

*Karl Schwarzschild Lecture*

## **Als die Computer die Astronomie eroberten**

Rudolf Kippenhahn

Max-Planck-Institut für Astrophysik  
Karl-Schwarzschild-Straße 1, 85748 Garching  
rkippen@gwdg.de

### **Abstract**

Around the year 1950, computers became available for scientific institutes. At the Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen, lead by Werner Heisenberg, an astrophysics group under Ludwig Biermann used computers, which had been developed in the institute by Heinz Billing and his group. The first machine was the G1. The author was among the young scientists who had the chance to use it for astrophysical calculations. He describes the situation of computing at a time not so much back in the past. But according to the rapid progress in computing today, it appears like it was the stone age.

## **1 Einführung**

Als ich vor nahezu 60 Jahren als Mathematiker in die Astronomie ging, fesselte mich der Gedanke, dass man Aussagen über das tiefe Innere der Sterne machen kann, von dort, wohin unser Blick nicht dringt.

Um 1950 waren die physikalischen Gesetze, einschließlich der Energieerzeugung durch Kernprozesse in den Sternen, wohlbekannt. Die Gleichungen, die zu lösen waren, standen längst in den Büchern. Man musste sie nur lösen. Nach meiner ersten Stelle als Astronom in Bamberg kam ich zu Arbeitsgruppe Biermann an dem von Werner Heisenberg geleiteten Max-Planck-Institut in Göttingen. Damals entstanden die ersten elektronischen Rechenmaschinen. Ich hatte das Glück, Zugang zu Ihnen zu bekommen und zu erleben, wie die Computer in die Astrophysik eindringen. Das geschah nahezu gleichzeitig überall in der Welt. Ich berichte es so, wie ich es bei den Arbeiten in unserer Arbeitsgruppe in Göttingen erlebt habe.

Große und gute Computer allein helfen nicht immer, man muss auch wissen, was man mit ihnen machen muss, wenn man die Vorgänge im Inneren der Sterne auf dem Computer verfolgen will. Ich hatte das Glück, als einer der ersten das entscheidende Rechenverfahren direkt von seinem Erfinder zu lernen.

Das alles aber hätte für mich nicht gereicht, hätte Ulbricht nicht in Berlin die Mauer gebaut, und wäre der Jenenser Astronom Alfred Weigert, der frühmorgens gerne länger schlief, zu dieser Zeit nicht zu Besuch in Westberlin gewesen. Als er an jenem Sonntag aufwachte, war die Mauer schon ziemlich weit hochgezogen, so dass er vor der Frage stand, ob es sich noch lohnt, in den Osten zurückzuklettern. Er blieb, und ich habe über lange Zeit mit ihm gearbeitet. Unsere wichtigsten Veröffentlichungen waren die, die wir gemeinsam geschrieben haben.

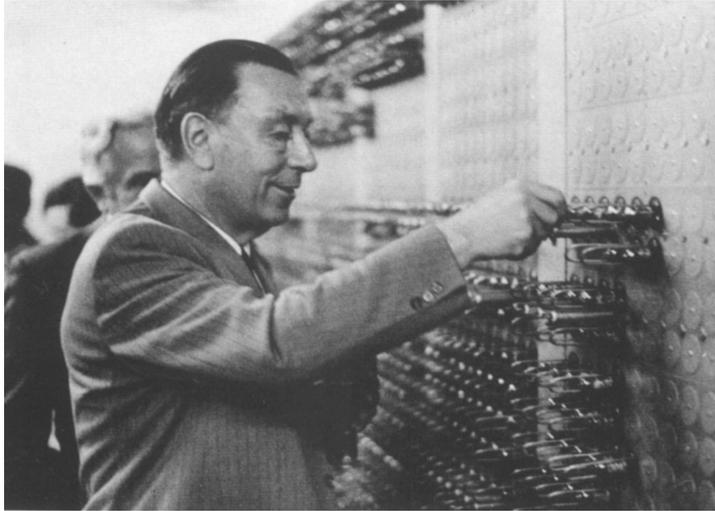


Abbildung 1: Ludwig Biermann (1907–1986)

## 2 Computer im Eigenbau

Aber ich muss der Reihe nach erzählen. Lassen Sie mich mit den Rechenmaschinen beginnen. Ludwig Biermann leitete Anfang der 50er Jahre die Abteilung Astrophysik in dem Heisenbergschen Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen. Die Schwerpunkte der Abteilung und des später daraus entstandenen Instituts für Astrophysik wurden von den jeweiligen Interessen Biermanns bestimmt. Ursprünglich waren es Berechnungen der Elektronenhüllen astrophysikalisch interessanter Atome. Dazu hatte er eine Gruppe von Rechnerinnen und Rechnern angestellt, die auf Tischrechenmaschinen die aufwendigen Rechnungen durchführten. Diese Gruppe wurde von Eleonore Trefftz geleitet.

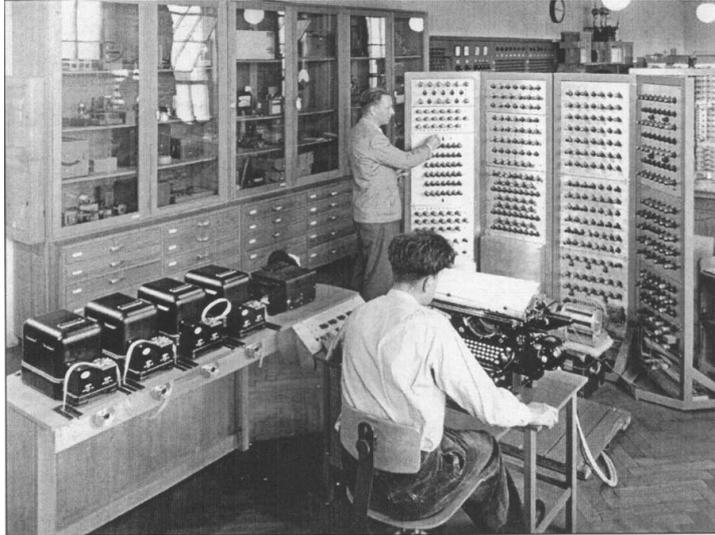
In den ersten Nachkriegsjahren arbeitete Heinz Billing, ein Physiker aus der Schule von Walther Gerlach, am Göttinger Institut für Instrumentenkunde, das Messgeräte für andere Institute herstellte. Im Jahre 1947 war eine Kommission englischer Wissenschaftler nach Göttingen gekommen, um etwas über die Forschung in Deutschland während des Krieges zu erfahren. Darunter war auch der berühmte Alan Turing. Was die Engländer über die Computer berichteten, weckte Billings Inter-



**Abbildung 2:** Heinz Billing, an einer seiner Rechenmaschinen

esse. Ein Problem in der Computerei ist das Speichern von Befehlsfolgen, die der Reihe nach ausgeführt werden sollen, aber auch die Frage, wie Zwischen- und Endergebnisse gespeichert werden können. Dafür erfand Billing die Trommel. Schon während des Krieges war in Deutschland das Tonbandgerät – damals hieß es noch „Magnetophon“ – entwickelt worden. Billing sah die Möglichkeit, eine Trommel mit magnetisierbarer Oberfläche als Speicher zu benutzen. Angeblich beklebte er seine erste Trommel mit Tonbändern. Das war praktisch die Erfindung der Festplatte! Die Trommel führte er Heisenberg und Biermann vor, die davon sehr angetan waren. Doch zu einer damit arbeitenden Rechenmaschine kam es erst einmal nicht, denn damals, kurz nach der Währungsreform, gab es kein Geld. So wäre Heinz Billing fast von der Universität von Sidney abgeworben worden. Doch Heisenberg und Biermann gelang es, ihn aus Australien mit einem Angebot nach Göttingen zurück zu locken, und da begann er, Rechenmaschinen zu bauen. Zu seinen Mitarbeitern gehörte übrigens auch ein Sohn des Astronomen Josef Hopmann, der bis Kriegsende den Lehrstuhl für Astronomie der Leipziger Universität innehatte. Und so entstand die G1.

Es war die erste elektronische Rechenmaschine, mit der ich gearbeitet habe. Dabei trat ein mir bis dahin unbekanntes Phänomen auf: Wenn die Maschine plötzlich stehen bleibt, etwa weil irgendetwas falsch programmiert war, lief die Uhr, welche die zugeteilte Zeit zählte, weiter. Man stand also unter dem Zwang, möglichst schnell das Programm zu ändern, damit die zugeteilte Zeit nicht verstrich. Jeder kam einmal in diese Situation, und wir lernten: vor der stehenden Maschine ist man beliebig dumm. Die Angst, Rechenzeit zu verlieren, lähmt alle Kreativität. Die G1 wurde im Herbst 1952 in Betrieb genommen. Die Eingabe erfolgte durch Lochstreifen. Fünf Lochreihen geben die Möglichkeit, 32 verschiedene Zeichen darzustellen. Die Lesegeräte waren vom Telex-Verkehr der Post. Sie lasen 7 Zeilen pro Sekunde. Die



**Abbildung 3:** Die G1 hatte als Eingabegeräte Lochstreifenleser der Post. Der dritte Leser von links trägt eine Programmschleife. Billing steht an einer der die Röhren und Relais tragenden Wände. Die Ausgabe erfolgte entweder durch den Streifenlocher, rechts neben dem vierten Lesegerät, oder durch die elektrische Schreibmaschine. Rechts hinter der Schreibmaschine am Fußboden die Trommel.

Trommel konnte 26 Dualzahlen mit je 32 Stellen speichern. Heute kann das ein besserer Taschenrechner. Doch sie füllte ein ganzes Zimmer. Ihre 476 Röhren erzeugten so viel Wärme, dass der Raum im Sommer gelüftet und im Winter nicht geheizt werden musste. Über 100 Fernmelderelais klapperten beim Rechnen ununterbrochen. Natürlich gab es immer wieder Probleme, denn Röhren haben eine recht begrenzte Lebensdauer. Die Ergebnisse wurden mit einer alten elektrischen Schreibmaschine ausgedruckt oder als Lochstreifen zur direkten Weiterverwendung ausgegeben. Von Lochstreifen erhielt die Maschine auch die Folge der Befehle, die der Reihe nach auszuführen waren.

Programmschleifen, also Befehlsfolgen, die mehrfach durchlaufen werden, waren zu Schleifen zusammen geklebt. Heute weiß jeder Programmierer, wie Programmschleifen zu schreiben sind. Aber keiner weiß mehr, dass die Schleifen nicht einfach mit Uhu zusammengeklebt werden dürfen, weil sie sonst in den Lesegeräten stecken bleiben. Man muss den Klebstoff mit Aceton verdünnen.

In der Sekunde konnte die Maschine etwa zwei Rechenoperationen ausführen. Die G1 war 10- bis 20-mal schneller als ein geübter Rechner mit einer Tischrechenmaschine der damaligen Zeit.

Im März 1953, die G2, die nächst bessere Maschine, war noch im Bau, tagte in Göttingen die Kommission „Rechenanlagen“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft. 126 Teilnehmer waren gekommen. Aus Kiel die jungen Astronomen Karl-Heinz Böhm und Volker Weidemann, von der Göttinger Sternwarte Hans Haffner, der Vor-Vorgänger von Herrn Mannheim hier in Würzburg.

+	+	+	+	+	<b>F</b>	●	+	+	+	+	<b>0</b>
+	+	+	+	●	<b>a</b>	●	+	+	+	●	<b>1</b>
+	+	+	+	●	<b>b</b>	●	+	+	○	+	<b>2</b>
+	+	+	○	●	<b>c</b>	●	+	+	○	●	<b>3</b>
+	+	○	●	+	<b>d</b>	●	+	○	+	+	<b>4</b>
+	+	○	+	●	<b>h</b>	●	+	○	+	●	<b>5</b>
+	+	○	●	+	<b>+</b>	●	+	○	●	+	<b>6</b>
+	+	○	●	●	<b>-</b>	●	+	○	●	●	<b>7</b>
+	○	+	+	+	<b>m</b>	●	○	+	+	+	<b>8</b>
+	○	+	+	●	<b>J</b>	●	○	+	+	●	<b>9</b>
+	○	+	+	●	<b>p</b>	●	○	+	+	●	<b>D</b>
+	○	+	●	●	<b>n</b>	●	○	+	●	●	<b>L</b>
+	○	+	+	+	<b>x</b>	●	○	+	+	+	<b>V</b>
+	○	+	+	●	<b>z</b>	●	○	+	+	●	<b>S</b>
+	○	+	+	○	<b>:</b>	●	○	+	+	+	<b>Zw</b>
+	○	+	+	○	<b>→</b>	●	○	+	+	○	<b>I</b>

**Abbildung 4:** Die Tabelle der Codezeichen auf dem Lochstreifen. Die kleinen Kreise an der 4. Stelle deuten Transportlöcher an. Entscheidungen, die in heutigen Programmiersprachen mit do while ... enddo oder ähnlich geschrieben werden, erfolgten durch die Zeichen SI ... I. Wenn das Ergebnis der Rechnungen vor diesem Programmteil positiv ist oder 0 wird der hier durch Punkte ange deutete Programmteil übersprungen.

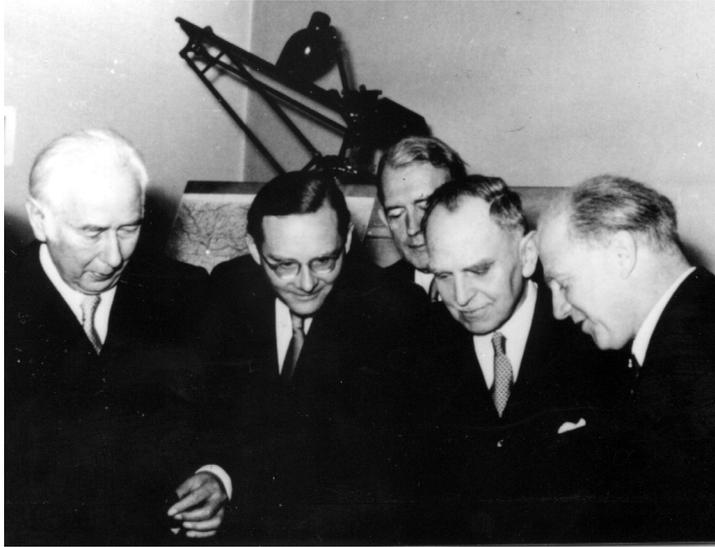
Konrad Zuse, der im Krieg die Z3 gebaut hatte, berichtete über die im Bau befindliche Maschine Z5, auch sie war von Relais gesteuert, wie die G1. Die Göttinger erzählten voller Begeisterung von ihren Erfahrungen mit der G1.

Arnulf Schlüter berichtete über das Rechnen von Bahnen geladener Teilchen, die in das Magnetfeld der Erde geraten und so genannte Störmerbahnen durchlaufen, ehe sie auf die Erde treffen. Das Programm dazu löste ein System gewöhnlicher Differenzialgleichungen. Reimar Lüst zeigte, wie man Rechenmaschinen das Wurzelziehen beibringt.

### 3 Die G2

Ein Jahr nach dieser denkwürdigen Konferenz, also im Jahre 1954, wurde die G2 in Betrieb genommen. Das Programm wurde zwar noch immer mit Lochstreifen eingegeben, aber die Befehle und Daten waren auf der Trommel gespeichert. Die Maschine erledigte etwa 30 Rechenoperationen in der Sekunde. Erst zwei Jahre später kam der ihr etwa gleichwertige Rechner IBM650 nach Europa. Die G2 war ein Unikat, die IBM-Maschine ging in Serie und wurde ein Welterfolg.

Elektronische Rechenmaschinen wurden bis dahin in der Astronomie noch nicht eingesetzt. Waren sie überhaupt dafür geeignet? Für die G2 kam die Stunde der Wahrheit im Jahre 1955. Die Bestimmung des Abstandes Erde-Sonne, der Grundeinheit für Entfernungen im Weltall, geschieht mit Hilfe nahe vorbeikommender Kleinplaneten. Zwei kleine Planeten bieten sich dafür an. Ihre Namen: Amor und Eros. Der Astronom kann sich also bei der Bestimmung der Astronomischen Einheit



**Abbildung 5:** Hoher Besuch: Bundespräsident Theodor Heuss, Ludwig Biermann, Otto Hahn und Werner Heisenberg betrachten Ausdrücke der G1.

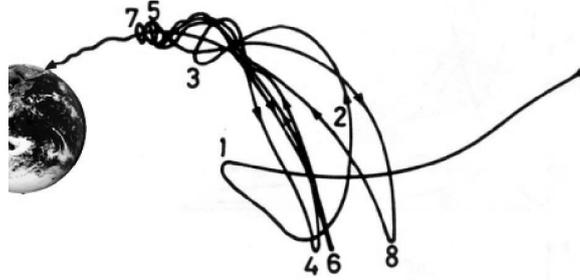
entweder der amourösen oder der erotischen Methode bedienen. Im März 1956 sollte Amor wieder einmal der Erde besonders nahe kommen.

Seit Jahrhunderten hatten die Astronomen Verfahren zur Berechnung der Bewegung eines Himmelskörpers entwickelt, die er unter dem Einfluß des Schwerefeldes der Sonne und der großen Planeten ausführt. Nach der Entwicklung von mechanischen und elektrischen Tischrechenmaschinen konnten die Verfahren diesen Hilfsmitteln angepaßt werden. Die Mitarbeiter des Astronomischen Rechen-Instituts, das damals in Berlin-Babelsberg angesiedelt war, hatten viel Erfahrung in der Berechnung von Planetenephemeriden. Ein Jahr vor der Annäherung von Amor an die Erde schritt man ans Werk. Doch damals arbeitete bereits die G2, und so bot es sich an, auch mit ihr die Bahn des Amor zu berechnen. Da würde man sehen, was die neuen Maschinen, von denen so viel die Rede war, wirklich zu leisten vermochten.

Viele Wissenschaftler blickten damals misstrauisch auf die neu entstehenden Computer. Selbst ein Jahrzehnt später, als Hans-Heinrich Voigt und ich versuchten, in Göttingen ein gemeinsam von der Universität und der Max-Planck-Gesellschaft betriebenes Rechenzentrum zu schaffen, ließen uns Kollegen durchblicken, dass ihrer Meinung nach Computer zwar sehr wichtig sind, dass aber ein guter Mathematiker oder ein guter theoretischer Physiker sie nicht braucht.

Als der Kleine Planet Amor im Anmarsch war, schritten in Göttingen Peter Stumpff, Stefan Temesvary, Arnulf Schlüter und Konrad Jörgens ans Werk.

Sie standen vor einer wohlbekannten mathematischen Aufgabe, der Lösung eines Systems gewöhnlicher Differenzialgleichungen. Was man dazu tun muss, steht in den Lehrbüchern, und wenn es nicht so sehr auf Arbeitszeit ankommt – die Arbeit macht schließlich eine Maschine – muss man nicht die bisher für Tischrechenma-



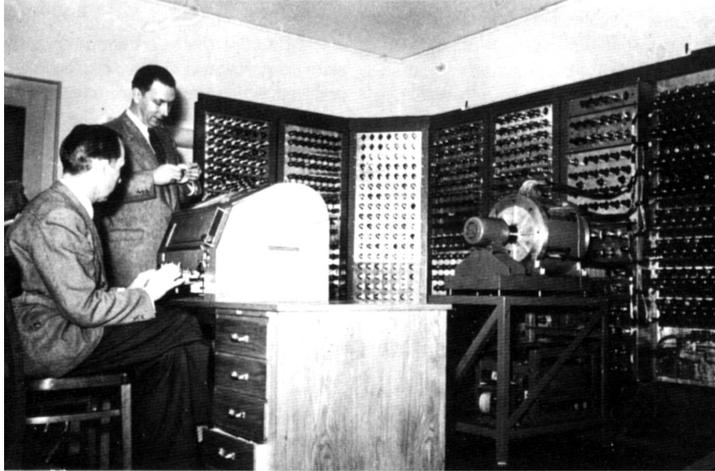
**Abbildung 6:** Die komplizierten Bahnen aus dem Weltall kommender geladener Teilchen im Magnetfeld der Erde zu berechnen, waren eine der Aufgaben der G1.

schienen entwickelten zeitsparenden astronomischen Rechenmethoden verwenden, sondern kann die Differenzialgleichungen nach wohlbekannten Rezepten lösen. Das Göttinger Ergebnis war etwas anders als die von den in Babelsberg nach den klassischen Verfahren berechneten Ephemeriden.

Und dann kam Amor. Wo aber stand er am Himmel? Dort, wo ihm die erfahrenen Babelsberger Rechner einen Platz zugewiesen hatten? Nein, er stand näher an der Stelle, an die ihn die G2 plazierte hatte!

Aber die neuen Maschinen konnten noch mehr! Im März des Jahres 1957 vollendete Ludwig Biermann sein 50. Lebensjahr, und man kam auf die Idee, die G2 ein Portrait des Jubilars drucken zu lassen. Heute wäre das kein Problem: Man nimmt ein Foto, scannt es ein und läßt es ausdrucken. Damals gab es weder Scanner, noch waren Drucker auf dem Markt. Die G2 hatte als Ausgabegerät nur einen Lorenz-Fernschreiber. Mehr als Buchstaben, Ziffern und Interpunktionen konnte er nicht auf das Papier setzen. An Graustufen oder gar Farben war nicht zu denken. Doch zwei junge Doktoranden, Friedrich Meyer und Hermann-Ulrich Schmidt, wußten sich zu helfen. Die verschiedenen Zeichen, über die der Drucker verfügte, benötigten verschieden viel Druckerschwärze. Ein Feld von Leerzeichen war weiß. Felder mit Ziffern oder Buchstaben wirkten aus der Entfernung betrachtet hellgrau. Die 8 auf die 9 geklopft ergibt nahezu Schwarz. Damit war das Problem der Ausgabe von Graustufen gelöst.

Doch wie das Bild in den Computer bringen? Auch da wußten Meyer und Schmidt sich zu helfen. Sie fertigten ein Dia des Bildes an und projizierten es auf eine weiße Wand, auf die viele kleine Quadrate vorgezeichnet waren. Der eine ging zeilenweise das Raster durch und schätzte für jedes Feld die mittlere Helligkeit des projizierten Bildes in diesem Quadrat. Der andere wandelte diese Helligkeit in Zeichen um, die entsprechende Graustufen darstellten. Das alles wurde in einen Lochstreifen gestanzt und ausgedruckt. Auf diese Weise, die ich etwas vereinfacht habe, entstand eines der ersten Computerbilder der Welt.



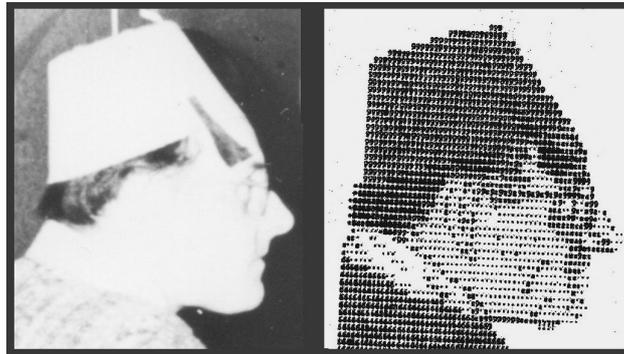
**Abbildung 7:** Die G2 hatte eine wesentlich größere Trommel, auf der auch das jeweilige Rechenprogramm gespeichert war. Heiz Billing (stehend) mit einem seiner Mitarbeiter. Wurden bei der G1 die Ergebnisse noch auf einer elektrischen Schreibmaschine ausgedruckt, so hatte die G2 bereits einen Fernschreiber der Marke Lorenz, der drucken und Lochstreifen ausgeben konnte.

Am Morgen seines Geburtstages wurde Ludwig Biermann gebeten, sich vor die G2 zu setzen und einen bestimmten Knopf zu drücken. Daraufhin tastete das Lesegerät den vorbereiteten Lochstreifen ab, während Biermann am Fernschreiber zeilenweise sein Bild entstehen sah. Ludwig Biermann, der an der Einführung der Computer in der Wissenschaft so viel Verdienste hatte, hat nie selbst einen Computer angerührt. Nur an jenem Geburtstagsmorgen ließen wir ihn auf einen Knopf drücken. ... und das machte er perfekt.

Stefan Temesvary und ich schrieben damals unser erstes Programm zur Berechnung von Sternmodellen für die G2. Als das Institut im Jahre 1958 nach München übersiedelte, gingen die G1 und die G2 mit, die G1 arbeitete noch einige Zeit an der Münchner Universität und wurde dann verschrottet. Einen Ehrenplatz im Deutschen Museum erhielt sie leider nicht. Die G2 wurde im neuen Institutsgebäude aufgestellt und arbeitete weiter. Damals entstand in der Billingschen Abteilung auch die G3, die etwa 150mal schneller war als die G2. Sie ging mit nach München.

Ich hatte mich in Erlangen habilitiert und hielt damals von München aus dort regelmäßig Vorlesungen. Im WS 1959/60 wagte ich eine Vorlesung über „Programmieren elektronischer Rechenmaschinen“. Das war zu einer Zeit, als weder in Erlangen und kaum irgendwo sonst in Deutschland darüber gelehrt wurde, außer vielleicht an der damaliger Münchner TH. Die Informatik kam erst viele Jahre später an die Erlanger Uni.

Da es noch keine allgemeinen Programmiersprachen gab, legte ich den Maschinencode der G2 zugrunde. Gegen Ende des Semesters schrieben die Hörer und ich an der Tafel ein Programm zur Lösung der Emdengleichung, also einer nichtlinea-



**Abbildung 8:** Links: Ludwig Biermann bei einem Institutsfasching in orientalischem Outfit. Rechts: Die auf der G2 hergestellte Computergrafik.

ren gewöhnlichen Differenzialgleichung mit einer Singularität an einem Ende des Intervalls. Das Programm ließ ich in München auf Lochband stanzen. Der Erlanger Rektor genehmigte meinen Hörern, allzu viele waren es nicht, eine Exkursion nach München. Dort fütterten wir den Lochstreifen in die G2, und es war das erste Mal in meinem Leben, dass ein Computerprogramm, an dem ich beteiligt war, auf Anhieb fehlerlos lief. Es war übrigens auch das letzte Mal!



**Abbildung 9:** Sternentwicklungsrechnungen auf der G2 um 1957: Eine Rechnerin, Stefan Temesvary (sitzend), und der Autor (stehend) starren auf die Ergebnisse.

Temesvary und ich setzten unsere Entwicklungsrechnungen für Sterne von etwa einer Sonnenmasse fort, die in ihrem Inneren allen Wasserstoff verbraucht haben und von der Hauptreihe in die Richtung der Roten Riesen marschieren. Sie besitzen einen entarteten Kern aus Helium. Da die Entwicklung durch das nukleare Verbrennen des

Wasserstoffs zu Helium gesteuert wird, ist sie langsam im Vergleich zur Einstellzeit des thermischen und erst recht des hydrostatischen Gleichgewichts. Deshalb sind nur gewöhnliche Differenzialgleichungen zu lösen. Wir begannen die Rechnungen mit Lösungen, die die äußeren Randbedingungen erfüllten und rechneten durch die Hülle nach innen, bis wir auf den Heliumkern trafen. Heliumkerne hatten wir auf Vorrat gerechnet. Natürlich passten Hüllenlösung und Kern nicht aneinander, doch wir lernten schnell, wie wir die noch freien Parameter, mit denen wir die Hüllenrechnungen begannen, abändern musste, um die Anpassung zu verbessern. Wir suchten nach Lösungen der gewöhnlichen Differenzialgleichungen des Sternaufbaus, die an der Sternoberfläche und im Zentrum jeweils zwei Randbedingungen erfüllen mussten. Für jede Rechnung von der Oberfläche zum Kern benötigte die G2 fünf Stunden. Dann erst erfuhren wir, wie gut oder schlecht wir die Anfangswerte für die Hülle gewählt hatten. Eine Reise von der Oberfläche bis fast in das Zentrum eines Sterns in fünf Stunden! Diese Reise ging von der Atmosphäre im Strahlungsgleichgewicht durch die Konvektionszone, in der die aus dem Inneren kommende Energie hauptsächlich durch turbulente Bewegung transportiert wird. Sie führte durch Bereiche, in denen der Strahlungsfluss durch das negative Wasserstoffion oder durch neutralen Wasserstoff kontrolliert wird oder durch Elektronen, die den Atomhüllen abgeschlagen worden sind. Sie führt durch Bereiche, in denen das Helium neutral ist und durch solche, in denen die Heliumatome ein oder zwei Elektronen verloren haben. Schließlich führte die Reise in Gebiete, in denen die Kernenergie frei wird, die den Stern leuchten lässt. Das alles musste das Programm erkennen und zu den entsprechenden Gleichungen umschalten. Es war aufregend, vor der laufenden Maschine den Ausdrucken anzusehen, wie die Rechnung immer tiefer in den Stern eindrang. Und wenn irgendetwas Ungewöhnliches passierte, musste man von Hand eingreifen und den Fehler rasch beseitigen, wenn die Rechenzeit nicht verloren gehen sollte. Beachten Sie bitte, die G2 war eine Festkommamaschine, wenn eine Zahl, auch bei Zwischenrechnungen, größer wurde als 8, blieb die Maschine unweigerlich stehen! Darauf musste man beim Programmieren achten, also zu einer Zeit, zu der man weder die Ergebnisse noch die Zwischenergebnisse kannte!

Für die langen Rechnungen bekamen wir nur nachts Rechenzeit. Deshalb wurden Studenten angestellt, die nachts die Integrationen von der Sternoberfläche in das Innere überwachten. Zur besseren Übersicht hatten wir zu Beginn jedes Integrationschrittes in einer Zeile Platz für sieben Zeichen gelassen. Dort konnten jeweils ein Stern oder ein Punkt gesetzt werden. Punkt an der ersten Stelle bedeutete zum Beispiel: Die Integration verläuft in einem konvektiven Bereich. War statt dessen an der ersten Stelle ein Stern, bedeutete dies, dass die Rechnung in einem Bereich des Sterns ausgeführt wurde, an der die aus dem inneren kommende Energie durch Strahlung nach außen transportiert wird. Die anderen Stellen zeigten durch Stern oder Punkt an, durch welche Prozesse der Absorptionskoeffizient dominiert wird oder ob die nukleare Energieerzeugung zur Energiebilanz merklich beiträgt. Ich erinnere mich, dass Temesvary einmal mitten in der Nacht angerufen wurde, weil der Nachtrechner den Verdacht hatte, dass etwas schief läuft. „Sind Sie im Bereich der Konvektion oder nicht?“ fragte der aus dem Schlaf gerissene Temesvary. „Ich glaube nicht“, antwortete es auf der anderen Seite etwas unsicher. „Unsinn, die Rechnung ist mitten in der Konvektionszone, das höre ich doch!“, war die Antwort. Tatsächlich

konnte man die Anschläge von Punkt und Stern akustisch unterscheiden, da der Stern zwei Anschläge benötigte. Wir haben in dieser Zeit viele Nachtrechner verschlissen. Einige kamen später zu Amt und Würden. Der Mathematiker Bruno Brosowski hatte Lehrstühle in Göttingen und Frankfurt inne. Auch unser Heidelberger Kollege Heinrich Völk zählte zu unseren Nachtrechnern.

Damals kam auch der Physiker Norman Baker als Postdoc nach München. Er und ich begannen auf der G2 pulsierende Sternmodelle zu untersuchen, was wiederum hieß, Eigenwerte gewöhnlicher Differenzialgleichungen zu finden.

Um 1961 war die Situation etwa so: Die Entwicklung von Hauptreihensternen machte keine Probleme, denn diese Sterne sind im mechanischen Gleichgewicht: Schwerkraft und Druck halten einander die Waage. Sie sind auch im thermischen Gleichgewicht: Jedes Gramm Sternmaterie gibt so viel Energie an seine Nachbarschaft ab, wie es erhält. Weder erhitzt es sich mit der Zeit, noch kühlt es ab. Sterne in diesem doppelten Gleichgewicht werden durch ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen beschrieben – kein größeres mathematisches Problem. Das wird sofort anders, wenn sich der verfügbare nukleare Brennstoff, der Wasserstoff, im Stern erschöpft oder wenn der Reaktor im Stern instabil wird. Dann verändert sich der Stern bereits im Laufe von Tausenden Jahren, manchmal im Laufe von Minuten. Da müssen die echten partiellen Differenzialgleichungen gelöst werden.

## 4 Ein neues Rechenverfahren

Inzwischen hatte die Industrie zwar leistungsfähigere Computer auf den Markt geworfen, doch die Schwierigkeiten bei den Sternentwicklungsrechnungen konnten sie nicht überwinden. Die lagen nicht in der Hard-, sondern in der Software. Deshalb war es bis 1961 nicht möglich, die Entwicklung von Sternen von merklich mehr Masse als der Sonne nach dem Erschöpfen des Brennstoffes zu verfolgen, also die Entwicklung von der Hauptreihe weg. Bei Sternen, deren Masse im Bereich der Sonne liegt, ist das zwar möglich, doch in diesen Sternen beginnt nach einiger Zeit die Fusion des Heliums zu Kohlenstoff, Sauerstoff und Neon mit unkontrollierbarer Stärke. Martin Schwarzschild war in Princeton bis dahin gekommen, doch vor diesem so genannten Helium Flash musste er kapitulieren. Damals wusste eben niemand, wie man aus dem Gleichgewicht geratene Sterne am Computer verfolgen kann. Doch einer vielleicht, Louis Henyey, Professor für Astronomie an der Universität von Berkeley. Er hatte eine Arbeit über ein neues Rechenverfahren zur Berechnung von Sternmodellen veröffentlicht. Ganz verstanden hatte die Arbeit wohl niemand, und der Autor hatte auch keine schlagenden Beweise für die Leistungsfähigkeit seiner neuen Methode geliefert.

Wieder einmal hatte ich Glück. Die Internationale Astronomische Union, die alle vier Jahre ihre Generalversammlung abhält, traf sich im August im Jahre 1961 in Berkeley. Ich hatte Gelegenheit, an dieser Konferenz teilzunehmen. Viele angesehene Astronomen waren gekommen. Das wichtigste, das ich danach aus Berkeley mitnahm, waren meine Vortragsnotizen von Henyey's Vorlesung über seine neue Rechenmethode. Verstanden hatte ich sie allerdings nicht. Erst als ich erfuhr, dass Martin Schwarzschild in Princeton nach seinen Notizen von Henyey's Vorlesung ein



**Abbildung 10:** Louis Henyey (1910–1970), der Erfinder der nach ihm benannten Rechenmethode zur Berechnung der zeitlichen Entwicklung der Sterne.

Computerprogramm zum Laufen und seinen Stern durch den Helium-Flash gebracht hatte, sah ich mir meine Notizen des Henyey-Vortrages wieder an – und ich verstand die Methode.

In dieser Zeit bereitete ich nach einem einjährigen Aufenthalt in den USA den Arbeitsplan für die Zeit nach meiner Rückkehr nach München vor. Alfred Weigert hatte an unserem Institut eine Stelle gefunden, außerdem wartete dort eine neue Mitarbeiterin, Emmi Hofmeister, die spätere Emmi Meyer, gelernte Versicherungsmathematikerin, die mit uns arbeiten wollte. Für sie schrieb ich von Pasadena aus eine Kurzfassung der Henyey-Methode.

## 5 Ein Telegramm nach Berkeley

Bald danach kehrte ich nach München zurück. Emmi Hofmeister, Alfred Weigert und ich begannen sofort, ein Henyey-Programm in der Programmiersprache FORTRAN zu schreiben, mit dem wir einen Stern von der Hauptreihe ins Stadium eines Roten Riesen und danach in das Stadium eines pulsierenden Delta-Cephei-Sternes verfolgen wollten. Wir wählten einen Stern von sieben Sonnenmassen. Damals bekam Garching eine IBM7090 und bald spielte es sich ein, dass wir mit einem institutseigenen Kleinbus Kasten mit Lochkarten und Computerausdrucke zwischen Garching und München hin- und herschickten. Einmal änderten wir noch kurz vor der Abfahrt

des Busses das Programm und als die neuen Karten gelocht waren, rannte Weigert mit dem Kasten schnell zum Bus, der gerade abfahren wollte. Dabei merkte er nicht, dass auf seinem Weg eine Glastür geschlossen war. Er kam unverletzt durch die Tür und wir erzählten ihm später, dass das Loch im Glas seine Silhouette zeige, einschließlich der Ohren.

Im Januar 1963 lief das Programm und es gelang uns, in Entwicklungsstadien unseres Sterns vorzudringen, in die noch niemand gelangt war. Wir schickten ein Telegramm an Louis Henyey: "The Henyey method is working in Munich!" Der Stern erschöpfte seinen Wasserstoff im Zentrum, wurde zu Roten Riesen. Aus mir heute nicht mehr verständlichen Gründen fürchteten wir, dass in unseren Rechnungen als nächstes nukleares Brennen der Kohlenstoff zündeten würde. Als wir einmal unsere Lochkarten selbst nach Garching brachten, modifizierten wir einen Bayerischen Spruch. „Oh Heiliger Sankt Florian, behüt' das C, zünds Helium an!“ Das wirkte. Das Zentrum unseres Modellsterns wurde kurz danach immer dichter und heißer. Schließlich zündete im Zentrum das Helium. Mehrmals führte die Entwicklung den Stern durch Phasen, in denen ihn das Helium seiner Oberflächenschichten zu pulsierenden Schwingungen zwang. Norman Baker, inzwischen Professor an der Columbia-Universität in New York, und ich hatten damit die ersten Sternmodelle für unsere Untersuchungen über die Ursache der Pulsationen. Das lieferte auch die Begründung der berühmten Perioden-Leuchtkraft-Beziehung der Delta-Cephei-Sterne, wie Emmi Hofmeister in ihrer Dissertation zeigte. – In den astrophysikalischen Arbeiten unseres Instituts waren die Computer voll angekommen. Kurt von Sengbusch (mit einer Untersuchung über die Entwicklung der Sonne) und Hans-Christoph Thomas (mit der Entwicklung eines sonnenähnlichen Sterns durch den Helium-Flash) benutzten das Programm für ihre Dissertationen und verbesserten es dabei wesentlich.

## 6 Sterne, die es nicht gibt, und ihre Eigenschaften

Wenn ich jetzt, viele Jahrzehnte danach, sagen soll, was mir im Rückblick als das Wichtigste erscheint. Dann ist es das: Die Computer geben uns die Möglichkeit, viele Eigenschaften der Sterne zu verstehen. Das ist nicht immer einfach. Wer mit Computern arbeitet, weiß es: Man gibt Zahlen ein und bekommt Zahlen heraus. Man gibt andere Zahlen ein und bekommt andere heraus. Aber was bewirkt was? Dazu braucht man mehr als nur die Naturgesetze in ein Programm einzubauen und los zu rechnen. Ich habe einmal so formuliert: Um die Sterne am Himmel zu verstehen, muss man auch die Sterne studieren, die es nicht gibt. Zum Verständnis der Sterne dürfen wir nicht nur die Lösungen der Sternaufbaugleichungen studieren, die Sterne beschreiben, die in der Natur realisiert sind, sondern auch die Mannigfaltigkeit der Lösungen, in die diese Lösungen eingebettet sind. Ich will das an drei Beispielen erläutern:

Vor mehr als 50 Jahren kam die immer wieder diskutierte Frage auf, ob sich die Naturkonstanten nicht mit der Zeit ändern. Damals ließ Schwarzschild einen seiner Schüler die Entwicklung der Sonne unter der Annahme einer künstlichen zeitlich veränderlichen Gravitationskonstanten rechnen. Die Stärke der Gravitation beein-

flusst das Alter, Leuchtkraft und Durchmesser der Sonne von heute. Das Ergebnis war eine obere Grenze der Variabilität der Gravitationskonstanten. Hätte die Konstante sich stärker geändert, sähe die Sonne heute anders aus.

Ein zweites Beispiel: Es ist an den Aufbaugleichungen nicht zu erkennen, warum die Sterne Rote Riesensterne werden, wenn sich der Wasserstoff in ihren Zentralgebieten erschöpft. Liegt es daran, dass der Kern eine andere chemische Zusammensetzung hat? Oder daran, dass die Energie jetzt nicht mehr hauptsächlich im Zentrum, sondern an der Oberfläche einer Heliumkugel freigesetzt wird? In seiner Hamburger Zeit setzten Weigert und sein Schüler Höppner eine Punktmasse in das Zentrum eines Hauptreihensterns, die dort die Schwerkraft künstlich erhöht, sonst aber keinerlei Wirkung auf chemischer Zusammensetzung und Erzeugung von Kernenergie hatte. Das Ergebnis: Der Stern, dem das und sonst nichts anderes angetan wurde, verwandelte sich in einen Roten Riesenstern! Was lernen wir daraus? Dass Hauptreihensterne, die während ihrer Entwicklung in ihrem Zentrum eine hohe Dichtekonzentration bilden, eine Art Massenpunkt, genau deshalb zu Roten Riesen werden.

Ein drittes Beispiel: Die Energie, mit der die Sonne leuchtet und uns wärmt, wird bei Kernreaktionen frei. Strahlt die Sonne stärker, wenn die Kernreaktionen effektiver werden? Achim Weiss in Garching hat mit seinen Mitarbeitern Sonnenmodelle mit künstlich bis zu 10fach vergrößerten Wirkungsquerschnitten der Kernreaktionen gerechnet. Das Ergebnis: Die Leuchtkraft des Sterns ändert sich kaum.

Das sind drei Beispiele, wo man bei den Rechnungen der Natur etwas Gewalt angetan hat, um herauszufinden, was was bewirkt. Als wir vor einem halben Jahrhundert Computer einsetzten, wussten wir, dass wir nicht die einzigen waren. Schwarzschild rechnete in Princeton massearme Sterne, in Pasadena hatte Icko Iben etwa gleichzeitig mit uns ein Henyey-Programm geschrieben, das bald Ergebnisse lieferte. Und in Warschau bastelte ein Student an einem Henyey-Programm. Er wurde bald durch seinen Einfallsreichtum weit über die Grenzen Polens bekannt: Bohdan Pacynski, Schwarzschilds späterer Nachfolger in Princeton. Er starb im vergangenen Jahr.

Aber so ist es, viele meiner Kollegen und Freunde von damals sind nicht mehr unter uns: Norman Baker, Ludwig Biermann, Dietmar Lauterborn, Bohdan Pacynski, Martin Schwarzschild, Stefan Temesvary, Alfred Weigert und Marshall Wrubel. Ich habe ihnen allen viel zu verdanken. Jetzt am Ende meiner Vorlesung eine persönliche Bemerkung: Bis auf einen wurde keiner so alt wie ich. Sie haben sich eben weniger geschont.