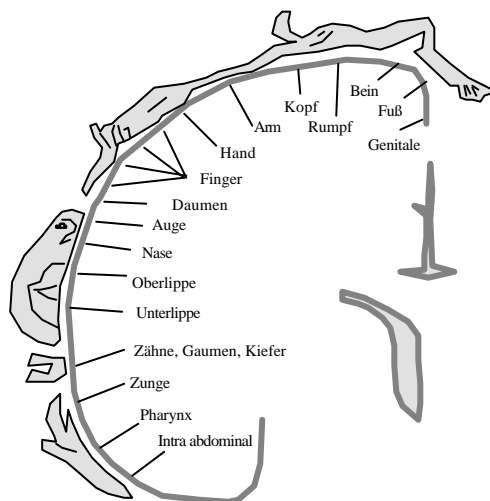


"Max von Sydow hatte nur das eine im Sinn: seiner blinden Frau die bunte Welt zu zeigen. In einem Höhlenlabor mitten in Australien gelang es ihm, eine Spezialeamera für sie zu entwickeln. Die damit aufgenommenen Videobilder ließen sich über Oberflächen-Elektroden am Kopf direkt zum visuellen Cortex im Gehirn schicken. Erstmals konnte sie sehen."

Wim Wenders: *Bis ans Ende der Welt*, 1991

Biologienahe Modellierungen

Der Interferenzansatz stellt verschiedene, derzeitige Modellvorstellungen in Frage. Obwohl viele Fakten im Sinne interferentieller Wirkung neu interpretierbar sind, wurden bisherige neurologischen Vermessungen ohne das Wissen um interferentielle Verschaltungen vorgenommen. Damit sind Meßergebnisse bisheriger Untersuchungen zumeist von begrenztem Aussagewert. Folglich ist es nicht anders möglich, als im folgenden Abschnitt Hypothesen in Form von Modellen vorzustellen, die angeben, wie neuronale Systeme neben bisherigen Interpretationen auch funktionieren *könnten*. Da grundlegende Mängel bisheriger Modelle allgemein bekannt und wohl auch akzeptiert sind, kann die Welt mit neuen Modellen eigentlich nur bereichert werden. Dennoch sei darauf hingewiesen, daß sich die Modelle noch nicht für Zwecke der Lehre eignen. Sie zeigen lediglich im Verhalten einige, wesentliche, adäquate Eigenschaften zur Biologie. Die Struktur zwischen Physik und Biologie kann dennoch different sein (so bei den Rückenmarkmodellen). Erst die kommenden Jahre werden es mit viel Akribie ermöglichen, den Wert folgender Modellvorstellungen zu bemessen.



Sensorische Körperprojektionen in den Gyrus postcentralis nach Penfield, 1950 (siehe unten)

Somatotopische Areale

Die Geometrie von Laufzeitleitungen kann somatotopische Karten erzeugen. Daraus leitet sich eine wesentliche Eigenschaft interferenziell wirkender Systeme ab, die im Widerspruch zu bisherigen Annahmen steht. Sofern im Detail Interferenz-Mechanismen wirken, können selbstorganisierenden

Merkmalskarten zB. der von Kohonen¹⁰¹⁾ beschriebenen Art nur als Interferenzkarten gebildet werden, das Terrain wird im *Maßstab der Interferenz*, der Laufzeit aufgeteilt.

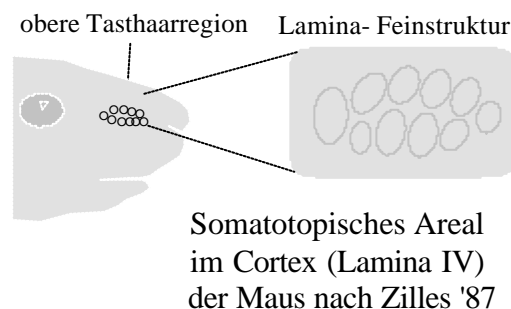
Das interferenziell wirkende System ist über geometrische Proportionen 'fest' verdrahtet. Merkmalskarten können nicht in Widerspruch zu Orten von Interferenz erlernt werden. Sieht man andererseits Merkmalskarten unter Zugrundelegung des Organisationsmaßes 'Laufzeit', dann stellt die Beschreibung von Interferenz- Wirkungen eine Spezies der selbstorganisierenden Merkmalskarten dar.

Eine Abbildung bleibt im wesentlichen graphentreu, wenn sie

- ◆ gedehnt, gezerrt,
- ◆ gespiegelt,
- ◆ gedreht,
- ◆ oder transformiert wird (zB. Inversion am Einheitskreis).

In allen Fällen bleibt die graphentreue Projektion weiterhin als solche erkennbar. Selbst Teilungen (partielle Abbildungen) stören die Erkennbarkeit eines einer Abbildung innewohnenden Graphen nicht.

Etwa seit vierzig Jahren ist das Phänomen der somatotopischen Projektionen bekannt¹⁰²⁾. Man versteht darunter einerseits die sensorische Projektion des Körperinneren auf den Gyrus postcentralis (hintere Zentralwindung des Großhirns), und andererseits die motorische Projektion vom Gyrus precentralis (vordere Zentralwindung) auf die verschiedenen Muskelgruppen des Körpers (Willkürmotorik). Neben diesem primären Projektionsfeld der Körpersensorik und -motorik existieren weitere Projektionsfelder. Es ist auffällig, daß sich sowohl im sensorischen, als auch im motorischen Projektionsfeld benachbarte Körperabschnitte aneinander anschließen. Offenbar liegt eine den komplizierten Projektionsbedingungen genügende, graphentreue Abbildung zwischen Körperinnerem und Cortex vor. Auch ist bekannt, daß das Sehzentrum der Großhirnrinde graphentreue Projektionen des gerade gesehenen widerspiegelt. Der Begriff 'Projektion' ist im Sprachgebrauch der Pysiologie allgegenwärtig. Eigentümlicherweise liegt zwischen den Windungen des G. precentralis und des G. postcentralis die Zentralfurche, die Stirn und Scheitellappen voneinander trennt. So verwundert es, daß G. precentralis und G. postcentralis eine so ähnliche Abbildung der Regionen des Körperinneren liefern, daß darauf verzichtet werden kann, beide nebeneinander darzustellen.



Unter der Annahme, zwischen Körperinnerem und Cortex befinden sich Übertragungskanäle, die eine interferenzielle Abbildung gestatten, können somatotopische Effekte mit einem Interferenzmodell nachgebildet werden. Da bekannt ist, daß bereits beim Fötus somatotopische Areale vorhanden sind, entsteht daraus eine Konsequenz für die Breite interferenzieller Wirkungen:

¹⁰¹⁾ Kohonen, T.: Self-organized Formation of Topologically Correct Feature Maps. Biol. Cybern., Vol.43 (1982), pp. 59-69.

¹⁰²⁾ Penfield, W., Rasmussen, T.: The Cerebral Cortex of Man. Macmillan, New York 1950.

Inherente, angeborene Somatotopieeigenschaften werden vorrangig von Interferenzen verursacht. Anhand des Vergleiches zwischen Fötus und Alttier kann der Grad ursprünglicher, interferenzieller Verschaltung (ererbtes Handeln) in ein Verhältnis zum erlernten Handeln gebracht werden, wobei auch - wie im folgenden gezeigt wird - wesentliche Lernvorgänge auf das Wirken neuronaler Interferenzen zurückführbar sind.

Beispiele aus der vergleichenden Anatomie zeigen, daß die funktionelle Spezifikation eines Tieres (zB. vorwiegender Gebrauch des visuellen Systems, der vorderen Extremitäten, der Nase, von Tasthaaren etc.) verschiedene morphologische Äquivalente im Gehirn hat. Somatotopische Projektionen sind bei verschiedenen Wirbeltieren bekannt, nur können sie bislang physikalisch nicht interpretiert werden.

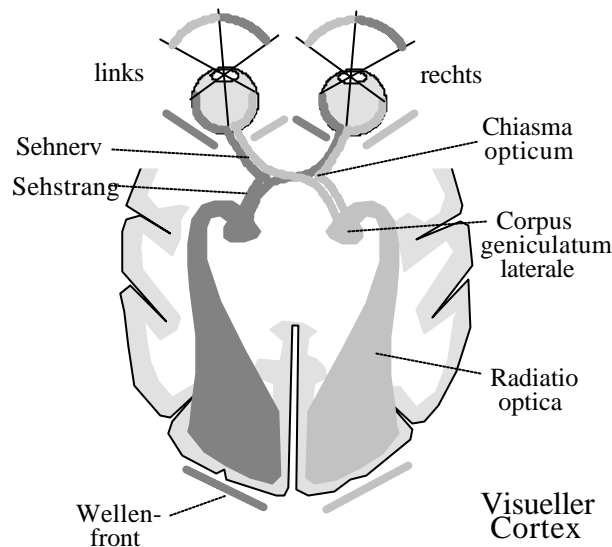
K. Zilles zeigt in^{103]} (nach Johnson 1980, ohne Quellenverweis) Darstellungen des somatosensorischen Cortex von Nasenbär und Wombat (Marsupialia). Erörtert werden daneben somatosensorische Beziehungen bei der Katze, beim Waschbär, beim Halbaffen Tarsius etc.. Tasthaare (Vibrissen) von Nagetieren werden zB. isomorph in die Lamina IV des Cortex als sog. Tönnchenfelder (Barrel fields) projiziert. In der Feinstruktur der Lamina IV ist der Graph der Vibrissen schemenhaft als Häufung von Nissl- gefärbten Zellen in den Randzonen wiederzuerkennen (im Bild schematisch dargestellt).

Modell des Gesichtsfeldes

Durchtrennungen der Sehnervenkreuzung (Chiasma opticum) oder des Balkens (Corpus callosum, Verbindung beider Hemisphären) zeigen eine Zuordnung zwischen Gesichtsfeldausschnitt und Lokalisation der Wahrnehmung im Gehirn. Somit spielt die Gültigkeit eines Wellenfrontmodells, daß sich aus dem Interferenzansatz herleiten läßt, eine zentrale Rolle. Der Ausfall von Teilbereichen des Gesichtsfeldes in Abhängigkeit von bestimmten Läsionen ist hinreichend bekannt^{104]}. Wenn interferentielle Wirkungen am Sehapparat auftreten, dann muß das Interferenzmodell zumindest ebenfalls gelten.

^{103]} Rauber/Kopsch: Anatomie des Menschen. Bd. III, Leonhardt, H. u.a.: Nervensystem, Sinnesorgane. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1987, S.456...459.

^{104]} Rauber/Kopsch: Anatomie des Menschen. Bd. III, Leonhardt, H. u.a.: Nervensystem, Sinnesorgane. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1987, S.558



Wird das Chiasma opticum durchtrennt, schrumpft das Gesichtsfeld auf einen zentralen Bereich, so, als ob man Scheuklappen trüge. Bei Durchtrennung eines Sehnervs wird das betroffene Auge blind. Bei durchtrenntem Sehstrang fallen beide rechte oder linke Gesichtsfeldhälften der anderen Seitenrichtung aus. Man prüfe die Übereinstimmung dieser Aussagen mit einem Interferenzmodell, bei dem ausschließlich dort eine Abbildung entsteht, wo Wellenfronten parallel auf den Lobus occipitalis (Hinterhauptlappen, visueller Cortex) stoßen.

Der 40 mm lange N. opticus setzt sich aus etwa 1 Mio. außerordentlich dünnen Fasern von 1-2 μm Durchmesser zusammen^{105]}, deren Leitgeschwindigkeit im Bereich von etwa 2..4 m/s liegt. Dem entspricht eine geometrische Impulslänge von 2...4 mm bei einer angenommenen Impulsdauer von 1 ms. Die Markscheidenbildung (die Isolation der Fasern) ist beim Mensch im dritten Monat nach der Geburt abgeschlossen.

In der Sehnervenkreuzung kreuzen nach derzeitiger Lehrmeinung jeweils nur die zu den äußeren Gesichtsfeldhälften gehörenden Nervenbahnen. Unter der Annahme, daß in einer chaotisch geordneten Struktur die durchschnittliche Länge der Fasern eines Nervenstrangs konstant bleibt, bleibt hingegen auch die Ausrichtung der Wellenfront etwa konstant, wenn Vorlage- und Bildfläche sphärisch parallele Flächen darstellen.

Somit wird die nach links blickende, den rechtsseitigen Augenhintergrund verlassende Wellenfront beider Augen eine Projektionsmöglichkeit nur im in die gleiche Richtung gewölbten Teil des rechten Hinterkopfes haben, und umgekehrt. Damit könnte nun einerseits geklärt werden, warum die durchsatzstärkste Datenübertragung über die längst mögliche Distanz in den Hinterkopf abgebildet wird. Andererseits wird die nicht restlos aufklärbare Verschaltung der Sehbahnen in der Sehnervenkreuzung transparent.

Das Chiasma opticum braucht mit der Kenntnis der Wirkung von Interferenzen keine Umschaltstelle für Millionen von Nervenfasern beider Augen zu sein. Es genügt, wenn die abgehenden Nervenfasern die Impulse von beiden Augen erhalten, und diese in alle Richtungen in den Cortex hinein versandt werden. Eine Abbildung kommt nur auf dem Schirmteil zustande^{106]}, dessen

^{105]} Rauber/Kopsch: Anatomie des Menschen. Bd. III, Leonhardt, H. u.a.: Nervensystem, Sinnesorgane. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1987, S.557

^{106]} Zur experimentellen Bestätigung des Interferenzmodells genügte der Nachweis einer stochastischen Verschaltung im Chiasma opticum, der im Gegensatz zur Lehrmeinung der teilgekreuzten Bahnen steht.

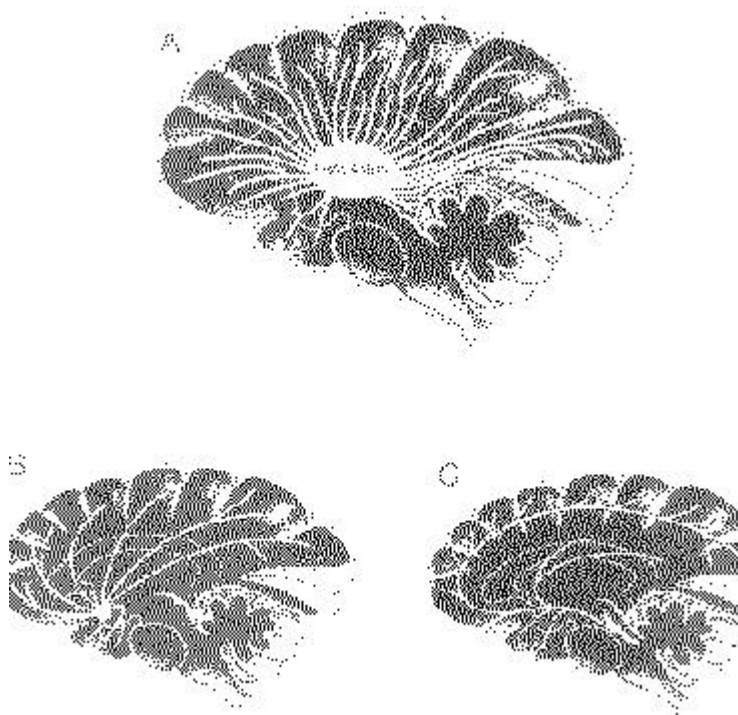
Ausrichtung in der (gekrümmten) Ausrichtung der jeweiligen Wellenfront liegt. Allerdings fehlt noch ein Hinweis darauf, wie die stark anisotrope Beeinflussung der Wellenfront im Augenkörper selbst 'linearisiert' wird.

Dieses Modell gilt unter der Maßgabe monochromer Bildübertragung. Die Übertragung von gleichzeitig mehreren Farben (rot, grün, blau) über dieselbe, neuronale Abbildung ist mit Pulsdichtemodulierung nicht ohne weiteres plausibel, es sei denn, es käme eine Art Lochmaskenverfahren durch Aufspaltung der Abbildung in Betracht. Gewisse Hinweise darauf stehen mit der bekannten, vertikalen Feinstrukturierung des Sehentrums zur Verfügung.

In ^{107]} sind verschiedene Hinweise auf die spezielle Art der Verschaltung im Cortex zu finden. Die informationellen Hauptströme verlaufen in Richtungen zueinander, deren Ausrichtung aus den vorn diskutierten Interferenzfeldern zu entsprechen scheint.

Neocorticales Interferenzsystem

Es ist bekannt^{108]}, daß nahezu alle Informationen, die den Neocortex erreichen, den Thalamus passieren. Von außen erregte Neuronen des Thalamus projizieren in den cerebralen Cortex. Der Thalamus wird als Schaltstelle zwischen Gehirn und restlichem Körper bezeichnet.



Eingabekanäle des Neocortex

A: Ein Großteil der Information gelangt durch den Thalamus und breitet sich radial aus.

B: Eine diffuse, cholinergene, radial verlaufende Eingabe stammt aus dem basalen Vorderhirn.

C: Diffuse, noradrenergische und serotonergene Informationsströme stammen aus dem Hirnstamm, und breiten sich entlang der Hülle aus.

Quelle: Crick (siehe Fußnote)

Kann angenommen werden, daß ein bestimmter Anteil von Wellen nicht nur einen der in den Bildern

Dieser würde das derzeitige Lehrmodell als unzutreffend ausweisen. Der Nachweis könnte mit Lichtblitzen geführt werden, deren Enzephalogramm in beiden Gesichtshälften nachweisbar sein müßte.

^{107]} Crick, F. und Asanuma, C.: Certain Aspects of the Anatomy and Physiology of the Cerebral Cortex. In: McClelland, J.L., Rumelhart, D.E., u.a.: Parallel Distributed Processing. Vol. 2: Psychological and Biological Models. MIT Press, Cambridge, MA, eighth printing, 1986-1988 (Vol. 1 siehe Rumelhart)

^{108]} Crick, F., Asanuma, C.: Certain Aspects of the Anatomy and Physiology of the Cerebral Cortex. Aus: Parallel Distributed Processing, Vol. 2, Chapter 20. MIT Press Cambridge, MA, 1988, p. 333-371

bezeichneten Wege geht, sondern daß gleichzeitig mehrere Wege aktiviert werden, z.B. A und B, so ist ein Interferenzsystem zu erkennen, das eine corticale Ortszuordnung je nach Art der Information vorbestimmt.

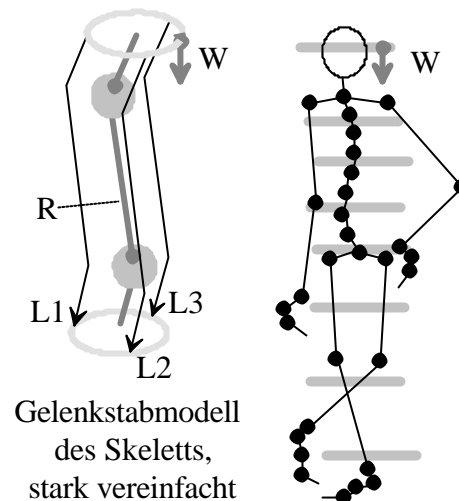
Modell des Stehens (Proprioception)

Stehen im Dunkeln ist aus technischer Sicht mit bisherigen Modellvorstellungen kaum möglich. Die verschiedensten Gelenke in der Reihe von Kopf bis Fuß sind in neuronalen Regelkreisen auszutarieren, ohne daß für die einzelnen Regelkreise der jeweilige Sollwert irgendwoher ableitbar wäre. Das Gleichgewichtsorgan liefert zwar seinen Sollwert für das Geradehalten des Kopfes, es besteht aber keine Kontrollmöglichkeit für die vertikale Ausrichtung der übrigen Körperteile zwischen Kopf und Fuß, da diese kein eigenes Gleichgewichtsorgan besitzen. Zudem ist bekannt, daß die Empfindlichkeit proprioceptiver (tiefensensibler) Sensoren eine Mindeständerungsgeschwindigkeit erfordert, um wahrnehmbar zu sein (Schultergelenk¹⁰⁹¹ 0,2...0,4° bei einer Mindestgeschwindigkeit von 0,3°/s; Fingergelenk 1...1,3° bei einer Mindestgeschwindigkeit von 12,5°/s).

Das Individuum müßte im Dunkeln notwendig langsam in sich zusammensinken, weil sämtliche Regelkreise ihre Führungsgröße zumindest allmählich verlieren, falls sie vorher doch eine besaßen. Der Soldat hingegen versteht auch im Dunkeln ein zackiges "Stillgestanden!" und wird augenblicklich um fünf Zentimeter größer. Woher nimmt jedes einzelne, zwischen Fuß und Kopf liegende Teil des Skeletts seine Führungsgröße, um sofort und ohne Überschwingverhalten in die vertikal ausgerichtete Stellung zu gelangen?

Es soll angenommen werden, daß sowohl von der Fußsohle, als auch vom Gleichgewichtszentrum im Kopf Wellenfronten W durch den Körper gesandt werden, die auf Befehl ausgewertet werden können. Dabei möge die nach unten abgehende Wellenfront permanent eine vom Gleichgewichtsorgan gelieferte, waagrechte Lage besitzen. Eine Wellenfront wird eindeutig durch mindestens drei Nervenbahnen $L1...L3$ übertragen, zB. als konzentrischer Ring. Dann besteht die Aufgabe jedes einzelnen Skelettsegments R nur darin, sich an der Wellenfrontrichtung zu orientieren, und in Abhängigkeit von anderen Steuergrößen eine definierte, ihm zukommende Lage einzunehmen. Das lokale Kriterium der Einnahme eine definierten Position zur Wellenfront bewirkt global die Aufrichtung des Skeletts.

¹⁰⁹¹ Schmidt, R.F., Thews, G.: Physiologie des Menschen. 24. Auflage, Springer-Verlag 1990, S.218



Bei dieser Interpretation handelt es sich um eine Hypothese, die künftig zu beweisen sein wird, die aber durch verschiedene Beobachtungen erhärtet werden kann.

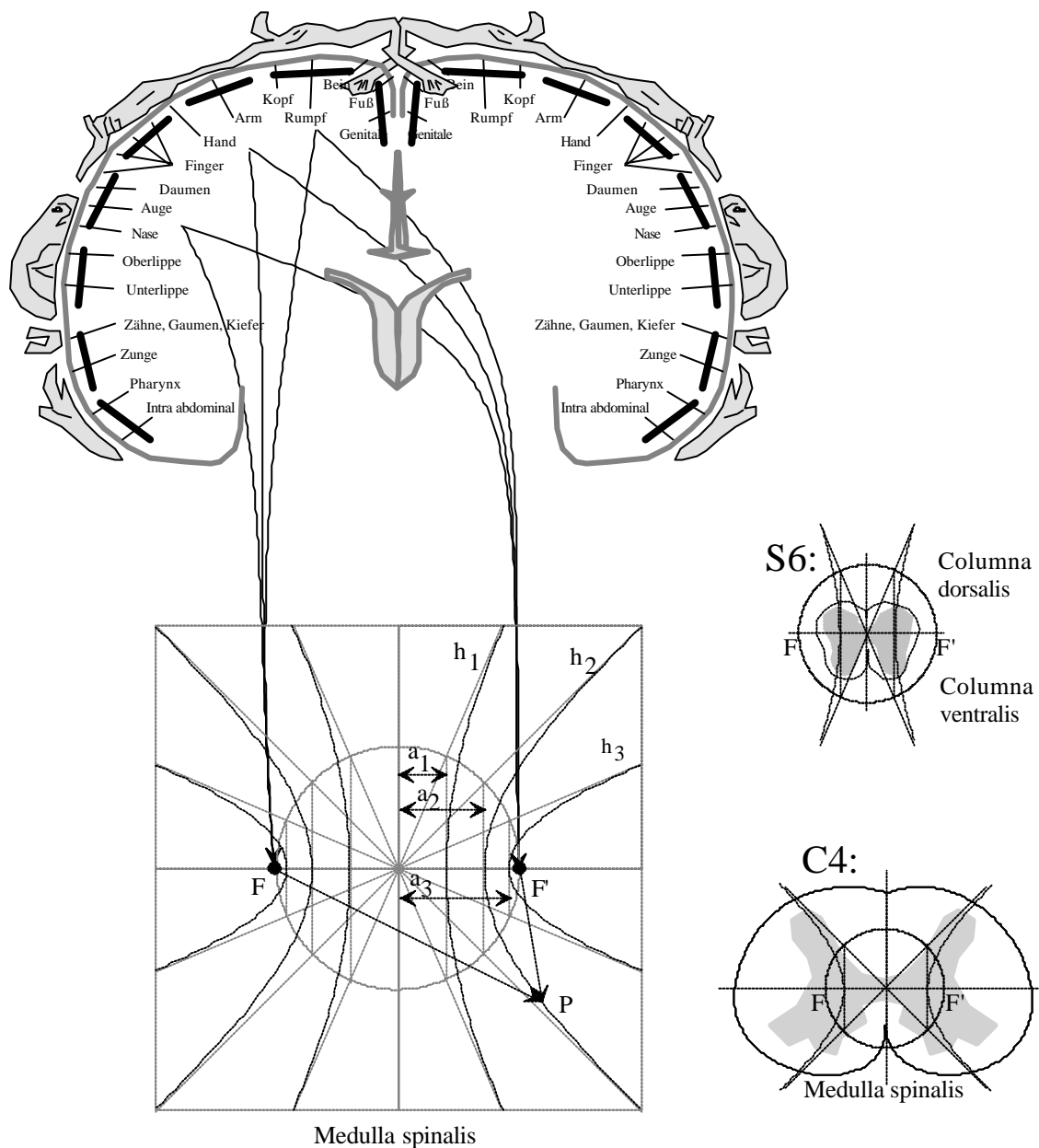
Bei plötzlicher Einwirkung auf das Gleichgewichtsorgan (zB. Kopfschlag beim Boxen) kann die Frontrichtung abrupt verloren gehen. Damit verliert zwangsläufig *jedes Element des Stützskeletts* die Führungsfront, bzw. versucht, der falschen Front nachzuregeln. Die Folge ist ein abruptes Hinschlagen. Zu langes Karussellfahren bewirkt wohl den Verlust der corticalen Führungsfront, die entstehende Taumeligkeit trotz visuell noch steuerbarer Lagekorrektur des Kopfes parallel zum Horizont führt zum selben Ergebnis. Die Beine versagen, weil offenbar die Führungsfront des Gleichgewichtsorgans fehlt. Im Bild ist zur Demonstration ein vereinfachtes Stabmodell des Skeletts dargestellt. Es ist nahezu in jedem Knoten um einen größeren Winkel frei beweglich. Man versuche, ein solches Modell technisch nachzubilden, um einen Eindruck von der technischen Relevanz der Instabilität zu erhalten, die mit aktiven Regelkreisen in jedem Abschnitt des Skeletts überkompensiert werden muß.

Interessant sind in diesem Zusammenhang Versuche mit decerebrierten Tieren¹¹⁰¹. Die Tiere zeigen einen tonischen Stellreflex (auch als Enthirnungsstarre bezeichnet). Sie bleiben verkrampft stehen, fallen jedoch (ohne führende Wellenfront von kranial) um wie Puppen, sobald sie geringfügig angestoßen werden.

Modell des Humunculus

Interpretiert man die Schmetterlingsfigur des Rückenmarks (Medulla spinalis) als Schar paariger, entarteter Hyperbeln, ist es mit dem Interferenzmodell möglich, die Ursache für die rechts/ links-Vertauschung zwischen vorderer bzw. hinterer Zentralwindung des Cortex (Gyrus precentralis, Gyrus postcentralis) und Körper zu modellieren. Es ist von Kopfverletzungen bekannt, daß die rechte Seite der Zentralwindung auf die linke Körperseite abbildet, und umgekehrt.

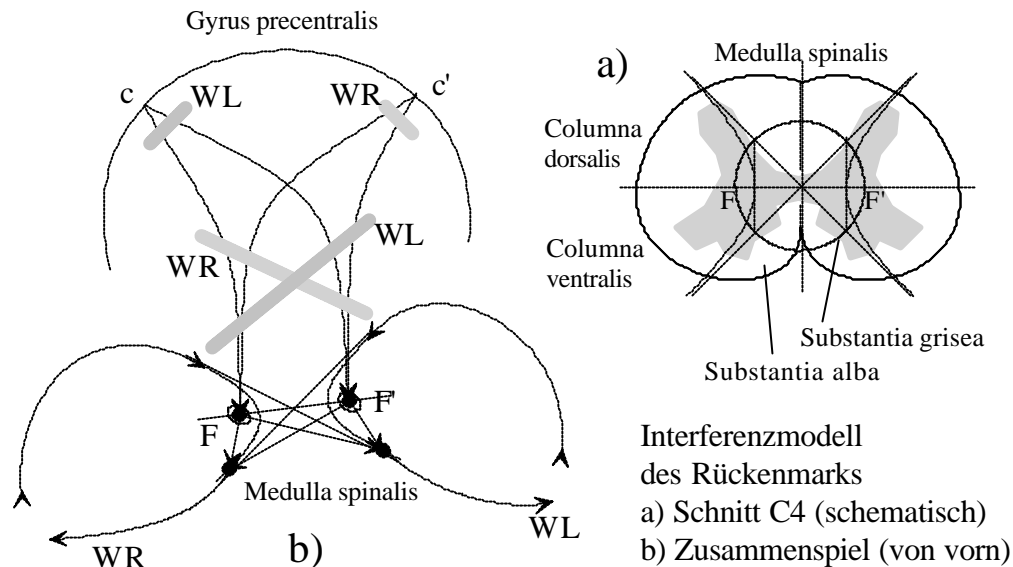
¹¹⁰¹ Schmidt, R.F., Thews, G.: Physiologie des Menschen. 24. Auflage, Springer-Verlag 1990, S.105



Die derzeitige Anschauung nach Penfield^{111]} geht davon aus, daß die Vertauschung der Seiten in der Pyramidenkreuzung (Decussatio pyramidum) erfolgt. Die Anatomie der Pyramidenkreuzung^{112]} selbst enthält wie auch in anderen Regionen Hinweise auf eine Vertauschung durch querverbindende Fasern. Vielmehr aber ist wahrscheinlich, daß beide Seiten des Gyrus precentralis ihre Information verteilt über verschiedene, beidseitig verlaufende Nervenstränge der weißen Substanz (Substantia alba) des Rückenmarks leiten.

^{111]} Penfield, W., Rasmussen, T.: The Cerebral Cortex of Man. Macmillan, New York 1950.

^{112]} Rauber/Kopsch: Anatomie des Menschen. Herausgegeben von Leonhardt, H., Töndury, G., Zilles, K., Band III: Nervensystem, Sinnesorgane. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1987, S. 299



Aus der Untersuchung einseitig geschädigter Patienten ist bekannt, daß sensorische Störungen vorrangig auf der geschädigten Seite zu finden sind (Brown-Séquard-Syndrom¹¹³¹). Das Interferenzmodell würde je nach Kanalzahl Totalausfall (bei Verwendung von nur zwei Kanälen) oder bei höherer Kanalzahl nur Teilausfälle modellieren.

Rechts-Links-Vertauschung

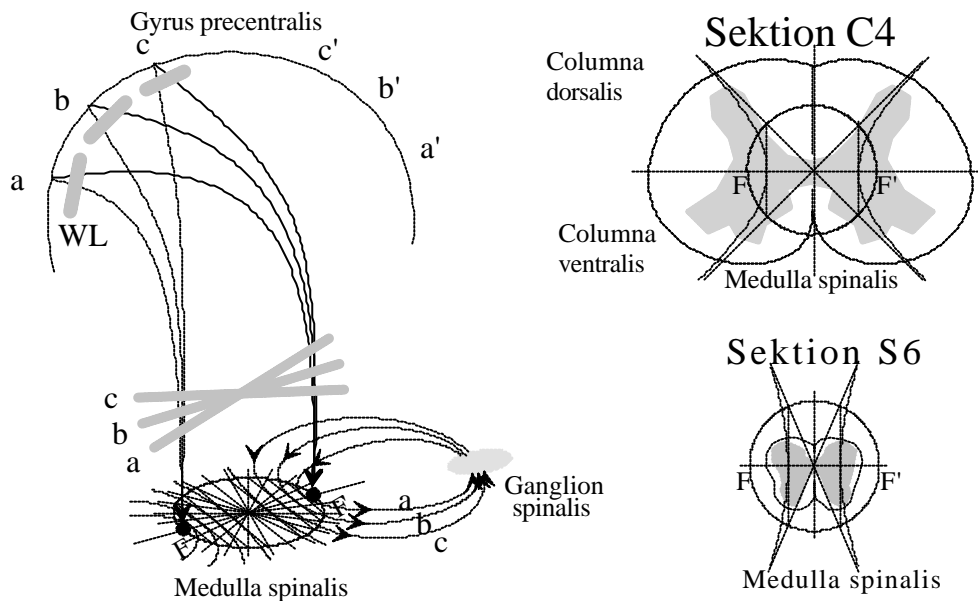
Mit einem Interferenzmodell läßt sich die *Gesetzmäßigkeit* einer Rechts- Links- Vertauschung der sensorischen Körperprojektion im Cortex modellieren. Angenommen, eine Wellenfront *WL* entsteht als Spalterregung *b* im rechten Teil des Gyrus precentralis. Der Frontverlauf ändert beim Durchlaufen der Krümmung in der Pyramidenbahn nur unwesentlich die Frontrichtung. Die Wellenfront kommt im wesentlichen in Richtung der Erregung an der Abgriffstelle der Medulla spinalis an. Sind in deren grauer Substanz Neuronen mit jeweils einem Eingang auf den rechten und den linken Teil von Nervenbahnen in der weißen Substanz geschaltet, interferiert nur der linksseitige Hyperbelast *F'*, und löst eine Weiterleitung aus. Umgekehrt für die rechte Seite: hier löst die Wellenfront *WR* von *b'* kommend eine Interferenz im *F*-seitigen Hyperbelast aus.

Hyperbolische Körperprojektion

Welche Möglichkeiten existieren, eine Selektion zwischen gleichseitig liegenden Organen vorzunehmen, deren Anschluß an die Wirbelsäule höher oder tiefer erfolgt (zB. Arm und Bein einer Seite)? Schnittbilder des Rückenmarks in verschiedenen Anatomieuntersuchungen weichen stark voneinander ab, sodaß zunächst nur ein Ansatz ohne Gewähr der Richtigkeit im anatomischen Detail gegeben werden kann. Ohnehin besitzt der hyperbolische Ansatz stark vereinfachenden Charakter. Die Laufzeitdifferenz zwischen zwei Brennpunkten einer Hyperbel ist $2a/v$, wobei a der halbe Abstand zwischen den Scheitelpunkten S, S' ist. Im Bild sind die halben Scheitelpunktabstände a, b, c dreier Hyperbeln mit identischem Brennpunkt Abstand F, F' eingezeichnet. Es wird deutlich, daß ein Zusammenhang zwischen der Richtung der Wellenfront von kranial und der Selektionswirkung der Hyperbeln besteht: Je schräger die ankommende Wellenfront, desto größer

¹¹³¹ Kunze; K.: Lehrbuch der Neurologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1992. S. 236 und S. 54

ist die Laufzeitdifferenz diametral laufender Impulse, desto weiter außen (c) wird die Welle selektiert. Umgekehrt wird eine Welle mit fast horizontaler Frontrichtung von weit innen liegenden Hyperbeln (a) selektiert. Rückenmark- Sektionen der Lagen C4 und S6 (schematisch nach Lippert) verdeutlichen den Sachverhalt. Zur kaudalen Seite hin (S6) wird der Abstand der grauen Substanz beider Seiten der Medulla spinalis geringer, potenziell selektieren dort Hyperbeln mit geringerer Laufzeitdifferenz. Folglich erfolgt nach dem Interferenzmodell zwangsläufig die Abbildung tiefer liegender (weiter innen liegender) Abschnitte der Medulla spinalis in gleichfalls weiter innen liegende Bereiche des Cortex. Natürlich ist die tatsächliche Gestaltung der Medulla spinalis wesentlich differenzierter, man vergleiche dazu zB. mit ¹¹⁴⁾.



Eine gleichwertige Interpretation gelingt, wenn angenommen wird, daß die Leitgeschwindigkeit der Axonen, die durch die Substantia grisea centralis (des Verbindungsbalkens beider Seiten) führen, nach kaudal ansteigt, zB. dadurch, daß sich der Faserdurchmesser geringfügig erhöht. Eben solche Wirkung hätte eine allmähliche Veränderung des Durchmessers der Axonen in den lateralen Columnen, wenn statt einer transversalen Interferenzenebene eine frontale Interferenzenebene angenommen wird. Die Validation dieser Modellvorstellungen ist kompliziert. Es steht kaum unter diesem Gesichtspunkt aufgearbeitetes, korrelierendes Material zur Verfügung. Das anatomische Erkenntnisproblem besteht darin, daß weder die mikroskopische Vielfalt, Verzweigung und stetige Vertauschung im Rückenmark in allen Verästelungen noch die Wertigkeit von Synapsen über mehrere Dezimeter verfolgt werden kann.

Deratomzuordnung

Das hyperbolische Modell gestattet bislang nur die Abbildung eines Bildpunktes in jede Sektion der Wirbelsäule. Unter der Annahme, daß nicht nur zwei Übertragungsleitungen (Axonen) an der Entstehung eines Zwischenbildes in der jeweiligen Sektion beteiligt sind, sondern mehrere, kann der entstehende Bildraum durch zusätzliche Scharen von Hyperbeln, die vorzugsweise verdreht zur dargestellten Hyperbelschar erscheinen, unterteilt werden. Das für eine Sektion gültige Bild entsteht

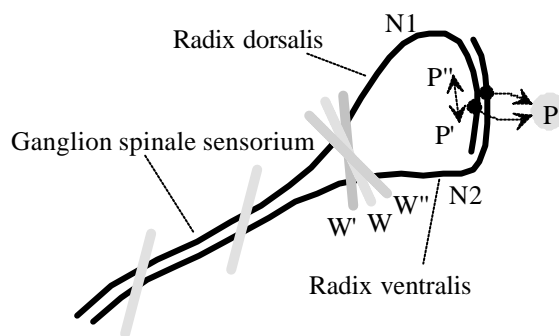
¹¹⁴⁾ Rauber/Kopsch: Anatomie des Menschen. Herausgegeben von Leonhardt, H., Töndury, G., Zilles, K., Band III: Nervensystem, Sinnesorgane. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1987, S. 244

jetzt in einem sich eng an die selektierte Hyperbel anschmiegenden doppelt nierenförmiges Gebiet x bzw. y , welches das betreffende Dermatome oder Myotome charakterisiert. Zwischen Dermatome bzw. Myotome mit ca. 300cm^2 Ausdehnung und Nierenbild mit ca. 1cm^2 besteht aber eine große Maßstabsverschiedenheit. Folglich ist es erforderlich, (siehe Abschnitt *Zooming*) die Leitgeschwindigkeit im maßstabskleineren Teil, der Sektion der Wirbelsäule, zu verringern. Wie im Abschnitt *Laufzeitleitungen* dargestellt ist, besitzen dünnere Nervenfasern eine geringere Leitgeschwindigkeit. Folglich ist es noch nötig, die dünneren, weil langsameren Fasern der Columna dorsalis bzw. Columna ventralis mit den stärkeren, schnelleren Fasern des Dermatome bzw. Myotome zu koppeln.

Es ist anzunehmen, daß diese Umsetzung zwischen Nervenfasern verschiedener Leitgeschwindigkeit neben anderen Aufgaben durch die Ganglia spinale gelöst wird.

Radiale Projektion

Vergleichbar zur gerade behandelten, axialen Projektion ist die Wahrscheinlichkeit der Erregung eines Neurons in radialer Richtung um die Wirbelsäule höher, wenn sich das betreffende Neuron im Fokus verschiedener Wellenfronten befindet^{115]}.



Radial- Interferenzmodell der Radix ventralis/ R.dorsalis

Ein auf den Nervenbahnen N1 und N2 ankommender Impuls aktiviert im Bereich des Gebietes P mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Nervenzelle. Das Modell kann die Zuordnung der Aktivierung definierter Areale im Rückenmark erklären.

Entgegen dem derzeitigen Erkenntnisstand^{116]}, nach dem angenommen wird, die vordere Wurzel (Radix ventralis) diene ausschließlich motorischer Erregungsübertragung (auch als Radix motoria bezeichnet), ist es für das Verständnis eines Interferenzmodells wesentlich, daß beide Wurzeln (Radix dorsales = R. sensoria und Radix ventralis) in beiden Richtungen Informationen übertragen können.

Zur Funktion: Aus kybernetischer Sicht und unter Maßgabe der Unmöglichkeit von Klingelanlagen-Modellen, ist die Frage, welches Neuron im Rückenmark durch welchen Sensorort angesprochen wird, von äußerster Wichtigkeit. Käme eine Erregung tatsächlich nur einseitig an (dorsal oder ventral), wäre jede an der Bahn des Axons liegende Synapse energetisch zum Informationsempfang gleichberechtigt. Erst der entgegenkommende Impuls aus gleicher Quelle vermittelt den Ort höchster Energiedichte P . In Abhängigkeit von der Richtung W, W', W'' der Wellenfront zur Normalenrichtung verschiebt sich dieses Gebiet P mehr zur einen oder mehr zur anderen Seite P', P'' der im Rückenmark gegeneinander ankommenden Nerven- Leitbahnen.

Eine analoge Betrachtung ist für die motorische Übertragung in der entgegengesetzten Ausbreitungsrichtung durchführbar. Die Frontrichtung der Wellenfront W, W', W'' richtet sich in

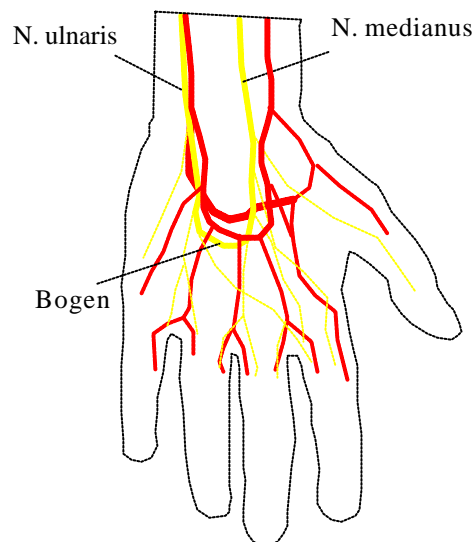
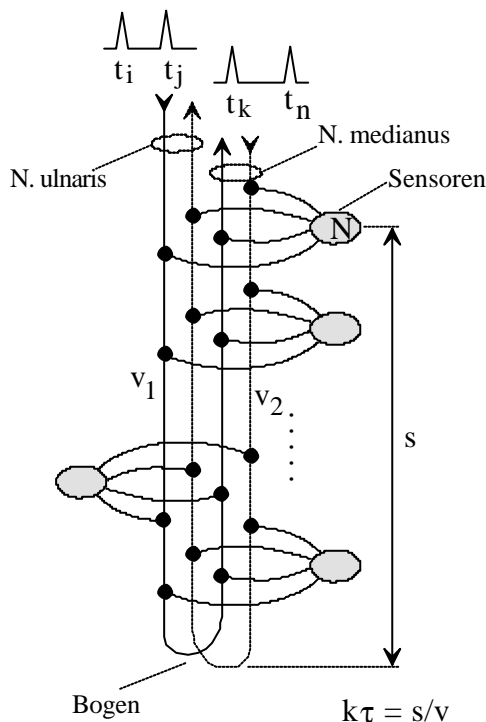
^{115]} Das Modell steht im offensichtlichen Bruch zum von Müller 1831 (siehe Index) nachgewiesenen Bellschen Lehrsatz der sensorisch/motorischen Funktionsaufteilung des vorderen und des hinteren Strangs.

^{116]} Dieser geht auf den (umstrittenen) Nachweis der Funktionstrennung von vorderer bzw. der hinterer Wurzel durch Johann Müller (siehe Index) zurück.

Umkehr der sensorischen Verhältnisse nach der Lage des Erregungsortes P , P' , P'' .

Höhenzuordnungen der Hand und des Rückenmarks

Bisherige Darstellungen¹¹⁷⁾ gehen von *getrennten*, aufsteigenden (Schleifenbahnen oder Lemnisci) und absteigenden Bahnen (Tractus pyramidalis etc.) im Rückenmark aus. Nach gängiger Lehrmeinung erreichen Fasern gezielt ihre Bestimmungshöhe, an der sie das Mark verlassen. Ein Klingeldrahtmodell, dessen Gültigkeit schwer widerlegbar ist. Nehmen wir stattdessen an, auf- und absteigende Bahnen mögen gelegentlich miteinander verknüpft sein. Es entsteht ein Modell, das vorzüglich geeignet ist, im Sinne interferentieller Wirkungen eine Höhenzuordnung vorzunehmen, ohne daß ein einziges Axon an einer bestimmten Stelle das Rückenmark verlassen muß. Es genügt, daß zu- und abgehende Neuronen an auf- und absteigende Fasern gleichzeitig angeschlossen sind, und daß eine Spiegelstelle existiert, an der ein im Rückenmark laufendes Signal in die Gegenrichtung reflektiert wird. (Allerdings bereitet uns diese Spiegelstelle in stochastischer, interferentieller Sicht bereits gewisse Bedenken, die bei einer Verfeinerung des Modells wohl nur mittels einer *Abbildung* auf das kaudale Ende der Wirbelsäule zu umgehen sind).



Erhöhung der sensorischen Auflösung in der Hand. N. ulnaris und N. medianus sind durch den sog. Bogen miteinander verbunden.

Gehen wir zur Erklärung der Wirkungsweise des Modells davon aus, daß jegliche Höhenadressierung im Rückenmark durch Überlagerung mit auch entgegengesetzt gerichteten Signalen zustande kommt. Unter Maßgabe, eine Verzögerung durch eine (wie auch geartete) kaudal gelegene Spiegelung betrage $2k\tau$, empfängt Neuron $N1$ alle gespiegelten Impulse um diesen Zeitraum versetzt zum Originalimpuls. Wird folglich nach einem ersten Impuls um $2k\tau$ verspätet ein

¹¹⁷⁾ Rauber/Kopsch: Anatomie des Menschen. Herausgegeben von Leonhardt, H., Töndury, G., Zilles, K., Band III: Nervensystem, Sinnesorgane. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1987, S. 299/301/303/304.

Folgeimpuls ausgesandt, erreicht der erste Impuls zeitgleich mit dem zweiten Impuls das Neuron $N1$. Folglich entspricht bei dieser Anordnung eine bestimmte Folgefrequenz f einer bestimmten Höhenzuordnung neuronaler Erregung.

$$f = \frac{1}{2(t_a - t_b)} = \frac{1}{2k\tau} = \frac{v}{2}$$

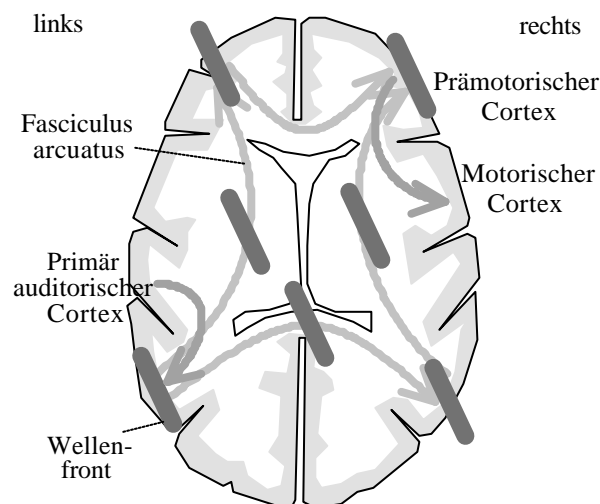
Je höher die Frequenz, desto tiefer (näher an der Spiegelstelle) liegt der adressierte Ort. Es wird deutlich, daß weiter oben liegende Bereiche durch Fehlinterferenz mit Frequenzvielfachen unterer Bereiche erregbar sind. Um das zu vermeiden, sind mindestens zwei Leitbahnen mit teilerfremd verschiedenen Laufgeschwindigkeiten $iv_1 \neq jv_2$ ($i, j \in \mathbf{N}$) vorauszusetzen.

In Analogie läßt sich die Betrachtung auf entgegengesetzt, kranial gerichtete Impulsfolgen übertragen. Die Schaltung macht aus einem Einzelimpuls einen Code, dessen Höhenangabe im Impulsabstand verschlüsselt wird.

Zwischen Nervus medianus und Nervus ulnaris der Hand ist eine derartige Umkehrstelle bekannt. Es wäre denkbar, daß diese den Schlüssel für das hohe Detailauflösungsvermögen der Hand darstellt. Im Rückenmark sind explizit keine Umkehrstellen bekannt. Es wäre aber denkbar, daß ein größerer Teil von Informationen durch Neuronen der weißen Substanz des Rückenmarks gespiegelt werden. Die Klasse der sog. Rückenmarkreflexe verdeutlichen diese Möglichkeit aus entgegengesetzter Wirkungsrichtung.

Modellbeispiel Befehlsausführung

Es gelingt offenbar, innerhalb eines beliebig geformten Körpers Abbildungen von Ort zu Ort weiterzuspiegeln, ohne die Wellenfront notwendig unbrauchbar zu machen. Damit ist es möglich, in beliebig geformten Körpern Spiegelungen zu finden, die zwei in beliebigem Winkel zueinander stehende Flächen so verbinden, daß auf beiden Seiten ein gewünschter Wellenfrontverlauf genutzt werden kann. Schmidt^{118]} erläutert das Sprachmodell von Wernicke- Geschwind.



Ausführung einer gehörten Anordnung
mit der linken Hand (frei nach Schmidt, S.161)

^{118]} Schmidt, R. F., Thews, G.: Physiologie des Menschen. 24. Aufl., Springer- Verlag Berlin, 1990

Im Bild (schematisch nach Schmidt) ist die Zusammenarbeit verschiedener Hemisphären des Cortex bei der akustischen Aufforderung, die linke Hand zu heben, dargestellt. Der Frontverlauf einer vom primär auditorischen Cortex zum motorischen Cortex wandernden, parallelen Information ist zusätzlich zur Richtung der Ausbreitung eingezeichnet. Es zeigt sich, dass ein Ausbreitungsmodell der Wellenfront Hinweise auf zu erwartende, beteiligte Cortexregionen geben kann. Mithin wäre ein Zusammenhang zwischen der Lage des primär auditorischen Cortex (links bzw. rechts) und der Schreibfähigkeit (rechts oder links) anzunehmen. Bekannterweise laufen wesentliche

Laminae	↑ außen ↓ innen	Golgi- Versilberung	Nissl- Färbung	Markscheiden Färbung	Horizontale Axonlagen
I. Molekularschicht					Exner-Streifen
II. Äußere Körnerschicht					Kaes-Bechterew-Streifen
III. Äußere Pyramiden- zellschicht					
IV. Innere Körnerschicht					Äußerer Baillarger-Streifen
V. Innere Pyramiden- zellschicht					Innerer Baillarger-Streifen
VI. Polymorphe Zellschicht					Kaes-Streifen

Darstellung der Struktur des Isocortex des Menschen im Vergleich. Je nach Art der Einfärbung werden verschiedene Details sichtbar. Während die Golgi-Versilberung Zelleib und Zellausläufer anzeigt, hebt eine Nissl-Färbung das Schichtenmodell des Palliums hervor. Mit der Markscheidenfärbung werden die Myelinscheiden betont. Auffällig sind die starken, horizontalen Bündel.
Bildquelle siehe Text.

Verarbeitungsschritte in dem graugezeichneten Areal, der Großhirnrinde ab. Diese wird von einer Wellenfront im Beispiel offenbar besonders wirkungsvoll angesprochen, wenn die Wellenfront plan in das betreffende Gebiet einläuft. Mit dem Wada-Test¹¹⁹¹ gelingt es, Links- und Rechtshänder auf den Zusammenhang zwischen Schreibfähigkeit und Lokalisation des Hörzentrums zu untersuchen. Es zeigt sich, daß bei 96% der Rechtshänder und bei 70% der Linkshänder die Sprache links lokalisiert ist, und daß bei 4% der Rechtshänder sowie 15% der Linkshänder die Sprache rechts repräsentiert ist¹²⁰¹. Offenbar spielen bei der Zuordnung der Hemisphäre andere Faktoren eine gewichtigere Rolle.

Mit dem Mittel der Computersimulation ist es möglich, gezielt nach interferenziell 'verschalteten' Regionen zu suchen. Mithin läßt sich aus groben Anhaltspunkten ein räumliches Modell des Großhirns generieren, dessen Qualität im Vergleich zum Original Auskunft über den tatsächlichen Umfang interferenzieller Wirkungen im Großhirn geben kann. Dieser Gedanke impliziert zweierlei:

- ♦ Die Verschaltung des Neocortex ist nicht nur in der neuronalen Feinverknüpfung, sondern ebenfalls in dessen Verwindungen und deren geometrischer Zuordnung zu Projektions- und Kommissurenbahnen fixiert,

¹¹⁹¹ Birbaumer, N., Schmidt, R.F.: Biologische Psychologie. Springer-Verlag Berlin, 1989

¹²⁰¹ Kolb, B., Whishaw, I.Q.: Fundamentals of Human Neuropsychology. 2nd Ed., Freeman, New York, 1985.

- ◆ die relative Lage der Oberfläche eines Pallium- Areal bestimmt deren Zusammenwirken mit anderen Regionen, der Grobschaltplan ist durch die geometrischen Längenverhältnisse der Fasern bestimmt.

Dabei wäre es falsch, davon auszugehen, daß nur das senkrechte Auftreffen einer Wellenfront eine Signalverarbeitung in einem Areal auslöst. Im Gegenteil: Analyseschritte, bei denen die Zeit als Komponente auftritt (Hören, Bewegen etc.) benötigen eine sequenziell relevante Ergänzung. Diese Operationen werden vorzugsweise beim Parallellauf der Information zur verarbeitenden Oberfläche zu erwarten sein.

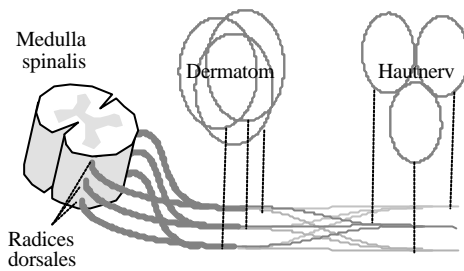
Modell der Hinterwurzeln

Innervationsgebiete (Dermatome) der Hinterwurzeln (Radices dorsales) des Rückenmarks (Medulla spinalis) unterscheiden sich deutlich von den Einzugsgebieten peripherer Nerven. Während sich die Dermatome überlappen, sind die Einzugsgebiete der peripheren Nerven klar voneinander getrennt (vgl. Zimmermann¹²¹¹). Ein Wurzelausfall äußert sich lediglich in der verringerten Qualität der Sensibilität im Innervationsgebiet, während sich der Ausfall eines peripheren Nerven als Empfindungsausfall des Gebietes darstellt. Bislang wurde die Verschmelzung verschiedener Areale zum Dermatome als Redundanzmodell zur Sicherung gegen sensorische Ausfälle ganzer Gebiete interpretiert. Das Gegenteil muß heute angenommen werden. Würde das Klingeldrahtmodell (vgl. *Direktabbildung*) gelten, wäre der Begriff des Dermatoms mit einem schroffen Totalausfall des betreffenden Gebietes bzw. mit einer Körnung der Sensibilität im Gebiet verbunden. Der weicher werdende Übergang in Richtung Hautnerv zu Wurzel indes deutet auf eine tendenziell wachsende, medial gerichtete Zunahme interferenzieller Verschaltung.

Da nicht nur ein Hautnerv in eine Wurzel einmündet, sondern flächendeckend eine Vielzahl von Hautnerven mehrere Wurzeln versorgen, sind geometrische Anordnungsschemata vergleichbar zu denen neuronaler Linsen im Modell zugrunde zu legen. Im Gegensatz zur Theorie findet die Umordnung der Nervenstränge nicht in Form des Anschlusses an einen Quell- und Senkenpunkt statt, sondern sie erfolgt allmählich im Gesamtbereich der Umhüllung des Nervenstrangs.

Die Natur hat zweifellos den Vorzug, daß die Abbildung nicht von vornherein scharf zu sein braucht, vielmehr wird sie durch das Wandern von Neuronen in die Ideallage am Zielort 'geschärft'. Wenn angenommen wird, daß eine Hinterwurzel (32 Wirbel a zwei Wurzeln) durchschnittlich $2\text{m}^2/60 = 0,0333\text{m}^2 = 333\text{cm}^2$ Hautfläche versorgt, mit einer zu übertragenden Innervationsdichte von einem Sensor pro mm^2 gerechnet wird, und für jedes Dermatome eine dreikanalige Übertragungsstrecke (drei Wurzeln) zur Verfügung stehen möge, mißt die Durchschnittsfläche eines Dermatoms rund $0,1\text{m}^2$ (333cm^2 mal drei). Auf dieser Fläche liegen dann durchschnittlich rund 100000 Hautnerven. Entsprechend wären an die Quellpunkte von drei Übertragungsleitungen im groben, physikalischen Modell jeweils an je 100000 Sensoren anzuschließen, von denen zwei Drittel zu benachbarten Wurzeln Interferenzen hat.

¹²¹¹ Schmidt, R.F., Thews, G.: Physiologie des Menschen. Springer-Verlag, Berlin, 1990, S.222

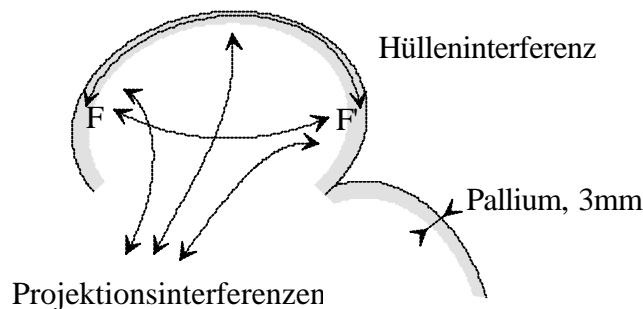


Innervationsgebiet
eines Hautnervs
und Dermatom
zum Vergleich.

Die Hinterwurzeln müssen
als Interferenz- Übertragungs-
leitungen aufgefaßt werden.

Modell der Hirnrinde (Pallium)

Die Hirnrinde (der Hirnmantel) ist durchschnittlich 3mm dick. Sie gliedert sich in sechs verschiedene Schichten von Nervenzellen (Laminae I...VI). Pro Kubikzentimeter findet man 15...50 Mio. Nervenzellen. Deren Gesamtzahl wird im menschlichen Cortex auf 10 bis 18 Milliarden geschätzt. Markscheidenfärbungen zur Hervorhebung der Axonhüllen zeigen mehrere (im Isocortex vier), horizontal parallele Axonlagen, sowie dazu senkrecht stehende Streifen starker, axonaler Verdichtung.



Es wäre zu untersuchen, ob über die parallel zur Hülle führenden Axone (Exner-, äußerer und innerer Baillarger- Streifen) in topografisch kleinen Arealen (enge Wülste) eine Hüllen- Interferenz stattfinden kann (Bild), sodaß eine Dualität von Hohlkörper- und Hülleninterferenzen möglich wird. Verschiedentlich wird in Quellen angedeutet, daß die verschiedenen Neuronentypen (Stern-, Korb-, Pyramidenzelle etc.) des Pallium verschiedene Laufzeiteigenschaften besitzen. Leider ist keine Quelle bekannt, die diesen Sachverhalt erschöpfend untersucht. Bei der Darstellung der Code-Dimension eines Interferenzfeldes wurde darauf hingewiesen, daß eine mehrlagige Anordnung mit Lagen verschiedener Laufzeit den speicher- oder darstellbaren Codebereich wesentlich erhöht. Es wäre zu prüfen, inwiefern das Pallium derart strukturiert ist (Bildquelle ^{122]}).

Weiter vorn hatten wir festgestellt, daß myelinisierte Nervenfasern zu einer wesentlichen Erhöhung der Leitgeschwindigkeit führen. Man beachte deshalb die im Bild zu erkennende, starke Einfärbung horizontal verlaufender Myelinscheiden. Offenbar zeigt uns dieses Bild über bekanntes hinaus an, daß im Isocortex des Menschen verschiedene Leitgeschwindigkeitsklassen vorliegen: eine langsame Kategorie, die in den Laminae II. und III. vorherrscht (kaum vorliegende Markscheidenfärbung), und verschiedene, schnelle Kategorien in horizontaler und vertikaler Richtung. Im Sinne der

^{122]} Rauber/Kopsch: Anatomie des Menschen. Herausgegeben von Leonhardt, H., Töndury, G., Zilles, K., Band III: Nervensystem, Sinnesorgane. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1987, S. 423

Relativität neuronaler Impulsausbreitung sollten die weniger stark gefärbten Laminae vorrangig der Codereferenz, also der Speicherung fremdinterferenzierender Muster (sensorische Amplituden, Bewegungskorrelation, Gefühl) dienen, während die stark gefärbten Bereiche vorrangig der logischen Kopplung neuronaler Strukturen im Sinne von statischer Funktion nach McCulloch/Pitts sowie dem interferenziellen Transport von Information über größere Distanzen dienen könnten, da die hier zu erwartende, geometrische Impulslänge bei angenommen gleichen Impulsdauern exakt um den Faktor der Leitgeschwindigkeit höher ist. Folglich ist die Impulsabbildung myelinisierter Fasern um genau diesen Faktor gröber oder unschärfer.

Während z.B. bei einer Impulsdauer von $dt = 0,5$ ~~ms~~ eine Leitgeschwindigkeit der nichtmyelinisierten Faser von $v = 2 \text{ m/s}$ zu einer geometrischen Impulslänge von

$$\lambda = v dt = 1 \text{ mm}$$

führt, bewirkt eine Leitgeschwindigkeit einer myelinisierten Faser von vielleicht 20 m/s eine entsprechend erhöhte, unschärfere, geometrische Ortsauflösung von 10 mm .

Dies zeigt zum einen, wie wesentlich klassische AI-Modelle zur Örtlichkeit neuronaler Vorgänge sind, zum anderen aber wird deutlich, daß ohne Kenntnis interferenzieller Wirkungen keine Struktur entschlüsselt werden kann, die sich weiter als einen Millimeter im Pallium ausdehnt(!), falls nicht noch langsamere Fasern gefunden werden.

Man beachte die mögliche Konsequenz dieser Aussage auf die Richtigkeit bzw. Stichhaltigkeit aller bislang im klassischen Sinne - ohne Kenntnis interferentieller Wirkungen - gemachten Untersuchungen an neuronalen Strukturen.

Es sei angemerkt, daß die hier angenommenen Leitgeschwindigkeiten und geometrischen Impulslängen nur fiktiver Natur sind. Derzeit sind keine qualitativ erschöpfenden Untersuchungen zu Leitgeschwindigkeiten in Verbindung mit Impulsbreiten im Pallium bekannt, die detaillierte Rückschlüsse auf die geometrische Impulsbreite zuließen. So würde es nicht überraschen, wenn im Experiment extrem dünne, dendritische Verästelungen zu finden wären, deren geometrische Impulsbreite in der Gegend von $\lambda = 10 \text{ }\mu\text{m}$ läge, dh. deren Leitgeschwindigkeit in der Größenordnung von $v = 5 \text{ mm/s}$ liegt.

Ein solcher Nachweis besäße enormen Wert zur Bestimmung des Grades interferenzieller Wirkungen im Verhältnis zur statischen Funktion neuronaler Strukturen. Er würde als **Schlüsselexperiment** darüber entscheiden, ob die Speicherung von Information in interferentieller Form, d.h. im wesentlichen *ohne die Notwendigkeit von synaptischer Wichtungsanpassung* oder von Strukturanpassung zustande kommt, oder ob Lernen doch in wesentlichem Maße mit gewichteter Synapsenstärke nach dem McCulloch/Pitts-Modell erfolgt. Eingangs wurde der Zweifel ausgesprochen, daß durch diese Erkenntnisse ausnahmslos alle, die klassisch-(künstliche) Intelligenzforschung ausmachenden Fundamente berührt werden. An dieser Stelle wird dieser Zweifel besonders unangenehm transparent.

Das entwickelte Beispiel zeigt, daß allein die *geometrische Wellenlänge*, die durch die langsamste zu messende Leitgeschwindigkeit im Pallium bestimmt wird, darüber entscheidet, ob elementare Grundprämissen (synaptische Gewichtsanzpassung) von vierzig Jahren AI-Forschung aufrecht erhalten werden können, oder nicht. Sie wird darüber entscheiden, ob später die ersten vierzig Jahre AI-Forschung als Jahre der Forschung an künstlich lernenden Systemen aufgefaßt werden müssen. Der Fakt, daß bislang zu wenige, biologierelevante Strukturen tatsächlich entschlüsselt werden konnten, forciert diesen Zweifel und führte zur oben geäußerten Vermutung der Entdeckbarkeit extrem langsamer Leitgeschwindigkeiten mit höchster Ortsauflösung, für die die dynamischen Modelle nach dem Abschnitt *Code referenziert Raum* Vorrang bei der Interpretation neuronaler Netze erhalten würden.

Modell der Muskelansteuerung

Wellenlänge im Verhältnis zur Muskellänge

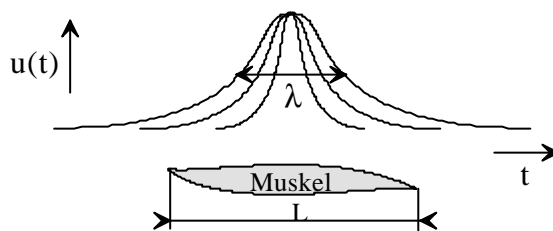
Muskeln erstrecken sich über eine bestimmte Länge l . Der einzelne Erregungsimpuls läuft am Faserbündel entlang, und erregt nacheinander verschiedene Regionen des Muskels. Zuerst werden die rumpfseitigen Regionen erregt, folgend die mittigen, dann erst erregt ein Einzelimpuls die äußeren Regionen des Muskels. Folglich läuft zwar eine Kontraktionswelle durch den Muskel, insgesamt kommt aber keine Kontraktion zustande, weil stets nur ein Teil des Muskels angespannt ist, während alle anderen Zonen entspannt sind.

Eine Lösung des Problems besteht darin, daß ein Impuls mit einer an die Muskellänge L angepaßten geometrischen Impulslänge λ benutzt wird,

$$\lambda = L.$$

Über die Anpassung der Leitgeschwindigkeit v ist es möglich, eine optimal erregende Impulslänge λ zu erreichen, wenn τ die Impulsdauer darstellt.

$$v = \lambda / \tau = L / \tau.$$



Muskellänge L im Verhältnis zur geometrischen Impulslänge λ

Zur Relevanz dieses Sachverhalts vergleiche man die im Kapitel *Laufzeitleitungen* zitierten Laufzeitmessungen (Tabelle).

Modell der Muskeltonus-Steuerung

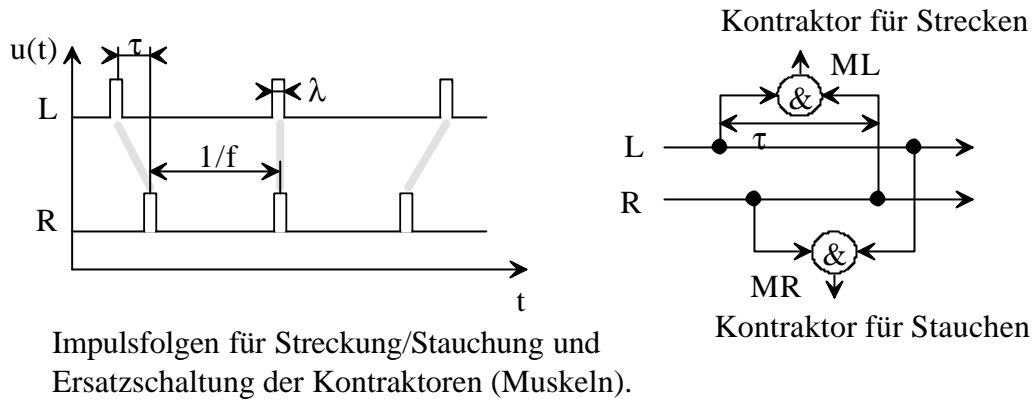
Interferentielle Prinzipien gestatten die Codierung komplexer Steuerungsaufgaben mit einfachen Mitteln. Zur kontinuierlichen Steuerung eines Muskeltonus sind im Modell lediglich zwei Leitbahnen vonnöten, auf denen Impulse in verschiedener zeitlicher Relation zueinander zu übertragen sind.

Wird zunächst ein Impuls auf einer mit L bezeichneten Leitbahn um die Zeitverschiebung τ nacheilend übertragen, so wird der mit ML bezeichneten Kontraktor von beiden Seiten gleichzeitig erregt, wenn vorausgesetzt wird, daß der in Signalrichtung hintere Anschluß von ML um $\tau = s/v$ versetzt angeordnet ist. Die geometrische Umweglänge des hinteren Anschlusses möge mit s bezeichnet sein.

Analoges gilt für den entgegengesetzten Fall. Kommt der Impuls auf Leitbahn R um τ verzögert zur Leitbahn L , wird der rechte Kontraktor angesteuert.

$$u_L(t) = u(t) * u(t + \tau)$$

$$u_R(t) = u(t) * u(t - \tau)$$



Eine Zeitfunktion $u(t)$ wirkt im Falle multiplikativer Verknüpfung jeweils mit sich selbst um τ verschoben als Steuerspannung $u_L(t)$, $u_R(t)$ des Modell-Muskels. Für den Fall summativer Verknüpfung wäre die Hinzunahme weitere Zeitfunktionen erforderlich, um ein tragfähiges Schwellwertkriterium konstruieren zu können.

Im Falle gleichzeitigen Eintreffens beider Impulse obliegt es dem Verhältnis zwischen der Wellenlänge λ und der geometrischen Länge der Umwegleitung $s = v\tau$ des Modell-Muskels, wie stark beide Kontraktoren in Neutrallage ansprechen, bzw. ob sie überhaupt ansprechen. Das Problem der Neutrallage ist vergleichbar zur Ruhestromeinstellung in *AB*-Endstufen von Leistungsverstärkern oder allgemein zur Einstellung des Totbereiches von Regelsystemen.

Es sei betont, daß das hier vorgestellte Muskel-Modell aus informatischer Sicht als Denkmodell zur Verdeutlichung interferenzieller Wirkungen konstruiert ist. Die biologischen Gegebenheiten weichen fallabhängig beträchtlich davon ab.

Modell der Krampfauslösung

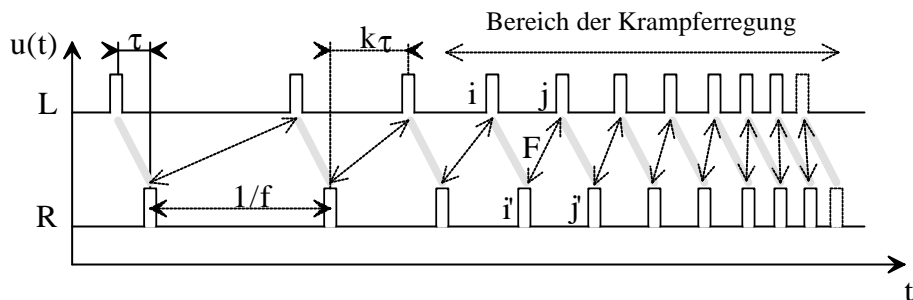
Ohne das biologische Detail zunächst zu kennen, lassen sich für unseren Modell-Muskel wesentliche Eigenschaften ableiten, die zum Verständnis von Krampferregungen beitragen können.

Je nach Stärke der Feuerfrequenz auf beiden Leitbahnen ist die Erregung der Kontraktoren verschieden stark. Gefährlich wird erst das Überschreiten einer maximalen Feuerfrequenz f . Ein immer dichter werdendes Feuer kann zur Fehlauflösung der anderen Seite führen. Es ist anzunehmen, daß dieses Phänomen für Muskelkrämpfe verantwortlich sein kann. Zur Verdeutlichung betrachte man das Bild. Der grau gezeichnete Impulsabstand bleibt bei allen Impulspaaren konstant, und möge die Sollerregung der zB. streckenden Muskelgruppe bezeichnen. Von Impulspaar zu Impulspaar wird nun der Abstand der erregenden Impulse vermindert., die Feuerfrequenz f wird erhöht.

Dabei wird darauf geachtet, daß in der zeitlichen Korrelation der Impulspaare keine Veränderung auftritt. Die jeweils den entgegengewirkenden Muskel steuernde Impulsfolge wird durch den gestrichelt gezeichneten Doppelpfeil dargestellt. Es ist zu erkennen, daß bei langsamer Folgefrequenz keine Fehlererregung F auftritt. Ab einer bestimmten Impulsfrequenz f aber passiert eine unbeabsichtigte Fehlererregung des entgegengesetzt wirkenden Muskels, wenn ein gewisser Sicherheitsfaktor k unterschritten wird, und $\tau = s/v$ der Umwegverzögerung des lateral liegenden Muskelanschlusses entspricht. Die maximale Feuerfrequenz f , mit der ein Muskel noch ohne Verkrampfung betrieben werden kann, folgt demnach zu

$$f \leq \frac{1}{k\tau} = \frac{1}{k(s/v)} = \frac{v}{ks}$$

wobei v die Leitgeschwindigkeit der Umwegleitung mit der Länge s darstellt. Je dichter die Impulsfolge wird, je stärker wird auch der entgegengesetzte Muskel erregt. Bei genauerer Betrachtung ist zu erkennen, daß nicht eine Eigeninterferenz diese Verkrampfung verursacht, sondern daß eine Fremdinterferenz zwischen benachbarten Impulsen eintritt.



Krampfauslösung durch zu dicht werdende Impulsfolgen und Fremdinterferenz

Der Impuls j interferenziert nicht nur mit dem Impuls j' , sondern zusätzlich dazu mit dem Impuls i' . Folglich werden beide, gegenläufig wirkenden Muskelgruppen unter Höchstlast plötzlich erregt. Die fremdinterferentielle Erregung kündigt sich - uns allen bekannt - durch eine stärker werdende Verspannung der Muskeln an, die in eine offenbar reflektiv verursachte Verkrampfung mündet, wenn zusätzliche, das Chaos weiter verstärkende Impulse zur Behebung des Krampfes eingekoppelt werden. Offenbar wirkt hierbei ein Schutzreflex mit, der auf eine Überbelastung eines Muskels mit einer Kontraktion genau dieses Muskels reagiert.

Leitgeschwindigkeit von Riesenaxonen

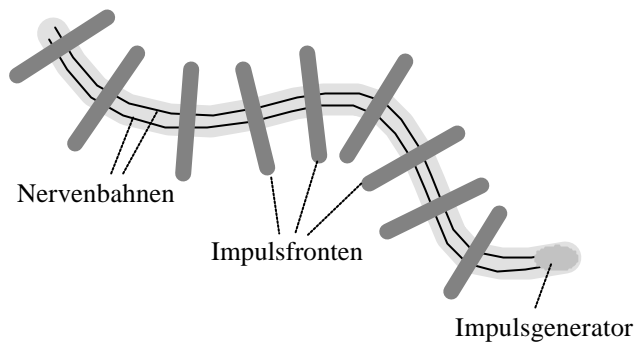
Von den vorn dargestellten Experimenten mit Eiweiß ist bekannt, daß ein axonal dünner Eiweißfaden einen Impuls mit der aus der Telegraphengleichung ermittelbaren Geschwindigkeit einer elektrischen RC - Laufzeitleitung transportiert. Diese ist im Prinzip vergleichbar zu den hohen, in mikroelektronischen Schaltkreisen erreichbaren Geschwindigkeiten. Sie ist um Zehnerpotenzen höher, als die Leitgeschwindigkeit von Riesenaxonen, die zB. in Riesensaurier- Fossilien eine Dicke von nahezu einem Millimeter erreichen. Warum sollte sich die Natur nicht einer einfachen Eiweißleitung mit Myellinscheide zur Isolation bedienen, wenn es tatsächlich nur darum ginge, schnellste Weiterleitung von Informationen zu erreichen? Wozu bedarf es des komplizierten Na/Ca - Ionenaustausches der Neuronen, um Impulse wesentlich langsamer als möglich zu transportieren? Offenbar, weil dieses langsam leitende Medium gestattet, die Laufgeschwindigkeiten durch Dickenvariation der Leitbahnen in restlos allen, zur Steuerung des biologischen Wesens benötigten Geschwindigkeitsklassen zu variieren. Man denke an die Informationübermittlung beim Saurier oder Riesenwal: Es kommt darauf an, einen Muskel von einigen Metern Länge homogen zu erregen, um eine geschlossene Kontraktion zu erreichen.

Wie die vorhergehende Betrachtung zur Krampferregung zeigte, kann bei differentieller Ansteuerung eines Muskelpaars die Feuerfrequenz nicht beliebig erhöht werden. Folglich ist es zwingend notwendig, daß die Wellenlänge der Erregung auf die Muskellänge abgestimmt ist.

Bleibt anzumerken, daß entwicklungsgeschichtlich nach gängiger Lehrmeinung dünne, schnelleitende Fasern erst in jüngeren Evolutionsphasen entstanden sind. Mithin ist die Nutzung neuronaler Interferenzen zwischen Nervenimpulsen so alt, wie die Tierwelt selbst.

Modell des Schlängelns

Der Wurm schlängelt wahrscheinlich proportional schnell zur Ausbreitungsgeschwindigkeit der nervalen Impulsausbreitung im Bereich von wenigen Millimetern pro Sekunde.

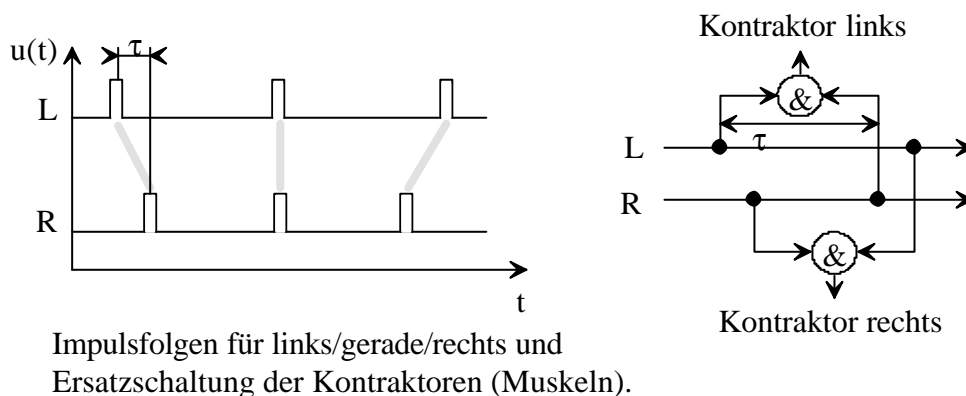


Modell eines Wurms.

Zwei Leitbahnen transportieren sehr langsam die dargestellten Impulsfronten in Richtung zum Schwanz. Der Impulsgenerator hat nur die Aufgabe, eine 'wellende' Wellenfront zu generieren.

Dazu werden dünne, extrem langsame, wahrscheinlich marklose Fasern benötigt. Die Ausbreitung einer vom Kopf kommenden Wellenfront kann scheinbar beim Gleiten beobachtet werden. Je nach Frontrichtung (rechts oder links orientiert) krümmt sich der gerade passierte Körperteil entsprechend, wenn vorausgesetzt wird, daß die Einzelsegmente der Konstruktion ihre Krümmungsrichtung der Wellenfront nachregeln.

Sind die Kontraktoren (Muskeln) der Einzelsegmente so an die Nervenbahnen angeschlossen, daß sie jeweils auf eine bestimmte Zeitdifferenz zwischen beiden Bahnen reagieren, und erfolgt dieser Anschluß in gegensinniger Weise, wird ein linkes Muskelsegment reagieren, wenn die Wellenfrontrichtung nach links zeigt. Entsprechend wird das rechte Segment ansprechen, wenn die Wellenfrontrichtung nach rechts zeigt. 'Kriechen' nun die Wellenfronten hintereinander durch den Wurm, beginnt dieser sich im selben Rhythmus mitzuschlängeln.



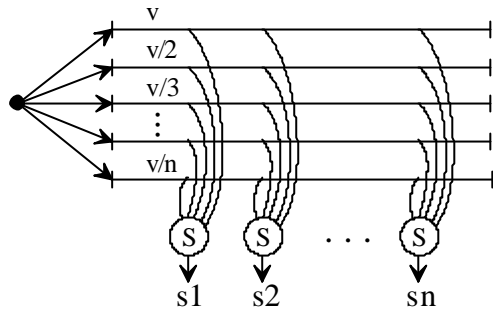
Impulsfolgen für links/gerade/rechts und Ersatzschaltung der Kontraktoren (Muskeln).

Um eine rechts- oder linksgerichtete Wellenfront in den Wurm einzuspeisen, genügt es kopfseitig fast schon, daß 'nahrungsspürende' Sensoren im selben Schema wie die Muskeln angeordnet sind. Entsprechende, aktive Regelkreise sind in der Vergangenheit seit verschiedentlich beschrieben worden^{123]}, und sind relativ einfach konstruierbar.

^{123]} Miyanaga, Y. u.a.: Neuron Architecture based on Jamming Avoidance Response of an Electric Fish. 1993 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Vol. 4, p. 2600-2603.

Modell des Hörens. Modell der Bewegung

Weiter vorn sind Schaltungen für phasen- und frequenzsensitive Systeme angegeben. Gingen wir davon aus, daß den verschiedenen Laminae des Pallium verschiedene Laufgeschwindigkeiten zustünden, könnte der bereits besprochene Sequenzspeicher in die Laminae eines Modell- Palliums umgesetzt werden. Stellen wir uns dazu vor, daß wir ein Modell- Pallium konstruieren können, dessen verschiedene Schichten aus verschiedenen Neuronentypen bestehen, deren Dendriten und Axonen in typischer Weise voneinander abweichende Laufgeschwindigkeiten realisieren, zB. in Art einer der im Bild dargestellten Geschwindigkeitsreihe v , $v/2$, $v/3$... v/n .



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.

Dabei ist recht nebensächlich, welches Laminae wie schnell leitet, oder ob die Geschwindigkeitsverteilung tatsächlich den Laminae zuordenbar ist. Wichtig ist, daß jedes, vom Ohr kommende frequenzmodulierte Signal in viele, verschieden schnelle Fasern eingekoppelt wird, die allesamt im dendritischen Einflußbereich bestimmter Neuronen S vorbeiziehen, sodaß Merkmalsdetektionen korrelierender Impulse im Frequenzraum möglich werden. Selbstredend ist auch die gegensinnig betriebene Anordnung des Interferenzfeldes in der Lage, Code zu detektieren. Auch die als Rückenmark- Modell angegebene Schaltung ist prinzipiell als Ersatzschaltung geeignet. Entsprechende Beobachtungen wurden an Nervenleitbahnen gemacht. So ist vom Nervus saphenus eine Messung bekannt^{124]} bei der das Summenaktivitätspotential extracellulär abgeleitet wurde. Es konnten verschieden schnelle Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den verschiedenen Fasern des Nervs festgestellt werden. Ein eingespeister Impuls kommt mit unterschiedlicher Verzögerung an der Ableitelektrode an.

Setzt man die Korrelation von Impulsen bei Bewegungen als Fremdinterferenzen verschiedener Impulse miteinander an, so wird ein anderer Sinn der gesplitteten Nervenleitbahnen erkennbar. Offensichtlich überläßt die Natur nicht dem Pallium allein die Bildung von Fremdinterferenzen, sondern gibt Hilfestellung, indem sie bereits verschieden verzögerte Signale bereitstellt, die dann nur noch verknüpft werden müssen. Diese Vorgehensweise hat Vorzüge und Nachteile. Neben dem genannten Vorzug entsteht das Problem der streng örtlichen Lokalisation bei der Detektion oder Einspeisung von Verhaltensmustern. So korreliert z.B. der Ausgang s_2 mit einer Impulsfolge, die typische Abstandsproportionen aufweist. Andererseits ist s_2 räumlich exakt lokalisiert. Der Freiraum zur örtlichen Verschiebung von s_2 ist gering, soll nicht ein vorgegebener Typ einer Lernaufgabe unlösbar werden. Bei Kleinkindern, wie bei Tieren ist oft eine gewisse Unflexibilität im Ausbrechen aus bestimmten Verhaltensmustern festzustellen. Es wäre zu untersuchen, inwiefern diese auf dieserart tangential erlernten Reaktionen beruht. Ferner wäre anzunehmen, daß bei Wesen mit höherem Intelligenzniveau diese Laufzeitleitungen mit verteilten Parametern zunehmend in ein separates, hirnahes Organ umverteilt sind, um maximale Flexibilität und Ortsungebundenheit

^{124]} Numa, S., Noda, M., Takahashi, H., u.a.: Molecular Structure of the Nicotinic Acetylcholine Receptor. Cold Spring Harbor Symposia Quant. Biol. XLVIII, 57-69 (1983) (nach Schmidt/Dudel).

lernender Neurone zu erreichen. Möglicherweise könnte dieser Gedanke zu neuen Ansätzen für die Funktionsbestimmung in der vergleichenden Anatomie des Palliums führen.

Veränderte Untersuchungsmethodiken

Mit den bis hierher gewonnenen Erkenntnissen eröffnet sich eine neue Sichtweise auf biologische Informatik. Neurologische Untersuchungsmethodiken sind größtenteils anders oder neu zu definieren. Nicht die Untersuchung des Einzelaxons kann im Vordergrund des Erkenntnisgewinns stehen, sondern die *relative* Ausbreitung von Impulsen, das relative Vorkommen eines Impulses auf verschiedenen Leitbahnen hin zu einem Ziel. Die Verschaltung verschiedener, neuronaler Verschaltungen ist in interferentiellm Zusammenhang unter genauer Kenntnis geometrischer Möglichkeiten bzw. Unmöglichkeiten der Wellenfortpflanzung zu beleuchten.

Neue *Fragen* sind zu stellen.

Dabei wird es wenig Sinn machen, *Korrelationen* zu untersuchen, die in einer konkreten Geometrie eines Laufzeitraums nicht vorkommen können. Aber es wird wichtig sein, stets und ständig die Laufgeschwindigkeiten der verfolgten Fasern oder Stränge im Auge zu behalten, um die Lokalisation eines Zielgebietes einer Interferenz von vornherein genau einschränken zu können.

Andererseits wird es Sinn machen, stets zwischen Eigen- und Fremdinterferenz zu unterscheiden, da die eine die *Adresse* der Information, die andere die *Eigenschaften* der Information bezeichnet.

Es sind *Synchronisationsmechanismen* zu untersuchen, die die Speicherung von Impulsen aus verschiedener Quelle in reproduzierbaren Interferenzräumen analog zur Holografie erst möglich macht. (Möglicherweise kommt der 'Backpfeife' eine solche, die Initialisierung des Lernens stimulierende Synchronisationswirkung zu.)

Lokale Lernmodelle werden gestaltbar: Das Neuron kann erstmalig aus dem Horizont seiner eigenen Welt entscheiden, ob Synapsen zu verstärken oder zu schwächen sind. Scheinbar chaotische Zeitfunktionen auf Nervenleitbahnen werden im Sinne der Rückfaltung als Faltungsräume interpretierbar.

Nicht zuletzt ist *Laufzeitlernen* als Dickenmodulation von Leitbahnen zu überprüfen, und die gesamte AI- Landschaft ist auf ihre Brauchbarkeit unter interferenzieller Wichtung zu evaluieren. Insbesondere sind quantitative Untersuchungen nötig, die eine Erregbarkeit eines durchschnittlichen, 7640 Synapsen besitzenden Neurons qualifizieren.

Die *Codesicherungsqualitäten* biologischer Interferenzräume sind zu umgehen. Wir werden lernen müssen, neuartige Fragen zu stellen, um mit interferentiell gesicherten, biologischen Systemen umgehen zu können. Auch sind viele, neue Fragen zu beantworten, um zu signifikanten Nachweisen der dargestellten, theoretischen Herleitungen der Relativität neuronaler Impulsausbreitung zu gelangen.

Beginnen wir also von vorn.