

University of Heidelberg

Bericht für das Seminar  
*Ist künstliche Intelligenz gefährlich?*  
gehalten am 14. Juni 2017 von

**Letiția Elena Pârcălăbescu**

Sommersemester 17

# 1 Einführung

Wenn der Mensch eine Rechnung durchführen soll, wie z.B.  $942657 * 235$ , wird er sofort von einer Maschine übertroffen. Ein Handy heutzutage kann auf das Ergebnis 221.524.395 in  $10^{-11}$  Sekunden kommen. Jeder Mensch, der das Multiplizieren in der Schule gelernt hat, braucht dafür um die 60 Sekunden. Dazu hat die Maschine noch den Vorteil, dass sie im Betrieb etwa 2 Watt verbraucht. Das menschliche Gehirn dagegen, um die 20 Watt, so viel wie eine Kühlschrankschraubglühbirne. Doch Leistung ist Energie pro Zeit; ein mal multiplizieren wir mit einer sehr kleinen Zahl, beim Gehirn mit einer sehr großen. Folglich hat das Gehirn für diese Rechnung  $10^{10}$  bis  $10^{11}$  mehr Energie verbraucht. Das Gehirn ist damit ein wahres Energiedesaster!

Die erste Schlussfolgerung die man hieraus ziehen könnte ist, dass das Gehirn ein sehr schlechtes Vorbild sei für die Entwicklung einer KI. Unsere jetzigen Computer können einige Probleme viel besser und schneller lösen. Sie sind im Stande Schach und sogar Go zu spielen, Entscheidungen zu treffen, Vorschläge für die von einer Person vorgezogene Werbung zu machen. Doch das ist nur ein Aspekt der ganzen Geschichte. Die Go-Maschine verbraucht etwa 1 Megawatt, hat ein Jahr lang gebraucht um das Spiel zu lernen. Das ist vielleicht schneller, als ein Mensch zum Lernen brauchen würde, aber der Computer musste dafür 120 Millionen spiele spielen. Das Gehirn braucht nicht diese riesige Anzahl an Trainingsbeispielen um schnell abstrahieren zu können, was ein Vogel ist. Das kann sogar mit unerwarteten Vogelbildern, wie mit einem Vogel mit Schnurrbart sinnvoll (mit Humor) reagieren. Ein Computer kann das (noch) nicht.

Folglich kann man dafür argumentieren, dass es durchaus sinnvoll ist das Gehirn zu verstehen und daran ein Beispiel zu nehmen. Das Gebiet der Gehirnforschung ist aber noch extrem jung und viel Licht ist noch ins Feld zu bringen. Dafür werden modernste Mikroskopieverfahren verwendet und neuste Algorithmen für die Verarbeitung der damit aufgenommenen Bilder entwickelt.

## 2 Ist das menschliche Gehirn besonders?

Um zu verstehen wie das menschliche Gehirn funktioniert, kann man unterschiedlich ansetzen. Einerseits versucht man die Bausteine vom Gehirngewebe zu analysieren, deren Verbindung zu untersuchen und daraus konstruktiv die größere Funktion zu ermitteln. Wegen der Komplexität des Problems ist ein komparativer Ansatz derjenige der in der Forschung die meisten Erkenntnisse bisher gebracht hat. Durch Vergleich der Gehirnarten durch das Tierreich kann man Schlüsse über die Funktion einiger Komponenten, sowie deren Charakteristiken ziehen.

Eine häufige falsche Auffassung ist diejenige, dass die Größe des Gehirns für die Intelligenz verantwortlich sei. Doch kommt dem von seiner überragenden Klugheit stolzen Menschen eine schlechte Nachricht entgegen: Es gibt viele Tiere, die ein größeres Gehirn haben als der Mensch, wie zum Beispiel der Elefant (Abbildung 1).

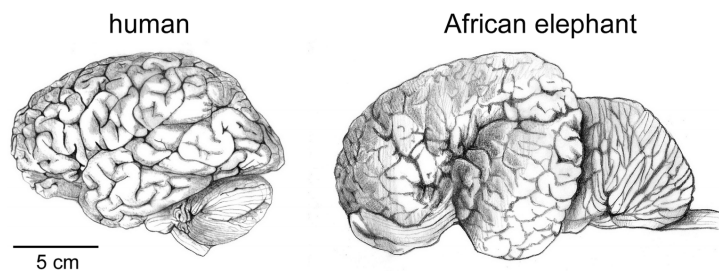


Abbildung 1: Das menschliche Gehirn verglichen zu dem von einem Afrikanischen Elefanten. Zeichnung auf gleicher Skala. Herculano-Houzel (2009)

Die nächstfolgende, weniger naive Auffassung könnte meinen, dass das Verhältnis von Gehirnmasse zur Körpergröße die Intelligenz beeinflusst. Der Mensch hat im Vergleich zu anderen Tieren ein sehr großes Gehirn und einen dafür viel zu kleinen Körper. Der Grund wird hier später erleuchtet. Erstmal schaut man sich ein Vergleich zwischen dem Menschen und seine Cousins den Großaffen an: Ein Gorilla wiegt 140-210 kg und hat ein Gehirn, das etwa 0.5 kg schwer ist. Der Mensch hat zu einem Körper von 70 kg, 1.5 kg an Gehirnmasse. Dazu verbraucht dieses über-entwickelte Gehirn 25% der Energie im Körper. Dieser intensive Energieverbrauch und die große Proportion solle die Außergewöhnlichkeit des Menschen zeigen. Doch Evolution ist ein Prozess

in kleinen Schritten, sie erlaubt solche Ausreißer wie das gerade Geschilderte nicht.

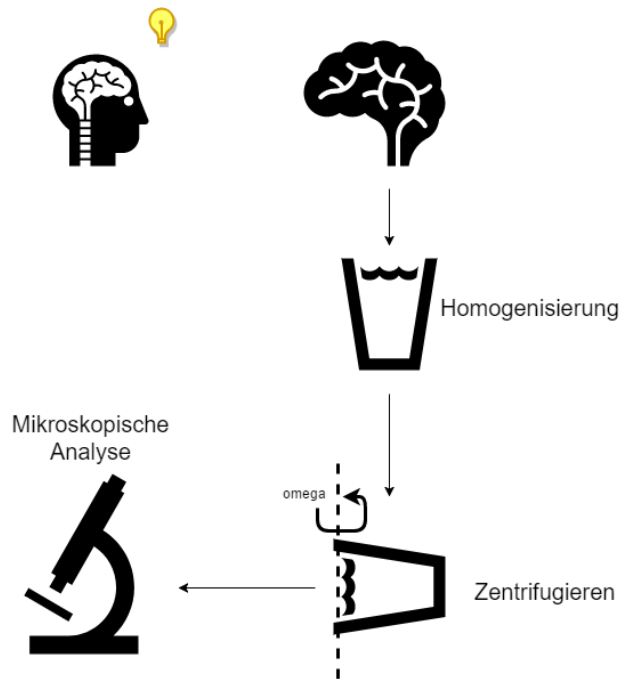


Abbildung 2: Das Verfahren vorgeschlagen von Herculano-Houzel and Lent (2005) besteht aus 4 Schritten: Homogenisierung des Gehirns durch Zermahlen und Lösen in Salz- Seiflösung, Zentrifugieren zur Isolierung der Zellkerne und deren mikroskopische Untersuchung.

Dieser Gedanke hat Forscher dazu gebracht, dieses Problem näher zu untersuchen (Herculano-Houzel, 2009). Erstmals wurde die Anzahl an Neuronen, die das menschliche Gehirn besitzt, in Frage gestellt. In der Literatur wurde in den Neunzigern stets die Zahl von 100 Milliarden Neuronen zitiert, doch ohne eine deutliche experimentelle Untersuchung. Diese Zahl stammt vermutlich durch eine einfache Überlegung: Die Dichte  $\rho = \frac{m}{V}$  ist Masse durch Volumen. Aus der Kenntnis des Volumens  $V$  und einer allgemeinen Dichte, konnte somit die Anzahl an Neuronen geschätzt werden. Doch diese Schätzwerte sind sehr fehlerbehaftet, da die Dichte gar nicht homogen im Gehirn ist und die Größe einzelner Neuronen auch sehr unterschiedlich ist.

Somit haben sich Herculano-Houzel and Lent (2005) eine viel effizientere und zuverlässigere Methode ausgedacht, Neuronen zu zählen. Und zwar ist nun jedes Gehirn an Neuronen abzählbar, so dass man Zahlen zur Verfügung

hat, mit denen man Gehirne untereinander vergleichen kann. Die Idee ist in Abbildung 2 skizziert: Man geht davon aus, dass jede Gehirnzelle einen einigen Zellkern hat. Damit kann man sich dem ganzen Zellkörper entbehren und nur die Zellkerne zählen. Dafür nimmt man erstmal das Gehirn oder Teile vom Gehirn, was man untersuchen möchte und zerquetscht es. Danach wird der Zellkörper weiter zerstört und vom Zellkern abgelöst, indem man ihn in Salz- und Seifenwasser löst. Das Ganze wird zentrifugiert, damit im Untersuchungs-glas nur die Zellkerne bleiben. Diese werden dann fluoreszierend markiert. Dabei wird geachtet, dass man zwei unterschiedliche DNA-spezifische Farben verwendet: Eine, die die Neuronenkerne markiert (NeuN - neuronal nuclear antigen), die andere Farbe ist dagegen für alle Zellkerne spezifisch (also 4',6-diamidino-2-phenylindole dihydrochloride (DAPI, ein Antigen was auf jeder DNA, die ja die Zellkerne enthalten, haftet.).

So erhält man unter dem Fluoreszenzmikroskop Bilder wie in Abbildung 3 zu sehen sind. Links zu erkennen sind die mit Dapi markierten Zellkerne, also alle Zelltypen. In der Mitte sind die mit NeuN markierten Neuronen und links steht eine Überlappung dieser beiden. Somit ist die Gesamtanzahl an Neuronen gegeben durch Dapi und die Anzahl der Gliazellen und Subtraktion vom linken und dem mittleren Bild.

$$\#Neuronen = NeuN$$

$$\#Gliazellen = Dapi - NeuN$$

Jetzt kann man dieses Verfahren für alle Gehirne anwenden. Es stellt sich heraus, dass Gehirngröße oder -masse nichts mit der Anzahl an Neuronen korreliert ist. Als Beispiel dienen die Primaten, die eine komplett andere Gehirnstruktur haben als Nagetiere. In Abbildung 4 wird links eine Reihe von Nagetiergehirnen gezeigt, wobei die Größe nach unten steigt. Man stellt fest, dass mit wachsender Größe des Gehirns die Dimensionen der Neuronen linear größer werden. Das ist aber nicht der Fall bei Primaten (rechts). Mit steigender Gehirngröße werden die Neuronen ökonomisch gepackt und die Größe der Gehirnzellen bleibt konstant.

Somit kann man den Schluss ziehen, dass Gehirne von Primaten (auch das

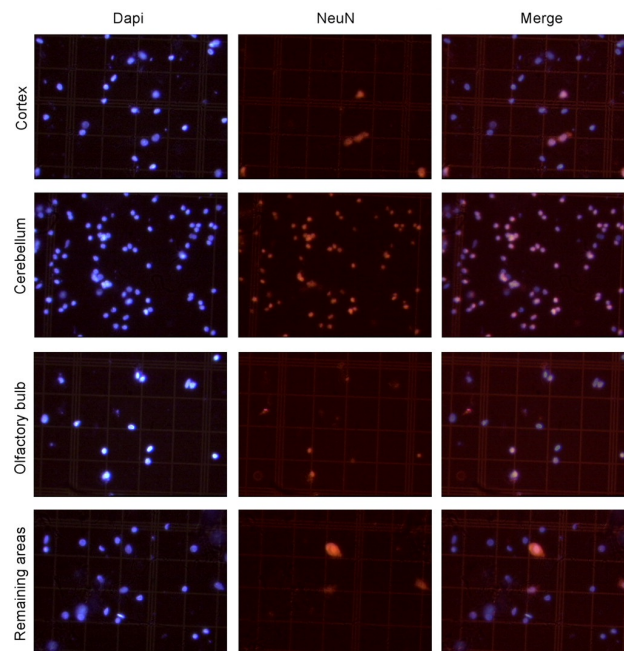


Abbildung 3: Links: Zellkerne (DAPI), Mitte: Neuronenkerne (NeuN), rechts: Überlappung der Beiden. (Herculano-Houzel and Lent, 2005)

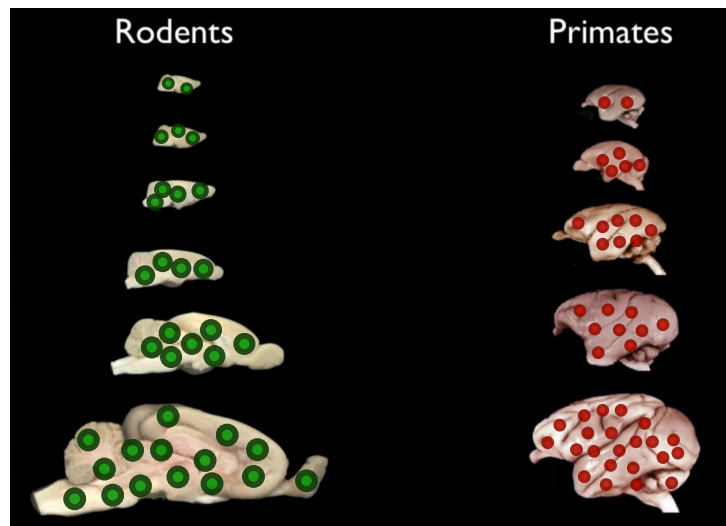


Abbildung 4: Links: Nagetiergehirne, wobei die Neuronengröße linear mit der Gehirngröße steigt. Rechts: Gehirne von Primaten, wobei die Größe der Neuronen konstant bleibt. (Herculano-Houzel, 2013)

menschliche Gehirn) sich signifikant von denen der Nagetiere unterscheiden. Es steht nun fest (Herculano-Houzel and Lent, 2005), dass der Mensch im

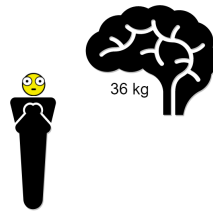


Abbildung 5: Ein Gehirn in einem Menschenkörper, das wie ein Nagetiergehirn gebaut ist, würde 36kg wiegen!



Abbildung 6: Ein Gehirn in einem Menschenkörper, das wie ein Primatengehirn aufgebaut ist, würde 1.24kg wiegen, was mit der menschlichen Gehirnmasse von 1.5 kg gut zu verbinden ist.

Mittel 86 Milliarden Neuronen hat. Ein Gehirn mit 86 Milliarden Neuronen das wie ein Nagetiergehirn gebaut wäre, würde 36kg wiegen! Sich das in einem Menschenkörper vorzustellen ist unmöglich (Abb. 5). Ein Primatengehirn dagegen, würde 1.24 kg schwer sein, was mit dem 1.5 kg schweren menschlichen Gehirn gut vereinbar ist (Abb.6).

Aber es bleibt noch die Frage offen, wieso der Mensch als Einziger so viele Neuronen (86 Milliarden) entwickelt hat, während die großen Affen erst um die 30 Milliarden Neuronen haben. Die Antwort findet man in der Evolution und in den Randbedingungen, die von der Umwelt gestellt werden. Die großen Affen brauchen viel Energie um ihren großen Körper der sie beschützt zu erhalten. Deswegen bleibt weniger Energie für das Gehirn übrig, denn jedes Tier muss der inexorablen Gleichung folgen:

$$\text{Körperkosten} + \# \text{Neuronen} < \text{Energieeinnahme}$$

Die großen Affen ernähren sich ungefähr 8 Stunden pro Tag, was ihre Energieeinnahme einschränkt. Sich länger als 9 Stunden zu ernähren, wäre gefährlich. Wenn man diese 9 Stunden als Grenze für die maximale Energieeinnahme festlegt, erhält man das lineare Verhältnis von Anzahl an Neuronen

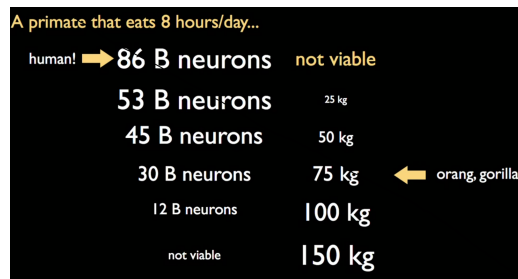


Abbildung 7: Mögliche Verhältnisse von Gehirn- zu Körpermasse bei einer Nahrungseinnahmezeit von 8 Stunden pro Tag.

zu Körpermasse, die man in Abbildung 7 wiederfindet. Auffallend ist, dass ein Mensch mit seinen 86 Milliarden Neuronen nicht in das Schema passt, sein Gehirn verbraucht viel zu viel Energie. Damit der Mensch diese Menge an Energie findet, um sein Gehirn zu erhalten, musste er etwas fundamental Neues in seiner Nahrung erfinden was ihm das ermöglicht: Das Kochen. Diese Erfindung stellt schon eine externe Verdauung des Essens dar, wodurch der Mensch seine Energieaufnahme deutlich vergrößern kann als der Affe. Damit muss er nicht 8 Stunden pro Tag essen und hat dadurch seine Zeit gewonnen, sich menschlich zu verhalten. Die Effizienz an Energieeinnahme hat sogar zu Übergewichtigkeit geführt, ein Phänomen, was man in der Wildnis nicht sieht. Dafür findet nun Mensch schon die beste Lösung: Er grast wieder und isst Salat in einer affenähnlichen Diät!

## 2.1 Mögliche Schlüsse

Da man nun aus der Biologie gelernt hat, dass die Anzahl an Neuronen einen sehr hohen Einfluss auf die Intelligenz hat, könnte man auf die Idee kommen, das gleiche Prinzip in Neuronalen Netzen nachzuahmen und die Anzahl der Parameter zu vergrößern. Dieses Hochskalieren hat man in der Tat bereits gemacht (Hsu, 2015), indem man 160 Milliarden Parameter (nicht Neuronen, deren Anzahl wäre kleiner) trainiert hat. Dabei hat man festgestellt, dass das Neuronale Netz besser funktioniert. Doch der Unterschied ist nicht revolutionär groß gewesen und der Aufwand dazu riesig, es geht nämlich darum, eine riesige Anzahl an Parametern zu optimieren. Dazu verbraucht dieses



Monster von Neuronales Netz extrem viel Speicher und Rechnerkapazität, Größenordnungen mehr als das Gehirn und kann am Ende dafür weniger.

Ein Grund dafür, dass das Gehirn weitgehend den Neuronalen Netzen überlegen bleibt, ist sein komplexer Aufbau. Das Neuronale Netz stellt nur ein Modell mit vielen Vereinfachungen dar, wobei die Morphologie der Neuronen komplett vernachlässigt wird, indem sie zu Punkten modelliert werden. Dazu wird nicht beachtet, dass jeder Spike eines Neurons eine zeitliche Dynamik hat und dass sich diese zwischen Neuronenarten sehr stark unterscheiden können.

Die Verbindungen zwischen den Neuronen sind in einem Neuronalen Netz auch zu stark in Layers vereinfacht. Das Gehirn hat aber hoch komplexe und noch unverstandene Verbindungen, vor allem auch zwischen sensorischen Reizen wie das Sehen, Hören, Fühlen. Wie solche Verbindungen in Neuronen gemacht werden ist noch ein Geheimnis. Eins davon ist der "Giant Neuron"(Crick and Koch, 2005), der in einem Mausgehirn beobachtet wurde (Abb. 8). Dieses Neuron ist extrem gut im Gehirn vernetzt, geht über beide Hemisphären und umfasst den Umfang des Organs wie eine "Dornenkrone"(Readon, 2017).

Die Autoren Crick and Koch (2005) spekulieren, dass der hier untersuchte Claustrum (ein dünner Strang an grauer Materie in jeder Hemisphäre im Endhirn) mit diesem Neuron das ganze Gehirn koordiniert und damit Selbstbewusstsein generiert. Diese Erkenntnis wurde dadurch gewonnen, dass individuelle Zellen fluoreszierend markiert werden. Es wurde Mäuse genetisch manipuliert, dass die Neuronen des Claustrums auf bestimmte Chemikalien reagieren. Wenn diese Substanzen von den Wissenschaftlern den Mäusen zugeführt werden, reagieren nur ein Teil der Neuronen darauf und produzieren ein grün fluoreszierendes Protein durch die ganze Länge der Zelle. Dann wird dieses Gehirn in Scheiben geschnitten und den Markierungen folgend 3D rekonstruiert.

### **3 Das Gehirn mit Licht untersuchen**

Im vorherigen Abschnitt wurde schon gezeigt wie wichtig es ist, das Gehirn in Bilder aufzunehmen und diese zu analysieren. Man kann daraus den Aufbau

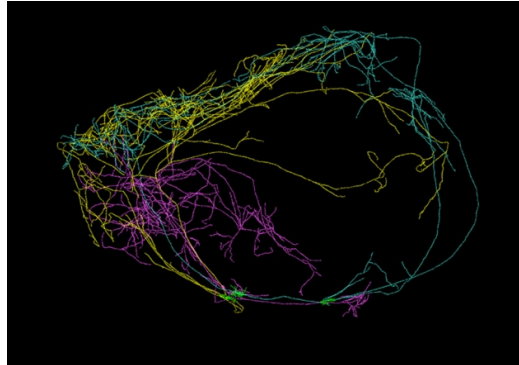


Abbildung 8: 3D-Rekonstruktion eines Mäusegehirns (Readon, 2017).

und die Verbindungen betrachten und Schlüsse ziehen. Doch dieses Organ kann zwar große Dimensionen erreichen, ist aber in seinen Komponenten ziemlich klein.

Die Dimensionen die man noch betrachten möchte sind die Synapsen, die aus einem etwa 30nm großen synaptischen Spalt bestehen, vorsynaptisch 40 nm große Vesikeln enthalten und postsynaptisch die Aktivierung verschiedener Rezeptoren aufweist. Doch diese Zahlen stehen weit unter der Auflösungsgrenze (Abbe-Limit) von 200nm, die man mit sichtbarem Licht klassisch noch erreichen kann. Denn der minimale Abstand  $d$  zweier Punkte die noch unterschieden werden können ist limitiert durch die Wellenlänge  $\lambda$  des Lichts, dem Brechungsindex des Immersionsmediums  $n$  und dem Einfallswinkel des Lichts  $\alpha$ .

$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \alpha}$$

Doch mit modernen Mikroskopieverfahren kann man diese Grenze umgehen, indem man die Wellenlänge versucht zu verkleinern. Das wird erreicht, indem man sich den Materiewellen der Elektronen bedient (Elektronenmikroskopie). Eine andere Variante versucht im Nenner der Abbe-Formel einen zusätzlichen Term einzufügen, der  $d$  weiter minimiert (STED Mikroskopie). Diese zwei Verfahren werden im kommenden Verlauf kurz erklärt.

### 3.1 STED-Mikroskopie

Die STED-Mikroskopie (Stimulated Light Emission Depletion) (Hell and Wichmann, 1994) hat als Basis die Mittel der Fluoreszenzmikroskopie. Dabei wird von dem Prinzip ausgegangen, dass man zwei Punkte besser unterscheiden kann wenn diese selbst leuchten, als wenn sie von einer Lichtquelle beleuchtet werden, wobei das gebrochenen und reflektierte Licht viel Rauschen erzeugt. Folglich werden in dem zu untersuchenden Gewebe fluoreszierende Moleküle angehängt und mit Licht erregt. Dabei wird Licht in kleinerer Wellenlänge emittiert, so dass man das einkommende Licht filtern kann und nur das Fluoreszenzlicht analysiert. Somit erhält man Bilder wie auf der linken Seite von Abb. 9. Um aber eine noch bessere Auflösung, wie auf der rechten Seite zu bekommen, bedient man sich dem STED-Verfahren.

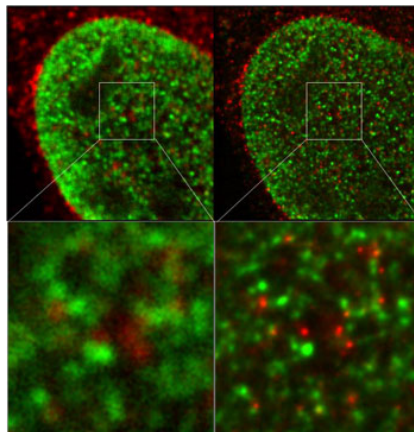


Abbildung 9: Fluoreszenzmikroskopie (links). STED (rechts). Man merkt die höhere Auflösung bei dem STED-Verfahren. Quelle<sup>1</sup>.

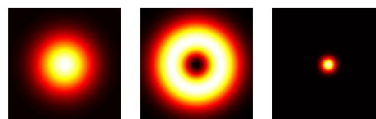


Abbildung 10: Fluoreszierender Punkt (links). Auslöschungslicht (mitte). Verbleibendes Signal (rechts). Quelle<sup>2</sup>.

<sup>1</sup><https://www.activemotif.com/catalog/689/chromeo-494-tools-for-sted-microscopy>

<sup>2</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/File:STED\\_Mikroskop\\_PSFs.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:STED_Mikroskop_PSFs.jpg)

Im STED wird ein Torus-geformter Strahl zusätzlich genommen, der die Ränder des fluoreszierenden Punktes ausschaltet und damit verkleinert (Abb. 10). Die erreichte Auflösung wird zu etwa 100nm, was der Hälfte des Abbe-Limits entspricht. Doch die zu untersuchenden Strukturen im Gehirn sind noch kleiner als die 100nm. Dazu ist ein großer Nachteil des Verfahrens, dass nur ein kleiner Teil der Proteine markiert werden, dabei bleibt der Rest der Struktur im Dunkeln. Um die Auflösung noch weiter zu verbessern, forscht man noch mit anderen Verfahren, wie das aus dem nächsten Abschnitt.

### 3.2 Elektronenmikroskopie

Die Elektronenmikroskopie versucht das Abbe-Limit auszunutzen, indem es die Wellenlänge des Lichts mit der des Elektrons ersetzt. Das ist möglich, weil man seit Louis de Broglie weiß, dass Materie auch Wellen erzeugt, mit einer Wellenlänge bestimmt durch die Planckkonstante, der Masse und Geschwindigkeit des Teilchens. Für ein Elektron beträgt diese 1.23nm.

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Da Elektronen eine Ladung tragen, werden diese durch Magneten, die sich wie die Linsen eines optischen Mikroskops verhalten, manipuliert. Diese treffen auf die zu untersuchende Probe ein und entweder hinterlassen einen Schatten (Rasterelektronenmikroskop REM) oder gehen durch die Materie durch (Transmissionselektronenmikroskop TEM). Aus den Mustern der gestreuten Elektronen kann dann das Bild rekonstruiert werden. Die Auflösungen gehen dabei im Falle vom TEM bis zu  $10^{-15}$ , wobei die Grenze durch die Feinheit des Detektorgitters bestimmt wird.

Diese tollen Errungenschaften im Bereich der Auflösung, haben aber auch ihren Preis. Die Methode ist destruktiv, da das Material der Untersuchung nicht mehr überlebt. Man untersucht nur in einem Farbkanal und der Präparationsprozess der Probe, die mit schweren Metallen dotiert werden muss, um die Ablenkung der Elektronen besser zu ermöglichen, ist schwierig.

### 3.3 Correlative Light Electron Microscopy (CLEM)

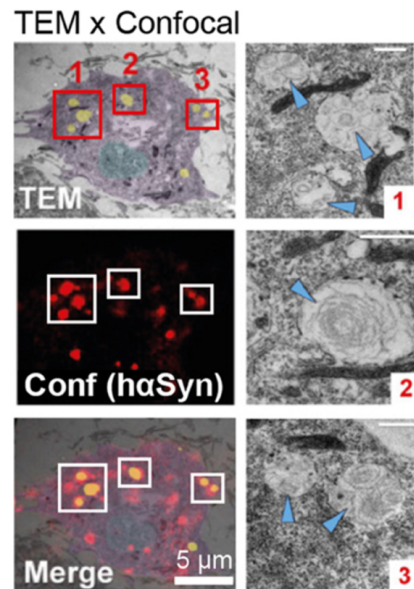


Abbildung 11: CLEM. Überlappung (3) von Konfokaler Mikroskopie (2) und Transmissions-elektronenmikroskopie (1). De Boer et al. (2015)

Um die Vorteile der beiden oben erklärten Methoden zu verwenden, werden die Verfahren zusammengefügt in CLEM (Correlative Light Electron Microscopy) De Boer et al. (2015). Dabei wird die zu untersuchende Probe, mit einem Lichtmikroskop (i.e. Fluoreszenzmikroskop) grob angeschaut. Dann werden die interessanten Bereiche unter dem Elektronenmikroskop untersucht (Abb. 11). Dabei sind die großen Hürden, Präparationsverfahren zu entwickeln, wo die eine Untersuchung nicht die andere ausschließt. Dazu ist es schwierig die Bilder zu überlappen und man benutzt entweder Lokalisationsgitter, spezifische Marker oder schon bekannte Strukturen, die man in beiden Bildern wiedererkennt.

### 3.4 Andere Verfahren

Bis jetzt war man es gewohnt, dass Mikroskope die Welt zum Vorschein bringen, indem sie kleine Dinge groß erscheinen lassen. Doch neulich haben es Wissenschaftler geschafft, die Objekte selber zu vergrößern. Chang et al.

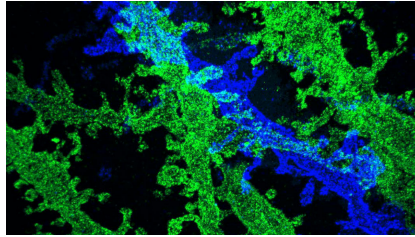


Abbildung 12: Ein um das 20-fache vergrößerte Gehirn Chang et al. (2017).

(2017) haben ein Verfahren entwickelt, mit dem sie das Gehirn zwanzigfach aufblasen. Als Erstes haben sie das gleiche Polyacrylatmolekül, was Windeln aufschwellt, injiziert und Wasser dazu gegeben. Die Vergrößerung war um das 4,5-fache. Um die 20-fache Vergrößerung zu bekommen wird das Verfahren iterativ angewendet: Das Gewebe wird ein Mal vergrößert, gespalten und nochmal vergrößert. Die Strukturen sind danach groß genug um mit dem Fluoreszenzmikroskop analysiert zu werden. Damit wurden Bilder erzeugt, die die Bildung von Proteinen an Synapsen in Mäusegehirnen abbilden, aber auch Details von dendritischen Stacheln (Abb. 12), wo das Neuron seine Signale bekommt.

## 4 Datenverarbeitung

Mit dieser Vergrößerungsmethode kann man Bilder erzeugen, aus denen es möglich ist, das Gehirn 3D zu rekonstruieren. Man schneidet es in Scheiben, nimmt Bilder auf und versucht die zusammenhängenden Segmente zu vereinigen. Das Rekonstruktionsverfahren ist jedoch sehr schwierig und dauert manuell zu lange. Für das von einer Fliege mit dem Elektronenmikroskop aufgenommene Gehirn, werden automatisierte Verfahren entwickelt, wie zum Beispiel in Heidelberg am HCI entwickelte Algorithmen (Beier et al., 2017).

Das Verfahren arbeitet auf Elektronenmikroskopaufnahmen von Neuronen die ein Volumen bilden, wobei die Schnitte in der  $z$ -Ebene passieren. Die Daten sind anisotrop, gerade weil der Schnitt gröber als die Auflösung in  $x, y$ -Richtung ist. Das Rekonstruktionsverfahren besteht aus mehreren Schritten, wobei im ersten auf den Elektronenmikroskopbildern überall Wahr-

scheinlichkeiten für Neuronengrenzen berechnet werden. Das geschieht mit einem Neuronalen Netz, welches die besten Ergebnisse liefert, doch dazu ist schon ein Random Forest befriedigend. Auf diesen Wahrscheinlichkeitsbildern werden dann Übersegmentierungen von Neuronenflächen erzeugt, die dann untereinander, mit den Prozessen in Richtung  $z - 1$  und  $z + 1$ , in einem graphischen Modell verbindet werden. In diesem Graph wird dann die Energie minimiert, so dass die optimale Lösung möglichst den besten Verbindungen entspricht. Die Schritte und das Ergebnis sind in Abbildung 13 zu sehen.

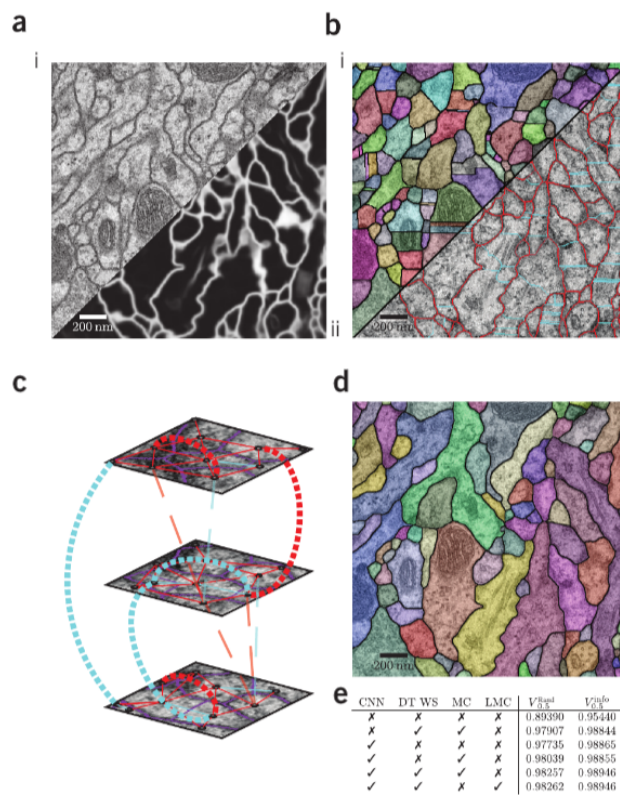


Abbildung 13: 3d-Rekonstruktionsverfahren von Elektronenmikroskopbildern eines Fliegehirns Beier et al. (2017). (a-i) Rohdaten, (a-ii) Wahrscheinlichkeitskarte für die Neuronengrenzen, (b) Übersegmentierung, (c) graphisches Modell, (d) Ergebnis.

## 5 Schlussfolgerung

Obwohl die Erkenntnisse der Gehirnforschung nur langsam voranschreiten, sind die angewandten Methoden beeindruckend und komplex. Da schon vor einem Jahr ein komplettes Fliegenhirn elektronenmikroskopisch aufgenommen wurde, kann man in der Zukunft viele neue Erkenntnisse gewinnen, dank der verbesserten und schnelleren Methoden sowohl in der Elektronenmikroskopie aber auch mit der Möglichkeit der Vergrößerung von Gehirngewebe. Wie diese neuen Entdeckungen genau aussehen werden, kann man nur spekulieren.

## Literatur

- T. Beier, C. Pape, N. Rahaman, T. Prange, S. Berg, D. D. Bock, A. Cardona, G. W. Knott, S. M. Plaza, L. K. Scheffer, et al. Multicut brings automated neurite segmentation closer to human performance. *Nature Methods*, 14(2): 101–102, 2017.
- J.-B. Chang, F. Chen, Y.-G. Yoon, E. E. Jung, H. Babcock, J. S. Kang, S. Asano, H.-J. Suk, N. Pak, P. W. Tillberg, et al. Iterative expansion microscopy. *Nature Methods*, 14(6):593–599, 2017.
- F. C. Crick and C. Koch. What is the function of the claustrum? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 360 (1458):1271–1279, 2005.
- P. De Boer, J. P. Hoogenboom, and B. N. Giepmans. Correlated light and electron microscopy: ultrastructure lights up! *Nature methods*, 12(6):503–513, 2015.
- S. W. Hell and J. Wichmann. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy. *Optics letters*, 19(11):780–782, 1994.
- S. Herculano-Houzel. The human brain in numbers: a linearly scaled-up primate brain. *Frontiers in human neuroscience*, 3:31, 2009.



- S. Herculano-Houzel. What is special about the human brain?, 2013. URL [https://www.ted.com/talks/suzana\\_herculano\\_houzel\\_what\\_is\\_so\\_special\\_about\\_the\\_human\\_brain#t-315547](https://www.ted.com/talks/suzana_herculano_houzel_what_is_so_special_about_the_human_brain#t-315547). [Online; letzter Zugriff 10. Juni 2017].
- S. Herculano-Houzel and R. Lent. Isotropic fractionator: A simple, rapid method for the quantification of total cell and neuron numbers in the brain. *Journal of Neuroscience*, 25(10):2518–2521, 2005. ISSN 0270-6474. doi: 10.1523/JNEUROSCI.4526-04.2005. URL <http://www.jneurosci.org/content/25/10/2518>.
- J. Hsu. Biggest neural network ever pushes ai deep learning, 2015. URL <http://spectrum.ieee.org/tech-talk/computing/software/biggest-neural-network-ever-pushes-ai-deep-learning>. [Online; letzter Zugriff 10. Juni 2017].
- S. Readon. A giant neuron found wrapped around entire mouse brain, 2017. URL <http://www.nature.com/news/a-giant-neuron-found-wrapped-around-entire-mouse-brain-1.21539>. [Online; letzter Zugriff 10. Juni 2017].