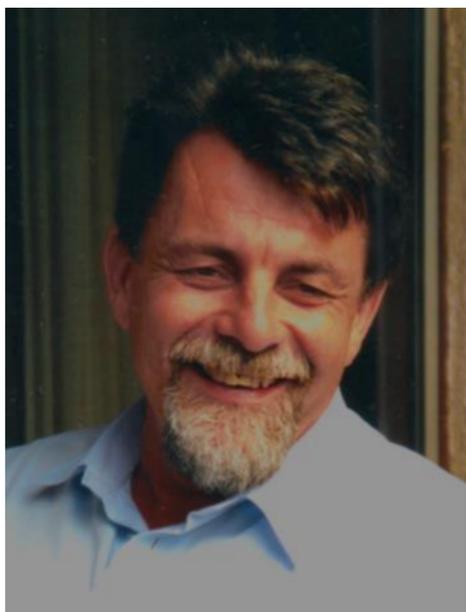


Heinz Horner



Heinz Horner

Heinz Horner wurde 1938 in Böhmisches-Leipa geboren. Nach Kriegsende ging es 1946 mit dem letzten Flüchtlingstransport nach Rosenheim in Bayern, wo er 1958 am humanistischen Gymnasium das Abitur machte. An der Technischen Universität München folgte er seiner Vorliebe für Thermodynamik und statistische Physik. Er promovierte 1968 bei Brenig zum Thema Theorie der Quantenkristalle, wobei es ihm erstmals gelang, die Phononenspektren der kristallinen Phasen der Helium Isotope samt Mehrphononenprozessen zu berechnen. Diese Rechnungen, inklusive Linienformen, wurden später durch Neutronenstreuexperimente gut bestätigt. Diese Arbeiten setzte Horner in den USA während zweier Jahre als Assistenzprofessor an der Universität von Minnesota fort. Anschließend arbeitete er am Institut für Festkörperforschung des Forschungszentrums Jülich und habilitierte sich 1973 an der RWTH Aachen. 1975 wurde er nach Heidelberg an das Institut für Theoretische Physik berufen, um dort zusammen mit seinem Jülicher Kollegen Franz Wegner (Band 3) die Statistische Physik und Festkörperphysik zu etablieren. Horner wechselte daraufhin zu dem ungemein anspruchsvollen Thema der Spingläser, mit ihrer Vielzahl metastabiler Zustände und divergierender Zeitskalen, und verband dieses Thema sehr erfolgreich mit der damals neu entwickelten Theorie der lernfähigen Neuronalen Netze. Dies führte ihn zu physiologisch-anatomischen Themen der Hirnforschung und dem berühmten Zusammenhang "Spingläser und Hirngespinnsten". Ab 1997 machte er sich als Prorektor für Forschung verdient um zeitgemäße Projekte wie die dezentrale Ressourcenverantwortung, leistungsorientierte Mittelvergabe und das kaufmännisches Rechnungswesen, eine wahre Herkulesaufgabe. 2004 wurde Horner emeritiert.

Heinz Horner

Spingläser und Hirngespinnste

Kindheit und Schule 1938–1958

Geboren wurde ich Ende August 1938 in Böhmisches-Leipa, einer nordböhmischen Kleinstadt, die kurz nach meiner Geburt "Heim ins Reich" geholt wurde.



Abb. 1. Postkarte aus meiner Geburtsstadt Böhmisches Leipa (Ceská Lípa) in Nordböhmen.

Ein Jahr nach Kriegsende ging es 1946 mit dem letzten Flüchtlings-transport in die amerikanische Zone nach Rosenheim. Inzwischen war ich mehrfach wieder zu Besuch in Leipa, auch mit meinen Kindern. Es war interessant die Häuser meiner Eltern und Großeltern zu sehen, oder die Schule, die ich für ein Jahr besucht hatte, Wehmut oder Heimatgefühle kamen aber nicht auf.



Abb. 2. Rosenheim mit Blick auf die Voralpen.

In Rosenheim kam ich dann, nach einjähriger Unterbrechung, wieder in die Schule und machte 1958 am dortigen Humanistischen Gymnasium das Abitur. Die ersten Fremdsprachen waren Latein und Griechisch. Englisch kam erst später dazu und hatte wenig Bedeutung. Das war zwar nicht ganz nützlich, aber am Humanistischen Gymnasium war man ja etwas Besonderes.



Abb. 3. Rosenheim in typischer Inn-Salzach-Bauweise.

Meine Vorliebe galt aber nicht so sehr den alten Sprachen. Interessanter waren da schon Biologie und Physik. Tatsächlich hatte unser Mathematik- und Physiklehrer wenig Interesse an der

Physik, aber wir waren eine Gruppe von vier Schülern, die ihre eigene Arbeitsgemeinschaft bildeten, und unser Physiklehrer war froh, wenn wir neue Demonstrationsexperimente vorschlugen, kauften und einrichteten. Alle Vier studierten wir später Physik.

Noch viel interessanter war jedoch der Bau von Modellflugzeugen. Immerhin brachte ich es zum Rosenheimer Stadtmeister, was bei der geringen Zahl von Mitbewerbern keine besondere Leistung war. Es war aber auch bedeutend für meine spätere Berufswahl. Ich fing an, mich für die Aerodynamik von Vögeln und Flugzeugen zu interessieren, und mir wurde gesagt, dass das eher ein Gebiet für Physiker und nicht für Ingenieure war. Das Interesse für Aerodynamik blieb, und eine meiner späteren Lieblingsvorlesungen war immer die Hydrodynamik. Rosenheim bot daneben noch viele andere Möglichkeiten für einen Jugendlichen mit seinen nahegelegenen Seen und Bergen. Zu Oper oder Konzert fuhr man nach München.

Studium und Promotion in München 1958–1967

Im Herbst 1968, ging es zum Studium nach München. Physik konnte man an der Universität oder auch an der Technischen Hochschule studieren. Nachdem meine Noten für den dortigen Numerus Clausus ausreichend waren, wählte ich die Technische Hochschule. Nachträglich gesehen war das wohl die bessere Wahl. Zu Vorlesungen von Heisenberg an der Uni konnten wir trotzdem gehen, was nicht allzu viel Bedeutung hatte, da wir sowieso fast nichts verstanden. Das Studium bis zum Vordiplom war straff organisiert, und wir konnten, im Gegensatz zu den Kommilitonen an der Uni, die Prüfung nach dem vierten Semester ablegen. Die Physik Grundvorlesung, die auch für Ingenieure gedacht war, wurde von Georg Joos mit vielen Experimenten und durchaus unterhaltsam gehalten. Er konnte aber auch wütend werden, besonders wenn jemand im abgedunkelten Hörsaal die Tür nach aussen öffnete. Einen hohen Vertreter des Kultusministeriums hat er beispielsweise mit den Worten "*und wenn Sie der Kaiser von China sind, ich sage: Raus da!*" begrüßt. Das von ihm verfasste

Lehrbuch der Theoretischen Physik war ein weit verbreitetes und hoch geschätztes Standardwerk mit Schwerpunkt auf klassischer Physik.



Abb. 4. Stammgelände der Technischen Hochschule München (heute Technische Universität).

Die Modernisierung der Physik an der Technischen Hochschule, wurde mit der Berufung von Heinz Maier-Leibnitz im Jahr 1952 eingeleitet. Er war allerdings für Studenten vor dem Vordiplom unsichtbar. Erst später konnten wir seine oft sehr originellen Vorlesungen über recht unterschiedliche Fragestellungen genießen. Erinnern kann ich mich an eine Vorlesung zur Technik des Skilaufs. Die darin vorgestellte Technik einen Bogen zu fahren, habe ich natürlich umgehend praktisch erprobt. Überzeugt war ich danach nicht. Neben seinen herausragenden Verdiensten bei Bau und Instrumentierung der Neutronen-Forschungsreaktoren in Garching und später Grenoble hat er die Umwandlung einzelner monolithischer Lehrstühle in ein Physik Department bewirkt. Im

Bereich der theoretischen Physik wurden Wilhelm Brenig und Wolfgang Wild und später Hans Jörg Mang berufen.

Wild und Mang kamen aus Heidelberg, wie auch schon vorher Maier-Leibnitz.

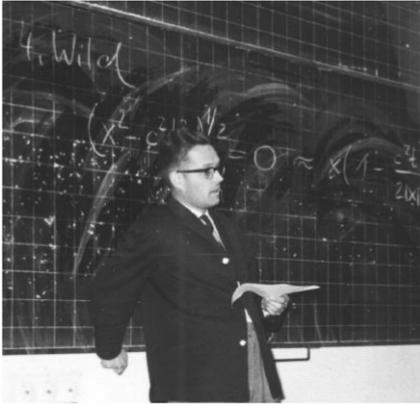


Abb. 5. Die neuen Professoren für theoretische Physik: Wilhelm Brenig (links) und Wolfgang Wild (rechts).

Mit den Neuberufenen änderte sich der Stil ganz wesentlich. Nicht nur der Inhalt wurde aktueller, im Sommer erschien Wilhelm Brenig zur allgemeinen Verwunderung in einem Buschhemd.

Wild kam allerdings immer noch im Anzug mit Krawatte. Besonders angetan war ich von Brenigs Vorlesung zur Statistischen Physik und Wärmelehre. Diese Vorlesung hat mein andauerndes Interesse an diesem Gebiet geweckt und war auch später die Grundlage meiner eigenen Arbeiten. Die Statistische Physik war auch immer meine liebste Kursvorlesung in Heidelberg.

Quantenkristalle

In meiner Diplomarbeit, aber besonders in meiner Doktorarbeit bei Brenig beschäftigte ich mich mit sogenannten Quantenkristallen. Darunter verstand man vorwiegend die Helium-Isotope ^3He und

^4He , die nur bei sehr tiefen Temperaturen und unter Druck kristallisieren.

Das Problem bestand darin, dass die zweite Ableitung des Wechselwirkungspotentials für nächste Nachbarn negativ ist. Damit war die harmonische Näherung als Ausgangspunkt zur Berechnung von Phononenspektren unbrauchbar, was zu Zweifeln an der Existenz von Phononen und zu anderen Spekulationen Anlass gab. Die Lösung bestand in einer störungstheoretischen Partialsummation, die letztlich darauf hinauslief, die Quantennatur der Gitterbausteine ernst zu nehmen und sie durch oszillierende Wellenpakete zu beschreiben, wobei die starke Abstoßung bei kleinen Distanzen berücksichtigt werden musste.

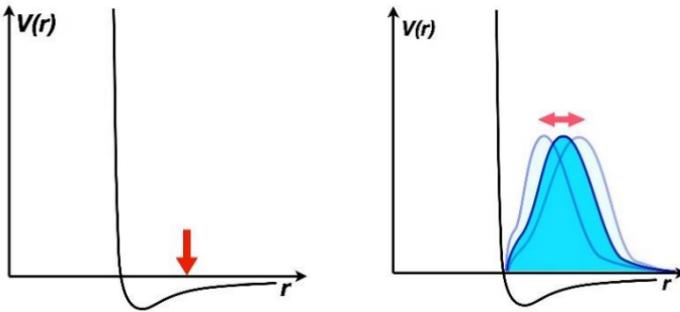


Abb. 6. Wechselwirkungspotential für Quantenkristalle. Die Position nächster Nachbarn ist durch den Pfeil angedeutet (links). Die Gitterbausteine werden durch oszillierende Wellenpakete beschrieben (rechts).

Die notwendigen numerischen Rechnungen konnte ich auf einer damals neuen Telefunken TR4 durchführen. Fehlersuche war noch etwas abenteuerlich. Ich erinnere mich, dass ich zusammen mit dem Operator einen ganzen Abend lang mit einem Transistorradio an dem kleiderschranks großen Gerät entlang suchte, um heraus zu finden welche Rechenoperationen gerade durchgeführt wurden.

Immerhin fand ich dabei heraus, in welcher Schleife das Programm hängen geblieben war.

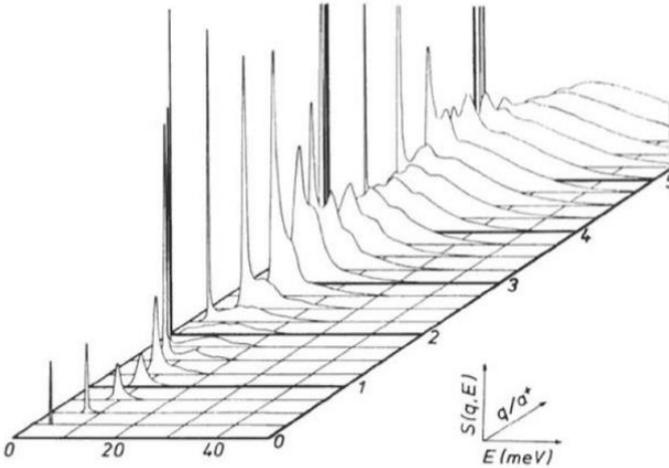


Abb. 7. Dynamische Strukturfunktion $S(q, \Omega)$ für festes ${}^4\text{He}$. Mit wachsendem Wellenvektor q ist der Übergang von Phononenlinien zu wachsender Bedeutung von Mehrphononprozessen und schließlich dem Spektrum freier Teilchen.

Als Resultat erhielt ich zunächst nur Phononenspektren. Damit wurde ich Anfang 1966 promoviert.

In weiteren Rechnungen konnten zum Beispiel auch Linienformen berechnet werden, wie sie bei inelastischer Neutronenstreuung zu erwarten sind. Bei kleinen Impulsüberträgen zeigen sich relativ scharfe Phononenlinien. Bei größeren Impulsüberträgen wächst der Beitrag von Mehrphononprozessen bis hin zu sehr breiten Linien, die der Streuung an freien Teilchen entsprechen. Dieses Verhalten ist charakteristisch für Quanten kristalle und ist in Kristallen der schwereren Edelgase weit weniger ausgeprägt. Die Ergebnisse dieser Rechnungen wurden durch Neutronenstreuexperimente in Brookhaven gut bestätigt. Erwähnt

sei, dass ich obiges Bild bereits schon einmal vor 45 Jahren hier gezeigt habe. Damals waren diese Ergebnisse aktuell, heute ist das Interesse an Phononenspektren weitgehend verschwunden.

Ein wichtiges jährliches Ereignis war immer die Nacht der Kernbohrer (NAKEBO), ein mehrtägigen Faschingsfest, für dessen Organisation und Dekoration jeweils ein Institut zuständig war. 1966 war die theoretische Physik dran. Das bedeutete mehrere Wochen Arbeit. Das Fest war dann immer recht schön und lustig. Wolfgang Wild kam gerne aufwendig als historische Person verkleidet und spielte diese Rolle dann auch sehr überzeugend.

Zufällig, am Rosenmontag 1966, hatten wir Prof. Lewis Nosanow aus Minneapolis, *den* Experten für Quantenkristalle, zu Besuch. Er war sehr erstaunt was da so vor sich ging. Wir fanden aber auch Zeit uns fachlich zu unterhalten, aber auch darüber, ob irgendwann einmal eine Postdoc-Stelle in Minneapolis zur Verfügung stünde.

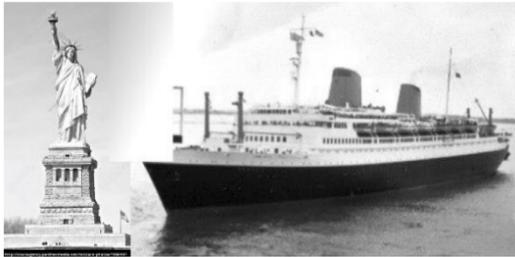


Abb. 8. Mit dem Schiff (Europa) ins gelobte Land.

Minneapolis-Minnesota 1967–1969

Im folgenden Jahr war es dann so weit. Mit "Green Card" und zwei Überseekoffern ging es per Schiff ins damals für uns gelobte Land. In Minneapolis wurden wir herzlich von der Fakultät aufgenommen. Als *Assistant*-Professor hatte ich eine sehr angenehme Zwischenstellung zwischen *Graduate Students* und *Faculty*. Eine wichtige Rolle spielte auch der *Faculty Club*. Leider existiert bei uns keine entsprechende Einrichtung.

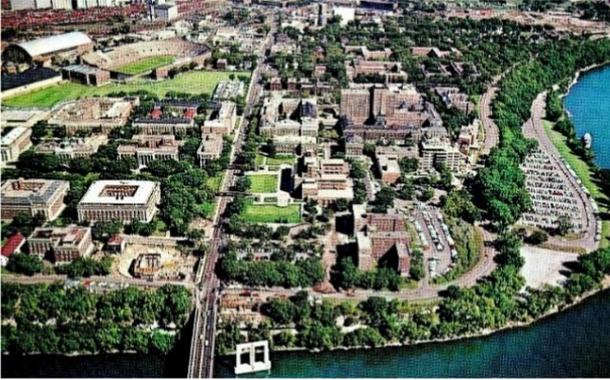


Abb. 9. Campus der University of Minnesota am Mississippi in Minneapolis.

Ich beschäftige mich weiter mit Quantenkristallen. Ich war aber auch Teil einer recht aktiven Tieftemperatur Gruppe mit vielen interessanten Besuchern und Gästen.



Abb. 10. Logo der University of Minnesota (links) und "Boundary waters" im Norden von Minnesota (rechts).

Vermutlich hatte die Existenz dieser Gruppe nichts mit den winterlichen Temperaturen in Minnesota zu tun. Tatsächlich war der Winter sehr schön, mit langen sonnigen, aber bitter kalten Perioden. Der Winter konnte allerdings auch recht lang sein. Im ersten Jahr hatten wir für 5 Monate Schnee. Der Übergang zum

Sommer ging dann sehr schnell, innerhalb weniger Wochen. Da konnten wir dann die 10 000 Seen im Norden von Minnesota genießen. Minneapolis war aber auch ein gewisses Zentrum im Norden des Mittleren Westens mit einem sehr guten Orchester und einer Reihe kleinerer interessanter Bühnen. Wir haben diese Zeit sehr genossen. Obwohl wir die Gelegenheit hatten zu bleiben, entschlossen wir uns nach zwei Jahren wieder zurück zu kehren. Ein Grund dafür war unsere dort geborene Tochter, die wir nicht als amerikanisches *Kid* groß werden lassen wollten. Das erste Jahr zurück im alten Kreis mit all den Problemen und Einschränkungen war jedoch nicht ganz einfach.



Abb. 11. Hexentor in Jülich (links), Herbert Wagner (rechts),

KFA-Jülich 1970–1974

Im Jahr 1970 wurde das Institut für Festkörperforschung an der Jülicher Kernforschungsanstalt (KFA), heute Forschungszentrum Jülich, stark ausgebaut. Herbert Wagner, den ich als Assistent in München bereits kannte, war als Leiter eines neuen Teilinstituts berufen. Seine Arbeitsgruppe rekrutierte er vorwiegend aus Münchner Ressourcen. Franz Wegner war ebenfalls dabei. Das Klima in dieser Gruppe war sehr gut und, dank Herbert Wagner, sehr anregend. Dort sind auch viele langdauernde Freundschaften entstanden. Man fand ja schnell ein gemeinsames Gesprächsthema. Man schimpfte auf das Kaff Jülich und wie schön es doch in München war. Tatsächlich war die KFA das Beste an Jülich, auch

wenn Aachen, Köln und Düsseldorf gut erreichbar waren. In dieser Zeit kam meine Beschäftigung mit Quantenkristallen zum Abschluss. Andere Themen, zum Beispiel Wasserstoff in Metallen, waren am IFF von Interesse. Darauf möchte ich aber hier nicht näher eingehen.



Abb. 12. Seekasino der Kernforschungsanlage Jülich, heute Forschungszentrum Jülich.

Heidelberg 1975 –

Nach einer drei monatigen Gastprofessur in Florida erhielt ich den Ruf nach Heidelberg. Man hatte dort beschlossen die Statistische Physik und Festkörperphysik als neues Arbeitsgebiet am Institut für Theoretische Physik einzurichten, und man hatte zwei Lehrstühle dafür vorgesehen. Nachdem zunächst Franz Wegner berufen wurde hatte ich wenig Hoffnung. Trotzdem scheute man sich offensichtlich nicht, zwei Kandidaten aus dem gleichen Stall zu berücksichtigen. Etwas später gab es dann noch eine weitere Professur in der Angewandten Physik, die mit Siegfried Hunklinger besetzt wurde. Hier entwickelte sich später eine enge und fruchtbare Zusammenarbeit zwischen meiner Arbeitsgruppe und der Hunklinger'schen Gruppe, die an Tunnelsystemen in Gläsern bei tiefen Temperaturen arbeitete.

Auch hier war die Aufnahme in der Fakultät herzlich und hilfsbereit. Man war eine große Familie und es entstanden gute anhaltende Freundschaften. Das Institut für Theoretische Physik war ursprünglich im Philosophenweg 16 untergebracht. Kurz vor meinem Amtsantritt Anfang 1975 kam die Villa Philosophenweg 19 dazu, in der Jörg Hüfner, Franz Wegner und ich mit unseren Mitarbeitern Platz fanden. Einen gewissen Ersatz für den fehlenden *Faculty Club* bildete das tägliche Butterbrotessen im Seminarraum des Instituts. Hier war Zeit für gute Gespräche mit vielfältigen Teilnehmern. Der Kern, bestehend aus unserem Triumvirat, war fast immer dabei. In den ca. 30 Jahren unserer gemeinsamen Tätigkeit wurden geschätzte 3 Tonnen Butterbrot umgesetzt.



Abb. 13. Blick aus meinem Bureau im Philosophenweg 16.

Es war bei uns üblich, dass jeder jede Kursvorlesung zu halten hatte. Ich habe das immer gerne getan, hatte aber durchaus meine Lieblingsvorlesung, die Statistische Physik und Thermodynamik. Neben der Herausforderung, Grundlagen immer neu zu überdenken, konnten aus dem Kreis der Hörer auch immer wieder gute Diplomanden und Doktoranden gewonnen werden. Daneben gaben Spezialvorlesungen die Gelegenheit, sich selbst in neue

Themenkreise einzuarbeiten. Die Verknüpfung von Lehre und Forschung halte ich immer noch für ganz wesentlich. Das wurde mir besonders bewusst, da ich ja vorher vier Jahre an einem reinen Forschungsinstitut, der KFA Jülich, tätig war.

Von den Forschungsthemen, die im Laufe der Jahre für mich und meine Gruppe von Interesse waren, möchte ich nur auf einen Themenkreis genauer eingehen:

Spingläser und Hirngespinnste (Neuronale Netze)

Unter **Spingläsern** versteht man zunächst verdünnte magnetische metallische Legierungen in denen aufgrund der oszillierenden RKKY-Wechselwirkung Frustration auftritt und auch bei tiefen Temperaturen keine magnetische Ordnung vorhanden ist. Das Auffinden von Grundzuständen in entsprechenden Modellen ist ein *NP-complete* Problem. Grob gesprochen sind das Probleme, die nicht in einer Zeit gelöst werden können, die polynomial mit der Größe des Systems, in unserem Fall der Zahl N der Spins, anwächst. In dieser Klasse finden sich viele Beispiele kombinatorischer Optimierungsprobleme, zum Beispiel das *Traveling Salesman Problem*. Ein beliebter Algorithmus zur Behandlung derartiger Probleme ist *Simulated Annealing*. Das ist aber genau der Prozess, den ein physikalisches System beim langsamen Abkühlen durchläuft. In Spingläsern, aber auch in realen Gläsern, existiert ein enger Temperaturbereich, oder sogar eine scharfe Übergangstemperatur, unterhalb der die notwendige Zeit bis zum Erreichen des Gleichgewichts divergiert. In speziellen Modellen, zum Beispiel dem *Sherrington-Kipkpatric (SK)* Modell, einem Modell für einen ungeordneten Magneten mit langreichweitiger Wechselwirkung, zeigt sich in der Tat ein Phasenübergang, an dem das System aus einem ergodischen in einen nicht ergodischen Zustand übergeht. Entsprechend der von Parisi 1979 vorgeschlagenen Lösung des *SK*-Modells wird im Rahmen einer sogenannten *Replica*-Rechnung eine Permutationsgruppe mit n Elementen im Grenzfall $n \rightarrow 0$ ultrametrisch gebrochen.

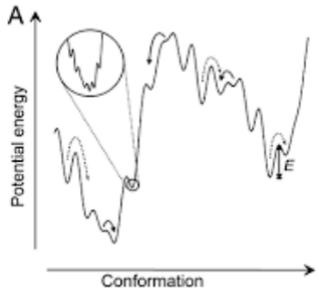


Abb. 14. Energielandschaft eines Spinglases (schematisch).

Als Alternative zu dieser Rechnung kann man die Dynamik derartiger Systeme untersuchen und findet divergierende Zeitskalen unterhalb einer charakteristischen Temperatur. Diese Temperatur kann in ähnlichen Modellen höher sein als die kritische Temperatur aus der *Replica*-Rechnung. Das erinnert an den Glasübergang, bei dem die Einfriertemperatur T_g höher ist als die sogenannte Kauzmann-Temperatur T_K in Gläsern

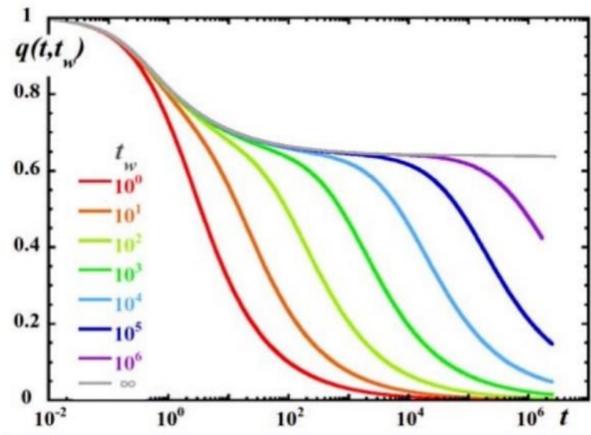


Abb. 15. Der Zerfall der Korrelationen in Spingläsern hängt von der Wartezeit t_w zwischen Abkühlen und Beginn der Messung ab.

Betrachtet man die Dynamik derartiger Systeme, zeigt sich dass zum Beispiel der Zerfall von Korrelationen von der Wartezeit zwischen Abkühlen und Beginn der Messung abhängt. Das alles deutet darauf hin, dass im Phasenraum derartiger Systeme eine Vielzahl metastabiler Zustände existiert, die durch eine Hierarchie von Barrieren getrennt sind.

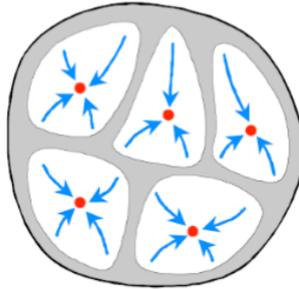


Abb. 16. In einem rückgekoppelten Neuronales Netz, dem Hopfield-Modell eines assoziativen Speichers, werden Muster in Form von Attraktoren gespeichert.

Im Jahr 1982 stellte *John Hopfield* ein vollständig rückgekoppeltes **Neuronales Netz** vor, das als assoziativer Speicher funktioniert. Man betrachtet dabei abstrakte Muster in einem System von binären Neuronen. Die Aufgabe besteht darin, dass man dem System einen Teil eines eingprägten Musters vorgibt, und dass das System das vollständige Muster rekonstruiert. Die Idee ist nun, die Wechselwirkungen zwischen den Neuronen so zu programmieren, dass die vorgegebenen Muster metastabile Zustände im Sinn von Spingläsern werden.

Bis dahin verstand man unter Artifizialen Neuronales Netzen (**ANN**) vorwiegend vorwärts gerichtete Netzwerke, die hauptsächlich das Interesse von Mathematikern und Informatikern fanden. Mit dem Hopfield Modell wurde das Gebiet auch für Physiker mit Hintergrund in statistischer Physik, speziell aus der Spinglas Gemeinde, also auch für uns, interessant.

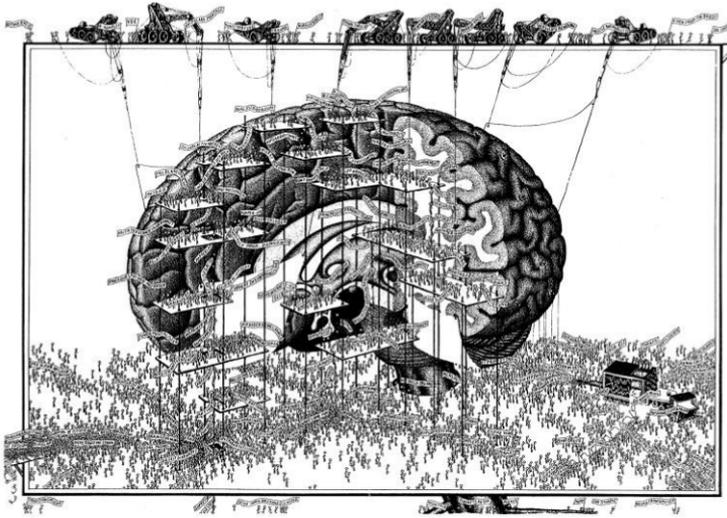


Abb. 17. So sieht der Göttinger Graphiker Uwe Brandi die Aktivitäten der Hirnforscher (© Uwe Brandi und GEO-Wissen, mit freundlicher Genehmigung des Verlags).

Diese Aktivitäten waren vorwiegend auf Europäische Länder konzentriert und über viele Jahre hinweg, bis 2003, waren wir in gemeinsamen Projekten im Rahmen des *EC-Twinning Programs* und im Program SPHINX der ESF organisiert. Wir trafen uns regelmäßig auf gemeinsamen Veranstaltungen, und das Programm förderte den Austausch von Mitgliedern. So konnte ich selbst mehrfach ein Sabbatical in Oxford, London, Paris und Rom verbringen.

Neuronale Netze, nicht nur vorwärts gerichtete, sind inzwischen eines der wichtigsten Instrumente der künstlichen Intelligenz geworden. Sie sind aber auch zentral für Projekte in der Hirnforschung, zum Beispiel bei den beiden Großprojekten, der *US Brain Initiative* und dem *EU Human Brain Project*, an dem Karlheinz Meier mit *Neuomorphic Computing* ganz wesentlich beteiligt ist.

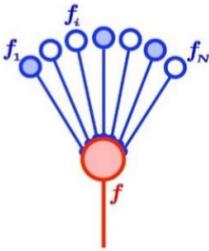


Abb. 18. Perzeptron, Grundbaustein Neuronaler Netze (links). Nervenbahnen zwischen verschiedenen Arealen im Gehirn (rechts).

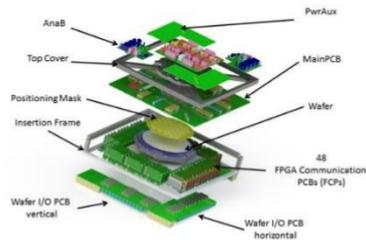


Abb. 19. Hardware zum Neuromorphic Computing in Jülich (links) und Heidelberg (rechts).

Da stellt sich natürlich die Frage, ob Spielzeugmodelle, wie sie in den 1980er Jahren in Mode kamen, Beiträge zum Verständnis der Funktionsweise des Gehirns leisten können. Ich möchte dies an einer einfachen Fragestellung erläutern.

In einem Computer sind Zahlen in einem binären Code gespeichert. 1 und 0 treten dabei mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf. Auch im Hopfield Modell eines assoziativen Speichers wurden zunächst symmetrische Zufallsmuster angenommen. Betrachtet man binäre Zufallsmuster mit mittlerer Aktivität a , ist deren Informationsgehalt pro Knoten:

$$I / N = -\log_2(a) - (1 - a) \log_2(1 - a),$$

also für $a = 1/2$ maximal.

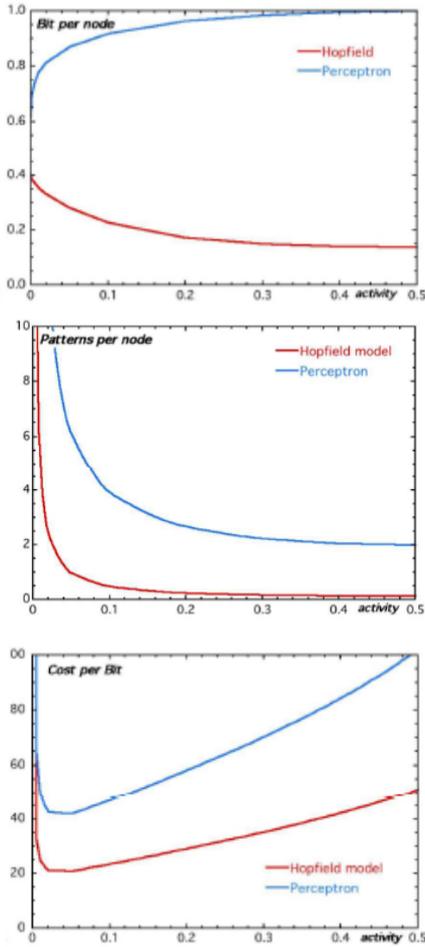


Abb. 20. Verschiedene Kenngrößen eines Perzeptrons (blau) und eines Hopfield-Modells (rot) als Funktion der mittleren Aktivität der verarbeiteten Muster.

Im Gehirn findet man typische Feuerraten, die nur 1/10 bis 1/100 der maximal möglichen Feuerrate betragen. Das legt es nahe, dass

das Gehirn tatsächlich mit spärlich kodierten Mustern, also Mustern mit $a \ll 1$, arbeitet.

Betrachten wir das Hopfield Modell als assoziativen Speicher von Mustern mit Aktivität a , oder ein Perceptron, einem Modell zur Klassifikation von Zufallsmustern mit Aktivität a . Das Perceptron ist das wohl einfachste Neuronale Netz, bestehend aus einem einzigen Schwellwert-Neuron und einer Eingangsschicht mit N Elementen.

Wie erwähnt nimmt der Informationsgehalt eines Musters mit kleiner werdender Aktivität ab. Es zeigt sich aber, dass die maximale Zahl der Muster, die von dem jeweiligen Netzwerk verarbeitet werden kann, zunimmt. Die gesamte Information, die verarbeitet werden kann, also die Information per Muster mal der maximalen Zahl der Muster, hängt nicht allzu sehr von der Aktivität ab und nähert sich einem Wert von $1/2$ Bit pro Synapse. Schließlich kann man versuchen, die Kosten für ein derartiges Netzwerk abzuschätzen. Diese bestehen aus einem konstanten Beitrag pro Neuron und einem Beitrag, der proportional zur Aktivität ist. Die Kosten pro abgerufene Bit zeigen ein Minimum bei niedriger Aktivität. Das könnte ein Argument für spärliche Kodierung sein.

Eine ganz zentrale Komponente Neuronaler Netze ist die Fähigkeit zu Lernen, also die Stärke von Synapsen, den Wechselwirkungen zwischen Neuronen, zu modifizieren. Man nimmt an, dass dies auf der Basis der Hebb'schen Regel geschieht. Diese Regel wurde von Donald O. Hebb 1949 formuliert, findet sich aber auch schon bei Sigmund Freud 1888. Sie besagt, dass die synaptische Verbindung zwischen einer Zelle A und einer Zelle B verstärkt wird, wenn Zelle B durch das Feuern der Zelle A wiederholt angeregt wird und selbst feuert. Vereinfacht bedeutet dies, dass beide Neuronen gleichzeitig aktiv sein müssen, um eine Veränderung der Synaptischen Stärke zu bewirken.

Lernen in abstrahierter Form besteht darin, dass die zu lernenden Muster dem Netzwerk aufgeprägt werden und die Synapsen entsprechend der Hebb'schen Regel modifiziert werden.

In einem Netzwerk der Größe N werden $P \sim N/a$ Muster mit Aktivität a gelernt. Bei einem Lernschritt werde die Synapse zwischen A und B bei Erfüllung der Hebb'schen Regel um einen Betrag Δ geändert. Sie hat also nach Präsentation von P Mustern, einen typischen Wert $W \sim Pa^2\Delta \sim aN\Delta$. Die damit notwendige Genauigkeit ist:

$$\Delta / W \sim \frac{1}{aN}$$

Setzt man für N die typische Zahl von Synapsen 10^4 ein, und eine Genauigkeit von etwa 1%, ist eine Aktivität $a < 0.01$, also spärliche Kodierung, erforderlich.

Im Rahmen derartiger Untersuchungen lassen sich weitere Argumente für *Sparse Coding* finden. Die Beschränkung aufgrund der notwendigen Genauigkeit bei Lernvorgängen erscheint mir jedoch ganz wesentlich.

Dies möge für den Moment genügen. Neben der Beschäftigung mit Modellen hat mir aber besonders das Kennenlernen von physiologischen und anatomischen Aspekten der Funktion des Gehirns Spass gemacht und Bewunderung für diese phantastische Maschinerie hervorgerufen. Als Folge dieser Aktivitäten habe ich auch mehrfach Vorlesungen über physiologisch-anatomischen Hintergrund und einfache Modelle Neuronaler Netze gehalten.

Rektorat Siebke 1997–2001

Als Rektor ab Wintersemester 1997 wurde der Professor für Volkswirtschaft, Jürgen Siebke gewählt. Er bat mich als Prorektor für Forschung in seinem Rektorat mit zu wirken. Als Dekan und gewähltes Mitglied des Senats hatte ich bereits vorher Erfahrung mit der Universitätsleitung gewonnen. Mit etwas gemischten Gefühlen sagte ich zu. Sein Arbeitsstil kam mir sehr entgegen. Er konnte Aufgaben delegieren, und wir hatten von Anfang an ein gegenseitiges Vertrauensverhältnis. Als Prorektor für Forschung wurde ich durch Ulrike Albrecht, der Leiterin des Forschungsdezernats, auf höchst kompetente Weise unterstützt.



Abb. 21. Alte Universität, Sitz des Rektorats.

Im vorausgehenden Rektorat Ulmer hatte die Universität im Rahmen des Programms "Leistungsfähigkeit durch Eigenverantwortung" der Volkswagenstiftung ein Projekt gewonnen. Dieses wurde mit 5 Mio DM gefördert. Die tatsächliche Arbeit begann mit dem IMPULSE-Projekt Anfang 1998. Ich war als Vertreter des Rektorats daran beteiligt, was sich als fordernd und arbeitsintensiv, aber auch sehr interessant erwies. Ziel des Projektes war es eine weitgehend dezentrale Ressourcenverantwortung im Rahmen von Globalhaushalten zu erreichen und die dafür notwendigen Maßnahmen, wie der Einrichtung eines kaufmännischen Rechnungswesens, oder der Implementierung von Mechanismen zur leistungs- und bedarfsorientierten Mittelvergabe, umzusetzen.

Wichtig war für mich aber auch die Erkenntnis, dass die Universität nicht am Philosophenweg endete, und dass man auf der Straße Kollegen aus anderen Fakultäten treffen konnte. Daneben hat der Rektoratsbetrieb die Begegnung mit vielen interessanten Menschen mit sich gebracht. Auch im Rückblick waren die vier Jahre eine Zeit, die ich nicht missen möchte. Die daraus erwachsene Freundschaft mit Jürgen Siebke wurde leider durch seinen Tod vor wenigen Wochen beendet.

Emeritierung 2004

Den Preis, den ich dafür gezahlt habe, war die Auflösung meiner Arbeitsgruppe am Institut für Theoretische Physik. Ich habe keine neuen Doktoranden angenommen, laufende Projekte wurden beendet und Mitarbeiter fanden andere Aufgaben. In den drei Jahren bis zur Emeritierung war es nicht angebracht, eine neue Gruppe aufzubauen. Geblieben ist aber das Interesse an Wissenschaft und dem Leben am Institut, mit Vorträgen, gelegentlicher Beteiligung an Promotionen und ohne Verpflichtungen.

Mein ehemaliger Chef und Freund, Herbert Wagner, hat es mal so ausgedrückt: Er kommt sich vor wie ein alter Grubengaul. Er trabt immer noch im Kreis herum, weil er das so gewohnt war. Es macht Spass, aber es kommt schon lange kein Wasser mehr.

Wichtig ist mir zum Schluss mein Dank an Universität, Fakultät und Institut, besonders aber auch an meine Familie, die oft viel Geduld aufbringen musste.



Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg am 18. Januar 2018.