

PETER GALISON

ABBILD UND LOGIK. ZUR APPARATIVEN KULTUR DER TEILCHENPHYSIK*

[...] Anstatt eine theoriedominierte Darstellung zu geben oder die Geschichten einzelner experimenteller Entdeckungen zu sammeln, ist es hier das Ziel, die Kontinuität experimenteller Praktiken durch die Analyse der Instrumente der modernen Physik aufzuzeigen. Ich werde zwei konkurrierende Instrumententraditionen verfolgen, die bereits im [Titel meines Buches *Image and Logic*] benannt sind. Die eine Tradition zielt auf die Repräsentation natürlicher Prozesse in ihrem ganzen Reichtum und ihrer ganzen Komplexität – sie zielt auf eine Abbildproduktion von solcher Klarheit, dass ein einziges Bild als Beweismittel für eine neue Entität oder einen neuen Effekt dienen kann. Diese Abbilder werden als *mimetisch* präsentiert und verteidigt – sie wahren vorgeblich die Gestalt der Dinge, wie sie in der Welt erscheinen: Teilchen erzeugen Blasen Spuren in überhitztem Wasserstoff, Spuren von Wassertröpfchen in übersättigtem Dampf oder Spuren in chemisch veränderten Emulsionen auf fotografischen Platten – diese Aufzeichnungen erschaffen *ipso facto* die genaue Gestalt der unsichtbaren Natur neu. Da dieses Repräsentationsideal auf der mimetischen Wahrung der Gestalt liegt, nenne ich es ‚homomorph‘.

Dieser mimetischen Tradition möchte ich die – von mir so genannte – ‚Logiktradition‘ entgegensetzen; diese bedient sich Zähler, die in logischen Schaltkreise eingebettet sind. Diese Zählgeräte (im Gegensatz zu bilderzeugenden Geräten) häufen Datenmassen an, um statistische Argumente für die Existenz eines Teilchens oder Effekts zu liefern. Somit gibt die Logiktradition die scharfe Fokussierung auf einzelne Ereignisse auf, wie sie von ihren Konkurrenten, die Abbilder erzeugen,

* Anm. d. Hrsg.: Beim folgenden Text handelt es sich um die leicht gekürzte Übersetzung einiger Auszüge aus Galison, Peter: *Image and Logic. A Material Culture of Microphysics*, Chicago/London 1997, S. 19-31 und 40f. Wir danken Peter Galison, sowie der Chicago University Press für die freundliche Genehmigung für Wiederabdruck und Übersetzung.

betrieben wird – ja, sie weist diese Fokussierung ausdrücklich zurück. Dafür werden die logischen Beziehungen zwischen bestimmten Umständen ermittelt, wie etwa: Das Teilchen drang nicht in Eisenplatte 3, aber durchdrang die Eisenplatten 4, 5 und 6. Da diese statistische Methode der Registrierung die logische Beziehung zwischen Ereignissen berücksichtigt, nenne ich sie ‚homologe‘ Darstellung.

Die mimetische Darstellung ist wohlgerüstet gegenüber der Forderung nach Vollständigkeit, doch empfindlich gegenüber dem Vorwurf, nur einen Glücksfall oder eine Anomalie ausfindig gemacht zu haben. Demgegenüber opfert der statistische Zugriff ganz bewusst das einzelne Detail der Beständigkeit der Masse. In vielen Fällen können beide Zugriffe die gleichen Ergebnisse liefern, z.B. die Erschließung eines neuen Teilchens. Physiker referieren hierbei auf etwas, das als metaphysische Version des ergodischen Theorems bezeichnet werden kann: Informationen über ein einzelnes Ereignis, das in allen Details wiedergegeben wird, entsprechen in allen relevanten Punkten den Informationen, die aus nur einem Teil der Details von vielen Ereignissen gleicher Klasse abgeleitet werden können (im Bereich der statistischen Mechanik macht es keinen Unterschied, ob man das Verhalten eines Gasbehälters über einen langen Zeitraum oder viele identische Behälter über kürzere Zeiträume untersucht). Hat man ein Anti-Myon-Neutrino gesehen, hat man alle gesehen; wenn man einzelne Stückchen von einer Million Lambdateilchen gesehen hat, kann man alles über jedes beliebige Lambdateilchen in Erfahrung bringen. Abstrakt betrachtet, entwickelt sich die Abbildtradition (mit ihrer homomorphen Darstellung) in Spannung zur Logiktradition (mit ihrer homologen Darstellung). [Man muss sich] den Instrumenten zuwenden, die entworfen wurden, um den mikrophysikalischen Entitäten der Physik nachzustellen: Nebelkammern, Kernemulsionen und Blasenkammern für den Abbildzweig; Zähler (Geiger-Müller-Zähler, Čerenkov-Zähler und Szintillationszähler), Funkenkammern und Drahtfunkenkammern für den Logikzweig, dazu kommen elektronisch hergestellte Abbilder als Ergebnis von Abbild/Logik-Hybriden:

Abbildtradition	Logiktradition
Nebelkammer	Zähler
Kernemulsion	Funkenkammer
Blasenkammer	Drahtfunkenkammer
\	/

Elektronisch hergestellte Abbilder

Als die Nebelkammer im frühen 20. Jh. das erste Mal die Teilchenwelt erkundete, wurde sie als eines der großartigsten Instrumente aller Zeiten gefeiert. 1923 erklärte der Physiker E. N. Andrade, dass „zukünftige Wissenschaftshistoriker es als eines der hervorstechendsten Merkmale unserer Zeit ansehen werden, dass wir fähig sind, uns mit einzelnen Atomen und Atomen in kleiner Zahl zu befassen – zumal wir diese Fähigkeit während des letzten Jahrzehnts so schnell entwickelt haben.“¹ In erster Linie wird diese Fähigkeit anhand der Wilsonkammer* deutlich sowie anhand neuer elektronischer Zähler, die den Durchgang einzelner geladener Teilchen registrieren konnten. Als elektronische Zähler in den späten 20er und frühen 30er Jahren zum Einsatz kamen, sah es ganz so aus, als ob sie den Staffelstab der Abbildtradition übernehmen würden; die Nebelkammer und die Kernemulsion – als deren Nachfolger in der Abbildtradition – schafften jedoch ein Comeback in den frühen Nachkriegsjahren, nur um ihrerseits von den neu eingeführten elektronischen Geräten der *Manhattan-* und *Radar Projects*** bedroht zu werden. In den 50er und 60er Jahren ließen Glaser und Alvarez mit der großen Wasserstoffblasenkammer die Abbildtradition nicht nur wieder aufleben; sie verschafften ihr eine beherrschende Stellung. Es schien, dass die Abbildtradition im Zeitalter industriemäßiger Forschung angekommen war und den Sieg davon getragen hatte – für dieses Mal stimmte es auch. Aber die Logiktradition hatte noch einen Trumpf im Ärmel. Indem sie die mikroelektronische Revolution der späten 60er und frühen 70er Jahre ausnutzten, konnten Zählerphysiker eine ganze Menge neuer elektronischer Detektoren vorstellen, die ein solch erstaunliches Auflösungsvermögen aufwiesen, dass sie die überzeugende Klarheit der Abbildtradition erreichen konnten – daraufhin wurden verschiedene Geräte von einigen Experimentatoren als ‚elektronische Blasenkamern‘ bezeichnet.

Diese neuen Instrumente (Driftkammern und Spurendriftkammern*** in Kombination mit Computern von hoher Rechenleistung) verbanden die Fähigkeit der Datenklassifikation der Logiktradition mit dem umfassenden Detailreichtum der Abbildtradition. So verschmolzen in den frühen 80er Jahren mit der Herstellung von computergenerierten

1 [27] Andrade, E. N. Da C.: *The Structure of the Atom*, London 1923, S. 285. Andrade zählt Astons Massenspektrometer zu den Geräten, die eine kleine Anzahl von Atomen manipulieren können.

* Anm. d. Hrsg.: Damit ist die 1895 von Wilson entwickelte Nebelkammer gemeint.

** Anm. d. Hrsg.: Damit sind die aus dem Zweiten Weltkrieg hervorgegangenen Projekte zur Radartechnologie bzw. zur Atombombe gemeint.

*** Anm. d. Hrsg.: Im Original: Drift Chamber und Time Projection Chamber.

Bildern die beiden Traditionen. Solch eine ‚elektronische Fotografie‘ verkündete 1983 die Entdeckung der $W^{+/-}$ - und des Z^0 -Teilchens – es war das erste Mal, dass ein einziger elektronischer Nachweis eines Ereignisses der größeren physikalischen Gemeinschaft als hinreichender Beweis für dessen Existenz präsentiert wurde.²

Die Beständigkeit der Traditionen, die in Abb. 1 dargestellt werden, zeigt sich auf drei Ebenen. Zunächst gibt es eine *pädagogische Kontinuität*: Kurz nachdem C. T. R. Wilson seine erste Nebelkammer gebaut hatte, erlernte Robert Millikan diese Technik, indem er Wilsons Arbeit studierte und modifizierte sie für seine Öltropfenexperimente. Millikan lehrte diese Technik dem zukünftigen Meister der Nebelkammer Carl Anderson; Anderson unterwies Donald Glaser, den Erfinder der Blaskammer. Es überrascht nicht, dass viele von Glasers Schülern ihre Arbeit in den enormen Blaskammerteams der 60er fortführten. Im Großen und Ganzen kann man von ‚Stammbäumen‘ von Schülern auf jeder Seite der Abbild/Logik-Markscheide ausgehen.

Zweitens gibt es eine *technische Kontinuität*. Die Fähigkeiten, die im Labor tagtäglich zum Einsatz kommen, sind für Nebelkammer, Blaskammer, Emulsion die gleichen: Spurenanalyse, fotografische Sachkenntnis und Mikrometrie. In ähnlicher Weise findet sich im logischen Zweig eine konstante Anhäufung elektronischer Sachkenntnisse [*skill clusters*]: Der Einsatz von Hochspannung, der Entwurf logischer Schaltkreise sowie Kaltlichtphysik. Wenn man einmal dieser (ihrerseits verknüpften) Kontinuitäten von Unterricht und Technik gewahr wird, überrascht es kaum, dass man beispielsweise in der Abbildtradition einen signifikanten Fluss von ‚Roh‘daten findet – in Form etwa von Spurenfotografien, die von Blaskammerteams an Emulsionsteams in den frühen 60er Jahren ‚weitergereicht‘ wurden. Im Gegensatz dazu überschreiten bestimmte Sachkenntnisse kaum die Abbild/Logik-Markscheide. Sowohl einzelne Forscher als auch Teams fanden es schwierig, die Experimente mit Nebel- und Blaskammern einfach fallenzulassen und sich Lötkolben, Vakuumröhren oder Schalttafeln zuzuwenden. Der Unterschied zwischen diesen beiden Anhäufungen von Sachkenntnissen ist markant, wie der folgende Bericht aus den frühen 70er Jahren deutlich macht: „Gehört er [ein Doktorand] zu einem Funkenkammerteam, kann er bei dem Entwurf und der Entwicklung von Geräten helfen; er kann sich an der Verschaltung von Computern und der Softwareentwicklung

2 [28] Vgl. Arnison, G. et al.: „Experimental Observation of Isolated Large Transverse Energy Electrons with Associated Missing Energy at $\sqrt{s}=540$ GeV“, in: *Physics Letters B* 122 (1983) S. 103-116.

beteiligen. In einem Blasenkartenteam müsste er einen Großteil seiner Kraft auf die Entwicklung von Programmen oder Verfahren zur Auswahl relevanter Informationen, die in den Bildern enthalten sind, verwenden.“³ Da die Erarbeitung von Analyse-Prozeduren und die Bildanalyse so wenig mit der Herstellung von Schaltungen zu tun haben, gab es eine Hürde zwischen den beiden Traditionen in den 30er und eine hohe Mauer zur Mitte der 60er Jahre.

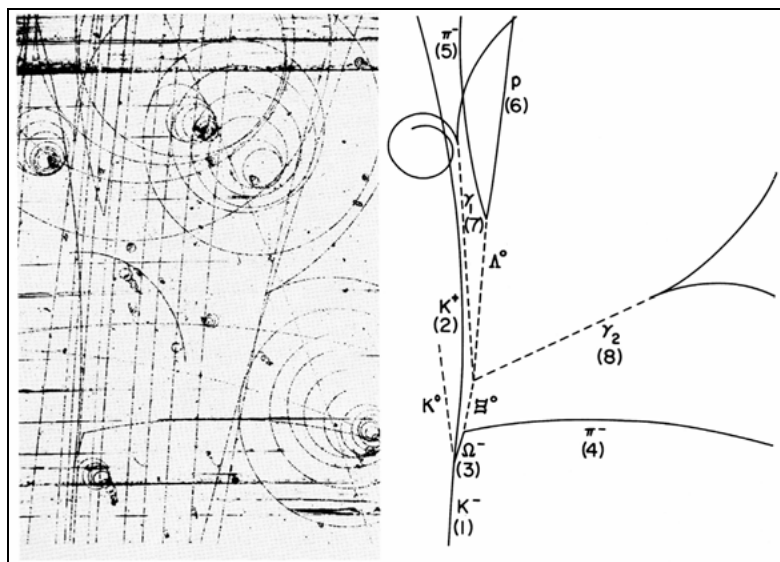


Abb. 1: Golden Event: Nachweis des Ω^- , 1964

Schließlich gibt es etwas, das ich als beweisende oder epistemologische Kontinuität bezeichne – die Kontinuität charakteristischer Formen, in der jede Tradition ihre Argumentation entfaltet. Dem Abbildzweig wohnt die tiefsitzende Festlegung auf die Erzeugung eines Golden Event inne: ein einzelnes Bild von solcher Deutlichkeit und Bezeichnungskraft, dass es allgemeine Akzeptanz verlangt. Beispiele hierfür sind etwa Andersons Bild des Positrons aus dem Jahre 1932, die Aufnahmen, die Alvarez und seine Mitarbeiter in den 50er Jahren von einer ‚Null-Kaskade‘ [Cascade Zero]* und der Myon-katalysierten Fusion machten, Brookhaven’s

3 [29] National Academy of Sciences (Hrsg.): *Physics in Perspective*, Washington 1972, Bd. 2, S. 114.

* Anm. d. Hrsg.: Dabei handelt es sich um einen Prozess, in dem das seltene Ξ^0 produziert wird. Da bei seiner Bildung ein K^0 entsteht und das Ξ^0 selbst

Nachweis des Ω^- -Teilchens in den 60er Jahren (Abb. 1), sowie die Bilder des Gargamelle(-Blasenkammer)-Teams von einem Ein-Elektron-neutrale-Ströme-Ereignis in den 70ern (Abb. 2).

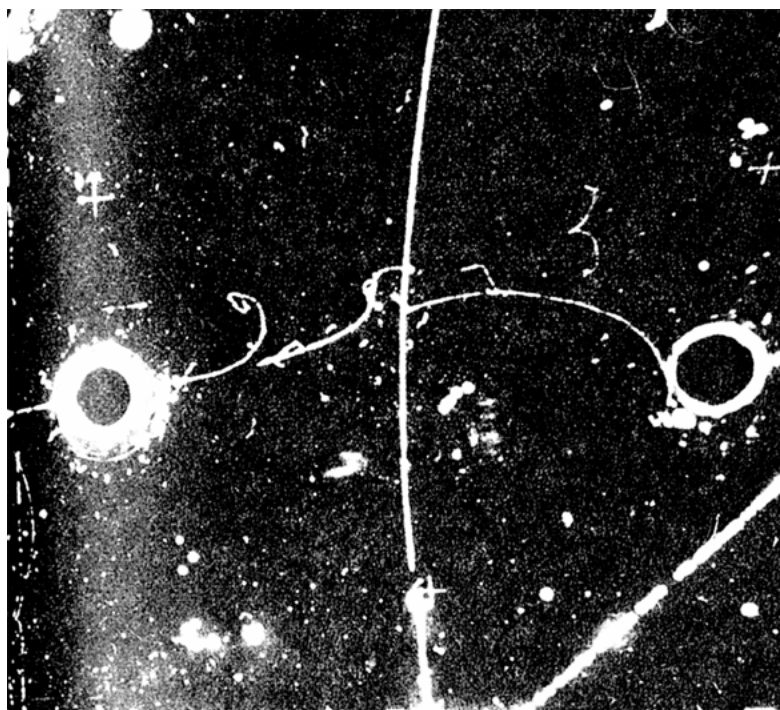


Abb. 2: *Golden Event: Nachweis neutraler Ströme, 1973.*

Das letzte Beispiel veranschaulicht vielleicht am besten die Beweiskraft eines einzelnen, glücklich strukturierten Bildes. Obwohl einige Mitglieder dieser großen Forschergruppe Jahre damit verbracht hatten, statistische Daten zu sammeln, war es dieses Bild – projiziert in Hörsälen, abgedruckt in Zeitschriften und Lehrbüchern und wortwörtlich um die ganze Welt getragen –, das viele Physiker, zum ersten Mal, an die Realität neutraler Ströme glauben ließ.⁴ Nicht jedes bedeutende Ergebnis des

wieder in ein Λ^0 und ein π^0 zerfällt, es also zu einer Kette neutraler Teilchen kommt, heißt das Phänomen ‚Null-Kaskade‘.

- 4 [30] Über die Stellung dieses einzelnen Events in der Beweisführung für die Existenz Neutraler Ströme im Fall von Gargamelle vgl. Galison, Peter: *How Experiments End*, Chicago 1987. Ganz richtig betont Latour die bedeutende rhetorische Macht, die den Verfertigern von Abbildern zukommt; diese

Abbildzweigs war ein *Golden Event*. Viele dieser Ergebnisse ruhten auf der Zusammenstellung tausender sorgfältig untersuchter Bilder. Gleichwohl stellte der *Golden Event* eine charakteristische Beweisform dar, die für den Logikzweig – bis in die 80er Jahre hinein – vollkommen unerreichbar blieb. Somit war es ein Emblem, ein Banner der Zuverlässigkeit dieses Zugangsweise: Wenn eine einzelne Fotografie vor einem überfüllten Hörsaal geschwenkt werden kann, wer könnte noch die Beweiskraft, die sich auf 100.000 solcher Bilder stützt, anzweifeln?

Der *Golden Event* war das Ideal des Abbildzweigs: ein einzelner Fall, so vollständig, so deutlich hervorgehoben, so ‚offenkundig‘ frei von Verzerrungen und Hintergrundstrahlung, dass keine weiteren Daten herangezogen werden mussten (es ist notwendig en detail zu erforschen, wie diese Transparenz geschaffen wurde^{*}). Wegen der außerordentlichen Schwierigkeit, eine perfekte Fotografie zu erhalten, war die Ausbeute an Fotografien aus Nebelkammer und Emulsion (und sogar der frühen Blaskammer) mager. Es war schlichtweg unmöglich, jene zehn- oder hunderttausend Fälle zu sammeln, die über Nacht von einem Geiger-Müller-Zähler aufgehäuft werden. Aber als es (in den 50er und 60er Jahren) möglich wurde, statistische Beweise durch enorme Sammlungen von Blaskammerfotografien zu führen, beruhte diese statistische Argumentation (so konnten ihre Verteidiger behaupten) auf einem Fundament, das es ermöglichte, einzelne Bilder eins nach dem anderen zu untersuchen.

Im Gegensatz dazu verlässt sich die logische Tradition wesentlich und allein auf statistische Beweismittel. Die typische logische Beweisführung kann man anhand der in den 30er Jahren durchgeführten Experimente zur kosmischen Strahlung veranschaulichen, die sich mit dem Durchgang geladener Teilchen durch Materie befassten: ein Geiger-Müller-Zähler wurde über einem Goldbarren angebracht, ein weiterer darunter. Die Experimentatoren bestimmten den Teilchendurchgang

kommt dadurch zustande, dass Fotografien gleichzeitig stabil und beweglich sind (in seinen Begriffen sind sie „unveränderliche, bewegliche Gegenstände“: Latour, Bruno: „Visualization and Cognition. Thinking with Eyes and Hands“, in: *Knowledge and Society: Studies in the Sociology of Culture Past and Present* 6 (1986) S. 1-40) [...] Gleichwohl [...] waren viele Mitarbeiter von Gargamelle *nicht* durch ein einzelnes Bild eines Elektrons zu überzeugen; eine ähnliche Auseinandersetzung gab es in der amerikanischen Forschergruppe, die mit Gargamelle konkurrierte. [...]

* Anm. d. Hrsg.: Vgl. Daston, Loraine/Galison, Peter: „Das Bild der Objektivität“, in: Peter Geimer (Hrsg.): *Ordnungen des Sichtbaren. Fotografie in Wissenschaft, Kunst und Technologie*, Frankfurt a.M. 2002, S. 29-99.

durch das Gold, indem sie die Anzahl gleichzeitiger Ausschläge beider Zähler bestimmten. Da es – durch ‚zufällige‘ Einschläge verschiedener Teilchen (z.B. Bestandteile eines Schauers von Elektronen aus kosmischer Strahlung) – immer einige gleichzeitige Zufallsausschläge geben wird, beruhte dieses Experiment *eigentlich* und *unvermeidlich* auf der Überzahl der gleichzeitigen Ausschläge, die über der berechneten Zufallsrate lag. Ein einzelner gleichzeitiger Ausschlag der beiden Zähler bedeutete gar nichts! Freilich besteht die Grundlage dieser elektronischen Auswahlmechanismen in logischen Verhältnissen (und/ oder/ wenn/ nicht/ dann), weshalb ich diese Tradition auch so genannt habe.

Durch diese logischen Relationen (verkörpert in elektronischen Selektionsverfahren) wurden in der Teilchenwelt weitere Felder erschlossen; diese waren alles in allem ebenso folgenschwer wie der berühmte *Golden Event*. In den späten 30er Jahren wurde (von Curry Street und E. C. Stevenson) ein grundsätzlicher Zugang zum Myon durch den Einsatz von Koinzidenz- und Antikoinzidenzzählern gelegt – diese zeigten, dass es statistisch gesehen ein Teilchen geben muss, das die gleiche kinetische Energie und die gleiche Ladung wie ein Elektron hat, aber wesentlich tiefer in Blei eindringt als ein ‚gewöhnliches‘ Elektron. Auf ähnliche Weise basierten Frederick Reines und C. L. Cowan ihren experimentellen Beweis des freien Neutrino gänzlich auf statistischen Messungen; die Daten erhielten sie durch eine ausgeklügeltes Aufgebot von Zählern, die um einen großen Tank mit Szintillationsflüssigkeit angeordnet waren, um gleichzeitige und ungleichzeitige Ausschläge festzuhalten. Während Reines und Cowan ihre Teilchen aus einem Reaktor bezogen, produzierten andere Experimentatoren des logischen Zweigs die ihren in einem Teilchenbeschleuniger. Owen Chamberlain, Emilio Segrè und ihre Kollegen am Bevatron – später bekannt unter dem Namen Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) – konkurrierten mit den Arbeiten des Abbildzweiges, arbeiteten aber auch mit ihm zusammen; um das Antiproton zu stellen, entwickelten sie Čerenkov-Zähler und Funkenzähler weiter, indem sie Präzisionschronographen und Koinzidenzschaltungen benutzten (1955). Obwohl eindeutige Abbilder des Antiprotons kurz darauf folgten, war es zunächst die zählergenerierte statistische Signifikanz, die den Anspruch auf die Entdeckung untermauerte. Noch in den späten 50er Jahren spielten *low budget*-Experimente der Logiktradition eine Rolle: Chien-Shing Wu und ihre Mitarbeiter führten eine Experimentserie durch, die 1957 den experimentellen Beleg der Paritätsverletzung lieferte. Auch sie arbeiteten ausschließlich mit bildlosen Apparaturen; es handelte sich um Elektronen-

zähler, die die Winkelverteilung beim Beta-Zerfall von gerichteten Atomkernen maßen. Bei einer Paritätsverletzung würde die Rate der Teilchen, die in einer bestimmten Richtung θ (relativ zur Polarisierung der Atomkerne) emittiert werden, sich von der Rate, die in der Richtung $180^\circ - \theta$ emittiert wurden, unterscheiden. Wu spürte diese Asymmetrie auf; damit war die Parität erledigt.* Die Liste lässt sich fortsetzen; denn selbst die kürzeste Aufstellung der Triumphe der Logiktradition würde sowohl die Messung der Ladungs-Paritäts-Verletzung [*CP-Violation*] durch James Cronin und Val Fitch beinhalten, als auch die Entdeckung einer zweiten Neutrino-Art [Myon-Neutrino] durch Mel Schwartz, Leon Lederman und Jack Steinberger 1962; auch wäre in ihr die Harvard-Wisconsin-Pennsylvania-Fermilab-Funkenkammer verzeichnet, mit der schwache neutrale Ströme nachgewiesen wurde.⁵

Sowohl die Geräte des Abbild- als auch die des Logikzweigs kamen zu ihren Erfolgen und ihren Nobelpreisen. Gleichzeitig war keine der beiden Tradition in der Lage, einen privilegierten Zugang zur Wahrheit über einen längeren Zeitraum zu beanspruchen, und keine behielt (länger) einen einzigartigen Einfluss auf die physikalische Gemeinschaft. Beide schätzten ihre eigene Beweisführung als überzeugend ein und bewerteten den jeweiligen Konkurrenten als in mancher Hinsicht tadelnswert: Abbild-Physiker erklärten, dass Logik-Physiker genarrt werden könnten, da sie wesentliche Details physikalischer Prozesse außer Acht ließen: Allein durch die Klarheit eines Bildes könnten die Kausalzusammenhänge des ganzen Prozesses aufgespürt werden. Obgleich die Logik-Physiker die Kraft dieser kleinteiligen Argumentation einräumten, äußerten sie Zweifel an einer Beweisführung, die auf einer Hand voll Ereignissen basierte. In den 60er Jahren konnte jeder Experimentator des Logikzweigs auf Myriaden von unwiederholten (unwiederholbaren?) Aufnahmen verweisen, die Experimentatoren und Theoretiker in die

* Anm. d. Hrsg.: Eine anschauliche Erklärung der Paritätsverletzungen findet sich in Braunbek, Werner/Röttel, Karl: *Forscher an den Wurzeln des Seins. Die abenteuerliche Welt der Elementarteilchen*, Düsseldorf/Wien 1981, S. 227f.

5 [31] [...] Zum Myon vgl. Galison: *Experiments* (An. 4), Kap. 3. Zu Reines' und Cowans Entdeckung des Neutrino vgl. Reines, Frederick/Cowan, C. L.: „Detection of the Free Neutrino“, in: *Physical Review* 92 (1953) S. 830f. sowie Seidel, Robert: *Hunting the Neutrino*, Typoskript 1996. [...] Zur Paritätsverletzung stammt der erste Artikel von Wu, C. et al., „Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay“, in: *Physical Review* 105 (1957) S. 1413-1415. [...] Der erste Artikel zur CP-Verletzung ist Christenson, J. et al., „Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson“, in: *Physical Review Letters* 13 (1964) S. 138-140. [...]

Sackgasse geführt hatten. So äußerte einmal ein Experimentator der Logiktradition (hinsichtlich eines einzelnen Bildes, das er aufgenommen hatte): „Alles kann irgendwann einmal passieren.“⁶

Den Experimentatoren des Abbildzweigs war die Passivität ihrer Aufzeichnungssysteme eine Tugend: theoretische Vorannahmen hatten keine Chance, wenn die Emulsion pflichtgetreu alles aufzeichnete, was durch sie hindurchging; das vorurteilslose Auge des Kameraarrays schoss mit jeder Expansion der Blaskammer Fotos. Diesen Forschern war es immer suspekt, dass die Logiktradition hochselektive ‚Schnitte‘ an den Daten ansetzte, noch bevor die Aufzeichnung dieser Daten überhaupt begann. Konnte man so wirklich sicher sein, dass durch diese Selektion die Daten so strukturiert werden, dass gerade das Wesentliche nicht entgeht? Im Gegensatz dazu äußerten sich die Experimentatoren des Logikzweigs entsetzt über die Passivität ihrer Konkurrenten. In ihren Augen haben die Physiker des Abbildzweigs ihren Status als Experimentatoren aufgegeben, als sie sich aus der Echtzeitmanipulation der Apparaturen zurückgezogen haben. Wie sonst könne man denn wissen, was passiert? Wie könne man Fehlergebnisse ausschließen, ohne die Möglichkeit, Resultate zu bekommen, den Versuchsaufbau zu verändern und dann das Experiment noch einmal durchzuführen? Auf allen Ebenen gerieten die beiden Traditionen aneinander: *Golden Event* vs. statistische Beweisführung, Objektivität passiver Aufzeichnung vs. Überzeugungskraft experimenteller Kontrolle, Anschaulichkeit vs. Zahlen und Fotografie vs. Elektronik.

Eine Möglichkeit, den Konflikt von Abbild- und Logiktradition zu beschreiben ist durch die von Hartry Field eingeführte epistemologische Unterscheidung von ‚Welt→Kopf-Verlässlichkeit‘ und ‚Kopf→Welt-Verlässlichkeit‘.⁷ Perfekte Welt→Kopf-Verlässlichkeit liegt in Hinsicht auf einen bestimmten inneren Zustand nur dann vor, wenn es eine bestimmte äußere Situation gibt. Wenn ich also einen Felsen in der Welt vor mir habe, weiß ich davon. Umgekehrt liegt perfekte Kopf→Welt-Verlässlichkeit für den Fall vor, dass, wenn ich denke, dass es einen Stein gibt, es einen solchen gibt. Das Ziel einer ordnungsgemäß arbeitenden Blaskammer kann mithin als die Etablierung von Welt→Kopf-Verlässlichkeit betrachtet werden: indem dem Film jede Spur einge-

6 [32] Vgl. Galison: *Experiments* (Anm. 4), S. 123.

7 [33] Zu Kopf→Welt- und Welt→Kopf-Verlässlichkeit vgl. Field, Hartry: „Narrow Aspects of Intentionality and the Information-Theoretic Approach to Content“, in: E. Villanueva (Hrsg.): *Information, Semantics and Epistemology*, Oxford 1990, S. 102-116, hier S. 106. [...]

schrieben wird, die die empfindliche Masse durchquert, versichern uns die Abbildungsgeräte des Gewährwerdens jedes Ereignisses – zumindest idealerweise: Dem Alptraum der Überselektion ist man somit entronnen. Allerdings ist diese umfassende Aufzeichnung vom Standpunkt der Logiktradition aus problematisch. Man denke nur an ein seltenes Ereignis – oftmals der Augapfel des Experimentators. Da sich Experimentatoren versichern wollen, dass sie nicht zufälligen Abweichungen in der Apparatur, dem Aufnahmewinkel des Fotos oder einer Verformung der registrierenden Substanzen (Flüssigkeiten, Emulsionen oder Gase) aufgesessen sind, trachten sie danach, die interessanten Ereignisse von der Hintergrundstrahlung zu trennen. Sie wollen diese Vorkommnisse beeinflussen – indem sie etwa Teilchen durch eine Stahlplatte schicken oder sie durch elektromagnetische Felder ablenken. Auswahl und Beeinflussung dienen dazu, uns davon zu überzeugen, dass das, was wir für den Fall halten, auch tatsächlich der Fall ist. Die Logiktradition ist gewillt, Universalität zugunsten von Kopf→Welt-Verlässlichkeit zu opfern.

Meiner Ansicht nach hat jede Tradition der Instrumentenfertigung Wesentliches zum empirischen Wissenserwerb beigetragen und dieses in die langfristigen Bemühungen der Physik eingebettet. Doch gleichermaßen verfügt keine dieser Traditionen über die epistemologische Vorherrschaft. So führt das Verständnis der jeweiligen Stärken und Schwächen zur Erhellung des stetigen Antriebs, den je anderen Zweig zu übertreffen und zu überlisten. Indem ich mich der produktiven Spannung dieser beiden Zweige widme, geht es mir nicht so sehr um eine überzeitliche Philosophie *von* Maschinen, als vielmehr um eine historisch spezifische Philosophie *in* Maschinen.

Die Wirkmächtigkeit der beiden Traditionen dieses Wissen erzeugenden Maschinen wird auf vielerlei Art sichtbar. Über die personelle, technische und argumentative Kontinuität hinaus, kann man drei Arten von Belegen anführen. *Erstens* gibt es die Kontinuität gemeinsamer Klassifikationen innerhalb der zwei Traditionen: Kurz nachdem die (zum Abbildzweig gehörende) Blaskammer eingeführt wurde, ordneten Physiker die sie betreffenden Artikel in die Rubrik ‚Nebenkammer‘ ein. Ganz ähnlich standen bei Konferenzen über die (zum Logikzweig gehörenden) Zähler regelmäßige Diskussionen über andere Geräte der Logiktradition auf dem Programm, wie etwa Funkenkammern; dergleichen gab es bei Konferenzen über Funkenkammern Diskussionen über die nächste Erfindung der logischen Tradition, die Drahtfunkenkammer. Bemerkenswerterweise gab es in den frühen Jahren der Funkenkammer (1957-62) keine gesonderten Einträge unter dem Lemma

‚Funkenkammer‘ in dem definitive Referenzorgan *Physics Abstract*. Um an die entsprechenden Artikel zu kommen, muss man unter dem Lemma ‚Zähler‘ oder genauer unter ‚Zähler, Funken‘ nachschlagen.⁸

Zweitens haben quantitative Untersuchungen der Literatur zur Hochenergiephysik eine überwältigende Wahrscheinlichkeit dafür festgestellt, dass jemand, der in einer bestimmten Tradition veröffentlicht hat, auch in den Folgepublikationen dieser Tradition treu bleiben wird. Barboni beispielsweise hat einige tausende Aufsätze über die Physik der schwachen Wechselwirkung klassifiziert und dabei ‚optische‘ Instrumente (Emulsionen, Nebelkammern und Blasenkammern) von ‚elektronischen‘ (Funkenkammern und Zähler) unterschieden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Physiker den gleichen Detektorentyp in zwei aufeinanderfolgenden Publikationen verwendet bzw. diesen wechselt ist in Tab. 1 wiedergegeben, wobei ich Barbonis Kategorien in ‚Abbild‘ und ‚Logik‘ umbenannte habe. Obgleich die Erforschung schwacher Wechselwirkungen nur ein Unterpunkt der Teilchenphysik ist, ist es eindeutig, dass die diagonalen Relationen (d. h. der Gebrauch des gleichen Geräts) wesentlich höher sind als die nicht-diagonalen (d. h. der Gebrauch verschiedener Geräte): 0,94 zu 0,06. *Physiker bleiben in ihrer jeweiligen Tradition*.

Tab. 1: Bezüge von Folgepublikationen innerhalb bzw. zwischen den Traditionen von Abbild und Logik:

Publikation 1	Publikation 2		
	Abbild	Logik	Summe
Abbild	2.011 (0,94)	130 (0,06)	2.141
Logik	85 (0,06)	1.254 (0,94)	1.339
Summe	2.096 (0,60)	1.384 (0,40)	3.480

Quelle: Modifiziert nach: Barboni, Edward: *Functional Differentiation and Technological Specialization in a Specialty in High Energy Physics: The Case of Weak Interactions of Elementary Particles*, Ph.D. Dissertation, Cornell University 1977, S. 190. Anm.: Barboni nennt seine Kategorien ‚optisch‘ und ‚elektronisch‘. Ich vermeide diese Benennung wegen der hybriden bilderzeugenden elektronischen Detektoren, die in den 70er Jahren aufkamen und die gleichermaßen zur Abbild- wie zur Logiktradition gehören, aber mit den Begriffen ‚optisch‘ und ‚elektronisch‘ nicht richtig gefasst sind.

8 [34] Vgl. Institution of Electrical Engineers, *Physics Abstracts*, für die Jahre vor 1962.

Allein auf der Grundlage der Daten, die die wechselseitige Beziehung beschreiben, bleibt logisch gesehen die Möglichkeit, dass Physiker im Normalfall 17 Aufsätze in der einen Tradition verfasst, gewechselt und weitere 17 in der anderen verfasst hätten (und so beständig zwischen Abbild und Logik hin- und herpendelten). Solch eine Vorgehensweise würde zu einem Netto-Beitrag von 50% auf jeder Seite der Abbild/Logik-Markscheide führen, wobei die Übereinstimmung von 94% bei aufeinanderfolgenden Aufsätzen gewahrt bliebe. Obgleich anhand der besonderen Daten logisch möglich, ist dieses Hin- und Herpendeln historisch nicht nachweisbar. Man betrachte nur einige Karrieren der aktivsten führenden Forscher im Bereich der experimentellen Teilchenphysik der letzten 75 Jahre. Nicht nur waren sie Mitverfasser von insgesamt einigen tausend Artikeln; im Laufe der Zeit zeichneten sie die verschiedenen Wege des Einsatzes von Instrumenten vor, denen hunderte von Mitarbeitern und Schülern folgen sollten.

So etwa Enrico Fermi, der vielleicht letzte große Forscher, der Beiträge sowohl in der Theorie als auch im Experiment zu einzelnen Teilchen und zu den fundamentalen Kräften geliefert hat. Mit beachtlicher Zurückhaltung wählten die Herausgeber seiner gesammelten Werke 270 Haupttexte aus; von den hunderten von Experimenten wurde keines mit Nebelkammer, Emulsion oder Blasenkammer durchgeführt, und das, obwohl Fermis Werk sich mit Kernkräften, Resonanzen, dem Raman-Effekt, der Kernspaltung und einer Menge weiterer Themen befasste. Ein anderer Vertreter der Logiktradition, Frederick Reines, veröffentlichte seinen ersten nichtklassifizierten Aufsatz 1945; dieser befasste sich mit einem fotoelektrischen Hygrometer. Seit dieser Zeit, während seiner Arbeit an einer verbesserten Atombombe, der Wasserstoffbombe, dem ersten Nachweis eines freien Neutrino und einer Serie von unterirdischen und unterseeischen Neutrino-Detektoren, die die Teilchenphysik mit der Astrophysik verbanden, blieb Reines der Logiktradition verhaftet. Hätte Reines die Neutrinophysik der 60er Jahre prinzipiell auch mit der Blasenkammer verfolgen können? Ja, und dies geschah auch (z.B. durch die lange Reihe von Propankammern in Frankreich und im CERN). Gleichwohl kann nur eine von Reines' 316 bis 1995 verfassten Publikationen der Abbildtradition zugeschlagen werden: In einem 1950 in den *Reviews of Scientific Instruments* veröffentlichter Aufsatz werden die Spektren von Neutronen geringer Energie [*low energy neutron spectra*], die mittels Emulsion zustande kamen, analysiert. Tatsächlich war dieser Aufsatz eine vom Gegenteil überzeugte Prüfung der Stichhaltigkeit der Kernemulsion als Meßgerät für den

Neutronen- und Protonenrückprall nah dem niedrigsten Energieniveau von Emulsionen.⁹

Experimente des Logikzweigs kennzeichnen die über 200 Aufsätze, die Carlo Rubbia verfaßte oder an denen er mitgewirkt hat. Für seine Promotion in Pisa 1958 befasste er sich mit einer neuen Generation von schnellen Koinzidenzschaltungen, Funkenzählern und Hochspannungsimpulsen. Seine Forschungen führten ihn in viele Bereich der Physik (er befasste sich u.a. mit kosmischer Strahlung, dem Zerfall ‚seltsamer‘ Teilchen*, Quantenchromodynamik und solaren Neutrinos), aber seine Karriere geht einher mit einem unumstößlichen Bekenntnis zu elektronischen Detektoren. Zuerst konstruierte er ein Tisch- Hodoskop, dann immer größere Funken- und Drahtfunkenkammern; die Entwicklung endete schließlich mit den sehr großen hybriden Elektronendetektoren des CERN, wie etwa der UA1, der den Abbildzweig in den Logikzweig hineinholte. Abgesehen von der gelegentlichen Analyse von einigen Blasenkammerergebnissen (und dem einen Mal, als er 1959 ein Gerät zur zählerbasierten Druckmessung für Blasenkammern entwarf), hielt sich

9 [35] Es ist wesentlich, die genaue Rolle von Emulsionen in Experimenten zu verstehen. Bei der berühmten Entdeckung des Antiprotons in Berkeley 1955 etwa, bestand Segrès Forscherteam aus zwei Untergruppen: es gab eine ‚Zähler-Untergruppe‘ (wie sie Owen Chamberlain nannte), die aus Chamberlain, Segrè, Clyde Wiegand und Thomas Ypsilantis bestand, und eine ‚Emulsion-Untergruppe‘ (E. Amaldi, G. Goldhaber, R. Birge und ihre jeweiligen Mitarbeiter). Zunächst veröffentlichte diese kombinierte Forschergruppe Zähler-basierte Beweise für das Antiproton, kurz danach untermauerten sie ihre Schlussfolgerungen in einer Serie von vier Artikeln, die sich auf Ergebnisse der Emulsions-Gruppe berief (vgl. Chamberlain, Owen: „The Discovery of the Antiproton“, in: L. M. Brown/M. Dresden/L. Hoddeson (Hrsg.): *Pions to Quarks: Particle Physics in the 1950s*, Cambridge 1989, S. 273-284 und im selben Buch Goldhaber, Gerson: „Early Work at the Bevatron: A Personal Account“, S. 260-272). Alles in allem enthält Chamberlains Publikationsliste 97 Logik-Experimente im Zeitraum von 1946 bis zur Mitte der 90er Jahre; dabei wechselte er leicht hin von verschiedenen Zählertypen zu Funkenkammern und schließlich zur Spurendriftkammer. Abgesehen von den vier Emulsionsbildern des Antiprotons gehört Chamberlains Arbeit völlig zum logischen Lager. NB: auch Segrè selbst arbeitete fast ausschließlich in diesem Zweig. Nichtsdestoweniger war er in seiner frühen Karriere Mitverfasser eines emulsionsbasierten Beweises für das Antiproton (s. o.), einer Arbeit über ein Antiproton-Ereignis in einer Propanblasenkammer sowie einiger vermischter Artikel, die auf Emulsionsexperimenten basierten. Der Rest seiner Karriere gehört zur Zähler-Tradition.

* Anm. d. Hrsg.: Mit ‚Seltsamkeit‘ (*Strangeness*) ist eine bestimmte Eigenschaft eines bestimmten Quark-Typs (*Strange-Quark*) gemeint. Teilchen, die solche Quarks enthalten, werden als ‚seltsame‘ Teilchen bezeichnet.

Rubbia die beherrschenden (fotografischen) Geräte der 50er und 60er Jahre vom Leibe. Er führte keine Experimente mit Emulsionen oder Blasenkammern durch und wirkte nur ein einziges Mal bei einem Versuch zur Messung von kosmischer Strahlung mit, bei denen Nebelkammern und Szintillatoren zusammen eingesetzt wurden; daraus gingen 1958/59 vier Aufsätze hervor.¹⁰ Auf ähnliche Weise kann man die (prinzipielle) logische Ausrichtung von Robert Hofstadter, Samuel Ting, Burton Richter, Mel Schwartz, Leon Lederman und Jack Steinberger verfolgen. [...¹¹]

Im Abbildzweig war die Bindung an die bestimmte Klasse von Instrumenten genauso stabil. Nachdem Wilson die Nebelkammer erfunden hatte, führte er Versuche zu elektrischen Entladungsphänomenen und der Beweglichkeit von Ionen durch, aber seine Arbeit rief niemals die elektronische Infrastruktur der Logiktradition zu Hilfe und wurde dominiert von seiner Nebelkammerarbeit. Der nächste in der Reihe war sein Schüler Cecil Power, der die Kernemulsion entwickelte, nachdem er mit Wilsons Nebelkammer für seine Promotion im Jahre 1928 gearbeitet hatte; er verbrachte ein paar Jahre (1929-35) mit Elektro-Experimenten, bei denen er die Beweglichkeit von Ionen in Gasen untersuchte. Von 1938 bis zu seinem Tod 1969, arbeitete Powell jedoch ausschließlich in der visuellen Tradition; er veröffentlichte über 75 Aufsätze und arbeitete zumeist mit Kernemulsionen. Wie Wilson benutzte er niemals Koinzidenzdetektoren, *scaler*, *timer* oder logische Diskriminatoren [logic discriminator] welcher Art auch immer. Donald Glaser – der auch mit Nebelkammertechniken vertraut war – zeigte ebenfalls solch eine völlige Anhänglichkeit an die visuelle Tradition. Obwohl er einmal – wenig erfolgreich – mit dem Gedanken spielte, ein elektrisches spurenzeugendes Gerät zu konstruieren, ist seine gesamte Karriere in der Physik der Abbildtradition verpflichtet, sei es durch einfache Nebelkammer, Doppelnebelkammern, Diffusionsnebelkammern oder durch die Blasenkammer, die er in den frühen 50er Jahren erfand. Sogar Glasers erste Arbeit auf dem Feld der Biologie war durch die visuellen Techniken bestimmt, die er von der spurenanalysierenden Tradition übernahm.

Die Kontinuität innerhalb von Traditionen wurde zudem in weiteren institutionalisierten Erscheinungen deutlich: Immer wieder kam es vor, dass Nebelkammer- oder Emulsionsteams zu Blasenkammerteams wurden oder dass Physiker, die mit Nebeln und Emulsionen arbeiteten und nicht über die für den Bau einer Blasenkammer notwendige Infra-

10 [36] Vgl. Galison: *Experiments* (Anm. 4), S. 202-206.

11 [FN 37 wurde komplett gestrichen].

struktur verfügten, Blaskammerfilme erwarben, um diese zu untersuchen. [...] ¹²

Aus all diesen Gründen – pädagogische Kontinuität, technische Kontinuität, epistemologische Kontinuität – erscheint es mir sinnvoll, diesen – anderen – Schnitt durch die Geschichte anzusetzen. Vernachlässigen wir zunächst die Strukturierung unserer Geschichte der Physik durch die Entdeckung einzelner Teilchen oder Effekte. Lassen wir auch die Geschichte der schwachen und starken Wechselwirkungen und gar die Theoriegeschichte außer Acht. Auf der Ebene der apparativen Kultur gibt es eine Großstrukturierung der Geschichte des Experimentierens: die lange Geschichte von Abbild und Logik.

Tatsächlich ist es in den verhältnismäßig wenigen Fällen, in denen ein einzelner Forscher oder eine Gruppe zu der konkurrierenden Tradition überwechselt (wofür es sicherlich bedeutende Beispiele gibt) so, dass die beweisführenden Strategien der einen oftmals auf die andere übertragen werden. Blaskammer-Physiker etwa, die sich auf elektronische Detektoren verlegt haben, bewahrten die Suche nach dem *Golden Event*. [...] So ist es z.B. kein Zufall, dass David Cline (der mit den Feinheiten der Suche nach einzelnen Ereignissen vertraut war), der in den frühen 70er Jahren an einem Drahtfunkenkammerexperiment beteiligt war, zunächst ein paar *Golden Events* sehen und vorweisen wollte, bevor er die schwachen neutralen Ströme für existent erklärte. Als Martin Perl sich der Suche nach einzelnen, besonders überzeugenden Beweisen für das Tau-Lepton im Mark I-Experiment widmete, bezog er sich gleichfalls auf frühere Erfahrungen mit Blaskammern und die *Golden Events* der Abbildtradition.

Beide Seiten der Abbild/Logik-Markscheide haben sich wiederholt darum bemüht, die jeweiligen Vorteile des anderen Zweigs nachzuahmen; dieser Wettbewerb hat zu einer Weiterentwicklung beider Technologien geführt. 1952 wollte Glaser eine Blaskammer konstruieren, die selektiv eingesetzt werden konnte, so dass nur interessante Events kosmischer Strahlung ‚sich selbst fotografieren‘ würden. Noch 20 Jahre später war es nur ein Traum von Blaskammerphysikern, eine elektronisch getriggerte Kammer zu entwerfen. In der Mitte der 60er Jahre entwarfen sowjetische Physiker eine Reihe hochauflösender *Streamer Chambers* – dies war eine veränderte Funkenkammer, die eine Lichtspur erzeugen konnte, ohne tatsächlich zu funken. Nach Meinung einiger Physiker war dies die ‚elektronische Blaskammer‘, nach der sie gesucht hatten, denn sie verband die Fähigkeit, durch ein Ereignis aus-

12 [FN 38 wurde komplett gestrichen].

gelöst zu werden mit der, viele Spuren, die in fast jede Richtung gingen, aufzuzeichnen. Zur Enttäuschung ihrer Fürsprecher hatte die *Streamer Chambers* nur geringe Bedeutung in der Teilchenphysik und konnte mit Blasen- und Funkenkammern nicht mithalten.

Doch es gab noch den dritten Konstruktionsversuch einer elektronischen Blasenkommer in den 70er Jahren; hierbei ging es um die Entwicklung computergenerierter Bilder auf der Basis von Daten, die mit Hilfe einer Drahtfunkenkommer gewonnen wurden. Damals gab es einige Veränderungen an den [verschiedenen] Laboratorien. In [einigen] kamen nun kollidierende Strahlen zum Einsatz: Anstelle eines Strahls, der Teilchen in einem schmalen Kegel aus einem Target schlug, arbeitete man nun mit zwei gegenläufigen Strahlen, die aufeinander prallten und Teilchen in alle Richtungen verstreuten. Um diese vielen, räumlich zerstreuten Teilchen aufzufangen, brauchte man größere und komplexere Detektoren. [...] [U]nd selbst in Kollidern, die mit einem festen Target arbeiteten, wurden die Funkenkammern immer größer und verloren aufgrund dieser Größe bald ihren Rang als Zufluchtsorte vor den fabrikartigen Arbeitsstrukturen in großen Blasenkommerenteams. Mit der Gründung von Gruppen wie *SLAC-LBL Solenoidal Magnetic Detector* (später Mark I) und erst recht mit der *Spurendriftkommer* (TPC), haben die elektronischen Instrumente die komplizierte hierarchische innere Struktur ihrer Abbild-Konkurrenten aufgegriffen und ausgeweitet. Tatsächlich haben diese Elektronik-Teams die Blasenkommerenteams geschluckt und gaben – gleich einer zufriedenen Python – den Umriss von dem erkennen, was sie verschluckt hatten.

Man kann den Aufbau vieler dieser Versuche elektronischer Abbildungsverfahren nur dann verstehen, wenn man sie als Zusammenarbeit früherer Blasenkommergruppen (die nach klaren, sichtbaren Beweisen – wie *Golden Events* – suchen) und Drahtfunkenkommergruppen (die nach elektronisch bearbeitbaren Belegen suchen, die selektiv extrahiert werden können).¹³ Diese Synthese, die gleichzeitig soziologischer, technischer und epistemologischer Natur ist, ist typisch für die mittleren bis späten 70er Jahre, als Blasenkommergruppen im ganzen Land nach und nach aufgelöst wurden und ihre Mitglieder Zuflucht bei einer ganz neuen Art elektronischen Experimentierens fanden. Die Entdeckung der $W^{+/-}$ und des Z^0 -Teilchens 1983 war das Emblem der Zusammenführung beider Traditionen. Damit wurde es Routine, aus einem milliardenfachvielfältigen Hintergrund eine Hand voll *Golden Events* abzuleiten. [...]

13 Vgl. Treitel, Jonathan: „Confirmation with Technology: The Discovery of the Tau Lepton“, in: *Centaurus* 30 (1987) S. 140-180.

Es sollte noch erwähnt werden, dass eine Synthese zwischen diesen entgegengesetzten Traditionen auch in anderen Feldern jenseits der Teilchenphysik stattgefunden hat. So haben etwa in dem *Space Telescope*-Programm die Astronomen, die mit Fotografien arbeiteten, ihren Mitstreitern, die elektronische Detektoren einsetzten, unterstellt, dass ihre Geräte keine ausreichende Auflösung und Empfindlichkeit hätten. Demgegenüber waren jene sehr besorgt, dass fotografische Emulsionen wegen eindringender Strahlung eintrüben oder – noch schlimmer – ein möglicherweise verfälschendes menschliches Eingreifen nötig machen würden. Robert Smith und Joseph Tatarewicz gingen dieser Sache nach und zeigten, dass die beiden Seiten schließlich mit einer Lösung aufwarteten, indem sie CCDs einsetzten, die elektronisch generierte Bilder von hoher Auflösung herstellten.¹⁴ Die Parallele zur Teilchenphysik ist nicht unberechtigt. In diesem Fall – wie auch bei Methoden der Erdabbildung, CAT-Scanverfahren des menschlichen Körpers sowie Magnet-Resonanz-Imaging – wird die neue Methode durch ein großes Arsenal gemeinsamer Technologien unterstützt. Es würde den Rahmen dieses Buches* sprengen, das astronomische, geophysikalische und medizinische Instrumentarium ebenso im Detail zu untersuchen wie das physikalische. Nichtsdestotrotz würde ich sagen, dass zwischen analogem technischem Wissen und digitalem technischen Wissen eine große Spannung besteht und dass diese Teilung auch für andere Wissensfelder gilt. Dass sich die beiden Traditionen in den letzten Jahrzehnten verflochten, stellt einen vormals unbekannten vereinheitlichenden Trend in einem Zeitalter wissenschaftlicher Spezialisierung dar. Homologe und homomorphe Darstellung sind letztlich miteinander verschmolzen.

Übersetzung: Holger Steinmann

14 [46] Vgl. Smith, Robert W./Tatarewicz, Joseph N.: „Replacing a Technology: The Large Space Telescope and CCDs“, in: *Proceedings of the IEEE*, Vol. 73, No. 7 (1985) S. 1221-1235. Vgl. auch Lynch, Michael/Edgerton, Samuel: „Aesthetics and Digital Image Processing: Representational Craft in Contemporary Astronomy“, in: G. Fyfe/J. Law (Hrsg.): *Picturing Power: Visual Depiction and Social Relations*, London 1988, S. 184-220. Es gibt viele interessante Arbeiten zur Geschichte und Soziologie von Abbildungen in wissenschaftlichen Texten; eine exzellente Einführung hierzu findet sich bei Lynch, Michael/Woolgar, Steve (Hrsg.): *Representation in Scientific Practice*, Cambridge, MA 1990, wo die Autoren die komplizierten Referenzketten untersuchen, welche Bilder aufrufen, um funktionieren zu können; dazu gehören bestimmte Prozeduren, andere Bilder oder Bilderserien, in denen das eine Bild in das nächste verwandelt wird. [...]

* Anm. d. Hrsg.: Galison bezieht sich hier auf *Image and Logic*.