

Erste Computerentwicklungen in den USA: Das ENIAC-Projekt

Seminar: Geschichte der Rechnerarchitektur

Max Reimann
max.reimann@tum.de

Jonas Schreier
jonas.schreier@tum.de

ABSTRACT

ENIAC, der Electric Numerical Integrator and Computer, war der erste vollkommen elektronische Computer der Welt. Er wurde von der US Army in den Jahren von 1943 bis 1946 in Philadelphia zur Berechnung von Ballistischen Tabellen entwickelt und brachte einige technische Neuerungen wie die Vakuum-Röhren mit sich. In einer späteren Version setzt der ENIAC außerdem bereits die heute weit verbreitete Von-Neumann Architektur um. Die Bedeutung des ENIAC zeigt sich durch die Entwicklungen die aus ihm hervorgingen, wie die Nachfolger EDVAC und UNIVAC. Neben direkten Nachfolgerechnern entstand auch das wegweisende Paper John von Neumanns *First Draft of a Report on the EDVAC* aus dem ENIAC-Projekt. Auf dem ENIAC wurde außerdem die erste Monte Carlo Simulation sowie die erste Wettervorhersage überhaupt berechnet. Dieses Paper fasst den zeitlichen Ablauf des ENIAC-Projektes zusammen, stellt die Funktionsweise der Hard- und Software vor und geht auch auf die direkten Nachfolger des ENIAC ein.

1. EINLEITUNG

Aus dem heutigen Leben ist der Computer nicht mehr wegzudenken. Microchips sind in einer Vielzahl von Geräten verbaut, oft so klein und unscheinbar, das man sie gar nicht bemerkt. Mit dem Smartphone trägt fast jeder einen leistungsfähigen Allzweckrechner in der Tasche und der *Personal Computer* ist ein ständiger Begleiter in Arbeit und Freizeit. Und obwohl die Computer sich in den letzten 80 Jahren im Bezug auf Größe, Rechenleistung, Aussehen, Stromverbrauch und Zuverlässigkeit massiv verändert haben, so haben sie doch einen gemeinsamen Ursprung. Dieser Ursprung liegt in den Großrechnern der 40er und 50er Jahre, die von den verschiedensten Institutionen in den USA und in Europa teilweise zeitgleich entwickelt wurden. Diese Computer hatten im Vergleich zu heute noch eine klare Aufgabe, wie der Name bereits verspricht: *Computing*. Sie waren Forschungs- und Entwicklungsrechner und berechneten Flugbahnen, Wahrscheinlichkeiten, Wettervorhersagen und mehr. Besonders im Angesicht des Selbstverständnisses, mit dem Computer heutzutage verwendet werden bietet es sich an, die Wurzeln dieser Technologie zu erkunden. Die Geschichte des ersten dieser vollkommen elektronischen Großrechner, dem ENIAC, soll im folgenden näher erläutert und nachempfunden werden. Doch wieso ist ein Computer, den wir bereits vor 20 Jahren auf einem 35 Quadratmillimeter Chip nachbauen konnten, heute noch von Bedeutung und relevant? Besonders der ENIAC bietet sich dafür an, da er im Vergleich zu einem modernen Computer noch einfach genug

war, um auch die Details und Eigenheiten nachvollziehen zu können. Außerdem musste er als *erster seiner Art* neben technischen auch politische Hürden überwinden und Zweifler davon überzeugen, dass ein Computer nicht nur in der Theorie funktionieren kann. Wie es zum Beginn des ENIAC-Projektes kam, wie der ENIAC sich in seiner Lebenszeit entwickelte und welche großen wissenschaftlichen Fortschritte dank der (für die damalige Zeit) großen Rechenleistung erzielt werden konnten werden neben dem Einfluss des ENIAC auf seine Nachfolger im folgenden genauer betrachtet.

2. METHODEN

Die Ergebnisse dieses Papers wurden mittels einer Literaturrecherche erarbeitet. Hierfür wurden jüngere Quellen, die das Thema bereits geschichtlich einordnen mit wissenschaftlichen Veröffentlichungen aus der Entwicklungszeit des ENIAC kombiniert. Vorallem die Bücher *From ENIAC to UNIVAC* (1981) von Nancy Stern, *ENIAC in Action: Making and Remaking the modern Computer* (2018) von Haigh Thomas sowie *ENIAC - A Problem Solver* (1994) von W.B. Fritz geben einen guten Überblick über die Eindordnung des ENIAC im historischen Kontext, die technischen Details der Maschine und ENIACs Anwendungsgebiete und Erungenschaften. Ergänzt werden diese Werke dann durch Paper von Autoren aus der Lebenszeit des ENIAC. Besonders der Artikel von Herman und Adele Goldstine *The electronic numerical integrator and computer (ENIAC)* sowie *Electronic numerical integrator and computer* von den Erfindern Mauchly und Eckert selbst geben einen guten Einblick in die Entwicklungen der Zeit. Die Beschaffung der Literatur erfolgte größtenteils über das OPAC-System der Technischen Universität München. Die Literatur ist gut zugänglich und in den meisten Fällen in digitaler Fassung und Online verfügbar. Viele der Artikel wurden in den IEEE Annals of the History of Computing veröffentlicht.

3. ERGEBNISSE

3.1 ENIAC im historischen Kontext

ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) war ein voll elektronischer Allzweckrechner der US-Army. Er wurde in den Jahren 1943 bis 1945 gebaut und 1946 offiziell vorgestellt. Bis heute gilt der ENIAC als einer der wichtigsten Entwicklungen auf dem Weg zum modernen Computer. Im folgenden wird der Weg des ENIAC von seinen Beginnen bis zu seinem Ende nachverfolgt. Ebenfalls wird sein Einfluss auf nachfolgende Entwicklungen sowie die direkten ENIAC - Nachfolger betrachtet.

3.1.1 Computer vor ENIAC

Der Begriff *Computer* war vor dem ENIAC vor allem ein Begriff für Personen, deren Aufgabe es war, Berechnungen durchzuführen. Der Beruf wurde oft auch einfach als *Human Computer* bezeichnet. [17] Meist wurden die Aufgaben dieser Personen durch mechanische oder mechanisch-elektrische Maschinen erleichtert. Diese Maschinen waren jedoch sehr spezialisiert und meist nur für eine oder wenige Anwendungen geeignet. So gab es beispielsweise diverse Hilfsmittel zur Integration, die mechanisch über die überstrichene Fläche eines Balles ein kontinuierliches Integral berechnen konnten. Außerdem kamen in den Anfängen des 20. Jahrhunderts bereits erste automatische Computer wie die Tabelliermaschine von Hermann Hollerith oder die Rechenmaschine von Konrad Zuse auf. Diese Maschinen waren bereits im Stande, mathematische Berechnungen durchzuführen, ihnen fehlten aber oft eine oder mehrere essentielle Eigenschaften um praktikabel zu sein. So war zum Beispiel die Tabelliermaschine von Hollerith rein mechanisch und nicht programmierbar, sondern rein zur Auswertung von vorgefertigten Lochkarten gedacht. Außerdem war die komplizierte Mechanik alles andere als verlässlich und musste oft gewartet und repariert werden. [1]. Konrad Zuses *Z1* war zwar bereits frei programmierbar, die rein mechanischen Rechenglieder waren jedoch äußerst unzuverlässig und verhakten sich regelmäßig. Ein großer Nachteil der mechanischen oder halb mechanischen Rechenmaschinen war zusätzlich die geringe Rechengeschwindigkeit. Die Mechanik musste so präzise aufeinander abgestimmt sein, dass nur niedrige Geschwindigkeiten möglich waren. Allgemein waren diese frühen Computer keinesfalls ausgereift und fanden im Vergleich zu den verbreiteten Tischrechenmaschinen kaum praktische Anwendung. Die Tischrechner sind am ehesten mit den heutigen Taschenrechnern vergleichbar und beherrschten die Grundrechenarten (Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division), waren aber natürlich in keiner Weise automatisierbar. Vor allem die Frage nach der besten Art und Weise, digitale Daten zu verarbeiten war umstritten. Die *Z1* verarbeitete ihre Daten bereits im Binärformat und verwendete eine Architektur mit Speicher-, Rechen- und Programm-Werk, während andere Entwicklungen der Zeit, wie auch der ENIAC, ihre Daten im Dezimalformat verarbeiteten. Einen Konsens über optimale Architekturen und Datenformate erreichte die Forschung erst in den 50er Jahren. [21]

3.1.2 Das ENIAC-Projekt der US-Army

In der Zeit nach dem Kriegseintritt der USA in den 2. Weltkrieg war das *Ballistics Research Laboratory (BRL)* für die Berechnung so genannter *Ballistischer Tabellen* zuständig. Diese Tabellen beschrieben die Flugbahnen von Geschossen unter den verschiedensten Bedingungen. Diese aufwändigen Berechnungen waren per Hand mühsam und vor allem sehr langwierig, auch mit Hilfsmitteln wie dem *Differential Analyzer*, einem mechanischen Tischrechner der Differentialgleichungen über mechanische Integration lösen konnte. Ein *Human Computer* benötigte so circa 10 Stunden für die Berechnung einer Tabelle. Da das BRL das Auftragsvolumen der US Armee nicht mehr bewältigen konnte, machte man sich im Jahr 1942 auf die Suche nach einer Lösung. Man wandte sich an die Moore School of Electrical Engineering der University of Pennsylvania, die zuvor bereits den bereits erwähnten *Differential Analyzer* für die US-Army entwickelt hatte. [5]

John W. Mauchly.

John Mauchly war Physiker an der Moore School. Er erhielt 1932 seinen Ph.D von der John Hopkins University und war anschließend Assistent am Ursinus College. 1941 wechselte er nach dem Besuch des *Summer War Time Training* als Professor an die Moore School. Aufgrund seines Interesses für Meteorologie begann er sich früh für die elektronische Berechnung mathematischer Formeln zu interessieren, die es ermöglichen würden, die für Wettervorhersagen benötigten großen Mengen an Daten effizient zu verarbeiten. Aus diesem Interesse heraus entstand 1942 das Paper *The Use of High Speed Vacuum Tube Devices for Calculating*, in welchem er das Potential von Vakuum-Röhren zur elektronischen Berechnung aufzeigt. Als mögliches Anwendungsgebiet nennt Mauchly hier bereits die Lösung von Differentialgleichungen. [13]

Die Erstveröffentlichung des Papers erregte kaum Aufmerksamkeit. Erst als das BRL alle Möglichkeiten in Betracht zog, wurde auch Mauchlys Paper noch einmal betrachtet. Trotz großer Zweifel von Seiten der Armee und Wissenschaftlern an der Machbarkeit eines großen, elektronischen Rechners bewilligte die US-Armee 1943 das Projekt. Hermann Goldstine überzeugte sich in persönlichen Gesprächen mit Mauchly von der Machbarkeit und setzte sich für die Realisierung des Projektes ein.

Herman Goldstine.

Herman Goldstine wurde im Jahr 1913 in Chicago geboren. Er schloss 1936 die University of Chicago mit einem Ph.D in Mathematik ab. Nach kurzer Lehrtätigkeit an der University of Michigan trat er 1942 der US Army bei und war anschließend als Vorgesetzter der *Human Computers* am Ballistics Research Laboratory stationiert.

Da Goldstines Wort, der aus seinen bisherigen Tätigkeiten bei der Armee bereits das Vertrauen seiner Vorgesetzten genoss, deutlich mehr Gewicht als das von Mauchly hatte, war es seinem Einsatz zu verdanken, dass das Projekt an die Moore School vergeben wurde. Mit Vergabe des Auftrags an die Moore School setzte diese ein Team aus Ingenieuren und Mathematikern zusammen. Die Leitung übernahm Mauchly zusammen mit einem Elektrotechniker der Moore School, John Presper Eckert.

J. Presper Eckert.

J. Presper Eckert wurde im Jahr 1919 in Philadelphia, Pennsylvania als Sohn eines Bauunternehmers geboren. Er wuchs in wohlhabenden Verhältnissen auf. Bei der College-Aufnahmeprüfung belegte er im Mathematik-Teil den zweiten Platz in den USA. An der University of Pennsylvania studierte er zunächst auf Wunsch seines Vaters Wirtschaftswissenschaften, wechselte aber im Jahr 1940 an die Moore School um sich den Ingenieurwissenschaften zu widmen.

Eckert war für das technische Design des Computers zuständig während Mauchly eher konzeptuell tätig war. [18] Nachdem sich Goldstine persönlich für das Projekt bei der Armee eingesetzt hatte, wurde er zum Projektleiter von Seiten der Armee benannt. [17]

Forschungs- und Konstruktionsphase.



Figure 1: John C. Mauchly, J. Presper Eckert und Herman Goldstine

Nachdem das Team zusammengestellt war, wurde im Jahr 1943 mit der Forschung begonnen. Der ENIAC, der mit dem Projektnamen *Project PX* als Top-Secret Projekt entwickelt wurde, war eine vollständige Neuentwicklung. Anfangs orientierte man sich noch an den verbreiteten, mechanischen Tischrechnern und den elektromechanischen IBM Lochkartenlesern. Da ein vollkommen elektronischer Rechner aber bisher gänzlich unbekannt war, waren viele Eigenentwicklungen nötig, die teilweise von den Ingenieuren der Moore School und teilweise von Privatfirmen aus der näheren Umgebung entwickelt wurden. So wurde die komplizierte Stromversorgung und das Netzteil des ENIAC beispielsweise von einer Elektrofirma aus Philadelphia geliefert.[17] Schließlich entstand der ENIAC als ein U-Förmiger, raumgroßer Computer aus einzelnen Komponenten, die alle in sich abgeschlossene Aufgaben ausführten. 20 Akkumulatoren für Addition und Subtraktion, ein Multiplikator und ein Divisor bildeten das Herzstück, den eigentlichen *Rechner*. Hinzu kamen Komponenten zur Taktgebung, Synchronisation, Ein- und Ausgabe über Lochkarten und die *Function Tables*. Diese dienten anfangs der Speicherung von konstanten Werten, nach einigen Modifikationen wurde ein Teil der Programmierung hier implementiert. Eine weitere wichtige Komponente war der *Master Programmer*, der wie der Name schon sagt für die Programmierung verwendet wurde. Der Master Programmer konnte einzelne Unterroutinen aufrufen und die Ergebnisse einer Teilberechnung an eine andere umleiten.[8] Die Grundlage für alle rechnenden Komponenten bildeten die Vakuum-Röhren, die für sämtliche Rechenoperationen genutzt wurden und in Ringzählern zu einzelnen Komponenten vereint wurden. Im Kapitel *Funktionsweise* werden die Vakuum-Röhren noch näher erläutert. Allgemein ist zu sagen, dass viele der Entwicklungen des ENIAC unter großem Zeitdruck entstanden sind. Für das BRL¹ war der ENIAC kein Forschungsprojekt, sondern eine wichtige Maschine für den Kriegseinsatz. Somit wurden oft Konzepte in Betracht gezogen aber aus Zeitgründen verworfen und durch einfacher realisierbare ersetzt. Dazu gehört auch die *Stored Program Architektur*, bei der ein Programm im Speicher des Computers abgelegt werden kann. Heute ist diese Architektur als *Von Neumann Architektur* bekannt. Eckert und Mauchly experimentierten bereits im Jahr 1943 mit dem Konzept, welches lediglich aus Zeitgründen nicht im ENIAC implementiert wurde.[12] Nach Abschluss der Konstruktion bestand der ENIAC aus 18000 Vakuum-Röhren, wog 27 Ton-

Table 1: Zeit pro Instruktion im ENIAC

Operation	Zeit in Millisekunden
Addition	0.2
Multiplikation	2.8
Division	24.0

nen, hatte eine Leistungsaufnahme von 150 kW und hatte eine Grundfläche von 167 Quadratmetern. Bis dahin hatte das Projekt circa 500.000 US Dollar gekostet (heute: 6.300.000 \$). Diese Zahl war für zahlreichen Forschungsprojekte der US Army keineswegs unüblich. Generell war die Armee bereit, große Geldbeträge auch für nicht besonders aussichtsreiche Forschung bereit zu stellen. Doch die Tatsache, dass das ENIAC Projekt auch nach Kriegsende noch weiter finanziert wurde zeigt, dass man auch in der Armee das Potential und die Chancen einer solchen Rechenmaschine erkannt hatte. Die benötigte Zeit pro Instruktion können Tabelle 1 entnommen werden. Zu beachten ist, dass es sich hierbei um Maximalzeiten handelt. Die benötigte Rechenzeit hing von der Größe der Operanden ab. Besonders die große Anzahl an Vakuum-Röhren sorgte noch vor Projektbeginn für Zweifel an der Realisierbarkeit des ENIAC. Eine einzige defekte Vakuum-Röhre würde ein Rechenergebnis verfälschen und es unbrauchbar machen, sofern man überhaupt erkennt dass das Ergebnis falsch ist. Dieses Problem konnte tatsächlich nie wirklich gelöst werden. Bis zum Ende seiner Einsatzzeit war der ENIAC oft in Wartung und hat selten länger als einen Tag am Stück gerechnet.[17]

Die ersten Tests am ENIAC wurden 1945 durchgeführt. Obwohl der ENIAC mit einem klaren Ziel entwickelt wurde, die Berechnung ballistischer Tabellen, haben die Ingenieure bereits während des Baus bemerkt, dass ENIAC eine Vielzahl von Problemen lösen kann. Goldstine selbst beschreibt es in seinem Paper[8] von 1946 folgendermaßen:

The machine was developed primarily for the purpose of calculating firing tables for the armed forces. Its design is, however, sufficiently general to permit the solution of a large class of numerical problems which could hardly be attempted by more conventional computing tools.

ENIAC war also in der Lage, viele analytisch unlösbaren Probleme numerisch hinreichend genau anzunähern. Auch das erste Testprogramm des ENIAC hatte nichts mit dem ursprünglichen Zweck gemein. Stattdessen wurde eine Mach-

¹Ballistic Research Laboratory

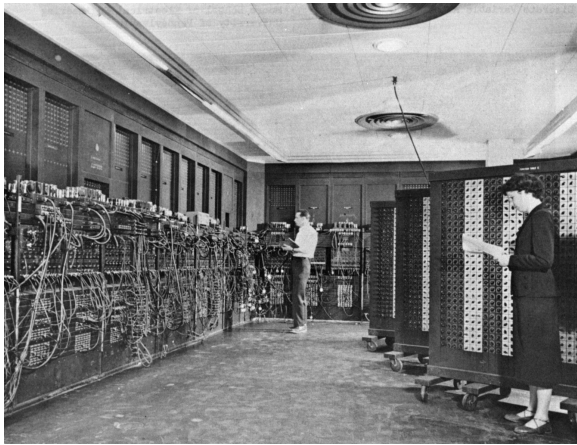


Figure 2: Akkumulatoren und Function Tables des ENIAC

barkeitsstudie zu einer Thermonuklearwaffe, später als die Wasserstoffbombe bekannt, durchgeführt. Dieser Test erforderte eine Zusammenarbeit mit dem Manhattan-Projekt in Los Alamos, die von John von Neumann initiiert wurde. Von Neumann war zu der Zeit in beide Projekte involviert und wusste somit, dass der ENIAC dafür geeignet war, die aufwändigen Berechnungen die das Manhattan-Projekt erforderte, durchzuführen.[6] Im Jahr 1946 wurde der ENIAC schließlich der Öffentlichkeit vorgestellt. Nach ausführlichen Tests und einer Abnahme durch die US Army konnte der ENIAC an den Auftraggeber, das Ballistics Research Laboratory in Aberdeen, Maryland übergeben werden. Der Transport eines raumgroßen Computers war logistisch nicht unproblematisch. Zusätzlich hatten zu dieser Zeit bereits viele der Ingenieure zusammen mit Eckert und Mauchly die Moore School verlassen, was den Wiederaufbau in Aberdeen erschwerte. Einige Zeit nach dem Transport hatte der ENIAC so noch mit höheren Ausfallraten als an der Moore School zu kämpfen, diese durch den Transport verursachten Probleme konnten aber nach und nach behoben werden.[17]

Die ENIAC-Frauen.

Neben den wichtigen Beiträgen von Mauchly, Eckert und ihrem Team aus Ingenieuren waren auch sechs Frauen der Moore School maßgeblich am Erfolg des Projekts beteiligt. Vor ENIAC, als alle Berechnungen noch von den *Human Computers* durchgeführt wurden, waren es zu einem überwiegenden Teil Frauen, die diesen Beruf ausübten. Es war weitestgehend anerkannt, dass Frauen diese Aufgabe schneller und genauer als Männer erledigten. Außerdem war es zur damaligen Zeit eine der wenigen Möglichkeiten für Frauen, einen technischen Beruf ausüben zu können. Aus dieser großen Gruppe von Frauen wurden sechs ausgewählt um die Programmierung des ENIAC zu übernehmen. Diese Frauen waren Kay McNulty, Jean Bartik, Betty Holberton, Marlyn Wescoff, Frances Bilas und Ruth Teitelbaum. Allesamt hatten einen Abschluss in Mathematik. Angeleitet wurden sie von Adele Goldstine, Frau von Herman Goldstine. Zu beachten ist, dass die Programmierung damals mit dem, was heute unter dem Begriff verstanden wird, nicht viel gemein hatte. Generell wurde der ENIAC durch die Verkabelung der unterschiedlichen Akkumulatoren programmiert, die dann

im ganzen ein Programm bildeten. Genauer wird im Unterpunkt Funktionsweise auf die Programmierung eingegangen.[6] Wie die Akkumulatoren aber nun verkabelt werden mussten, um das gewünschte Ergebnis zu berechnen, mussten die Programmiererinnen selbst erarbeiten. Hierfür standen ihnen anfangs nur die Logik- und Schaltpläne sowie die mündlichen Informationen der Ingenieure zur Verfügung. Eine vorgegebene, mathematische Formel in eine entsprechende Berechnungsvorschrift zu übersetzen, die Berechnungsvorschrift per Hand zu testen, durch Verkabelung zu implementieren und das Ergebnis anschließend zu verifizieren war eine äußerst anspruchsvolle und zeitintensive Aufgabe. Doch auch hier zeigt sich, dass ihre männlichen Teammitglieder diese Aufgaben nicht wirklich würdigten. Das reine Übersetzen einer mathematischen Formel in eine Verschaltung der Akkumulatoren sahen viele der Ingenieure als eine triviale Aufgabe an. Neben der Programmierung waren die Frauen ebenfalls für die Fehlersuche und Behebung zuständig. Stellte sich heraus, dass der ENIAC ein falsches Ergebnis lieferte, musste die eine defekte aus den 18000 Vakuum-Röhren gefunden werden. Eine Aufgabe, die später durch entsprechende Testprogramme immerhin ein wenig vereinfacht werden konnte. Die Arbeit dieser sechs Frauen wurde erst spät nach dem Krieg gewürdigt, obwohl ihre Arbeit maßgeblich zum Erfolg des ENIAC beigetragen hatte. Immerhin wurde den Frauen durch ihre Arbeit auch nach Ende des Projektes die Tür zur Wissenschaft geöffnet, wo einige der Frauen ebenfalls bedeutende Leistungen im Bereich der Informatik verzeichnen konnten. Hier ist besonders Jean Bartik zu nennen, die nach ihrer Zeit bei ENIAC maßgeblich an den Nachfolgern BINAC und UNIVAC beteiligt war und später in einem Team die Programmiersprache FORTRAN entwickelte. Katy McNulty heiratete im Laufe des Projektes John Mauchly. Klara von Neumann, die Frau von John von Neumann trat dem Projekt im Jahr 1945 bei, zusammen mit John von Neumann (Abbildung 3).[7]

Gespeicherte Instruktionen im ENIAC.

Nach Auslieferung des ENIAC wurden immer wieder Modifikationen durchgeführt. Die vermutlich wichtigste ist die *Stored Program Erweiterung*, die es erlaubte, eine kleine Anzahl an vorgefertigten Instruktionen im Speicher des ENIAC abzulegen. Das *Stored Program Concept* beschreibt die Idee, Programmstrukturen neben Daten im selben Speicher abzulegen. Bei jedem Programmwechsel den Computer komplett neu zu programmieren war schlicht zu aufwändig und die Möglichkeit, wenigstens eine kleine Anzahl an Instruktionen von Programm zu Programm zu erhalten, war bereits eine große Erleichterung. Außerdem konnte durch die Speichererweiterung die Anzahl an I/O-Vorgängen stark reduziert werden, was wiederum die Rechengeschwindigkeit erhöhte. Die von Eckert und Mauchly während der Konstruktion bereits angedachte Speicherung von Programmen konnte nun also tatsächlich implementiert werden. Realisiert wurde dies über einen 100 Wort großen Magnetkern-Speicher. Magnetkern-Speicher waren die neue Generation der Speichertechnologien und im Jahr 1951 noch eine große Neuheit. Sie waren deutlich kleiner, zuverlässiger und einfacher als die bisher verwendeten Delay-Line Speicher und erlaubten den zufälligen Zugriff auf beliebige Speicheradressen. Der Magnetkern-Speicher des ENIAC wurde von der Firma Burroughs geliefert und wurde vor dem ENIAC lediglich im Echtzeitrechner des MIT, *Whirlwind*, eingesetzt. Eine wei-

tere Modifikation am ENIAC war eine zusätzliche Function-Table, die im Jahr 1951 hinzugefügt wurde. Sie erlaubte die Speicherung weiterer konstanten Werte, die dann in Berechnungen abgerufen werden konnten. Doch neben Konstanten konnten seit der Modifikation des ENIAC auch Instruktionen darin gespeichert werden.[9]

Vorbild für die Modifikation war John von Neumanns *First Draft of a Report on the EDVAC*, welcher im Jahr 1945 an der Moore School entstand und die Architektur des direkten ENIAC-Nachfolgers, dem EDVAC beschreibt. Bis heute ist es jedoch umstritten, ob der ENIAC tatsächlich dem *Stored Program Concept* entspricht. Ein häufiges Gegenargument ist die Tatsache, dass der ENIAC nur über read-only Speicher verfügte und so nicht dynamisch Instruktionen manipulieren konnte. Da das *Stored Program Concept* jedoch zu keinem Zeitpunkt klar definiert wurde, gilt dieses Thema bis heute als kontrovers.[10] Der modifizierte ENIAC berechnete dann für mehrere Jahre die verschiedensten numerischen Probleme für das BRL und andere externe Auftraggeber. 1955 wurde ENIAC schließlich abgeschaltet, nachdem er durch andere modernere, schnellere und effizientere Computer wie den EDVAC ersetzt worden war. [6] Die wichtigsten Programme, die ENIAC in dieser Zeit ausführte, werden im nächsten Abschnitt behandelt.

Die Eckert-Mauchly Computer Corporation.

Eckert und Mauchly konfrontierten die University of Pennsylvania 1944 mit ihrer Absicht, einen Patentantrag für den ENIAC einzureichen, was sie einerseits zu den alleinigen Erfindern machen würde und ihnen andererseits das Recht auf Weiterentwicklungen auf Basis des ENIAC zuschreiben würde. Die Universität erhob anfangs einen eigenen Anspruch auf das Patent, willigte nach einigen Gesprächen aber ein. Im Jahr 1946 änderte die Universität jedoch ihre Patentregeln, die Eckert und Mauchly zwingen würden, alle ihre Patente an die Universität abzugeben. Daraufhin kündigten beide ihre Anstellung an der Moore School und gründeten die Eckert-Mauchly Computer Corporation(EMCC). Einige der Moore School Ingenieure sowie manche der Programmiererrinnen folgten ihnen. 1947 erhielten Mauchly und Eckert schließlich das Patent für den ENIAC mit der Nummer *US3120606A*[4]. Die neu gegründete Firma hatte zunächst Schwierigkeiten, Auftraggeber für neue Projekte zu finden. Obwohl der ENIAC bewiesen hatte, das Großrechner technisch machbar waren, war die finanzielle Rentabilität vor allem für Unternehmen fraglich. Der erste Auftrag nach Firmengründung kam also erneut von einer Regierungsorganisation, dem National Bureau of Standards. Die EMCC entwickelte zwei Iterationen an ENIAC-Nachfolgern, den *BINAC* und den *UNIVAC*. Der BINAC war sehr ähnlich zum *EDVAC*, der noch während der ENIAC im Bau war an der Moore School als direkter Nachfolger entwickelt wurde. Der UNIVAC baute dann wiederum auf dem BINAC auf und entwickelte diesen weiter. Beide Rechner werden im folgenden noch genauer betrachtet. Im Jahr 1950 wurde die EMCC durch Remington Rand, die unter anderem kleinere Tischrechner herstellten, aufgekauft.[17] 1955 fusionierte Remington Rand schließlich mit der Sperry Computer Corporation zur Sperry Rand. Heute ist die Firma unter dem Namen Unisys bekannt. [3]

3.1.3 ENIAC in der Anwendung

Das ENIAC-Projekt hatte von Anfang an ein klar definier-



Figure 3: John von Neumann

tes Ziel: Die Berechnung von Ballistischen Tabellen für die US-Armee. Durch den späten Baubeginn im Jahr 1943 und die Fertigstellung nach Ende des 2. Weltkrieges, verringerte die Nachfrage nach diesen Tabellen. Natürlich entwickelte die Armee immer noch neue Waffen und Geschosse, die wiederum die Berechnung eben dieser Tabellen nötig machte, doch das riesige Auftragsvolumen zu Zeiten des 2. Weltkrieges gab es nach Kriegsende nicht mehr. Also wandte man sich neuen Einsatzgebieten zu. Hierzu stellten die Ingenieure schon früh fest, dass der ENIAC, ursprünglich für einen Zweck entwickelt, eine ganze Reihe von Problemen lösen konnte. In der Zeit vor dem ENIAC war die Lösung von Problemen, die keine analytische Lösung besaßen, entweder sehr aufwändig oder schlicht unmöglich. Durch den großen Geschwindigkeitsvorteil den der ENIAC im Vergleich zu allen anderen Computern der Zeit erzielte, war es nun möglich, eine Vielzahl von Problemen numerisch zu lösen. Unter den wichtigsten dieser Probleme ist die Machbarkeitsstudie zu einer Thermonuklearwaffe im Jahr 1945, die Erfindung und Erprobung der Monte Carlo Methode und diverse Wetterberechnungen.[6]

Ballistische Tabellen.

Etwa 25 Prozent der verfügbaren Rechenzeit wurden mit der Berechnung der Ballistischen Tabellen und ähnlichen Flugbahnberechnungen verbracht. Die Mathematik hinter einer solchen Berechnung bestand meist aus nichtlinearen Differentialgleichungen mit mehreren Unbekannten.

Monte Carlo Simulation auf dem ENIAC.

In den 1940er Jahren forschten eine Vielzahl bekannter Wissenschaftler am *Los Alamos National Laboratory, New Mexiko* an der ersten Atombombe. Am so genannten Manhattan Projekt waren unter anderem John von Neumann und ein polnischer Mathematiker und Nuklearphysiker namens Stanislaw Ulam beteiligt. Zusammen entwickelten sie während ihrer Forschung in Los Alamos eine Methode zur numerischen Berechnung von Problemen mittels einer große

Anzahl von Zufallsexperimenten. Der Name *Monte Carlo* stammt vom Casino Monte Carlo in Monaco. Ein klassisches Beispiel für eine mögliche Berechnung mit dieser Methode ist die Kreiszahl π . Wirft man Pfeile auf ein Quadrat mit aufgezeichnetem Einheitskreis, so entspricht die Anzahl der Pfeile in dem Kreis der Zahl $\frac{\pi}{4}$. Im Rahmen des Manhattan Projektes untersuchten die Forscher, wie weit Neutronen in verschiedenste Materialien eindringen konnten. Da die Berechnung dieser Distanzen mit konventionellen mathematischen Methoden erfolglos blieb, musste eine andere Lösung gefunden werden. Ulam kam auf die Idee, das Ergebnis über eine sehr große Anzahl an Zufallsexperimenten anzunähern. Diese sehr große Anzahl an Experimenten war jedoch durch die Geschwindigkeit der Computer der Zeit beschränkt. Von Neumann, der parallel bereits am ENIAC Projekt arbeitete, wusste dass die hohe Rechengeschwindigkeit des ENIAC ausreichte, um genügend exakte Werte zu erhalten und schlug den ENIAC-Ingenieuren seine Monte Carlo Simulation als erstes Testprogramm vor. [14] Durch das Kriegsende 1945 hatte der ENIAC seine geplante Hauptaufgabe² verloren, was Rechenzeit für andere Projekte freigab und so berechnete der ENIAC bis 1952 immer wieder verschiedene Monte Carlo Simulationen. Im Jahr 1952 entwickelte das Los Alamos Laboratory einen eigenen Großrechner (*MANIAC*), auf dem zukünftig die Monte Carlo Simulationen durchgeführt werden sollten.

Wetterberechnungen.

Eine weitere numerische Anwendung war die Wetterbechnung auf dem ENIAC. Wieder initiiert durch John von Neumann machten sich ein Team aus Meteorologen daran, die erste Wettervorhersage im heutigen Sinne zu berechnen. Wie auch bei den Monte Carlo Berechnungen, war es die hohe Rechengeschwindigkeit des ENIAC die dies erst möglich machte und es den Forschern erlaubte, ihre Theorien in der Praxis anzuwenden und zu überprüfen. ENIAC benötigte circa 24 Stunden für die Berechnung einer Wettervorhersage für die nächsten 24 Stunden. [11] Durch Optimierung der verwendeten Algorithmen konnte diese Zeit in den kommenden Jahren noch verringert werden. Zusammen mit der weiter steigenden Rechenleistung nachfolgender Computer wurde die numerische Wettervorhersage realistisch durchführbar. [16]

Weitere Anwendungen.

Neben den oben genannten Berechnungen wurden auf dem ENIAC weitere Berechnungen durchgeführt. Zum Beispiel berechnete ENIAC Referenztabelle für Sinus und Cosinus auf die 10. Nachkommastelle, eine Tabelle aller Fakultäten von $1!$ bis $1000!$ und die ersten 2500 Nachkommastellen der Zahlen π und e . Außerdem diverse Berechnungen zu inversen Matrizen, Primzahlen und anderen rechenintensiven Problemen. Hierbei ist zu beachten, dass der ENIAC praktisch eine völlig neue Disziplin in der Wissenschaft begründete. Die Simulation von Vorgängen der Physik zum besseren Verständnis war etwas vollkommen neues. Bisher war es schlicht unmöglich, Theorien durch Simulation zu beweisen oder widerlegen. ENIACs Rechenleistung erlaubte es den Wissenschaftlern nun, Simulationen zu entwickeln, die die Realität in einer Weise nachbilden, die es erlaubte diese Theorien in

der (simulierten) Praxis zu testen. [6]

Patentkontroverse zwischen Sperry Rand und Honeywell.

Sperry Rand, die nach der Fusion der Remington Rand und Sperry im Besitz der ENIAC - Patente waren mussten sich in den Jahren 1971 bis 1973 wegen eben diesen vor Gericht verantworten. Ursprünglich verklagte die Sperry Rand die konkurrierende Firma Honeywell auf die Zahlung von Lizenzgebühren, da diese nach der Meinung von Sperry unberechtigtweise das ENIAC-Patent nutzen. Daraufhin legte Honeywell eine Gegenklage vor, da ihrer Meinung nach ENIAC als ein abgeleitetes Werk keine echte Erfindung war und somit die Patente ungültig wären. Die Klage beruhte auf der Behauptung, Mauchly hätte die Funktionsweise des ENIAC einem kleinen Forschungsrechner, dem *Atanasoff-Berry Computer(ABC)* nachempfunden. Der ABC war ein Forschungsprojekt des Iowa State College, entwickelt von John Atanasoff und Clifford Berry in den Jahren 1937 - 1941. Der ABC war sollte ein Spezialrechner zur Lösung Linearer Gleichungssysteme werden. Er verwendete, wie der ENIAC, Vakuum-Röhren zur Berechnung. Jedoch wurden diese Rechnung im ABC im Binärsystem durchgeführt, nicht wie im ENIAC im Dezimalsystem Insgesamt war der gesamte Maßstab des ABC jedoch sehr viel kleiner als der des ENIAC, besonders im Bezug auf die Rechengeschwindigkeit³. Er wurde jedoch bis Ende des Projekts nie fertiggestellt und hat nie produktiv gerechnet. Tatsächlich besuchte Mauchly im Jahr 1941 Atanasoff, unterhielt sich mit ihm über den ABC und hatte sogar die Möglichkeit, den ABC für längere Zeit zu studieren. Der Patentstreit endete mit einem Sieg für Honeywell. Der zuständige Richter stimmte zwar zu, dass der ABC und der ENIAC sich zwar in wichtigen Punkten unähnlich waren, die generelle Idee eines automatischen Computers jedoch von Atanasoff stammte und Mauchly diese Ideen im ENIAC umsetzte. Weiterhin sprach die späte Patentanmeldung durch Eckert und Mauchly gegen die Gültigkeit des Patents. Laut Gericht hätte das Patent deutlich früher angemeldet werden müssen. Aus diesen Gründen invalidierte das Gericht das ENIAC Patent. Somit war das ENIAC Patent von Mauchly und Eckert (und in Folge das Patent der Sperry Rand) ungültig und nicht durchsetzbar. Der ABC wurde nach Projektende abgebaut und existiert heute nur noch als Nachbildung. Eine weitere Frage, die während dieses Gerichtsverfahrens geklärt wurde, war die Frage nach dem tatsächlichen Erfindern des ENIAC. Hierzu stellte der Richter fest, dass viele der Ingenieure der Moore School bedeutende Arbeiten zum ENIAC beigetragen haben, die Erfindung des ENIAC als ganzes bleibt jedoch weiterhin Eckert und Mauchly zugeschrieben. [17]

3.1.4 Die Nachfolger des ENIAC

Der direkte Nachfolger des ENIAC war der EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer). Doch noch bevor der EDVAC veröffentlicht wurde, gab es bereits einige Nachfolger, die durch von Neumanns Paper *First Draft of a Report on the EDVAC* beeinflusst wurden und nach diesem Vorbild gebaut waren. So entstand im Vereinigten Königreich der EDSAC (Electronic delay storage automatic calculator) [19], der Mauchly-Eckert Computer BINAC (Binary Automatic Computer) und später der erste kommerzi-

²Ballistische Tabellen wurden in deutlich kleinerer Anzahl benötigt

³ENIAC rechnete mit 10000 Pulsen pro Sekunde, der ABC mit 60

ell erfolgreiche Großrechner, UNIVAC (Universal Automatic Computer). Neben diesen direkten ENIAC Nachfolgern entstanden weitere wichtige Maschinen. Am Institute of Advanced Study entwickelte Von Neumann den *IAS - Computer*, in Harvard entsteht unter Leitung von Howard Aiken der *Mark 1* und das MIT entwickelte mit dem *Whirlwind* den ersten echtzeitfähigen Computer. [17]

EDVAC.

EDVAC wurde bereits während der ENIAC noch im Bau war, entworfen. EDVAC sollte viele der Designfehler im ENIAC verbessern und Entwicklungen, die aus Zeitgründen nicht im ENIAC implementiert wurden, enthalten. EDVAC sollte der erste Von-Neumann Rechner mit im Hauptspeicher gelagerten Programmen werden. EDVAC arbeitete im Vergleich zu ENIAC mit binären Zahlen, die aus der dezimalen Eingabe in das Binärsystem übersetzt wurden. Außerdem wurde die große Anzahl der im ENIAC verwendeten Vakkum-Röhren deutlich auf 3900 reduziert. Auch Strom- und Platzverbrauch wurden deutlich reduziert. Trotzdem erreichte der EDVAC dank der höheren Taktrate in etwa die gleiche Rechengeschwindigkeit wie der ENIAC. Eine der größten Änderungen war der Hauptspeicher des EDVAC, ein Quecksilber Verzögerungsspeicher (*Mercury Delay Line Memory*), der es erlaubte, Werte und ganze Programme und Instruktionen zwischen zu speichern. [20] Die Fertigstellung des ENIAC verzögerte sich jedoch immer wieder, da viele der ENIAC-Ingenieure zusammen mit Eckert und Mauchly inzwischen die Moore School wegen der Patentregelung der Universität verlassen hatten. [17] Der EDVAC stellt bis heute einen Meilenstein in der Geschichte der Computer dar. An ihm wurde das erste mal die *Stored Program Architektur* entwickelt⁴ entwickelt, was ihn nicht unähnlich zu den modernen Computern der heutigen Zeit macht. [20]

BINAC.

BINAC war der erste Computer der Eckert-Mauchly Computer Corporation. Außerdem war er einer der ersten Computer, der für einen kommerziellen Zweck gebaut wurde. Der BINAC wurde 1947 durch die Northrop Aircraft Company in Auftrag gegeben. Besonders am BINAC war die Anforderung der Northrop Aircraft Company, dass der fertige Computer im ganzen in ein Flugzeug passen musste. Das Design orientierte sich stark am Design des EDVAC, dessen Anfänge Eckert und Mauchly in ihrer Zeit an der Moore School noch miterlebt hatten. BINAC rechnete, wie der EDVAC, intern im Binärsystem und stellte Ergebnisse im Oktalformat dar. Außerdem setzte er ebenfalls die Stored Programm Architektur um. Ebenfalls lernten Mauchly und Eckert aus der Fehleranfälligkeit des ENIAC. Einerseits wurden lediglich 700 Vakuum-Röhren statt der 18000 aus dem ENIAC verbaut. Um trotzdem eine zum ENIAC vergleichbare Geschwindigkeit zu erreichen, wurde die Taktrate wie beim EDVAC deutlich erhöht. Andererseits bestand der BINAC aus zwei identischen Einheiten, die gegenseitig ihre Ergebnisse überprüfen und so schnell festgestellt werden konnte, ob eine Rechnung korrekt abgeschlossen wurde. Eine weitere Neuerung waren die Magnetbänder, die zur Ein- und Ausgabe verwendet wurden. Diese konnten deutlich schneller gelesen und geschrieben werden als die bisher verbreiteten Loch-

⁴Andere Computer setzten diese wegen der vielen Verzögerungen jedoch noch vor dem EDVAC um

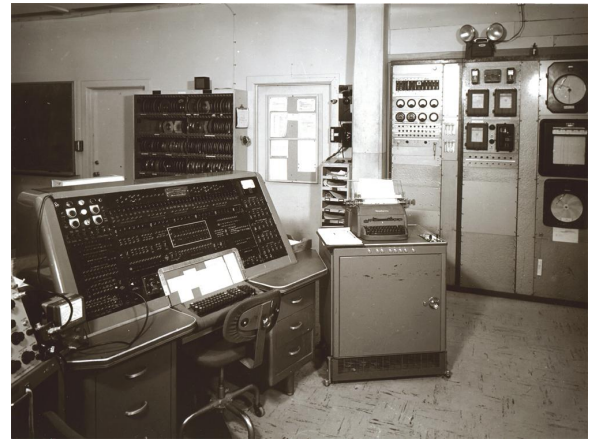


Figure 4: Ein/Ausgabepult des UNIVAC

karten. Dies war ein großer Schritt, die große Diskrepanz zwischen hoher, interner Rechengeschwindigkeit und langsamer Ausgabe der Ergebnisse, die alle Computer der Zeit betraf, zu beheben. BINAC wurde im August 1949 fertiggestellt und dem Auftraggeber präsentiert. BINAC rechnete bei dieser Präsentation für etwa sieben Stunden mit lediglich einer Pause, um eine defekte Komponente zu ersetzen und wurde somit von der Northrop Aircraft Company erfolgreich abgenommen und abtransportiert. Nach Aufbau in den Räumen der Firma in Kalifornien war BINAC von einer großen Anzahl von Fehlern geplagt. Die Ingenieure der Northrop Aircraft Company beschwerten sich über den schlechten äußerlichen Zustand des BINAC und die hohe Fehleranfälligkeit. Bis heute ist nicht geklärt, ob der BINAC während des Transports und des Wiederaufbaus so beschädigt wurde, oder ob Eckert und Mauchly, von finanziellen Schwierigkeiten unter Druck gesetzt, jede Möglichkeit Einsparungen zu machen, nutzen. BINAC war somit kein kommerzieller Erfolg. Er wurde lediglich ein einziges mal gebaut und rechnete nie verlässlich genug, um einen produktiven Einsatz zu ermöglichen. [17]

UNIVAC.

UNIVAC war der erste kommerziell erfolgreiche Computer in den USA. Während im Vereinigten Königreich bereits der Ferranti Mark 1 und in Deutschland der Zuse Z4 auf dem Markt waren, gab es in den USA vorher nur den BINAC, der an einen Privatkunden ausgeliefert wurde. Da dieser jedoch nie kommerzielle Relevanz erreichte und nur ein einziges mal gebaut wurde, gilt der UNIVAC als erster erfolgreicher Großrechner. Die Entwicklung des UNIVAC begann noch bevor der Bau des BINAC abgeschlossen war. In vielen Punkten diente der BINAC als Prototyp und Testplattform für neue Entwicklungen, die erst im UNIVAC tatsächlich marktreife erreichten. Ausgeliefert wurde der erste UNIVAC in 1951 an das *US Census Bureau*, nachdem die Eckert-Mauchly Computer Corporation nach finanziellen Schwierigkeiten von Remington Rand aufgekauft wurde.

Der UNIVAC ähnelte dem BINAC in vielen Punkten. So verwendete der UNIVAC ebenfalls ein Magnetband für die Ein- und Ausgabe (mit deutlich weniger technischen Schwierigkeiten). Außerdem setzte er ebenfalls die Von-Neumann Architektur mit im Hauptspeicher gelagertem Programm-

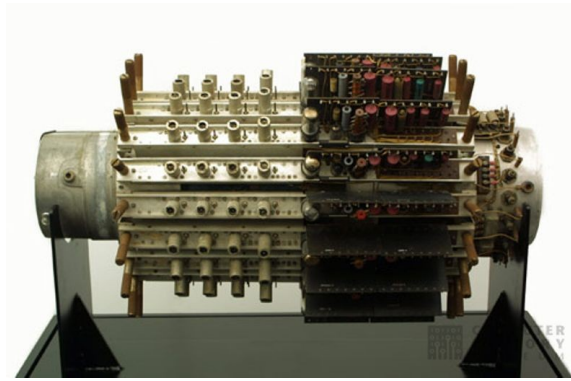


Figure 5: Delay Line Memory des UNIVAC

code um. Der Hauptspeicher wurde wieder mittels eines Quecksilber-Verzögerungsspeichers (Abbildung 5) realisiert. Insgesamt war UNIVAC aber wieder ein deutlich größerer Rechner als der BINAC und ähnelte in den Dimensionen eher dem ENIAC. Auch das Dezimalsystem wurde für die interne Verarbeitung von Zahlen wieder dem Binärsystem vorgezogen. [17] Besondere Bekanntheit erlangte der UNIVAC durch seine Wahlprognose im Jahr 1952. Der UNIVAC führte eine Hochrechnung ausgehend von einem Prozent der bereits ausgezählten Stimmen durch und prognostizierte, dass General Dwight D Eisenhower das Präsidentschaftsrennen gegen seinen Konkurrenten Adlai Stevenson mit großem Vorsprung gewinnen würde. Da die konventionellen Umfrageergebnisse eher Stevenson vorne sahen bestand der US-Fernsehsender CBS darauf, dass UNIVAC falsch gerechnet hatte und veröffentlichte das Ergebnis der Hochrechnung nicht. Am Ende des Wahltages stellte sich dann heraus, dass die Abweichung zwischen echtem Wahlergebnis und UNIVACs Hochrechnung unter einem Prozent betrug. [12]

3.2 Aufbau und Funktionsweise

Der ENIAC war ein voll elektronischer, auf Röhrentechnologie basierender Computer. Wobei er sich eher als Zusammenstellung von in sich unabhängigen Komponenten verstand, welche durch das Verbinden mit Kabeln zu einem Gesamtrechner verknüpft werden konnten. Im Folgenden wollen wir den ENIAC anhand von Abb. 6 in seine Bestandteile zerlegen und diese genauer untersuchen.

3.2.1 Ursprüngliche Konfiguration

Vakuumröhren.

Die einfachste Form der Vakuumröhre im ENIAC hatte lediglich zwei Anschlüsse. Legt man an jene eine Spannung an, hält die Röhre diese und gibt sie bei Bedarf wieder ab. Wenn man so will, speichert die Vakuumröhre also ein wertkontinuierliches Datum ab. Beim ENIAC allerdings wurde ausschließlich auf die Polarität der Röhre geblickt. Je nach dem, an welchem der beiden Pole eine positive, bzw. negative Spannung anlag, wurde die Röhre als an oder aus interpretiert. Eine dieser Röhren im ENIAC kann also als ein Bit angesehen werden. [8]

Die Cycling & Initiating Unit.

Das Starten einzelner Subroutinen und Aktionen an den verschiedenen Bauteilen erfolgte durch die Übertragung von

elektrischen Impulsen. Um die Maschine in Gang zu setzen wurde von der Initiating Unit ein initiales Signal erzeugt, das an die erste anzusprechende Komponente übermittelt wurde.

Diese Impulse wurden jedoch nicht ausschließlich für das Auslösen von Prozeduren, sondern für verschiedenste Aufgaben im ganzen ENIAC verwendet. Zum Beispiel generierte sie jeden Zyklus eine Serie von 9 Impulsen, die von den Akkumulatoren für arithmetische Operationen genutzt wurden. Auch Overflow Signale oder Programmimpulse wurden nie von den Einheiten des ENIAC direkt produziert. Sie wurden stets lediglich von der Cycling Unit an die gewünschte Komponente weitergeleitet. Aus diesem Grund mussten kontinuierlich für jeden Rechenzyklus eine Reihe von Signalen erzeugt und auf unterschiedlichen Kanälen verteilt werden. Eben darin bestand die Aufgabe der Cycling Unit, die somit als zentraler Taktgeber für die Rechenmaschine gesehen werden kann.

Der Master Programmer.

Der Master Programmer war, wie der Name schon sagt, ein wichtiges Instrument, das zur Programmierung des ENIAC eingesetzt wurde. Er diente als Kontrollstruktur, in welcher festgelegt werden konnte, wann welche Subroutine einer Berechnung angesteuert werden sollte. Es bestand die Möglichkeit verschiedene Teilprogramme nacheinander aufzurufen oder diese mehrmals zu wiederholen, bevor ein weiterer Schritt initiiert wurde. Hierfür besaß auch der Master Programmer einige Ringzähler, die dessen Zustand abspeicherten. Abhängig davon wurden verschiedene Sequenzen im ENIAC angesprochen. Weiterhin bestand die Möglichkeit, nach Beendigung von Operationen die dann ausgesendeten Programmimpulse an den Master Programmer zurückzuführen. Dieser konnte diese anschließend weiterleiten, oder aber sie alternierten die Ringzähler und versetzten die Maschine so in einen anderen Zustand.

Die Portable Function Tables.

Der ENIAC besaß weiterhin drei sogenannte Function Tables. Diese waren mobil und somit an genau der Komponente platzierbar, an der sie für die aktuelle Berechnung benötigt wurden. Die Vorderseite der Function Tables bestand aus einer Matrix von Drehschaltern, mithilfe dieser häufig genutzte Funktionswerte eingestellt werden konnten. Stellte man nun zwischen einem Function Table und einem Akkumulator eine kabelgebundene Verbindung her, konnte auf die abgelegten Werte in Form eines read only Speichers zugegriffen werden. [2]

Die Akkumulatoren.

Der Kern des ENIAC bestand aus seinen insgesamt 20 Akkumulatoren, die im Wesentlichen je drei Funktionen erfüllten. Einerseits dienten sie zur Speicherung einer positiven oder negativen Dezimalzahl mit bis zu zehn Ziffern, andererseits aber auch zur Darstellung dieser. Als Anzeige für den gespeicherten Inhalt wurde eine Matrix bestehend aus Neon Lämpchen eingesetzt, die in der oberen Hälfte von Abb. 7 angesiedelt ist. Die Bestandteile im unteren Bereich kommen später ins Spiel, wenn wir uns der letzten Aufgabe des Akkumulators zuwenden, der Programmierung. Selbstverständlich wurden sie auch dafür genutzt, Operationen über Zahlen auszuführen. Für diesen Zweck entwarf man je für Addition/Subtraktion, Multiplikation, Division und einige

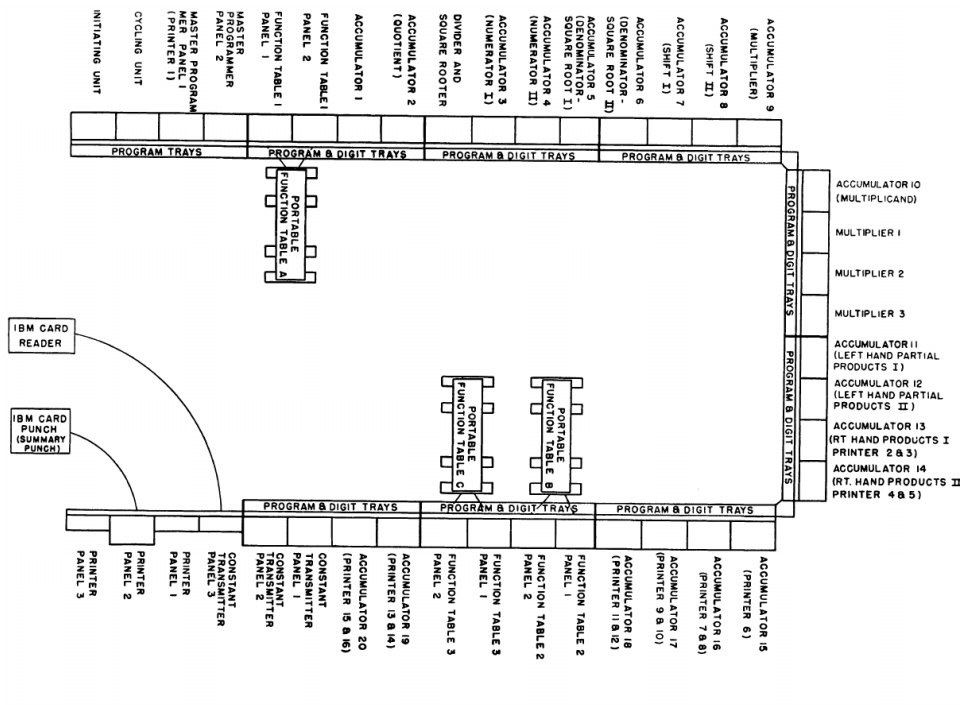


Figure 6: Komponenten des ENIAC

andere Verfahren eigene, spezialisierte Komponenten.

Wie bereits erwähnt speicherte und verarbeitete der ENIAC jede Zahl im Dezimalformat. Für diesen Zweck wurden in jedem Akkumulator zehn, im ganzen ENIAC 200, sogenannte Ringzähler verbaut. Ein solcher Ringzähler war in der Lage eine einzelne Ziffer abzuspeichern. Zusätzlich setzte man für die Unterscheidung zwischen negativen und positiven Zahlen noch ein Vorzeichen Flip-Flop ein, das zwischen den Zuständen P bei Zahlen größer Null und M bei Zahlen kleiner Null unterschied. Somit ergab sich pro Akkumulator ein Zahlenbereich von $-(10^{10} - 1)$ bis $10^{10} - 1$, wobei Zahlen kleiner Null im Zehnerkomplement bezüglich 10^{10} dargestellt wurden. Jede positive Zahl wurde so in für uns natürlicher Schreibweise abgelegt. Der Wert P 0000012300 stellte die Zahl 12300 dar. Zum Bilden einer negativen Zahl n zieht man den Betrag von n von 10^{10} ab und stellt das Vorzeichen auf M. Wollte man also den Wert -1200 darstellen, musste im ENIAC das Datum M 9999998800 abgespeichert werden. Nun waren diese Zähler in solch einer Art mit einander verbunden, dass sie im Falle eines Overflows einen Impuls an den nächst höheren Ringzähler weitergaben und diesen somit um eins erhöhten. Sollte jedoch der Zähler der höchsten Zehnerpotenz einen Übertrag erzeugen, so alternierte dieser im Anschluss das Vorzeichenbit. [8]

Die Dekadenzähler.

Die zu je zehn Stück in den Akkumulatoren verbauten Dekadenzähler waren als Ringzähler aufgebaut. Sie Bestanden aus je zehn Röhren, die als großes Flip-Flop agierten. Das heißt, von den zehn Röhren wurde immer genau eine als eingeschaltet interpretiert. An jedem Ringzähler war weiterhin ein Signaleingang angebracht, der, sobald ein Impuls angelegt wurde, den Zähler um eine Stufe erhöhte. Da der ENIAC negativen Zahlen als Komplement darstellte, war es nicht nö-

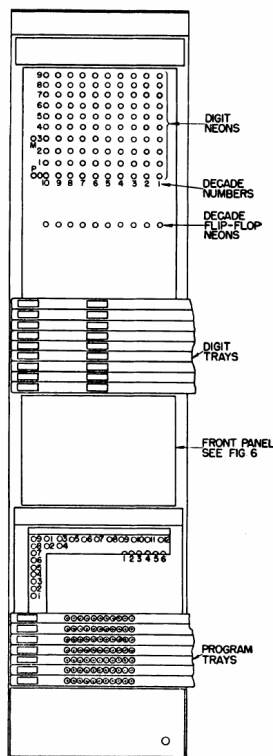


Figure 7: Akkumulator des ENIAC

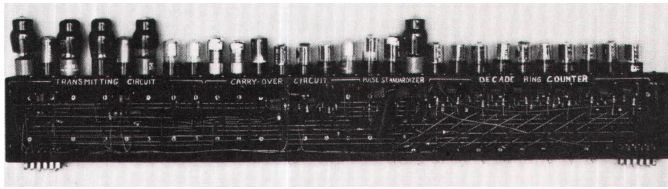


Figure 8: Einer von 200 Ringzählern des ENIAC

tig, dass der Dekadenzähler rückwärts zählen konnte. Da es sich bei diesem Konzept um einen Ringzähler handelt, wird er, wenn bereits die zehnte Röhre aktiviert ist und ein Signal eintrifft, wieder in den ersten Zustand zurückspringen. Bei diesem Zurücksetzen wird auch ein Overflow Signal an die nächste Komponente weitergeleitet. Die restlichen Bestandteile dienten unter anderem der Signalaufbereitung oder dem Overflow Mechanismus. [2]

Lochkarten -Leser und -Stanzer.

Aufgrund von Zeitdruck wurde für die Ein- und Ausgabe großer Datenmengen das damals bewährte Verfahren der Lochkarten verwendet. Jedoch warf diese Entscheidung einen sehr großen Nachteil für das System auf. Die interne Datenverarbeitung im ENIAC erfolge voll elektronisch mit hohen Geschwindigkeiten, als Schnittstelle nach außen jedoch dienten verhältnismäßig langsame mechanische Verfahren. Somit stellten die Lochkarten einen enormen limitierenden Faktor für die Operationsgeschwindigkeit des ENIAC dar. [17]

Die Constant Transmitter.

Um letztendlich die Werte des Lochkartenlesers in den Rechner zu übertragen und andersherum, wurden die Constant Transmitter verwendet. Sie übersetzten die Zahlen in Werte, die die jeweils andere Komponente verarbeiten konnte. [2]

3.2.2 Später hinzugefügte Komponenten

The Register.

1947 beschloss das Ballistic Research Lab den ENIAC um zwei neue Paneele zu erweitern. Diese stammten aus der von Eckert und Mauchly neu gegründeter Firma, der *Electronic Control Company*. Eines dieser Bauteile wurde bekannt als *The Register* und sollten den eingeschränkten Arbeitsspeicher der Akkumulatoren erweitern. Hierfür sollten *Delay Lines* eingesetzt werden. Jedoch hatten Eckert und Mauchly keine Erfahrungen auf dem Gebiet der Produktion von Verzögerungsspeichern. Am Schluss war es eine Mischung aus zu hohen Kosten und Misstrauen in die Firma, dass man beschloss die Komponenten stattdessen von der Moore School anfertigen zu lassen. Doch nach über zwei Jahren Entwicklungszeit war immer noch kein funktionierendes Produkt geschaffen, wodurch es *The Register* nie zur Anwendung im ENIAC brachte.

The Converter.

Die zweite Gerätschaft, welche die Electronic Control Company dem ENIAC hinzufügen wollte war der sogenannte *Converter*. Diese Komponente war als Auswahlgerät für Routinen konzipiert. Als Eingabe konsumierte sie eine zwei-

stellige Dezimalzahl. Abhängig von dieser wurde ein Programmimpuls an einen von 100 Ausgängen übermittelt. So konnten Befehle effizient dekodiert und die entsprechenden Teilprogramme angesteuert werden. Im Gegensatz zum *Register* jedoch konnte dieses Gerät erfolgreich konstruiert werden und erwies sich im späteren Betrieb des ENIAC als sehr nützlich.

Der Magnetkernspeicher.

Einer der größten einschränkenden Faktoren des ENIAC war dessen geringer beschreibbarer Arbeitsspeicher, der auf die 20 Akkumulatoren begrenzt war. So war es ein gigantischer Sprung nach vorne, als die Maschine 1953 mit einem Magnetkernspeicher ausgestattet wurde. Dieser zuverlässige, kompakte Apparat war in der Lage die Inhalte von 100 Akkumulatoren abzuspeichern. Einen riesen Vorteil gegenüber den Lochkarten, die bis dato für das Zwischenspeichern größerer Datenmengen zum Einsatz kamen, ermöglichte die neue Speichertechnologie, durch die Bereitstellung von *random access* Zugriff auf dessen Inhalte. Doch mussten, um diese neue Technologie nutzen zu können, einige technische Herausforderungen gestemmt werden. Der ENIAC rechnete wie bereits erwähnt mit zehnstelligen Dezimalzahlen. Der Magnetkernspeicher jedoch arbeitete ausschließlich mit vier Bit großen Binärdaten. Es musste also eine Hardwareschnittstelle entwickelt werden, welche die Zahlenpulse des ENIAC in für den Speicher verwertbare Daten umwandeln konnte. Auch der, seit dem neuen Code Paradigma definierte Befehlssatz, musste um Lese- und Schreibinstruktionen erweitert werden. Nach der Installation folgte eine lange Serie von Problemen und Wartungsarbeiten, die vor allem auf die neuen Fehlermuster und auf das unerfahrene Personal zurückzuführen sind. Letztenendes konnten die Ausfallzeiten der Maschine wieder in den Griff bekommen werden und der ENIAC profitierte fortan von seinem enorm vergrößerten Arbeitsspeicher. [9]

3.2.3 Programmierung

Das Programmieren des ENIAC erfolgte anfangs ausschließlich durch das Stecken von Kabeln und Stellen von Schaltern. Die wichtigsten Stellen, an welchen dies erfolgte waren die Akkumulatoren und der Master Programmer.

Das Akkumulator Panel.

Im Folgenden wollen wir uns anhand von Abb. 9 ansehen, wie die damaligen Programmierer bei ihrer Tätigkeit vorgegangen sind. Oben am Panel sind die Digit In- und Output Terminals zu finden. Diese wurden genutzt, um gespeicherte Zahlen von einer zu einer anderen Komponente des ENIAC zu übertragen. Die ersten fünf Steckplätze dienten als Inputs, die restlichen beiden als Outputs. Wobei der mit A beschriftete Port die gespeicherte Zahl unverändert ausgab, der mit S betitelte jedoch das Zehnerkomplement weiterreichte, wodurch Subtraktionen modelliert werden konnten. Darunter befanden sich jeweils Paare von Drehschaltern. Jedes von diesen kann gewissermaßen als unabhängig programmierbare Subroutine angesehen werden. Beispielhaft betrachten wir nur die Gruppen fünf bis zwölf. Der obere Schalter definierte, ob eine Zahl von einem Input konsumiert oder der Inhalt des Akkumulators an einen Output gesendet werden sollte. Mit dem darunterliegenden konnte angegeben werden, ob die Operation, die abhängig vom Typs des Akkumulators war, mehrmals ausgeführt werden sollte. Am Boden des Panels

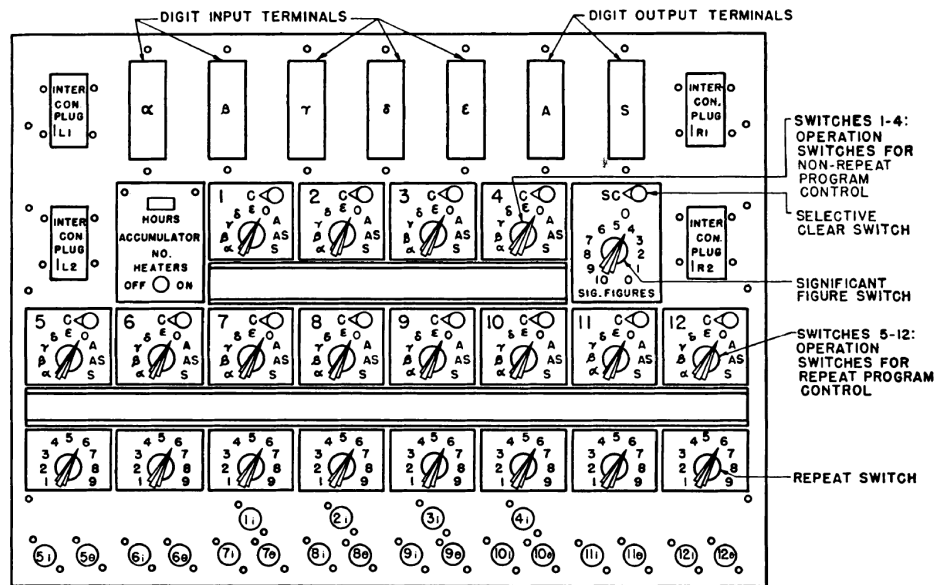


Figure 9: Front Panel eines Akkumulators

angesiedelt, liegen die Steckplätze, über welche Programimpulse übertragen werden konnten. Mithilfe dieser wurde ein entsprechendes Teilprogramm in Gang gesetzt, wobei natürlich penibelst darauf geachtet werden musste, die zugehörigen Abläufe in anderen Instrumenten des ENIAC zeitgleich zu starten. Um zu ermöglichen, dass nach Abschluss einer Aktion eine weitere gestartet werden konnte, wurde am Ende einer jeder Operation ein Programmimpuls an diesen Ports ausgegeben.

Ein Beispielprogramm.

Wie müsste also der ENIAC konfiguriert werden, wollte man einen Wert x fünf Mal zu einem Wert y addieren? Angenommen wir haben zwei Akkumulatoren I und II. In I ist bereits unser Wert x und in II y hinterlegt. Nun sucht man sich eine freie Schaltergruppe an beiden Akkumulatoren, als Beispiel 5 bei Akkumulator I, 7 bei II. Der Operation Switch Nummer 5 von I wird auf den Digit Output A gestellt, da die Zahl unverändert ausgegeben werden soll. Da x fünf mal zu y addiert werden soll, wird der Repeat Switch auf 5 gestellt. Anschließend wird der Digit Output A zu einem beliebigen Input von II verbunden. Als beispiel wählen wir an dieser Stelle den Digit Input β . Als Konsequenz muss nun der Operation Switch 7 von Akkumulator II auf β gestellt werden, der Repeat Switch, wie auch bei I, auf 5. Als letzter Schritt müssen nun beide Akkumulatoren gleichzeitig an den Programm Puls Inputs 5, bzw. 7 ein Signal erhalten, um die Berechnung zu starten. Der Akkumulator I sendet nun fünf mal die Zahl x an das Digit Terminal A. Dieses ist mit β von II verbunden, wodurch dieser x fünf mal erhält. Da die Sequenz gestartet wurde, die β fünf mal ausliest, wird x 5 mal an den vorher in II gespeicherten Wert y addiert.

Parallelität.

Dadurch, dass der ENIAC aus unabhängigen Geräten besteht, sind diese auch nebenläufig verwendbar. Diese Funktionalität jedoch ist nur in begrenztem Maße nutzbar. Pro-

blem dabei ist die nicht vorhandene Möglichkeit, die parallelen Abläufe nach Beendigung wieder zu synchronisieren. Alles muss vorher taktgenau geplant und so umgesetzt werden, dass alle voneinander abhängigen Berechnungen rechtzeitig fertig werden.

Bedingte Programmierung.

Ursprünglich war der ENIAC nicht darauf ausgelegt bedingte Operationen zu unterstützen. In den späteren Jahren stellten die Entwickler jedoch fest, dass es möglich war mit kleinen hardwareseitigen Modifikationen bedingte Schleifen zu implementieren. Man setzte einen Akkumulator als Zähler ein, der nach jedem Takt einen Wert von seinem Inhalt abzog. Wenn der Wert schlussendlich unter Null fiel, wurde das Vorzeichenbit alterniert. Das daraufhin vom Vorzeichen Flip Flop emittierte Signal konnte dann an einen Programm Puls Input des Master Programmers weitergeleitet werden, woraufhin dieser in einen anderen Zustand versetzt wurde. Mit dieser Methode bestand nun die Möglichkeit, eine bestimmte Operation so oft auszuführen, bis eine Bedingung erreicht wurde. Nach Umsetzung des neuen Code Paradigmas wurden die Möglichkeiten im Bereich der bedingten Programmierung nochmals drastisch erweitert. [9]

3.2.4 Datentransfer im ENIAC

Wollte man eine Zahl, beispielsweise für eine Addition, von einem Akkumulator zum anderen übertragen, mussten sie via den Digit Terminals miteinander verbunden werden. Ein solcher Digit Connector hatte für jede Ziffer eines Akkumulators, sowie für das Vorzeichenbit und die Erdung einen dedizierten Pin. Die Verbindung war so konstruiert, dass über solch ein Kabel jeder Ringzähler des einen mit dem entsprechenden Pendant des anderen Akkumulators verbunden war. Bei der schlussendlichen Übertragung wurde jede Ziffer schlicht als die Anzahl von Impulsen interpretiert, der sie entsprach. Wollte man beispielsweise die Ziffer fünf übertra-

gen, leitete der Akkumulator fünf Signale des Tens Pulses⁵ an das Digit Terminal weiter. Dieses war in der Regel an einen der Datenbusse des ENIAC, die sich an fast allen Komponenten befanden, verbunden. Eine weitere Einheit konnte diesen Wert an einer anderen Stelle vom Datenbus auslesen. Neben dem Datenbus war allerdings auch ein Steuerbus vorhanden. Dieser diente der Übertragung der Programmimpulse. Mithilfe des Datenbusses konnten Folgeroutinen gestartet oder der Master Programmer in einen anderen Zustand versetzt werden. [2]

Beispielhafte Addition.

Stellen wir uns nun ein solches Setup mit einem Additions-Akkumulator vor. Bekam der sendende Akkumulator einen Programmimpuls zum starten seiner Operation, leitete er den Zehnerimpuls an alle seine Ringzähler weiter. Dies hatte zur Folge, dass auf jeden der Zähler zehn addiert wurde, was nach Beendigung zur Ausgangssituation führte. Sobald jedoch einer der Zähler einen Overflow erzeugte, wurde jedes der kommenden Signale über das Digit Terminal ausgegeben. Dies wiederum erhöhte dann pro Impuls den entsprechenden Ringzähler des empfangenden Akkumulators, der somit diese Ziffer zu seinem gespeicherten Wert addierte. Es war also im ENIAC nicht der Fall, dass der addierende Akkumulator für eine gelesene Zahl n den ersten Ringzähler n Mal erhöhte, sondern es wurden alle Ringzähler gleichzeitig zusammengezählt. [17]

Die Monte Carlo Simulationen.

Wie bereits erwähnt war eine der ersten großen Aufgaben des ENIAC die Simulation der Wirkung von Atombomben nach dem Monte Carlo Prinzip. Dafür war es notwendig, die Reaktionen der Neutronen innerhalb der Atome zu simulieren. Federführend für die Aufbereitung der Berechnungen war John von Neumann. Von Neumann schlug vor, ein Atommodell bestehend aus konzentrischen Kreisen zu verwenden. In jedem der Ringe waren eine bestimmte Anzahl von Neutronen, sowie Materialien, die mit ihnen reagierten, angesiedelt. Dies erleichterte die Implementierung stark, da für die Simulation dieses Modells nur Position und Geschwindigkeit der Neutronen, sowie die vergangene Zeit benötigt wurden. Von Neumann favorisierte klar die Verwendung des ENIAC für diese Simulation. Er schätzte, dass die Hardwarelimitationen des Rechners für das Experiment ausreichen würden. Er befasste sich auch konkret damit, wie das Problem auf den ENIAC anwendbar gemacht werden konnte. Sein Ansatz war schlussendlich, dass jeweils eine Lochkarte den exakten Zustand eines Neutrons zu einem festen Zeitpunkt repräsentierte. Der ENIAC würde also die Daten einer Karte einlesen und anschließend mit der Simulation des weiteren Verhaltens des Neutrons beginnen. Mithilfe von Zufallszahlen wurde ermittelt, wie weit das Teilchen sich bis zur nächsten Kollision bewegte. Anschließend wurde die neu generierte Position erneut in eine Lochkarte gestanzt und ausgegeben. Dabei wurde zwischen zwei verschiedenen Ausgängen unterschieden. Sollte das Neutron einen der Kreise verlassen und sich in einen anderen bewegen, wurde dies vermerkt. Anders sah es aus, sollte ein Neutron mit einem anderen Teilchen kollidieren. So wurde wieder unter Zuhilfenahme einer zufälligen Zahl die Art der Kollision bestimmt.

Das Neutron konnte anschließend absorbiert werden, in eine andere Richtung abprallen oder eine nukleare Spaltung einleiten. Diese Prozesse wurden nun immer und immer wieder ausgeführt, wodurch sich irgendwann ein abzuschätzender Ausgang einer solchen Reaktion abzeichnen ließ. Jedoch wurde eine funktionsfähige Variante einer Monte Carlo Simulation nie auf dem ursprünglichen ENIAC fertiggestellt. Noch vorher passte man den ENIAC an das neue Code Paradigma an, nach welchem auch schließlich die Monte Carlo Berechnungen implementiert wurden.

Dies hatte auch starke Auswirkungen auf den anfänglichen Plan, die Simulation zu gestalten. Notation konnte vereinfacht und auf den ENIAC spezialisiert werden. Einzelne Operationen konnten in wiederkehrenden Subroutinen abgelegt werden. Weiterhin konnten, im Gegensatz zum ersten Entwurf, der vorsah, die Zufallszahlen mithilfe der Lochkarten in die Maschine einzugeben, mit dem neuen Code Paradigma pseudo Zufallszahlen vom Rechner erzeugt werden. Eine weitere Veränderung fand in der Simulation der Neutronen statt. Man verwarf die Idee, ein Teilchen bis zum Zeitpunkt einer Kollision oder anderen Aktion zu verfolgen. Stattdessen unterteilte man die Simulation in Zeitabschnitte, sogenannte *census times*. Fortan wurde eine Annäherung der Zustände von mehreren Teilchen verwaltet und nach Ablauf der *census time* auf Lochkarten dokumentiert. Das Konzept der *census times* wurde fortan auch als gängige Praxis bei verschiedensten Arten von Monte Carlo Experimenten angewandt. Eine letzte große Änderung war das Überarbeiten der Idee, jeweils ein Neutron bis zur nächsten Aktion zu verfolgen und anschließend eine Lochkarte zu stanzen. Da man nun lediglich den Zustand der Neutronen nach Ablauf der *census time* vermerkte, konnten auch mehrere Aktionen eines Teilchens simuliert werden, bevor der Zustand wieder dokumentiert wurde. Nach jeden Berechnungszyklus wurden alle dokumentierten Spaltungen, die wiederum Teilchen freisetzten, nochmals in den Simulator gegeben. Der Grund hierfür war, dass die Zustände der neu entstandenen Teilchen für die verbleibende *census time* nach der Spaltung noch nicht berechnet wurden. [9]

3.2.5 Das neue Code Paradigma

Der ENIAC war, vor allem aus zeitlichen Gründen bei der Konstruktion, an das damals wohl Bekannte Konzept der menschlichen Computer angelehnt. Zuerst wurde ein mathematisches Problem in einzelne Additionen und Subtraktionen zerlegt. Anschließend wurden diese Teilprobleme von einer Vielzahl an menschlichen Computern mithilfe von mechanischen Rechenmaschinen bearbeitet und die Zwischenergebnisse an den nächsten weitergegeben. Diese Charakteristik findet sich auch beim ENIAC. Zuerst wurden die Aufgaben in kleine Bestandteile heruntergebrochen, Startwerte über die Function Tables oder in Form von Lochkarten dem ENIAC zugeführt. Für jeden Akkumulator wurde seine spezifische Aufgabe definiert und mithilfe der Daten- und Steuerbusse wurden Ergebnisse nach Vollendung zur weiteren Verarbeitung weitergereicht. Man könnte die ursprüngliche Version des ENIAC nach jeder Neuprogrammierung auch als spezialisierten Rechner für ein Problem bezeichnen. Der ENIAC ersetze so die menschlichen Computer durch seine Akkumulatoren, um die einzelnen Elementarprobleme zu lösen. Der Vorteil dieser Herangehensweise war, dass in der Methodik, Probleme zur Berechnung aufzuarbeiten, keine großen Änderungen

⁵Eine Serie von zehn aufeinanderfolgenden Impulsen, die jeden Takt von der Cycling Unit erzeugt wurden

geschehen mussten. Weiterhin rechneten die Akkumulatoren des ENIAC deutlich schneller und vor allem zuverlässiger als ihre menschlichen Pendants. [15]

Doch bereits während der Planungsphase des ENIAC wurde einigen Wissenschaftlern, allen voran John von Neumann, die limitierten Möglichkeiten der Maschine bewusst. Durch die Anzahl der Akkumulatoren, deren Schalterpaare und die begrenzte Menge an Phasen des Master Programmers war ein physikalisches Limit für die Komplexität von Programmen vorhanden. Und so schrieb er, mit den gesammelten Erfahrungen aus der Konstruktion des ENIAC, den *First Draft of a Report on the EDVAC*. Neben der Von Neumann Architektur stellte er auch eine völlig neue Art dar, den Computer zu programmieren. Anstatt für jedes Problem die Maschine physikalisch zu verändern, einen festen Befehlssatz zu entwickeln. Diese Befehle können anschließend, zum Beispiel in Form von Lochkarten, in den Rechner eingelesen werden, welcher diese dann ausführt. Es wurde analysiert, ob man den ENIAC, obgleich er nicht dafür konstruiert wurde, an dieses neue Code Paradigma anpassen könnte. Tatsächlich war man in der Lage dies zu realisieren. Hierfür brach man das Konzept des neu vorgestellten EDVAC in wenige Guppen herunter und versuchte diese mit den Komponenten des ENIAC zu emulieren. Sofort wurde begonnen ein Instruktionssatz für den ENIAC zu entwickeln. Gleichzeitig begannen die Planungen, welche für den Umbau des Rechners notwendig waren. Als Eingabemöglichkeit für die Instruktionen sollten die drei Function Tables dienen. Die Schalter des ENIAC wurden fest eingestellt. Auch die Verbindungskabel für Zahlen und Steuerimpulse wurden zur Neuprogrammierung fortan nicht mehr umgesetzt. Weiterhin wurden einige wenige Veränderungen an der Hardware vorgenommen. Der ENIAC erhielt nun auch zusätzliche Komponenten, die Kontrollfluss-Operationen vereinfachten. Dies verhinderte auch, dass Akkumulatoren dafür verschwendet werden mussten, was insgesamt zu einer größeren Anzahl an Befehlen führte. Nach der Konvertierung waren nun einige Abschnitte des ENIAC ausschließlich für die Dekodierung der in den Function Tables gespeicherten Instruktionen zuständig. Weitere Einheiten wurden so konfiguriert, dass sie die Operationen, die der Instruktionssatz definierte, auf Abruf ausführen konnten.

Der 51 Order Code.

Parallel zur Planung des physikalischen Umbaus des Rechners, begann sofort die Entwicklungsphase für einen Instruktionssatz. Nach intensiver Arbeit wurde ein Set aus 51 Befehlen präsentiert. Akkumulator 15 sollte das Rechenwerk der neugedachten Maschine darstellen. Akkumulator 13 wurde als Hilfsregister eingesetzt und sechs weitere als, wie man sie in moderner Computerarchitektur bezeichnen würde, *Special Purpose Registers* installiert. Drei weitere Akkumulatoren waren für das Einlesen und Dekodieren der jeweils zweistelligen Befehlscodes zuständig. Der Master Programmierer bildete nun einen Instruktionssatz auf die entsprechende Sequenz zu, die den Befehl abarbeitete. Da das Programmierkonzept des EDVAC auch bedingte Sprünge vorsah, die die Fähigkeit der Adressmanipulation benötigten, traf man die Entscheidung, spezielle Akkumulatoren für das Speichern der aktuellen Adresse zu verwenden. Einer von diesen verwaltete das *current control argument*, welches die Adresse der aktuell auszuführenden Instruktion beinhaltete. Sollte ein bedingter

Sprung erfolgen, musste lediglich dieser Wert überschrieben werden, um den Kontrollfluss zu verändern. Dies geschah, indem beim Ausführen eines bedingten Sprungbefehls das Vorzeichen des Akkumulators 15 überprüft wurde. War dieses positiv, wurde das *current control argument* mit dem sogenannten *future control argument*, welches in einem weiteren Akkumulator gespeichert war überschrieben. Nachdem alle benötigten Kontrollstrukturen geschaffen waren, blieben neun Akkumulatoren zur freien Verfügung übrig. Jedoch konnten diese vom Programmierer nicht mehr als arithmetische Komponenten eingesetzt werden. Letztenendes wurden sie nur noch als Speicherzellen mit einem dedizierten Lese- und Schreibbefehl verwendet. Dieses Setup kam jedoch nie zur Anwendung. Lediglich die damit geschaffenen Konzepte wurden in der Erarbeitung aller weiteren Instruktionssätze beibehalten.

Der 60 Order Code.

Der *60 order code* war eine Weiterentwicklung des *51 order code*, der nun auch von neuer Hardware profitieren sollte. Es wurde ein weiterer Dekadenzähler hinzugefügt, welcher direkt mit dem Master Programmierer verdrahtet wurde. Die Dekodierung von Befehlen konnte somit um einiges beschleunigt werden. Einige weitere Komponenten fügten direkte Hardwareunterstützung für die Auflösung gewisser Instruktionen hinzu. Dem Instruktionssatz wurden vor allem mehr Befehle, welche die Kontrollstruktur betrafen, angefügt. Aber auch diese Implementierung kam im ENIAC nie zum Einsatz.

Der Converter Code.

Auch dieses Konzept machte Verwendung von neuer Hardware. Die Gesamtzahl an möglichen Befehlen konnte drastisch erhöht werden, da nun alle zweistelligen Instruktionssätze effizient dekodiert werden konnten. Das erste Konzept dieses Codes umfasste einen Instruktionssatz mit 79 Befehlen. Später jedoch stieg die Zahl auf 83 an. Der substantiellste Unterschied zum *60 order code* war das Entwickeln einiger neuer Shift Befehle, die dem Programmierer mehr Kontrolle erlaubten. In diesem finalen Konzept blieben nun 13 Akkumulatoren, die dem Entwickler frei zur Verfügung stehen. Der *converter code*, welcher eigens für die Monte Carlo Berechnungen entworfen wurde, sollte der erste Instruktionssatz sein, den der ENIAC nach dem neuen Code Paradigma ausführen sollte. Auch Befehle, welche aus mehreren Operationen bestanden wurden hinzugefügt. Dies wird von vielen als eine der ersten Formen der heutigen Mikroprogrammierung angesehen.

Ein riesigen Vorteil der Konvertierung des ENIAC war der nun deutlich größere Funktionsumfang. Auch die Möglichkeit bedingte Verzweigungen bei der Programmierung einzusetzen, öffnete den Entwicklern neue Türen. Nach anfänglichen Problemen jedoch, vor Allem mit der neuen Hardware, musste die Taktgeschwindigkeit des ENIAC verringert werden. Dies war nötig, um akzeptable Zuverlässigkeit der Maschine gewährleisten zu können.

Verbleibende Probleme.

Durch die Konvertierung zum neuen Code Paradigma verbesserte sich die Flexibilität des ENIAC enorm. Jedoch blieben einige Probleme und Schwachstellen des Rechners bestehen. Die Geschwindigkeit, welche die Maschine in der Ausführung von arithmetischen Operationen bot, büßte sie wie-

der ein, sobald der Speicher der Akkumulatoren und Function Tables nicht mehr ausreichte und auf Lochkarten zurückgegriffen werden musste. Auch war die maximale Länge von Programmen des ENIAC nicht unendlich, sodass sich manche Probleme immer noch zu komplex gestalteten. Für viele Berechnungen wurde auch schlicht der Programmieraufwand als zu hoch eingestuft. Es war stets ein aufwendiger Prozess ein Problem für den ENIAC zu adaptieren. So wurden schlussendlich noch immer viele Aufgaben mit menschlichen Computern bewerkstelligt. [9]

3.3 Zuverlässigkeit

Hardwareprobleme.

Allein schon die immense Menge an Komponenten machte den ENIAC Entwicklern schwer zu schaffen. Von den rund 18000 verbauten Röhren musste eine alle 20 Stunden ausgetauscht werden. Aber auch die vielen Dutzend Transformatoren, die tausenden Kabel, Lötstellen, usw. sorgten für langwierige Wartungsarbeiten. Diese machten, wie in Abb. 10 circa 30 Prozent der gesamten Betriebszeit der ENIAC aus. In den ersten Jahren war die Anlage häufig länger defekt, als sie effektiv genutzt werden konnte.

Weitere Fehlerquellen.

Viele der unproduktiven Phasen des ENIAC sind auf menschliches Versagen zurückzuführen. Fehler in der Gestaltung der Programme oder in der Implementierung dieser am ENIAC waren häufige Problemquellen. Besonders knifflig an solchen Patzern war das Bemerkten und Finden dieser. Der ENIAC bot nämlich nur begrenzte Möglichkeiten Debugging zu betreiben. Nämlich konnte man die Cycling Unit anhalten und im Anschluss die einzelnen Rechenzyklen händisch starten. Doch selbst dann war es eine schwierige Aufgabe unter all den Schaltern und Steckern den Fehler zu finden. [6]

Korrektheitsprüfungen.

Die ENIAC Entwickler investierten eine Menge Zeit sich Gedanken darüber zu machen, wie ermittelt werden konnte, ob ein berechnetes Ergebnis Fehler enthielt oder nicht, da man sich selbstverständlich über die Unzuverlässigkeit von Mensch und Maschine im Klaren war. Um dies zu erreichen, wurden mehrere Methoden entwickelt. Eine recht simple Möglichkeit Fehler zu identifizieren, war eine Berechnung schlicht zu wiederholen und im Anschluss die Ergebnisse zu vergleichen. Sollte die Maschine aber einen Defekt aufweisen, der immer das selbe Fehlermuster erzeugt, war dieser Test nicht in der Lage ein Problem zu erkennen. Aussagekräftiger war es beispielsweise die selbe Operation auf anderer Hardware durchzuführen. Stimmt die Ergebnisse hierbei überein, war die Wahrscheinlichkeit eines falschen Ergebnisses sehr gering. Jedoch war es zur Zeit des ENIAC schwierig, einen Rechner zu finden, der den Aufgaben des ENIAC gewachsen war. Eine weitere Herangehensweise war, zwar den selben Computer zu verwenden, jedoch zwei verschiedene Algorithmen, die zum gleichen Ziel führen. Checksummen oder Testberechnungen, deren Ausgänge bekannt waren, konnten ebenfalls eingesetzt werden, um die Chance zu erhöhen, Probleme zu erkennen.

Es ist unschwer zu erkennen, dass viele dieser Techniken entweder zu aufwändig für die alltägliche Anwendung waren oder ein korrektes Ergebnis trotzdem nicht gewährleisten konnten. So ging es schlussendlich nicht darum, die Richtig-

keit einer jeden Berechnung zu prüfen, viel mehr aber darum, die Fehlerwahrscheinlichkeit auf ein akzeptables Niveau herabzusenken. [5]

Verbesserung der Effizienz.

Die Ingenieure des ENIAC trafen mehrere Designentscheidungen, die sich positiv auf die Effizienz der Maschine auswirken sollten. Einige davon wurden erst während den Betriebsjahren des Rechners entwickelt, was seine Fehlerzeiten stetig minimierte und dem ENIAC schlussendlich zu seinem Erfolg verhalf. Zu diesem Zweck wurden beispielsweise die Ringzähler der Akkumulatoren so entwickelt, dass sie sich als Ganzes binnen kürzester Zeit austauschen ließen. Aufgrund der zentralen Cycling Unit war es mit recht geringem Aufwand möglich, die Taktrate des Systems anzuheben oder abzusenken. Mit dieser Technik war es möglich, Fehler zu fixieren oder zu vermeiden. Diese und einige weitere Einrichtungen, wie beispielsweise der vorher erwähnte Debugging Modus, machten die Wartung des ENIAC deutlich simpler und erhöhten die Zuverlässigkeit der Maschine. [6]

4. DISKUSSION

Der ENIAC war mehr, als ein für den Krieg entwickeltes Instrument. Er war als erster voll elektronischer Rechner der Wegbereiter vieler Konzepte und Technologien. Er wurde unter enormem Termindruck geplant und konstruiert. Der enge Zeitplan ließ den Entwicklern des ENIAC wenig Spielraum für die umfangreiche Konzeption von neuen Herangehensweisen an die Lösung von arithmetischen Problemen. So wurde kurzerhand auf alt bewährte Methoden zurückgegriffen. Da der ENIAC die erste Maschine ihrer Art war, gab es für die Ingenieure auch keine Anhaltspunkte oder Erfahrungswerte an denen sie sich orientieren konnten. Doch bereits während der Planungsphase wurde man sich den Limitierungen des Rechners bewusst. So war der ENIAC noch vor der Inbetriebnahme der Grundstein für John von Neumanns *First Draft of a Report on the EDVAC*. In diesem stellte von Neumann einige Konzepte, wie das *stored program concept* vor, die bis in die moderne Computerarchitektur wegweisende Methodiken darstellen. Doch war der ENIAC nicht nur eine Quelle von Erfahrungen und Ideen, sondern er war gleichzeitig auch Beweis für die Konzepte, die aus ihm entsprangen. Nachdem von Neumann das Prinzip des Computers mit dem Entwurf des EDVAC weiterdachte, wurden die dort erarbeiteten Prinzipien so gut es ging an den ENIAC adaptiert. Der Computer ging von einem veränderbaren spezialisierten Rechner zu einer universalen, mithilfe von kodierten Befehlen programmierbaren Maschine über. Er wurde an die bis heute aktuelle von Neumann Architektur angepasst und implementierte das *stored program concept*. So konnten von Neumanns Ideen eines Rechners an der selben Maschine erprobt werden, die diese erst ermöglichten. Desweiteren erwiesen sie sich nach umfangreichem Einsatz des umgebauten ENIAC bei tatsächlichen Problemen als zuverlässig und vielseitig. Und das obwohl der ENIAC sowohl vor, als auch nach seinem Umbau selten mehr als 60 Prozent seiner Betriebszeit produktiv im Einsatz war. Teilweise stand der Rechner monatelang für Wartungsarbeiten still. Doch trotz aller Schwierigkeiten ermöglichte der ENIAC Berechnungen, für die Menschen Monate benötigten, binnen kürzester Zeit auszuführen. Damit begann auch ein neues Zeitalter für die Lösung von eben solchen Problemen. Die Aufbereitung der Aufgaben für die

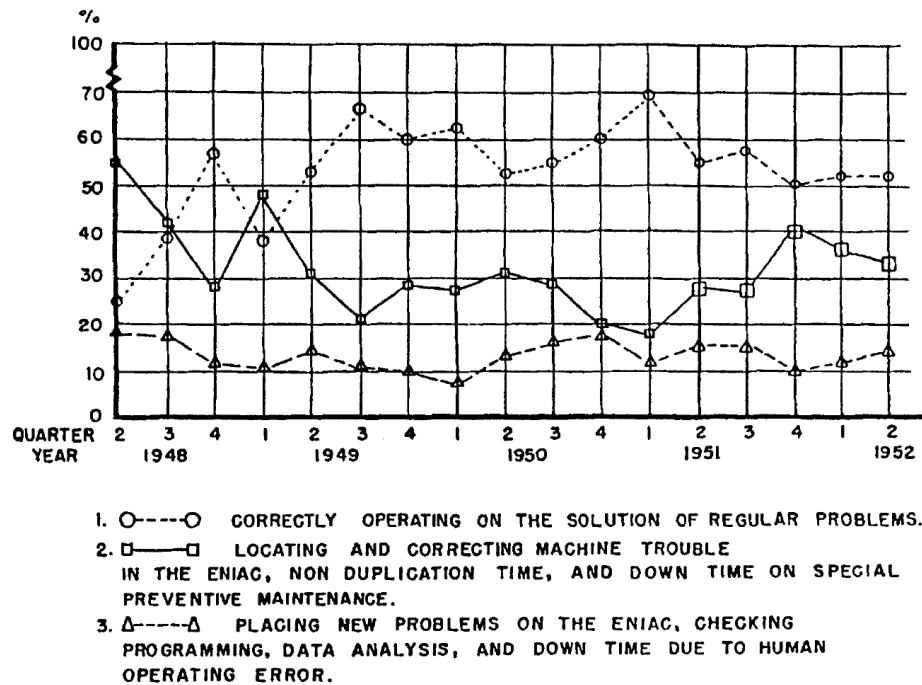


Figure 10: Effizienz des ENIAC

neu entwickelten Computer war aufwändig und die Gefahr, dass es gar nicht auf den Rechner anwendbar ist bestand stets. Doch es folgte eine Phase, in der digitale Rechenmaschinen immer zuverlässiger, billiger und einfacher wurden. So erkannten mehr und mehr Menschen das Potential des Computers. Heute sind sie nicht mehr wegzudenken und bestimmen täglich unseren Alltag. Manchmal tut es gut, sich daran zu erinnern, dass vieles, was wir heute als selbstverständlich sehen mit dem ENIAC begann. Zwar überdauerte dessen Lebenszeit keine zehn Jahre, sein Nachwirken aber sollte die Zukunft für immer verändern.

5. REFERENCES

- [1] J. H. Blodgett and C. K. Schultz. Herman hollerith: Data processing pioneer. *American Documentation*, 20(3):221–226, 1969.
- [2] J. G. Brainerd and T. K. Sharpless. The eniac. *Electrical Engineering*, 67(2):163–172, Feb 1948.
- [3] R. Coopey. Computers and commerce: A study of technology and management at eckert-mauchly computer company, engineering research associates, and remington rand, 1946–1957. by arthur l. norberg. cambridge, ma: Mit press, 2005. pp. x, 347. \$40. *The Journal of Economic History*, 66(4):1102–1103, 2006.
- [4] J. J. P. Eckert and J. W. Mauchly. Electronic numerical integrator and computer, Feb. 4 1947. US Patent 3,120,606.
- [5] J. P. Eckert Jr, J. W. Mauchly, H. H. Goldstine, and J. G. Brainerd. Description of the eniac and comments on electronic digital computing machines. Technical report, MOORE SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING PHILADELPHIA PA, 1945.
- [6] W. B. Fritz. Eniac - a problem solver. *IEEE Annals of the History of Computing*, 16(1):25–45, Spring 1994.
- [7] W. B. Fritz. The women of eniac. *IEEE Annals of the History of Computing*, 18(3):13–28, 1996.
- [8] H. H. Goldstine and A. Goldstine. The electronic numerical integrator and computer (eniac). *IEEE Annals of the History of Computing*, 18(1):10–16, Spring 1996.
- [9] T. Haigh. *ENIAC in action : making and remaking the modern computer*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2018.
- [10] T. Haigh, M. Priestley, and C. Rope. Reconsidering the stored-program concept. *IEEE Annals of the History of Computing*, 36(1):4–17, Jan 2014.
- [11] E. N. Lorenz. Reflections on the conception, birth, and childhood of numerical weather prediction. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34(1):37–45, 2006.
- [12] H. Lukoff. *From Dits to Bits: A Personal History of the Electronic Computer*. Robotics Press, 1979.
- [13] J. W. Mauchly. *The Use of High Speed Vacuum Tube Devices for Calculating*, pages 355–358. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1982.
- [14] N. Metropolis. The beginning of the monte carlo method. *Los Alamos Science*, (Special Issue):125–130, 1987.
- [15] H. Neukom. The second life of eniac. *IEEE Annals of the History of Computing*, 28(2):4–16, April 2006.
- [16] G. W. Platzman. The eniac computations of 1950—gateway to numerical weather prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60(4):302–312, 1979.
- [17] N. Stern. *From ENIAC to UNIVAC: An appraisal of the Eckert-Mauchly computers*. Digital Press, 1981.
- [18] S. M. Walker. Eniac: The triumphs and tragedies of

the world's first computer. *Physics Today*, 53(7):58, 2000.

- [19] M. V. Wilkes. *EDSAC*. John Wiley and Sons Ltd., 2003.
- [20] M. R. Williams. The origins, uses, and fate of the edvac. *IEEE Ann. Hist. Comput*, 1993.
- [21] K. Zuse, F. L. Bauer, and H. Zemanek. *Der Computer - Mein Lebenswerk*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 5. Aufl. edition, 2010.