

**Wolfgang Hagen<sup>1</sup>**

**Die Entropie der Fotografie.**

**Skizzen zur einer Genealogie der digital-elektronischen Bildaufzeichnung.**

„An Personen kann man sich rächen,  
die Unbilden des Zufalls aber muss man  
hinunterwürgen.“<sup>2</sup>

Was seit Ende der achtziger Jahre<sup>3</sup> unter „Digitaler Fotografie“ firmiert, vermischt oft genug bis zur Unkenntlichkeit – man mag auch sagen „entropisch“ – drei umfangreiche und historisch ungleich ältere Wissensgebiete ineinander: *Image processing* (mathematische Bildverarbeitungstechniken), *Computergrafik* (Techniken der algorithmischen Bild- Erzeugung), und *elektronische Bilddetektoren* (Halbleiter- / “CCD“-Technik). Das umfassende Feld der digitalen Bildproduktion „Digitale Fotografie“ zu nennen, macht alle Katzen grau.

Ganz praktisch gefragt, was hat „Fotografieren“ durch digitale Bilddetektoren verloren? Wenig, vielleicht hier und da gar gewonnen (an Geschwindigkeit z.B.)<sup>4</sup>. - Was aber hat „Fotografieren“ durch digitale Bilddetektoren verloren kulturhistorisch und in Bezug auf die Episteme des Wissens? Das ist die Frage der nächsten fünf Viertelstunden. Die SchlussThese wird sein, dass ein paradigmatischer Zusammenhang zerbrochen ist, der der Fotografie mehr als ein Jahrhundert lang zur Instanz eines Wissens und dessentwegen zu seiner kulturgeschichtlichen Bedeutung verhalf. Gefördert und gefordert von der Wissenschaft um 1840 wurde sie, die Fotografie, in den Kreis der Instrumente einer Selbstaufschreibung der Natur aufgenommen, ein Kreis, in dem die Lichtenbergschen Figuren von 1777 und vor allem Chladnis Klangfiguren von 1802 schon gut inventarisiert waren, und in dem, um mit Bernhard Siegert zu sprechen, schon die fouriersche „Hitze“ brodelte in Gestalt einer bereits schon nicht-mehr-eulerschen und nicht-mehr-leibnizianischen Funktionenmathematik. In den neuesten Wissensfeldern des Bildlichen unserer Tage, geprägt von der Epistemologie der Quantenmechanik und des Computers, hat nach knapp anderhalb Jahrhunderten diese Funktion der „Selbstchiffrierung“(Novalis)<sup>5</sup> der

---

<sup>1</sup> Referat Oberseminar Friedrich Kittler, 10.07.2001, Humboldt Universität Berlin

<sup>2</sup> Nietzsche, Werke:1988, Bd. 2, S. 258.

<sup>3</sup> Vgl. Schröter, Geschichte:2001, im Erscheinen. Ich danke Jens Schröter für seine hilfreiche Materialzusammenstellung und seine unverzichtbaren Anregungen.

<sup>4</sup> Kein Sportfotograf, der nicht digital fotografierte. Das Spiel läuft noch und die Redaktion hat schon Bilder.

<sup>5</sup> Allgemein Brouillon

Natur mittels Fotografie seit etwa zwei Jahrzehnten im wesentlichen ausgedient.<sup>6</sup> In Rahmen dieser neuen Epistemologie, genauer: im Kontext der „Halbleiterphysik“, wird ab 1970 die Fotografie ‚neu‘ definiert, nämlich als quantenmechanischer Photovoltaik-Effekt. Digitale Foto-Chips erzeugen, kurz gesagt, aus Licht Strom. Aber ihre Entwicklung geschah ohne Bezug auf die Fotografie, nahezu ‚nebenbei‘, völlig unbildlich, als Auswurf und technischer ‚cut out‘ eines Wissens, zu dessen Genealogie die folgenden Anmerkungen beitragen wollen.

### **Die Enthüllung**

Es waren nicht die Künstler, Instrumentenmacher oder Bastler, die die Fotografie *in die Welt setzten*, sondern die europäischen Wissenschaftseliten, die führenden ihrer Zeit. Kein geringer als der Doyen der französischen Wissenschaft, Francois Jean Dominique Arago, Observatoriumsdirektor, Parlamentarier und Sekretär der Académie des Sciences, präsentierte auf der montäglichen Sitzung des 7. Januar 1839 in aller Ausführlichkeit erstmals die Fotografien Daguerres. Daguerre sagte kein Wort. Diese „sensation“<sup>7</sup> forderte William Henry Fox Talbot, Mitglied der Royal Society und Exparlamentarier, heraus. Zweieinhalb Wochen später ließ er seine eigene Erfindung, die „photogenischen Zeichnungen“<sup>8</sup>, durch Londons größte physikalische Berühmtheit, nämlich den ‚Chef‘ der Royal Institution, Michael Faraday, im weiten Rund der dortigen Bibliothek präsentieren.<sup>9</sup> Dieser französisch-englischen Doppel-„Enthüllung“<sup>10</sup> der Fotografie folgte ein wissenschaftspolitischer Streit auf dem Fusse, der mit Fernwirkung noch heute die Fotografiehistoriker umtreibt. „What is this thing we call photography?“<sup>11</sup>, fragt Geoffrey Batchen, und wer hat das Ding wann und wie und wo und warum, entwickelt, erfunden oder entdeckt? Waren es wirklich die Franzosen Daguerre (der Maler) und Niépce (der Physiker von Châlon), wie Arago dekretierte? Waren es nicht vielmehr die Engländer Davy (der Chemiker) und Talbot (der Multi-Wissenschaftler und Literat), wie Talbot es behauptete? Oder waren es – teils gemeinsam mit ihnen, teils früher, teils später - Henry Brougham, Elizabeth Fulhame, Tom Wedgwood, Anthony Carlisle, Humphry Davy, Eugene Hubert, James Wattles, Hercules Florence, Richard Habersham, Philipp Hoffmeister, Friedrich

---

<sup>6</sup> Die letzte große Wissenschaftsbastion der Fotografie, die Mikrophysik der „cloud“-, „bubble“- und „diffusions-photography“, schließt Mitte der 80er Jahre. Vgl. Galison, Image:1997, 559ff.

<sup>7</sup> Talbot, Pencil:1844.

<sup>8</sup> Talbot, Account:1839.

<sup>9</sup> Talbot, Researches:1877, 45.

<sup>10</sup> Talbots Begriff: „Disclosure“. In Talbot, Pencil:1844.

<sup>11</sup> Batchen, Desire:1997, 17.

Gerber, John Draper, Vernon Heath, Hippolyte Bayard oder José Ramos Zapetti?<sup>12</sup> - Der Aplomb der doppelten „Enthüllung“ der Fotografie durch Arago und Talbot, hatte den dekonstruktiven Folge-Effekt, die Frage nach ihrem Ursprung von vorneherein, nämlich genealogisch, zu verdecken. Auch anderthalb Jahrhunderte fotografiehistorischer Ausforschung seither, - der (alchemistischen?<sup>13</sup>) Anfänge einer Chemie der Salze, Chloride und Nitride im achtzehnten und der disparaten Effekte der camera obscura<sup>14</sup> im siebzehnten und sechszehnten Jahrhundert, landen daher immer wieder im sogenannten ‚Gernsheimschen Paradox‘: Helmut Gernsheim 1982:

Considering that knowledge of the chemical as well as the optical principles of photography was fairly widespread following Schulze's experiment (1725) ... the circumstance that photography was not invented earlier remains the great mystery in its history ... It had apparently never occurred to any of the multitude of artists of the seventeenth and eighteenth centuries who were in the habit of using the camera obscura to try to fix its image permanently.<sup>15</sup>

Geoffrey Batchen, unter den neueren Fotografiehistorikern der einfallsreichste, zieht daraus den Schluss:

My account is ... to displace the traditional origin story centered on 1839 and the introduction of photography into the marketplace and replace it with another, the discourse formation of a *desire to photograph* within the European epistemological field of the late eighteenth and early nineteenth centuries.<sup>16</sup>

Für Geoffrey Batchen ist das „Desire to Photograph“ von 1840 logischerweise auch eine Rettung der digitalen Fotografie. In ihr führt sich das Desire to Photograph fort. Nur führt freilich die ‚diskursive Formation des Begehrens zu fotografieren‘ aus dem epistemologischen Feld um 1800 zunächst einmal in allertiefste Unbilden hinein, nämlich in die des Begehrens selbst. Der Begriff des Begehrens nämlich – definitiv aus dem epistemologischen Feld um 1900 stammend - verdankt sich, wie Benjamin als einer der ersten fand (und nach ihm Barthes, Lacan u.v.a.), nicht zuletzt dem „Optisch-Unbewussten“<sup>17</sup> der Fotografie selbst. Außer für eine schütterere Metaphysik anthropologischer Vorstellungen über die Fotografie ist nichts gewonnen, wenn man epistemologische Felder der Wissenschaftsgeschichte beliebig überblendet. Gar von einem ‚desire to digitization‘, von

---

<sup>12</sup> Batchen, *Desire*:1997, 80.

<sup>13</sup> Für Frizots These von Niepce's „Glauben an die Alchemie“ (Frizot, *Fotografie*:1998, 20) fehlen alle historischen Belege.

<sup>14</sup> Vgl. Delsaute, *Camera*:1998.

<sup>15</sup> Gernsheim, *Origins*:1982, 6.

<sup>16</sup> Batchen, *Desire*:1997, 180.

<sup>17</sup> Benjamin, *Photographie*:1931, 371. Vgl. auch Iversen, *Photograph*:1994 u. Schade, *Posen*:1996.

einem Begehren nach dem Digitalen zu reden, ist dann von platter Bewusstseinsphysik nicht weit entfernt.

### **Erwartung**

Von der Fotografie führt ein Weg in die Quantenphysik, mit dem wir dagegen halten wollen. Und es ist ein Weg, der, wie wir gleich sehen werden, einer fundamentalen Spur folgt, nämlich einer fundamentalen Spur der Fotografie. Drei Tage nach Talbots Ausstellung in Faradays Bibliothek schreibt einer der bedeutendsten Physiko-Chemiker Englands, der Astronom John Herschel, seinem Freund Talbot (und nicht nur ihm) über das Problem der Fotografie, das zunächst und zuerst ein Problem des Namens sei.

Your word photogenic ... lends itself to no inflexions and is out of analogy with Litho- and Chalcography“<sup>18</sup>

Ein zarter, aber kein beiläufiger Hinweis. Abgesehen davon, dass erst seit John Herschel Fotografie Fotografie heißt, folgt die Intervention einem strategischen Ordnungsdenken einer Epistemologie im Umbruch:

„Nomenclature, then, is, in itself, undoubtedly an important part of science, as it prevents our being lost in a wilderness of particulars, and involved in inextricable confusion.“<sup>19</sup>

Auch Herschel kennt die Ader der immer noch herrschenden romantischen Naturphilosophie, die buntesten Namen für die divergentesten Sachen zu finden: „Heliografie“ (Niépce) „Skiografie“ (Talbot), „Daguerreotypie“, „Kalotypie“ etc. Die Wissenschaft um 1840 ist mit Herschel, aber nicht nur mit ihm, auf der Kippe, sich aus den Benennungswildnissen der Naturromantik zu befreien. Herschel schliesst sich dem an:

Were language a true picture of Nature, a perfect daguerreotype of all her forms, this proceeding might be pardonable“.<sup>20</sup>

Aber Sprache ist keine Daguerreotypie. Weil vielleicht die Wissenschaft, aber nicht ihre Sprache von Zeichnungen der Natur profitiert, braucht es eine „fundamentale Klassifikation von Fakten“. Dazu gehört, dass John Herschel die ursprünglich elektrizitätstheoretischen Begriffe für das fotografische „Positiv“ und „Negativ“<sup>21</sup> einführt. Dazu gehört auch die Klarheit John Herschels, der der Sache ihren Namen gibt: den Namen Fotografie eben: eine Aufschreibung von Licht.

---

<sup>18</sup> Herschel an Talbot, 28.2.1839. (Chalcography = Kupferstich). In: Batchen, Naming:1993, 26.

<sup>19</sup> Herschel, Discourse:1830, 21.

<sup>20</sup> Herschel, Whewell:1841, zit nach: Batchen, Naming:1993, 26.

<sup>21</sup> Benjamin Franklin, Staatsgründer der USA und zu seiner Zeit hochberühmter Theoretiker der Elektrizität (Erfindung des Blitzableiters u.a.), hatte um 1750 die Begriffe „positiv“ und „negativ“ für die unterschiedlichen Ladungsarten eingeführt.

Die Wissenschaft, die an der Front ihrer Zeit steht, verbindet einen wohldefinierten Erwartungswert mit Fotografie verbindet und weiß, was sie ‚ist‘: nämlich nicht so sehr die Aufschreibung mit Licht, wie Aragos photogrammetrische Visionen es vorhersehen, sondern vielmehr die Aufschreibung von Licht als Exploration des Lichts, als Spektroskopie. Nicht nur diese Umdeutung bezeugt den Vorsprung der englischen Physik um 1840.<sup>22</sup> Sechs Wochen nach der „Enthüllung“ in London liest Herschel im März 1839 vor der Royal Society ein Paper, indem es um die subtile spektroskopische Frage geht, ob Fotografie möglicherweise Aufklärung über die seit 1817 bekannten „Fraunhofer’schen Linien“ im Lichtspektrum geben könnte:

Such a spectrum, if... carefully examined by chemical reagents might be expected to exhibit bands of deficient action - like those detected by Fraunhofer in the luminous spectrum - and when analysed by absorbents might disclose peculiarities of action in its component rays which are marked by mutual superposition in its natural state, as the primary colours blend into intermediate tints.<sup>23</sup>

### Linien des Lichts

Herschels Hoffnung offenbart, dass und wie die englische Physik Fotografie als ein Medium versteht. Fotografie soll nicht nur mittels Licht abbilden, sondern Licht (als chemisches Agens) messen.

Josef von Fraunhofer (1787-1826) kartographierte im Spektrum eine Serie von dunklen Linien.



Die Fraunhofer’schen Linien („bands of deficient action“) sind schwarze Linien im farbigen Spektrum des Sonnenlichts, die schon Joseph Fraunhofer 1824 beschrieb und mit Buchstaben „B, C, D, E, F, ..“ markierte. Er fand, dass ihre spektrale Lage und Zahl vom

☒ Lichtspender (Sonne oder Fixstern) abhängig war. Sie

lagen wie fixe „Messmarken“ über das jeweilige Spektrum verteilt, egal welches Brechungsmedium er verwendete.<sup>24</sup> Kerzen und andere brennende Stoffe zeigten seltsam vergleichbare Streifen, aber nicht in Schwarz, sondern in Weiß. John Herschel, der das fotografiert, und 1840 fraunhofersche Linien im Spektrum des Infraroten Lichts findet, also der Region, die sein Vater William 40 Jahre zuvor überhaupt erst entdeckt hatte, - Herschel junior geht zwar von Fresnels (1819) erwiesener Wellenexistenz des Lichts

<sup>22</sup> Dazu generell: Crosland, Transmission:1978.

<sup>23</sup> Herschel, Note:1839, 59.

<sup>24</sup> Also auch ein „Maß“ für Brechungsmedien! Vgl. Roth, Fraunhofer:1976, 59ff. Herschel hat Fraunhofer 1824 studienhalber in München besucht. Diese Reise war Anlass für die erste freundschaftliche Begegnung Herschels mit Talbot. Daraus resultiert ein Text Talbots (1826), der die Spektralanalyse von Flammen zu Gegenstand hat. Vgl. Schaaf, Shadows:1992, 1 u. 21.

aus, aber versteht Licht zugleich (und immer noch) korpuskular, nämlich als „chemical rays“, die mit den Silberchloriden u.a. reagieren.<sup>25</sup> Herschel hält im anschwellenden Gegenstrom zu der von ihm selbst beförderten Wissenschaft zeitlebens (zurecht) daran fest, dass eine Wellentheorie allein die Linien im Licht des Fernrohrmachers aus Bendiktbeuren nicht werde erklären können.<sup>26</sup> Sind Lichtwellen aber chemischer Natur, und dafür sprach ja aus Herschels Sicht einiges, dann hätte man auf einer belichteten Fotografie die Fraunhofer-Linien gleichsam wie auf einem chemischen Reagenz-Papier (oder Reagenzglas) präpariert, und könne ihre Zusammensetzung endlich analysieren und vielleicht – verstehen.

Ein genialer Gedanke. Mit diesem Ansatz profiliert John Herschel Fotografie als das ontologische Medium einer Physik des Lichts. Nicht mit dem, was sie zeigt, sondern in dem, was sie ist, soll Fotografie die Wahrheit über das Licht enthüllen. Überdeutlich ist damit, mit welchem Anspruch die Fotografie von Anbeginn an in ihr epistemologisches Entstehungsfeld interveniert. Deutlich ist aber auch, wie die Fotografie mit der Doppeldeutigkeit dieses Anspruchs sich zugleich überfrachtet. Denn kein fotografisches Lichtbild wird je das Wesen dessen zeigen, was es zeigt. Gleichwohl aber liegt in der epistemologischen Herkunft der Fotografie genau dieses Versprechen. Die Spanne dieser doppeldeutigen epistemischen Spur der Fotografie ist ebenso reichhaltig wie heterogen. Sie reicht von Herschels Spektralfotografien (1842), Duchennes Muskelstudien (1852), über Feddersens Funkenfotos (1858), Galtons eugenische Portraits (1878), Bertillons Übersichtstafeln (1878), Mareys Chronofotografie (1882), Londe's Pathologiestudien (1883), Machs Projektilaufnahmen (1888), Zehnders Ganzkörperrentgenbild (1896), bis hin zu Baraducs psychikonischer Fotografie (1896) und den ersten Nebelkammerfotos von Alphateilchen im Jahre 1912.

Herschels Versuche waren erfolgreich und erfolglos zugleich.<sup>27</sup> Die Linien im Spektrum des Lichts, für die Herschel 1839 die Fotografie als chemisches Explorationsreagenz hernehmen will, führen uns direkt in den Riss des ‚Weltbildes‘ von 1913 hinein. Allein die Quantenphysik erklärt die spektralen Linien des Lichts, aber es sind genau die von Herschel fokussierten Linien, die mitten hineinführen in diesen Gewaltakt einer Zäsur, den die Quantenphysik Niels

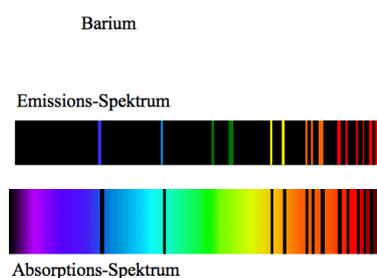
---

<sup>25</sup> Diese Zwitterlage diskutiert ausführlich: Buchwald, Rise:1989, 290ff.

<sup>26</sup> Herschel schlug Spektralanalyse für die Identifizierung von Stoffen vor. Vgl. Simonyi, Kulturgeschichte:1995, 387.

<sup>27</sup> Herschel hat sich noch einmal 1840 und 1842 ausführlich mit der fotochemischen Spektralanalyse auseinandergesetzt. Der Nachweis der Fraunhoferschen Linien als Zonen chemischer Inaktivität gelang erst Alexandre Edmond Becquerel 1842. – Becquerel beschrieb 1839 erstmals an einem elektrolytischen Medium den fotovoltaschen Effekt, der erst in der Halbleiterforschung um 1940 seine befriedigende Beschreibung erfuhr. Sein Sohn Antoine Henri entdeckte 1896 die Radioaktivität des Urans.

Bohrs macht. Sie wird in der Konsequenz nicht nur die Spektrallinien a la Fraunhofer ad acta legen, sondern mit ihnen zugleich die Schönheit einer ontologischen Kontinuität von Welt und Natur. Binnen weniger Jahrzehnte wird sie, wie wir im folgenden nachzeichnen werden, einer ausgefeilten Quantenmechanik den Platz einräumen, die ab 1948 in Amerika die industrielle Entwicklung schaltbarer Halbleiter-Elemente ermöglicht. Es ist die Quantenmechanik der Halbleiterphysik, die seither jedes Gerät unseres Alltags ‚beherrscht‘, aber ebenso auch alle Waffenarten. Die Quantenmechanik ist diejenige Elementarwissenschaft, mittels derer die Herzstücke aller unserer Computer gefertigt werden. Als Wissenschaft vom Bau der ‚Chips‘ beherrscht die Quantenmechanik – die Welt. Dass mit quantenmechanischer Halbleiterphysik, en passant, im Jahre 1970 auch der Keyframe der Digitalen Fotografie, nämlich das „CCD“-Element entwickelt wurde, markiert nur eine kleine Etappe auf einem Siegeszug dieser Technologie, dessen Ende weiterhin unabsehbar bleibt.



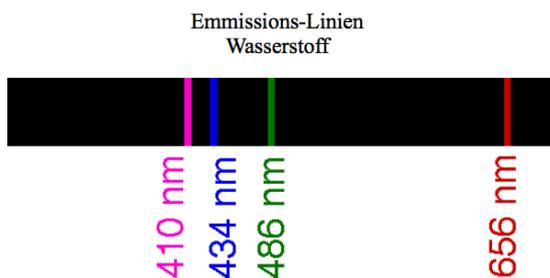
Allerdings mussten, im Wissen der Physik von Fraunhofer über Herschel zu Bohr, aus den *dunklen* Linien des Sonnenspektrums zunächst *helle*, oder noch genauer: ‚elementare‘ Linien werden. Den entscheidenden Schritt in diese Richtung erbrachte Gustav Kirchhoffs Beobachtung von 1859, „dass in dem Spektrum einer Kerzenflamme zwei *helle* Linien auftreten, die mit den beiden *dunklen* Linien D des Sonnenspektrums zusammenfallen.“<sup>28</sup> Wo *helle*

an der Stelle *dunkler* Linien im Spektrum auftauchten (und umgekehrt), musste ein direkter Zusammenhang bestehen. Also schickte Kirchhoff durch eine Flamme aus brennendem Lithiumchlorid zunächst keines, darauf aber taghelles Sonnenlicht. Ohne Sonnenstrahlen zeigte das Flammenlicht, durch ein Prisma gebrochen, eine *helle* Linie im Spektrum (wo im Sonnenspektrum *keine* zu finden war). „Bei größerer Stärke des Sonnenlichts aber tritt an ihrer Stelle eine dunkle Linie auf... Entfernt man die Flamme, so verschwindet die Linie, so weit ich habe sehen können, völlig.“<sup>29</sup> Dieses handgemacht einfache Experiment einer Physik, die noch mit bloßem Auge forschte, hat die klassische Spektralanalyse wissenschaftlich begründet und die Astronomie revolutioniert.

<sup>28</sup> Kirchhoff, Linien:1859, 3.

<sup>29</sup> Kirchhoff, Linien:1859, 4.

Kirchhoff folgert nämlich, was zu folgern war: Auf der Sonne wird (unter anderem) Lithiumchlorid verbrannt, dessen (helle) Spektrallinien nur durch Eines verdunkelt („absorbiert“) werden können: durch Lithiumchlorid. Aus Fraunhofers dunklen Linien waren jetzt *elementare* Linien geworden, die Linienspektren eines jeden Elements, wenn es Licht ausstrahlt oder äquivalent resorbiert. Daraus ließ sich physikgedanklich ein ideeller Körper konstruieren, der alle Frequenzen zugleich abstrahlt und resorbiert. Kirchhoffs „schwarzer Körper“ wurde zum gedanklichen Ausgangspunkt Plancks zur Bestimmung des Wirkungsquantums im Jahr 1900.



Balmer-Formel  $\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, \dots$

$R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$  (Rydberg-Konstante)

Der Katalog der Spektrallinien, Kirchhoffs ‚Sonnenkatalog‘ und der nahezu aller irdischen Elemente waren bereits 1913 weitgehend erschlossen. Schon dreißig Jahre zuvor hatten beispielsweise der Baseler Gymnasiallehrer Johann Jakob Balmer und der schwedische Physiker Rydberg nicht nur die Anzahl, sondern auch eine Formel für die Abfolge der Spektrallinien

des einfachsten und ersten chemischen Elements, des Wasserstoffs, empirisch angeschrieben. Bis 1913 konnte diese Abfolge niemand erklären, Bohr tat es als erster. Linien des Lichts wurden zum *experimentum crucis* der Quantenphysik, der Physik der atomaren Teilchen.

Atomare Teilchen waren 1913 gerade mal 16 Jahre alt. J.J. Thomson hatte 1897 „corpuscle“ nachgewiesen, 2000 leichter als Wasserstoff, ein „corpuscle“ namens Elektron. Thomsons Mitarbeiter Ernest Rutherford fand 1911 das positive Gegenstück, den schweren Nukleus, später Proton genannt. Das Zusammenspiel der beiden, Nukleus und Elektron, sah Rutherford so, wie es eine Physik nur sehen kann, die von der Sonne und den Planeten herkommt. Wie Newtons Erde um die Sonne kreist, sah Rutherford jetzt das Elektron kreisen. Wie Sonnen-Gravitation und ErdUmlaufkraft sich ausgleichen, so sollte das Elektron (-e), elektrisch angezogen sein vom Nukleus (+e), und nicht in ihn stürzen, weil seine umlaufende Masse und Ladung sich die Waage halten? Der junge Niels Bohr, aus Dänemark frisch promoviert in Cambridge beim berühmten Rutherford zu Gast, hielt dagegen. Ein Elektron gibt in Bewegung Strahlung ab, beispielsweise ein Magnetfeld. Strahlend aber verlöre es doch auf seiner Bahn Energie und stürzte so, immer weiter angezogen vom Kern,

spiralisierend, ins Verderben und damit ins Weltenende des Universums. So konnten die Dinge nicht aussehen, so konnte das Atom nicht - sein.

### „**Aller Unsinn hebt sich auf!**“

Bohr löst das Problem im Denken, gedanklich, mit Papier und Bleistift, wie immer sie wollen, oder eben durch ein „Wunder“, wenn man den Worten Albert Einsteins glauben darf.<sup>30</sup> Er machte in aller Allgemeinheit zwei schlichte Annahmen:

„The principal assumptions used are :

(1) That the dynamical equilibrium of the systems in the stationary states can be discussed by help of the ordinary mechanics, while the passing of the systems between different stationary states cannot be treated on that basis.

(2) That the latter process is followed by the emission of a homogeneous radiation, for which the relation between the frequency and the amount of energy emitted is the one given by Planck's theory.

Diese zwei Postulate stehen an der Geburtsstätte der Quantenphysik von 1913, geeignet, eine bis dahin – weitgehend – geschlossene epistemische Welt aus den Angeln heben. Elektronen nehmen in einem „System“ orbitale Zustände an, genauer: unterschiedlich energiereiche orbitale Zustände, noch genauer: unterschiedlich mögliche energiereiche orbitale Zustände. Also doch Elektronen in Bewegung, nämlich im Kreis. Max von Laue, der eben, nämlich erst 1912 bewiesen hatte, dass Röntgenstrahlen nichts als elektromagnetische Wellen sind, bleibt bei seinem scharfen Protest: „Das ist Unsinn, die Maxwell'schen Gleichungen gelten unter allen Umständen, ein Elektron auf einer Kreisbahn muss strahlen.“<sup>31</sup>



$$\nu = R_H \cdot \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (\text{Für } n_2 > n_1) \quad R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Der allgemeine Zusammenhang, nach dem sich alle Linien des Wasserstoffspektrums aufbauen, wurde von dem schwedischen Physiker Johannes Rydberg empirisch gefunden. Mit der von ihm aufgestellten Formel liessen sich die Frequenzen aller Emissionslinien (Sicht, UV, IR) des Wasserstoffs berechnen.

Bohr weiß das, aber hält am „Unsinn“ fest.

Unsinn Nr. 1: Wie sollen wir ein System überhaupt „sehen“, das nicht strahlt, sich also nicht zu erkennen gibt? Unsinn Nr. 2: Wie in ein System hineinleuchten, wenn das Hineinleuchten alles verändert? Bohrs Atommodell aber bleibt lichtfixiert. Licht, also Photonen der Sichtbarkeit, das sind die Spektrallinien verschiedenster glühender

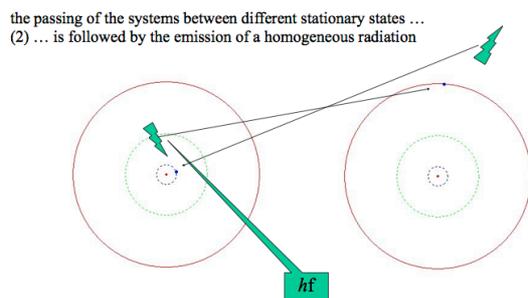
x Stoffe und an ihnen soll sich das Atommodell beweisen.

---

<sup>30</sup> Bohrs Doppel-Postulat erschien Einstein „wie ein Wunder – und erscheint mir auch heute noch als ein Wunder. Dies ist die höchste Musikalität auf dem Gebiet des Gedankens.“ Zit. nach Segre, Physiker:1984, 595.

<sup>31</sup> Zit. nach Simonyi, Kulturgeschichte:1995, 437.

Bohr beginnt mit dem einfachsten aller Atome, dem Wasserstoff. Ein Kern, ein Elektron, viele Spektrallinien, aufgereiht an der Zahlenkette der Rydberg-Formel. Wenn es Bohr nun gelänge, mittels *anderer* bekannter Zahlen, zum Beispiel den Zahlen von Masse und Ladung eines Elektrons, und einer weiteren *anderen* bekannten Zahl, zum Beispiel dem Planckschen Wirkungsquantum  $h$ , die „Rydberg-Formel“ neu herzuleiten? Wenn das gelänge, und sei es mit verwegenen, ja unsinnigen Grundannahmen, sollte sich dann am Ende sagen lassen: „Aller Unsinn hebt sich auf!“?



Für dieses Neuableitungs-Ziel – das einzige, das ernsthafte Physiker beeindruckten konnte – konstruiert Bohr „assumption (2)“. Mit ihr gerät das „System“ in Bewegung. Jetzt wechselt („passing“) das bislang statische Systemelement Elektron seine Zustände mit berechenbaren Folgen. Bohrs Elektron

x „strahlt“, wenn es vom Zustand ‚mehr Energie‘ in den Zustand ‚weniger Energie‘ wechselt.

Wie es das tut, bleibt auch für Bohr ein Rätsel. Aber ab jetzt und bis auf den heutigen Tag wird das Elektron-Photon-Spiel ‚Wechselwirkung‘ heißen. Was aber bedeuten ‚Mehr‘ oder ‚Weniger‘? In der „gewöhnlichen Mechanik“ gäbe es viele ‚mehr‘ oder ‚weniger‘ energiereiche „Zustände“ (Bahnen) des Elektrons um den Kern, weil Masse, Ladung (=Anziehung im Abstandsquadrat) und Radius als kontinuierliche Größen existieren. Es gäbe in der normalen Welt der Mechanik des Himmels und der Erden sogar unendlich viele. Doch Bohr zielt darauf ab, ein weiteres Mal, nicht in der Welt des Normalen zu sein.

Als Schlüssel für den Zustandssprung eines Elektrons – z.B. von ‚mehr‘ zu ‚weniger‘ Energie – nahm Bohr die Zahl  $h$  aus „Plancks Theorie“ von 1900, das Wirkungsquantum mit dem Wert  $6,55 \cdot 10^{-34}$  Joule\*sec, sowie Einsteins Beweis von 1905, dass die Energie eines Licht-„Quants“ gleich der Planckschen Konstante mal seiner Frequenz war. So verankerte der junge Bohr sein völlig neues physikalisches Modell tief in eine damals neue Physik. „Plancks Theorie“ besagte, dass Frequenzen im Spektrum des Elektromagnetischen (von Hertz’s Radiowellen über das sichtbare Licht bis hin zu den Röntgenstrahlen) nicht jeden beliebigen Wert annehmen können, sondern nur einen durch  $h$  teilbaren. In Bohrs Atom-Modell sind es  $h$  und sein Vielfaches, nach dessen Wert die Elektronen ‚springen‘. Mittels dieser Werte mussten jetzt ‚nur noch‘ diejenigen energetischen Zustände angeschrieben werden, deren

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$E_{\text{oben}} - E_{\text{unten}} = hf$$

$$\frac{1}{hc}(E_{\text{oben}} - E_{\text{unten}}) = \frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} m (v_o^2 - v_u^2) - ke^2 \left( \frac{1}{r_o} - \frac{1}{r_u} \right)$$

m = Masse  
v = Geschwindigkeit  
r = Radius

Bohr fand einen Ausdruck, der die Rydberg-Konstante oder -Frequenz durch Naturkonstanten ausdrückt:

$$R_H = (m_e \cdot e^4 / c \cdot 8h^3 \cdot \epsilon_0^2)$$

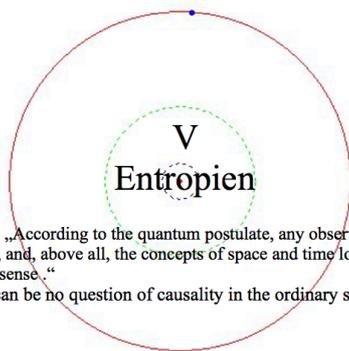
mit:  $\epsilon_0$  = Dielektrizitätskonstante im Vakuum,  $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{J m})$

e = Elementarladung,  $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   
 $m_e$  = Masse des Elektrons,  $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Differenz (= Elektronen-, Sprung'-Abstrahlung) die Frequenz einer Balmerischen Wasserstoff-Linie ergab.<sup>32</sup>

Bewunderung und Anerkennung folgten. Epistemologisch betrachtet lag das „Wunder“ von Bohrs Beweis in der kompromisslosen Schärfe, mit der er gleich eine Serie tiefer Einschnitte in das bisherige Wissen zog. Es schienen, so paradox es klingt, klare Ergebnisse auf Kosten von unlösbaren

Problemen gewonnen zu sein, die von Beginn an vor allem auch Bohr sah und die bis heute unter dem Stichwort „Quantum philosophy“ eine immer noch virulente Debatte nach sich ziehen.<sup>33</sup>



Bohr 1927: „According to the quantum postulate, any observation will be impossible, and, above all, the concepts of space and time lose their immediate sense.“  
„... there can be no question of causality in the ordinary sense of the word.“

## Entropien

Die größte epistemologische Hiobsbotschaft offerierte Bohr selbst. Como 1927, ein großer Physikerkongress – diskutiert wurden die ‚stabilen‘ Zustände des orbitalen Kern-Elektron-Systems. Bohr: „„According to the quantum postulate, any observation will be impossible, and, above all, the concepts of space and time

lose their immediate sense.“<sup>34</sup>. Mit einem Wort: Ein um ein Atom kreisendes Elektron existiert nicht, nach keinen Maßstäben eines neuzeitlich physikalisch denkbaren Seins, für welche gilt, dass nicht existiert, was nicht beobachtbar ist. Zu dieser Unbeobachtbarkeit gehört, dass erst ein Ereignis, das per definitionem nicht im System angelegt ist, daß also ein exogener Zustandswechsel des Systems, die (unmögliche) Existenz des Systems offenbaren soll. Von Anfang an lag darin, sehr viel grundsätzlicher gedacht, der 1927 bereits gesicherte Befund der Heisenbergschen Unschärfe-Relation.<sup>35</sup> Ort und Signal (Impuls, Strahlung) des Elektrons sind unbestimmt und zwar wenigstens um den Faktor  $h/2\pi$ , also genau um den Betrag, den

<sup>32</sup> Die Einzelheiten in: Petruccioli, Atoms:1993, 60ff.

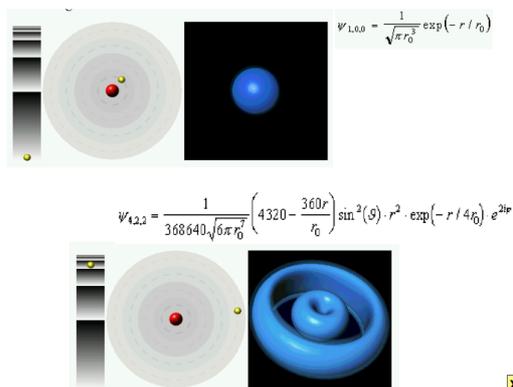
<sup>33</sup> Vgl. z.B. Jammer, Philosophy:1974, Miller, Years:1990, zuletzt Omnes, Quantum:1999.

<sup>34</sup> Bohr, Postulate:1928, 148.

<sup>35</sup> Weshalb Bohr Heisenberg die Originalität seiner „Entdeckung“ von Beginn an absprach. Vgl. Rhodes, Atombombe:1986, 125.

Bohr für die Rechnung seiner Zustandswechsel in Anspruch nahm. Schlimmer noch, fügt Bohr 1927 hinzu, „there can be no question of causality in the ordinary sense of the word.“<sup>36</sup> Bohr, Heisenberg und andere hatten sich bereits auf das „Komplementaritäts-Prinzip“ verständigt, ein naturphilosophisches Axiom im Rückgriff auf Kierkegaard und andere, das mehrfach paradoxe Ausgangslagen dann und nur dann für gültig hält, wenn ihre ausschließenden Bedingungen einander exakt komplementär sind.

Auch das blieb – zumal für die jüngeren Physiker und Mathematiker der Forscherorganisation um 1925 - ein mehr als unbefriedigender, fast metaphysischer Erklärungsweg. Viel sinnvoller erschien, vor allem der nicht-deutschen Physikwelt, was der Wiener Physiker Erwin Schrödinger Anfang 1926 mit seinen hochkomplexen Wellengleichungen postulierte, nämlich das Ziel, die *Quanten*hypothesen des ‚System Bohr‘ mit seiner *Systemmechanik* mathematisch wieder zu vereinen.



Schrödingers Quantenmechanik definierte gleichsam das gesamte unbestimmte Geschehen im Atom weg, insofern er es als harmonisch schwingende Materie-Wellen ansah, schwingende Wahrscheinlichkeitsfunktionen,<sup>37</sup> deren definierbare Überlagerungseigenschaften die Spektrallinien des Wasserstoffatoms ebenso befriedigend erklärten wie Bohrs dichotomische und komplementäre Setzungen. Einsteins

Gemurmel, dass Gott nicht würfele, hatte schon bei Bohr nicht verschlagen. Erst recht nicht gegen Schrödingers Wahrscheinlichkeitswellen des Atoms. Immer noch 1927, in Como, hielt man Einstein entgegen, wie er denn wohl Gott vorzuschreiben habe, dass der die Welt regiere?

Freilich, am Problem der Messbarkeit tauchten auch in Schrödingers Quantenmechanik einige ernste Probleme auf. Statistische Verfahren wie die seinen mussten, wenn mathematisch konsistent, hohen Axiomatisierungsansprüchen genügen. Ein blutjunger Mathematiker, später ein wichtiger Berater im Konstruktionsteam der A- und H-Bomben und in dieser Eigenschaft Autor des bis heute gültigen Archestrukts des Computers, namens

<sup>36</sup> Bohr, Postulate:1928, 148.

<sup>37</sup> Genauer: 1926 deutete Max Born die Schrödinger-Gleichungen probabilistisch und erhielt dafür 1954 den Nobelpreis.

John von Neumann, nahm sich dieser Aufgabe mit vierundzwanzig Jahren an.<sup>38</sup> Die Schrödinger-Gleichungen des Atoms, so von Neumann, stellen, ähnlich Bohrs ‚stabilen‘ Systemzuständen, „wie in einer klassischen Bewegungsgleichung den durch Beobachtung unbehelligten Vorgang“ dar, „wobei man die Vorgänge beliebig in die Zukunft und Vergangenheit vor- und zurückrechnen kann.“<sup>39</sup> Für Bohrs Problem, dass man ins stabile Unbekannte des Atoms nicht hineinsehen kann, fand von Neumann die Lösung, mit diesem Unbekannten sehr wohl zu ‚rechnen‘, und zwar indem man Wahrscheinlichkeit und Thermodynamik eines solchen Systems fest im Griff behält. Von Neumann zeigte, dass für deterministisch reversible Prozesszustände solcher Systeme ( $S, S', ..$ ) „Erwartungswerte“ definiert werden können, und beschrieb die „automatischen Veränderungen“ seiner Zustände  $\phi$ .

Eine thermodynamische Betrachtungsweise der quantenmechanischen Gesamtheiten wird auch durch die folgenden Erwägungen nahegelegt: Wenn  $\mathcal{E}$  im reinen Zustande  $\phi$  befindlich ist, so entwickelt es sich nach der zeitabhängigen Schrödingerschen Differentialgleichung streng kausal (vgl. z. B. W. A. Q., § IX und Anm. 41), und die Entwicklung ist (durch Anbringung geeigneter potentieller Energien) in allen Teilen reversibel. Sobald aber eine in  $\phi$  nicht scharfe Größe  $a$  gemessen wird, spaltet es in unendlich viele andere reine Zustände auf (den Eigenfunktionen des Operators von  $a$  entsprechend): und dieser Schritt ist irreversibel. Der En-

John von Neumann: Thermodynamik quantenmechanischer Gesamtheiten. In: Gött. Nach. 1, 1927

„Wenn  $S$  in reinem Zustande  $\phi$  befindlich ist, so entwickelt es sich nach der zeitabhängigen Schrödingerschen Differentialgleichung streng kausal und die Entwicklung ist ... in allen Teilen reversibel.“<sup>40</sup> Wenn nun ein Messgerät in den automatischen Lauf der Dinge eingreift, „erfolgt ein uneteter, akausaler, irreversibler, x stochastischer Übergang des Quantensystems in einen neuen Zustand, wobei dieser Prozess

nicht durch die Schrödinger-Gleichung beschrieben wird.“<sup>41</sup>

Oder in von Neumanns Worten:

---

<sup>38</sup> „What today is called quantum mechanics is a formalism that John von Neumann ... presented in his classical book translated into english as the *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*“ Schlager, Myth:1996, 477. Von Neumanns Buch erschien auf deutsch 1932, seine Arbeiten an diesen „Grundlegungen“ begannen 1927. – Zu seiner prägenden Rolle im Team der Atombombenbauer von Los Alamos vgl. Hagen, Herkunft: 2000 und in diesem Band S. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.Fehler! Textmarke nicht definiert.ff.**

<sup>39</sup> Kanitscheider, Natur:1996, 101.

<sup>40</sup> Neumann, Thermodynamik:1927, 239.

<sup>41</sup> Kanitscheider, Natur:1996, 101.

„Sobald aber eine in  $\phi$  nicht scharfe Größe  $a$  gemessen wird, spaltet [das System sich, W.H.] in unendlich viele andere reine Zustände auf (den Eigenfunktionen des Operators von  $a$  entsprechend): und dieser Schritt ist irreversibel.“<sup>42</sup>

Damit wird, vom Messprozess und vom Beobachter, in das System der „automatischen Veränderungen“ intelligent (mit „Erinnerung“, wie von Neumann sagt) und zugleich mit Entropie, d.h. mit Abbau von Struktur, eingegriffen. Das war die Ausgangslage des Problems.

Die fundamentale thermodynamische Umdeutung der Quantenmechanik als ‚entropie‘-freie Probabilistik entwickelte von Neumann augenscheinlich zusammen mit seinem Jugendfreund Leo Szilard (später beide vereint in der Kerngruppe des Atombombenbaus in Los Alamos). Szilard stellte jedenfalls zeitgleich die thermodynamischen Betrachtungen an, auf die von Neumann sich bezieht.

"L. Szilard hat in einer im Drucke befindlichen Arbeit („Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen“) [Szilard, Entropieverminderung: 1929, W.H.] gezeigt, welche Eigenschaften des ‚Maxwellschen Dämons‘ es sind, die ihn zu entropievermindernden Handlungen befähigen, und wie dieselben thermodynamisch zu kompensieren sind. Es kommt, wie dort dargelegt wird, hauptsächlich auf die Gabe des ‚Erinnerns‘ an...“<sup>43</sup>

Erinnerung ist, im Sinne der Thermodynamik Szilards, ein entropischer (d.h. hier und im folgenden immer: Entropie vermehrender) Prozess. Von Neumann dreht genau hier den Spieß um: Wenn Erinnerung (z. B.: wo ist ein Teilchen und was ist ein Energiewert) selbst "unscharf" bleibt, und allein in einem wahrscheinlichkeitstheoretischen "Wissen" liegt (ein "Wissen" von der Unbestimmtheit von Ort und Impuls des Teilchens), dann kompensiert genau dieses "Wissen" den vordem durch genaue ‚Erinnerung‘ verbrauchten Wärmebetrag. In den "Grundlagen" erläutert von Neumann diesen Punkt sehr ausführlich:

"Die normale klassisch-thermodynamische Überlegung verläuft so: Man nehme einen Behälter vom Volum  $V$ , in dessen rechter Hälfte (Volum  $V/2$ , durch eine Zwischenwand von der anderen Hälfte getrennt) sich  $M$  Moleküle befinden. (...) Ziehen wir ... die Zwischenwand einfach hinaus, so diffundiert das Gas in die freie linke Hälfte hinein, das Volum wächst auf  $V$  - d.h. die Entropie nimmt um  $M k \ln 2$  zu, ohne dass irgendeine Kompensation geschaffen würde. Der Prozess ist somit irreversibel, die Entropie hat im Laufe der einfachen mechanischen zeitlichen Entwicklung des Systems (nämlich bei der Diffusion) zugenommen. Warum ergibt unsere Theorie nichts Ähnliches? - Die Verhältnisse werden am klarsten, wenn man  $M = 1$  setzt, für ein solches Ein-Molekül-Gas gilt die Thermodynamik noch immer, und es ist richtig, dass seine Entropie um  $k \ln 2$  zunimmt, wenn sein Volum verdoppelt wird. Jedoch ist dieser Unterschied  $k \ln 2$  nur so lange wirklich da, als man vom Molekül wirklich nicht mehr weiß, als dass es sich im Volum  $V/2$  bzw.  $V$  befindet. (...) Im Volum  $V$  ist die Entropie

---

<sup>42</sup> Neumann, Thermodynamik:1927, 239.

<sup>43</sup> Neumann, Thermodynamik:1927, 244. Vgl. auch Neumann, Grundlagen:1932, 197f.

dieselbe wie im Volum  $V/2$ , falls man weiß, in welcher Hälfte des Behälters sich das Molekül befindet. Wenn man also das Molekül vor der Diffusion genau kannte (Ort und Impuls), so kann man für jeden Moment nach der Diffusion berechnen, ob es sich in der rechten oder linken Hälfte befindet, d.h. die Entropie hat gar nicht zugenommen." "D.h. wir haben unser Wissen gegen die Entropieabnahme  $k \ln 2$  eingetauscht." <m. Hvhb., W.H.> "Bloß wenn einem lediglich die makroskopische Angabe zur Verfügung steht, dass das Volum vorher  $V/2$  war, nimmt die Entropie bei der Diffusion wirklich zu." Neumann, Grundlagen:1932, 212f.

Genau hier kommt das ins Spiel, was von Neumann an anderer Stelle den „psychophysischen Parallelismus“ nennt: der "psychophysische Parallelismus" besagt, „dass es möglich sein muss, den in Wahrheit außerphysikalischen Vorgang der subjektiven Apperzeption so zu beschreiben, als ob er in der physikalischen Welt stattfände - d.h. ihren Teilen physikalische Vorgänge in der objektiven Umwelt, im gewöhnlichen Raume, zuzuordnen.“<sup>44</sup>

So hebt, wie es in der erläuternden Literatur allenthalben heisst, die Quantenmechanik in Bezug auf ihren Messprozess in so etwas wie das ‚Bewusstsein‘ ab, jedenfalls in ein intellegibel konstruiertes System der Wahrscheinlichkeitskalküle. Quanten-Thermodynamik auf einen Faktor "Wissen" zu stützen, wie von Neumann es hier tut, hat jene nachhaltige Bewegung in der Quantenphysik begründet, die man gemeinhin mit "Bewusstseinsphysik" apostrophiert.<sup>45</sup>

Entropie, dieser klassische Begriff, der die Verlaufsrichtung eines Wärmeprozesses beschrieb, wird von Neumann quantenmechanisch zum Maß der Ungewissheit über den Ausgang eines Experiments umgedeutet. Dieser Impact ‚reiner Mathematik‘ im System der Quantenmechanik ist von epistemologisch weitreichender Bedeutung. Bohrs strikte Weigerung, Wahrscheinlichkeitsformalismen überhaupt als physikalisches Denken zuzulassen, mag als eine alteuropäische Weigerung weitsichtig gewesen sein.<sup>46</sup> De facto aber sind solche Entropie produzierende, Abbau von Struktur erwirkende, Instabilität erzeugende Systeme auf Basis der Quantenmechanik im zwanzigsten Jahrhundert technologisch in einem überwältigenden Maße zur Entfaltung gekommen, nicht so sehr über Europa, aber über die USA. Seither scheinen, inzwischen weltweit, dem entropischen Drang der Expansion von Mikrophysik-Technologien (und nichts anderes revolutioniert unsere Welt in immer kürzeren Entwicklungszyklen) keine Grenzen gesetzt. Von Neumann, der allen Philosophen und Theoretikern stets aus dem Wege ging, ganze vier Bücher schrieb zuzüglich ein paar Dutzend Hände voll Aufsätze, hat diesen Nukleus des modernen

---

<sup>44</sup> Neumann, Grundlagen:1932, 223

<sup>45</sup> Vgl. Jammer, Philosophy:1974, 474ff. u. Kanitscheider, Natur:1996, 99ff.

<sup>46</sup> „shy and diffident like a theology student“ nannte Schrödinger Bohr. Nach: Schlager, Myth: 1996, 478.

Wissens, nämlich die Entropiethese der quantenmechanischen Experimentation, als junger Mann rein innermathematisch aufgefunden. Kurz darauf emigrierte er in die USA und stellte fortan seine eigene Wissenschaft in den überwiegend militärischen Dienst der Entwicklung solcher atomar-entropischen Technologien wie der Atombombe, des Computer, der Kybernetik, der Wirtschaftsmathematik, der Atomenergie, der Wetter- und Klima-Kontrollen und der Theorie endlicher, selbststeuernder Automaten. Von Neumann wusste am besten, dass die Problematik und die Macht quantenmechanisch konstruierter Technologien nicht in ihren technischen Wirkungen, in ihrem „Impact“, sondern in ihrer Episteme, in ihrem Wissenstyp liegt.

“Can We Survive Technology?” – fragt er im Titel einer seiner letzten öffentlichen Reden (1955): „It is not a particular perverse destructiveness of one particular invention that creates danger. Technological power, technological efficiency as such, is an ambivalent achievement. Its danger is intrinsic.”<sup>47</sup>

Allerdings – und diese komplementäre Wendung ist entscheidend: Die entropische Dimension der „Quanten-Episteme“ ist mit (makrophysikalischen) Instabilitäten, intrinsischen Welt-Gefahren, mit indifferenten Kontrollproblemen aller Art einerseits und „destruction“ auf der Ebene der Quantenmechanik andererseits *nicht* gleichzusetzen. In der Quantenmechanik nämlich wird, im Gegenteil, Entropie als Maß des Abbaus von Struktur systemisch ausgegrenzt, genauer gesagt: ‚herausgerechnet‘. Innerhalb der Quantenmechanik dient Entropie als wohlkalkuliertes und gut berechenbares Maß für die Unkenntnis darüber, wie weit ein für eine beliebige Messung präparierter Zustand vom ‚reinen‘ Zustand abweicht. Dies geschieht so, dass messende und gemessene Systeme prinzipiell den gleichen operativen Aufbau erfahren, und noch genauer so, dass messende Operatoren in gemessene rekursiv eingeführt werden können.<sup>48</sup> Erst beim unabhängigen Zusammensetzen zweier Systeme, also beim Mischen und bei zufälligen Störungen nimmt Entropie zu. Aber dem ist wohldefiniert zu entsprechen, indem die Dichtematrizes der Eigenwerte (=erwarteten Messwerte), in entsprechende Operatoren umgesetzt, nach geeigneten Näherungsverfahren für periodische und nichtperiodische, also zeitlich begrenzte Störungen gute Lösungen finden.<sup>49</sup> Bei allen Überlegungen zur Entropie ging es von

---

<sup>47</sup> Neumann, Technology:1955, 515.

<sup>48</sup> Die Pointe der „Mathematischen Grundlagen“ von Neumanns liegt in ihrem Kapitel VI.2. „Zusammengesetzte Systeme“. Dort wird gezeigt, wie es quantenmathematisch konsistent gelingt, durch geeignete Austausch- und Einsetzverfahren „das Messinstrument“ in „das eigentlich zu beobachtende System“ zu überführen. Vgl. Neumann, Grundlagen:1932, 225ff.

<sup>49</sup> Vgl. die „Goldene Regel der Quantenmechanik“ erläutert in: Scherz, Quantenmechanik:1999, 217ff.

Neumann ausschließlich darum, die komplexen Bedingungen vollständig zu klären, *unter denen sie kompensierbar ist.*

Percy Bridgman, auf den ich gleich noch zu sprechen komme, hat 1931 - im Sinne der von Neumannschen Quantenmechanik völlig zurecht - auf die fundamentale Re-Interpretation der klassischen Statistik durch den "wellenmechanischen Standpunkt" hingewiesen:

"Einige der ... logischen Schwierigkeiten der klassischen Statistik werden, wie ich glaube, durch die Annahme des wellenmechanischen Standpunktes überwunden werden, nach dem die Wahrscheinlichkeit eine Ureigenschaft der Elemente des Modells ist und nicht aus dem Zusammenwirken einer großen Teilchenzahl resultiert.(...) Dies [wird] zu einem gewissen Grad eine Niederlage der klassischen Statistik nach sich ziehen, deren Zweck es war, zu erklären, warum viele physikalische Elemente den Regeln der Wahrscheinlichkeit gehorchen."<sup>50</sup>

Weil quantenmechanische Messprozesse insoweit einem Spiel mit den Matrizen und Operatoren der - messenden und gemessenen – Systeme gleichkommen, die ihrerseits wieder definierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen gehorchen, werden Volkswirtschaftler im Hauptstudium eine deutliche Isomorphie mit den späteren, heute klassisch gewordenen von Neumannschen Grundannahmen seiner wirtschaftsmathematischen Spiel-Theorie erkennen. Von Neumann Spieltheorie basiert auf den gleichen Voraussetzungen wie von Neumanns Quantenmathematik.<sup>51</sup>

### **Operationalismus**

Ich fasse insoweit zusammen: Entropie, Wärmeverlust, Strukturverlust, Unsicherheit, Instabilität, Irreversibilität – alles das ist im quantenmechanischen Wissen operativ verkapselt und ausgeglichen. Quantenmechanische Entropien sind unübertragbar; sie gelten nur ‚intern‘, verrechenbar zugunsten von Gleichgewicht und Stabilität des Outputs eines wiederum quantenmechanischen Systems. Die Bedeutung der mathematischen Grundlegungen von Neumanns liegt also gerade nicht im Maß an Unsicherheit, sondern an Sicherheit, die er fundieren konnte. So und nur so konnten Kalküle des Atomaren epistemologisch zur beherrschenden Domäne des Wissens werden. Ihre Episteme gründet sich auf einen autarken Operationalismus, der, in den dreißiger Jahren ausgebaut, seit den

---

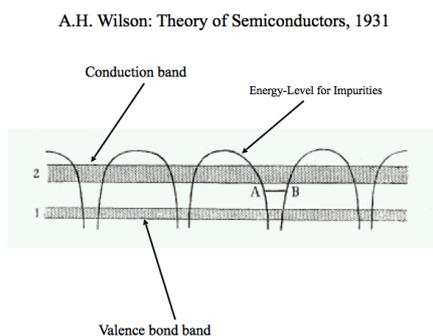
<sup>50</sup> Bridgman, Hauptsatz:1932, 117

<sup>51</sup> „The result relies on the equivalence of the tow fundamental operators in the two fields, namely, the expected value in economics and the density matrix in quantum physics. This coincidence can be traced back to the contributions of von Neumann in both disciplines“. Lambertini, Mechanics:2000,1. Wobei „expected value“, der „Erwartungswert“, bereits als zentrale Kategorie in den frühen quantenmechanischen Mathematiken von Neumanns ebenso fungiert.

vierziger Jahren die wissenschaftlichen Fundamente elementarer Festkörperphysik sichert und das hat uns seither all die Erfolge beschert, die wir kennen.<sup>52</sup> „Solid state physics“ sind über Radarforschung, Atombombenbau, Halbleiter-, Raumfahrt-, Werkstoffentwicklung, Radio- TV- und Computerindustrien usw. zu einer Art Kerntechnologie moderner Zivilisationen geworden, also umweltprägend wie kaum andere zuvor. Ihr epistemischer ‚Kernel‘ jedoch, der Operationalismus der Quantenmechanik, macht sie zur ‚black box‘, epistemologisch abgedichtet, unübertragbar auf die Weltdimension ihrer Wirkungen und daher autark gegenüber jeglicher Umwelt schlechthin. Zu solchen Umwelten, quantenmechanisch unerreichbar, rechnet selbstredend auch Philosophie, Metaphysik und Vernunft. Man lese nur Percy W. Bridgman, erklärter Pate der Halbleiterforschung und des Radikalen Konstruktivismus zugleich<sup>53</sup>, in einem Text von 1929:

Wir haben einen Punkt erreicht, wo das Wissen auf Grund seiner Natur stehen bleiben muss: jenseits dieses Punktes hört jede Bedeutung auf. (...) Die Welt ist nicht eine Welt der Vernunft, die vom menschlichen Geist erfasst werden kann, sondern während wir immer tiefer und tiefer eindringen, wird das grundlegende Gesetz von Ursache und Wirkung, von dem wir gedacht hatten, dass es eine Formel ist, zu deren Unterschrift wir sogar Gott zwingen könnten, bedeutungslos. Die Welt ist nicht wirklich vernünftig oder verständlich; sie entwickelt diese Eigenschaft in immer zunehmendem Maße erst, wenn wir vom Reich des sehr Kleinen hinaufsteigen zum Reiche der Dinge unserer täglichen Erfahrung; erst hier können wir möglicherweise auf ein Verständnis hoffen, das für alle praktischen Zwecke ausreicht, aber nicht für mehr.<sup>54</sup>

Der Schritt von einer abstrakt-mathematischen Begründung der Quantenmechanik in die konkrete technologisch-industrielle Welt der Halbleiterforschung, der die Digitale Fotografie ihr wesentliches Werkzeug verdankt (nämlich den „CCD“-Chip, der Licht in Elektronen ‚verwandelt‘), ist nicht mehr weit.



Bereits 1931 hatten quantenmechanische Gleichungssysteme eine Stufe der Konkretisierung erreicht, dass es mit ihnen bereits gut möglich war, die Materialstrukturen halbleitender Metalle, also Silizium, Germanium, Kupferoxyde u.a., in bezug auf Stromflüsse und -dichte, Ladungen, Gleichrichter-Eigenschaften

x

<sup>52</sup> Neben einigen anderen Fundamentalgebieten des modernen Wissens wie Quanteninformationstheorie, „economic mathematics“, u.a.

<sup>53</sup> Von Foerster und Glaserfeld bekunden Bridgmans bestimmenden Einfluss expressis verbis in: Foerster, Autobiographie:1999, 46 u. pass.

<sup>54</sup> Bridgman, Weltbild:1929, 49f.

etc. mathematisch zu beschreiben.<sup>55</sup> Dies geschah unter Zuhilfenahme konkreter, aber eben strikt ‚operationaler‘ Modelle. Das wichtigste war das bis heute noch gebräuchliche „Bänder-Modell“, nach denen Metall-Elektronen in den „Gittern“ von Halbleiter-Molekülen sich wie auf voneinander getrennten, teils ‚verstopften‘, teils befahrbaren „Fahrbahnen“ sollten bewegen können. Band 1, das Leitungsband enthält „freie Elektronen“, ist befahrbar, Band 2, das Valenz-Band hält die Elektronen in ihren Gitterstrukturen fest. Dazwischen ein verbotenes Band von einer durch Fermi definierten Energie, wo kein Elektron sich aufhalten kann.

1931 ergaben auch beste Herstellungsverfahren nur ein „unreines“ und mit fremden Elementen ‚verschmutztes‘ Silizium. In der technischen Praxis war damit wenig anzufangen. Genau hier entfaltete nun die Quantenmechanik ihre Wirkung. Es ließen sich nun Modelle entwickeln, die die bis dahin völlig diffuse und unklare Situation solcher Verunreinigungen aufklärten. „Modell“ aber hieß, im Sinne des opaken Bridgman-Operationalismus, „*Papier- und Bleistift-Modell*“<sup>56</sup>, ohne jeglichen Bild- oder Abbild-Bezug zu irgendeiner physikalischen Realität. Gleichwohl folgten damals wie heute aus diesen operationalen Modellen und ihren quantenmechanischen Formeln Botschaften und Befehle an die reelle physikalische Welt, nämlich eine Flut von Kenngrößen für die geforderte Werkstoffreinheit der Materialien. Ohne Reinheitsgrade von über 99% war mit Silizium, Germanium und anderen Halbleitern nichts anzufangen. Die entsprechenden Anstrengungen erfolgten im Krieg, wo Silizium, nämlich das stark verunreinigte und nur erratisch handhabbare als nahezu einziges Detektormaterial in kurzweiligen Radarsystemen zum Einsatz kam. 1940 lag dann der erste, fast reine Block Silizium auf dem Tisch des Bell-Lab-Chefs Kelly. Zufällig p-n-dotiert und zwar genau in der Mitte, um auch mal was für die Fachleute zu sagen. Man leuchtete mit einer Tischlampe darüber und die Stromanzeige schlug aus.<sup>57</sup>

Modell-Bildungen in der Quantenmechanik sind nicht nur deswegen bilderlos, weil von Neumanns Quantenmechanik einfach nur bilderlos wäre. Das ist sie allerdings völlig. Sie läuft in sogenannten „Hilbert-Räumen“ ab, in der N-Dimensionalität eines Raums, der von orthogonalen Vektoren aufgespannt wird, bewehrt mit zahlreichen Axiomen über Operator-Funktionen und deren Kommutativität, Selbstadjungierbarkeit und hermitesche Eigenschaften etc., was etwa ein Semester intensivse Seminararbeit bedeuten würde, auch

---

<sup>55</sup> Wilson, Theory:1931.

<sup>56</sup> Bridgman, Hauptsatz:1932, 96.

<sup>57</sup> Riordan, Fire:1997, 88. In dem „Cavity Magnetron“, einer englischen Entwicklung für 9 cm-Radarwellen, waren empfangsseitig ab 1940 Kristall-Detektoren eingebaut (99f). Diese „glückliche“ Fügung von Halbleiter-Kriegsforschung im Radarsektor und Entwicklung der Quantenmechanik hat Walter Brattain, neben Shockley und Bardeen Nobelpreisträger der Transistorentwicklung, ausdrücklich zugestanden. Vgl. Brattain, Oberflächeneigenschaften:1957, 457.

nur die Anfangsgründe einzusteigen. Für das bilderlose Genie John von Neumanns, der die halbe Mathematik der Welt im Kopf hatte, aber keine Erinnerung an Gesichter, an Menschenbilder also, und deswegen oft auch gute Bekannte schon nach kurzer Zeit nicht wiedererkannte, für John von Neumann waren Hilbert-Räume das intellektuelle Eldorado absoluter Bilderlosigkeit, die mit ihm zur Maxime der Quantenmechanik wurde. Um aber auf eine strikt operationelle Bildlichkeit umzustellen, die zwar keinen Anspruch mehr auf physikalische Realität erhebt, aber zum technischen Verständnis der Halbleitertechnik mehr als nötig ist, braucht es ein epistemologisch gekoppeltes Argument, eine Kopplung, die Bridgman nie verleugnet hat. Damit Operationalismus ‚funktioniert‘, muss die absolute Unvorstellbarkeit des mathematischen Raums, den die Lemmata der Quantenmechanik besetzen, mit der kalkulierbaren Nicht-Entropie ihrer statistischen Verfahren äquivalent sein. „Meine Analyse des Begriffs ‚Wahrscheinlichkeit‘“, sagt Bridgman, „[zeigt], dass es sich hier im hohen Grade um einen ‚Papier-und-Bleistift‘-Begriff handelt“<sup>58</sup>.

Nur also wenn das epistemische Kernstück der Quantenmathematik, der Begriff der ‚Wahrscheinlichkeit‘, keine, oder „im hohen Grade“ keine Referenz zur Natur mehr hat (Neumann sagte: ins „Wissen“ übergeht), und also bestenfalls mithilfe einer entsprechend präparierten Natur, via „Papier-und-Bleistift“, Kenngrößen, „Erwartungswerte“ etc. generiert (unter Herausrechnung der dabei entstehenden Entropien), dann können an genau diese Stelle mit Leichtigkeit „operationale Realitäten“ treten. Auf diesem strategischen Spiel herausrechenbarer Entropien, das auf Wahrscheinlichkeitskalkülen ohne Naturäquivalenz basiert, gründet die Episteme der herrschenden Festkörperphysik.

Wir können damit bruchlos übergehen zum „CCD“-Element der digital-elektronischen Fotografie und zwar mithilfe der Bibel aller Halbleiterforscher, zehn Jahre nach jenem 6. März 1940 geschrieben, als in den Bell-Labs der erste fast reine Siliziumstab auf dem Tisch lag. Wir lesen die ersten Sätze aus William Shockleys Standardwerk der Halbleiterphysik „Electrons and Holes in Semiconductors“ (und schicken voraus, dass Shockley einer der drei nobelpreisgekrönten Entwickler des Transistors von 1948 war; *der* Theoretiker, strategische Kopf und Leiter des erfolgreichsten Technologie-Entwicklungs-Projekts aller Zeiten):

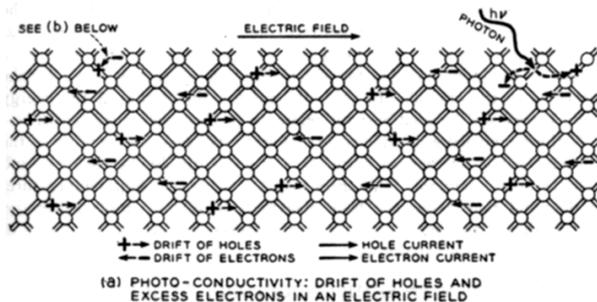
“The hole, or deficit produced by removing an electron from the valencebond structure of a crystal, is the chief reason for existence of this book.... From the theoretical viewpoint, the hole is an abstraction from a much more complex situation and the achieving of this abstraction in a logical way appears inevitably to involve rather detailed quantum-mechanical considerations. From the experimental viewpoint, in contrast, the existence of hole and electrons as positive and negative carriers of current can be inferred directly by the experimental techniques of transistor electronics

---

<sup>58</sup> Bridgman, Analyse:1938, 16.

so that holes and electrons have acquired an operational reality in Bridgman's sense of the word.<sup>59</sup>

Gibt es „Löcher“ und damit gleichsam ‚verschundene Elektronen‘ im Silizium? Als ‚operational reality‘ sicher, als physikalische Realität wohl eher nicht. Das ganze Bild geht aus von einem rein quantenmechanisch konstruierten Wahrscheinlichkeits-Wolkenband aus Elektronen, die in einem „Valenzband“ flutieren, welches gleichwohl die einzelnen Atome des Silizium-Kristalls fest zusammenhält. Fallen Licht-Photonen auf dieses Kristall, so werden aus diesem (nur operational ‚gedachten‘) Valenzband einzelne Elektronen herausgeschlagen, die dann durch die Kristallgitter hindurch-„migrieren“ bis hin zu einem höherenergetischen (eher virtuellen) „Leitungsband“, in welchem die Elektronen dann wie in einem Flussbett zu fließen beginnen. Dieser Elektronenfluss bewirkt den elektrischen Strom – das Silizium beginnt zu ‚leiten‘.



“One may think of the hole as moving through the crystal as a positively charged particle with much the same attributes as a free electron except for the sign of its charge.”

William Shockley: Electron and Holes in Semiconductors, 1950

X

Dort aber, wo die Elektronen herauskommen, wo sie herausgeschlagen wurden (durch Lichtphotonen), entsteht ein „Loch“. Diese Löcher tragen ebenfalls zum Stromfluss bei, indem sie gleichfalls durch die Valenzgitter „migrieren“ ins ‚Leitungsband‘ und dann in entgegengesetzter Stromrichtung „fließen“.

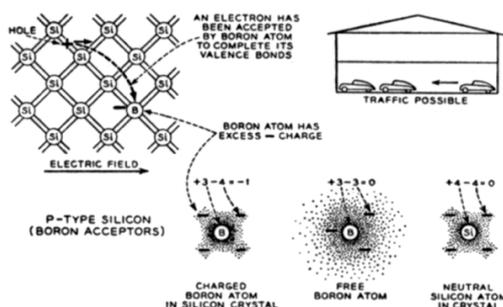


FIG. 1-8—Defect or Hole Conduction in Silicon Containing Boron.

“One may think of the hole as moving through the crystal as a positively charged particle with much the same attributes as a free electron except for the sign of its charge.”

William Shockley: Electron and Holes in Semiconductors, 1950

X

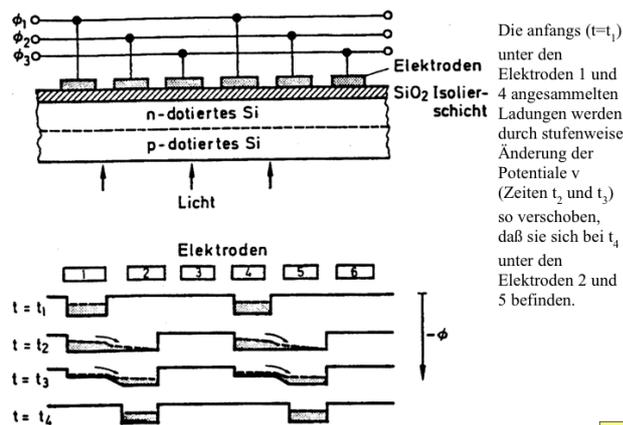
Wie aber können Löcher fließen? Vielleicht wie Blasen im Wasser, aber das wäre genau das falsche Bild! Shockley greift zu dem radikalsten aller denkbaren Bilder:

“One may think of the hole as moving through the crystal as a positively charged particle with much the same attributes as a free electron except for the sign of its charge.”<sup>60</sup>

<sup>59</sup> Shockley, Electrons:1950, ix.

<sup>60</sup> Shockley, Electrons:1950, 11.

Shockley weiß, dass ein Elektron niemals eine positive Ladung haben kann und dass positiv geladene Teilchen „in der Natur“<sup>61</sup> nur als Kernteilchen (Protonen) existieren, also weder in Elektronen noch ihren Löchern stecken, sondern im Atomkern. Außer es wären antimaterielle Positronen (das ‚Gegenstück‘ eines Elektrons in der Antimaterie, das positive Ladung hat...), doch dann würden im Silizium Materie und Antimaterie zusammengemischt und alles würde augenblicks zerstrahlen. Shockley quantenmechanische Rechnungen brauchen keine Begriffe wie Elektron oder Positron. Seine Bilder haben eine strikt operationale Realität, nicht nur keine „natürliche“, sondern auch keine physikalische. Was ihren Wert nicht mindert, was ihren Erfolg nicht schmälert, was die technologisch unersetzlichen Quantensprünge der Halbleiterindustrien nicht diskreditiert und jeden damit verbundenen zivilisatorischen ‚Fortschritt‘ ebenso nicht. Auf Shockley Operationen mit dem „electron-holes“ basiert am Ende seine ganze Theorie, auf ein absolutes Loch eben, das nicht einfach nur das Loch des Nicht-Sichtbaren ist, wie ich Ihnen nun schon eine dreiviertel Stunde zu zeigen versuche.



Fast im Vorübergehen können wir jetzt abhandeln, wie unser gesuchter Foto-Chip „CCD“ funktioniert. Wir lassen alle weiteren Einzelheiten weg („Dotierung“, „P-N-Übergänge“ etc.), nehmen den Stand der Technik aus dem Jahr 2000 und sagen gleichfalls operativ epistemologisch: Photonen, also Licht schlägt in winzige, zellenförmig nebeneinander angeordnete

Halbleiter-Gitter ein, die so groß (= so winzig klein) wie ein Bild-Pixel sind, das hinterher auf dem Bildschirm oder Drucker erscheint. In diesem winzigen Areal agitiert der Lichteinschlag Elektronen dazu, in ein anderes Energie-Niveau zu ‚migrieren‘, wo sie sich unter den angezeigten Elektroden sammeln und mittels einer ausgetüftelten Schaltungslogik ‚ausgelesen‘ werden. Dort verbleiben die aus Licht erzeugten Elektronen, Pixel für Pixel, wie in winzigen ‚Elektroneneimern‘. Ein weiterer Schaltungstrick verfrachtet die ‚Eimer‘ an den Rand des Chips, wo ihr Inhalt (Elektronen) ‚ausgezählt‘, d.h. ladungsmäßig gemessen wird. Diese Messwerte können dann (müssen nicht) digital umgesetzt werden in Bitmuster (= Zahlen). „CCD“ ist die Abkürzung von „Charge Coupled Device“, was nicht den Vorgang des Herausschlagens von Elektronen durch Photonen beschreibt, sondern den

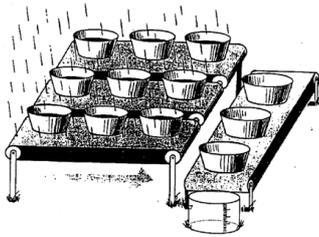
<sup>61</sup> Streng genommen gibt es in der modernen Physik kein „in der Natur“. Vgl. Mittelstaedt, Begriff: 1972.

schaltungstechnisch hochgetakteten Transport der einzelnen ‚Elektroneneimer‘ an den Rand des Chip.

### Das Digitale, das Manichäische

Man sieht sofort: Das „Digitale“ an der digitalen Fotografie ist das am wenigsten Wichtige.

Das „Digitale“ geschieht am Rand des Chips, dort, wo der ganze Quantenmechanismus bereits ‚gelaufen‘ ist. Nicht die Digitalisierung, der



Mathematik auf das frühe 19te Jahrhundert zurückgeht, ist die Revolution des zwanzigsten Jahrhunderts, sondern die Quantenmechanik, die ihre technische Implementierung erst universalisiert hat<sup>62</sup>.

So entstand die „digitale“ Fotografie. Erst seit es

x schnellste, alle menschlichen Sinneszeiten

unterschreitende Schaltelemente gibt, zunächst Röhren, dann Transistoren, dann integrierte Schaltkreise auf winzigstem, nur quantenphysikalisch beschreibbaren Halbleiter-Raum, steht Digitalisierung auf der Tagesordnung. Auch das erkannte – was Wunder – der Quantenmathematiker von Neumann zuerst und verfasste aufgrund seiner Mitarbeit am Prototyp des ersten rein elektronisch geschalteten Rechners ENIAC das berühmte „draft“ vom Juni 1945, das die Grund-Architektur aller bis heute gängigen Computer beschreibt.

Behielt John von Neumann „seine“ Episteme für sich? Seine eigene Wissenschaftspolitik zeigt uns, wie er die von ihm mitbegründete Episteme der Quantenmechanik proliferiert wissen wollte. 1945 im Januar, als noch Krieg war, er aber schon weiß, dass elektronische Maschinen (d.i. „Computer“) technisch realisierbar sein werden, ist es von Neumann, der den Gründungskongress jener Wissenschafts-Disziplin in Princeton organisiert, die sich später „Kybernetik“ nennen wird. Ihre interdisziplinäre Organisation überließ er gerne seinem Freund aus frühen Göttinger (Hilbert-) Zeiten<sup>63</sup> – Norbert Wiener. Der historische und epistemologische Prätext der Kybernetik aber war und ist die Quantenmechanik in der von Neumannschen Grundlegung.

---

<sup>62</sup> Dass aus dem quantenmechanischen Wahrscheinlichkeitskalkül auch die Informationstheorie (Abtasttheorem etc.), als zweite epistemologische Revolution des Jahrhunderts hervorgeht, lässt sich gerade an ihrem Entropie-Kalkül gut zeigen, das nämlich mit dem der Quantenmechanik logisch äquivalent ist. „Quantum theory has led, for our purposes, to a new association of energy and information.“ Sagt Norbert Wiener zurecht. Wiener, Use:1954, 38f.

<sup>63</sup> Heims, Neumann/Wiener:1980, 20f.

Die Kybernetik Wieners hat bekanntlich zahlreiche andere Natur- und Sozialwissenschaftsbereiche inspiriert, wenn nicht gar epistemologisch umgestülpt. Wichtige Konzepte, so der kybernetische Begriff der Evolution, wirken aus dieser Tradition bis heute fort. So wie in der Quantenmechanik die Entropie des Messprozesses durch ‚Wissen‘ ausgeglichen werden kann, wird jetzt kybernetisch ein Begriff von Evolution gedacht, der der Entropie widersteht. Lesen Sie von Foerster oder Glasersfeld oder das operativ konstruktivistische Systemapptet Niklas Luhmanns, in dessen Kommunikationstheorie der Begriff der „Evolution“ fundamental ist. Er wird, so als sei Gesellschaft ein Wahrscheinlichkeitsraum wie das Atomare, probabilistisch gefasst. Luhmanns „Grundaussage ist: dass Evolution geringe Entstehungswahrscheinlichkeit in hohe Erhaltungswahrscheinlichkeit transformiert. Dies ist nur eine andere Formulierung der geläufigeren Frage, wie aus Entropie (trotz des Entropiesatzes) Negentropie entstehen kann.“<sup>64</sup> Nichts anderes geschieht prinzipiell in der Quantenmechanik. In ihr wird Wissen gegen Entropie ‚verrechnet‘, wie bei Luhmann, qua konstruktivistischer Evolution, aus Entropie ‚Negentropie‘ entstehen soll.

Es war der Mathematiker Wiener selbst, der um den entscheidenden epistemologischen Fallstrick der Kybernetik, nämlich das Problem der Entropie, noch am genauesten wusste.

>> 34 “[The cybernetic] machine, like the living organism, is ... a device which locally and temporarily seems to resist the general tendency for the increase of entropy. By its ability to make decisions it can produce around it a local zone of organization in a world whose general tendency is to run down.”<sup>65</sup>

Unverkennbar, die „lokale Zone der Organisation“ (= Entropie-Verminderung), die eine kybernetische Maschine soll produzieren können, ist ein entschiedener epistemologischer Schritt über die Quantenmechanik im engeren Sinn hinaus. Wiener macht im Kern genau das, was Bridgmans opaker Operationalismus strikt untersagte: eine Projektion der Quantenmechanik auf die reelle, physikalische Welt. Hier beginnen die Quantenmechanik und die aus ihr hervorgehenden Maschinen ein „Leben“ im kybernetischen Sinn. Und weil nun der Schritt aus dem mikrophysikalisch Reellen in die makrophysikalische Realität vollzogen ist, muss Wiener diesem Leben gegen die Entropie, diesem ‚Lebendigen‘ seiner Maschinen, einen neuen Namen geben. Es soll ein Leben sein aus der Kraft der „manichäischen Entropie“.

The scientist is always working to discover the order and organization of the universe, and is thus playing a game against the arch enemy, disorganization. Is this devil

---

<sup>64</sup> Luhmann, Gesellschaft:1997, 414f.

<sup>65</sup> Wiener, Use:1954, 34. Das Buch existiert in zwei Auflagen (1950, 1954). Wiener hat die hier zitierte 2. Auflage komplett überarbeitet und erst hier die Unterscheidung einer manichäischen von einer augustinischen Entropie eingearbeitet.

Manichaeen or Augustinian? Is it a contrary force opposed to order or is it the very absence of order itself?<sup>66</sup>

Ohne den quantenmechanischen Wissenschaftskontext, wie wir ihn entfaltet haben, bliebe diese seltsame Unterscheidung einer augustinischen von einer manichäischen Entropie obskur. So aber legt sie den Finger auf ein fundamentales Problem, dessen Schwierigkeit offenbar Wiener selbst zu einer Offensive mit teuflischen Mitteln verleitet. Entropie, so wie sie in der Natur geschieht, also der einfache Verlust von Ordnung, beispielsweise der schlichte Zerfall von Materie (wie ein Glas zerspringt, z.B. am Ende von Stanley Kubricks „2001“), meint Wiener, sei augustinisch.

„The Augustinian devil is stupid. He plays a difficult game, but he may be defeated by our intelligence as thoroughly as by a sprinkle of holy water.“<sup>67</sup>

Deshalb also, weil sie so blöd waren wir ihr augustinischer Gegner, hatten die Menschen des mechanischen Zeitalters, weil Weihwasser ja nicht viel half, jahrhundertlang ihren blöden Schweiß gegen die alles niederreißende Tendenz der Natur (= Entropie) zu vergießen. Mit der Kybernetik aber, nach dem Wissensmodell der Quantenmechanik gedacht, entsteht ein neues Gegenüber, ein neuer Feind, eine neue Entropie und ein neues manichäisches Programm der Rettung.

“The Manichaeen devil is playing a game of poker against us and will resort readily to bluffing; which, as von Neumann explains in his *Theory of Games*, is intended not merely to enable us to win on a bluff, but to prevent the other side from winning on the basis of a certainty that we will not bluff. Compared to this Manichaeen being of refined malice, the Augustinian devil is stupid.”<sup>68</sup>

Diese willkürlich definierten, doppelten Übel der Entropie in Wieners Kybernetik ideologisieren die quantenmechanischen Technologien in unserer Welt. Die manichäische Entropie ist, wie die quantenmechanische von Neumanns, spieltheoretisch gedacht. Wiener übergeht den operationalistischen Vorbehalt Bridgmans, nämlich dass die Logik und das Wissen der Quantenmechanik auf sie beschränkt bleiben muss, kommentarlos. Wir erfahren stattdessen, dass das kybernetische „Leben“ nicht gegen den „dummen“ Zerfall opponiert, sondern gegen einen „klugen“ und „wissenden“, nämlich intelligent spielenden. Es hat einen intelligenten Feind zum Gegner – uns selbst. Wir sind die anderen und diese anderen sind wir, isomorph verrechnet in einem (bislang so) böartigen Spiel. Wenn aber die Welt der Automaten, der wir äquivalent sind, zum Zuge käme, so könnte das Spiel, das das unsere ist, erfolgreich zum Siege kommen. Zum Sieg aber weniger über die ‚natürliche‘, die dumme, die gütige Entropie des augustinischen Todes, als vielmehr zum Sieg über uns selbst, über das teuflisch-manichäische Menschenspiel, das wir selbst sind. Nur Automaten können uns

---

<sup>66</sup> 34.

<sup>67</sup> 35.

<sup>68</sup> 35.

retten. Das ist der ganze ‚Kernel‘ der Fiktion der kybernetischen Automaten, die, wie Peter Galisons luzide Analyse gezeigt hat, auf einer „Ontologie des Feindes“ basiert.<sup>69</sup>

### **Wissen und Erinnerung**

Von Neumanns Grundkalkül – die Verrechenbarkeit von Entropie und „Wissen“ auf Quanten-Niveau – schloss jede makrodimensionale Vereinnahmung explizit, nämlich mathematisch, aus.<sup>70</sup> In einer Anmerkung zu dem oben zitierten Satz: „D.h. wir haben unser Wissen gegen die Entropieabnahme  $k \ln 2$  eingetauscht“, erläutert von Neumann, „dass man sich dieses ‚Wissen‘ auch nicht um weniger als eine kompensierende Entropiezunahme  $k \ln 2$  verschaffen kann – allgemein ist  $k \ln 2$  der „thermodynamische Wert“ der Kenntnis, welcher von zwei Alternativen besteht. – Alle Versuche, den oben beschriebenen Prozess dann durchzuführen, wenn man nicht weiß, in welcher Hälfte sich das Molekül befindet, lassen sich als unstichhaltig nachweisen, obwohl sie u.U. zu recht komplizierten Automaten-Mechanismen führen.“ Neumann, Grundlagen:1932, 261.

Vermutlich hatte von Neumann so etwas eine thermodynamische „Unbestimmtheit“ (als einer Art „Naturkonstante“) im Sinn, die sich aber nicht ausführen ließ. Am Ende seines Lebens hat sich von Neumann dann nahezu ausschließlich mit Automatentheorien beschäftigt.

Wenn aber gilt, dass die Verrechnung von Wissen gegen das entropische Sein der makrophysikalischen Welt nur quantenmathematisch, d.h. nur in mikrophysikalischer Unbestimmbarkeit möglich ist, andererseits aber genau mit ihr, mit quantenmathematischer Verrechnung des Wissens gegen Entropie, Technologien (der Automation, der Medien) expandieren (sie expandieren im Wissen, aber nicht „mit“ Wissen“), – dann sitzen wir in einer Falle, die am besten mit der berühmten Lacanschen Übersetzung des ‚cogito ergo sum‘ zu

---

<sup>69</sup> Galison, Ontologie:1994.

<sup>70</sup> In einer Anmerkung zu dem oben zitierten Satz: „D.h. wir haben unser Wissen gegen die Entropieabnahme  $k \ln 2$  eingetauscht“, erläutert von Neumann, „dass man sich dieses ‚Wissen‘ auch nicht um weniger als eine kompensierende Entropiezunahme  $k \ln 2$  verschaffen kann – allgemein ist  $k \ln 2$  der „thermodynamische Wert“ der Kenntnis, welcher von zwei Alternativen besteht. – Alle Versuche, den oben beschriebenen Prozess dann durchzuführen, wenn man nicht weiß, in welcher Hälfte sich das Molekül befindet, lassen sich als unstichhaltig nachweisen, obwohl sie u.U. zu recht komplizierten Automaten-Mechanismen führen.“ Neumann, Grundlagen:1932, 261. Vermutlich hatte von Neumann so etwas eine thermodynamische „Unbestimmtheit“ (als einer Art „Naturkonstante“) im Sinn, die sich aber nicht ausführen ließ. Am Ende seines Lebens hat sich von Neumann dann nahezu ausschließlich mit Automatentheorien beschäftigt.

beschreiben wäre: Entweder wir ‚sind nichts‘ (entziehen uns der Automation, den Medien), oder wir ‚wissen nichts‘ (operieren mit ihnen).<sup>71</sup>

Die Welt der Quantenmechanik sperrt das Wissen, mit dem sie operiert und ihre Systeme expandiert, zugleich ab.<sup>72</sup> Weil aus dem bloßen Funktionieren ihrer Technologien nicht erkennbar ist, welches Wissen die Quantenmechanik operativ ‚verrechnet‘ und welches nicht, wird die Bahn frei für die wildesten Metaphorologien über den „Darwinismus“ dieser Technologien<sup>73</sup> und die „Evolution der Medien“<sup>74</sup>, die sich der Quantenmechanik verdanken. Dennoch ist nicht unmöglich, dem auf die Spur zu kommen, was im Wissen der Quantenmechanik abgesperrt ist. Man lese man nur noch einmal, welches mathematisch-probabilistische Kalkül dem jungen von Neumann und seinen Freund Szilard der These der Entropieäquivalenz eines quantenmechanisch messenden Wissens zugrunde lag. Um den Unterschied zu einem quantenmechanisch „wissenden“ Meßsystem zu definieren, stellten beide klar:

In dem Moment, wo einem Meßsystem zugewiesen werden muss, sich zu „*erinnern*“, ist Entropie (mathematisch) *nicht mehr ausgleichbar*. Makrophysikalisch, also in der für unsere Augen sichtbaren Welt, weist ein Meßsystem

... ja eine Art Erinnerungsvermögen auf, in dem Sinne, dass man an dem Zustandsparameter  $y$  erkennen kann, was für einen Wert ein anderer Zustandsparameter  $x$  zu einem früheren Zeitpunkt gehabt hat, und wir werden sehen, dass schon vermöge einer solchen Erinnerung der zweite Hauptsatz verletzt wäre, wenn der Vorgang der Messung sich ohne Kompensation abspielen würde.<sup>75</sup>

---

<sup>71</sup> Lacan sagt in seinem einzigen ‚medialen‘, nämlich im Radio vorgetragenen Text 1970: „Lesen wir das *cogito*, indem wir es übersetzen gemäß der Formel, die Lacan von der Botschaft im Unbewussten gibt; das heißt also: ‚Entweder du bist nicht, oder du denkst nicht‘, adressiert ans Wissen. Wer zögerte zu wählen?“ Lacan, Radiophonie:1970, 39. Die hier naheliegende These, dass auch Lacans Konzept des Unbewussten, im Sprechprozess gefesselt wie ein Reelles, das stets sich selbst an den Füßen klebt, sein Medienapriori in der Episteme der Quantenmechanik hätte, nämlich in einem von allen anderen abgesperrten, unerreichbaren Wissenstyp des Wissens, wäre einen diskursanalytischen Explorationsversuch wert.

<sup>72</sup> McLuhan war einer der ersten, der – im Kontext der Medien des ‚electric age‘ - auf diesen Effekt der „closure“ eines Medien-Wissens nachdrücklich hingewiesen hat. McLuhan, Understanding:1964, 46f u. pass.

<sup>73</sup> „Der Darwinsche Kampf hat sich hinausverlagert auf die Technologien und die kulturellen Einrichtungen des Menschen.“ Bolz, Medienevolution:1996, 26.

<sup>74</sup> „Je mehr Medien entstehen, umso schneller entstehen *noch mehr Medien*.“ Merten, Evolution: 1994, 153.

<sup>75</sup> Szilard, Entropieverminderung:1929, 842.

Die mathematische Behandlung zeigt: nur in Meßsystemen, die keine „Erinnerung“ definieren, gleicht das Wissen, das ihre Systeme enthalten, die Entropie wieder aus, die beim Messprozess anfällt. Nur sie sind also wissens-entropisch äquivalent. Das gilt, wie von Neumann mit Szilard verdeutlicht, eben nur in den Grenzen der Unschärferelationen der Quantenmechanik. Nur dort ist ein Wissen ohne Erinnerung, nämlich ein reines Wahrscheinlichkeitswissen, definierbar. Ich denke, daraus folgt ein wichtiger Umkehrschluss. Nämlich der, dass jedes Wissen, das erinnerungslos expandierende quantenmechanische Systeme insgesamt steuern wollte, eine Episteme der „Erinnerung“ implementieren *muss*, deren Entropie quantenmechanisch selbst ganz unausgleichbar bleibt. Erinnerung kann immer nur durch eine weitere Arbeit der Erinnerung selbst ‚ausgeglichen‘ werden, und das heisst: durch nichts Quantenmechanisches.

### **Digitale Fotografie**

Ein Wissen über digitale Fotografie als Fotografie im Herschelschen Sinn ist also keine logische Unmöglichkeit. Wir wissen, „wie“ es geht (mit „CCDs“ Licht in digitale Pixel verwandeln und mit ihnen rechnen, was berechenbar ist); und wissen, „was“ sie ist. Nämlich ein, im Sinne des Wissens, vollständig reversibler Prozess ohne inneren Erinnerungswert. „Digital“ können wir beliebig Bilder herstellen, überlagern, vermischen, fraktalisieren, „dithern“ etc., ohne auch nur ein Pixel in diesem Prozess zu verlieren. Im Digitalen reicht der „Undo“-Button, um alles wiederherzustellen wie es war. Nicht einmal anschauen müssen wir unsere Pixelbits, wir verpacken sie mittels ein paar Headern in ein Soundfile und wandeln ihre Daten in „Musik“ im John Cage’schen Sinn. Das geschähe ebenso verlustfrei wie ein Bildherstellungsprozess und wäre diesem vollständig äquivalent. „Objects are not *recorded* in this system as much as they are *rendered*.“<sup>76</sup>

Hinter dem Digitalen der Digitalen Fotografie steckt die quantenmechanische Episteme eines „Tausches“ von Wissen gegen Entropie.<sup>77</sup> Diese Äquivalenz gilt nur, wie zu sehen war, wenn aus diesem Wissen ‚erinnerndes‘ Wissen ausgeschlossen wird. Wohlgermerkt, das ist kein Ausschluss von außen, sondern von innen her. Der Ausschluss ‚erinnernden‘ Wissens ist die innere Funktion einer quantenmechanisch-epistemischen Wissensprozedur, der gleichwohl ihr Nicht-Wissen, also „Erinnerung“, immer an ihrer Ferse klebt. Dieses Nicht-Wissen im Wissen der quantenmechanischen Episteme ‚existiert‘ also nur als Negation. Zwischen digitaler und analog-chemischer Fotografie zieht die Quantenmechanik eine Grenze qua Entropie, qua Temperatur, durch Verlust an Struktur, durch Abbau von Redundanz, durch

---

<sup>76</sup> Druckrey, Dada:1994, 7.

<sup>77</sup> „Wir haben unser Wissen gegen die Entropieabnahme  $k \ln 2$  eingetauscht.“ S.o.

Verfall, durch den Tod. Aber sie zieht diese Grenze durch Negation: der Entropie, der Temperatur-, Struktur-, Redundanzverluste, - durch die Negation des Todes.

Das verstärkt, negativ wie positiv, jenen immer schon ambivalenten Aspekt der technischen Still-Bildlichkeit, den Roland Barthes in seinem phänomenologischen Blick auf die Fotografie „die ungewisse Kunst“ genannt hat, „vergleichbar einer Wissenschaft von den ‚desirablen‘ [anziehenden] oder ‚haïssablen‘ [abstoßenden] Körpern (man sollte darauf verfallen, eine solche zu begründen).“<sup>78</sup> Geschwächt, weil negativ verstärkt, wird der Ort, wo die Fotografie zu einem unübersetzbaren, unübertragbaren Zeichen wird, zu einem uncodierbaren „punctum“, das weder sein Zeichen noch seinen Namen findet.<sup>79</sup> Dieses Ungewisse, die Uncodierbarkeit eines „blinden Feldes“, in welchem „alles, was sich innerhalb des Rahmens abspielt, vollständig [stirbt]“<sup>80</sup>, hat nämlich mit Entropie zu tun. Es ist gleichsam etwas, was mit dem Bild, das es zeigt, stirbt und in dieser erstorbenen Struktur wie ein Mahnmal erstarren lässt.

>> 39 Die Fotografie, sagt Barthes luzide Beobachtung, „ist das lebendige Bild von etwas Totem“<sup>81</sup>. Ihr unbewegtes Bild verschränkt das „Reale“ mit dem „Lebendigen“<sup>82</sup>. Genau diese „Verschränkung“ bezeugt ihre Entropie: die „Zeit [wird] zermalmt“<sup>83</sup>.

Als sei es das letzte Mal – „La chambre claire“ ist 1980 erschienen –, dass man die Fotografie bannen müsse in ihrem Sein, fixiert Barthes seinen Gegenstand:

„Das Noema der Photographie ist schlicht, banal, hat keine Tiefe: ‚*Es ist so gewesen*.““<sup>84</sup>.

Diese Phänomenologie ist prekär, das weiß auch Barthes. An der Schwelle zur Einführung ‚digitaler‘ Prozeduren in die Fotografie, um 1980, muss Barthes noch einmal in die historischen Tiefen der (AI-)Chemie steigen, um seine These von der noematisch „notwendig realen[n] Sache, die vor dem Objektiv platziert war“<sup>85</sup>, zu retten:

Denn der Sinngehalt des „*Es-ist-so-gewesen*“ ist erst von dem Tage an möglich geworden, da ... die Entdeckung der Lichtempfindlichkeit von Silbersalzen es erlaubte, die von einem abgestuft beleuchteten Objekt zurückgeworfenen Lichtstrahlen ... festzuhalten. (...) Die Photographie des verschwundenen Wesens berührt mich wie das

---

<sup>78</sup> Barthes, Kammer:1980, 25f.

<sup>79</sup> 62.

<sup>80</sup> 66.

<sup>81</sup> 88f.

<sup>82</sup> 89.

<sup>83</sup> 106.

<sup>84</sup> 126.

<sup>85</sup> 86.

Licht eines Sterns. (...) Der geliebte Körper wird durch die Vermittlung eines kostbaren Metalls, des Silbers (Denkmal und verschwenderische Fülle) unsterblich; und die Vorstellung ließe sich nachtragen, dass dieses Metall, wie alle Metalle der Alchemie, lebendig ist.<sup>86</sup>

Das Licht der Sterne und die Messung des Lichts. Schon Herschel hatte die Idee, an der Fotografie das Licht selbst, also nicht das zurückgeworfene, zu messen. Im 19. Jahrhundert bleibt es dabei, dass dies nicht gelingt und man sich mit der Phänomenologie des Lichts, einer Art messenden „Erinnerung“ ihrer fotografisch-chemischen Entropien, behelfen muss. Chemische Fotografien sind hoch-entropisch, ein zersprungenes Glas ist nichts dagegen. Unmöglich, einen bereits belichteten Film wieder in seinen ursprünglichen Zustand zu versetzen. Nicht also am „Referenten“ des Bildes, sondern an der Irreversibilität belichteten Materials haftet das „Es-ist-so-gewesen“ der Fotografie, ein Strukturverlust, fixiert durch die „Entwicklung“ des Bildes. Dieser entropische Strukturverlust – und nichts sonst – schafft die Arbitrarität des fotografischen Zeichens, die die Übertragung eines „Infra-Wissens“<sup>87</sup> über die fotografierte Welt, den Transport all dieser codierten, zeichengestützten Bilder ‚aus aller Welt‘, Typisierungen, Katalogisierungen, Fetischismen und Klischees sichert und erlaubt. Eine Arbitrarität auf Zeit, denn irgendwann<sup>88</sup> vergilbt jedes chemische Lichtbild oder wandert auf den Müll.

Digitale Fotografie dagegen ist vollständig reversibel und deshalb nicht-arbiträr. Das beginnt mit dem Halbleiterchip, der Lichtphotonen in berechenbaren Wechselwirkungsquerschnitten in Elektronenladung wandelt. Abgespeichert oder nicht, augenblicks später ist der Chip wieder „resettet“, eine geeignete Vorspannungs-Schaltung erledigt das, und bereit für den nächsten ‘Schuss’.

Halbleiterfotografie ist in Wahrheit eine quantenmechanische Messung des Lichts, also das realisierte Ideal Herschels. Ich hoffe, Ihnen gezeigt zu haben, wie rekursiv die Quantenphysik mit dem Licht, das sie misst, operiert. Die Messungen am Geburtsort der Physik gehen längst, wie Sie sehen, über alles das, was wir sehen können, weit hinaus. So hat die digitale auch die chemische Fotografie weitgehend aus der Astronomie verdrängt.<sup>89</sup> Quantenmechanisch ist eine „Lichtausbeute“ zu haben, die jede mögliche chemische Licht-Speicherung um ein Vielfaches übersteigt. Digitale Fotografie ist Messung des Lichts, auf Quantenraumgröße verdichtet, deren Messwerte sich zu einem Puzzle namens Bild fügen lassen, oder zu etwas anderem. Eine solche Messung ergibt niemals das „Zeichen“ eines

---

<sup>86</sup> 91.

<sup>87</sup> 38.

<sup>88</sup> Wenn nicht immer wieder Arbeit in seine Konservierung gesteckt wird.

<sup>89</sup> Vgl. Howell, Handbook:2000.

Dinges, sondern nur sein Maß, einen Signalwert, eine Zahl. Deswegen kann Digitale Fotografie auch keinen Zeichenprozess, „a signing of signs“, wie Batchen in Anschluss an Peirce und Derrida vorschlägt, generieren.<sup>90</sup>

Analoge Fotografie war/ist die unwiderrufliche Einschreibung einer Entropie am Material, erzeugt durch Belichtung. Da unsere Augen schlecht messen, aber gut trügen, dachten wir, wir sähen – uns. Im entropischen Spiegel der „Urdoxa“ einer irreversiblen Prozedur des Fotografierens sahen wir uns Sterbliche, sahen wir die „Melancholie“ unseres Seins und erblickten - unsere Geschichte. Es ist ja kein Paradox, wenn Barthes sagt: „Dasselbe Jahrhundert hat die Geschichte und die Photographie erfunden.“<sup>91</sup> Digitale Medien aber und ihre quantenmechanische Episteme rechnen aus ihren Prozeduren Entropien heraus, erzeugen Bilder einer selbstreferentiell „konstruierten Realität“, einer prinzipiell „unerreichbaren Welt“<sup>92</sup>, diesseits derer sie Abbau an Strukturen hinterlassen, ohne dass es davon noch Bilder gäbe. Es ist ein ‚wissentlicher‘ Abbau, wenn auch wissentlich von einem anderen Typ des Wissens als es der uns gewohnte ist. Entgegnet werden kann dem nur mit einem Wissen, das im Wissen der quantenmechanischen Episteme nicht noch einmal die internen Strukturen von quantenmechanischen Technologien parodiert.

---

<sup>90</sup> „In other words, the very Peircian semiotics upon which photography’s analogical stability is founded would have us rewrite photography as a signing of signs, recognizing that it is at the same time a *digital* process.” (Batchen, *Desire*:1997, 215.) Batchens Versuch, die digitale Fotografie gleichsam in einem Kreisprozess mit den Anfängen der Fotografie, nämlich den Atkins’schen Photogrammen, oder mit Amsel’schen Reproduktionsfotografien zu identifizieren, überzeugt nicht recht. Anna Atkins Algen-„contact prints“ sind kein „collaps“ des Verhältnisses von Original und Reproduktion, sondern seine materiale Verschiebung. Sie würde es nicht ermöglichen, Fotografie als Sound prozessieren zu lassen. Vgl. Batchen, *Photogenics*:1998, 24.

<sup>91</sup> Barthes, *Kammer*:1980, 104.

<sup>92</sup> „Die These des operativen Konstruktivismus ... bestreitet nicht, dass es Realität gibt. Aber sie setzt Welt nicht als Gegenstand, sondern ... als Horizont voraus. Also als unerreichbar. Und deshalb bleibt keine andere Möglichkeit als: Realität zu konstruieren.“ Luhmann, *Realität*:1996, 18.