

Brain mapping

Der renommierte Neurowissenschaftler Karl J. Friston hat die Methode des „Statistical Parametric Mapping“ (SPM) entwickelt, die sich auf die Konstruktion und Bewertung räumlich ausgedehnter statistischer Prozesse bezieht, die zur Prüfung von Hypothesen über funktionelle Bildgebungsdaten verwendet werden. Während die Charakterisierung eines regionalspezifischen Effekts auf Inferenz, Schätzung und Interpretation beruht, beinhalten Inferenzen im Neuroimaging Unterschiede, die greifbar werden, wenn die Gehirne mehrerer Probanden verglichen werden. Statistisches parametrisches Mapping (SPM) wird im Allgemeinen verwendet, um funktionell spezialisierte Gehirnreaktionen zu identifizieren, und ist der am weitesten verbreitete Ansatz zur Charakterisierung der funktionellen Anatomie und krankheitsbedingter Veränderungen. SPM ist ein voxelbasierter Ansatz und nutzt die klassische Inferenz, um lokal spezifizierte Reaktionen auf experimentelle Faktoren zu analysieren. Um eine beobachtete Reaktion einer bestimmten Hirnstruktur oder einem kortikalen Bereich zuzuordnen, müssen die gewonnenen Daten mit einer bekannten anatomischen Struktur übereinstimmen. Während die funktionelle Lokalisierung impliziert, dass eine bestimmte Funktion irgendwo im Kortex (und nur dort) lokalisiert werden kann, impliziert die Spezialisierung, dass ein bestimmtes kortikales Gebiet auf bestimmte Funktionen spezialisiert ist, sei es im Zusammenhang mit Wahrnehmungsprozessen oder der motorischen Kontrolle. Beide Aspekte – funktionelle Lokalisierung und Spezialisierung – müssen im „großen Ganzen“, dem Gehirn selbst, miteinander verbunden sein. An dieser Stelle kommt die weiße Substanz ins Spiel, die sich von der grauen Substanz deutlich unterscheidet. LeDoux bringt die heutige Auffassung von der überragenden Bedeutung der synaptischen Funktion auf den Punkt:

„Das meiste, was das Gehirn tut, wird durch synaptische Übertragungen zwischen Neuronen und durch den Abruf von Informationen erreicht, die durch frühere Übertragungen über Synapsen beendet wurden. Angesichts der Bedeutung der synaptischen Übertragung für die Funktion des Gehirns sollte es praktisch eine Binsenweisheit sein zu sagen, dass das Selbst synaptisch ist. Was sollte es sonst sein?“ (Friston, 1994, S. 24)

Die Synaptologen kamen jedoch schon vor Jahren zu dem Schluss, dass die Synapse allein nicht für eine so weitreichende Interpretation verantwortlich sein kann. Sie stellen fest:

„Es wird auch immer deutlicher, dass Synapsen nur einen Teil des gesamten Spektrums an Interaktionen ausmachen, die zwischen Neuronen und Glia bestehen und die zu ihren funktionellen Eigenschaften bei der Vermittlung von Verhalten beitragen. Neuroglia tragen zur Verarbeitung von Informationen durch Neuronen durch eine Vielzahl von Mechanismen bei, die traditionell als nicht-neuronal und nicht-synaptisch angesehen werden“. (Friston, 1994, S. 25)

Friston zufolge „... scheint das Gehirn zwei Prinzipien der funktionellen Organisation zu folgen: funktionelle Segregation und funktionelle Integration.“ (Friston, 1994, ebd.)

Dies liest sich wie eine Analogie zwischen lokalisierte und verteilter Hirnfunktion, also eine Synthese zwischen dem traditionellen und dem avant-gardistischen Ansatz. Friston fährt fort und erklärt, dass „die Integration innerhalb und zwischen funktionell spezialisierten Bereichen durch funktionelle oder effektive Konnektivität vermittelt wird.“ (ebd.) Diese Konnektivität lässt sich als die verteilten Ströme aktiverter Neuronen erklären, die überall im Kortex feuern und die vielen verschiedenen Funktionsbereiche verbinden, die in eben diesem Kortex identifiziert wurden.

Gedanken, Wahrnehmungen, motorische Signale und deren Verarbeitung finden offenbar nicht in streng getrennten, exklusiven Teilen des Gehirns statt, sondern sind das Ergebnis einer verteilten Zusammenarbeit, selbst von sehr weit entfernten Teilen des Gehirns. Mit anderen Worten: Das menschliche Gehirn besteht nicht aus 52 abgegrenzten „Brodmann“-Arealen, sondern ist vielmehr eine globalisierte innere Welt, deren einzige wirkliche Grenze der knöcherne Schädel ist, in dem sie eingekapselt ist. Diese letzte Grenze wird jedoch durch die Entwicklung invasiver und nicht-invasiver Gehirn-Maschine-Schnittstellen immer durchlässiger.

Thermodynamik in der Neurologie

Das Chaos verteilter elektrischer Ströme, an denen eine Vielzahl von Neuronen beteiligt sind und die nahtlos die Grenzen lokalisierter Funktionen überschreiten, und das räumlich-zeitliche Kontinuum, das sich aus diesen strömenden neuronalen Symphonien ergibt, könnten auch mit dem Konzept der Thermodynamik beschrieben werden. Denn die Thermodynamik befasst sich mit Systemen, die von einer inhärenten Entropie beherrscht werden, die es den Analytikern ermöglicht, ein Spektrum abzuschätzen, in dem bestimmte Teilchen auftreten, ohne die genaue Position oder den genauen Zeitpunkt zu kennen. Die Thermodynamik befasst sich also mit einer Art räumlich-zeitlicher Unsicherheit. Biologische Systeme sind thermodynamisch offen in dem Sinne, dass sie Energie und Entropie mit der Umwelt austauschen. Außerdem arbeiten sie fernab vom Gleichgewicht und sind dissipativ, d. h. sie zeigen selbstorganisierendes Verhalten. (vgl. Friston et al., S. 3, 2006) Andererseits korreliert die Thermodynamik in biologischen Systemen mit der Informationstheorie. Einige bekannte Autoren behaupten sogar, dass die Gesetze der Thermodynamik nichts anderes als Prinzipien der Informationstheorie sind. (Collell, Guillem/Fauquet, Jordi) In der Tat gibt es tiefe theoretische Verbindungen zwischen Thermodynamik und Informationstheorie. (ebd.)

Bereits 1944 unterschied Erwin Schrödinger zwischen Entropie und negativer Entropie (Negentropie) und ebnete den Weg für die Informationstheorie, um den Abstand von einem normalen Zustand des Systems zu messen. Vergleicht man alle Verteilungen mit einem gegebenen Mittelwert und einer gegebenen Varianz, so hat die Gauß-Verteilung (nach dem legendären Mathematiker Carl Friedrich Gauß) den höchsten Grad der Entropie. Die negative Entropie misst den Unterschied in der Entropie zwischen einer gegebenen Verteilung und der Gaußschen Verteilung mit demselben Mittelwert und derselben Varianz. Die negative Entropie ist mit der Netzwerkentropie verwandt, wie sie in der unabhängigen Komponentenanalyse verwendet wird. (siehe Signalverarbeitung, 36, S. 287-314, 1994) Landauer postulierte das „Landauer-Prinzip“ (oder „Landauer-Limit“) bereits 1961 und behauptete, dass

„.... jede logistisch irreversible Manipulation von Information, wie das Löschen eines Bits oder das Zusammenführen zweier Rechenwege, von einer entsprechenden Entropiezunahme in nicht-

informationstragenden Freiheitsgraden des informations-verarbeitenden Apparats oder seiner Umgebung begleitet sein muss.“ (Bennett, 2003, S. 501-510)

Mit anderen Worten, wenn ein Beobachter Informationen über ein physikalisches System verliert, verliert er auch die Fähigkeit, Arbeit aus dem gegebenen System zu gewinnen. Eine bahnbrechende Schlussfolgerung aus dem Landauer-Prinzip ist, dass eine logisch umkehrbare Berechnung (ohne Lösung von Informationen) ohne jegliche Wärmeerzeugung durchgeführt werden kann.

Seltsamerweise ist eine Verbindung zwischen Informationstheorie und Thermodynamik in den Neurowissenschaften noch nicht formalisiert worden. (Del Castillo/Vera-Cruz, 2011; Collell/Fauquet, 2014). Die Versuche, die Informationstheorie und die Thermodynamik zu vereinheitlichen, sind eigentlich Versuche, die Verbindung zwischen Kognition (geistige Aktivität) und physischer Hirnaktivität (die z. B. über Gehirn-Computer-Schnittstellen gemessen werden kann) zu erklären und auszuarbeiten. Insbesondere könnte der dritte Hauptsatz der Thermodynamik auf neuronale Prozesse angewendet werden. Der dritte Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass die Entropie eines Systems einen konstanten Wert annimmt, wenn sich die Temperatur dem absoluten Nullpunkt nähert. Übertragen auf das Gehirn bedeutet dies, dass die Entropie (= systemisches Chaos) bei schwer komatösen oder hirntoten Personen, bei denen alle messbaren Hirnaktivitäten zum Erliegen gekommen sind, in einen stabilen Zustand konstanten Gleichgewichts übergeht.

Das relativistische Gehirn

Die Vorstellung vom Gehirn als fester Architektur mit streng lokalisierten Funktionsbereichen – bis hin zu einzelnen Neuronen mit spezifischen Aufgaben und Fähigkeiten – ist zwar noch nicht vollständig widerlegt, wackelt aber aufgrund der fehlenden Kohärenz innerhalb der eigenen Perspektive sowie der vielen plausiblen Argumente, die der distributive Ansatz liefert, in seinen Grundfesten. In seiner Hypothese vom „relativistischen Gehirn“ argumentiert Nicolelis, dass das Gehirn von Natur aus relativistisch sein muss, da sowohl der Energieverbrauch als auch die Geschwindigkeit des neuronalen Feuerns an Obergrenzen gebunden sind:

„Wenn das Gehirn einer Person mit neuen Möglichkeiten konfrontiert wird, Informationen über die statistischen Daten der umgebenden Welt zu erhalten, wird es diese Daten sowie die Sensoren oder Werkzeuge, die zu ihrer Erfassung verwendet werden, ohne weiteres übernehmen. Als Ergebnis erstellt das Gehirn ein neues Modell der Welt, eine neue Simulation des Körpers der Person und eine neue Reihe von Grenzen oder Beschränkungen, die die Wahrnehmung der Realität und das Selbstverständnis der Person definieren. Dieses neue Gehirnmodell wird dann während des gesamten Lebens der Person weiter getestet und umgestaltet. Da die Gesamtenergiemenge, die das Gehirn verbraucht, und die maximale Geschwindigkeit des neuronalen Feuerns feststehen, müssten der neuronale Raum und die Zeit entsprechend diesen Beschränkungen relativiert werden“ (Nicolelis, 2011, S. 243)

Nicolelis sieht in der Hypothese vom relativistischen Gehirn auch eine potenzielle Lösung für das Bindungsproblem. Diese Lösung ist tatsächlich bestechend einfach, denn sollte das Gehirn tatsächlich relativistisch organisiert sein, so würde sich das Bindungsproblem in der bekannten Form überhaupt nicht stellen:

„Indem man einfach den Bezugsrahmen von den eingehenden Reizen, die von der Außenwelt erzeugt werden, auf den Standpunkt des eigenen Gehirns verlagert, könnte das Bindungsproblem ganz verschwinden, da es im relativistischen Gehirn keine Notwendigkeit gibt, irgendetwas zu binden, weil kein eingehender Reiz in diskrete sensorische Informationsbits zerlegt wurde, um damit zu beginnen. In einem relativistischen Gehirn gibt es einfach ein einziges dynamisches Modell der Welt, das durch die ständigen Kollisionen zwischen der internen Dynamik des Gehirns und den übereinstimmenden und nicht-übereinstimmenden Informationen, die von der Peripherie des Körpers wahrgenommen werden, ständig aufgefrischt wird.“ (Nicolelis, 2011, S. 309)