

Parallelrechner der 70. Jahre: Die Cray 1

Seminar: Geschichte der Rechnerarchitektur

Jago Wahl-Schwentker
jago.wahl-schwentker@tum.de

ABSTRACT

Dieser Aufsatz behandelt den Supercomputer Cray 1 als berühmtes Beispiel für die Parallelrechner der 70. Jahre. Es werden der grundlegende Aufbau der Cray 1 und die Techniken der Parallelisierung des Prozessors dargelegt, die auch für moderne CPU- und GPU-Architekturen von Bedeutung sind. Außerdem wird kurz auf das Schaffen von Seymour Cray eingegangen, bevor er die Cray 1 erfand.

Keywords

Rechnerarchitektur; Supercomputer; Cray; Parallelrechner

1. EINLEITUNG

Die Cray 1 übt auf viele eine besondere Faszination aus. Sie gilt nicht als eine von vielen Computern, die in der kurzen Geschichte der Informatik und Computertechnik uns hin zu moderner Rechnerarchitektur gebracht hat, sondern glänzt als erster Supercomputer der Menschheitsgeschichte. Sie hat nicht nur ein anschauliches Äußeres, sondern zeigt durch ihre Architektur, wie schnelle Performance durch eine hohe Taktung und unterschiedliche Arten der Parallelisierung möglich ist.

Im Folgenden möchte ich zunächst auf Seymour Cray und seinen Weg zu seinem Meisterwerk eingehen und anschließend beleuchten, durch welche Techniken die Cray 1 die Rechenleistung erreicht, die sie erst zu einem Supercomputer macht.

2. SEYMOUR CRAY: AUF DEM WEG ZUR CRAY 1

2.1 Die Anfänge seiner Karriere

Seymour Cray wird am 28. September in den USA geboren. 1943 beendet er die Schule mit dem High School Abschluss und wird im gleichen Jahr in den 2. Weltkrieg eingezogen. Dort interessiert sich Cray schon für die Entschlüsselung feindlicher Kommunikation. Zwei Jahre später ist Kriegsende und Cray geht an die University of Minnesota um dort Electrical Engineering zu studieren. 1949 erreicht Cray seinen Bachelor of Science und zwei Jahre später den Master in Applied Mathematics. Cray beginnt seine Karriere mit einer Anstellung bei ERA, den Engineering Research Associates, die bald von Remington Rand aufgekauft werden. Bei Remington Rand wirkt Cray bei einem Geheimprojekt der NSA mit, der Entwicklung des Computers ATLAS II. Bald nachdem der Rechner bei der NSA installiert

ist, wird der Rechner zum kommerziellen Gebrauch freigegeben. Zunächst wird der Rechner als ERA 1103 und durch die baldige Übernahme des Technologieunternehmens Unisys als UNIVAC 1103 verkauft [1]. Durch Probleme bei der Serienherstellung kann allerdings kein Auftrag zeitig beendet werden.

Unisys will sich von nun an eher auf den hohen Absatz ihrer Computer konzentrieren und legt weniger Wert darauf, Spitzenreiter bei neuer Computertechnologie zu sein. Einige Mitarbeiter von ERA sehen eine Marktlücke in der Computerindustrie, die auch nicht vom Marktführer für Großrechner IBM abgedeckt wird, der eher Computer für kaufmännische Anwendung hergestellt hat: Die Entwicklung und Herstellung von Hochleistungscomputern.

Diese Mitarbeiter verlassen also Unisys und gründen das Unternehmen Control Data Corporation. Seymour Cray ist von der Idee überzeugt und schließt sich kurze Zeit später der CDC an [1].

2.2 Crays Arbeit bei CDC

Der erste von Cray entwickelte Rechner ist die CDC 1604. Dieser basiert nicht wie bisherige Rechner auf Vakuumröhren sondern auf Germanium Transistoren. Sein Nachfolger die CDC 1604A mit einer Taktung von 0,2 MHz und einer Rechengeschwindigkeit von 300 KFLOPS war ein großer Verkaufserfolg und bereite den Weg für die Rechner CDC 6600 und CDC 7600. Der CDC 6600 zeichnete sich durch eine superskalare Architektur aus, bei der mehrere Recheneinheiten parallel arbeiten können. Durch die Einführung von Pipelines¹ und eine 4 mal höhere Taktrate erreicht der CDC 7600 eine weiter verbesserte Performance von 10 MFLOPS. Das letzte Projekt von Cray bei Control Data Corporation soll die Entwicklung des Computers CDC 8600 sein. Designziel ist die Erhöhung der Taktrate um das 3-fache und der Einsatz von integrierten Schaltkreisen mit ECL-Technologie². Dies erfordert allerdings die Erhöhung der Packungsdichte, also das Zusammenrücken der Module, um die Signalübertragungszeit zu verkürzen. Das daraus resultierende Abwärmeproblem führt Cray zu der Erkenntnis, dass dieser Computer nur durch eine Neuaufgabe des Projektes realisierbar ist. Crays Chef lässt sich davon allerdings nicht überzeugen. Seymour Cray verlässt die Firma um sein eigenes Start-Up „Cray Research“ zu gründen und beginnt mit der Entwicklung der Cray 1 [1].

¹Siehe 4.1

²Siehe 3.1.1



Figure 1: Cray 1 im Deutschen Museum

3. ARCHITEKTUR DER CRAY 1

3.1 Software

Die Cray Research hat zu seinem Rechner ein eigenes Betriebssystem, eine eigene Assemblersprache und einen FORTRAN-Compiler angeboten. Cray Research hat das CRAY Operating System (COS), die Cray Assembler Sprache und die Programmiersprache Cray FORTRAN für die Verwendung der Vektorprozessorarchitektur optimiert [2]. Einige Kunden wie die NSA haben jedoch ihre eigenes OS für die Cray entwickelt.

3.2 Eckdaten

Die Cray 1 war zu ihrer Erscheinung im Jahr 1976 der schnellste Computer der Welt. Mit einer Taktfrequenz von 80 MHz (clock cycle 12,5 ns) ist der Rechner dazu in der Lage, 138 Mio. Floating Point Operationen pro Sekunde auszuführen (138 MFLOPS). Sie basiert auf einer 64-bit-Architektur. Die CPU der Cray 1 verfügt u.a. über 8 Adressregister mit 24-bit Wortlänge, 8 Skalarregister mit 64-bit Wortlänge und 8 64-bit Register, die jeweils maximal 64 Wörter speichern können, sodass sowohl skalare als auch vektorisierte Berechnungen möglich sind (Fig. 4). Die Cray 1 kann auf 16 unabhängigen Speicherbänken mit einer Kapazität von jeweils 65K Wörtern insgesamt 8 MB speichern. Über 24 I/O Channel, die in 4 Gruppen eingeteilt sind und jeweils jeden 4. Taktzyklus bedient werden, kann mit der Cray 1 kommuniziert werden [3]. Der Supercomputer weist ebenfalls eine sehr hohe Zuverlässigkeit mit einem Wert von über 98 % auf. Die „mean time of interruption“ (MTBI) beträgt 100 Stunden, die „mean time to repair“ (MTTR) nur eine Stunde [4].

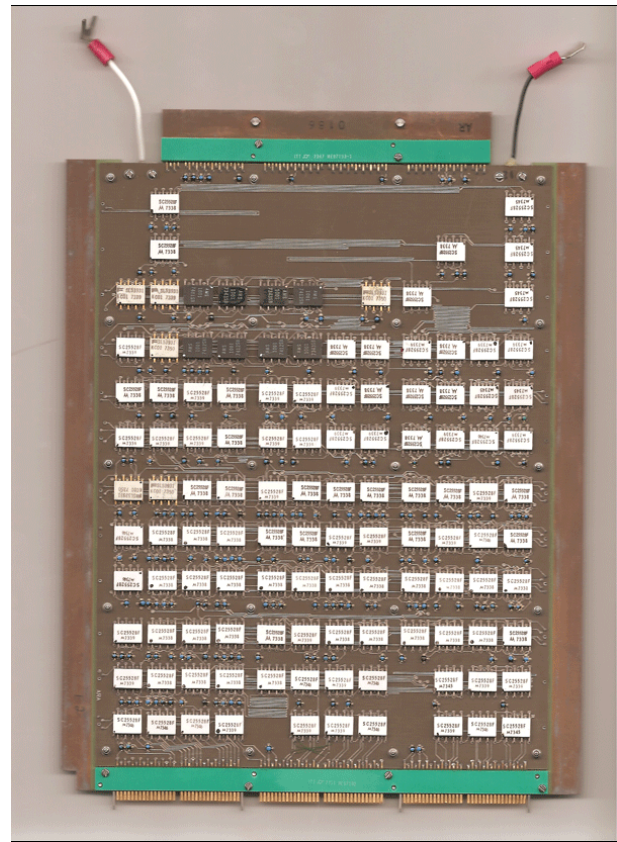


Figure 2: Modul [6]

3.3 Physischer Aufbau

3.3.1 Integrierte Schaltkreise

Die Cray 1 basiert auf Integrated Circuits (IC) und hat keine diskret aufgebaute CPU, anders als alle bisher von Seymour Cray entwickelten Computer. Die Cray 1 hat drei unterschiedliche Schaltkreistypen. Für logische Operation sind insgesamt rund 200.000 bipolare NAND Gatter mit 4 und 5 Inputs zuständig, mit denen alle Rechenoperationen möglich sind [5]. Die Register bestehen aus 16 x 4 bit SRAM und der Hauptspeicher aus 1024 x 1 bit SRAM. Alle drei Chips funktionieren mit der ECL-Technologie (Emitter Coupled Logic) [3]. Diese hat den Vorteil, dass die Transistoren nie zur Sättigung kommen und so ein kleiner Schaltabstand besteht, was die hohe Schaltfrequenz ermöglicht.

3.3.2 Boards und Module

Die ICs sind auf Boards angebracht. Ein Board fasst maximal 144 ICs (Fig. 2). Zwei Boards sind back-to-back auf einer 20 Millimeter dicken Kupferplatte montiert und ergeben zusammen ein Modul. Auf Abbildung 2 lässt sich die Kupferplatte links und rechts am Rand des Boards erkennen. Die Kupferplatten dienen der Ableitung der Abwärme, die durch die ICs erzeugt wird. Insgesamt hat die Cray 1 1662 Module mit 113 Modultypen [3]. 500 Module davon bilden die CPU.



Figure 3: Rack

3.3.3 Gesamtaufbau

Die Cray 1 ist durch 12 ca. 196 cm hohe Türme in der Form eines Cs aufgebaut (Fig. 1), bestehend aus jeweils zwei übereinanderliegenden Racks. Ein Rack (Fig. 3) fasst 72 Module, die auf der Innenseite der C-Form miteinander verkabelt sind. Dabei wurde darauf geachtet, dass Kabel nie länger als 90 cm sind, um eine kurze Signallaufzeit zu garantieren. Der Kühltapparat verbirgt sich unter gepolsterten Sitzen vor den Türmen und ist ebenfalls in C-Form aufgebaut. Er kühlt und pumpt eine freonbasierte Flüssigkeit durch rostfreie Stahlrohre in den Innenwänden zwischen den Türmen, sodass die Wärme der Kupferplatten in den Modulen ableitet wird. Inclusive der Kühlung misst die Cray 1 einen Durchmesser von 263 cm und wiegt knapp 4,8 Tonnen [3].

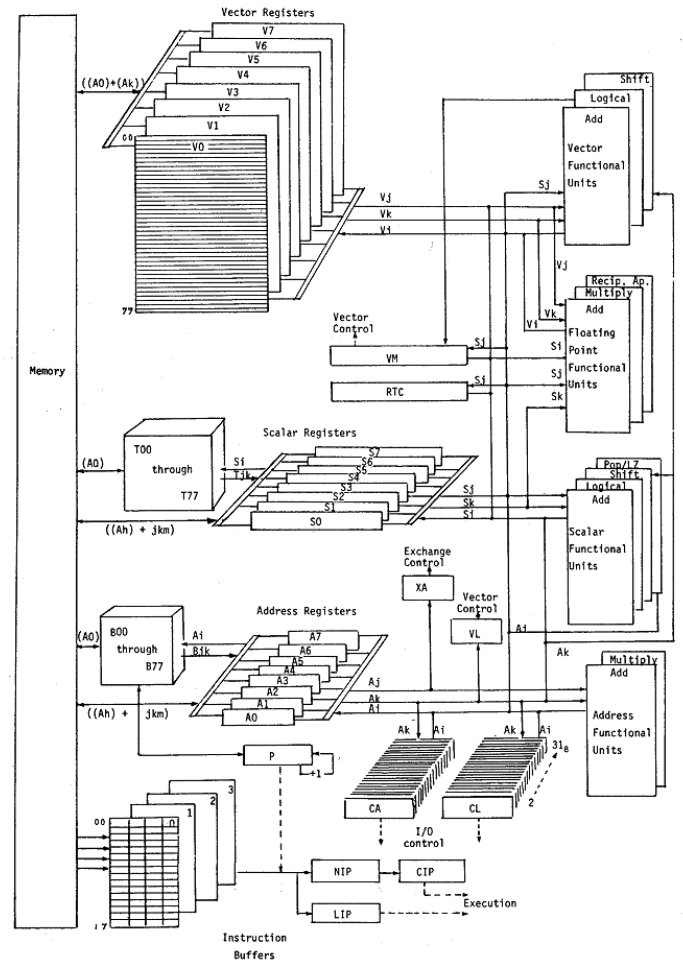


Figure 4: Die Computational Section der Cray 1 [7]

4. STRATEGIEN DER PARALLELISIERUNG

Bisher wurde in der Computerentwicklung das Augenmerk verstärkt auf eine höhere Taktfrequenz gelegt, um die Rechengeschwindigkeit zu erhöhen. Seymour Cray schafft es unter der Verwendung von nur einer CPU durch das geschickte Zusammenspiel von Pipeling, Vectorprocessing und Chaining mit seiner Cray 1 eine Performace zu erreichen, die durch rein sequentielle und skalare Befehlsverarbeitung nie erdenklich wäre.

4.1 Pipelining

4.1.1 allgemeiner Ansatz

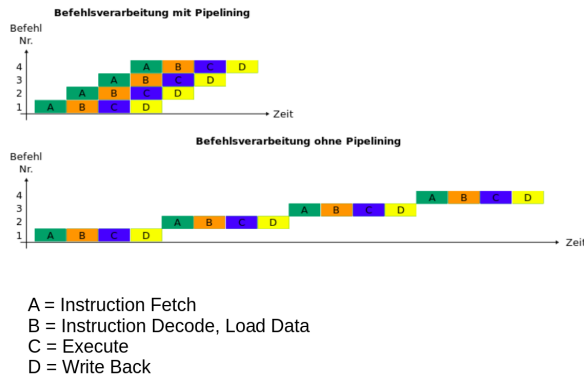


Figure 5: Parallele und sequentielle Ausführung einer Befehlspipeline [8]

Die Cray 1 war eine der ersten Computer, dessen Prozessor durch Pipeling parallel mehrere Befehle zeitgleich ausführen konnte. Im Allgemeinen lässt sich eine Befehlsausführung vereinfacht in 4 Schritte aufteilen (siehe Fig. 5) :

- Instruction Fetch: Die nächste Programmwort wird aus dem Programmspeicher geladen und der Programmzähler wird der Wortlänge entsprechend erhöht.
- Instruction Decode, Load Data: Die Instruktion wird entschlüsselt und benötigte Registerinhalte und Operanden werden geladen.
- execute: Die Registerinhalte und Operanden werden gemäß arithmetischer Operationen miteinander verknüpft.
- write back: Das ermittelte Ergebnis wird in das Zielregister geschrieben.

Diese Vorgänge finden in voneinander unabhängigen Modulen statt. In unserem Beispiel hätte eine sequentielle Ausführung zur Folge, dass ein Modul arbeitet, während die anderen drei Module warten. Das Pipeling verfolgt die Idee der Minimierung der CPU dead time [3]. Während bei dem ersten Befehl nämlich schon gerechnet wird, können die Registerinhalte des zweiten und die Instruktion des dritten Befehls geladen werden. So können alle Einheiten parallel arbeiten und die Befehle in 4-facher Geschwindigkeit ausführen. Ein extremer Performacegewinn wird erreicht.

4.1.2 Grenzen des Pipelinings: Hazards

In der Praxis ist es allerdings nicht möglich, alle Rechen-einheiten stets voll auszulasten. Das liegt zum einen daran, dass nicht alle Operationen in gleicher Geschwindigkeit ausführbar sind - schnelle müssen auf langsamere Module warten. Zum Anderen gibt es sogenannte Hazards.

Wenn z.B. zwei Befehle hintereinander auf das gleiche Register zugreifen wollen, können diese nicht nebeneinander ablaufen. Der zweite Befehl muss alle Schritte des ersten Befehls abwarten, bis er sein Ergebnis zurück in den Register geschrieben hat. Man spricht von einem Datenhazard. Ein strukturelles Hazard wird erzeugt durch Verzweigungen, wodurch ebenfalls der parallele Ablauf der Pipeline durcheinander geworfen wird.

4.1.3 Pipelining in der Cray 1

Functional Unit	Register Usage	Unit Time (in clock periods)
Address		
Address add unit	A	2
Address multiply unit	A	6
Scalar Units		
Scalar add unit	S	3
Scalar shift unit	S	2 or 3
Scalar logical unit	S	1
Population/leading 0 count	S	3
Vector		
Vector add unit	V	3
Vector shift unit	V	4
Vector logical unit	V	2
Floating-point (F-p)		
F-p add unit	S, V	6
F-p multiply unit	S, V	7
Reciprocal approximation unit	S, V	14

Figure 6: Übersicht der Funktionalen Einheiten in der Cray 1 [3]

Die Cray 1 verfügt über 12 Funktionale Einheiten, die sich in 4 Gruppen einteilen lassen: Skalar-, Vektor-, Floating Point- und Adresseinheiten [2]. In Abbildung 6 finden sich die Funktionalen Einheiten der Cray 1 mit jeweiligem Registerzugriff wieder. Alle Einheiten funktionieren unabhängig voneinander, sodass sie gleichzeitig laufen können. Es ist in Abb. 6 ebenfalls zu erkennen, dass auch in der Cray 1 nicht alle Einheiten gleich viele Taktzyklen brauchen.

4.2 Vektorberechnung

4.2.1 Motivation

Wir nehmen an, wir wollen 2 Arrays mit jeweils 64 Einträgen elementweise addieren. Im skalaren Ansatz müsste dazu ein eine Schleife herangezogen werden, wo bei jedem der 64 Schleifendurchläufe die oben beschriebenen Befehle nach dem Schema „load, add, store“ ausgeführt werden müssten, um alle Elemente einzeln zu addieren.

Lässt sich das nicht schneller lösen?

4.2.2 Vektorprozessor

Die Cray 1 hat neben ihren skalaren Registern auch Vektorregister (siehe Fig. 4), von dem einer parallel bis zu 64 Elemente speichern kann. Dazu hat sie eigene arithmetisch-logische Einheiten zur Vektorberechnung. Durch eine erweiterte Vektor-Assemblersprache, die unterschiedliche Befehle zur Vektorrechnung bereit hält, können Vektoren nun in wenigen Schritten berechnet werden. Die gesamte Laufzeit der Vektorberechnung mit Hilfe der Vektorregister und den Rechen-einheiten ist nun ähnlich groß wie das einfache Durchlaufen der Schleife in der skalaren Lösung. In diesem Ex-

trembeispiel hätten wir also eine Performancesteigerung um das rund 64-fache.

4.2.3 Herausforderung Vektor-Skalar

Trotz der eindrucksvollen Performance die der Vektorprozessor in einigen Fällen im Vergleich zu einer skalen Lösung zeigt, kann er einen Skalarprozessor nicht vollständig ablösen. Einige Aufgaben lassen sich in einem Vektor nicht sinnvoll lösen. Die Cray 1 verfügt deshalb sowohl über einen Vektor- als auch über einen Skalarteil in ihrer CPU (Fig. 4). Es ist allerdings eine Herausforderung beide Strukturen nebeneinander und v.a. auch miteinander (Vektor-Skalar-Berechnung) arbeiten zu lassen.

4.3 Chaining

Chaining ist eine Technik in der Cray 1, die es ermöglicht, dass berechnete Werte, die sofort wiederverwendet werden, nicht zwischendurch im Hauptspeicher abgelegt werden, sondern direkt von der nächsten Instruktion übernommen werden. Gerade in Kombination mit dem Vektorprozessor ist das eine große Effizienzsteigerung, weil die Elemente nicht alle auf die 16 Datenbänke verteilt gespeichert werden und dann davon wieder aufgerufen werden müssen, sondern mit dem Zielregister gleich weitergerechnet wird (Fig. 7) [3].

5. VERKÄUFE DER CRAY 1

Der initiale Verkauf der ersten Cray 1 verlief etwas schlep-pend. Die US-Regierung hat sich für die Bezahlung einer Cray 1 bereit erklärt. Für diese Gelder haben sich sowohl das Lawrence Livermore National Laboratory und das Los Alamos National Laboratory beworben. Um den nicht zu Ende gehenden Streit der beiden Labore zu beenden, macht Seymour Cray dem Los Alamos Labor ein Angebot: Sie dürfen die Maschine für ein halbes Jahr bei sich testen und zur Ablauf der Frist sich zur Rückgabe, zum Mieten oder zum Kauf des Computers entscheiden. Letztendlich kauft das Labor den Computer.

Das NCAR („National Center for Atmospheric Research“) hört von Los Alamos, dass die Cray 1 5 mal schneller rechnet als die CDC 7600 und entscheidet sich ebenfalls für den Kauf. Der Ball kommt ins Rollen und die Cray 1 findet Abnehmer in Bereichen wie der Wettervorhersage, Flugzeugentwicklung, Kernforschung und der seismischen Analyse [3]. Der erste deutsche Kunde der Cray 1 ist das Max Planck Institut in Garching bei München, die durch unterschiedliche Benchmarktests ebenfalls überragende Rechenleistung der Cray 1 feststellen konnte. Insgesamt wurde die Cray 1 über 80 Mal verkauft mit einem jeweiligen Verkaufspreis von ca. 5-8 Mio. US\$.

6. FAZIT

Auch wenn heute jedes Smartphone mehr Rechenleistung als die Cray 1 hat, bleibt sie ein außerordentlicher Computer der Rechnergeschichte. Viele Konzepte der Cray 1 finden sich heute überall wieder. Eine moderne CPU ohne Pipelining wäre unvorstellbar. Auch Vektorprozessoren haben heute eine große Bedeutung. Vorallem in GPUs, die viele Vektorberechnungen vornehmen müssen um z.B. ein Computerspiel anzuzeigen oder ein 3D-Objekt berechnen, ist die Technologie nicht wegzudenken. Allein weil Cray mit seinem Rechner gezeigt hat welchen hohen Wert ein Hochleistungs-computer hat und damit auch den Wettbewerb um die Ent-

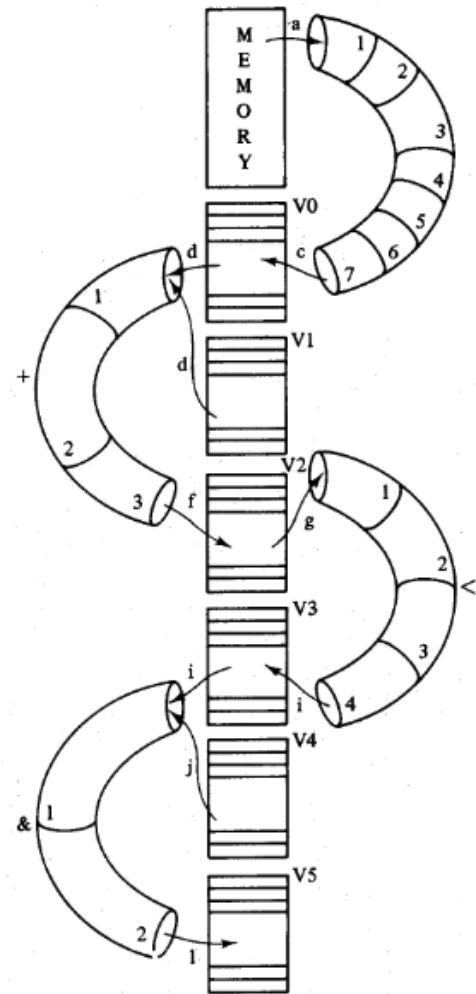


Figure 7: Schema des Chainings in der Cray 1 [3]

wicklung immer effizienterer Computer angetrieben hat, ist ihr Status als eine Ikone der Rechnergeschichte gerechtfertigt.

7. REFERENCES

- [1] Bernd Leitenberger. Seymour cray und seine supercomputer.
<https://www.bernd-leitenberger.de/cray.shtml>;
eingesehen 13.06.2019.
- [2] Richard M Russell. The cray-1 computer system.
Communications of the ACM, 21(1):63–72, 1978.
- [3] Andie Hioki. The cray-1 supercomputer. 2002.
- [4] James Kolodzey. Cray-1 computer technology. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 4(2):181–186, 1981.
- [5] Bernd Leitenberger. Die cray 1 - architektur eines supercomputers.
<https://www.bernd-leitenberger.de/cray-1.shtml>;
Eingesehen 13.06.2019.
- [6] Chippewa Falls Museum. Cray research, cray 1, ar module serial number 0186.
- [7] Cray Research. Cray 1 hardware reference manual.
- [8] Frank Jacobsen. Schematische darstellung einer 4-stufigen befehlspipeline. 2004.