

Peter Koval; Robert Dennhardt

Vom Experimentiertisch zu Electronic Design Automation

2013

<https://doi.org/10.25969/mediarep/3905>

Veröffentlichungsversion / published version

Sammelbandbeitrag / collection article

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Koval, Peter; Dennhardt, Robert: Vom Experimentiertisch zu Electronic Design Automation. In: Hannelore Bublitz, Irina Kaldrack, Theo Röhle u.a. (Hg.): *Unsichtbare Hände. Automatismen in Medien-, Technik- und Diskursgeschichte*. Paderborn: Fink 2013 (Schriftenreihe des Graduiertenkollegs "Automatismen" 3), S. 141–167. DOI: <https://doi.org/10.25969/mediarep/3905>.

Erstmalig hier erschienen / Initial publication here:

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:466:2-10749>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer Creative Commons - Namensnennung 4.0/ Lizenz zur Verfügung gestellt. Nähere Auskünfte zu dieser Lizenz finden Sie hier:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Terms of use:

This document is made available under a creative commons - Attribution 4.0/ License. For more information see:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

PETER KOVAL UND ROBERT DENNHARDT

VOM EXPERIMENTIERTISCH ZU ELECTRONIC DESIGN AUTOMATION

1. Einleitung

„Nicht mit Unrecht dürfen wir unser Zeitalter in Bezug auf wissenschaftliche und praktische Arbeit die *Epoche der Elektrizität* nennen, denn auf allen Gebieten des Wissens und Könnens hat sich diese Form der Energie als das vornehmste Agens bewährt, um Fortschritte hervorzuzaubern“.¹ Diese über ein Jahrhundert alte Rede von der Fortschrittszauberei mag heute etwas altmodisch klingen. Das unsichtbare, vornehme Agens der *Elektrizität*² bringt aber nach wie vor Fortschritt im Wissen und Können hervor. Ohne Strom würde heute kein Rechner laufen, und was wir ohne unsere Rechner könnten, das wüssten wir nicht einmal mit ihnen zu berechnen. Als der zitierte Satz im ersten Band der *Elektrotechnischen Rundschau* von 1883 erschien, in jenem Jahr, in dem Edison die *Thermionic Tube* erfand und mit ihr die *Epoche der Elektrizität* begründete, dürfte es allerdings mit der Zauberei bereits vorbei gewesen sein. War es doch das ausgesprochene Ziel der deutschen Monatsschrift, das Agens der unsichtbaren Energie „[i]n faßlicher Darstellung und mit Hilfe guter Abbildungen“ sichtbar zu machen und die Gegenstände der *Elektrizität* „in strenger wissenschaftlicher Darstellung“ zu behandeln, „sofern dies zum eingehenden Verständniß oder für die Anwendung des Gebotenen zweckmäßig [war]“.³ Das Wissen der *Elektrizität* war fortan nicht mehr an die bloße Aufstellung, sondern an die Darstellung ihrer Dinge geknüpft. Dafür mussten die Räume des Konkreten, der Gegenstände auf Holzplatten von Experimentiertischen verlassen und die Flächen des Symbolischen, der abstrakten, standardisierten technischen Diagrammatik auf dem Papier besetzt werden. Nur so konnten sich die Dinge der *Elektrizität* zu einer weit größeren Komplexität entfalten, als es ihnen in der dinglichen Aufstellung möglich war. Diese „Wende vom Anschaulichen zum Symbolischen“⁴ der Elektronik vollzog sich weder rauschfrei noch restlos. Der ins Symbolische der Elektronik eingeschli-

¹ O. A., „Was ist Elektrizität?“, in: *Elektrotechnische Rundschau*, 1 (1883), S. 3. [Herv. i. O.]

² Mit *Elektrizität* ist hier das historische Wissen der Elektrizität und ihre Dinge im ausgehenden 19. Jahrhundert gemeint.

³ Mit diesen Worten wurde die *Elektrotechnische Rundschau* im *Centralblatt der Bauverwaltung* vorgestellt. Otto Sarrazin (verantw. Redakteur), *Centralblatt der Bauverwaltung*, Nr. 11A, 16. März 1887, S. 112.

⁴ Näher zu dieser Wende im Denken vgl. Erich Hörl, *Die heiligen Kanäle. Über die archaische Illusion der Kommunikation*, Zürich, Berlin, 2005.

chene und eingeschriebene Rest der Anschauung (Abschnitt 2)⁵ markiert einerseits diese Wende, könnte aber andererseits auch ein Hinweis dafür sein, dass eine sich an der „Papierlektüre“⁶ orientierende medienwissenschaftliche Analyse oder auch historische Epistemologie⁷, der durch „operativen Symbolgebrauch“⁸ erkenntnistheoretisch größtenteils zum „Papier“ gewordenen elektronischen Maschinen, nicht ausreicht.

Dieser grundlegende Wandel betraf aber nicht nur die Episteme, sondern auch das Agens des Fortschritts. Die Zauberei der *Elektricität* bekam mit der symbolischen Notation einen sichtbaren, einen (be-)greifbaren Grund. Auf diesem hatten sich nunmehr die entwerfenden Hände der Ingenieure buchstäblich vorwärts zu tasten, um die Elektronik auf dem Weg zur größeren Komplexität fortschreiten zu lassen. Dennoch blieb auch die integrierte Elektronik bis in die späten 1960er Jahre von der sinnlich-materiellen Beschaffenheit des Entwurfs und der Herstellung geprägt und damit eng an die Ingenieurshände gebunden. Zuerst zugunsten einer strikten Entwurfs- und Produktionsökonomie und erst danach – aus technischer Notwendigkeit – wurde hier die Ingenieurshand schrittweise automatisiert (Abschnitt 3). Mit dem Aufkommen der elektronischen Entwurfsautomatisierung (*Electronic Design Automation*) wurde das Agens der *Elektricität* ihr selbst (rück-)übertragen. Diese (Rück-)Übertragung, die das Papier zur bloßen Passage, zu einem Katalysator der Elektronikgeschichte und den Menschen als Zeugen des „operativen Symbolgebrauchs“ überflüssig macht, scheint sich ganz vorn in die Serie der Ereignisse einzureihen, die der Technik einen Spielraum eröffnen, „in dem die Innovationen immer weiter laufen können, ohne an dem, was von der Natur her anweist, mehr Halt zu finden.“⁹

⁵ Der zweite Abschnitt ist in einer ähnlichen Form erschienen in: Robert Dennhardt, *Die Flip-flop-Legende und das Digitale. Eine Vorgeschichte des Digitalcomputers vom Unterbrecherkontakt zur Röhrentechnik 1837-1945*, Berlin, 2009.

⁶ Zur Methodik einer solchen „Lektüre“ vgl. z. B. Bernhard J. Dotzler, *Diskurs und Medium. Zur Archäologie der Computerkultur*, München, 2006, S. 7-26.

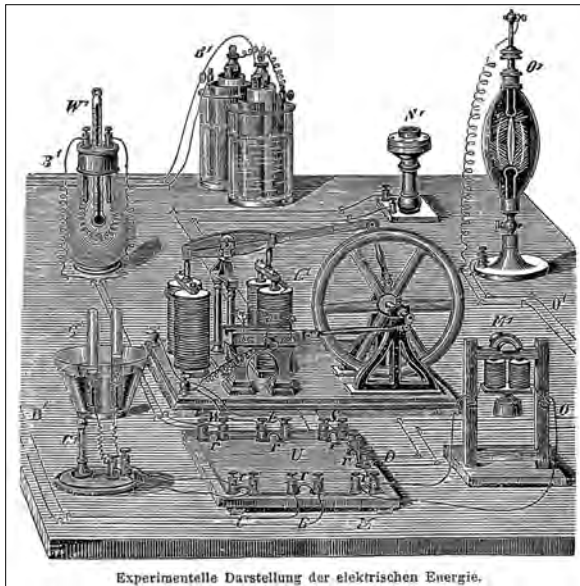
⁷ Dazu eingehend Hans-Jörg Rheinberger, *Epistemologie des Konkreten. Studien zur Geschichte der modernen Biologie*, Frankfurt/M, 2006, S. 21-72.

⁸ Vgl. Sybille Krämer, *Berechenbare Vernunft. Kalkül und Rationalismus im 17. Jahrhundert*, Berlin, New York, 1991.

⁹ Friedrich Kittler, „Blitz und Serie – Ereignis und Donner“, in: Nikolaus Müller-Schöll (Hg.), *Ereignis. Eine fundamentale Kategorie der Zeiterfahrung. Anspruch und Aporien*, Bielefeld, 2003, S. 145-157: 148.

2. Vom Experimentiertisch zur symbolischen Notation

Die einzige Abbildung (Abb. 1) des Aufsatzes, dem die zu Anfang zitierten Worte entnommen sind, zeigt gleich drei wesentliche Darstellungselemente auf einem einzigen Experimentiertisch – die Spirale im Raum, die einfache Leitungsverbindung und den rechtwinklig verlegten Leitungsdraht in der Ebene:



1 – Experimentiertisch, 1883

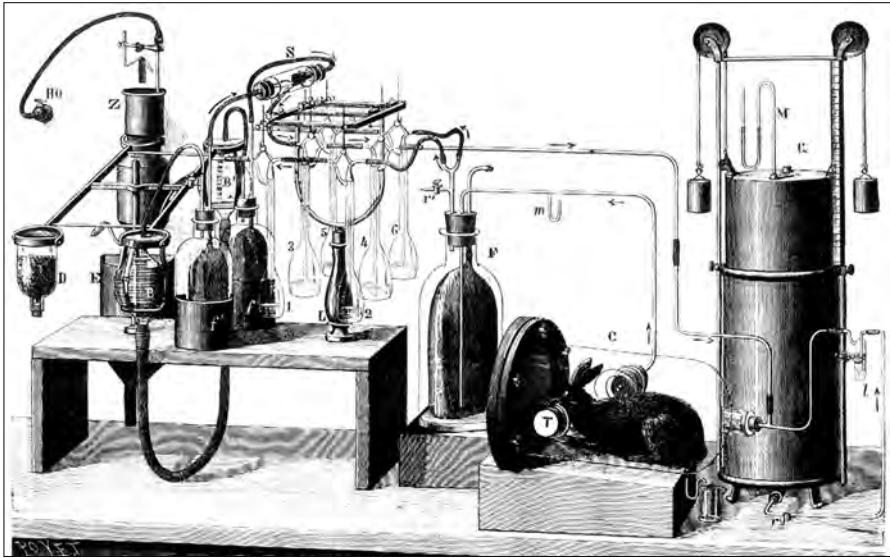
Jedes Klemmschraubenpaar ist durch eine Drahtleitung mit einem der vorerwähnten Apparate verbunden [...]. Das Klemmschraubenpaar W führt zu einem Glasbehälter, in welchem ein spiralförmig aufgewundener dünner Platindraht die beiden Pole der Drahtenden verbindet. [...] Es zeigt uns demnach diese instruktive Anordnung die Umsetzung eines elektrischen Stromes in Magnetismus (M'), in mechanische Arbeit (L'), in Wärme (W'), in chemische Thätigkeit (C'), in Licht (O') und in Schall (S').¹⁰

Zu jener Zeit waren viele wissenschaftlich-technische Darstellungen beeinflusst durch Darstellungen chemischer und physiologischer Experimente, die im ausgehenden 19. Jahrhundert einen Großteil der Forschungen ausmachten, beispielsweise mit Fröschen¹¹ oder Hasen (Abb. 2). Nötig war die realistische

¹⁰ O. A. (1883), Was ist Elektrizität?, S. 4 f.

¹¹ 1780/81 forschte der italienische Arzt Luigi Galvani über die physiologische Wirkung von Elektrizität auf Lebewesen und erfand 1800 die elektrische Batterie. Seine Erkenntnisse bildeten die Grundlage für Alessandro Voltas Beschreibung der Elektrochemie von Zellen. Be-

Darstellungsweise, weil es keine disziplinspezifischen Standards zur Darstellung von Experimentieraufbauten oder -schaltungen gab:



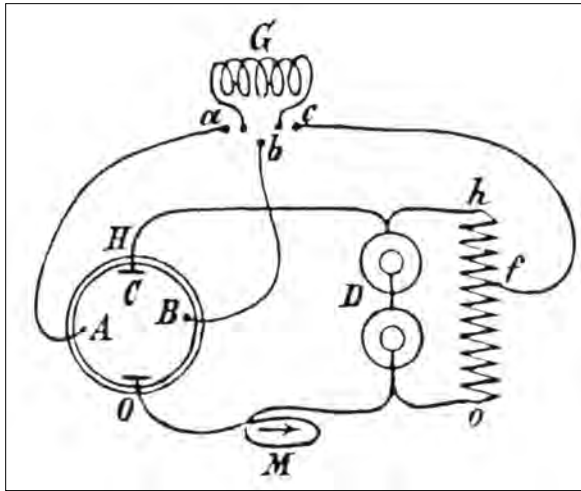
2 – Physiologische Experimentieranordnung, 1893

Ein frühes prominentes Beispiel für den Übergang von dieser natürlich-räumlichen Darstellung zu standardisierten elektrischen Schaltplänen, wie sie sich in der Elektronik des 20. Jahrhunderts etablierten, ist in Hermann von Helmholtz' Abhandlung *Über Bewegungsströme am polarisierten Platina* von 1880 zu finden. Er verwendete ganz im Stile seiner Zeit krumme Linien wie in der ersten Abbildung. Interessant bezüglich der Genese des Schaltplans ist, dass in seiner Zeichnung die beiden sich nur optisch kreuzenden Drähte unterhalb der Spule *G* bereits so gezeichnet sind, wie in modernen Schaltplänen. Helmholtz war sich also im Klaren darüber, dass es keiner weiteren Kennzeichnung einer Leitungskreuzung bedurfte, denn nur wenn sie eine Drahtverbindung bzw. Abzweigung darstellte, wäre eine zusätzliche Kennzeichnung nötig (Abb. 3):

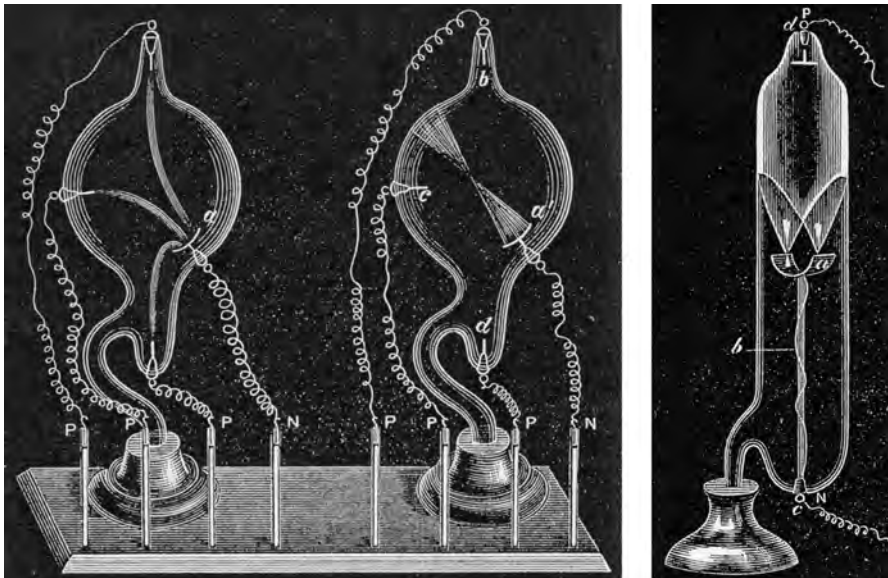
Das Schema der *Leitungen* war also das bestehende: *C* ist ein grosses, rundes Glasgefäß mit dem sauren Wasser gefüllt, *H* und *O* sind die beiden Wasser zersetzenden Platinplatten, *A* und *B* die beiden Drähte, *D* die beiden Daniell's, *oh* die Scala von 2000 Widerstandseinheiten, *Aa*, *Bb*, *fc* die zum Galvanometer *G* führenden Drähte.¹²

reits 1783 erfand Volta den Plattenkondensator. Die Einheit *Volt* für die elektrische Spannung ist nach ihm benannt.

¹² Hermann L. F. v. Helmholtz, „Ueber Bewegungsströme am polarisirten Platina“, in: *Wiedemanns Annalen der Physik*, Bd. 11, 11. März 1880, S. 901.



3 – Zwei sich kreuzende aber nicht berührende Drähte, 1880



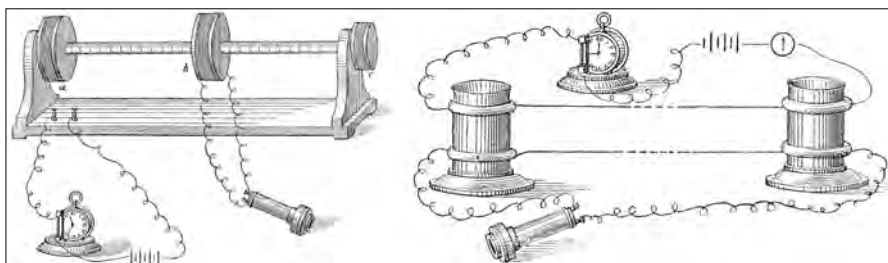
4 – Einfache Drahtspiralen, 1879

Drei bildsprachliche Elemente haben für die Genese der Schaltpläne, die für sämtliche elektrische Technologiezweige der Moderne unentbehrlich sind, eine zentrale Bedeutung – der Experimentiertisch im Labor, die Hand des Experimentators sowie die Drahtspirale im Raum. Und alle drei sollten im Lauf der Entwicklung verschwinden: Tisch und Hand vollständig, die notwendige Darstellung sich in der Ebene kreuzender Drähte jedoch hinterließ einen drei-

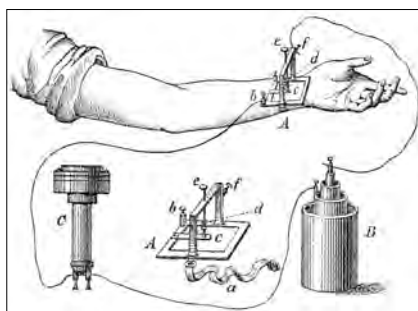
dimensionalen Rest, der als Artefakt noch in standardisierten Schaltplänen Mitte des 20. Jahrhunderts zu finden sein wird.

1879 wurde im *American Journal of Science* eine Experimentieranordnung zur Messung von Strahlungspartikeln im Vakuum vorgestellt (Abb. 4). Links zu sehen ist die natürliche räumliche Darstellung einer Tischplatte, auf dem die gesamte Apparatur befestigt ist. Obwohl die Leitungswege als Drahtspiralen dargestellt sind, geht daraus in keiner Weise ihre schaltungstechnische Funktion hervor. Im Bild rechts führen Drahtspiralen schlicht aus der Abbildung heraus oder scheinen in der linken Abbildung unter dem Tisch angebracht zu sein. Die Gesamtschaltung wird im Text ausführlich beschrieben.

In den Darstellungen zum *Audiometer* in der ersten Ausgabe der *Zeitschrift für angewandte Electricitätslehre* von 1879 ist zwar keine Tischplatte zu sehen, aber die Schattenwürfe der Apparaturen, einschließlich des scheinbar über dem Tisch schwebenden Telefonhörers (Abb. 5). Eine Art Tischrest markieren die Standfüße des Audiometers und der Uhr. Die Batterie und ein Messinstrument sind bereits schematisch eingezeichnet:



5 – Schatten und Tischrest, 1879

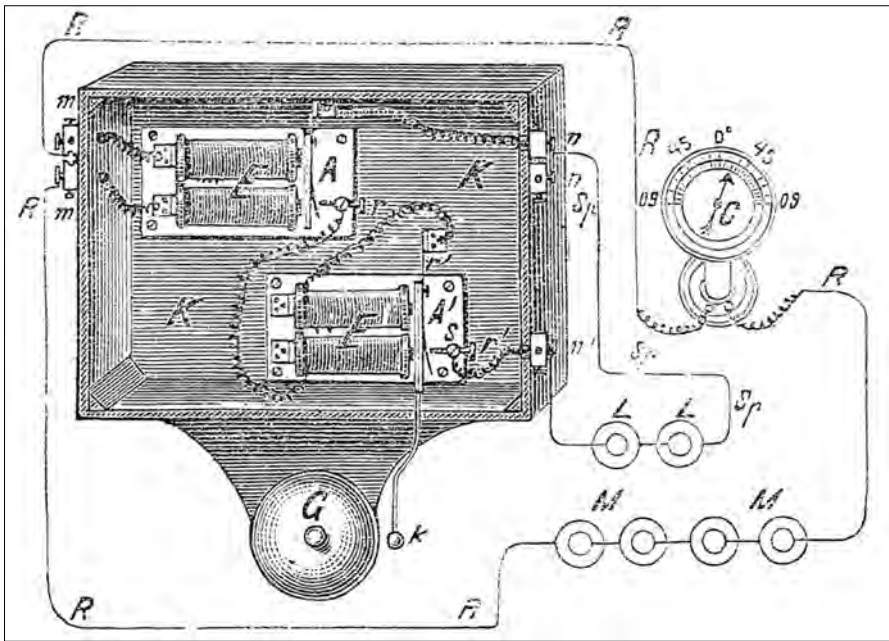


6 – Die Hand des Experimentators und Schattenrest, 1879

In derselben Ausgabe findet sich *Das Sphygmophon, ein neuer elektrotelephonischer Apparat* zur Messung und Hörbarmachung des Arterienblutpulses. Statt eines Experimentiertisches sind die vollständige natürliche Darstellung des menschlichen Armes zu sehen, sowie sämtliche für die Messung notwen-

digen Elemente, die durch einfache Linien verbunden wurden (Abb. 6). Allein der Schattenwurf der Batterie, nicht aber des Telefonhörers, ist noch zu sehen.

In der Ausgabe von 1881 ist ein *Verbesserter Feuer- und Einbruch-Aviseur* in einer Holzkiste abgebildet, die im Haus an geeigneter Stelle angebracht werden konnte (Abb. 7) und auf diese Weise direkt den Experimentiertisch ersetzt. Die Funktionsweise entspricht einer einfachen elektrischen Türklingel bzw. der eines Unterbrecherkontakts. Alle Elemente innerhalb dieser Kiste sind räumlich dargestellt, die zusätzlichen Anschlüsse und Bauteile außerhalb dieser dagegen bereits standardisiert, ausgenommen der zwei Drahtspiralen zum Anzeigergerät rechts. Diese sollen eine räumliche Entfernung zwischen Anzeige und Alarmanlage andeuten:



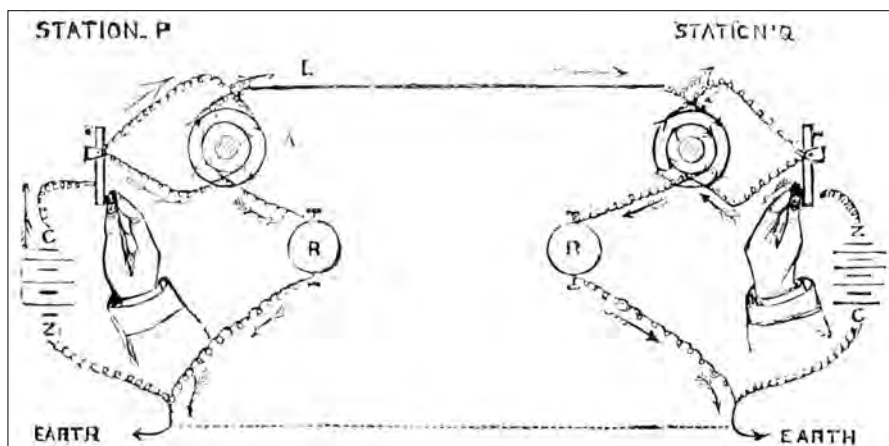
7 – Alarmklingelkasten, 1881

In der englischen Fachzeitschrift *The Electrician* von 1882 ist eine Prinzipschaltung zur Morse-Telegrafie zu sehen, in der die zum Tasten notwendige Hand zusätzlich abgebildet wurde (Abb. 8). Sämtliche stationären Drahtverbindungen wurden konsequenterweise durch Spiralen dargestellt.

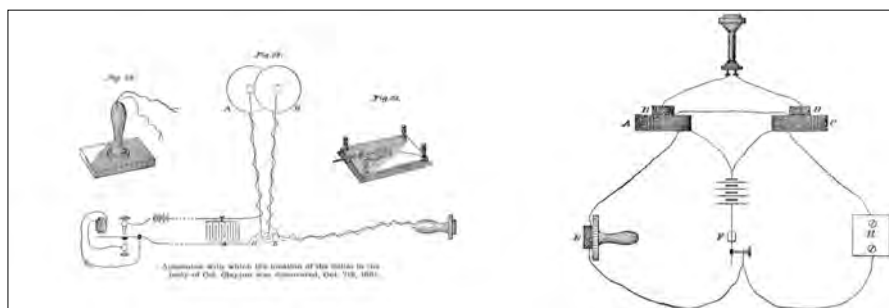
1883 wurde im *American Journal of Science* mit dem Aufsatz „Exploring for an Imbedded Bullet“¹³ ein induktiver Metalldetektor vorgestellt. In den dazugehörigen Abbildungen schweben schattenlose Objektträger verbindungslos

¹³ *American Journal of Science* 25, Third Series (1883), S. 52.

über einem Tisch, der wiederum lediglich aus einem Rechteck besteht (Abb. 9 links). In einer zweiten Draufsicht verschwinden die Reste des Tisches und der Objektträger (Abb. 9 rechts).

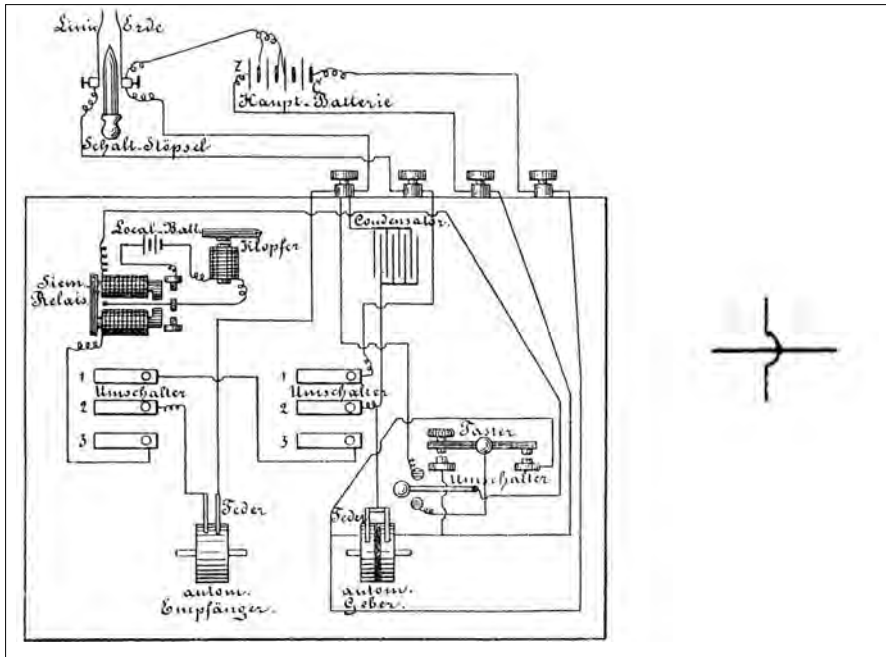


8 – Die Hand am Morse-Taster, 1882

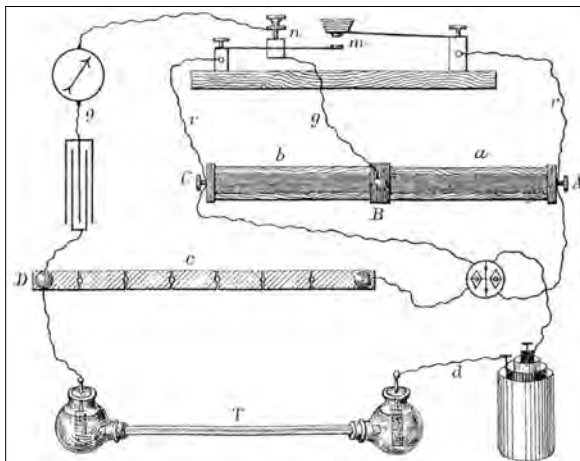


9 – Experimentiertisch verschwindet, 1883

Eine erste übersichtlich standardisierte Schaltung der *Automatischen Telegraphie* zeigte das deutsche *Centralblatt für Elektrotechnik* im selben Jahr. Den diagrammatischen Rest eines Tisches markierte hier noch, wie in der eben gezeigten Abbildung, ein schwarzes Viereck, an dessen oberem Rand die Schraubenkontakte für außerhalb befindliche Bauteile zu sehen sind (Abb. 10 links). Sowohl inner- und außerhalb des Vierecks wurden noch kleinste Drahtspiralen eingezeichnet. Gleichzeitig sind sich scheinbar kreuzende Drähte in der Ebene durch einen Halbkreis gekennzeichnet, der für sich eine halbe Spiralwindung darstellt und somit einen bildsprachlichen Rest anschreibt (Abb. 10 rechts). Interessant ist diese Neuerung deshalb, weil zwar noch Drahtspiralen mit vier, drei und zwei Windungen als solche gezeichnet wurden, eine Spirale mit nur einer Windung jedoch nicht:



10 – Rechtwinklige Leitungsbahnen und Spiralrest, 1883

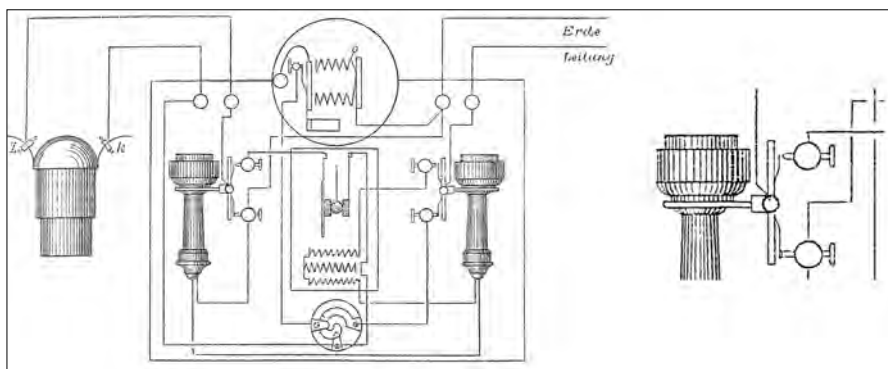


11 – Bögen statt Spiralen, 1876

Ein zentrales Darstellungselement sämtlicher elektrischer Schaltpläne Ende des 19. Jahrhunderts war also die Drahtspirale, die Schritt für Schritt verschwand, bis auf jenen Rest zur Darstellung sich im Raum kreuzender, nicht aber berührender Leitungen. Bereits in der Abbildung zum Aufsatz „On a Sen-

sitive Mercury Barometer“ der Londoner *Proceedings of the Physical Society* von 1876 sind statt der Drahtspiralen lose Verbindungen zu sehen¹⁴ (Abb. 11). An Spiralen erinnern jedoch noch die mehr oder weniger gleichmäßigen kleinen Bögen. Schatten sind vollständig verschwunden.

Eine weitere Möglichkeit der reduzierten ebenen Darstellung räumlicher Leitungskreuzungen zeigt folgende Zeichnung eines *Mikrotelephonischen Fernsprech-Apparates* in der *Zeitschrift für angewandte Electricitätslehre* von 1880 (Abb. 12 links). Sich überlappende Leitungen wurden einfach durch Unterbrechung einer der beiden Linien angedeutet (Abb. 12 rechts), wobei sicher die unten liegende gemeint war. Diese Darstellungsweise setzte sich jedoch nicht durch. Des Weiteren ist hier eine Vereinfachung der Darstellung von Verbindungen und Klemmschrauben durch einfache, nicht-ausgefüllte Kreise zu erkennen:



12 – Leitungsunterbrechungen, 1880

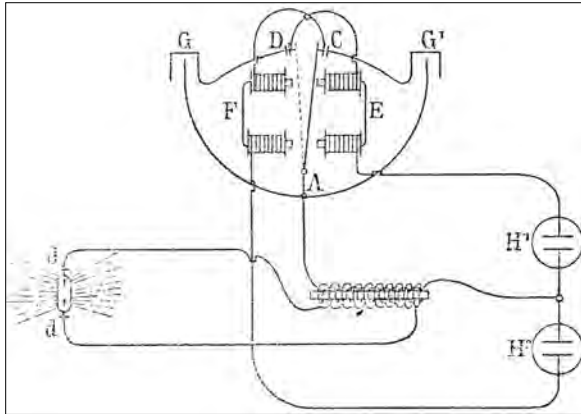
Eine der ersten Abbildungen, in denen lediglich ein halbkreisförmiger Spiralrest zu sehen ist, zeigt dieselbe Ausgabe in einem Aufsatz über „Neuerungen in der Erzeugung von elektrischem Licht“¹⁵ (Abb. 13). Dass diese Darstellung jedoch nicht vollständig bzw. bildsprachlich konsistent ist, zeigt der Umstand, dass die Kreuzung unterhalb der Kreuzung mit Spiralrest nicht eindeutig dargestellt ist. Eine wichtige bildsprachliche Entwicklung stellen auch die gerade verlaufenden Leitungen dar, deren Bögen jedoch relativ große Radien aufweisen. Die Klemmschraube für eine Leitungsverbindung zwischen *H1* und *H2* wird hier durch einen einfachen kleinen Kreis dargestellt, wie er bis heute verwendet wird.

Das Problematische des vollständigen Übergangs von freier räumlicher zu standardisierter ebener Darstellung verdeutlicht ein Aufsatz über „Telefonklin-

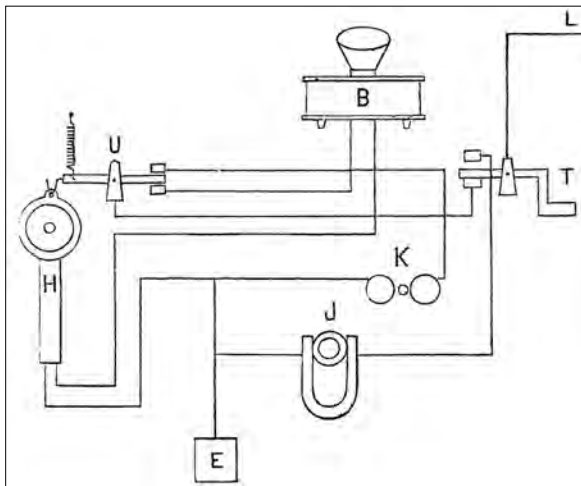
¹⁴ *Proceedings of the Physical Society of London* 2, (1876), S. 144.

¹⁵ *Zeitschrift für angewandte Elektrizitätslehre* 2, (1880), S. 210.

geln“ von 1882 ebenfalls in der *Zeitschrift für angewandte Elektrizitätslehre*¹⁶ (Abb. 14). Zwar ist davon auszugehen, dass die Kreuzungen keine Verbindungen sind, weil zwei T-Verbindungen im unteren Teil zu sehen sind. Dennoch ist diese Darstellungsweise unzureichend bzw. unlesbar. Die Verbindungen selbst sind aber bereits vollständig durch gerade Linien und rechte Winkel dargestellt.



13 – Frühe Darstellung mit Halbkreiskreuzung, 1880

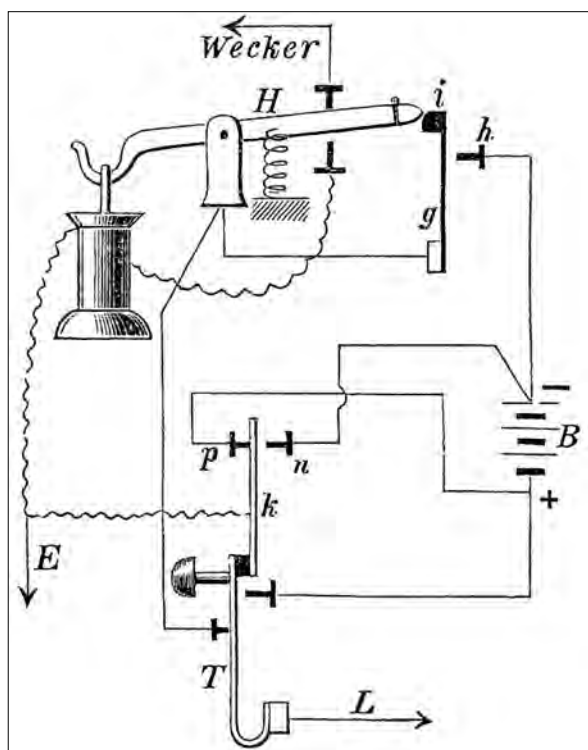


14 – Kreuzung oder Verbindung? 1882

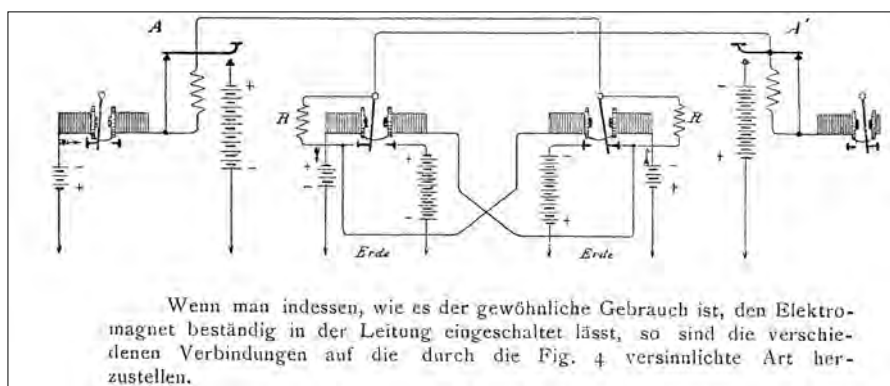
Die schematische Darstellung eines *Telefonapparates* in der *Elektrotechnischen Zeitschrift* von 1885 vereinigt alle bis dahin verwendeten Zeichenele-

¹⁶ *Zeitschrift für angewandte Elektrizitätslehre* 4, (1882), S. 115.

mente, wie mittels Bögen vereinfachte Spiralen im Raum, halbkreisförmige Spiralreste in der Ebene sowie gerade Linien und rechte Winkel (Abb. 15):



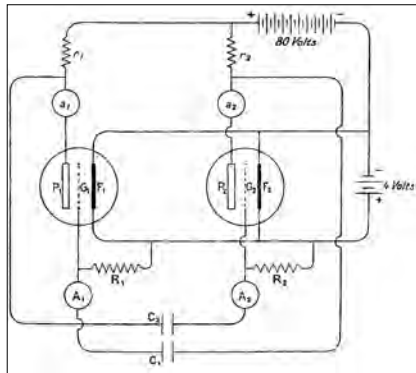
15 – Spiralbögen, Halbkreis und rechte Winkel, 1885



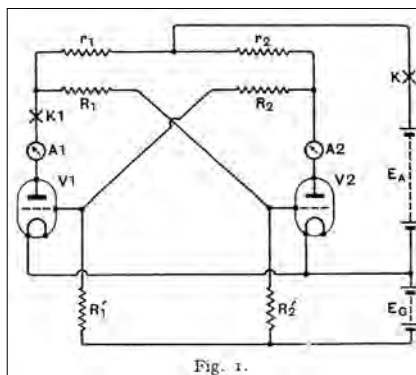
Wenn man indessen, wie es der gewöhnliche Gebrauch ist, den Elektromagnet beständig in der Leitung eingeschaltet lässt, so sind die verschiedenen Verbindungen auf die durch die Fig. 4 versinnlichte Art herzustellen.

16 – Frühe Standarddarstellung, 1887

Dass der Spiralrest für sich darstellungstechnisch redundant ist, zeigt erstmals eine Abbildung aus einem Aufsatz „Ueber das Telegraphiren mit Wechselströmen“ in der Zeitschrift für Elektrotechnik von 1887. In sämtlichen Standardwerken und Lexika spätestens seit Ende der dreißiger Jahre des 20. Jahrhunderts „sind die verschiedenen Verbindungen auf die durch Fig. 4 versinnlichte Art herzustellen.“¹⁷ (Abb. 16) So konnten einfache Leitungsverbindungen mittels ausgefüllter schwarzer Kreise unterschieden werden von nicht-ausgefüllten Kreisen für Buchsen oder Steckverbindungen. Sich kreuzende aber nicht verbundene Leitungen wurden einfach als solche gezeichnet.



17 – (Astabiler) Multivibrator, 1919

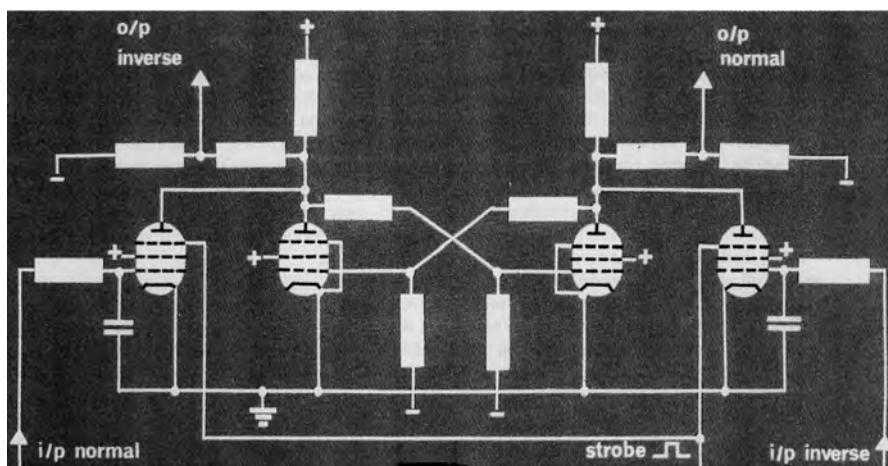


18 – Bistabiler Multivibrator (Flipflop), 1935

Dennoch tauchte der hartnäckige Halbkreis als grafischer Rest der natürlichen Darstellungen der Drahtspirale noch in den vollends standardisierten Schaltplänen der dreißiger Jahre des 20. Jahrhunderts auf (Abb. 17 und 18). Dieser

¹⁷ Zeitschrift für Elektrotechnik 8, (1887), S. 115. Vgl. Otto Morgenroth, *Vom Schaltsymbol zum Empfängerschaltplan*, Berlin, 1970, S. 16.

verschwand vollständig erst in den Aufzeichnungen über die ersten elektronischen Digitalcomputer der vierziger Jahre (Abb. 19 und 20).



19 – Flipflop im COLOSSUS, 1944

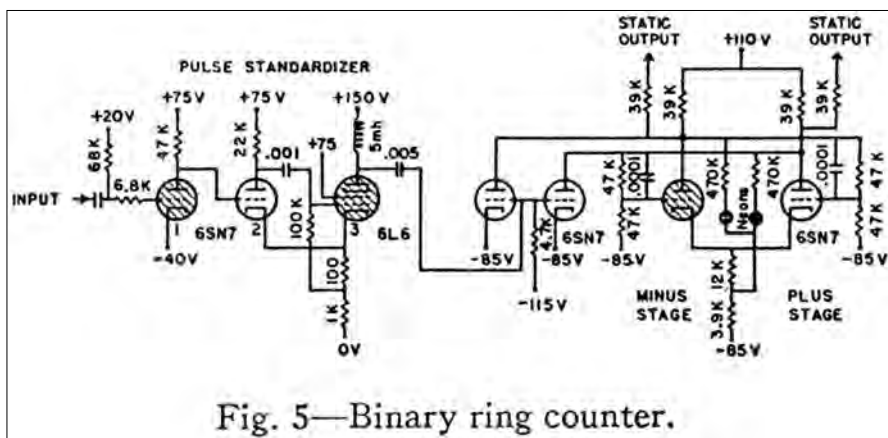


Fig. 5—Binary ring counter.

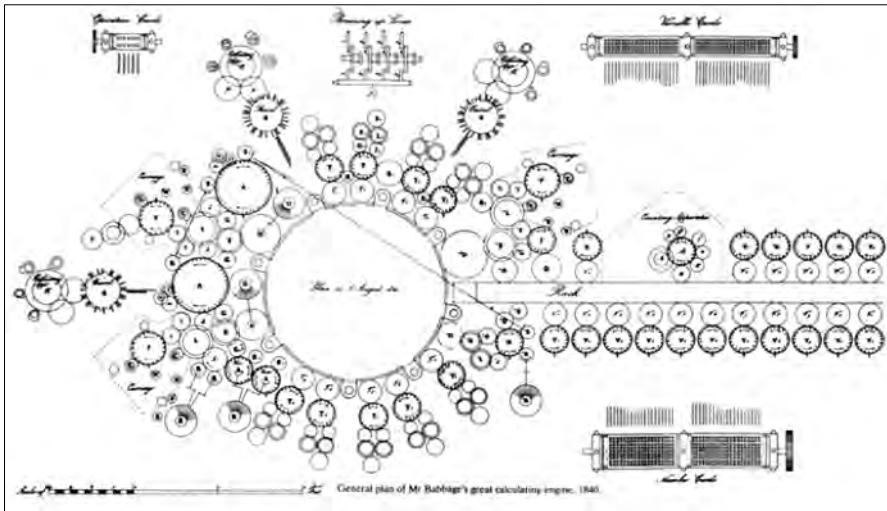
20 – Flipflop im Eniac, 1945

3. Von symbolischer Notation zu Electronic Design Automation

Man könnte in den medienhistorischen Windungen des Spiralrests, wie auch in dem abklingenden Rauschen der proportional zur Sichtbarkeit der Dinge der *Elektricität* unsichtbar werdenden Tischkanten, der verschwindenden Schattenwürfe oder Menschenhänden auf elektrischen Schaltplänen einen blinden Fleck technologischer Diagrammatik ausmachen. Man kann die Reste

der Anschauung aber auch als eine sichtbare Spur¹⁸ der unsichtbaren Zauberhand der Elektrizität ansehen. Diese Papier gewordene Geschichte der Elektronik ist – so wie sie hier skizziert wurde und wie sie heute immer noch von den Standardisierungskommissionen und Normenausschüssen der International Electrotechnical Commission oder des Deutschen Instituts für Normung fortgeschrieben wird – jedoch selbst zu einem Rest geworden. Sie wurde vor fünf Dekaden wieder zur Elektrizität und damit zum „vornehmsten Agens“ des Fortschritts, zur „Zauberei“ jenseits der symbolischen Notation, die sie einst war. Ein solcher medialer (Rück-)Wandel würde das Papier als Medium des Erkennens und der Gestaltung lediglich zu einer Passage der Elektronikgeschichte machen; allerdings zu einer notwendigen Passage, die mit der Verschränkung der Geschichte der Elektronik mit der des digitalen Universalrechners endet. Zumindest legt uns die Genese der elektronischen Entwurfsautomatisierung eine derartige Betrachtung nahe.

3.1 Entwurfsökonomie



21 – Analytical Engine auf Papier

Wenn man Bernhard Dotzler folgt, konnten Babbages Rechenmaschinen in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts auf ihre Verkörperung als Hardware verzichten¹⁹ – und das trotz der vielfach erzählten Geschichte ihres Schei-

¹⁸ Zum Konzept der Spur in diesem Sinne vgl. Sybille Krämer/Werner Kogge/Gernot Grube (Hg.), *Spur. Spurenlesen als Orientierungstechnik und Wissenskunst*, Frankfurt/M, 2007.

¹⁹ Vgl. Bernhard J. Dotzler, „Operateur des Wissens. Charles Babbage (1791-1871)“, in: ders. (Hg.), *Babbages Rechen-Automate: Ausgewählte Schriften, Computerkultur Bd. VI*, Wien, New York, 1996, S. 2-29.

terns²⁰ –, nicht aber auf das Medium ihres Entwurfs, auf das Papier (Abb. 21). Die *Analytical Engine* funktionierte auf dem Papier in der eigens für sie entwickelten Mechanischen Notation. Auch der Entwurf und Bau der ersten Generation von elektronischen, universal programmierbaren Digitalrechnern hundert Jahre später, wäre ohne papierne Notation nicht ausgekommen (vgl. auch Abb. 19 und 20). Rechnerentwurf und -bau – davon zeugen schon Babbages Memoiren²¹ – gehen mit einer enormen technischen und organisatorischen Komplexität einher. Spätestens mit dem Entwurf der zweiten Generation von digitalen Universalrechnern wurde das ideale Instrument zur Bewältigung dieser Komplexität entdeckt: der Rechner selbst.²² Das heißt natürlich nicht, dass man davor auf bloße Hände angewiesen wäre; die Anfänge der expliziten elektronisch-rechenmaschinellen Selbstanwendung sind aber eben in jener Zeit, in der ersten Hälfte der 1950er Jahre zu verorten.

Die ersten Automatisierungsversuche deckten verschiedene Bereiche, Abstraktionsstufen und Stadien des Rechnerentwurfs ab. Zunächst waren es diejenigen, die zeitaufwendige mathematische Berechnungen erforderten. Allen voran Logiksynthese oder -simulation, also eher abstrakte Entwurfsschritte. Aber auch konkrete elektrotechnische Implementierungsprobleme, wie die Erzeugung von Komponentenlisten oder die räumliche Gestaltung der Leitungsführung sollten rechenmaschinell unterstützt werden. Den meisten elektronischen Automatisierungsversuchen in den 1950ern war gemeinsam, dass die zu automatisierenden Vorgänge sonst manuell durchgeführt werden mussten. Deren Automatisierung war also technisch nicht unentbehrlich, sondern in erster Linie ökonomisch motiviert. Ein Beispiel aus den späten 1950er Jahren macht dies deutlich.

NCR 304 (Abb. 22 links) war einer der ersten kommerziellen Rechner, die voll transistorisiert waren. Es war ein mittelgroßer Rechner, der von General Electric für die Firma National Cash Register (NCR) entworfen und gebaut wurde. Der Logikentwurf für den Prozessor des NCR 304 (Abb. 23) und seine Implementierung in Schaltkreisen wurden im Prototyp-Stadium noch gänzlich manuell durchgeführt. Bei dem Produktionsmodell hingegen wurden Automatisierungsroutinen verwendet, die auf dem IBM 704 (Abb. 22 rechts) liefen.

²⁰ Vgl. dazu z. B. Klaus Mainzer, *Computer – neue Flügel des Geistes? Die Evolution computergestützter Technik, Wissenschaft, Kultur und Philosophie*, Berlin, New York, 1995, S. 55 f.

²¹ Charles Babbage, *Passagen aus einem Philosophenleben*, Berlin, 1997.

²² „Since by definition Design Automation is the use of computers to aid in the design of computers, its first use began with the design of the second generation of computers, making use of the capabilities of the first generation.“ Paul W. Case, „Evolution of Design Automation“, in: *Computer* 5, 3 (1927), S. 21.



22 – NCR 304 (links) und IBM 704 (rechts)

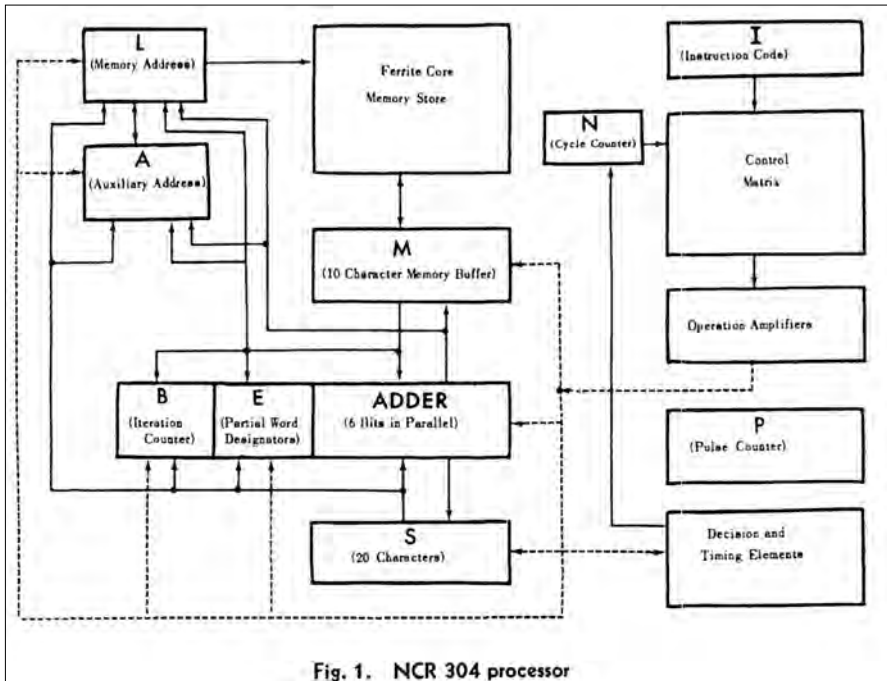


Fig. 1. NCR 304 processor

23 – Prozessor des NCR 304

Einem Bericht über die Auswirkungen der Automatisierung beim Entwurf und Produktion des NCR 304²³ kann man entnehmen, dass dadurch die Dauer des

²³ W. A. Hannig/T. L. Mayes, „Impact of Automation on Digital Computer Design“, in: *Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference*, International Workshop on Managing Requirements Knowledge, 1960, S. 211-232.

Entwurfszyklus reduziert wurde, wie auch der Einsatz von notwendigen Fachkräften. Es konnte eine bessere Dokumentation erstellt werden, durch eine sehr genaue Umsetzung der Regeln für die Gestaltung der Schaltkreise (*circuit rules*) konnte die Reliabilität erhöht, die Gesamtgestaltung des Rechners optimiert und die Zeit wesentlich verkürzt werden, die für die Einarbeitung der Logikdesigner in die Gestaltungsregeln notwendig war. Vor allem ist der ganze Entwurfsprozess flexibler geworden – spätere Änderungen der Parameter, die in früheren Schritten festgelegt wurden (z. B. Kapazität und Preis der zu verwendenden Transistoren), konnten schneller oder gar überhaupt berücksichtigt werden. Auch die Genauigkeit der generierten Dokumente war wesentlich höher, da alle möglichen Zustände und Konfigurationen rechenmaschinell überprüft werden konnten.

Die Automatisierung folgte hier nicht technischer Notwendigkeit, sondern einer strikten Ökonomie der Produktion. Dieser Ökonomie stand aber das Papier entgegen; paradoxerweise eben dasselbe Papier, das als Medium der Evidenzproduktion die Möglichkeit der technischen wie organisatorischen Komplexität einer solchen elektronischen Anlage bedingte. Um bei unserem Beispiel zu bleiben: IBM 704 war imstande, Lochkarten zu lesen²⁴, nicht aber Logikstrukturen, Blockdiagramme, einzelne Schaltzeichen oder ganze Schaltpläne als (manuell) gezeichnete Bilder zu prozessieren. Die symbolische, Papier verhaftete Beschreibung des elektronischen Rechners auf verschiedenen Abstraktionsstufen musste also maschinenlesbar übersetzt werden.



24 – Steckkarte

Um nachzuvollziehen, wie dies im Falle des NCR 304 geschah, wollen wir kurz auf den Entwurfsprozess eingehen: Zuerst wurden Boolesche Gleichungen aufgestellt, die die erforderlichen Gesamtfunktionen des Rechners sehr

²⁴ Evtl. auch magnetische Bänder, die jedoch nicht für externe Dateneingabe bestimmt waren.

abstrakt beschreiben. Durch ihre Interpretation konnten dann einzelne Gatter²⁵ und ihre Verschaltung berechnet werden. Seit Mitte der 1950er Jahre wurden beim Rechnerbau – vor allem wegen der Reliabilität im Betrieb und Praktikabilität der Wartung – Steckkarten (*plug-in circuits*) bevorzugt. Damit sind weitgehend standardisierte Leiterplattenkarten gemeint, bestückt mit elektronischen Bauteilen, die einer bestimmten Schaltfunktion entsprechen (Abb. 24). Aus solchen Karten wurde dann die Elektronik zum wesentlichen Teil zusammengesteckt.

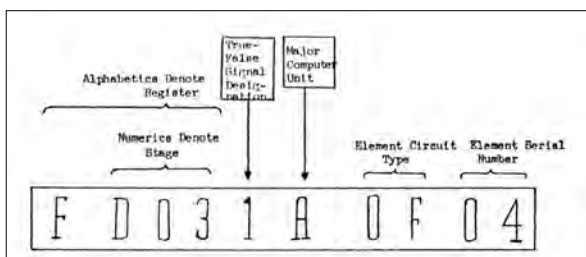
Als Nächstes musste also die Information über die Zuweisung der einzelnen Logikgatter zu diesen Steckkarten, d. h. zu der ausführenden Elektronik definiert werden. Zum Schluss des Logikentwurfs des NCR 304 Prozessors lag schließlich eine detaillierte, sortierte Liste der Steckkarten vor (Abb. 25), die dann der Produktion als Vorgabe galt.

CARD LOCATION				CARD SERIAL NO. IN MOD.				CARD TYPE			
01H1				23				04			
CKT. TYPE	EQUATION SUM	EL. LEVEL & TYPE	PIN NO.	CKT. TYPE	EQUATION SUM	EL. LEVEL & TYPE	PIN NO.	CKT. TYPE	EQUATION SUM	EL. LEVEL & TYPE	PIN NO.
2G2	DM771A	4G0111	47	4G2	DM801A	4G0212	08				
	EM821A	0E020-	29		FL093A	0F01D-	17				
	FL142A	0F01B-	28				18				
2G2	DM771A	4G0111	45	4G2	DM801A	4G0312	09				
	FL093A	0F01D-	41		FL142A	0F01B-	13				
	FL103A	0F01C-	40				14				
2G2			42	4G2	DM801A	4G0411	05				
			37		FM810A	0F01E-	03				
			36				04				
2G2			44	4G2	DM801A	4G0511	06				
			35		DM181A	0H013-	12				
			34				10				
2G2			46	4R			43				
			31								
			32	4R			33				
4G2	DM751A	4G0211	07	4R			21				
	PM003A	0H0A0	19								
	EM821A	0E020-	20	4R			30				
4G2	DM771A	4G0211	11	4R			38				
	RM803A		15								
	EM821A	0E020-	16								

25 – Plug-In Gate Card

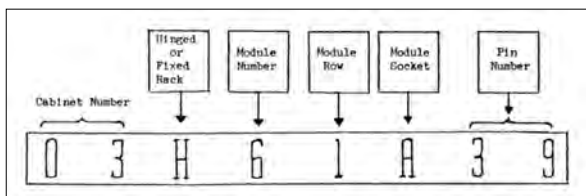
²⁵ Mit Gatter wird die konkrete Umsetzung von logischen Elementarfunktionen (Schaltfunktionen) bezeichnet.

Damit die einzelnen Schritte automatisiert werden konnten, wurden sowohl die logisch-funktionalen Komponenten (Ordnung), als auch die physische Position, und die Einbaustelle (Ortung) alphanumerisch codiert.



26 – Codierung der logischen Struktur (Ordnung)

Zu diesem Zweck wurde der Rechner in kleinere funktionale Einheiten eingeteilt: Register, Abschnitte (stage) und Elemente. (Abb. 26 zeigt also den dritten Abschnitt des FD Registers, der True/False-Indikator steht auf ‚True‘, das Element ist Teil der CPU, es handelt sich um Flipflop, und zwar um das vierte in der Serie des Abschnitts.) Die Einbaustelle, bzw. der physikalische Ort der Elemente und der einzelnen Steckkarten-Pins wurde ebenfalls codiert (Abb. 27).



27 – Codierung des physischen Ortes (Ortung)

Das hatte den großen Vorteil, dass sowohl die logisch-funktionale Ausgestaltung, als auch der Entwurf der materiellen Implementierung im Bezug auf denselben Datensatz automatisch berechnet werden konnten.²⁶

Wenn also die Entwurfsschritte, so wie hier skizziert, als 60 Routinen in 5 Programmen auf einem IBM 704 implementiert wurden, konnte der Zustand eines Registers des gerade zu entwickelnden NCR 304 – repräsentiert durch elektrische Spannung – zum Zustand eines Registers in einem bereits laufenden IBM 704 werden. So wurde auch der Schaltplan schaltbar und seine pa-

²⁶ Dies hatte weitreichende Konsequenzen. Hannig/Mayes (1960), Impact of Automation on Digital Computer Design, berichteten, dass der manuell entwickelte Prototyp und das teilautomatisiert hergestellte Produktionsmodell zwei ganz unterschiedliche Maschinen waren, obwohl ihnen dieselben logischen Gleichungen zugrunde lagen.

perne, visuelle Repräsentation buchstäblich ein Ausdruck, ein bloßes Nebenprodukt des nunmehr elektronisierten Wissens von Elektronik (Abb. 28):

BLOCK NUMBER	Q102 D		
SPECIAL STORAGE REGISTER (S-REG)			
ADDRESS REGISTER (L-REG)	FK01 = XP08 FM051 PM231		
FL011-FL041 = FA011-FA041 KP141 PL071	DECISION LOGIC		
FL010-FL040 = FA010-FA040 KP141 PL071	FK011 =		
FL051-FL141 =	FK010 = XP141		
FL050-FL140 = KP141 PL071	FK021 = (FA05-07+ 000) KP101 PM231		
AND L REGISTER TIMING			
FL001 = XP051 PL251	FK020 = XP141		
FL000 = XP081	INSTRUCTION REGISTER		
AUX ADDRESS REGISTER (A-REG)			
FA011-FA081 = FA051-FA121 FL001 KA051	FN141-FN161 = FM011-FM031 SR051 KP091		
FA010-FA080 = FA050-FA120 FL001 KA051	FN140-FN160 = FM010-FM030 SR051 KP091		
FA091-FA121 = FM011-FM041 FL001 PA021	PM231		
FA090-FA120 = FM010-FM040 FL001 PA021	FN171 = FM051 SR051 KP091 PM231		
FA131 = FM051 FR281 FL001 PA021	FN170 = FM050 SR051 KP091 PM231		
FA130 = FM050 FR281 FL001 PA021	PROGRAM COUNTER (FM01-FM07)		
FA141 = FM061 FR281 FL001 PA021	FK010 FK020 = COUNT TO NEXT BLOCK		
FA140 = FM060 FR281 FL001 PA021	FK010 FK021 = SKIP TO BLOCK 04		
ARITHMETIC UNIT			
EF011-EF041 = FS011-FS041 KP141	FK011 FK021 = SKIP TO BLOCK 00		
EF010-EF040 = FS010-FS040 KP141	FK011 FK020 = SKIP TO BLOCK 00		
KG011-KG061 = FM011-FM061 KG111	IF the monitor character is nega		
KG010-KG060 = FM010-FM060 KG111	The mode bits of character 9 are		
KA111 = NJ171 FP001 KA111	providing the machine is not in R3		
KA110 = NJ170 FP001 KA111	The index register character (R)		
KA101 = FP141 KA940	four bits of the L-reg. while the		
DECIMAL ADD		cleared.	
MEMORY REGISTER		The program counter counts to the	
NO CHANGE OF CONTENT IN LOGIC PERIOD	NO CHANGE	register field selector (S) is not	
MEMORY-SELECT = ADDRESS IN L-REG.	MISC. BIT STORAGE	The program counter skips to bit	
	FEW11 = (FL01-1A = CONSOLE SWITCHES)	field selector (S) is zero.	
	J1401 KP231 (M=MAIN)		
	FEW11 = (J1413K = J1423K (FM011+FM021)+		
	J1433K FM021+ J1443K FM011		
	FM021) KP091 PM231		

28 – Ausdruck des elektronisierten Wissens von Elektronik

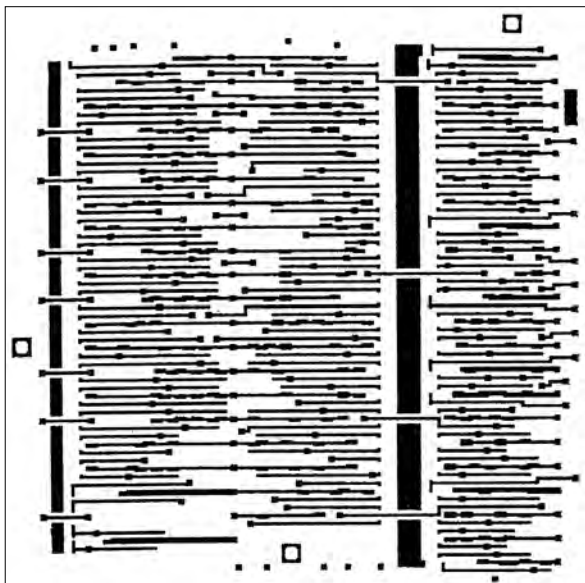
3.2 Materialität

Mit der Etablierung der integrierten Schaltkreise in den 1960er Jahren erfuhr die elektrische Schaltplan-Diagrammatik eine Wendung, eine *Verdichtung im Konkreten*. Denn mit der wachsenden Komplexität der Strukturen auf einem integrierten Schaltkreis stand nicht mehr die Entwurfsökonomie der abstrakten logischen Strukturen im Vordergrund, sondern nun die Materialität der Herstellungsverfahren und ihre Grenzen. Die Überwindung dieser Grenzen brachte eine andere Automatisierungsgeschichte hervor als die Entwurfsökonomie, wie sie am Beispiel des NCR 304 sichtbar gemacht wurde.

Dazu sei kurz an das Herstellungsverfahren der integrierten Schaltkreise erinnert. Anders als bei diskreter Elektronik werden die einzelnen Komponenten auf einem monolithischen Siliziumblock (Wafer) gebildet. Dazu wurde bereits in der Transistorenproduktion Lithografie verwendet.²⁷ Die Strukturen wurden also in das Siliziumsubstrat eingeschrieben oder eingezeichnet; d. h. es wur-

²⁷ Womit der in den frühen Zeichnungen der Dinge der *Elektricität* verschwundene Schatten in einer nicht reduzierbaren Funktion wieder auftaucht.

den verschiedene Schichten flächendeckend oder selektiv auf den Wafer aufgebracht oder von ihm entfernt. Um die entworfenen Schaltpläne auf den Wafer zu übertragen, wurden Schablonen verwendet, auch *Masken* oder *Artworks* genannt (Abb. 29).



29 – Artwork

Diese Schablonen mussten mit höchster Präzision gefertigt sein, denn eine spätere Korrektur ließ dieses Herstellungsverfahren nicht zu. Insgesamt gesehen begründet die materielle Präzision die Funktionalität integrierter Elektronik: Bei jedem Schritt wird ein Teil der räumlichen Struktur jeweils durch eine andere Schablone erzeugt. So entstehen unterschiedliche Schichten, die sich genauestens überlappen müssen, damit die Schaltfunktionen überhaupt realisiert werden können.

In dieser Funktion tauchten die Masken spätestens bei der Fertigung von Transistoren auf – man hat sie einfach mit einem Messer aus einem undurchsichtigen Material geschnitten und dann fotografisch verkleinert. Der Herstellungsprozess von solchen Schablonen war Mitte der 1960er Jahre sehr aufwendig: Zuerst erhielt ein Zeichner bestimmte Gestaltungsregeln (z. B. minimale Entfernung von zwei Komponenten) und als Vorlage einen Schaltplan – nicht selten handgezeichnet. Er fertigte dann eine vergrößerte, detaillierte Zeichnung für jeden in seinem Plan vorhandenen Typ von Bauelementen. Im nächsten Schritt entwarf er dann mehrere geometrische Modelle dieser Bauelemente und versuchte, die Gestaltungsregeln im Auge behaltend, ihre optimale Anordnung zu finden, indem er einfach, sprich mit der Hand auf dem Pa-

pier, verschiedene Konfigurationen durchspielte. Wenn der Zeichner glaubte, ein Optimum gefunden zu haben, zeichnete er den ganzen Schaltkreis. Dabei wurden alle notwendigen Schablonen in dieselbe Zeichnung eingetragen – jede Schablone mit einer anderen Linienart gezeichnet. Nachdem die Zeichnungen auf augenscheinliche Fehler und Konsistenz mit den Vorgaben und Gestaltungsregeln überprüft wurden, wurden sie mithilfe eines Präzisions-Koordinatografen auf Rubylith übertragen (Abb. 30).²⁸



30 – „Cut & strip“ von Rubylith

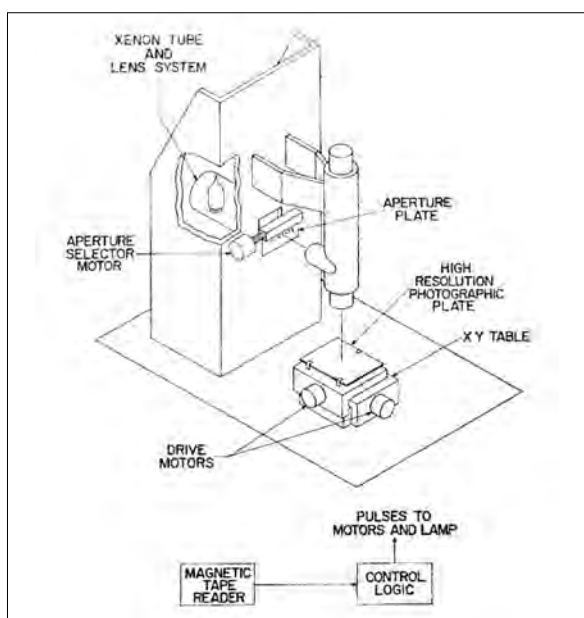
So entstanden dann Maskenvorlagen für integrierte Schaltkreise, sogenannte Masters, die 300- bis 500-mal größer waren als die endgültigen Strukturen auf den hergestellten Chips. Nach einer weiteren gründlichen manuell-visuellen Kontrolle wurden die Master in mehreren Schritten fotografisch verkleinert. Pro integrierten Schaltkreis brauchte man 5 bis 15 Masken.²⁹ Als ein umständlicher, sehr heikler und zeitintensiver Prozess, den man auch mit mehr Personal nicht wirklich verkürzen konnte, war die Herstellung der Schablonen ein idealer Automatisierungskandidat. Dass es dazu so kam, wird wohl eher an der Materialität des Rubylith liegen als am betriebswirtschaftlichen Optimierungdenken.³⁰ Schon bei 300-facher Verkleinerung wurden die Präzision der Vorlagen und die Qualität der optischen Verkleinerungstechniken entscheidend für die Machbarkeit eines integrierten Schaltkreises. Nehmen wir an: Wenn der größte handhabbare Rubylith-Bogen ungefähr drei Meter an der Seite

²⁸ Rubylith ist eine zweischichtige Folie, bestehend aus einer klaren, durchsichtigen, härteren Schicht, auf der eine weichere, weniger transparente, eine rubinrote Folie aufgeklebt ist. (Daher auch der Name Rubylith.) Der Schaltplan wurde in diese rote Schicht geschnitten und abgezogen (das sogenannte *cut & strip* oder *stripping*). Die roten und weißen Flächen bestimmten dabei, ob eine Schicht auf dem Siliziumsubstrat weggeätzt oder dotiert wurde.

²⁹ Meist eine für die Dotierung und zwei für die Metallisierung pro Schicht.

³⁰ Folgende Argumentation ist angelehnt an Lawrence M. Rosenberg, „The Evolution of Design Automation to Meet the Challenges of VLSI“, in: *Proceedings of the 17th Design Automation Conference, DAC '80*, Minneapolis, MN, 1980, S. 3-11.

messen würde und das Schneiden auf einen Millimeter genau erfolgen kann, und wenn die erforderliche Größe der kleinsten Strukturen auf dem Siliziumsubstrat fünf Hundertstel Mikrometer³¹ messen sollte, dann müsste man die Schablone statt 500 Mal 1000 Mal verkleinern. Dafür reichte damals die Qualität der Verkleinerungstechnologien in der Halbleiterherstellung – d. h. das Wissen und Zu-sammenspiel von Optik (Verkleinerung), Chemie (Photolack) und Festkörperphysik (Substrat) – schlichtweg nicht aus. Man wäre gerade noch auf eine Chipgröße von 3 Millimetern gekommen.³² Wollte man komplexere Chips produzieren³³, so musste man das Zeichnen, Schneiden und Abkleben der Artworks *notwendig* automatisieren. Bereits die ersten Anlagen für die automatische Herstellung der Schablonen haben die Ingenieurshand durch elektronisch gesteuertes Licht ersetzt (Abb. 31 und 32) und damit den Weg zur vertikalen Automatisierungsintegration der Halbleiterproduktion geebnet.

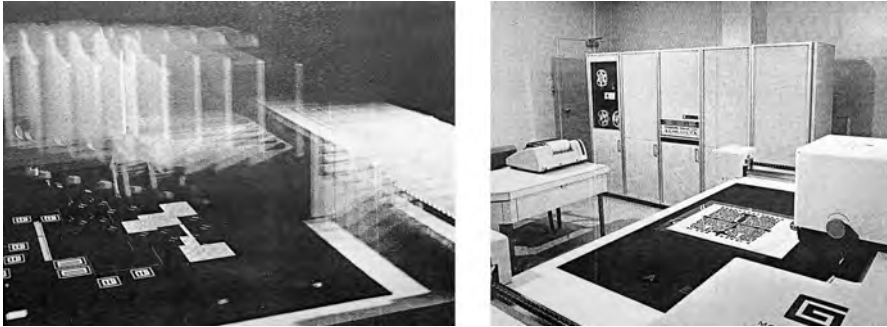


31 – Automatische Herstellung von Artworks. Light Table

³¹ Zum Vergleich: Heute befinden wir uns im Nanobereich.

³² Vgl. Rosenberg (1980), *Evolution of Design Automation*.

³³ Der Drang nach verlässlicher, widerstandsfähiger und günstiger Kleinstelektronik hat vor allem einen militärischen Hintergrund. Die im Zweitem Weltkrieg aufgekommene elektronische Kriegsführung (*electronic warfare*) wurde zum Schlachtfeld des wissenschaftstechnischen Wettrennens im Kalten Krieg. Die großzügige staatliche Förderung der Halbleitertechnologie in den USA hängt eng mit der Entwicklung von ballistischen Interkontinentalraketen, insbesondere deren Steuerung und Wartung, zusammen. Vgl. dazu Paul Ceruzzi, *Eine kleine Geschichte der EDV*, Bonn, 2003, S. 222 f.



32 – Automatische Herstellung von *Artworks*. Automatic Drafting Machine

4. Schlussbetrachtung

Die Genese der elektronischen Notation zeigt, (1) wie *die Ingenieurshand* aus dem Konkreten des Elektronikentwurfs *verschwand*. In der standardisierten symbolischen Notation hatte sie nichts verloren. Die Hand blieb dem Entwurf zwar nicht zu-, aber – weitgehend unbeachtet, weil unsichtbar – vorhanden. Dabei hat sich die Hand als Zeichnerin von Schaltplänen, als Schneiderin von Schablonen oder als „Eingabequelle“ für Tastaturen und Mäuse auf immer abstraktere Ebenen hinaufbefördert. Den mit der unsichtbar werdenden Hand verbundenen Verlust an unmittelbaren Eingriffs-, Steuerungs- oder Kontrollmöglichkeiten könnte man durchaus als einen schrittweise entstehenden Automatismus betrachten, der seine Selbst- bzw. Vollständigkeit mit der Einführung von Datenbanktechnologien in den 1970ern erlangte. Erst diese konnten es vollbringen, die einzelnen, bereits großteils automatisierten Entwurfs- und Produktionsschritte vertikal zu integrieren.

Dieser Automatisierungsprozess ist (2) von einem hartnäckigen *Rest der Anschauung* flankiert, der eine geradlinige „Wende vom Anschaulichen zum Symbolischen“ zu unterlaufen scheint. Schwand in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts die Anschauung von Dingen der *Elektrizität* zugunsten ihrer abstrakten, symbolischen, papierbehafteten Repräsentation, innerhalb derer sich die Dinge zu einer weit größeren Komplexität entfalten ließen, so geschah es nicht rückstandslos. Das Herstellungsverfahren der integrierten Elektronik zeugt sogar von einer „Wiederkehr“ der konkreten Bilder; geht es in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts doch darum, ein errechnetes Bild als funktionsfähige Elektronik buchstäblich zu „zeichnen“, den vorerst nur in der symbolischen Notation existierenden Dingen einen materiellen Körper zu geben.

Die materiellen Umstände bei der Herstellung von Elektronik, insbesondere der Elektronik für digitale Rechenmaschinen, führten zur – zuerst ökonomisch erwünschten und erst später technisch notwendigen – Elektronisierung des elektrischen Schaltplans. Dabei (3) stieß die Entfaltung der Dinge der Elektri-

zität im Symbolischen auf ihre *Verdichtung im Konkreten*. Einerseits wurde konkrete, real funktionierende Elektronik zur Bedingung ihrer symbolischen, auf dem Papier nicht mehr notwendigen oder sogar nicht mehr möglichen, Existenz, andererseits trieb die mediale Selbstreferenzialität der Elektronik eine erstaunlich anhaltende materielle Miniaturisierungsgeschichte an. So sind immer noch immer mehr Dinge der Elektrizität auf kleinstem Raum immer dichter aufzustellen.

Literatur

- O. A., „Was ist Elektrizität?“, in: *Elektrotechnische Rundschau*, 1 (1883), S. 3.
- Babbage, Charles, *Passagen aus einem Philosophenleben*, Berlin, 1997.
- Case, Paul W., „Evolution of Design Automation“, in: *Computer* 5, 3 (1972), S. 21-22.
- Ceruzzi, Paul, *Eine kleine Geschichte der EDV*, Bonn, 2003.
- Dennhardt, Robert, *Die Flipflop-Legende und das Digitale. Eine Vorgeschichte des Digitalcomputers vom Unterbrecherkontakt zur Röhrentechnik 1837-1945*, Berlin, 2009.
- Dotzler, Bernhard J., „Operateur des Wissens. Charles Babbage (1791-1871)“, in: ders. (Hg.), *Babbages Rechen-Automate. Ausgewählte Schriften*, Computerkultur Bd. VI, Wien, New York, 1996, S. 2-29.
- Ders., *Diskurs und Medium. Zur Archäologie der Computerkultur*, München, 2006.
- Hannig, W. A./Mayes, T. L., „Impact of Automation on Digital Computer Design“, in: *Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference*, International Workshop on Managing Requirements Knowledge, 1960, S. 211-232.
- Helmholtz, Hermann L. F. von, „Ueber Bewegungsströme am polarisirten Platina“, in: *Wiedemanns Annalen der Physik*, Bd. 11, 11. März 1880.
- Hörl, Erich, *Die heiligen Kanäle. Über die archaische Illusion der Kommunikation*, Zürich, Berlin, 2005.
- Kittler, Friedrich, „Blitz und Serie – Ereignis und Donner“, in: Nikolaus Müller-Schöll (Hg.), *Ereignis. Eine fundamentale Kategorie der Zeiterfahrung. Anspruch und Aporien*, Bielefeld, 2003, S. 145-157.
- Krämer, Sybille, *Berechenbare Vernunft. Kalkül und Rationalismus im 17. Jahrhundert*, Berlin, New York, 1991.
- Dies./Kogge, Werner/Grube, Gernot (Hg.), *Spur. Spurenlesen als Orientierungstechnik und Wissenskunst*, Frankfurt/M., 2007.
- Mainzer, Klaus, *Computer – neue Flügel des Geistes? Die Evolution computergestützter Technik, Wissenschaft, Kultur und Philosophie*, Berlin, New York, 1995.
- Morgenroth, Otto, *Vom Schaltsymbol zum Empfängerschaltplan*, Berlin, 1970.
- Rheinberger, Hans-Jörg, *Epistemologie des Konkreten. Studien zur Geschichte der modernen Biologie*, Frankfurt/M., 2006.
- Rosenberg, Lawrence M., „The Evolution of Design Automation to Meet the Challenges of VLSI“, in: *Proceedings of the 17th Design Automation Conference, DAC '80*, Minneapolis, MN, 1980, S. 3-11.

Sarrazin, Otto (verantw. Redakteur), *Centralblatt der Bauverwaltung*, Nr. 11A, 16. März 1887.