

“Realität’ ist, was wir als wahr annehmen. Was wir als wahr annehmen, ist, was wir glauben. Was wir glauben, basiert auf unseren Wahrnehmungen. Was wir wahrnehmen, hängt davon ab, was wir suchen. Was wir suchen, hängt davon ab, was wir denken. Was wir denken, hängt davon ab, was wir wahrnehmen. Was wir wahrnehmen, bestimmt, was wir glauben. Was wir glauben, bestimmt, was wir für wahr halten. Was wir für wahr halten, ist unsere Realität.”¹

2. Naturwissenschaften

Arbeitsfelder von Imaging Science

Im Folgenden werden anhand von viernaturwissenschaftlichen Forschungsgebieten die wissenschaftliche Nutzung diverser bildgebender Verfahren im Überblick vorgestellt. Die Wissenschaftler arbeiten auf diesem Gebiet zur Zeit weitestgehend ohne interdisziplinäre Kommunikation. Die fachübergreifenden Forschungsansätze sollen hier, soweit sie sich andeuten, besonders beachtet werden.

Der im ersten Kapitel vorgestellte Fachbereich *Imaging Science* stellt sich die Aufgabe, zwischen den Naturwissenschaften, in Bezug auf die jeweiligen bildgebenden Verfahren, vermittelnd zu agieren. Denn oft sind die Problemstellungen, z.B. auf der Softwareebene, verwandt und müßten nicht für jeden Fachbereich neu definiert werden.

Die angewendeten bildgebenden Verfahren in der Astro- und Teilchenphysik, in der Molekularbiologie, sowie in der Gehirnforschung, sind identisch, oder zumindest eng verwandt. In der durchgeführten Literaturrecherche weist nichts auf eine interdisziplinäre Kommunikation zwischen den Forschungsbereichen bezüglich dieser Verfahren hin. Selbst innerhalb der einzelnen Institute und Forschungseinrichtungen scheint es schwer, zwischen Physik, Biologie und Medizin zu vermitteln. Die Gründung des Fachbereiches Computerwissenschaften war ein erster Schritt hin zu einer verstärkten transdisziplinären Kommunikation.

¹ siehe G. Zukav, 1981, “Die tanzenden Wu Li Meister”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 351

2.1.

KOSMOLOGIE UND TEILCHENPHYSIK

Das Arbeitsgebiet der Astronomen wird der Physik zugerechnet. Sterne, Galaxien und der Raum dazwischen werden durch die selben grundlegenden Gesetze der Mechanik, Quantentheorie, Elektro- und Thermodynamik beschrieben, wie in allen Bereichen der Physik.

Fortschritte in den kosmologischen Fragestellungen, einige werde ich im Folgenden exemplarisch und im Bezug auf die Verwendung bildgebender Verfahren vorstellen, sind offensichtlich unmittelbar mit Fortschritten in der Elementarteilchenphysik verknüpft. "Andererseits folgt aus diesem Zusammenhang aber auch, daß der Vergleich der Ergebnisse kosmologischer Modellrechnungen mit astronomischen Beobachtungen erlaubt, Ansätze und Voraussagendertheoretischen Elementarteilchenphysik zu testen. Wegen der extremen Bedingungen im Urknall erreichen solche kosmologischen Tests Energiebereiche, die von Menschenhand gebaute Beschleuniger nie erreichen werden."²

Das Ergebnis dieser Entwicklung ist daher, "daß sich zwischen Astronomen, die den großräumigen Aufbau unserer Welt erforschen und den Elementarteilchenphysikern, die die Eigenschaften der kleinsten Grundbausteine unserer Welt aufzuklären versuchen, in den letzten Jahren eine überraschend enge Interessengemeinschaft und Zusammenarbeit ergab. Beobachtungen mit astronomischen Großteleskopen liefern heute bereits wichtige Anhaltspunkte für die noch unbekanntenen Eigenschaften der Elementarteilchen. Umgekehrt liefern Beschleunigerexperimente heute wichtige Beiträge zur Einschränkung der freien Parameter kosmologischer Weltmodelle."³

Eingangs werden die Fragestellungen und Verfahrensweisen der Astrophysik vorgestellt. Dieses wird sehr schnell zum Forschungsgebiet der Teilchenphysik

²siehe I. Appenzeller, 1990, "Einführung", in "Kosmologie und Teilchenphysik", Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 8

³siehe I. Appenzeller, 1990, "Einführung", in "Kosmologie und Teilchenphysik", Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 8

führen und sich teilweise miteinander verbinden. Dieses Verfahren erscheint jedoch aus den genannten Gründen des übergeordneten Zusammenhanges dieses Fachbereiches sinnvoller, als beide separat zu behandeln.

Streng genommen erfüllt die Astronomie nicht die Kriterien einer exakten Wissenschaft, da ein sonst wesentlicher Bestandteil der Physik in der Astrophysik fehlt: das Experiment unter kontrollierten Bedingungen. "Die Astronomen müssen sich mit der Strahlung begnügen, die ihre Forschungsobjekte sozusagen freiwillig aussenden; eine Wiederholung der Messungen unter identischen Bedingungen oder eine systematische Manipulation der Meßbedingungen ist nicht möglich."⁴

Leuchtkraft, Temperatur und Größe der meisten Himmelskörper sind nahezu konstant, daher läßt sich eine interessante astronomische Entdeckung meistens durch nachfolgende Beobachtungen verifizieren.

Die Wissenschaft vom Weltall ist Geschichtsforschung, da zum einen der Blick in die Tiefen immer ein Blick in die Vergangenheit ist. Ein Himmelskörper wird von uns so gesehen, wie er zu einer Zeit aussah, die seiner Entfernung in Lichtjahren entspricht.⁵ Zum anderen vermag die Kosmologie die Ursprünge unserer unmittelbarer kosmischen Umgebung zu ergründen und damit zentrale Fragen nach der kosmischen Wurzel der Menschheit zu beantworten. Wie sind die Erde und das gesamte Planetensystem entstanden? Woher stammen die chemischen Elemente, aus denen unsere Umwelt und unsere Körper aufgebaut sind? Was ist die Vorgeschichte der Galaxis? Diesen und ähnlichen Fragen gehen die Astronomen mit ihren immer leistungsfähigeren Instrumenten nach.

"Moderne astronomische Teleskope, hochempfindliche Lichtdetektoren und leistungsfähige Radiowellenempfänger erlauben es heute, Galaxien und

⁴siehe U. Borgeest, 1996, "Fragen der modernen Astrophysik", in "Digest: Astrophysik", Spektrum der Wissenschaft Verlag, Heidelberg, Seite 6

⁵vgl. U. Borgeest, 1996, "Fragen der modernen Astrophysik", in "Digest: Astrophysik", Spektrum der Wissenschaft Verlag, Heidelberg, Seite 6

Quasare in Entfernungen zu beobachten, aus denen die Lichtlaufzeit mehr als 90 Prozent des Weltalters seit dem Urknall beträgt. Im Lichte der kosmischen Mikrowellenstrahlung sehen wir unser Universum in dem Zustand, den es wenige hunderttausend Jahre nach dem Urknall hatte. Anhand der relativen Häufigkeit der leichten Elemente (Wasserstoff, Deuterium, Helium) erhalten wir sogar indirekte, aber recht zuverlässige Informationen über den Zustand unserer Welt, als diese gerade erst etwa eine Sekunde alt geworden war.”⁶

⁶siehe I. Appenzeller, 1990, "Einführung", in "Kosmologie und Teilchenphysik", Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 8

2.1.1. Neue Astronomie

Die traditionelle Astronomie befaßte sich damit, das Licht - optische Strahlung - von Objekten im Weltraum zu studieren. Die Neue Astronomie, eine Entwicklung der letzten zwei oder drei Jahrzehnte, erfaßt alle Strahlungen, die Himmelsobjekte aussenden: Gammastrahlen, Röntgenstrahlen, ultraviolettes, sichtbares und infrarotes Licht, sowie Radiowellen.⁷

Der Wellenbereich des Lichtes ist sehr schmal. "Er umfaßt nur Strahlung von Wellenlängen, die 30 Prozent kürzer, bis 30 Prozent länger sind, als die Wellenlänge, für die unsere Augen die größte Empfindlichkeit besitzen. Die neue Astronomie erfaßt extreme Strahlungen. Die kürzesten Gammastrahlen haben Wellenlängen von weniger als einem Millionstel, die längsten Radiowellen solche von mehr als dem Hundertmillionenfachen der Wellenlänge des Lichtes. Um einen Vergleich mit dem Schall herzustellen: die traditionelle Astronomie war ein Versuch, die Symphonie des Universums mit Ohren zu hören, die nur das mittlere C und die beiden Töne davor und danach wahrnehmen konnten."⁸ (In einer orchestralen Symphonie können bis zu 88 Töne verwendet werden.) Heute unterscheidet man zwischen *Optischer Astronomie*, *Infrarotastronomie*, *Radioastronomie*, *Ultraviolettastronomie* und *Röntgen-/Gammastrahlen-Astronomie*.

In den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts wurden zufällig Radiostrahlen außerhalb der Erde entdeckt. Damit war bewiesen, daß nicht-optische Strahlung aus dem Weltraum existiert. Aber erst in den vergangenen Jahrzehnten wurden zwei weitere Probleme gelöst. Zum einen müssen neuartige Teleskope zur Verfügung stehen, um andere Strahlungsarten einzufangen und sie zu einem Bild zusammenzufügen. Zum anderen neue Detektoren, die das Bild registrieren und es uns auf eine Weise zeigen, die wir verstehen können. Bilder von anderen Wellenlängen als jenem des Lichtes stehen erst seit den letzten Jahren zur Verfügung. Es sind Computertechnologien entwickelt worden, um diese Bilder

⁷vgl. N. Henbest, 1984, "Die neue Astronomie", Birkhäuser Verlag, Basel, Seite 6

⁸siehe N. Henbest, 1984, "Die neue Astronomie", Birkhäuser Verlag, Basel, Seite

zu verarbeiten.

“In vielen Fällen ist das optische Bild am wenigsten interessant. Dunkle Staubwolken im Weltraum verbergen völlig die Stellen, wo Sterne entstehen - Regionen, deren Einzelheiten bei Infrarot- und Radiowellenlängen mühelos sichtbar werden. Das Gas im Weltraum ist lichtdurchlässig und von optischen Teleskopen nicht erfaßbar, gibt aber Radiowellen und Gammastrahlen ab, so daß sie bei diesen Wellenlängen helleuchtend hervortreten. Ferne Galaxiehaufen halten Wolken von sehr heißem Gas mit einer Temperatur von Millionen Grad gefangen, diese sind nur durch ihre Röntgenstrahlenemission erkennbar. Explosionen im Mittelpunkt mächtiger Galaxien schleudern strahlenförmig Elektronen hinaus, die ungeheure Säcke von Magnetfeldern aufblähen - die größten Gebilde im Universum, aber unsichtbar, außer für Astronomen, die Radioteleskope benützen.”⁹

Tatsächlich erzeugen alle Objekte irgendeine Strahlung. Je niedriger die Temperatur, desto länger die Wellenlänge der so entstehenden Strahlung.

Bei der Darstellung der astronomischen Information durch einen Computer werden im allgemeinen Farbmonitore verwendet. Durch die Farben kann die Masse an Informationen in jedem Bild herausgearbeitet werden. Farbe besteht aus Licht verschiedener Wellenlängen. “Werden Darstellungen beispielsweise bei einer Wellenlänge im Röntgenstrahlen- oder Radiobereich erzielt, besitzt Farbe keine eigentliche Bedeutung, und wir können Farbkodierung auf vielerlei neue und eindrucksvolle Art nutzen.”¹⁰

Nun können Farben auf verschiedene Weise kodiert werden, z.B. entsprechend der Wellenlänge, wenn Beobachtungen verschiedener Wellenlängen zu einer Gesamtdarstellung verbunden werden. “Diese Methode wird häufig genutzt in der Infrarotastronomie, wo Astronomen Beobachtungen desselben Objekts bei verschiedenen Wellenlängen anstellen, um Temperaturunterschiede anzuzeigen.

⁹siehe N. Henbest, 1984, “Die neue Astronomie”, Birkhäuser Verlag, Basel, Seite

7

¹⁰siehe N. Henbest, 1984, “Die neue Astronomie”, Birkhäuser Verlag, Basel, Seite

9

Blau stellt in der Regel die Erscheinung bei kürzester Wellenlänge dar, grün bei mittlerer und rot das Bild bei der größten Wellenlänge. Farbkodierung kann aber auch Geschwindigkeit wiedergeben.”¹¹

Am häufigsten dient die Farbkodierung dazu, Dichte anzuzeigen. “Diese Methode wird weithin bei allen Wellenlängen eingesetzt - auch bei optischen, wenn man gewöhnliche Fotografien mit dem Computer verarbeitet. Der Astronom teilt den verschiedenen Helligkeitsstufen im Bild willkürlich gewählte Farben zu. Die Ergebnisse sind nicht bloß malerisch. Sie überwinden eines der Probleme fotografischer Darstellung, nämlich, daß es unmöglich ist, Einzelheiten, sowohl im schwächsten Teil einer Galaxie oder eines Nebels, als auch im hellsten zu zeigen, der mehr als tausend mal heller sein kann. Erscheinen die erstgenannten auf einer Fotografie, sind die hellen Regionen ‘ausgebrannt’, während eine kurze Belichtung, um Einzelheiten in den hellen Regionen hervortreten zu lassen, die schwachen Teile gar nicht zeigen würde. Dichte-Farbkodierung liefert Einzelheiten von hellen und dunkleren Regionen gleichzeitig in verschiedenen Farben.

Die neuen Darstellungen haben daher oft Ähnlichkeit mit Kunstwerken; die naturgegebene Kunst des Universums wird dabei unterstützt von der Fantasie des Astronomen am Computer. Die Hauptaufgabe des Astronomen besteht aber nicht darin, die unsichtbare Schönheit des Weltraums einzufangen, sondern mit dieser neuen Information den Versuch zu unternehmen, Aufbau und Maßstab des Universums und seine Veränderung im Laufe der Zeit besser zu verstehen.”¹²

¹¹siehe N. Henbest, 1984, “Die neue Astronomie”, Birkhäuser Verlag, Basel, Seite 11

¹²siehe N. Henbest, 1984, “Die neue Astronomie”, Birkhäuser Verlag, Basel, Seite 11

2.1.2. Teleskope

Seit dem 17. Dezember 1993 arbeitet das *Hubble Space Telescope* (HST) mit seiner vollen Leistungsfähigkeit. Dieses Weltraumteleskop erlaubt den Astronomen, das Universum noch detaillierter und noch genauer zu beobachten, als es jemals zuvor möglich war. "Das HST wurde mit dem Ziel entwickelt, eine große Zahl von sehr verschiedenen Beobachtungen über die gesamte Spannweite astronomischer Objekte von Asteroiden und Kometen im Sonnensystem bis zu supermassereichen Galaxiehaufen am Ende des Universumsdurchzuführen."¹³ Dies sind extreme Größenunterschiede, von 500 Kilometern eines großen Asteroiden, bis zu billionenmal größeren Galaxiehaufen.

"In seiner Umlaufbahn um die Erde kann das HST ungestört von der Atmosphäre alle Wellenlängen vom infraroten über das sichtbare Licht bis ins Ultraviolette beobachten."¹⁴

Die Daten der Beobachtung werden vom HST währenddessen über ein erdumspannendes Netz von Kommunikations-Satelliten nach White Sands, New Mexico, dem Kommunikationszentrum der NASA, gesendet. Von dort werden diese Daten den Astronomen über das NASA Goddard Space Flight Center Space Telescope Operations Control Center (STOCC) oder das Space Telescope Science Institute (STScI) via Internet oder auf Magnetband übermittelt.

"Das HST hilft den Astronomen auch bei der Ermittlung der entscheidenden 'Meßlatte'. Die Entfernungen zu astronomischen Objekten außerhalb des Sonnensystems können nicht direkt gemessen werden, daher kommen indirekte und oft unsichere Meßmethoden zur Anwendung. Je weiter ein Objekt entfernt ist, desto ungenauer ist in aller Regel die Schätzung seiner Entfernung. (...). Bei Abständen zwischen Sternen kann der Meßfehler in der Größenordnung von 5

¹³siehe S. Goodwin, 1996, "Mission Hubble. Das neue Bild des Universums", Bechtermünz Verlag, Augsburg, Seite 15

¹⁴siehe S. Goodwin, 1996, "Mission Hubble. Das neue Bild des Universums", Bechtermünz Verlag, Augsburg, Seite 16

bis 10 Prozent liegen, während bei Galaxiehaufen auch mehr als 50 Prozent möglich sind. Mit der verbesserten Auflösung des HST können auch Sterne in viel größeren Entfernungen als früher genau vermessen werden.”¹⁵

“Die wichtigste und spannendste Aufgabe, die das HST lösen helfen soll, ist der Versuch, die Größe und Natur des gesamten Universums herauszufinden. (...). Dehnt sich das Universum bis in alle Ewigkeit aus, oder wird es irgendwann einmal wieder in sich zusammenfallen? Wie schnell dehnt es sich aus? Wie groß ist das Universum? Das HST spielt eine wichtige Rolle bei der Lösung dieser und anderer Fragen.”¹⁶

Am 12. Februar 1997 wurde eine Acht-Meter-Antennen-Schale zu ihrer Ellipsenbahn um die Erde in 20.000 Kilometer Höhe transportiert. Sie soll mit bis zu zwanzig auf der Erde verteilten Radioteleskopen gekoppelt werden und damit das Herzstück des größten Teleskops aller Zeiten bilden.

Beim Vereinen der Signale in einer Zentralstation überlagern sich die empfangenen Radiowellen, die verschieden lange Wege zurückgelegt haben. Dadurch entstehen Interferenzen, die das endgültige Bild detailreicher machen. Je weiter entfernt die einzelnen Teleskope voneinander stehen, um so höher die Auflösung des Bildes. Von diesem ersten weltraumgestützten Radio-Interferometer erwarten die Experten neue Hinweise über die vermuteten *Schwarzen Löcher* und bessere Daten über Quasare.¹⁷

“Zur Klärung dieser Phänomene sind detaillierte Bilder dringend notwendig.”¹⁸

Russische Wissenschaftler arbeiten zur Zeit an einem Teleskop, das in 80.000 Kilometer Höhe eingesetzt werden soll. Damit werden in der Zukunft zehnfach kleinere Einheiten zu erkennen sein, als mit der erdgebundenen Interferometrie.¹⁹

¹⁵siehe S. Goodwin, 1996, “Mission Hubble. Das neue Bild des Universums”, Bechtermünz Verlag, Augsburg, Seite 16

¹⁶siehe S. Goodwin, 1996, “Mission Hubble. Das neue Bild des Universums”, Bechtermünz Verlag, Augsburg, Seite 16

¹⁷vgl. Zeitschrift GEO, Juni 1997, Gruner und Jahr Verlag, Hamburg, Seite 139

¹⁸siehe E. Preuß von Bonner, Max-Planck-Institut für Radioastronomie, in Zeitschrift GEO, Juni 1997, Gruner und Jahr Verlag, Hamburg, Seite 139

2.1.3. Dunkle Materie

Die Forschung der letzten Jahre zeigt, daß die "Weltparameter schon in frühen Phasen des Urknalls festgelegt wurden und daß sie eng mit den Eigenschaften der Grundbausteine der Materie, also der Elementarteilchen, zusammenhängen."²⁰

Die Astrophysiker sind daher bei ihrer Erforschung der frühen, nicht direkt beobachtbaren Phasen unseres Kosmos' auf physikalische Modellrechnungen angewiesen.

Es bleibt das wohl "größte Problem der modernen Astrophysik, wie sich Galaxien und die noch größeren Strukturen - Galaxiehaufen und sogenannte Superhaufen - bestehend aus tausenden von Sternsystemen, gebildet haben. Auch Computersimulationen helfen nicht weiter, denn es ist unbekannt, welche Arten von Materie im Universum überhaupt vorhanden sind. Jede Galaxie enthält mehr Masse, als in Sternen und interstellarem Material direkt nachweisbar ist. Gäbe es nur diese Formen der Materie, so müßte die Fliehkraft unsere Sonne mitsamt ihren Planeten hinaus in den intergalaktischen Raum tragen. Erst unter der Annahme, daß die Galaxie zu 90 Prozent aus einer bisher unbekanntem, sogenannten Dunklen Materie besteht, gibt es ein Gleichgewicht zwischen Fliehkraft und Gravitation."²¹

Inzwischen haben sich die Anzeichen gehäuft, "daß der größte Teil der Masse im Universum dunkel ist: unsichtbar für heutige Teleskope oder sonstige Beobachtungsgeräte."²²

"Die Frage nach der dunklen Materie - wieviel es davon gibt, wie sie verteilt ist und woraus sie besteht - ist eng mit den Fragen nach der großräumigen Struktur

¹⁹vgl. Zeitschrift GEO, Juni 1997, Gruner und Jahr Verlag, Hamburg, Seite 139

²⁰siehe I. Appenzeller, 1990, "Einführung", in "Kosmologie und Teilchenphysik", Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 8

²¹siehe U. Borgeest, 1996, "Fragen der modernen Astrophysik", in "Digest: Astrophysik", Spektrum der Wissenschaft Verlag, Heidelberg, Seite 9

²²siehe L. M. Krauss, 1990 "Dunkle Materie im Universum", in "Kosmologie und Teilchenphysik", Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 32

und der Entwicklung unseres Universums verknüpft. Da dunkle Materie wahrscheinlich die dominierende Form von Masse darstellt, muß sie die Entwicklung der heute sichtbaren Komponenten des Universums beeinflussen haben. Das Problem der kosmischen Strukturen hängt wiederum von der engen Verbindung zwischen Makro- und Mikrophysik ab, den beiden Säulen des physikalischen Wissens, welche die Wechselwirkungen auf der größten Skala (derjenigen des Universums als ganzem) wie der kleinsten Skala (jener der Elementarteilchen, aus denen alle Materie besteht) beschreiben.“²³

Die Beobachtung, daß das Universum sich ausdehnt, führt zu dieser Korrelation. Wenn in der Astrophysik diese Expansion um zehn bis zwanzig Milliarden Jahre zurückextrapoliert wird, verschmelzen die kosmologischen und die atomaren Skalen miteinander. Denn während dieser Entstehungsphase des Universums “befanden sich die größten heute beobachtbaren Strukturen in Raumbereichen, deren Dimensionen für Elementarteilchenprozesse charakteristisch sind.“²⁴ In den heutigen Strukturen, so vermuten die Astrophysiker, müssten Spuren der damaligen Vorgänge zu finden sein. Und so scheint es konsequent, “Beiträge zur Lösung des Problems der dunklen Materie von Fortschritten der Physik hochenergetischer Teilchen zu erwarten.“²⁵

Es scheint, daß die Astrophysik einen Punkt erreicht hat, an dem sich Entstehung, Evolution und gegenwärtige Struktur des Universums nahtlos zu einem einzigen Problemfeld zusammenfügt. Dann wäre es nicht mehr möglich, sich nur mit einem Teil des Puzzles zu befassen - wir müßten das Ganze im Blick haben.²⁶

Die Theorie der dunklen Materie und die Überlegungen zu *Super-* bzw.

²³siehe L. M. Krauss, 1990 “Dunkle Materie im Universum”, in “Kosmologie und Teilchenphysik”, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 32

²⁴siehe L. M. Krauss, 1990 “Dunkle Materie im Universum”, in “Kosmologie und Teilchenphysik”, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 32

²⁵siehe L. M. Krauss, 1990 “Dunkle Materie im Universum”, in “Kosmologie und Teilchenphysik”, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 32

²⁶vgl. J. Trefil, 1990, “Fünf Gründe warum es die Welt nicht geben kann. Die Astrophysik der dunklen Materie”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 223-

Kosmischen Strings sind Beispiele für diese Entwicklung. Es liegt die Schlußfolgerung nahe, "daß dunkle Materie in einer Form existieren muß, die wir noch nie gesehen haben und deren Eigenschaften uns völlig unbekannt sind."²⁷

Die mit diesem Problem beschäftigten Theoretiker "untersuchen eine gerade populäre Theorie über die Wechselwirkungen der elementaren Bestandteile der Materie und stellen fest, daß die Theorie die Existenz irgendeiner Art neuer Teilchen entweder erfordert, oder zumindest gestattet. Dann werden die Erfordernisse für die Beschaffenheit des noch gar nicht entdeckten Partikels untersucht, und wenn sich dabei herausstellt, daß kalte dunkle Materie (...) aus diesen Teilchen bestehen könnte, wird es als Entdeckung der grundlegenden Konstituente des Universums"²⁸ veröffentlicht.

Diese Suchmethode veranschaulicht am besten das Ineinandergreifen von Teilchenphysik und Kosmologie. Die Existenz neuartiger Teilchen wurde ursprünglich aus Gründen vorgeschlagen, die nichts mit der Struktur des Universums zu tun hatten. "Die Untersuchungen ihrer Eigenschaften wurden allein von den Erfordernissen vorangetrieben, die sich aus den zur Erklärung der Wechselwirkungen zwischen den Elementarteilchen entwickelten Theorie ergeben. Erst später erkannte man, daß diese Partikel auch in der Kosmologie eine wichtige Rolle spielen könnten."²⁹

²⁷siehe J. Trefil, 1990, "Fünf Gründe warum es die Welt nicht geben kann. Die Astrophysik der dunklen Materie", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 177

²⁸siehe J. Trefil, 1990, "Fünf Gründe warum es die Welt nicht geben kann. Die Astrophysik der dunklen Materie", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 177-178

²⁹siehe J. Trefil, 1990, "Fünf Gründe warum es die Welt nicht geben kann. Die Astrophysik der dunklen Materie", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 178

2.1.4. String-Theorien

Es würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, auf sämtliche Theorien - auch zur Standardtheorie des Urknalls gibt es Alternativen³⁰ - und Fragestellungen im Rahmen des derzeitigen Diskussionsstandes der Astro- und Teilchenphysik einzugehen. Trotzdem möchte ich exemplarisch die Theorie der Superstrings erläutern, um eine Vorstellung der gegenwärtigen Weltmodelle in der Physik anzudeuten.

“Die bei weitem größte Zahl der exotischen Kandidaten für *Dunkle Materie* ergibt sich aus einem Prinzip, das unter dem Namen *Supersymmetrie* bekannt ist. Die Theorien, die Supersymmetrie voraussetzen, sind jene, die alle vier Grundkräfte zu vereinen suchen, also einen Zustand beschreiben, der im allerersten Moment nach dem Punkt Null geherrscht haben muß.”³¹

“Bis jetzt haben die theoretischen Physiker Quantentheorien für drei der vier in der Natur vorkommenden Kräfte entwickelt: für die starke, die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung.”³² Es bestand bis vor kurzem wenig Aussicht, Einsteins Theorie der Gravitation, der vierten Kraft, in den Rahmen der Quantenmechanik einzufügen zu können.³³ In den letzten zehn Jahren schöpften die Elementarteilchenphysiker wieder Hoffnung, begründet auf die Entwicklung einer neuen Theorie, der sogenannten *Superstring-Theorie*. “In der Superstring-Theorie und in jeder anderen String-Theorie stellt man sich die Elementarteilchen als Strings (Saiten) vor. (...). Da ein String ein ausgedehntes Objekt ist, kann er genau wie eine gewöhnliche Violinsaite schwingen. Die Saitenspannung bestimmt dabei die Normalschwingungen (Harmonischen) eines Strings. In der Quantenmechanik sind Wellen und Teilchen zwei zueinander

³⁰vgl. R. Breuer (Hg.), 1993, “Immer Ärger mit dem Urknall. Das kosmologische Standardmodell in der Krise”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg

³¹siehe J. Trefil, 1990, “Fünf Gründe warum es die Welt nicht geben kann. Die Astrophysik der dunklen Materie”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 179

³²siehe M. B. Green, 1990, “Superstrings”, in “Kosmologie und Teilchenphysik”, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 150

³³vgl. M. B. Green, 1990, “Superstrings”, in “Kosmologie und Teilchenphysik”, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 150

duale Beschreibungen ein und desselben Phänomens, so daß jede Schwingungsmode eines Strings einem Teilchen entspricht. Die Frequenz der Schwingung bestimmt die Energie des Teilchens und damit seine Masse. Man faßt also die Elementarteilchen als Schwingungsmodus eines einzigen Strings auf.“³⁴

Die Superstring-Theorie ist eine Kombination der String-Theorie mit der sogenannten Supersymmetrie. “Sie vermeidet nicht nur die Probleme, denen man sich bei früheren Versuchen gegenüber sah, Gravitation und Quantenmechanik zu vereinen; sie eröffnet auch die Möglichkeit, alle in der Natur vorkommenden Kräfte als verschiedene Aspekte eines einzigen Prinzips zu betrachten.

Man vereinheitlicht die vier Grundkräfte der Natur in dieser Theorie auf eine Art und Weise, die ausschließlich durch die logische Forderung nach innerer Konsistenz bestimmt ist. Diese Entwicklung hat die Beziehungen zwischen Mathematik und Physik außerordentlich belebt. Viele Entwicklungen der modernen Mathematik tragen zum Verständnis der String-Theorien bei; andererseits werfen diese Theorien neue mathematische Fragen auf.“³⁵

In der Gravitationstheorie von Einstein sind Raum und Zeit zu einem vierdimensionalen ‘Kontinuum’ (= den Raum zusammenhängend erfüllende Materie) vereint, genannt Raumzeit. Diese Theorie muß in der Superstring-Theorie zumindest annäherungsweise enthalten sein. Die Gravitation ist in der Superstring-Theorie in einer “auf neun räumliche Dimensionen und die Zeit erweiterten zehndimensionalen Welt definiert.“³⁶ Offensichtlich müssen sechs dieser zehn Dimensionen unbeobachtbar sein. Diese sechs zusätzlichen

³⁴siehe M. B. Green, 1990, “Superstrings”, in “Kosmologie und Teilchenphysik”, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 150

³⁵siehe M. B. Green, 1990, “Superstrings”, in “Kosmologie und Teilchenphysik”, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 150

³⁶siehe M. B. Green, 1990, “Superstrings”, in “Kosmologie und Teilchenphysik”, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 151

Dimensionen müssen dann so aufgewickelt sein, "daß sich die entsprechenden Strukturen nicht beobachten lassen, weil sie zu klein sind."³⁷

"Unmittelbar nach dem Urknall (...) müssen alle zehn Dimensionen aufgewickelt gewesen sein. Im Laufe der anschließenden Expansion des Universums müssen vier von diesen zehn Dimensionen begonnen haben, sich zu 'entwickeln' und auszudehnen. Eine konsistente Beschreibung dieses Prozesses könnte vielleicht eine Vorhersage von beobachtbaren Konsequenzen im heutigen Kosmos ermöglichen."³⁸

"In gewisser Hinsicht verlief die Entwicklung der Superstring-Theorien in scharfem Gegensatz zur Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie. Im Falle der Allgemeinen Relativitätstheorie ergab sich die Struktur der Theorie aus der tiefen Einsicht Einsteins in die Logik der physikalischen Gesetze. In den Superstring-Theorien haben wir zuerst gewisse Einzelheiten verstanden, müssen uns aber noch immer um ein generelles Verständnis der Logik dieser Theorie bemühen."³⁹

Diese Hypothesen liefern bisher keine nachprüfbaren theoretischen Voraussagen, die experimentell oder durch Beobachtung nachzuprüfen wären. "Die Theoretiker sind den Experimentatoren so weit vorausgeeilt, daß sie sich nicht mehr an Beobachtungen orientieren können, sondern sich auf ihren ästhetischen Sinn verlassen müssen. Noch nie zuvor wurde versucht, Wissenschaft auf diese Art zu betreiben, und es wird interessant sein zu beobachten, was dabei herauskommt."⁴⁰

³⁷siehe M. B. Green, 1990, "Superstrings", in "Kosmologie und Teilchenphysik", Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 151

³⁸siehe M. B. Green, 1990, "Superstrings", in "Kosmologie und Teilchenphysik", Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 163

³⁹siehe M. B. Green, 1990, "Superstrings", in "Kosmologie und Teilchenphysik", Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 163

⁴⁰siehe J. Trefil, 1990, "Fünf Gründe warum es die Welt nicht geben kann. Die Astrophysik der dunklen Materie", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 186

2.1.5. Kosmische Strings

Die Einführung der String-Theorie schlieÙe ich mit einem kurzen Verweis auf die Theorie der *Kosmischen Strings*. Kosmische Strings sind durch ihren Namen mit den Superstrings verbunden, stellen jedoch etwas ganz anderes dar. Superstrings wären kleiner als die kleinsten Elementarteilchen, Kosmische Strings hingegen könnten sich über weite Teile des Universums erstrecken. Laut der theoretischen Überlegung sind Kosmische Strings lange eindimensionale Objekte im Raum und unglaublich massiv und sehr dünn - "der Durchmesser eines String ist viel kleiner, als beispielsweise der eines Protons."⁴¹

Alexander Vilenkin beschreibt die Kosmischen Strings als, "exotische, unsichtbare Gebilde, die den Theorien der Elementarteilchenphysiker entspringen. Strings sind sozusagen fadenartige Überbleibsel des Raum-Zeit-Gefüges im neugeborenen Universum. Sie sind unvorstellbar dünn und energiereich; sie bewegen sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit und krümmen den sie umgebenden Raum. Die in der Sekunde nach dem Urknallentstandenen Strings verwickeln sich in Form unendlicher Fäden zu Schleifen, die heftige Taumelbewegungen vollführen und dadurch ihre Energie nach und nach verlieren. Niemand weiß mit Sicherheit, ob die Kosmischen Strings tatsächlich existieren. Doch, wenn es sie gäbe, könnten sie nach Ansicht vieler Physiker die inhomogene Materieverteilung im Universum verursacht haben: besonders massereiche String-Schleifen könnten die notwendige Gravitationsanziehung aufgebracht haben, um die Keimzelle von Galaxien und Galaxienhaufen anzulegen. Da derartige Schleifen jedoch nur von recht geringer Dauer wären, müßten sie heute zum größten Teil verschwunden sein - selbst wenn sie einst das Universum durchdrungen hätten. Weniger massive Strings könnten auch heute noch existieren, doch gestaltet sich ihre Entdeckung äußerst schwierig. Durch sorgfältige Forschungsarbeit mit immer empfindlicheren Instrumenten könnten die Astronomen in einigen Jahren dennoch imstande sein, die Existenz Kosmischer Strings zu bestätigen, oder zu widerlegen. Ihre Untersuchungen werden mit großer Spannung verfolgt, da die Entdeckung eines Strings neue

⁴¹siehe J. Trefil, 1990, "Fünf Gründe warum es die Welt nicht geben kann. Die Astrophysik der dunklen Materie", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 200

Einblicke in die elementare Natur der Materie und gleichermaßen in die Entstehung des Universums ermöglichen würde.“⁴²

Auf der Suche nach Beweisen für die Kosmischen Strings sind erstens Computersimulationen⁴³, zweitens eine Methode, beruhend auf der Gravitationslinse - sie befaßt sich mit möglichen Auswirkungen Kosmischer Strings auf das Licht⁴⁴ - und drittens ein etwas indirekteres Verfahren, bei dem es um die Suche nach Gravitationswellen geht, die die Strings im frühen Stadium des Universums ausgesendet haben⁴⁵, die heute zur Verfügung stehenden Methoden.

“Interessant ist, daß alle diese Modelle der Strukturbildung im Universum eine neue Grundlagenphysik erfordern. (...) Die Untersuchung der Strukturen des Universums scheint somit zu einer neuen Physik und einer neuen Astronomie zu führen.“⁴⁶ Dabei wird die kosmologische Forschung nicht mehr nur von Beobachtungen der Teleskope gestützt.

⁴²Siehe A. Vilenkin, 1990, "Kosmische Strings", in "Kosmologie und Teilchenphysik", Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 164

⁴³vgl. J. Trefil, 1990, "Fünf Gründe warum es die Welt nicht geben kann. Die Astrophysik der dunklen Materie", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 200-205

⁴⁴vgl. J. Trefil, 1990, "Fünf Gründe warum es die Welt nicht geben kann. Die Astrophysik der dunklen Materie", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 208-210

⁴⁵vgl. J. Trefil, 1990, "Fünf Gründe warum es die Welt nicht geben kann. Die Astrophysik der dunklen Materie", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 210-211

⁴⁶siehe D. N. Schramm, 1991, "Vom Ursprung der Strukturen im Kosmos", in "Immer Ärger mit dem Urknall. Das kosmologische Standardmodell in der Krise", Reinhard Breuer (Hg.), 1993, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 92-93

2.1.6. Teilchenbeschleuniger

Um einen experimentellen Nachweis für die Existenz jener Teilchen zu erbringen, von denen man annimmt, daß sie mehr als 90 Prozent der Materie im Universum ausmachen, gibt es zwei verschiedene Wege. Zum einen kann versucht werden, sie in Teilchenbeschleunigern zu erzeugen, zum anderen können Instrumente konzipiert und gebaut werden, die diese Teilchen registrieren, wenn sie die Erde passieren. Die Wissenschaft setzt auf beide Methoden. Viele der Elementarteilchen, deren Existenz die Physik heute als selbstverständlich betrachtet, wurden durch Reaktionen, die von kosmischen Strahlen ausgelöst wurden, entdeckt. Zum Beispiel Teilchenschauer, die von Supernovae in der Milchstraße auf die Erde trafen. Parallel waren viele wichtige Entdeckungen Ergebnisse von Experimenten in Teilchenbeschleunigern.⁴⁷

In einem Teilchenbeschleuniger werden in einem Teilchenstrahl Teilchen erzeugt, entweder Protonen oder Elektronen. Diese werden zu einem Strahl gebündelt und dann nähernd auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Dieser Strahl wird auf ein Target (Zielobjekt) gerichtet. Jede Ansammlung von Atomen eignet sich als Target. "In einigen der Kollisionen wird ein Teil der Energie des Strahls in die Masse neuer Teilchen umgewandelt ($E=mc^2$). Wie gering auch immer die Wahrscheinlichkeit ist, daß in einer solchen Reaktion ein bestimmtes Teilchen erzeugt wird - wenn der Strahl nur genügend Energie hat und wir lange genug warten, wird sich das Ereignis, das wir erwarten, früher oder später einstellen. Experimentalphysiker setzen heute ihre Hoffnung darauf, daß dies für die Suche nach Dunkler Materie genauso zutreffen wird, wie es in der Vergangenheit für das Forschen nach anderen Teilchen gegolten hat."⁴⁸

Als noch geeigneter für die Suche nach neuen Teilchen erweist sich der sogenannte Speicherring. In ihm werden die beschleunigten Teilchen nicht auf ein ruhendes Target, sondern gegeneinander geschossen. "Ein Beschleuniger

⁴⁷vgl. J. Trefil, 1990, "Fünf Gründe warum es die Welt nicht geben kann. Die Astrophysik der dunklen Materie", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 213

⁴⁸siehe J. Trefil, 1990, "Fünf Gründe warum es die Welt nicht geben kann. Die Astrophysik der dunklen Materie", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 21

erzeugt Teilchenstrahlen, die in große Ringe eingeschlossen werden, wo starke Magnete die Teilchen auf einer kreisförmigen Bahn halten. Teilchen mit positiver elektrischer Ladung (zum Beispiel Protonen) kreisen in einer Richtung durch den Ring, während negativ geladene Teilchen (zum Beispiel Antiprotonen) sich in die andere Richtung bewegen. Der Ring ist so konstruiert, daß die beiden Strahlen an bestimmten Stellen frontal zusammenstoßen. Bei solchen Kollisionen steht die gesamte Bewegungsenergie der Geschosse für die Umwandlung in Masse zur Verfügung - ein effizienteres Verfahren ist nicht denkbar."⁴⁹

⁴⁹siehe J. Trefil, 1990, "Fünf Gründe warum es die Welt nicht geben kann. Die Astrophysik der dunklen Materie", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 215

2.1.7. Atomistik

“Die Bandbreite der Abstände vom Durchmesser des Universums bis zur Größe der kleinsten Teilchen erstreckt sich über vierundvierzig Größenordnungen. Davon umfaßt das zugängliche Spektrum von 10^{12} bis 10^{-10} zweiundzwanzig Größenordnungen oder anders betrachtet, die Hälfte der Schöpfung.”⁵⁰

Die Möglichkeit, Atomteilchen einzufangen und zu isolieren, steht der Wissenschaft noch nicht sehr lange zur Verfügung. Die erste Fotografie eines einzelnen Atoms wurde an der Universität Heidelberg aufgenommen und 1980 veröffentlicht. 1990 waren dann weltweit etwa sechs Institute dazu in der Lage. In den achtziger Jahren wurden fünf Nobelpreise für die Entwicklung von Techniken zur Manipulation und bildlichen Wiedergabe einzelner Atome verliehen. “Indem wir zur atomaren Ebene hinabsteigen und sie unseren Sinnen zugänglich machen, zähmen wir sie. Einzelne Atome lassen sich heute zählen, fotografieren und einschließen. Wir können die Oberflächenunebenheiten von Substanzen millionenfach vergrößern, auf diese Weise Aufschluß über ihre atomare Struktur gewinnen und einzelne Atome zu synthetischen Stoffen zusammenfügen. Bald werden uns die neuen Bilder der Atome so vertraut sein wie Fotos der Planeten.”⁵¹

Das Betrachten der Atome unterscheidet sich vom Verständnis ihrer Zusammensetzung grundsätzlich. Die Physiker haben die atomare Struktur “bis in ihre kleinsten Einzelheiten erforscht und sind heute in der Lage, sie exakt und zuverlässig zu beschreiben. Nur die Begriffe, derer sie sich bedienen, um über das Innere des Atoms zu sprechen, sind nicht die vertrauten Wörter, mit denen wir unsere Sinneswahrnehmungen beschreiben. Statt dessen reden sie in der höchst exotischen Sprache der Quantenmechanik, die die Atome nicht als kleine Objekte wie Sandkörner beschreibt, sondern als immaterielle Wolken, deren

⁵⁰siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 17

⁵¹siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 19

Realität, um es vorsichtig auszudrücken, fraglich ist.”⁵²

Werner Heisenberg (1901-1976), als einer der Väter der Quantenmechanik, hat ihnen ihre Wirklichkeit fast gänzlich abgesprochen. “In den Experimenten über Atomvorgänge haben wir mit Dingen und Tatsachen zu tun, mit Erscheinungen, die ebenso wirklich sind, wie irgendwelche Erscheinungen im täglichen Leben. Aber die Atome oder die Elementarteilchen sind nicht ebenso wirklich. Sie bilden eher eine Welt von Tendenzen.”⁵³

“Atome sind Grenzgänger zwischen der Welt, die wir sehen, und der Welt, die nur unserem theoretischen Wissen zugänglich ist.”⁵⁴

“Die Quantenmechanik ist eine Theorie und ein Verfahren. Sie beschäftigt sich mit subatomaren Erscheinungen. Subatomare Erscheinungen sind im allgemeinen nur denen zugänglich, die über komplizierte (und kostspielige) Apparaturen verfügen. Jedoch können wir auch mit den kompliziertesten und teuersten Geräten nur die Wirkung subatomarer Phänomene sehen. Das Reich des Subatomaren liegt jenseits der Wahrnehmungsgrenzen unserer Sinne. (Ein auf ‘dunkel’ eingestelltes Auge kann ein einzelnes Photon wahrnehmen. Alle anderen subatomaren Partikel können wir nur indirekt auffinden.) Es liegt auch jenseits der Grenze rationalen Verstehens. Natürlich haben wir rationale Theorien über subatomare Phänomene, aber der Begriff ‘rational’ wurde so weit ausgedehnt, daß er jetzt Dinge einschließt, die früher als Unsinn, bestenfalls als paradox, galten.”⁵⁵

⁵²siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 219

⁵³siehe W. Heisenberg, 1984, “Physik und Philosophie”, Hirzel, Stuttgart, Seite 180

⁵⁴siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 20

⁵⁵siehe G. Zukav, 1981, “Die tanzenden Wu Li Meister”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 108

2.1.8. Raster-Tunnel-Mikroskop

1988 veröffentlichte die Zeitschrift *Physical Review Letters* in der Ausgabe vom 6. Juni das Schwarzweißbild von Benzolmolekülen, die an der Oberfläche eines Streifens aus dem Metall Rhodium hafteten. "Der Durchmesser eines Moleküls wurde ungefähr mit einem milliardstel Meter angegeben, (...). Das Bild war von Wissenschaftlern am *Almaden Research Center* der IBM im kalifornischen San José mit einem neuartigen Gerät, dem Raster-Tunnelmikroskop (RTM), aufgenommen worden."⁵⁶

Dieses Mikrobild hatte eine interessante Frage aufgeworfen: "entgegen allem Anschein war es keine echte Fotografie, sondern eine Computerrekonstruktion (vergleichbar Computertomogrammen eines Gehirns). Sie beruhte auf Messung des elektrischen Stroms, der durch eine Nadelspitze floß, während diese über die Oberfläche des Moleküls geführt wurde. Eine verborgene Kette von Lesevorgängen, Berechnungen und Interpretationen lag zwischen der Probe und dem endgültigen Bild."⁵⁷ Bevor diese Bilder zugänglich waren, hingen die Modelle der Wissenschaftler auch von der theoretischen Interpretation verschiedener chemischer Beobachtungen ab. Wie stehen diese beiden Sehweisen in Beziehung zueinander? "Inwieweit liefert die Vorstellung ein zutreffenderes Bild der Welt? Und umgekehrt, in welchem Umfang war das Mikrobild in Wirklichkeit nur eine Vorstellung?"⁵⁸

Den Erfindern des RTM, Gerd Binnig und Heinrich Rohrer, wurde knapp sieben Jahre später, 1986, der Nobelpreis verliehen. Das von ihnen entwickelte Gerät ist heute im Handel als tassengroßes Modell erhältlich. Das Kernstück des RTM, die sogenannte Wolframnadel, ist seit seiner Erfindung unverändert geblieben. Bei Betrieb des Gerätes wird die heute sehr feine Nadelspitze, meist besteht

⁵⁶siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 96

⁵⁷siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 96

⁵⁸siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 97

sie aus einem unregelmäßigen Vorsprung, der nur ein paar Atome enthält, "nahe an die Metalloberfläche herangeführt und eine elektrische Spannung, ein Bruchteil eines Volts, an die Lücke angelegt, um die Elektronen zum Tunneln anzuregen. Die Nadel wandert systematisch über die Probe. Trifft die Sonde auf einen Höcker der Oberfläche, verringert sich die Breite der Lücke, wodurch sich der Tunnelstrom verstärkt. Daraufhin wird die Sonde automatisch zurückgezogen, fort von der Probe, bis der Strom wieder auf seinen vorherigen Wert fällt, während die Bewegung der Nadel von einem Computer aufgezeichnet wird. Sinkt die Spannung dagegen, weil eine Vertiefung vorliegt, nähert sich die Sonde automatisch der Oberfläche. Auf diese Weise wird die gesamte Fläche erkundet, wobei der Tunnelstrom -und damit die Entfernung zwischen Nadelspitze und Probe- auf einem konstanten Wert gehalten wird.

Die Koordinaten der Nadel -ihr regelmäßiges Hin- und Herschwenken auf der Probe, sowie ihre senkrechten Ausschläge- zeichnet das Gerät auf. Wenn alle Daten vorliegen, rekonstruiert der Computer eine Umrißkarte der Oberfläche (...). Schließlich wird die vollständige Umrißkarte auf einem Bildschirm gezeigt. Auf diese Weise wurden die an einem Rhodiumstreifen haftenden Benzolmoleküle 1988 zum erstenmal sichtbar gemacht."⁵⁹

In den zwanziger Jahren des 20. Jahrhunderts begann die Untersuchung der Struktur von Materie mit Hilfe von Röntgenbildern. Diese Bilder von Molekülen sind jedoch nur in einem sehr begrenzten Sinn Bilder. Röntgenstrahlen prallen von Atomen ab. Damit ließe sich indirekt, durch die theoretische Analyse von Röntgenbildern, Aufschluß über die Anordnung von Atomen in Molekülen gewinnen. "Der Wert des RTM liegt darin, daß es zum erstenmal die Architektur einzelner Moleküle, eines nach dem anderen, offenbart."⁶⁰

Aber auch die Bilder des RTM sind keine Bilder im herkömmlichen Sinne. Sie beruhen nicht auf Licht, sondern auf elektrischen Strömen und bedeuten insofern eine neue Art des Sehens.⁶¹ Die Stärke des Tunnelstroms, die der Computer

⁵⁹siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 101-102

⁶⁰siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 102

aufzeichnet, wird durch zwei Einflüsse bestimmt, die beide nichts mit unserem optischen Sehvermögen zu tun haben. Der erste Effekt ist die Nähe der Sondennadel zur Oberfläche der Probe. Diese Beziehung gibt Aufschluß über die Atomstruktur der Probe. Der zweite Effekt wird von der elektrischen Ladung der Probe hervorgerufen und läßt sich vom ersten nicht trennen. Elektrische und strukturelle Eigenschaften sind miteinander verflochten. Das RTM mischt also diese Eigenschaften der von ihm abgebildeten Atome und Moleküle. Dieses Problem führt manchmal zu einer Verwechslung von Vertiefungen und Erhöhungen.

“Unklarheit in der Interpretation von Bildern ist kein besonderes Merkmal des RTM. In der Wissenschaft ist sie eher die Regel als die Ausnahme. (...) - jede Beobachtung muß sorgfältig in ein zusammenhängendes Bild übertragen werden. Häufig müssen sich Wissenschaftler für eine von vielen miteinander konkurrierende Interpretationen eines Bildes entscheiden, ohne die Gewißheit zu haben, daß ihre Wahl richtig ist. Nur in den seltenen Fällen, in denen sich Form, Farbe und Beschaffenheit des Bildes durch Betrachten und Berühren direkt verifizieren lassen, können wir sicher sein, daß Objekt und Bild übereinstimmen. Doch diese Fälle verlieren für die Zielsetzung der modernen Wissenschaft immer mehr an Bedeutung.”⁶²

“Insofern die Bilder, die durch Geräte wie das RTM erzeugt werden, und die Vorstellungsbilder, die der menschliche Geist auf der Grundlage nichtvisueller Information konstruiert, indirekt und mehrdeutig sind, verwischt sich die Unterscheidung zwischen technischer Bilderzeugung und menschlicher Vorstellung. Beide sind Methoden zur Erschaffung von Bildern, beide hängen von bestimmten Hintergrundinformationen ab, von versteckten Annahmen und Theorien.”⁶³

⁶¹vgl. H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 102

⁶²siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 105

⁶³siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 105

Den Erfindern des RTM war die Vieldeutigkeit der damit erzeugten Bilder natürlich bewußt. Aus den Überlegungen zur Verbesserung des RTM entwickelte Gerd Binnig mit einem Team amerikanischer Kollegen das Kraftmikroskop (Atomic Force Microscope). Hierbei wird die Oberfläche der Probe mit einer scharfen Diamantspitze, die auf einen Auflegearm, ähnlich der Nadel eines Plattenspielers, montiert ist, abgetastet. Der Arm verringert dabei die Kraft, mit der die Spitze gegen die Oberfläche drückt. Der Druck darf nicht zu stark sein, damit die Oberfläche nicht zerreißt. Der aus einem winzigen Streifen Aluminiumfolie bestehende Arm, ist an einem Ende fixiert und verbiegt sich unter der "unvorstellbar schwachen Kraft, die zwischen einzelnen Atomen wirkt."⁶⁴ Die Schwierigkeit bestand zu Anfang darin, die "fast unmerklichen Ausschläge der Diamantspitze bei ihrer Bewegung über winzige Höcker, wie sie von einzelnen Atomen hervorgerufen werden, zu registrieren. (...) So wurde in das ursprüngliche Kraftmikroskop ein RTM integriert, das die Auslenkung des mit dem Diamantsplitter versehenen Metallarms aufzeichnete. Das neue Mikroskop ersetzte den elektrischen Strom durch tatsächlichen Kontakt und verringerte dadurch die beim RTM auftretende Gefahr, elektrische und strukturelle Eigenschaften zu verwechseln."⁶⁵

Und trotzdem: es "läßt sich zwar mit dem Kraftmikroskop die grobe Verwechslung von strukturellen und elektronischen Eigenschaften vermeiden, unter denen das RTM leidet, doch bringt es dafür subtilere Interpretationsprobleme mit sich."⁶⁶

Denn was bedeutet tatsächlicher Kontakt? "Auf atomarer Ebene ist selbst der intuitiveinleuchtende Begriff der Berührung alles andere als einfach. Tatsächlich berührt kein reales Objekt jemals ein anderes. Wenn zwei Billiardkugeln sich

⁶⁴siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 106

⁶⁵siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 106-107

⁶⁶siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 109

einander nähern, verringert sich der Abstand zwischen ihren am weitesten außen befindlichen Atomen, während im gleichen Maße die Abstoßungskräfte zwischen ihnen zunehmen und ihre Geschwindigkeit abbremsen. Schließlich halten sie einen Moment inne, prallen ab und entfernen sich voneinander. Wissenschaftlern geht es nicht um den Begriff des Berührens, sondern um die Frage, wie Bewegung zum Stillstand kommt (...). Kurzum, (...), wenn Billiardkugeln zusammenstoßen und wenn die Spitze einer Nadel auf eine Oberfläche trifft, bilden die Kräfte, die dabei ins Spiel kommen, einen gordischen Knoten aus klassischen und quantenmechanischen Effekten, und es ist unmöglich, genau zu bestimmen, welcher der vielfältigen Einflüsse letztlich verhindert, daß ein Objekt in ein anderes eindringt. (...).

Entsprechend gibt es kein endgültiges Bild von einem Atom. Alle Erkenntnisse, die wir aus der Strukturchemie, der Quantenmechanik, den Bildern des RTM und seines Ablegers, des Kraftmikroskops, sowie aus zahllosen anderen Experimenten in der Atomphysik gewonnen haben, leisten ihren Beitrag zu unserem sich rasch formenden Bild vom Atom.“⁶⁷

Der Blick von außen auf das Atom leidet also an Genauigkeit. Im Gegensatz dazu ist die Sicht aus dem Inneren des Atoms sehr detailliert, aber es läßt sich “aus ihr kein Vorstellungsbild gewinnen“⁶⁸. Immer größere und schnellere Computer verbessern die quantenmechanischen Berechnungen und liefern immer zuverlässigere Wellenfunktionen der Elektronenwolken. Zwar enthalten sie prinzipiell alle Informationen, die man von einem Atom bekommen kann, “doch wenn wir uns dann bemühen, intuitiv verständliche Darstellungen des Atom’s zu fertigen, stellt sich heraus, daß wir noch nicht gelernt haben, die richtigen Fragen zu stellen. Wir wissen alles über die Struktur des Atoms, ausgenommen ihre Bedeutung.“⁶⁹ Die Wissenschaft hofft auf eine Verbesserung der Sonden und

⁶⁷siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 107-109

⁶⁸siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 110

⁶⁹siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 110

bildgebenden Verfahren, wie dem RTM, um weiter unter die atomare Oberfläche zu tauchen. Dabei wird die Wellenfunktion für die Interpretation dieser Bilder immer wichtiger. Ziel, so Hans Christian von Baeyer, ist die Vereinigung der beiden Perspektiven, von außen und von innen, bis sie sich schließlich "zu einem neuen Bild des Atoms vereinigen."⁷⁰

Jedoch ist die visuelle Wiedergabe der Atomstruktur, mit der sich auch der gesunde Menschenverstand zufrieden geben kann, vielleicht nicht möglich. Wenn die Spannung am RTM erhöht und der Auslegearm des Kraftmikroskop's verstärkt wird, um in die Bereiche des Atominnenen vorzudringen, in den Bereich der Quantenmechanik, beginnen die Sonden die Proben zu verändern, deren Zustand sie nur registrieren sollen. Dann wird nicht ein Atom gemessen, wie ursprünglich geplant, sondern etwas anderes, viel komplexeres, ein aus Atom und Nadel zusammengesetztes System. Der Beobachter ist dann Teil des zu Beobachtenden, er wirkt auf das Objekt der Beobachtung ein.⁷¹

Wie läßt sich also festlegen, beweisen, daß wir auf dem Bild zum Beispiel die Oberfläche eines Atoms sehen? "Ein wissenschaftlicher 'Beweis' ist eine logische Folge mathematischer Sätze, an Hand derer man zeigt, daß die zur Debatte stehende Aussage logisch folgerichtig ist. Im Reich der reinen Mathematik hat eine Aussage möglicherweise überhaupt keinen Bezug zur Erfahrung. Nichtsdestoweniger wird sie akzeptiert, wenn sie von einem in sich logisch folgerichtigen Beweis gestützt wird. Läßt sich ein solcher Erweis nicht bringen, wird sie abgelehnt. Das gleiche gilt für die Physik, nur stellt sie die zusätzliche Forderung, daß sich die Aussage auf die gegenständliche Realität bezieht.

Wir können also über den Zusammenhang zwischen der 'Wahrheit' einer wissenschaftlichen Behauptung und der Natur der Realität eine wichtige Aussage machen: es gibt keinen. Die wissenschaftliche Wahrheit hat nichts damit zu tun, wie die Realität 'wirklich' ist. Eine wissenschaftliche Theorie ist wahr, wenn sie in

⁷⁰siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 110

⁷¹vgl. H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 110-111

sich selbst folgerichtig ist und wenn sie Erfahrung richtig korreliert (Ereignisse zutreffend voraussagt). Kurz, wenn ein Wissenschaftler sagt, daß eine Theorie wahr ist, dann meint er, daß sie Erfahrungen in Übereinstimmung bringt und deshalb nützlich und brauchbar ist. Wenn wir das Wort 'wahr' jedesmal durch das Wort 'brauchbar' ersetzen, wird die Physik in die richtige Perspektive gerückt."⁷²

Können wir die bildgebenden Verfahren der Naturwissenschaften in dieser Weise sehen, als brauchbare und nicht wahre Images?

⁷²siehe G. Zukav, 1981, "Die tanzenden Wu Li Meister", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 306

2.1.9. Farben und Falschfarben

Kommen wir noch einmal zurück zu den Farben der Images. Die Verwendungsweise von Farben in den bildgebenden Verfahren der Astronomie unterscheidet sich von denen in der Mathematik. Hans Christian von Baeyer schreibt dazu, "die Farben der astronomischen Bilder sind möglicherweise von den optischen Eigenschaften der Kameras und von dem komplizierten Vorgang ihrer elektronischen Übertragung zur Erde beeinflusst, doch im Prinzip sind sie keineswegs willkürlich. Sie sind von der Natur vorgegeben, und es ist die Aufgabe der Bildtechnik, Eichverfahren zu entwickeln, die unerwünschte chromatische Verzerrungen ausschließen. In der Mathematik dagegen ist alles künstlich, nichts wirklich. Trotzdem bewährt sich die Fähigkeit der Farbe, das Gefühl anzusprechen, selbst im Kontext dieser strengen Wissenschaft."⁷³ Ein anschauliches Beispiel dafür sind die farbigen Darstellungen der Mandelbrot-Menge, grafische Wiedergaben von numerischen Beziehungen. Die Sammlung spezieller Punkte einer komplexen Zahlenebene, die in der Chaostheorie entsteht, wird mit Hilfe von Farben anschaulich. Die Mandelbrot-Menge ist ein numerisches Konzept, in dem Farbe gar keine Rolle spielt. In der farbigen Darstellung repräsentiert jede Farbe die Geschwindigkeit, "mit der der Rechengang seiner endgültigen Lösung für einen bestimmten Fleck des Bildes zustrebt."⁷⁴ Hier wird die Farbauswahl nach rein ästhetischen Gesichtspunkten getroffen. Da die Farben keine mathematischen oder physikalischen Bedeutungen haben, werden sie als Falschfarben bezeichnet. Dennoch scheinen die Ergebnisse die Sinne ebenso anzusprechen, "wie den mathematischen Verstand"⁷⁵.

"Obwohl Falschfarben nicht die Bedeutung von echten Farben haben, können sie uns bei unseren Verständnisprozessen und Entdeckungen helfen. Indem sie das Auge leiten, können sie bislang verborgene Muster aufdecken, und indem

⁷³siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 116

⁷⁴siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 117

⁷⁵siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 117

siestrukturale Merkmale markieren, bieten sie dem Betrachter die Möglichkeit, ihnen durch komplexe Bildsequenzen zu folgen. Wie Gehirnchirurgen in der Computertomografie mit Falschfarben die Grenze zwischen gesundem und kranken Gewebe ermitteln, beginnen auch Physiker den Wert der Farbkodierung für ihre Arbeit zu erkennen.”⁷⁶

So lag es auch nahe, die computergenerierten Bilder des RTM in Farbe wiederzugeben. “Die Landschaft der Atome, deren Umrisse sich Anfang der achtzigerJahrezunächst in den schwarzen Strichmustern des ersten RTM von Binnig und Rohrer andeuteten, läßt sich heute in den leuchtenden Farben betrachten, wie wir sie von den Bildern aus anderen Bereichen kennen.”⁷⁷

So falsch die Farbigkeit der Atome auch ist, sie gibt ihnen ein Element der Wirklichkeit. “Die Wissenschaftler, die RTM-Bilder herstellen, kolorieren sie nicht, um ihren emotionalen Reiz zu erhöhen, oder um sie realer erscheinen zu lassen. Ein einfacher Zweck der Farbkodierung ist es, verschiedene Atomarten zu identifizieren. Wenn die Position oder andere Eigenschaften eindeutige Unterscheidungen zulassen, bekommt jedes Atom seine eigene Farbe. (...) Das Farbschema verleiht dem Bild visuelle Kontraste und sorgt dafür, daß es sich dem Betrachter besser einprägt.”⁷⁸

“Visuelle Modelle lassen komplexe Systeme einfacher erscheinen und tragen zu einem vollständigeren Verständnis bei. Deshalb werden Bilder der atomaren Landschaftin der Lehre eine wichtige Rolle spielen und möglicherweise sogar das Bohrsche Atommodell als populäres Symbol verdrängen.”⁷⁹

“Mit dem technischen Fortschritt werden sicherlich schärfere Bilder möglich

⁷⁶siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 117

⁷⁷siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 117

⁷⁸siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 118

⁷⁹siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 124

werden, doch eine unendlich spitze Nadel oder ein Bild mit unendlicher Auflösung kann es nicht geben. Nur in der Scheinwelt der Mathematik lassen sich Objekte in immerfeinere Einzelheiten auflösen und ad infinitum unterteilen. Im Bereich der Atome wird man immer an einen Punkt gelangen, wo zwei separate Merkmale eines Objekts als ein einziges erscheinen, weil die Sonde zu plump ist, um sie als getrennt zu erkennen.“⁸⁰

Das RTM liefert Aufnahmen der Oberfläche von Atomstrukturen und zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist diese kontinuierliche Oberfläche der Atomlandschaft für das RTM undurchdringlich. “Der Elektronenmantel, der die atomaren Bausteine der Materie miteinander verbindet, verbirgt ihre fundamentale Körnigkeit. Mit dieser Erkenntnis wird klar, daß die Landschaft der Atome nicht in das Gebiet der Physik, sondern in das der Chemie fällt. Es ist die Aufgabe von Chemikern, die Struktur verschiedener Atomkombinationen zu untersuchen. (...). Doch physikalische Fragen, die die innere Struktur des Atoms selbst betreffen, verlangen einen anderen Ansatz.

Wenn Fotografien von Dünen keinen Aufschluß über die Beschaffenheit des Sandes geben, so läßt sich dieses Ziel vielleicht dadurch erreichen, daß man ein einzelnes Korn ins Licht hält und es isoliert von seinen unzähligen Geschwistern untersucht.“⁸¹

Hans Dehmelt, deutscher Physiker an der *University of Washington*, Seattle, begann 1956 mit der Suche nach isolierten Teilchen, für die ihm 33 Jahre später der Nobelpreis verliehen wurde. Dehmelt setzte sich das Ziel, ein Elektron einzuschließen; konkreter formuliert, “ein einzelnes Atomteilchen, das auf Dauer bewegungslos im freien Raum schwebt“⁸² zu isolieren. 1973, siebzehn Jahre nachdem Dehmelt seine Idee zum erstenmal entwickelt hatte, war er erfolgreich

⁸⁰siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 130

⁸¹siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 130-131

⁸²siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 134

und veröffentlichte einen Artikel, "in dem die Isolierung eines einzelnen Elektrons angezeigt wurde"⁸³. Eines der eingefangenen Elektronen blieb zehn Monate in einem Behälter, bevor es versehentlich mit einer Wand kollidierte. Diese und folgende Experimente führen uns vor Augen, schreibt von Baeyer, "daß Elektronennicht nur bequeme mathematische Konstrukte sind, sondern im Gegensatz zur Überzeugung von Schrödinger und Heisenberg auch reale, dauerhafte Objekte, die man wie Sandkörner am Strand aussondern und untersuchen kann"⁸⁴.

Nachdem Dehmelt und seine Gruppe ein Elektron isoliert hatten, faßten sie das Atom selbst ins Auge. Dazu verwendeten sie ein Gerät von Wolfgang Paul, der dafür 1989 zusammen mit Dehmelt den Nobelpreis erhielt. An der Universität von Heidelberg gelang Dehmelt 1979 die erste Fotografie eines einzelnen Atoms. Ein Jahr später wurde in Seattle ein geladenes Bariumatom in Farbe fotografiert.

"Das Bild eines eingeschlossenen Atoms ist seiner Natur nach etwas ganz anderes als das Bild eines Atoms unter den RTM. Letzteres wird 'sichtbar', wenn Tunnelelektronendurchdieäußere Fläche seiner Schale dringen und als Strom aufgezeichnet werden, mit dessen Hilfe dann eine computergenerierte Reproduktion des Atoms gefertigt wird."⁸⁵ Das Bariumatom aus Seattle dagegen "absorbiert und emittiert tatsächlich blaues Licht in Form von Photonen, die das menschliche Auge sehen kann."⁸⁶

"Farbfotos und Falschfarben-Mikrobilder von Atomen unterscheiden sich voneinander wie der Schnappschuß eines Gesichtes von dem Eindruck, den man von diesem Gesicht gewinnt, wenn man seine Züge mit den Fingerspitzen

⁸³siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschießen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 135

⁸⁴siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschießen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 137

⁸⁵siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschießen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 140

⁸⁶siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschießen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 140

abtastet.“⁸⁷ Die verschiedenen Ansichten eines Atoms sollen helfen, ein vernünftiges Modell zu kombinieren. “Erschwert wird die Aufgabe durch den Umstand, daß die Quantentheorie, die alle Messungen und Beobachtungen im atomaren Bereich erklärt, nicht in der Alltagssprache geschrieben ist. Am Ende müssen wir immer versuchen, mit ihren intuitiv so schwer faßbaren Aussagen zurechtzukommen.“⁸⁸

“Die Quantentheorie ist nicht deshalb so schwer zu erklären, weil sie kompliziert ist. Die Schwierigkeit ist vielmehr auf die Tatsache zurückzuführen, daß die Wörter, auf die wir angewiesen sind, sich für die Erklärung von Quantenphänomenen nicht eignen.“⁸⁹ Dieses Problem wurde auch von den Gründern der Quantentheorie diskutiert. Max Born schrieb dazu beispielsweise: “Der letzte Ursprung der Schwierigkeit liegt in der Tatsache (oder in dem philosophischen Prinzip), daß wir gezwungen sind, Wörter der gewöhnlichen Sprache zu gebrauchen, wenn wir ein Phänomen beschreiben wollen, nicht die logische oder mathematische Analyse, sondern Bilder, die das Vorstellungsvermögen ansprechen. Die gewöhnliche Sprache ist nach der alltäglichen Erfahrung gewachsen und kann diese Grenzen nie überschreiten. Die klassische Physik hat sich auf die Anwendung von Begriffen dieser Art beschränkt; durch Analyse sichtbarer Bewegungen hat sie zwei Wege entwickelt, sie durch elementare Prozesse darzustellen: sich bewegende Teilchen und Wellen. Es gibt keine andere Möglichkeit, Bewegungen bildlich zu beschreiben - wir müssen sie sogar im Bereich atomarer Vorgänge anwenden, wo die klassische Physik scheitert.“⁹⁰

Bei der Erklärung subatomarer Phänomene stoßen die Wissenschaftler auf Schwierigkeiten bei der bildlichen Vorstellung. “Daher müssen wir es aufgeben,

⁸⁷siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 140

⁸⁸siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 141

⁸⁹siehe G. Zukav, 1981, “Die tanzenden Wu Li Meister”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 294

⁹⁰siehe M. Born, 1957, “Atomic Physics”, New York, Seite 97

Erklärungen in Begriffen der 'gewöhnlichen Sprache' zu liefern. Wir müssen uns auf 'mathematische Analyse' beschränken."⁹¹ Müssen wir erst Mathematik studieren, um uns mit der Physik der subatomaren Phänomene befassen zu können? David Finkelstein, Direktor der *School of Physics* am *Georgia Institute of Technology*, behauptet, daß das nicht stimme. Mathematik sei eine Sprache wie Deutsch oder Englisch auch. "Das Beste, was man mit Symbolen erreichen kann, ist eine maximale, aber keine vollständige Beschreibung."⁹²

"Eine mathematische Analyse subatomarer Phänomene ist qualitativ nicht besser als irgendeine andere Analyse mittels eines Systems von Symbolen, da Symbole nicht den gleichen Regeln folgen, wie die Erfahrung. Sie folgen ihren eigenen Regeln. Kurz, das Problem liegt nicht in der Sprache, das Problem ist die Sprache."⁹³

Hier liegt auch das Problem der fotografischen Darstellung eines Atoms. "Das Atom ist keine statische Struktur, sondern ein dynamischer Mechanismus, der sich in ständiger Wechselwirkung mit einer ebenso dynamischen Umgebung befindet. (...). Wenn wir das Atom verstehen wollen, müssen wir hinter die starren Bilder blicken und die Handlung eines Films einfangen."⁹⁴

"Nicht der Schatten eines Zweifels fällt auf die beiden Arten, das Atom wahrzunehmen - als winziges Sandkorn und als quantenmechanisches Phantom: das erste sehen wir, vom zweiten wissen wir, und die Kluft zwischen beiden ist tief. Die Frage lautet: was fangen wir mit ihr an?

Es gibt zwei Möglichkeiten: entweder wir leben mit ihr, oder wir finden einen Weg, sie zu überbrücken."⁹⁵ Sollte sich die Quantenmechanik als das einzig

⁹¹siehe G. Zukav, 1981, "Die tanzenden Wu Li Meister", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 295

⁹²siehe D. Finkelstein, Januar/1976, Tonbandaufzeichnung von der Esalen-Konferenz über Physik und Bewußtsein in G. Zukav, 1981, "Die tanzenden Wu Li Meister", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 295

⁹³siehe G. Zukav, 1981, "Die tanzenden Wu Li Meister", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 295

⁹⁴siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschießen die Welt der kleinsten Teilchen", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 164

⁹⁵siehe H. C. von Baeyer, 1993, "Das Atom in der Falle. Forscher erschießen die

richtige Bild der Wirklichkeit erweisen, dann wären Wahrscheinlichkeit und Möglichkeit die angemesseneren Sprachen zur Beschreibung unserer Welt, als strenger Determinismus, „und man müsste das Gesetz aufgeben, nach dem zwei widersprüchliche Aussagen nicht gleichzeitig richtig sein können. Alle Dinge könnten miteinander verknüpft sein, und die Beziehungen zwischen Objekten würden sich als ebenso grundlegend erweisen, wie die Objekte selbst.“⁹⁶

Die Atomistik, „die auf der Überzeugung beruht, daß sich physikalische Erscheinungen mit Hilfe einer endlichen Zahl von fundamentalen Bausteinen und ihren Wechselwirkungen erklären lassen, hat sich für die Untersuchung der Materie als außerordentlich erfolgreich erwiesen, doch die Quantenmechanik steht in einem grundlegenden Widerspruch zu ihr. Nach quantenmechanischer Auffassung sind atomare Teilchen potentiell und nicht aktuell, Objekte, deren Verwirklichung von den Details der zu ihrer Beobachtung verwendeten externen makroskopischen Meßeinrichtungen, das heißt von ihrer physikalischen Umgebung, abhängt. (...). Auf jeden Fall leugnet die Quantenmechanik die Möglichkeit, die Welt mit Hilfe irreduziblen Bestandteilen zu analysieren, und verstößt damit gegen den Geist der Atomistik.“⁹⁷

Auch auf diese Fragestellungen in der naturwissenschaftlichen Diskussion konnte ich im Rahmen meiner Arbeit nur ansatzweise eingehen. Abschließend, als eine weitere Anregung zur Diskussion, ein Wort zu diesem Thema von Max Planck, der 1936 schrieb: „Wissenschaft (...) bedeutet rastloses Bemühen und ständig fortschreitende Entwicklung auf ein Ziel hin, das die poetische Intuition verstehen mag, das jedoch der Intellekt niemals völlig erfassen kann.“⁹⁸

Welt der kleinsten Teilchen“, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 285

⁹⁶siehe H. C. von Baeyer, 1993, „Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen“, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 286

⁹⁷siehe H. C. von Baeyer, 1993, „Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen“, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 286-287

⁹⁸siehe M. Planck, 1936, „The Philosophy of Physics“, New York, Seite 83

2.1.10. Quarks

An anderer Stelle wurde dargestellt, daß die moderne Astronomie nicht nach dem Universum, wie es sich der menschlichen Erfahrung darstellt, sucht, sondern vielmehr wissen möchte, wie es beschaffen ist.

“Auch im mikroskopischen Bereich vollzieht sich eine entsprechende Verlagerung der Blickrichtung. Die Biologie, die einst ausschließlich damit beschäftigt war, Tiere und Pflanzen in Kategorien einzuordnen, die der Mensch festgelegt hat, erschließt die neuen Gebiete der Biophysik und Biochemie, in denen sie versucht, lebende Organismen anhand atomarer Prozesse zu erklären. (...). Am Ende wird der Dreh- und Angelpunkt aller wissenschaftlichen Aktivitäten der universelle Baustein der Materie sein.”⁹⁹

“In der Physik bezeichnet man ein Teilchen als elementar, wenn es keine innere Struktur besitzt, die darauf hindeutet, daß das betreffende Teilchen aus noch kleineren Objekten besteht. Diese Definition ist jedoch relativ. In verschiedenen Gebieten der Physik gibt es verschiedene Vorstellungen von Elementarität. So ist es zum Beispiel für weite Bereiche der physikalischen Chemie irrelevant, ob Atome eine spezifische innere Struktur besitzen. Es genügt, die Atome als die kleinsten Teilchen der Materie zu betrachten. Andererseits legt man in der Atomphysik Wert auf das Studium der inneren Struktur der Atome. Für den Atomphysiker bestehen die Atome aus den Elektronen in der Hülle und dem Atomkern. Der Atomkern wird vom Atomphysiker als unteilbar angenommen, gewissermaßen als elementares Objekt betrachtet. Für den Kernphysiker agieren die Nukleonen als die elementaren Objekte, die den Atomkern aufbauen. Andererseits betrachtet der Elementarteilchenphysiker die Nukleonen als nichtelementare Systeme; sie bestehen aus den Quarks.”¹⁰⁰ Die Frage, ob die Quarks und Leptonen aus noch kleineren Teilchen bestehen, ist bis heute unentschieden, jedoch nicht ausgeschlossen.

Anfang dieses Jahrhunderts stellten die Physiker die Frage, ob die Atome eine

⁹⁹siehe H. C. von Baeyer, 1993, “Das Atom in der Falle. Forscher erschließen die Welt der kleinsten Teilchen”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 281-282

¹⁰⁰siehe H. Fritzsche, 1981, Überarbeitete Neuausgabe “Quarks. Urstoff unserer Welt”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 207

innere Struktur haben, oder strukturlos sind. "Etwa im Jahre 1932 waren den Physikern insgesamt vier Teilchenarten bekannt, nämlich die Elektronen, Photonen, Protonen und Neutronen. Abgesehen vom Photon sind diese Teilchen die Bausteine der beobachteten Materie. Man nahm damals an, daß sie elementare Objekte sind, das heißt, nicht aus noch kleineren Konstituenten zusammengesetzt. (...); heute kennt man einige hundert Elementarteilchen, und es ist mittlerweile klar geworden, daß die meisten der sogenannten Elementarteilchen gar nicht elementar sind."¹⁰¹

Bereits 1930 wurde "das wohl eigenartigste Teilchen im Zoo der Elementarteilchen"¹⁰², das Neutrino, von Wolfgang Pauli vorausgesagt. Es brauchte aber zwanzig Jahre, "bis es in der ersten Hälfte der fünfziger Jahre entdeckt wurde, und zwar durch den Nachweis von Neutrinostrahlung in der Nähe eines Kernreaktors."¹⁰³

Seitdem wurden eine ganze Reihe neuer Teilchen entdeckt. "Diese Teilchen haben alle die Eigenschaft, daß sie nicht als Bestandteil der von uns beobachteten Materie fungieren, sondern nur für kurze Zeit leben"¹⁰⁴, für winzige Bruchteile von Sekunden.

Diese neugefundenen Teilchen werden von den Elementarteilchen- oder Hochenergiephysikern in verschiedene Gruppen eingeteilt. Stark wechselwirkende Teilchen werden als Hadronen bezeichnet. Von ihnen sind heute eine große Anzahl bekannt. Innerhalb der Klasse der *Hadronen* findet man wiederum zwei verschiedene Familien von Teilchen, die als *Mesonen* und *Baryonen* bezeichnet werden.

Die Wissenschaftler vermuten, daß es unendlich viele Mesonen gibt, obwohl die

¹⁰¹siehe H. Fritzsche, 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 63

¹⁰²siehe H. Fritzsche, 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 63

¹⁰³siehe H. Fritzsche, 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 69

¹⁰⁴siehe H. Fritzsche 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 71

Experimente nicht ganz eindeutig sind.¹⁰⁵ Mesonen sind instabil und zerfallen letztlich in Elektronen, Positronen, Photonen und Neutrinos, "das heißt, am Ende bleibt kein stark wechselwirkendes Teilchen übrig"¹⁰⁶. Mesonen haben einen ganzzahligen Spin.

Baryonen (von 'baryos', im Griechischen 'schwer') haben einen nicht-ganzzahligen Spin. Zu ihnen gehören Nukleonen und Hyperonen. "Alle Baryonen sind instabil, mit Ausnahme des Protons, und alle Baryonen zerfallen so, daß am Ende ein Proton übrigbleibt, neben anderen nicht stark wechselwirkenden Teilchen, wie den Elektronen."¹⁰⁷ Und, wie im Falle der Mesonen, nehmen die Wissenschaftler an, daß es unendlich viele Baryonen mit beliebig hohem Spin gibt.

"Es ist nützlich, neben den Mesonen und Baryonen eine weitere Gruppe von Teilchen einzuführen: die Gruppe der Teilchen, die Spin 1/2 haben und nicht an der starken Wechselwirkung teilnehmen. Zu dieser Gruppe gehören natürlich das Elektron und das (...) Neutrino. Es gibt jedoch noch weitere dieser Teilchen; man bezeichnet sie als *Leptonen*."¹⁰⁸ Der Name leitet sich vom Griechischen 'lepos' (leicht) ab, allerdings hat sich in jüngerer Zeit herausgestellt, daß dieser Name nicht besonders sinnvoll ist, da es auch schwere Leptonen, "das heißt Leptonen, die schwerer als das Proton sind, gibt"¹⁰⁹.

"Die Leptonen scheinen paarweise aufzutreten, wobei ein Paar aus einem Neutrino und einem geladenen Lepton besteht."¹¹⁰

Es gibt also viel mehr Hadronen als Leptonen. Bis heute kennt die

¹⁰⁵vgl. H. Fritzsche 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 72

¹⁰⁶siehe H. Fritzsche 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 72

¹⁰⁷siehe H. Fritzsche 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 73

¹⁰⁸siehe H. Fritzsche 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 79

¹⁰⁹siehe H. Fritzsche 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 79

¹¹⁰siehe H. Fritzsche 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 80

Elementarteilchenphysik sechs Leptonen, aber einige Hundert Hadronen. "Hieraus mag man die Schlußfolgerung ziehen, daß die Leptonen fundamentalere Objekte als die Haronen sind. Während der siebziger Jahre hat sich herausgestellt, daß diese Idee richtig ist. Die Hadronen erwiesen sich als Systeme, die aus elementaren Konstituenten bestehen: den *Quarks*. Das Quarkkonzept wurde ursprünglich von Murray Gell-Mann und Georg Zweig vorgeschlagen - im Jahre 1964. Seit dieser Zeit hat sich das Quarkmodell der Hadronen von einer gewagten Hypothese zur modernen Theorie der Hadronen entwickelt."¹¹¹

Die Zahl '3' spielt eine besondere Rolle im Quarkmodell: das Proton besteht zum Beispiel aus drei Quarks. "Dies ist der Grund für die Bezeichnung 'Quarks'. Gell-Mann wählte diesen Namen unter Bezugnahme auf den Roman 'Finnegans Wake' von James Joyce."¹¹²

Alle mit dem Quarkmodell verbundenen Probleme können mit der Theorie der Chromodynamik gelöst werden. "In dieser Theorie erscheinen die Quarks als die fundamentalen Objekte der Hadronenphysik. Die Situation ist analog zur Elektrodynamik, in der das Elektron als das fundamentale Objekt fungiert. In der Theorie der Chromodynamik sind die Quarks (...) innerhalb der Hadronen permanent gebunden. Es gibt keine Möglichkeit, sie als freie Teilchen zu beobachten, wie etwa die Elektronen. Demzufolge mußten sich die Physiker spezielle Möglichkeiten einfallen lassen, um die Quarks zumindest indirekt innerhalb der Hadronen zu beobachten und zu studieren."¹¹³

Neben den Quarks führt Harald Fritzsich noch eine weitere subnukleare Konstituente ein, die hier vollständigkeithalber anfügt sei: die neutralen *Gluonen*. Dieser Name sei nicht zufällig gewählt, da "die Gluonen die Bindung der Quarks zu den Hadronen bewirken, sie sind der 'Klebstoff' (im Englischen 'glue'), der die

¹¹¹siehe H. Fritzsich 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 82

¹¹²siehe H. Fritzsich 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 82

¹¹³siehe H. Fritzsich 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 93-94

Nukleonen zusammenhält.”¹¹⁴

Im Rahmen dieser Arbeit können nicht sämtliche Teilchen vorgestellt werden, die in den folgenden Jahren entdeckt wurden, deshalb sei nur noch kurz erwähnt, daß nach 1974 ein ganzer Satz neuer Teilchen, bestehend aus den sogenannten Charm-Quarks, entdeckt wurde. Damit wurde eine neue Art von Materie entdeckt, “die in der freien Natur nirgends vorkommt, ausgenommen...” [in den] “...extremen Situationen, die in den Hochenergiephysik-Laboratorien geschaffen werden.”¹¹⁵

Nach 1970 begann die Entwicklung der modernen Theorie der starken Wechselwirkung, der Quantenchromodynamik (QCD). Diese Theorie gründet sich auf der Annahme, “daß jedes Quark in drei verschiedenen Ausgaben oder Formen existieren kann”¹¹⁶, die als Farben bezeichnet werden, zum Beispiel in einer roten, einer grünen und einer blauen. Dabei hat jede Farbe die gleichen Rechte, keine Farbe ist gegenüber der anderen im Vorzug. So sind zum Beispiel die roten Quarks genau so oft repräsentiert, wie die grünen.¹¹⁷ Diese Konfigurationen werden von den Mathematikern als Farbsingulets bezeichnet, “nämlich Singulets unter der Farbgruppe, das heißt der Gruppe aller mathematischen Transformationen, die man im Farbraum durchführen kann.”¹¹⁸ “Man findet, daß Farbsingulets die Bindungszustände der [Gruppen-] Theorie sind, [diese können wir hier nicht im Detail diskutieren] genauso wie die Ladungssingulets die Bindungszustände in der Elektrodynamik bilden. Die Quarks haben also die Tendenz, in Farbsingulettzuständen zu existieren, falls die

¹¹⁴siehe H. Fritsch 1994, Überarbeitete Neuausgabe “Quarks. Urstoff unserer Welt”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 99

¹¹⁵siehe H. Fritsch 1994, Überarbeitete Neuausgabe “Quarks. Urstoff unserer Welt”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 145

¹¹⁶siehe H. Fritsch 1994, Überarbeitete Neuausgabe “Quarks. Urstoff unserer Welt”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 150

¹¹⁷vgl. H. Fritsch 1994, Überarbeitete Neuausgabe “Quarks. Urstoff unserer Welt”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 150-151

¹¹⁸siehe H. Fritsch 1994, Überarbeitete Neuausgabe “Quarks. Urstoff unserer Welt”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 151

Kräfte zwischen den Quarks durch die Farbladung gegeben sind. (...) Ist es möglich, eine wirkliche Theorie der Quarks und der Gluonen zu konstruieren, in der die oben erwähnte Eigenschaft realisiert ist? Im Falle der elektrischen Kräfte gibt es eine solche Theorie, nämlich die Maxwellsche Theorie und ihre quantisierte Version, die Quantenelektrodynamik (QED).¹¹⁹

Die Physiker suchten also nach einem "Farbanalog der Quantenelektrodynamik, wobei die Rolle der elektrischen Ladung von den Farbladungen übernommen wird. (...) Der wesentliche Unterschied zwischen der Elektrodynamik und der Chromodynamik besteht in der Tatsache, daß es acht verschiedene Farbladungen gibt, während andererseits nur eine elektrische Ladung existiert."¹²⁰

Im Laufe der letzten zwei Jahrzehnte haben die Wissenschaftler festgestellt, daß die Theorie der Quantenelektrodynamik "die Prozesse nicht nur auf befriedigende Art und Weise beschreibt, daß sie sogar viel besser ist, als man ursprünglich erwartete. Man hat mittlerweile sehr präzise Tests der QED durchgeführt. Es hat sich herausgestellt, daß die Theorie die Phänomene viel genauer beschreibt, als zu etwa einem Tausendstel eines Prozentes. Wir können deshalb sagen, daß es bezüglich der Wechselwirkung von Elektronen und Photonen nichts Ungeklärtes gibt. Die elektromagnetische Wechselwirkung ist vollkommen verstanden. Nicht nur innerhalb der klassischen Physik, sondern auch, wenn wir Quanteneffekte betrachten. Dies ist sehr wichtig, denn es zeigt, daß die Methode der theoretischen Physiker, insbesondere die Methoden der Quantenmechanik, geeignet sind, die Natur selbst bei sehr kleinen Abständen richtig zu beschreiben."¹²¹

Die Quantenchromodynamik dagegen zeigt Instabilitäten, sie treten bei relativ großen Distanzen auf, "das heißt groß gegenüber der Ausdehnung eines Protons (etwa 10^{-13} cm)."¹²² Konkrete Berechnungen können durchgeführt

¹¹⁹siehe H. Fritzsche 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 168-169

¹²⁰siehe H. Fritzsche 1994, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 169

¹²¹siehe H. Fritzsche, 1981, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 177

¹²²siehe H. Fritzsche, 1981, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer

werden, wenn man die Quarks und die Gluonen bei sehr kleinen Distanzen (weniger als 10^{-13} cm) betrachtet.¹²³

“Die zwischen den Quarks wirkenden Kräfte sind viel stärker als etwa die elektrischen Kräfte, die für die Struktur der Atome wichtig sind. Sie sind aber auch viel stärker als die Kernkräfte, die für den Aufbau der Atomkerne verantwortlich sind. Beim Studium der Hadrone begegnen uns also die stärksten bislang in der Natur beobachteten Kräfte: die chromoelektrischen Kräfte zwischen den Quarks.”¹²⁴ Bei sehr kleinen Distanzen allerdings werden diese Kräfte schwach und genauso beschreibt es die Chromodynamik. Dies ist für die Physiker einer der Gründe zu glauben, daß sie mit der Chromodynamik, trotz ihrer Instabilitäten die richtige Theorie der Hadronen und der Quarks gefunden haben. Dies könne man, so Fritsch, nicht mit absoluter Sicherheit behaupten, aber alle gefundenen experimentellen Resultate würden mit den theoretischen Voraussagen der QCD übereinstimmen.¹²⁵

“Bis vor einigen Jahren waren die meisten Physiker der Ansicht, daß die Kernkräfte etwas Fundamentales darstellen. Heute hat sich die Situation vollständig geändert. Die Kernkräfte selbst sind keine elementaren Kräfte, sondern nur Konsequenzen der superstarken Kräfte der Chromodynamik. (...) die Kräfte, die unsere Welt im Innersten zusammenhalten.”¹²⁶

Um das Quarkkonzept einzuführen, mußte ich zumindest grob auf diesen Forschungsbereich der Elementarteilchenphysik eingehen. Die eigentliche Frage im Rahmen dieser Arbeit lautet aber: Können wir die Quarks sehen? Und wie stellen sie sich uns dar?

Welt”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 185

¹²³vgl. H. Fritsch, 1981, Überarbeitete Neuauflage “Quarks. Urstoff unserer

Welt”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 190

¹²⁴siehe H. Fritsch, 1981, Überarbeitete Neuauflage “Quarks. Urstoff unserer

Welt”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 193

¹²⁵vgl. H. Fritsch, 1981, Überarbeitete Neuauflage “Quarks. Urstoff unserer

Welt”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 253

¹²⁶siehe H. Fritsch, 1981, Überarbeitete Neuauflage “Quarks. Urstoff unserer

Welt”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 196-197

“Es gibt einen Prozeß in der Hochenergiephysik, der sich von allen anderen Prozessen durch seine Wichtigkeit unterscheidet, nämlich die Vernichtung von Elektronen und Positronen. In diesem Prozeß vernichten sich ein Teilchen und das entsprechende Antiteilchen vollständig: sie lösen sich in reine Energie auf. Diese kann man benutzen, um alle möglichen Arten von neuen Teilchen zu produzieren.”¹²⁷ In der Elektron-Positron-Vernichtung kann man aus der vorhandenen Energie im wesentlichen alles erzeugen, “was sich bei der in Frage kommenden Energie eben produzieren läßt. Man erzeugt neue Teilchen gewissermaßen aus dem Nichts, also aus dem Vakuum”¹²⁸

Wenn man zwei Quarks, zum Beispiel zwei sehr schwere Quarks, voneinander entfernt, bildet sich zwischen ihnen ein Gluonband aus, und der Aufbau dieses Gluonbandes kostet Energie. Um die Quarks voneinander zu entfernen, muß also eine beträchtliche Energie aufgewendet werden. “Nun ist es so, daß das Vakuum angefüllt ist mit einer unendlichen Anzahl von virtuellen Quark-Antiquark-Paaren. Im allgemeinen bemerkt man diese nicht. Sie warten jedoch nur darauf, sich in Form von Teilchen (Hadronen) zu manifestieren. Dies ist nur möglich, wenn die nötige Energie zur Verfügung steht.”¹²⁹ Und dieses System von Hadronen kann am Ende in den Teilchendetektoren nachgewiesen werden.

Mit Hilfe der Theorie der Chromodynamik ist es möglich, Voraussagen über die Verteilung der Impulse der erzeugten Teilchen zu machen. Auch ohne tiefgreifende theoretische Überlegungen kann man sich leicht vorstellen, wie das erzeugte hadronische System in der Elektron-Positron-Annihilation bei hohen Energien aussieht. Man erwartet nämlich, daß die Hadronenimpulse eng mit den Impulsen der beiden Quarks zusammenhängen. Speziell werden die Hadronen des Endzustandes erzeugt, indem die Quarks in Hadronen ‘fragmentieren’: das

¹²⁷siehe H. Fritzsche, 1981, Überarbeitete Neuauflage “Quarks. Urstoff unserer Welt”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 215

¹²⁸siehe H. Fritzsche, 1981, Überarbeitete Neuauflage “Quarks. Urstoff unserer Welt”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 215

¹²⁹siehe H. Fritzsche, 1981, Überarbeitete Neuauflage “Quarks. Urstoff unserer Welt”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 218

heißt, sie erzeugen Jets von Teilchen, wobei der jeweilige Quarkimpuls gleich der Summe der Impulse der Teilchen eines Jets ist. Demzufolge erwarten wir, daß man in der Elektron-Positron-Annihilation bei genügend hohen Energien das Auftreten von zwei Jets beobachtet. Da die Jets gewissermaßen die Zerfallprodukte der ursprünglich erzeugten Quarks sind, spricht man hier von sogenannten Quarkjets. In der Elektron-Positron-Vernichtung ist man also in der Lage, die Quarks zu 'sehen', zwar nicht direkt als wirkliche Teilchen, zumindest aber als Jets."¹³⁰

Experimente dieser Art werden zum Beispiel in Hamburg am *DESY* mit dem dortigen PETRA-Speicherring, in Genf am *Europäischen Kernforschungszentrum CERN* mit dem Speicherring LEP und in Kalifornien am Forschungszentrum *SLAC* mit dem Speicherring PEP durchgeführt.

Neben den Elektronen und Quarks sind, nach dem heutigen Stand der Physik, die Gluonen die fundamentalen Teilchen der Materie. Auch die Gluonen werden bei Experimenten nicht als wirkliche Teilchen erzeugt, sondern die Physiker erhalten "Gluonjets. Die Gluonen fragmentieren in Hadronen, in ähnlicher Weise wie die Quarks."¹³¹

Die computergenerierten Bilder, zum Beispiel der Quark- und Gluonjets, stehen den Physikern zwei- und drei-dimensional zur Verfügung. Dr. Carla Grosso Pilcher, Senior Research Associate am *Enrico Fermi Institute* in Chicago, bestätigte mir, daß bei den bildgebenden Verfahren dieser Experimente die Farben willkürlich und von Institut zu Institut unterschiedlich gewählt werden. Die Farben der Darstellungen sind also nicht bestimmten Informationen zugeordnet, sondern nach Belieben des jeweiligen Programmierers bestimmt. Dies führt zu Kommunikationsschwierigkeiten beim internationalen Austausch von Daten der Elementarteilchenphysiker. Eine jeweils entsprechende Farblegende muß vor der Interpretation der Daten jedesmal neu studiert werden.

Wir haben gesehen, daß subatomare Erscheinungen nur denjenigen Wissenschaftlern zugänglich sind, die über die kompliziertesten und teuersten

¹³⁰siehe H. Fritzsche, 1981, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 219-220

¹³¹siehe H. Fritzsche, 1981, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 241

Apparaturen verfügen. Jedoch können sie auch mit diesen Maschinen nur die Wirkungen subatomarer Phänomene sehen. Denn "das Reich des Subatomaren liegt jenseits der Wahrnehmungsgrenzen unserer Sinne."¹³²

Zur Quantentheorie, die sich mit diesen subatomaren Erscheinungen beschäftigt, schreibt Fritzsich sogar: "Wir glauben heute, daß die Wahrscheinlichkeitsaussagen der Quantentheorie nicht einer Unkenntnis über die entsprechenden Elementarvorgänge entspringen, sondern daß diese eine absolute Grenze an unsere Erkenntnisfähigkeit setzen."¹³³

Im Rahmen der Quantenmechanik ist es unmöglich, "neben einer genauen Ortsbestimmung auch eine genaue Geschwindigkeitsbestimmung durchzuführen. In gewisser Weise sind die Größen Ort und Geschwindigkeit zueinander komplementär."¹³⁴ Die Relationen zwischen den jeweiligen Grenzen der Genauigkeit der verschiedenen Größen nennt man, nach Werner Heisenberg, die Unschärferelationen.

Was immer die Elementarteilchenphysiker also im subatomaren Bereich beobachten, "es kann einen bestimmbar Impuls und eine bestimmbar Position haben, doch in jedem gegebenen Augenblick müssen wir uns entscheiden, welche von diesen beiden Eigenschaften wir genau bestimmen wollen. Das heißt -jedenfalls in bezug auf 'sich bewegende Partikel'-, daß wir sie nie so sehen können, wie sie 'wirklich sind', sondern nur so, wie wir sie zu sehen uns entschieden haben!

'...wir müssen uns daran erinnern', schrieb Heisenberg, 'daß das, was wir beobachten, nicht die Natur selbst ist, sondern Natur, die unserer Art der Fragestellung ausgesetzt ist.'¹³⁵

¹³²siehe G. Zukav, 1981, "Die tanzenden Wu Li Meister", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 108

¹³³siehe H. Fritzsich, 1981, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 18

¹³⁴siehe H. Fritzsich, 1981, Überarbeitete Neuausgabe "Quarks. Urstoff unserer Welt", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 21

2.2.

MOLEKULARBIOLOGIE

Die Molekularbiologie ist in der Mitte des 20. Jahrhunderts aus der Biochemie und der Molekülstrukturforschung hervorgegangen. "An exzellenten Darstellungen dieses modernen Fachgebietes mit all' seinen Erkenntnissen und Einblicken in biologische Strukturen mangelt es nicht. Allein was fehlt, ist die Einordnung des neuen Wissens in ein allgemeines Naturverständnis."¹³⁶

Ich werde im Folgenden die gegenwärtigen Forschungsansätze der Molekularbiologie skizzieren und dabei wieder das Hauptaugenmerk auf die verwendeten bildgebenden Verfahren legen.

Einen interdisziplinären Ansatzpunkt in der Molekularbiologie bietet die Verbindung zur Neurowissenschaft. "Das Fachgebiet der Neurowissenschaft hat sich bis zu einem Punkt entwickelt, an dem sie ihre Kräfte nun mit denen der Molekularbiologie vereinigen muß. Einige der Kernfragen zu Nervenzelle und Gehirn lassen sich alleine auf der Ebene der Gene beantworten. Gene halten die erforderliche Information bereit, um Peptide und Proteine herzustellen. Diese wiederum zeichnen für Struktur und Funktion der Nervenzellen und ihrer synaptischen Verbindungen verantwortlich, ganz zu schweigen von ihrer Bedeutung für die Entwicklung von Körper und Gehirn aus einer einzelnen befruchteten Eizelle. Unbestimmten Schätzungen zufolge beträgt die Zahl der Gene in menschlichen Chromosomen mehr als 100.000. Von diesen sind etwa 30.000 bis 50.000 ausschließlich in Zellen des Gehirns aktiv. Bislang hat man nur wenige dieser Gene beschrieben (sequenziert).¹³⁷ In den Neurowissenschaften ist eines der zentralen Themen die Identifikation von Proteinen, insbesondere der chemischen Rezeptoren in Hirnzellen.

¹³⁵siehe G. Zukav, 1981, "Die tanzenden Wu Li Meister", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 138

¹³⁶siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage "Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 8

¹³⁷siehe R. F. Thompson, 1994, "Das Gehirn", 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 504

Der Beginn der Forschungsrichtung Molekularbiologie wird durch die 1953 veröffentlichte Entdeckung von Francis Crick und James Watson markiert. "In diesem Zusammenhang ist nicht so sehr die auf Röntgendaten basierende Festlegung der Struktur der Desoxyribonucleinsäure gemeint, sondern die Erkenntnis, daß DNA *das* Erbmerkmal ist und seine Struktur den Schlüssel zum Verständnis des molekularen Mechanismus' der Vererbung in sich birgt. Der lang gesuchte Übergang von der Chemie zur Biologie war gefunden. DNA per se ist eine chemische Substanz, doch sie ist mehr, als bloß ein großes Molekül. DNA ist - vermöge ihrer chemischen Natur - ein Speicher für Information. Diese über die Chemie hinausführende Eigenschaft ist es, die alles weitere Geschehen in der Biologie prägt."¹³⁸

"Die Untereinheiten der Gene sind im Sinne der Chemie 'elementar', Molekülgruppen, chemische Einheiten. Erst ihre Zusammenfügung im DNA-Molekül ergibt eine neuartige, für das Leben spezifische Qualität: Information. Die DNA ist in der Tat mit den hervorstechendsten Eigenschaften des Lebens begabt. Sie hat ein Gedächtnis, kann sich reproduzieren, kann mutieren und sich demzufolge evolutiv anpassen, und sie wird kraft des Stoffwechsels der Zelle gehindert, in den chemischen Gleichgewichtszustand, einen Zustand, der Leben ausschließt, abzusinken."¹³⁹

Wenn die Molekularbiologen nach dem Ursprung des Lebens fragen, unterscheiden sie zwischen der - aufgrund von Naturgesetzen - prinzipiell möglichen und der geschichtlich wirklichen Abfolge von Ereignissen. "Die Studienobjekte des Biologen sind die Lebewesen, in denen der historische Prozeß manifest geworden ist. Die Rekonstruktion des Evolutionsverlaufes ist auf historische Zeugnisse angewiesen. Soweit diese vorliegen, deuten sie auf einen gemeinsamen Ursprung allen Lebens hin. Auf den verschiedenen Stufen des Lebens offenbaren sich neben individueller Variabilität, Übereinstimmung und

¹³⁸siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage "Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 9-10

¹³⁹siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage "Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 11

Universalität der zugrunde liegenden physikalischen und chemischen Ordnungsprinzipien.“¹⁴⁰ Man könne, laut Eigen, diese Prinzipien nur erkennen, indem man von der Wirklichkeit abstrahiere; denn die Physik befasse sich nicht mit den Prozessen an sich, sondern allein mit den in den Prozessen wiederkehrenden Regelmäßigkeiten.¹⁴¹

Eigen postuliert weiter, daß Leben nicht eine der Materie schlechthin innewohnende Eigenschaft sei. Leben sei zwar an Materie geknüpft, erscheine aber nur unter sehr spezifischen Voraussetzungen und äußere sich dann in sehr vielfältigen und individuellcharakteristischen Merkmalen. Es sei daher folgerichtig, die Frage nach der Natur des Lebens mit der Frage nach seiner Entstehung in Beziehung zu setzen. Das Prinzip Leben würde sich uns am ehesten erschließen, wenn wir herausfänden, wie Leben entstehen kann. Diese Frage sei an den Physiker gerichtet, ob er sich als Biophysiker, Biochemiker oder Molekularbiologe bezeichne. Wie Leben allerdings wirklich entstanden ist, könne hingegen allein vermittels historischer Zeugnisse geklärt werden.¹⁴²

“Die Nichtberücksichtigung der Unterschiedlichkeit beider Fragestellungen hat schon zu manchen Mißverständnissen geführt. Es gibt keine physikalische Theorie für die historische Lebenswerdung. Die Entstehung des Lebens muß als eine Kette von Ereignissen angesehen werden, deren detaillierte Abfolge weder rekonstruiert, noch vorhergesagt werden kann. Gleichwohl hat sie sich unter dem steuernden Einfluß von Naturgesetzen vollzogen.“¹⁴³

¹⁴⁰siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage “Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 19

¹⁴¹vgl. M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage “Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 19

¹⁴²vgl. M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage “Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 20

¹⁴³siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage “Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 20

2.2.1. DNA (Desoxyribonucleinsäure)

Für eine Rekonstruktion des historischen Ursprungs der Arten, des Lebens, benötigen die Molekularbiologen einen Stammbaum der Arten. Die Annahme einer sukzessiven Auffächerung in der Phylogenie (Phylogenese: grch., die Stammesentwicklung) sei zwingend, schreibt Eigen, wenn man voraussetze, daß die Entwicklung der Arten tatsächlich evolutiv erfolgte und auf einen Vorläufer zurückgeführt werden kann. Für den Nachweis einer evolutiven Entwicklung müsse man dagegen fordern, daß die konsekutive Verästelung als Ergebnis aus den Daten ableitbar sei. Sie müsse dann klar von alternativen Verzweigungsmustern - zum Beispiel büschelartigen oder vernetzten - unterscheidbar sein.¹⁴⁴ In der Molekularbiologie wird daher nach einem Verfahren gesucht, mit dessen Hilfe sich die Topologie der Verzweigung eines solchen Stammbaumes präzise bestimmen läßt.

“Für eine quantitative Lösung dieses Problems hat sich eine Methode als geeignet erwiesen, die innerhalb der letzten zwei Jahrzehnte zur Anwendungsreife gelangte. Es handelt sich um die vergleichende Analyse von Protein-, beziehungsweise Nucleinsäuresequenzen.

Seit den fünfziger Jahren wissen die Biologen, daß die Baupläne der Lebewesen - und damit auch aller von den Lebewesen benutzten und durch die Biosynthesemaschinerie der Zellen hergestellten molekularen Funktionseinheiten - in riesigen Kettenmolekülen, den Desoxyribonucleinsäuren (engl.: deoxyribonucleic acid = DNA), wie in Schriftsätzen niedergelegt sind. Den einzelnen DNA-Abschnitt, der für eine molekulare Funktionseinheit, ein Proteinmolekül, codiert, nennt man das Gen. Die Sequenz der Informationssymbole in den Nucleinsäuren wird in eine kollineare Abfolge der Bausteine des Proteinmoleküls übersetzt. Die exakte Bestimmung ermöglicht es, die genetische Information zu identifizieren.”¹⁴⁵

¹⁴⁴vgl. M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage “Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 24

¹⁴⁵siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage “Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 24-25

Die Methode der Sequenzanalyse wird heute, vor allem für die Analyse der DNA, routinemäßig angewendet. "In Verbindung mit der neuen Gentechnologie, die ein gezieltes Zerlegen der DNA in Genabschnitte erlaubt, lassen sich im Prinzipsämtliche Gensequenzen -und zwar für alle Lebewesen- entziffern und dokumentieren."¹⁴⁶

Heute nutzen die Forscher die Bestimmung von DNA-Sequenzen für eine quantitative Verwandtschaftsanalyse der verschiedenen biologischen Organismen. Dabei werden die Sequenzen eines individuellen Gens in unterschiedlichen Evolutionsstufen Symbol für Symbol miteinander verglichen.

"Sämtliche Stufen der Evolution, von der Differenzierung der Primaten bis zu den allerersten Verzweigungen von Einzellern, lassen sich unter Verwendung geeigneter Genabschnitte quantitativ analysieren. Zu den bestuntersuchten Proteinsequenzen zählen die Immunglobuline, der Blutfarbstoff Hämoglobin und das Atmungsferment Cytochrom c. Bei den Nucleinsäuren sind es hauptsächlich Sequenzen von Komponenten des Reproduktions- und Übersetzungsapparates der Zelle, die Zeugnis von den Anfangsstadien der biologischen Evolution ablegen. Sie wurden bereits für viele Hunderte von verschiedenen Organismen analysiert und lassen die frühesten Verzweigungen der Evolution deutlich erkennen."¹⁴⁷

Eine absolute zeitliche Datierung läßt sich für die allerersten Verzweigungen bisher nicht vornehmen. Die Molekularbiologen kennen bis jetzt erst die absoluten Abstände zwischen den analysierten Sequenzen und die daraus resultierenden Grenzwerte für eine relative Zeitskala. "Man müßte für die jeweiligen Evolutionsabschnitte die gültigen Mutationsgeschwindigkeiten genau kennen, um mit ihrer Hilfe die Informationsabstände in einen absoluten Zeitmaßstab transformieren zu können."¹⁴⁸

¹⁴⁶siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage "Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 25

¹⁴⁷siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage "Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 28

¹⁴⁸siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage "Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 29

Für die anfänglichen Evolutionsstadien kann die Wissenschaft nur Grenzwerte angeben. Die frühesten phylogenetischen Verzweigungen reichen bis circa drei Milliarden Jahre zurück. "Die Extrapolation auf präzelluläre Stufen ist unsicher, doch liegen die frühesten aus Sequenzabständen rekonstruierbaren Verzweigungspunkte molekularer Funktionseinheiten - etwa der Adaptoren des genetischen Codes - relativ nahe bei den Verzweigungen für die ersten Zelltypen. Nach vorsichtiger Schätzung liegt die Phase der Entstehung des molekularen Instrumentariums der Zelle nicht wesentlich mehr als vier Milliarden Jahre zurück."¹⁴⁹ Der genetische Code und die Übersetzungsmaschinerie der Zelle entstanden demzufolge in einem Viertel der gesamten Zeitspanne der Evolution und wurden zu einer für alle Lebensformen verbindlichen Einheit. Eigen hält sehr viel von der Schlußfolgerung, daß das Leben auf unserem Planeten, dessen Alter etwa 4,7 Milliarden Jahre beträgt, entstanden ist. Es bestehe kein Anlaß zu der Annahme, die Existenzzeit unseres Planeten habe für eine Selbstorganisation reproduktionsfähiger Molekülsysteme nicht ausgereicht.¹⁵⁰ "Die Evolution der Arten, von den ersten Einzellern bis hin zum Menschen, vollzog sich innerhalb eines Zeitraumes von drei bis dreieinhalb Milliarden Jahren. Sie wird in rekonstruierbaren phylogenetischen Stammbäumen manifest. Die Aussicht, daß in naher Zukunft die gesamte genetische Information einer Vielzahl von Lebewesen dokumentiert sein wird, eröffnet weitere Möglichkeiten für eine gesicherte Rekonstruktion des historischen Ursprungs des Lebens."¹⁵¹

¹⁴⁹siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage "Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 30

¹⁵⁰vgl. F. H. C. Crick, 1981, "Das Leben selbst", R. Piper & Co. Verlag, München

¹⁵¹siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage "Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 30

2.2.2. Information

“Die Information, der Bauplan der Lebewesen, ist in der DNA gespeichert. Die Symbolabfolge muß wie in einer Sprache organisiert sein. Es gibt in der Tat eine Interpunktion oder Gliederung, die den Riesenschriftsatz in Wörter (Codonen), Sätze (Gene), Abschnitte (Operonen), ja ganze Schriftsätze (Chromosomen), unterteilt. Diese Organisation ist statisch; sie wurzelt in der Struktur, beziehungsweise in der Bausteinsequenz des DNA-Moleküls.”¹⁵²

Die strukturelle Stabilität eines Moleküls, die Stärke seiner chemischen Wechselwirkungen, steht in keinem Zusammenhang mit der semantischen Information, die erst im Übersetzungsprodukt zum Ausdruck kommt. “Die Auslese von informierten, gegenüber nicht-informierten Molekülen beruht nicht auf struktureller Stabilität, sondern basiert auf einer Ordnung, die in der Selektionsdynamik der Reproduktion begründet ist.”¹⁵³

“Alle Lebewesen benutzen als Speicher für ihr Erbmateriale die DNA und verarbeiten die gespeicherte Information nach dem Schema:

Legislative>	Nachricht>	Exekutive>	Funktion
DNA>	RNA>	Protein>	Stoffwechsel

Nicht nur das Schema ist universell, die Detailstrukturen sind es gleichermaßen. Alle Lebewesen machen von einem universellen genetischen Code, einer universellen biochemischen Maschinerie, sowie von makromolekularen Syntheseprodukten, die nach universellen Strukturprinzipien organisiert sind, Gebrauch. (...). Sämtliche Spielarten des Lebens haben einen gemeinsamen Ursprung. Der Ursprung ist die Information, die in allen Lebewesen nach dem gleichen Prinzip organisiert ist.”¹⁵⁴

¹⁵²siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage “Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 49

¹⁵³siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage “Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 49

¹⁵⁴siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage “Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 50-51

Wie kommt nun Information zustande? Manfred Eigen schreibt, es müsse sich um ein dynamisch begründetes Prinzip handeln. Information entstehe aus Nicht-Information. Dabei dürfe es sich nicht lediglich um eine die Information sichtbar machende Transformation handeln, denn der Zustand des Systems nach der Entstehung von Information sei ein völlig neuartiger. Der damit verknüpfte Prozeß sei irreversibler Natur. Der vorherige -informationsärmere- Zustand sei aufgrund der neuen Information instabil geworden und somit irreversibel vergangen.¹⁵⁵

Somit beschreibt Evolution die Entstehung von Information. "Fixiert ist diese Information in den Genen der Lebewesen."¹⁵⁶

In der Entwicklung des Lebens vom Molekül bis hin zum Menschen sind viele Stufen der Organisation durchlaufen worden, "von denen manche darwinistischer, viele dagegen grundlegend anderer Natur waren. Da die Erhaltung aller lebenden Systeme auf Reproduktion basiert, spielt Selektion auf allen Stufen eine Rolle. Doch kommt sie infolge verschiedenartiger Organisationsmechanismen in mannigfaltiger Weise zum Ausdruck, manchmal als Koexistenz oder gar Kooperation, manchmal als Konkurrenz und Auslese bis hin zur nicht mehr revidierbaren 'Ein-für-allemal'-Entscheidung."¹⁵⁷

Experimente an Modellsystemen und quantitative Abschätzungen deuten an, daß die molekulare Optimierung bei einer Sequenzlänge von hundert bis tausend Bausteinen ihre natürliche Grenze gefunden hat. Das bedeutet, daß die Optimierung individueller Gene zweckmäßigerweise vor ihrer Integration zu einem Riesenmolekül, dem Genom, erfolgte. Zum Beispiel macht in einer Bakterienzelle das einzelne Gen weniger als ein Tausendstel des gesamten Informationsgehaltes aus, während die Fehlerrate auf die tausendfache Länge des gesamten Genoms adaptiert ist. Bei einer so kleinen Fehlerrate könnte eine

¹⁵⁵vgl. M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage "Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 55

¹⁵⁶siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage "Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 55

¹⁵⁷siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage "Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 80

Optimierung nur sehr langsam voranschreiten.

Die sexuelle Vererbung beinhaltet einen Austausch von Sequenzabschnitten der DNA zwischen weiblichem und männlichem Erbsatz, so daß in jeder Generation neue Genkombinationen auftreten und für ständige Innovation sorgen. "Die wichtigste Konsequenz dieser Art von Fortpflanzung ist - abgesehen von der großen Variabilität - die Verlagerung der Angriffsfläche der Evolution von der einzelnen Zelllinie auf die gesamte Population, deren Gen-Fundus auf diese Weise jede Veränderung unmittelbar aufnimmt. Die Gene sind damit de facto wieder von der Zentralherrschaft des Genoms befreit. (...). Die Einprogrammierung des Todes wurde unumgänglich, oder treffender formuliert: das Altern und Sterben des Individuums stellte sich als derart vorteilhaft für die Entwicklung der Art heraus, daß sie im evolutiven Prozeß unausweichlich war. (...). Tod bedeutet neues Leben für die Art."¹⁵⁸

Die Entstehung des Lebens sei nicht einfach durch den Übergang von unbelebter in belebte Materie zu definieren, so Eigen. Ein solcher Übergang sei zum einen kaum auszumachen, da er kontinuierlich verläuft, zum anderen sei die Evolution des Lebens damit nicht abgeschlossen. Eine ständige Weiterentwicklung übersteige in ihrer Komplexität die ersten Stufen des Lebens bei weitem.¹⁵⁹

"Zelluläres Leben erschien auf unserem Planeten, nachdem dieser abgekühlt war und eine chemische Selbstorganisation zuließ, innerhalb von weniger als einer Milliarde Jahren. Wahrscheinlich wurde der größte Teil dieser Zeitspanne dazu gebraucht, die für den Lebensprozeß erforderlichen Moleküle soweit anzureichern, daß sie in hinreichender Konzentration vorhanden waren, somit einander oft genug begegnen, und dabei ein 'Sozialwesen', die erste Zelle,

¹⁵⁸siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage "Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 112-113

¹⁵⁹vgl. M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage "Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie", R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 119

organisieren konnten. Demgegenüber verweilte das Leben auf der Stufe des Einzellern für einen Zeitraum von ungefähr drei Milliarden Jahren. (...). Der Weg führte vom Molekül zum integrierten Molekülsystem, von der einzelnen Zelle zum System interagierender Zellen, vom Zellhaufen zum integrierten Zellstaat, vom Organ zum höheren Organismus. Bis zum Menschen dauerte es dann noch einmal fast eine Milliarde Jahre.”¹⁶⁰

¹⁶⁰siehe M. Eigen, 1993, durchgesehene Auflage “Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie”, R. Piper & Co. Verlag, München, Seite 119-120

2.2.3. Molekulargenetisch interpretierte Evolution

Die Entwicklungen in der Biochemie und der Molekularbiologie durch genetische Verfahren, wie der Gentechnik, hätten die Frage, so schreibt Bernhard Irrgang, nach einer informationstheoretischen Interpretation der Evolutionstheorie verstärkt und die Metapher vom Text der Natur wiederbelebt. "Nimmt man aber dieses Bild ernst und betrachtet den genetischen Code als Information, kommt man nicht umhin, ein subjektbezogenes Moment sowohl im Begriff der biologischen Information, der Komplexität, sowie in der Rekonstruktion wie in der Prognose evolutionär-biologischer Ereignisse zuzugestehen. Denn Information ist adressatenbezogen. Für den Biologen besteht diese Information im Gen, für den Biochemiker in der Anordnung der Nukleotide (DNA) und für den Physiker in der Anordnung der Atome. Damit ergibt sich ein spezifisches Problem für die informationstheoretische Deutung des Evolutionsprozesses, nämlich die Frage, auf welcher Ebene die Aussagen über biologische Information angesetzt, bzw. auf welche Ebene sie reduziert werden müssen."¹⁶¹

Es wurden drei Modelle zur Lösung des Problems der Entstehung biologischer Information vorgeschlagen:

1. Laut der Zufallshypothese, vertreten durch Jacques Monod, "ist eine gesetzmäßige Erklärung des Vorgangs biologischer Informationsentstehung kaum möglich."¹⁶²
2. Der teleologische Ansatz von Walter Elsasser und Eugene Wigner "führt diesen Prozeß auf lebensspezifische Gesetzmäßigkeiten zurück, welche die Belebung der unbelebten Materie verursachen."¹⁶³
3. Der molekular-darwinistische Ansatz, entwickelt vor allem von Manfred Eigen, "basiert im wesentlichen auf den Gesetzen der chemischen Reaktionskinetik und beschreibt den Prozeß der

¹⁶¹siehe B. Irrgang, 1993, "Lehrbuch der Evolutionären Erkenntnistheorie", E. Reinhardt Verlag, München, Seite 157

¹⁶²siehe B. Irrgang, 1993, "Lehrbuch der Evolutionären Erkenntnistheorie", E. Reinhardt Verlag, München, Seite 158

¹⁶³siehe B. Irrgang, 1993, "Lehrbuch der Evolutionären Erkenntnistheorie", E. Reinhardt Verlag, München, Seite 158

biologischen Informationsentstehung als einen molekular-darwinistischen Selbstorganisations- und Evolutionsprozeß der Materie, in dessen Verlauf biologische Information sukzessive entstand. Gemäß diesem Modell wirkt Darwins Selektionsprinzip bereits im molekularbiologischen Bereich, was zu Reduktionismuskorrekturen von seiten der Gegner dieses Modells führte.“¹⁶⁴

Aussagen über den Ursprung des Lebens sind nicht einfach vorzunehmen, sie müßten von den heutigen molekularen Strukturen rückwärts extrapolieren. Es seien, schreibt Schuster, Ähnlichkeiten zwischen den Selbstorganisationsvorgängen in Physik und Chemie und der biologischen Evolution festzustellen.¹⁶⁵ Evolution sei sehr schwer zu bewerten, da in geschichtlichen Zeiträumen nur sehr wenige Evolutionsphänomene stattgefunden haben. Aber jede evolutionäre Veränderung einer Spezies bedingt eine neue Umgebung für alle anderen Arten des gesamten Ökosystems. Dabei seien die ersten Anwendungsgebiete der molekularen Evolutionstheorie die Mutations- und Evolutionsexperimente ‘in vitro’ (im Reagenzglas).¹⁶⁶

¹⁶⁴siehe B. Irrgang, 1993, “Lehrbuch der Evolutionären Erkenntnistheorie”, E. Reinhardt Verlag, München, Seite 158

¹⁶⁵vgl. P. Schuster, 1987, “Molekulare Evolution und Ursprung des Lebens” in B.O. Küppers (Hg.), 1992, “Ordnung aus dem Chaos. Prinzipien der Selbstorganisation des Lebens”, 3. Aufl., München, Seite 53f.

¹⁶⁶vgl. P. Schuster, 1987, “Molekulare Evolution und Ursprung des Lebens” in B.O. Küppers (Hg.), 1992, “Ordnung aus dem Chaos. Prinzipien der Selbstorganisation des Lebens”, 3. Aufl., München, Seite 69f.

2.2.4. Entwicklungsbiologie (Molekulargenetische Experimente)

“Das Genom enthält ein genaues Programm, nach dem sich die Lebewesen entwickeln. Die Frage, wie aus der linearen Information, die in der Reihenfolge der Nucleotidbausteine der DNA gespeichert ist, ein dreidimensionaler Organismus entsteht, ist eine der Grundfragen der Entwicklungsbiologie. Dazu kommt als vierte Dimension noch die Zeit, die ebenfalls im Entwicklungsprogramm eingeplant ist. (...).

Höhere Organismen besitzen etwa zwanzig- bis hunderttausend Gene, deren Aktivität von hierarchisch untereinander verschalteten Kontrollgenen gesteuert und koordiniert werden muß. (...). Die Zellen tauschen Genprodukte und Informationen untereinander aus, um einen harmonischen Organismus aufzubauen. Diese Wechselwirkungen zwischen Zellen können heute mit einer Kombination von zellbiologischen, biochemischen und genetischen Methoden aufgeklärt werden. Bei der Kommunikation zwischen Zellen werden Signale von der einen Zelle abgegeben und von der Zielzelle über Rezeptoren wahrgenommen. Der Rezeptor setzt dann einen Signalübertragungsmechanismus in Gang, der das Signal zum Zellkern leitet. Vom Zellkern geht anschließend die Antwort, die Reaktion auf dieses Signal aus. In einzelnen Fällen ist es gelungen, Signal und Rezeptor zu identifizieren und den Übertragungsmechanismus aufzuklären. (...).

Eine der Grundfragen der Entwicklungsbiologie ist diejenige der Musterbildung. (...). Obwohl es schon seit geraumer Zeit Hinweise gibt, daß die Zellen Informationen über ihre Position im Organismus besitzen müssen, war die molekulare Grundlage dieser Positionsinformation und der Musterbildungsprozesse völlig rätselhaft.”¹⁶⁷

VerschiedenemolekulargenetischeBildgebungsverfahren werden genutzt, um diese Rätsel zu lösen. Anders als die vorgestellten Verfahren aus der Astro- und Teilchenphysik, beruhen die bildgebenden Verfahren der Molekulargenetik auf

¹⁶⁷siehe W. J. Gehring, 1992, “Einführung”, in “Entwicklung und Gene”, Spektrum Akademischer Verlag: Verständliche Forschung, Heidelberg, Berlin, New York, Seite

direkter Beobachtung der Aktivität der Gene über die Genprodukte (RNA und Proteine) unter dem Mikroskop. In den letzten zwanzig Jahren wurden so in der Entwicklungsbiologie enorme Fortschritte erzielt.

Die Theorie, daß Zellen bei ihrer Differenzierung Gene an- oder abschalten und das gerade dieses die Entwicklung einer befruchteten Eizelle zu einem Organismus ermöglicht, ist mehr als fünfzig Jahre alt. "In einem Embryo wandern die Zellen nach komplizierten Mustern, verändern ihre Form und vereinigen sich schließlich zu spezialisierten Geweben und Organen. Die mehr als 250 verschiedenen Zelltypen eines Menschen zum Beispiel müssen alle am richtigen Ort die richtige Funktion erfüllen."¹⁶⁸ Alle Körperzellen eines Individuums haben praktisch dieselbe genetische Information in ihrer Erbsubstanz DNA enthalten. "Das Geheimnis, wie ein Embryo die Aktivität seiner Gene so abstimmt, daß die Zellen am rechten Ort zur rechten Zeit sich formieren und funktionieren, beginnt sich allmählich zu lüften. In Aberhunderten von Experimenten hat sich gezeigt, daß die Mehrzahl der Gene, zumindest die meiste Zeit über, auf der Ebene der Transkription reguliert wird: in jenem Prozeß, bei dem die genetische Information der DNA in Ribonucleinsäure (RNA) umgeschrieben - transkribiert - wird. Die RNA übermittelt dann die Botschaft, die verschlüsselte Bauanweisung für das vom Gen kodierte Protein [das Genprodukt], den Eiweißfabriken der Zelle, sie heißt dementsprechend Boten-RNA"¹⁶⁹ (oder messenger RNA).

Die Frage wann und wo (Zeit und Raumkoordinaten) ein Gen transkribiert wird, und wo welche Genprodukte entstehen, läßt sich heute mittels bildgebender Verfahren (hier: Färbetechniken, die unter dem Mikroskop beobachtet werden können) beantworten. Als Farbstoffträger fungieren dabei:

- a) gegen Zielproteine gerichtete Antikörper mit fluoreszierenden Farbstoffen und
- b) radioaktiv-gelabelte komplementäre RNA-Sonden.

¹⁶⁸siehe T. Beardsley, 1991, "Intelligente Gene", in "Entwicklung und Gene", Spektrum Akademischer Verlag: Verständliche Forschung, Heidelberg, Berlin, New York, Seite 50

¹⁶⁹vgl. T. Beardsley, 1991, "Intelligente Gene", in "Entwicklung und Gene", Spektrum Akademischer Verlag: Verständliche Forschung, Heidelberg, Berlin, New York, Seite 50

Durch Gen-Klonierungsmethoden wurde es möglich, einzelne Gene zu isolieren. Die Untersuchungen der letzten Jahre an Segmentierungs- und homöotischen Genen [Entwicklungsgene] haben den Zugang zur molekularen Ebene in der Entwicklungsbiologie eröffnet. In den bildgebenden Verfahren können die Positionen dieser Gene und ihr Verhalten durch Markierung sichtbar gemacht werden.

Homöotische Gene haben eine gemeinsame DNA-Sequenz, die sogenannte Homöobox, und sind an der Festlegung der räumlichen Organisation des Embryos (auch beim Menschen) beteiligt.

“Das räumliche Gen-Expressionsmuster [Steuerungsmuster] wird derzeit durch in-situ-Hybridisierung untersucht (‘in situ’ heißt, im Gewebe des Organismus’ und nicht im Reagenzglas). Bei dieser Technik macht man sich zunutze, daß ein einsträngiges DNA-Stück aus einem Gen mit dem entsprechenden mRNA-[messenger Ribonucleinsäure]-Transkript hybridisiert. Da sich die mRNA an den Stellen im Embryo anreichert, an denen das Gen exprimiert wird [aktiv ist], läßt sich mittels dieser Hybridisierung das räumliche Muster der Gen-Expression sichtbar machen. Als Sonde dienen gereinigte und radioaktiv markierte Gene, die eine Homöobox enthalten. Ein Tropfen der Lösung mit den Sonden-Molekülen wird auf den Dünnschnitt [zum Beispiel] eines *Drosophila*-Embryos aufgetragen. Nacheinander Zeit, wenn die Sonde mit dem mRNA-Transkript hybridisiert hat, wäscht man die überschüssige DNA heraus und bedeckt den Schnitt mit einer photoempfindlichen Emulsion. Diese wird dort, wo sich die radioaktiven DNA-Moleküle mit ihrer eigenen mRNA verbunden haben, durch Strahlung belichtet. An den entsprechenden Stellen erscheinen nach der Entwicklung der Emulsion je nach dem optischen System - also dunkle oder helle Körner.”¹⁷⁰ Mit diesem Verfahren lassen sich auch Transkripte homöotischer Gene nachweisen.

Dieses Verfahren stand am Beginn der molekularen Phase zu Anfang der achtziger Jahre dieses Jahrhunderts. Die Entdeckung der Homöobox bei sehr

¹⁷⁰siehe W. J. Gehring, 1985, “Die molekulare Grundlage der Entwicklung”, in “Entwicklung und Gene”, Spektrum Akademischer Verlag: Verständliche Forschung, Heidelberg, Berlin, New York, Seite 40

verschiedenen Tierarten ließ vermuten, daß die molekularen Mechanismen hinter dem Entwicklungsgeschehen universeller sein könnten, als man bisher geglaubt hatte. Denn die, den Homöoboxen entsprechenden Aminosäuresequenzen, erwiesen sich im Vergleich von Wirbeltieren und Wirbellosen, die sich schon vor mehr als 500 Millionen Jahren auseinanderentwickelt haben, als bemerkenswert übereinstimmend.¹⁷¹

“Der Frage, ob die Ähnlichkeit der Entwicklungskontrollgene (und damit auch die ihrer Produkte) bei vielen Arten von Lebewesen eine funktionelle Verwandtschaft widerspiegeln, sind Forscher in letzter Zeit verschiedentlich nachgegangen; sie haben dazu Entwicklungsgene (oder Teile davon) von einer Art in die andere verpflanzt.”¹⁷² So haben Forscher ein dem Fliegen-Gen entsprechendes Gen der Maus eingepflanzt und zugleich für seine Überexpression (Fehlsteuerung) gesorgt. Die Fliegen zeigten ‘nahezu identische’ Mißbildungen, wie sie bei einer Überexpression desselben eigenen Genes auftreten.¹⁷³

In der Erforschung des Nervensystems wird ein neuartiges Markierungsverfahren angewendet, um die Herkunft bestimmter Zellen sichtbar zu machen. Die zentralen Fragen lauten dabei: “Wie steuert das Netzwerk aus Nervenzellen das Verhalten eines Tieres? Und wie entwickeln sich die Nervenzellen und ihre zielgenauen Verbindungen aus einem befruchteten Ei?”¹⁷⁴ Dabei ist es notwendig herauszufinden, wie das fertige Produkt aussieht und wie es funktioniert, um tiefergehende Fragen zur Entwicklung zu bearbeiten.

¹⁷¹vgl. W. J. Gehring, 1985, “Die molekulare Grundlage der Entwicklung”, in “Entwicklung und Gene”, Spektrum Akademischer Verlag: Verständliche Forschung, Heidelberg, Berlin, New York, Seite 39

¹⁷²siehe T. Beardsley, 1991, “Intelligente Gene”, in “Entwicklung und Gene”, Spektrum Akademischer Verlag: Verständliche Forschung, Heidelberg, Berlin, New York, Seite 58

¹⁷³vgl. T. Beardsley, 1991, “Intelligente Gene”, in “Entwicklung und Gene”, Spektrum Akademischer Verlag: Verständliche Forschung, Heidelberg, Berlin, New York, Seite 58

¹⁷⁴siehe G. S. Stent und D. A. Weisblat, 1982, “Die Entwicklung des einfachen Nervensystems”, in “Entwicklung und Gene”, Spektrum Akademischer Verlag: Verständliche Forschung, Heidelberg, Berlin, New York, Seite 110

Neuronen lassen sich bis zu den feinen Fortsätzen durch die Injektion von Farbstoffen oder fluoreszierenden Stoffen sichtbar machen. Mit dieser Methode ist es möglich, die Verbindung zwischen den Neuronen zu verfolgen.

So werden zum Beispiel sogenannte 'Tracer' (Spurenleger) in eine bestimmte, am frühen Embryo erkennbare Zelle injiziert. Dieser Tracer darf die Entwicklung nicht stören, darf vom Organismus nicht abgebaut oder zu sehr verdünnt werden und soll nicht die durchlässigen Zellkontakte passieren, damit er nur an direkte Nachkommen seiner Zelle weitergegeben wird. Dieser Tracer wird an einen dafür konstruierten Träger gekoppelt. Nach einiger Zeit wird das Embryo durch ein spezielles Mittel chemisch fixiert. Der Farbstoff des Tracers ist so Wochen nach der Injektion in einzelnen Zellen und ihren Abkömmlingen sichtbar. Damit läßt sich dann die Entwicklung eines bestimmten Teils des Nervensystems nachvollziehen.¹⁷⁵

Durch diese verschiedenen Färbetechniken lassen sich Prozesse und Funktionen auf molekular-genetischer, wie auf zellbiologischer Ebene, sowohl zeitlich als auch räumlich, sichtbar machen. Dabei ist es natürlich auch möglich, einen zeitlichen Prozeß darzustellen. Diese bisher noch einzelnen Standbilder könnten im Computer zu kurzen Filmsequenzen zusammengefügt werden.

Noch sind in diesen hier vorgestellten Experimenten die verwendeten Farben beliebig. Das heißt für jeden Forscher, daß er jedes Mal erneut die Bildlegende studieren muß. Eine einheitliche Farbgebung würde das intuitive Erfassen, zum Beispiel von größeren Strukturzusammenhängen, sicherlich vereinfachen.

¹⁷⁵vgl. G. S. Stent und D. A. Weisblat, 1982, "Die Entwicklung des einfachen Nervensystems", in "Entwicklung und Gene", Spektrum Akademischer Verlag: Verständliche Forschung, Heidelberg, Berlin, New York, Seite 117

2.2.5. Molekularbiologische Experimente

Prof. Keith Moffat, Direktor des *Consortium for Advanced Radiation Sources* (CARS) an der *University of Chicago*, untersucht die Dynamik von Makrobiomolekülen. Moffat beschäftigt sich dabei mit der atomaren Struktur der Materie und der Veränderung in bestimmten Prozessen. Die verwendete Technologie zur Untersuchung der biologischen, physikalischen oder chemischen Materie sind Röntgenstrahlen der Advanced Photon Source (APS). Moffat untersucht die Interaktion der Materie mit den Röntgenstrahlen. Diese Strahlung interagiert mit den Elektronen in den Atomen.

Moffats Proben, zum Beispiel Kristalle eines biologischen Materials, bewegen sich in einer Größenordnung von ca. 100 Mikrometern. Das Material wird Mikrometer für Mikrometer beobachtet. Ebenso müssen die Zeitintervalle der Beobachtung klein sein, um Veränderungen beobachten zu können. Die Röntgenquelle der APS pulsiert. Sie gibt alle paar Mikrosekunden Bündel von Röntgenstrahlen ab. Jedes Bündel strahlt ungefähr 100 Pictosekunden lang. In seinen Versuchen gilt Moffats Interesse, der Bewegung der Atome in biologischen Mikromolekülen während diese einem Prozess unterliegen, der von biologischem oder biochemischen Interesse ist.

Moffat betont, daß alles in der Biologie, ob auf der chemischen, biochemischen oder physiologischen Ebene, Bewegung beinhaltet, denn wenn etwas sich nicht bewegt, sei es nicht lebendig. Auf diesem fundamentalen Level sei die Untersuchung von Bewegung, die Untersuchung von Leben.

Erst seit der Entwicklung dieser neuen Röntgenstrahlquellen ist es möglich, Bilder in einem sehr kurzen Zeitraum aufzunehmen. Eines der ersten Experimente dieser Art führte Moffat mit seinem Team in Europa durch. Winzige Kristalle eines biologischen Materials wurden dabei mit pulsierendem Licht aus einem Laser illuminiert. Dieser Laserpuls dauert etwa fünf Nanosekunden und startet die Reaktion. In diesem speziellen Fall brach das Licht eine bestimmte Bindung in einem Protein auf, so daß sich Atome aus ihren ursprünglichen Verbindungen heraus bewegten. Sobald es nach dem Laserblitz wieder dunkel ist, bewegen sich die Atome in ihre ursprüngliche Position zurück, das heißt, die Reaktion ist

innerhalb von etwa 100 Mikrosekunden reversibel. Zu verschiedenen Zeitpunkten des Laserbeschusses werden nun Bilder aufgenommen, mit sieben oder acht verschiedenen Zeitverzögerungen, so daß sich die Atome auf den Bildern an verschiedenen Raumpositionen zeigen. Auf den Bildern sieht man allerdings nicht direkt Atome, sondern die Dichte von Elektronen. Anschließend werden diese Elektronenwolken im Computer mathematisch analysiert.

Auf den verschiedenen Bildern eines Experiments befinden sich die Elektronenwolken an unterschiedlichen Stellen, da sich die Atome bewegen. In der mathematischen Analyse soll herausgefunden werden, wie und wohin sich die Atome bewegen. Allerdings sei bis heute, so Moffat, die Bewegung der Atome, wo sich das einzelne Atom zu jedem gegebenen Augenblick befinde, nicht zu beobachten. Man sieht vielmehr die Anfangs- und Endposition, aber nicht die Bewegung dazwischen. Das Ergebnis der Experimente ist also nicht eine Art Film, in dem der Weg eines Atoms zu beobachten ist, sondern verschiedene, hier vier bis fünf, statische Bilder, wie Fotografien.

Moffat bestätigt, daß in seine gesamte Forschungsarbeit sehr große Mengen an Daten und Computergrafiken involviert sind und ohne diese nicht möglich wäre. Seine Arbeit beinhaltet die Beobachtung dreidimensionaler Reihen von Atomen. Dazu sei es nötig, die dreidimensionale Repräsentation im Computer in alle Richtungen zu drehen. Laut Moffat basiert seine Forschung auf der Visualisierung von Daten.

Dr. Edwin Westbrook, Direktor des *Structural Biology Centers* am *Argonne National Laboratory* (ANL) in Chicago, bietet Molekularbiologen die Möglichkeit, ihre Proben mit den APS-Röntgenstrahlen zu untersuchen. Hier wird die Struktur von Makromolekülen, zum Beispiel von Proteinen, DNA oder RNA, erforscht. Nach Entschlüsselung einer Struktur arbeiten andere Forscher der Gentechnik, der Medikamentenerstellung oder der Enzymmechanik mit diesen Daten.

Auch hier werden aus den Daten der Röntgenbestrahlung nach der Durchführung verschiedener mathematischer Berechnungen Computerbilder erstellt.

Westbrook betont, daß diese Bilder keine Simulationen sind, sondern eine Repräsentation von Daten.

Westbrook wies durch dieses bildgebende Verfahren nach, daß die Moleküle des Cholera Giftes eine kreisförmige Struktur mit einem Loch in der Mitte darstellen. Dieses neue Wissen konnte seiner Meinung nach nur durch diese computergenerierten Bilder nachgewiesen werden.

Auf molekularer Ebene können heute diverse bildgebende Verfahren eingesetzt werden. Zum Beispiel liefern das Elektronenmikroskop und das Kraftmikroskop jeweils leicht andere Perspektiven eines Objektes. Je besser die Struktur bekannt ist, um so leichter wird es für die Wissenschaftler, Rückschlüsse auf die Funktion zu ziehen.

Westbrook betont, daß in den späten 90er Jahren des 20. Jahrhunderts das Verständnis der Molekularbiologie sehr stark von der Fähigkeit der Kristallografen abhängt, zum Beispiel Enzyme und Proteine visuell darzustellen und aus diesen Bildern die nötige Information herauszulesen. Die Fähigkeit, Chemie zu verstehen, so Westbrook, hänge im Wesentlichen mit der Notwendigkeit zusammen, daß das menschliche Verständnis einen visuellen Kontext benötige.

Aber auch in der Molekularbiologie existieren keine internationalen Farbdefinitionen. Die Farbgebung der einzelnen Moleküle wird individuell entschieden.

Westbrook bestätigt, daß die dreidimensionale Darstellung von Relationen in seiner Arbeit von großer Bedeutung ist. Es sei nötig, Vorder- von Hintergrund zu trennen, um nicht nur ein zweidimensionales Liniengewirr zu sehen. Er müsse wissen, wie weit oder nah sich die Objekte befinden und in welche Richtung sie zeigen. Dies sei nur möglich, wenn eine dreidimensionale Repräsentation erstellt werde und diese durch eine Stereobrille auch als räumliche Darstellung betrachtet werden könne. Diese Betrachtungsmöglichkeit von Proteinstrukturen ist heute internationaler Standard.

Als Anwendungsmöglichkeiten der Forschungsergebnisse verweist Westbrook auf die molekulare Biotechnologie und in diesem Zusammenhang auf die Entwicklung neuer Medikamente auf molekularer Ebene.

2.2.6. Molekulare Biotechnologie

Die Biotechnologie nutzt die biologische Zelle und deren Inhaltsstoffe zur Herstellung von Produkten und zur Entwicklung von Verfahren. Die molekulare Biotechnologie ist die modernste Ergänzung der traditionellen Biotechnologie. Sie beinhaltet die Möglichkeit, spezifische genetische Informationseinheiten auf gezielte Weise von einem Organismus auf den anderen zu übertragen. "Grundlage dieser neuen und revolutionären Technologie ist die Gentechnik, mit deren Hilfe definierte DNA-Abschnitte kloniert und damit in größeren Mengen für experimentelle Zwecke verfügbar gemacht werden. Die Erweiterung der traditionellen Biotechnologie mit molekularen Konzepten ausgangs der siebziger Jahre des 20. Jahrhunderts hat völlig neue Anwendungsfelder entstehen lassen, deren Bedeutung auch heute noch nur facettenartig begriffen und beurteilt werden kann und deren Potential, wegen der Möglichkeit des gezielten Eingriffs in das genetische Material von Lebewesen, das Interesse einer breiten Öffentlichkeit gefunden hat."¹⁷⁶

Die molekulare Biotechnologie entwickelte sich als neues Forschungsgebiet aus der Verknüpfung der DNA-Rekombinationstechnik mit der traditionellen industriellen Mikrobiologie. Ziel ist häufig die Herstellung eines nützlichen Produkts, oder die Entwicklung eines kommerziell anwendbaren Verfahrens.

"Ein industrielles, biotechnisches Verfahren, das Mikroorganismen für die Herstellung eines kommerziellen Produktes benutzt, ist durch drei Schlüsselstadien gekennzeichnet:

1. Vorbereitende Maßnahmen (upstream processing): Vorbereitung des Rohmaterials, damit es als Nahrungsquelle für den Zielmikroorganismus eingesetzt werden kann.
2. Fermentation und Biotransformation: Vermehrung (Fermentation) des Zielmikroorganismus in einem großen Bioreaktor (gewöhnlich über 100 Liter Volumen), wobei die gewünschte Verbindung, zum Beispiel ein Antibiotikum, eine Aminosäure oder ein Protein hergestellt wird

¹⁷⁶Siehe B. R. Glick und Jack J. Pasternak, 1995, "Molekulare Biotechnologie", Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite XIII

(Biotransformation).

3. Produktaufarbeitung (downstream processing): Reinigung der gewünschten Verbindung aus dem Zellmedium oder der Zellmasse.

Die biotechnische Forschung beschäftigt sich mit der Maximierung der Effizienz jedes einzelnen Schrittes und dem Auffinden von Mikroorganismen, deren Stoffwechselprodukte sich als Nahrungsmittel, Nahrungsmittelzusätze oder Medikamente eignen.¹⁷⁷

¹⁷⁷siehe B. R. Glick und Jack J. Pasternak, 1995, "Molekulare Biotechnologie", Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 8

2.2.7. Kristallografie

1953 entdeckte der Chemiker Max F. Perutz eine Methode, um die Struktur von Proteinen durch Röntgenstrahl-Kristallografie zu determinieren. Anders als DNA haben Proteine eine extrem unregelmäßige Form und werden daher als die komplexesten bekannten Biomoleküle angesehen. Perutz' Entdeckung führte direkt zur Lösung der Struktur eines Myoglobins und des Haemoglobins. Seitdem ist das Forschungsgebiet der Protein-Röntgenstrahl-Kristallografie ein ständig wachsender Bestandteil der Molekularbiologie. 1990 waren bereits einhundert Strukturen von Proteinen gelöst. Seitdem werden jedes Jahr Hunderte von Proteinstrukturen gelöst. Die große Beschleunigung der Forschungsergebnisse auf diesem Gebiet ist der ständigen Verbesserung der Röntgengeräte zuzuschreiben. Die Daten können schneller gesammelt und analysiert werden.¹⁷⁸

Die DNA-Sequenz eines Gens zu bestimmen, so Perutz, bedeutet an sich nicht sehr viel Information, bevor man nicht das Protein kennt, welches durch dieses Gen codiert ist. Protein-Chemiker weisen immer wieder darauf hin, daß, verglichen mit Protein, DNA nur ein dümmliches ("dumb"¹⁷⁹) Molekül sei, da es keinerlei chemische Funktion habe. Jeder Schritt der DNA Transkription und Replikation würde von Proteinen durchgeführt.¹⁸⁰

Neben der Kristallografie hilft heute die neue und sich sehr rasch entwickelnde Technologie des Nuclear Magnetic Resonance Imaging (Kernresonanzspektrografie), weitere Strukturen von Proteinen zu definieren. Mit NMR werden vor allem Proteine untersucht, die sich nicht kristallisieren lassen. Laut Perutz sind diese beiden Verfahren, die Röntgenbestrahlung und das NMR, zwei komplementäre bildgebende Verfahren. Während die Bilder, die mit Hilfe der Röntgentechnologie erstellt werden, schärfere Darstellungen eines

¹⁷⁸vgl. F. Eijgenraam, 1994, "The advent of molecular imaging", in "Helix Magazin", Amgen GmbH, München, Seite 30-31

¹⁷⁹siehe F. Eijgenraam, 1994, "The advent of molecular imaging", in "Helix Magazin", Amgen GmbH, München, Seite 35

¹⁸⁰vgl. F. Eijgenraam, 1994, "The advent of molecular imaging", in "Helix Magazin", Amgen GmbH, München, Seite 35

gekühlten Proteins liefern und bei dieser Temperatur die NMR Bilder unscharf werden, verhält es sich bei kochenden Proteinen genau umgekehrt. Perutz weist darauf hin, daß bisher die Röntgen-Kristallografie und NMR bei allenuntersuchten Proteinen zu übereinstimmenden Ergebnissen gelangten. So können die Forschungsergebnisse gegenseitig überprüft und bestätigt werden.¹⁸¹

Die bereits definierten Proteinstrukturen werden in einer internationalen Datenbank gesammelt und sind über das Internet jedem Molekularbiologen zugänglich. So ist es möglich, ständige Vergleiche zwischen Strukturen anzustellen. Findet ein Forscher eine neue Struktur und weist sie Ähnlichkeiten mit einer bereits bekannten auf, so kann er über evolutionäre Verbindungen der beiden Proteine spekulieren. Diese Möglichkeit sei auf anderem Wege kaum gegeben. Und in speziellen Fällen sei so Information über die Funktion des Proteins zu gewinnen.¹⁸²

Vor allem die Erforschung und Produktion von neuen Medikamenten wird von den neuen Bildern der Proteine profitieren. Die Definition der Proteinstruktur hilft den Forschungen der Pharmaindustrie. In der nahen Zukunft werde eine wachsende Anzahl von Molekül-Modellierern ("modellers"¹⁸³) mit Molekülen auf den Computerbildschirmen spielen. Und schnellere Supercomputer werden eine interaktive Technologie ermöglichen, mit der man einfach auf ein Atom zeigen und fragen kann, ob ein Molekül in der Datenbank sich an einer bestimmten Stelle an das Atom binden würde. Bis heute sind allerdings noch nicht sehr viele neue Medikamente aus der Strukturellen Biologie und dem Protein Imaging hervorgegangen.¹⁸⁴

¹⁸¹vgl. F. Eijgenraam, 1994, "The advent of molecular imaging", in "Helix Magazin", Amgen GmbH, München, Seite 35

¹⁸²vgl. M. Dedijer, 1995, "Visual Riches", in "Helix Magazin", Amgen GmbH, München, Seite 28

¹⁸³siehe M. Dedijer, 1995, "Visual Riches", in "Helix Magazin", Amgen GmbH, München, Seite 31

¹⁸⁴vgl. M. Dedijer, 1995, "Visual Riches", in "Helix Magazin", Amgen GmbH, München, Seite 31

Die Analyse der Bilder von Protein Molekülen ist eine junge Wissenschaft und wächst gerade aus ihren Kinderschuhen. Die Forschungsergebnisse, darin scheinen alle Molekularbiologen übereinzustimmen, werden vor allem der Entwicklung neuer Medikamente zugute kommen.¹⁸⁵

¹⁸⁵vgl. Dr. D. Blow, 1994, "Solving Protein Structure", in "Helix Magazin", Amgen GmbH, München, Seite 28-29

2.3.

GEHIRNFORSCHUNG

Die menschliche Hirnrinde besitzt etwa 10 Milliarden Neuronen (Nervenzellen), von denen jede mit mehreren Tausend Nervenzellen verknüpft ist.

“Das Neuron ist die funktionelle Einheit des Gehirns. Über die Dendriten und den Zellkörper empfängt die Nervenzelle Informationen, und über ihr Axon leitet sie Signale an andere Neuronen oder sonstige Zellen weiter. Das Axon spaltet sich am Ende typischerweise in eine Anzahl dünner Äste auf, die in kleinen Verdickungen enden; jedes dieser ‘Endköpfchen’ nimmt an einer sogenannten Synapse Kontakt mit einer angrenzenden Zelle auf. Die Synapse stellt die funktionelle Verbindung zwischen einer Axonendigung und einem anderen Neuron (aber auch Muskel- und Drüsenzelle) her: Hier wird die Information von einer Nervenzelle auf die nächste übertragen. Ein ganz schmaler Zwischenraum, der synaptische Spalt, trennt die Axonendigung von dem Zellkörper beziehungsweise Dendriten der Nachbarzelle.”¹⁸⁶

Ein bestimmtes Neuron im Gehirn kann also mehrere tausend synaptische Kontakte mit anderen Nervenzellen aufweisen. Wenn das menschliche Gehirn 10^{11} Neuronen enthält, so besitzt es mindestens 10^{14} , also 100 Billionen, Synapsen. “Die Anzahl der möglichen Kombinationen von synaptischen Verbindungen zwischen den Neuronen in einem einzelnen menschlichen Gehirn ist größer, als die Gesamtzahl der Atome im ganzen bekannten Universum.”¹⁸⁷

Das erklärte Ziel des “Gemeinschaftsunternehmens Hirnforschung”¹⁸⁸, der Neurowissenschaften, ist es, die Funktionsweise unseres Gehirns zu verstehen. “Dabei wird implizit vorausgesetzt, daß Verstehen bedeutet, Leistungen des

¹⁸⁶siehe R. F. Thompson, 1994, “Das Gehirn”, 2.Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 14

¹⁸⁷siehe R. F. Thompson, 1994, “Das Gehirn”, 2.Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 14

¹⁸⁸siehe W. Singer, 1992, “Einführung: Das Ziel der Hirnforschung”, in: “Gehirn und Kognition”, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 7

Gesamtsystems aus dem Zusammenspiel seiner Einzelkomponenten herleiten zu können. Man geht davon aus, daß sich komplexe Funktionen aus der Wechselwirkung einzelner Systemkomponenten ergeben, die, jede für sich genommen, weniger komplexe Eigenschaften aufweisen, als das Gesamtsystem.“¹⁸⁹

Philosophie und Naturwissenschaften waren ursprünglich eng miteinander verwobene und im Grunde untrennbare Verfahren der Erkenntnisgewinnung. Darauf werde ich im dritten Kapitel ausführlicher eingehen. Durch die stürmische Entwicklung der naturwissenschaftlichen Disziplinen haben sie sich jedoch aus den Augen verloren. “Und so folgt der naturwissenschaftliche Erkenntnisprozeß einer Eigendynamik, die durch Anhäufung neuer Beobachtungen unterhalten wird. Neue Fakten führen zu Modifikationen von Modellvorstellungen, Arbeitshypothesen und experimentellen Ansätzen, und letztere erschließen wiederum neue Fakten. Die diesen Aktivitäten zugrundeliegenden Basishypothesen sind jedoch meist implizit, beruhen auf unausgesprochenem Konsens und harren einer philosophischen Durchdringung und Einordnung. Die gezogenen Schlußfolgerungen sind deshalb vermutlich nicht weniger richtig, aber sie erscheinen verschiedentlich als ungeschützt und nicht hinreichend eingebunden in disziplinübergreifende Beschreibungssysteme.“¹⁹⁰

Seit Mitte des neunzehnten Jahrhunderts, besonders im Zusammenhang mit der Entwicklung leistungsfähiger Mikroskope und neuer Färbetechniken (vor allem der sogenannten Golgi-Technik), wurden die anatomischen Grundlagen der heutigen Neurobiologie und Hirnforschung mit ihrem Kernstück, der Neuronentheorie¹⁹¹, geschaffen. Mit der Entwicklung der Elektrophysiologie wurde nachgewiesen, vor

¹⁸⁹siehe W. Singer, 1992, “Einführung: Das Ziel der Hirnforschung”, in: “Gehirn und Kognition”, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 7

¹⁹⁰siehe W. Singer, 1992, “Einführung: Das Ziel der Hirnforschung”, in: “Gehirn und Kognition”, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 7

¹⁹¹vgl. O. Breidbach, 1993, “Nervenzellen oder Nervenetze? Zur Entstehung des Neuronenkonzeptes” in: E. Florey und O. Breidbach (Hg.) “Das Organ der Seele”, Akademie-Verlag, Berlin, Seite 81-126

allem durch die Arbeiten der Physiker und Physiologen Hermann von Helmholtz (1821-1894) und Emil Du Bois-Reymand (1818-1896), daß die Tätigkeit des Gehirns, zum Beispiel die Aktivität der Nervenzellen und die Erregungsfortleitung, mit physikalischen Mitteln untersucht werden kann.¹⁹² "Helmholtz, Du Bois-Reymond, aber auch Ernst Mach (1838-1919), Gustav Theodor Fechner (1801-1887), Karl Ewald Hering (1834-1918) und viele andere Physiker, Physiologen und Psychophysiologen entwickelten ein neurowissenschaftliches Weltbild, das auch noch heute weitgehend gültig ist und den Anspruch erhob und erhebt, sich gleichberechtigt neben den Philosophen und Psychologen mit der Natur und Herkunft geistiger Tätigkeit zu beschäftigen."¹⁹³

Aufgrund neuer Methoden hat sich in den letzten Jahren die Möglichkeit zur Untersuchung neuronaler Grundlagen kognitiver Leistungen, und dies auf ganz unterschiedlichen funktionalen Ebenen, entscheidend geändert. Die Methoden umfassen neben der systematischen Anwendung von Einzel- und Vielzelleableitungen mit Hilfe von Mikroelektroden eine weiterentwickelte Elektroenzephalographie-Technik (EEG-Mapping) und andere bildgebende Verfahren, wie Positronenemissionstomographie (PET) und Kernresonanzspektroskopie (NMR, Functional Imaging).

"Durch die Kombination dieser Methoden lassen sich Hirnanatomie, lokale und globale neuronale Aktivität und kognitive Leistungen des Gehirns systematisch in Verbindung setzen, ohne daß - wie bei den neurophysiologischen und -anatomischen Methoden - der Schädel geöffnet werden muß. Damit wird überhaupt erst eine empirische Überprüfung der Frage nach den neuronalen Grundlagen kognitiver Leistungen beim Menschen möglich."¹⁹⁴

¹⁹²vgl. G. Roth, 1996, "Die Bedeutung der Hirnforschung für die philosophische Erkenntnistheorie und das Leib-Seele-Problem" in: V. Braitenberg und I. Hosp (Hg.)

"Die Natur ist unser Modell von ihr", rororo, Hamburg, Seite 88

¹⁹³siehe G. Roth, 1996, "Die Bedeutung der Hirnforschung für die philosophische Erkenntnistheorie und das Leib-Seele-Problem" in: V. Braitenberg und I. Hosp (Hg.)

"Die Natur ist unser Modell von ihr", rororo, Hamburg, Seite 88

Mit folgenden Techniken werden Bilder vom Computer aus aufgezeichneten und jeweils unterschiedlichen Daten generiert, die die Aktivität des Gehirns darstellen:

¹⁹⁴siehe G. Roth, 1996, "Die Bedeutung der Hirnforschung für die philosophische Erkenntnistheorie und das Leib-Seele-Problem" in: V. Braitenberg und I. Hosp (Hg.) "Die Natur ist unser Modell von ihr", rororo, Hamburg, Seite 90

2.3.1. EEG (Elektroenzephalographie)

“Beim EEG wird am Kopf mittels Oberflächenelektroden die elektrische Aktivität von großen Ensembles kortikaler Neuronen gemessen. Die Zeitauflösung des EEG liegt im Millisekundenbereich. Durch eine größere Anzahl von Elektroden (dreißig und mehr) wird eine räumliche Darstellung der lokalen kortikalen Aktivität erreicht. Diese kann durch rechnerunterstützte Interpolationsverfahren bis auf etwa hundert Aktivitätspunkte erhöht werden (EEG-Mapping). Mit Hilfe des EEG-Mapping lassen sich Erregungsverläufe im Kortex (Gehirnrinde) während kognitiver Leistungen zeitlich genau darstellen. Bei der Messung ereigniskorrelierter Potentiale (EKP) werden durch Mittelungsverfahren Veränderungen im laufenden EEG aufgrund sensorischer Stimulation festgestellt. Dabei werden lokale Veränderungen der elektrischen Hirnaktivität sichtbar, die spezifisch sowohl von der Art der sensorischen Stimulation als auch vom Ort der Registrierung abhängen.”¹⁹⁵

¹⁹⁵vgl. G. Roth, 1996, “Die Bedeutung der Hirnforschung für die philosophische Erkenntnistheorie und das Leib-Seele-Problem” in: V. Braitenberg und I. Hosp (Hg.) “Die Natur ist unser Modell von ihr”, rororo, Hamburg, Seite 90

2.3.2. PET (Positronemissionstomographie)

PET mißt nicht direkt die elektrische Aktivität des Gehirns wie EEG und EKP, sondern beruht "auf der Tatsache, daß neuronale Erregungen von einer lokalen Erhöhung der Hirndurchblutung und des Hirnstoffwechsels (vor allem hinsichtlich des Sauerstoff- und Zuckerverbrauchs) begleitet sind. Bei der PET wird dem Blut ein Positronen aussendendes Isotop (zum Beispiel das Sauerstoff-Isotop ^{15}O) in Verbindung mit einer am Stoffwechsel beteiligten Substanz (zum Beispiel Zucker) zugeführt. Dieser Stoff wird dann in einer besonders hohen Konzentration dort im Gehirn 'verstoffwechselt', wo die Hirnaktivität besonders hoch ist. Die beim Zerfall des Isotops freiwerdende Gammastrahlung registrieren Detektoren, die ringförmig um den Kopf des Patienten angebracht sind."¹⁹⁶ Mit den heutigen Computersystemen lassen sich der Zerfallsort und die Zerfallsmenge genau berechnen und dann in ein dreidimensionales Aktivitätsbild umsetzen. Noch liegt die räumliche Auflösung im Millimeterbereich. Die zeitliche Auflösung ist gegenüber dem EEG deutlich schlechter, das Erstellen eines aussagekräftigen PET-Bildes benötigt 45 bis 90 Sekunden. Das bedeutet, schnellere neuronale beziehungsweise kognitive Prozesse können nicht erfaßt werden. Außerdem liefert PET keine Darstellung der Anatomie des untersuchten Gehirns, deshalb werden die PET-Bilder mit röntgentomographischen oder magnetresonanz-spektroskopischen 3D-Darstellungen kombiniert.¹⁹⁷

¹⁹⁶siehe G. Roth, 1996, "Die Bedeutung der Hirnforschung für die philosophische Erkenntnistheorie und das Leib-Seele-Problem" in: V. Braitenberg und I. Hosp (Hg.) "Die Natur ist unser Modell von ihr", rororo, Hamburg, Seite 90

¹⁹⁷vgl. G. Roth, 1996, "Die Bedeutung der Hirnforschung für die philosophische Erkenntnistheorie und das Leib-Seele-Problem" in: V. Braitenberg und I. Hosp (Hg.) "Die Natur ist unser Modell von ihr", rororo, Hamburg, Seite 90-91

2.3.3. MRI/NMR (KernResonanzspektroskopie)

NMR, auch MRI (Magnetic Resource Imaging) genannt, beruht auf einem anderen Prinzip als PET und nutzt die Tatsache, "daß sich in einem starken Magnetfeld viele Atomkerne mit ihren Magnetachsen parallel zu den Feldlinien ausrichten. Sie senden nach Störung mit einem Radiowellensignal Hochfrequenzsignale aus, die Aufschluß über die Art und Position des Kerns sowie die physikalische und chemische Beschaffenheit seiner Umgebung liefern. Auf diese Weise lassen sich zum Beispiel mit Hilfe von Wasserstoffkernen - anders als bei EEG, MEG oder PET- genaue anatomische Darstellungen von Gehirnen erzielen. Beim funktionellen NMR (fNMR) werden zusätzlich Schwankungen im Sauerstoffgehalt des arteriellen oder des venösen Blutes in Abhängigkeit von der leistungsbedingten Stoffwechselaktivität des Gehirns erfaßt und bildlich umgesetzt."¹⁹⁸ So läßt sich darstellen, in welchem Bereich des Gehirns die neuronale Aktivität erhöht ist. Zwar entspricht die räumliche Auflösung des fNMR in etwa der von PET, dafür ist die zeitliche Auflösung wesentlich besser. Bestimmte Techniken erlauben heute die Darstellung der Geschwindigkeit, mit der sich der lokale Sauerstoffgehalt des Blutes ändert. Es ist möglich, diese Veränderung in wenigen Sekunden, zum Teil sogar in weniger als einer Sekunde, darzustellen. Dies ist immer noch schlechter als beim EEG und technisch nicht wesentlich zu steigern, da die Hirndurchblutungsprozesse im Vergleich zu den neuroelektrischen Aktivitäten viel langsamer ablaufen.¹⁹⁹

"Die Zusammenhänge zwischen lokaler Hirndurchblutung, lokalem Hirnstoffwechsel, lokaler neuronaler Aktivität und spezifischen kognitiven Leistungen sind keineswegs linear. Dies führt zu immer wieder auftretenden Inkonsistenzen zwischen den verschiedenen Meßmethoden, wie auch zwischen Versuchsergebnissen bei Anwendung der selben Methode. An der Bedeutung dieser

¹⁹⁸siehe G. Roth, 1996, "Die Bedeutung der Hirnforschung für die philosophische Erkenntnistheorie und das Leib-Seele-Problem" in: V. Braitenberg und I. Hosp (Hg.)

"Die Natur ist unser Modell von ihr", rororo, Hamburg, Seite 91

¹⁹⁹vgl. G. Roth, 1996, "Die Bedeutung der Hirnforschung für die philosophische Erkenntnistheorie und das Leib-Seele-Problem" in: V. Braitenberg und I. Hosp (Hg.)

"Die Natur ist unser Modell von ihr", rororo, Hamburg, Seite 91

Verfahren für die Aufklärung der neuronalen Grundlagen kognitiver und mentaler Leistungen, insbesondere wenn sie in Kombination angewandt werden, ist jedoch nicht zu zweifeln.”²⁰⁰

²⁰⁰siehe G. Roth, 1996, "Die Bedeutung der Hirnforschung für die philosophische Erkenntnistheorie und das Leib-Seele-Problem" in: V. Braitenberg und I. Hosp (Hg.) "Die Natur ist unser Modell von ihr", rororo, Hamburg, Seite 92

2.3.4. Anwendungen der bildgebenden Verfahren

In Chicago, USA, sprach ich mit Prof. Dr. Chin-Tu Chen (PhD, Associate Professor of Radiology), Direktor des *Frank Center for Image Analysis* über seine Forschungsarbeit. Er forscht nach neuen, physikalischen Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der biomedizinischen bildgebenden Verfahren. Chen unterteilt seinen Forschungsbereich in fünf Kategorien:

1. IMAGING INSTRUMENTATION (bildgebende Apparaturen),
2. IMAGE PROCESSING AND RECONSTRUCTION
(Bildverarbeitung und -rekonstruktion),
3. PHYSIOLOGICAL MODELLING (physiologisches Modellieren),
4. IMAGE ANALYSIS (Bildanalyse) und
5. ADVANCED TECHNOLOGY (weiterführende Technologie).

Ich fragte Chen, inwieweit Visualisierungen von biomedizinischen Daten zu neuen Ergebnissen innerhalb seines Forschungsbereiches führten. Chen verwies auf seine laufenden Versuche mit dem Medikament *Prozac*. Mit Hilfe von PET und MRI werden kombinierte Bilder des Gehirns eines Patienten generiert. Die Bilder vor und nach der Einnahme des Medikamentes werden verglichen. Nach Chen liegt dieser Technik zwar das Prozessieren von umfangreichen Daten zugrunde, und jeder Prozeß beinhaltet mathematische Formeln, aber das Ergebnis ist ein Bild, auch wenn es andere Bilddaten überlagert. Seiner Meinung nach gibt dieses letzte Bild aber direkte Evidenz der Vorgänge im Gehirn. Früher hätten sich Forscher und Mediziner ausschließlich auf Verhaltensstudien verlassen müssen. Das Aufzeichnen der Verhaltensdaten dauerte bisweilen Tage bis Monate. Mit den neuen bildgebenden Verfahren, hier die Kombination aus PET und MRI Daten, erhält man ein direktes Resultat. Man könne hiermit in einer zweistündigen Sitzung eine Interpretation der Bilddaten liefern. Laut Chen habe man so eine direkte Signatur des jeweiligen Gehirns und dessen Reaktion auf das Medikament. Daraufhin könne man das Medikament modifizieren und erneut studieren. Nach Chen produziert diese Technik neue Informationen, die ausschließlich über Bilder erhalten werden. Die pharmazeutische Industrie, so Chen, sei noch nicht von diesen bildgebenden

Verfahren überzeugt. Sie würden zwar angewendet, jedoch müßte ein neues Medikament auch von staatlicher Seite genehmigt werden. Und hier werden die durch PET gewonnenen Daten noch nicht als ausreichend signifikant zur Bewertung eines neuen medizinischen Produktes angesehen. Als Folge setze die pharmazeutische Industrie auch weiterhin die etablierten Verhaltensdaten zur Erprobung neuer Medikamente ein. Generell, so Chen weiter, offeriere er mit seinen bildgebenden Methoden die direkte Visualisierung der Reaktion des Gehirns. Wie dieses Resultat interpretiert würde, werfe ein komplett neues Set von Fragen auf.

Am FMI/PET Center für Gehirnforschung der Universität von Chicago sprach ich mit dessen Direktor, Prof. Dr. Malcolm Cooper (Associate Professor of Radiology), über seine wissenschaftliche Anwendung von bildgebenden Verfahren. Cooper nutzt Images als informierte Elemente von dynamischen Prozessen, welche im Gehirn auftreten, wenn dieses Gehirn in bestimmte Verhaltensweisen involviert ist, mit der Intention, die Beziehung zwischen Verhalten und Gehirn zu examinieren. Cooper nutzt die Images, um ein Signal der biologischen Prozesse zu erhalten, die sich innerhalb eines definierten Zeitraums ereignen, in welchem die Versuchspersonen ein fixiertes Verhalten durchführen. Laut Cooper kann Verhalten das Gehirn beeinflussen, andererseits kann das Gehirn deutlich das Verhalten beeinflussen. Die hier angewendeten bildgebenden Verfahren sind PET und MRI, um sowohl die Struktur, als auch Funktion des Gehirns sehen zu können. Cooper definiert seine zugrundeliegende Hypothese wie folgt: das Gehirn sei ein Organ, das sich, um Verhalten zu beeinflussen, selbst moduliere. Das allgemeine Messen des Energieverbrauchs von Glukose im Gehirn zeige an, wie das Gehirn sich bereit mache, um mit verschiedenen Situationen umzugehen. Cooper postuliert, daß die Gehirn-Verhalten-Beziehung zum Teil durch die Art, wie das Gehirn seinen Energieverbrauch moduliert, erklärt werden könne.

Das spezielle Attribut von PET sei, daß man Positrons nutze, um chemische Verbindungen im Gehirn radioaktiv zu markieren, welche an der Hirndurchblutung,

dem Hirnstoffwechsel und den chemischen Prozessen dazwischen beteiligt seien. So könne man in das Gehirn 'hineinsehen' und dort einen chemischen Prozeß, eine Enzymaktivität oder eine Änderung einer Örtlichkeit an einem Rezeptor beobachten. Laut Cooper ermöglihe dieses kein anderes Verfahren. So habe man eine einzigartige Verfahrensweise, die 'invivo' (im lebenden Organismus) Chemie des Gehirns zu beobachten. In seinem Forschungsbereich nutze man PET, um die Effekte von Medikamenten und Drogen zu studieren.

Coopers Kollege, Dr. John Metz (PhD, Senior Research Associate, Associate Director) am FMI/PET Center für Gehirnforschung, schränkt ein, man nutze nicht das direkte Bild des Gehirns, sondern analysiere ein Image, das nach dem Prozessieren durch den Computer (nach der Anwendung diverser Algorithmen) entstehe. Auch Metz verwendete das Antidepressiva *Prozac* als Fallbeispiel. *Prozac* sei ein signifikantes und kein leichtes Medikament, da es einen depressiven Zustand in einen zufriedenen verändern könne. Aber man wisse aus der klinischen Arbeit mit *Prozac*, daß man bei einer einmaligen Vergabe kaum einen Effekt beim Patienten beobachten könne. Man müsse *Prozac* mindestens zwei bis drei Wochen verabreichen, um eine Auswirkung festzustellen. Daraus zog Metz den Schluß, daß auch bei der Erstellung von PET Images der Effekt von *Prozac* kaum auszumachen sein würde. In seinen PET Studien sind die Versuchspersonen in einer standardisierten Verhaltenskondition. Das heißt, sie schauen auf einen Bildschirm, auf dem sich nur die Helligkeit ändert. Jedesmal wenn der Bildschirm dunkel wird, soll die Person einen Knopf drücken. Diese langweilige Prozedur sei 30 Minuten auszuführen, so daß man ein gutes Bild von einem gelangweilten Gehirn bekäme. Die Langeweile funktioniere, so Metz, als Bildhintergrund für die zu studierenden Effekte des verabreichten Medikaments. Wie bei jeder Medikamentenstudie bekommen die Versuchspersonen auch hier, ohne ihre Wissen entweder *Prozac* oder ein Placebo. Ebenso wird diese, salopp als Langeweile-Hintergrund bezeichnete Konzentrationsübung, bei allen seinen Medikamentenstudien eingesetzt. Die Versuchspersonen sollen daran gehindert werden, an irgendetwas anderes zu

denken. Außerdem wird vor jedem PET Test mit der Versuchsperson ein standardisierter psychologischer Test durchgeführt, um die allgemeine Stimmung vor dem Test zu eruieren.

Metz sucht bei seinen PET Studien nach einer signifikanten Änderung in der Stimmung einer Versuchsperson zwischen einem Placebo- und einem *Prozac* Tag. Er sucht nach den Unterschieden in der Stimmung und versucht zu beobachten, wie sie sich verändert. Metz führt diese Studien seit vielen Jahren durch und betont, er kenne die Muster, nach denen er suche. Bei *Prozac* gab es keine meßbaren Veränderungen in der Stimmung der Versuchspersonen, keine Unstimmigkeiten zwischen den Resultaten aus dem Verhalten und den PET Images der Versuchspersonen. Metz fügt hinzu, daß es dafür allerdings auch keine Beurteilungskriterien gibt. Man wisse nicht, auf was man in den PET Images schaue, man könne nur unter den Aspekten des zu beobachtenden Verhaltens interpretieren. Das heißt, wenn man in dem Verhalten etwas bestimmtes beobachte, könne man nach der Entsprechung in den PET Images suchen. Es sei irreführend zu denken, ein Image würde etwas aussagen. Wichtig sei die wissenschaftliche Präposition, mit der man das Bild betrachte. Die experimentellen Daten unterstützen oder widerlegen eine zuvor aufgestellte Theorie. Es sei ein konstanter Vor-und-zurück-Dialog mit der gewonnenen Information. Wir besitzen, sagt Metz, keinen absoluten Referenzpunkt, den wir sehen könnten, an dem wir die experimentellen Daten ausrichten könnten. Aus diesen Überlegungen heraus fordert Metz, daß alle wissenschaftlichen Fachgebiete (Natur- und Geisteswissenschaften, wie Techniker, die freien Künste und Designer) die Images aus ihrer jeweiligen Perspektive analysieren und beurteilen.

Richard F. Thompson beurteilt unsere aktuellen Kenntnisse von den komplexeren, kognitiven Aspekten der Hirnfunktionen - Sprache, Gedanken, Bewußtsein - als bruchstückhaft.²⁰¹ "Die neuen bildgebenden Verfahren führen

²⁰¹vgl. R. F. Thompson, 1994, "Das Gehirn", 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 485

uns mit immer mehr Einzelheiten vor Augen, welche Hirnregionen bei komplexen geistigen Handlungen tätig werden. Hier wird es zu raschen Fortschritten kommen. Doch stellen diese Vorgänge das Ergebnis von Tätigkeiten immens komplizierter Schaltkreise im Gehirn dar. Auf dieser Ebene wird man die Netzwerke des Nervensystems nur allmählich verstehen können. Die verhältnismäßig neue Forschungsdisziplin mathematisch-informatischer Analyse neuronaler Netzwerke wird hierbei von wachsender Bedeutung sein. Selbst für unseren derzeitigen Wissensstand, der die Nervenschaltkreise für einfache Verhaltensaspekte umfaßt, sind die Schaltkreise bei weitem zu verflochten, um sie auf verbal-qualitativer Ebene zu begreifen. Nur, wenn wir Computermodelle dieser Schaltkreise entwickeln, können wir verstehen, wie sie auf quantitativer Ebene arbeiten.”²⁰²

Unserem menschlichen Primärerfahrungen sind gefiltert, “das Gehirn ‘erfährt’ durch seine Sinnesorgane nur, was es und der es bergende Organismus zum Leben und letztlich zum Überleben brauchen kann. Materie, so wie sie sich unserer Primärerfahrung offenbart, ist für uns Menschen zunächst etwas Dingliches, Nehm- und Greifbares. Die Erweiterung unseres Sinnesapparates unter Zuhilfenahme technischer Geräte hat uns jedoch gelehrt, daß dieses Konzept nicht für beliebige Skalierungen gilt. Weder in sehr großen noch in sehr kleinen Maßstäben verhält sich Materie so, wie wir sie natürlich wahrnehmen.”²⁰³

“Aber auch die technische Erweiterung unserer Sinne und die daraus resultierende Verfügbarkeit von Fakten, die unserer Primärerfahrung unzugänglich sind, bewirken nicht notwendigerweise, daß unsere Konstrukte ‘wirklichkeitsnäher’ werden. Denn sowohl bei der Fertigung der Meßvorrichtungen, als auch bei der Interpretation der Beobachtungen greifen wir auf Hypothesen, Begriffssysteme und Axiome zurück, die im Laufe der Menschheitsgeschichte aufgrund von

²⁰²siehe R. F. Thompson, 1994, “Das Gehirn”, 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 485

²⁰³siehe W. Singer, 1992, “Einführung: Das Ziel der Hirnforschung”, in: “Gehirn und Kognition”, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 8

Wahrnehmungen aufgestellt worden sind.“²⁰⁴

Wahrnehmung ist also keine Abbildung der Realität, sondern ein bewährtes, handlungsleitendes Konstrukt. Eine enge Korrespondenz mit objektiven Verhältnissen ist für ein solches erfolgreiches Konstrukt keineswegs stets erforderlich. Für uns scheint es grundsätzlich unmöglich, eine derartige Korrespondenz zweifelsfrei festzustellen, denn wir können bei der Überprüfung dieser Frage “niemals aus den Bedingungen unserer Wahrnehmung heraustreten. (...). Dies gilt natürlich auch für die Hirnforschung selbst; sie kann Dinge ergründen, die maximal plausibel sind, aber nicht die objektive Wahrheit.“²⁰⁵

Für Roth ist die Tatsache, daß das Bemühen, die Prinzipien von Wahrnehmen und Erkennen rein durch Eigenbeobachtung und bloßes Nachdenken herauszufinden, vollkommen in die Irre gehen muß, von größter Bedeutung für die Erkenntnistheorie, denn dem Konstrukt könne man nicht den Konstruktionsprozeß ansehen. Dies sei aber nicht zwangsläufig das Ende der philosophischen Erkenntnistheorie, und zwar dann nicht, wenn sie die Ergebnisse der Hirnforschung konsequent berücksichtige.²⁰⁶

²⁰⁴siehe W. Singer, 1992, “Einführung: Das Ziel der Hirnforschung”, in: “Gehirn und Kognition”, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Seite 8

²⁰⁵siehe G. Roth, 1996, “Die Bedeutung der Hirnforschung für die philosophische Erkenntnistheorie und das Leib-Seele-Problem” in: V. Braitenberg und I. Hosp (Hg.) “Die Natur ist unser Modell von ihr”, rororo, Hamburg, Seite 100

²⁰⁶vgl. G. Roth, 1996, “Die Bedeutung der Hirnforschung für die philosophische Erkenntnistheorie und das Leib-Seele-Problem” in: V. Braitenberg und I. Hosp (Hg.) “Die Natur ist unser Modell von ihr”, rororo, Hamburg, Seite 100

2.3.5. Gehirnverpflanzung

Die bildgebenden Verfahren der Gehirnforschung ermöglichen den Einsatz und die Überprüfung neuer Operationstechniken, wie z.B. in der Neurochirurgie. Die Möglichkeit der Transplantation von menschlichem Gehirngewebe wirft nicht nur medizinische, sondern auch geisteswissenschaftliche und ethische Fragen auf. Auf diesem Gebiet ist eine disziplinübergreifende Kommunikation unerlässlich. Dieser medizinische Bereich soll hier als Übergang von Natur- zur Geisteswissenschaft vorgestellt werden

“Die ersten klinischen Tests mit der Einpflanzung von Gewebe in das Gehirn zum Zweck der Ersetzung ausgefallener Hirnfunktionen wurden 1982 in Schweden durchgeführt. Backlund und seine Mitarbeiter berichten 1985 über ihre ersten beiden Patienten. In diesen Fällen war noch nicht fremdes fetales Mittelhirngewebe, sondern Nebennierenmarksgewebe der Patienten selber verwendet worden, welches im Gehirn hormonell wirksam werden sollte. (...) Die erste Einpflanzung von fremdem *Hirngewebe* in ein menschliches Gehirn erfolgte 1987.”²⁰⁷

Diese Technik wurde bisher nur bei Parkinson-Patienten eingesetzt, die auf die medikamentöse Behandlung nicht ansprachen. Forscher auf diesem Gebiet meinen jedoch, die Anwendung dieser Methode auch auf andere chronische Erkrankungen übertragen zu können. Dazu gehören Alzheimer, Schizophrenie, Multiple Sklerose, Epilepsie, Querschnittslähmung, Hirnverletzungen, etc..²⁰⁸

Die Einpflanzung von Gewebe in das Gehirn kann durch eine Hohlnadel erfolgen, ohne daß das Gehirn auf breiter Fläche geöffnet werden müßte. “Der Neurochirurg findet dabei den Zielort für das Gewebe mit Hilfe von Röntgenkontrolle und mathematischen Berechnungen, die bereits auf einem kleinen Personalcomputer durchgeführt werden können.”²⁰⁹ Diese Operation

²⁰⁷ siehe D. B. Linke, 1993, “Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 12

²⁰⁸ vgl. D. B. Linke, 1993, “Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 21

²⁰⁹ siehe D. B. Linke, 1993, “Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 28

kann bei vollem Bewußtsein durchgeführt werden, da das Gehirngewebe zwar für die Schmerzempfindung das entscheidende Wahrnehmungsorgan ist, selber aber weitgehend schmerzunempfindlich ist. Es muß nur eine örtliche Betäubung an der Kopfhaut durchgeführt werden.

Bei der Transplantation anderer Organe müssen Immunsuppressiva eingesetzt werden, damit sich das Immunsystem des Patienten nicht gegen das körperfremde Spenderorgan wehrt. Bei den Gehirnverpflanzungen fiel jedoch auf, daß das menschliche Gehirn offenbar nur in geringem Maße Abstoßungsreaktionen zeigt.²¹⁰

Lange Zeit war es unsicher, ob Hirngewebe von Ungeborenen, das bei abgetriebenen Feten entnommen wurde, bei Erwachsenen einwachsen würde. "Mit den bildgebenden Verfahren der Neuroradiologie konnte man jedoch nachweisen, daß das fetale Gewebe im Hirn des Empfängers seinen Stoffwechsel fortsetzt und auch einen Wachstumsprozeß eingeht. Mit radioaktiv markiertem Dopamin konnte gezeigt werden, daß dieses Gewebe Dopamin freisetzt."²¹¹

"Von großem Interesse ist nun die Tatsache, daß das eingepflanzte Hirngewebe bei seiner Entwicklung nicht unbedingt immer jene Transmitterproduktion in den Vordergrund stellt, für welche sie zunächst eingepflanzt worden war. So konnte nachgewiesen werden, daß bei Verpflanzung von Hirngewebe aus der Substantia nigra in das Striatum in dem Nervengeflecht insbesondere jene Nervenzellen sich zu weiterem Wachstum entwickelten, welche nicht Dopamin, sondern Serotonin, einen völlig anderen Transmitter, herstellten.

Wenn man diesen Sachverhalt berücksichtigt, so kann Hirngewebe-transplantation auch unter neurowissenschaftlichen Aspekten nicht bloß als Ersatz ausgefallener Hirnregionen gedeutet werden, sondern muß als Ausgangspunkt für eine dynamische völlige Neustrukturierung des 'Spender'-Empfänger-Systems angesehen werden. (...). Das innige Zusammenwachsen der zwei

²¹⁰vgl. D. B. Linke, 1993, "Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 34-35

²¹¹siehe D. B. Linke, 1993, "Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 31

Zellsysteme mutet in mancher Hinsicht wie das Verschmelzen zweier Personenkerne an. Der Versuch, den Infragestellungen des Verfahrens im Hinblick auf die personale Identität des Menschen dadurch zu entgehen, daß man zu einem technischen Zellengineering übergeht und versucht, Zellkulturen zu entwickeln, die dann kaum noch die Charakteristika des ursprünglichen Spenderindividuums aufweisen, kann der Frage nach dem Personsein, beziehungsweise der Individualität des Menschen, nicht ganz entgehen, denn die Verschmelzung mit einem technisch hergestellten Neuronennetz würde die Frage nach der Identität des Hirngewebeempfängers nur etwas verschieben. Es wäre dann die Frage nicht, ob der Mensch mit dem Substrat einer anderen Person verschmelzen kann, sondern ob er sich selbst in ein technisches System verwandeln kann.”²¹²

Die Welt vom Ich her zu deuten entspricht, laut Linke, sowohl der Vorgehensweise der Erkenntnistheorie, als auch den psychotherapeutischen Maßnahmen, bei welchen die Heilung der Seele zunehmend mit der Identitätsbildung gleichgesetzt wird.²¹³ Bei der Hirngewebeverpflanzung würden nun die tiefenpsychologischen ‘monarchischen’ Machtstrebungen der Seele mit den Konzepten einer technisch-naturwissenschaftlich orientierten Egologie zusammen treffen.²¹⁴ Für Linke ist dementsprechend die zentrale Frage der Neurologie, die nach der Identität des Menschen.²¹⁵

Dabei hält Linke die Nichtberücksichtigung des Gehirns bei allen Fragen der Beziehung von Verstand und Körper für die Ursache der dualistischen Irrtümer bei der Konzeption des Leib-Seele-Problems (siehe auch Kapitel 2.7.). Stattdessen müßten wir lernen, “das Gehirn als ein System zu verstehen, das

²¹²siehe D. B. Linke, 1993, “Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 46-47

²¹³vgl. D. B. Linke, 1993, “Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 48

²¹⁴vgl. D. B. Linke, 1993, “Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 77

²¹⁵vgl. D. B. Linke, 1993, “Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 86

sich zwischen Leib und Seele angesiedelt hat, die wir uns als traditionelle Dualität zu sehen angewöhnt haben. Das System Gehirn ist der Ort, an dem sich Eigenes und Fremdes treffen, an dem Leib und Seele ihre Ansprüche und Beziehungengleichermaßen austragen.“²¹⁶ Linke fordert, “daß man aus dem kruden Geist-Materie-Schema heraustritt und sieht, daß das Gehirn stets Form *und* Materie, nämlich geformte Materie ist, in welcher beide nicht voneinander getrennt werden können.“²¹⁷

Linke plädiert für einen “relationalen Seelenbegriff, der den Menschen immer schon als auf den anderen ausgerichtet versteht und nicht zuläßt, daß der Mensch durch eine ethiklose Ontologie bestimmt wird.“²¹⁸ Der Mensch sei erst richtig verstanden, so Linke, wenn er als relationales Wesen gedeutet werde, das seine Wahrheit erst in der Beziehung entfaltet und dessen Wahrheit diese Beziehung ist, und nicht nur der Punkt, von dem aus sie als ausgehend gedacht werde. Würden wir die Welt, so Linke weiter, von dieser Relationalität her deuten, was viele Vorteile für unsere alltägliche Kommunikationsfähigkeit und Kommunikationsbereitschaft bringen würde, so erschiene die hirngetragene Kognition nur als ein abgeleitetes Phänomen einer relationalen Grundstruktur der Welt.²¹⁹

In der modernen Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie werde der Großteil des Aufwandes darauf verwendet, diesen Wandlungen des ‘Beobachters’ entgegenzuwirken und ihn in der Position verharren zu lassen, in welcher der Gegenstand feststehe. Dies sei, so Linke, zur Erreichung gewisser technischer Ziele unabdingbar. Linke betont, daß das Gehirn aber eben nicht nur dieser festgestellte Gegenstand in der Naturwissenschaft sei, sondern vielmehr Ausgangspunkt für einen tiefen seelischen Prozeß sein könnte, aus dem alle

²¹⁶siehe D. B. Linke, 1993, “Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 110

²¹⁷siehe D. B. Linke, 1993, “Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 130

²¹⁸siehe D. B. Linke, 1993, “Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 208

²¹⁹vgl. D. B. Linke, 1993, “Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden”, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 208-211

Bilder des Kosmos' hervorgehen könnten.²²⁰

Die Dynamik zwischen rechter und linker Hirnhälfte gestalte des Menschen Lebensschicksal. Und indem er die Hirnhälften nutze und sich als Nutzer jeweils 'in' einer oder beiden von ihnen mit unterschiedlicher Gewichtung aufhalte, gestalte der Mensch sein Lebensschicksal. Es gäbe, so Linke, keine Metareflectionsebene, mit der der Mensch dieser Dynamik entgehen könne. Sie selber müßte zu einem bestimmten Hemisphärenaktivierungsmuster führen, wie es jeder Positron-Emissions-Tomograph aufzeigen könne.²²¹

Die große Leistungskraft des menschlichen Gehirns läge in dem Wechsel von Hierarchie und Heterarchie (Nebenordnung). Der Streit zwischen Hierarchie und Netzwerk, zwischen Vertikalität und Parallelität, zwischen Über- und Unterordnung, sei Ausdruck eines dynamischen Auseinander- und Zusammengehens zweier grundlegender Funktionsprinzipien des Gehirns.

Hirngewebeverpflanzung sei eine Identitätsänderung und mit dem schwer zu kalkulierenden Risiko des Identitätsverlustes behaftet, stellt Linke abschließend fest. Im Denkhorizont der Postmoderne, die sich von alten Identitätsverhärtungen freimachen wolle und Identität sogar als ein Hindernis der Freiheit ansehe, könne eine Gegenbewegung gegen eine tiefgehende Hybridisierung des Menschen nicht erwartet werden. Die Postmoderne würde in der Hirnverpflanzungstechnik nur bestätigt finden, was sie ohnehin schon lange diagnostiziert habe und dem ihrer Ansicht nach durch die Herrschaft des Subjekts niemand und nichts mehr entgehen könne. Künstler würden sich in ihren Arbeiten bereits zur multiplen Identität bekennen und die Pluralität ins Subjekt verlagern. Der Erfahrungsbereich der modernen Kunst, in dem sich die Zerstückelung der Welt zum Ausdruck bringe, und welche durch keine Harmonisierungsversuche mehr eingeholt werden könne, sei auch von der Philosophie, wenn auch mit erheblicher Verspätung, eingeholt worden.²²²

²²⁰vgl. D. B. Linke, 1993, "Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 216

²²¹vgl. D. B. Linke, 1993, "Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 220

Insofern wertet Linke das Jahr 1982 mit der ersten Gewebepflanzung in ein menschliches Gehirn als ein historisches Jahr in der Menschheitsgeschichte, dessen Bedeutung nur wenige andere geschichtlichen Ereignisse gleichkämen. Linke ist überzeugt, daß der Fortbestand der Menschheit durch Fortpflanzung von Hirnsubstanz, die perpetuierende Hirngewebepflanzung, im Horizont unserer individuumorientierten Ethik nicht aufgehoben werden wird.²²³

Abschließend sei noch erwähnt, daß in China bereits der Einsatz von Hirngewebeverpflanzungstechniken zur Behandlung von Intelligenzdefiziten bei Kindern begonnen hat.²²⁴

Eine der interessantesten Aufgaben der Hirnforschung sei es, so Linke, die Isomorphie (Strukturentsprechung) zwischen den Urbildern und den ihnen zugrundeliegenden Denkakten, die in ihrer Spur diese Bilder hervorrufen, näher zu untersuchen. Zunächst käme es darauf an, überhaupt erst einmal eine sinnvolle Klassifikation dieser Urformen zu liefern und dann ihren Zusammenhang mit den allgemeineren Persönlichkeitsstrukturen aufzuweisen. "Soll man Persönlichkeit mit diesen Grundmustern, die einem Menschen oft nur in Krisen des eigenen Lebens bewußt werden, mit der Grundstruktur der Persönlichkeit identifizieren und Persönlichkeit mit den urbildtragenden Strukturen des Gehirns gleichsetzen? Hier tut sich ein großes Forschungsfeld auf, an dem viele gemeinsam arbeiten werden. Festzustellen ist, daß die vielen Künstler, Natur-, Geistes- und Gesellschaftswissenschaftler bei dieser Aufgabe selber auf mannigfaltige Weise in diese Bilder verstrickt sein werden. Dies aber macht durchaus das Glück des Lebens aus."²²⁵

²²²vgl. D. B. Linke, 1993, "Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 300-305

²²³vgl. D. B. Linke, 1993, "Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 308

²²⁴vgl. D. B. Linke, 1993, "Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 309

²²⁵siehe D. B. Linke, 1993, "Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 175-176

Linke hält eine evolutionäre Perspektive, wie sie im folgenden dritten Kapitel besprochen wird, bei der Meisterung der Probleme der hier angesprochenen Entwicklung nicht für die letztgültige. Denn sie gehorche einem egologischen Archetypus, der bei der Lösung der Probleme der Entwicklung im Wege stehen könne, gerade eben weil er nur auf Entwicklung achten lasse.²²⁶

²²⁶vgl. D. B. Linke, 1993, "Hirnverpflanzung - Die erste Unsterblichkeit auf Erden", Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, Seite 262