

Humboldt-Universität zu Berlin
Philosophische Fakultät III
Institut für Musik- und Medienwissenschaft
Studiengang Musik und Medien (BA)
Wintersemester 2011/12
Seminar „MEDIENGESCHICHTE IM DIREKTKONTAKT. Explorationen im medienarchäologischen Fundus.“
Dozent: Prof. Dr. Wolfgang Ernst

**Schriftliche Hausarbeit als Abschlussprüfung im Modul X:
„Vertiefungsstudium: Medienkompetenz unter
hochtechnischen Bedingungen“.**

Der Operationsverstärker

Das ‚epistemische Ding‘ der Kybernetik

Johannes Maibaum

Abgabe: 30. April 2012

Matrikelnummer.: 533368

5. Fachsemester

Krossener Str. 27, 10245 Berlin

jmaibaum@googlemail.com

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	„Mischgeräte“ und ein früher elektronischer Analogrechner	4
2.1	Das „Mischgerät“	5
2.2	Vom A-4-Flugsimulator zum elektronischen Allzweck-Analogrechner	8
3	Das Prinzip der Gegenkopplung	11
3.1	“Like any modern episteme worthy of the name...”	11
3.2	Der Feuerleitrechner und der Operationsverstärker	14
4	Das ‚epistemische Ding‘ der Kybernetik	18
5	Fazit	22
	Abbildungsverzeichnis	25
	Literaturverzeichnis	26

1 Einleitung

The use of an amplifier as a computing tool is not entirely obvious.

(Jim Williams¹)

Die Unterscheidung zwischen dem *Analogen* und dem *Digitalen* ist seit dem Aufkommen des Digitalcomputers – als technischer Implementation der universellen Turing-Maschine nach der von-Neumann-Architektur – immer wieder Gegenstand nicht nur natur- und ingenieurwissenschaftlicher, sondern auch philosophischer, kulturwissenschaftlicher und vor allem medientheoretischer Diskurse.² Dem ubiquitären Digitalcomputer werden dabei die sogenannten *analogen Rechenmaschinen* und im besonderen der *elektronische Analogrechner* gegenübergestellt. Exemplarisch nachzulesen ist eine solche Gegenüberstellung von analog und digital in der häufig zitierten siebten Macy-Konferenz zur Kybernetik, die 1950 stattfand.³

Aufgabe der Medientheorie und ihrer Methode der Medienarchäologie ist, die Unterscheidung zwischen analog und digital „streng zu denken, d. h. kritisch zwischen diskursiven, metaphorischen und wohl definierten Verwendungen dieses Begriffs zu trennen.“⁴ Zunächst muss daher der Begriff des *Analogrechners* selbst beleuchtet werden. In der Gegenüberstellung mit dem Digitalcomputer erscheint es auf den ersten Blick als sei mit beiden Rechnern prinzipiell dasselbe möglich. Dass dem rein technisch betrachtet nicht so ist, wird daran deutlich, dass mechanische Analogrechner in den 1930er Jahren noch den Namen *differential analyser* trugen – eine Bezeichnung, die ihrem eigentlichen Einsatzgebiet – auch der späteren rein elektronischen Geräte – entspricht: mit ihnen können Differentialgleichungen gelöst werden.⁵ Ob nun mechanisch oder elektronisch, nur für ein spezielles Problem geeignet (wie z. B. Rechenschieber⁶) oder ‚allgemein‘ einsetzbar (wie der *differential analyser*), besteht die wesentliche Charakteristik des

1 Jim Williams. „Is Analog Circuit Design Dead?“ In: *Analog Circuit Design. Art, Science, and Personalities*. Hrsg. von dems. Boston u. a.: Butterworth-Heinemann, 2010 [1991], S. 17–20, hier S. 17.

2 Für die zuletzt genannten Diskurse relevant sind z. B.: Martin Warnke, Wolfgang Coy und Georg Christoph Tholen, Hrsg. *HyperKult II. Zur Ortsbestimmung digitaler Medien*. Bielefeld: Transcript, 2005; Jens Schröter und Alexander Böhnke, Hrsg. *Analog/Digital – Opposition oder Kontinuum? Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung*. Medienumbrüche 2. Bielefeld: Transcript, 2004.

3 Nachzulesen in: Claus Pias, Hrsg. *Cybernetics – Kybernetik. The Macy-Conferences 1946–1953*. Bd. 1: *Transactions/Protokolle*. Zürich und Berlin: Diaphanes, 2003, S. 171 ff.

4 Wolfgang Ernst. „Den A/D-Umbruch aktiv denken – medienarchäologisch, kulturtechnisch“. In: *Analog/Digital – Opposition oder Kontinuum? Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung*. Hrsg. von Jens Schröter und Alexander Böhnke. Medienumbrüche 2. Bielefeld: Transcript, 2004, S. 49–65, hier S. 49.

5 Die Idee zu einem solchen mechanischen Gerät zur Lösung von Differentialgleichungen kam William Thomson im Jahr 1876. Der erste in diesem Sinn tatsächlich realisierte *differential analyser* wurde jedoch erst 1931 von einer Arbeitsgruppe um Vannevar Bush fertiggestellt, vgl. Bernd Ulmann. *Analogrechner. Wunderwerke der Technik*. Grundlagen, Geschichte und Anwendung. München: Oldenbourg, 2010, S. 32 f., 47 f.

6 Vgl. ebd., S. 14 ff.

Analogrechners darin, so konfigurierbar zu sein, dass er sich zum zu berechnenden Problem analog verhält.⁷

Die diskursive Bedeutung der Gegenüberstellung von analog und digital für die Medientheorie kann also nicht allein in den technischen Eigenschaften der jeweiligen Rechenmaschinen begründet sein. Dennoch lassen sich im Programm der Kybernetik Spuren finden, die diese Unterscheidung wesentlich aufhellen können. Ihre initiale Beobachtung formuliert die Kybernetik in einem Aufsatz aus dem Jahr 1943: Mechanismen der *Rückkopplung*, die bestimmten Maschinen ein *zielgerichtetes Verhalten* ermöglichen, eignen sich demnach auch zur Beschreibung des Verhaltens lebendiger Organismen, folglich auch des Menschen:

Purposeful active behaviour may be subdivided into two classes: "feed-back" (or "teleological") and "non-feed-back" (or "non-teleological"). The expression feed-back is used by engineers in two different senses. In a broad sense it may denote that some of the output energy of an apparatus or machine is returned as input; an example is an electrical amplifier with feed-back. [...]

Finally it reveals that a uniform behaviouristic analysis is applicable to both machines and living organisms, regardless of the complexity of behaviour.⁸

„Epistemologien sind eben auch eine Frage der Hardware.“⁹ In diesem Sinne ist auch die medienarchäologische Intention der vorliegenden Arbeit zu verstehen, die ganz konkret den zitierten *elektronischen Verstärker mit Rückkopplung* in den Fokus rückt. Als *Operationsverstärker*, wie dieser erstmals in einem Artikel aus dem Jahr 1947 betitelt wird,¹⁰ ist dieses materielle technische Ding nicht nur in allen Beschreibungen des elektronischen Analogrechners als dessen „wichtigste[s] Bauelement“ präsent,¹¹ sondern gleichzeitig ein wichtiges Teil der „Hardware“ der frühen Kybernetik.

Doch das eingangs erwähnte Zitat macht es deutlich: der Einsatz eines Verstärkers als Rechenhardware erscheint zunächst alles andere als offensichtlich. Dies ist nicht verwunderlich, denn auch die Hardwarewerdung des Operationsverstärkers steht am Ende eines langen Prozesses, der maßgeblich durch empirische Experimente geprägt ist. Der Wissenschaftshistoriker Hans-Jörg Rheinberger hat solche Prozesse innerhalb von *Experimentalsystemen* verortet: „Ex-

7 In Anbetracht des begrenzten Umfangs dieser Arbeit kann an dieser Stelle keine detailliertere Beschreibung unterschiedlicher analoger Rechenmaschinen erfolgen. Es sei stattdessen auf Ulmann, *Analogrechner*, S. 2 ff. verwiesen. Eine sehr detaillierte Diskussion des Unterschieds zwischen analog und digital findet sich außerdem in Jörg Pflüger. „Wo die Quantität in Qualität umschlägt. Notizen zum Verhältnis von Analogem und Digitalem“. In: *HyperKult II. Zur Ortsbestimmung digitaler Medien*. Hrsg. von Martin Warnke, Wolfgang Coy und Georg Christoph Tholen. Bielefeld: Transcript, 2005, S. 27–94.

8 Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener und Julian Bigelow. „Behavior, Purpose, and Teleology“. In: *Philosophy of Science* 10.1 (Jan. 1943), S. 18–24, hier S. 19, 22.

9 Wolfgang Hagen. „Die Camouflage der Kybernetik“. In: *Cybernetics – Kybernetik. The Macy-Conferences 1946–1953*. Bd. 2: *Essays & Documents/Essays & Dokumente*. Hrsg. von Claus Pias. Zürich und Berlin: Diaphanes, 2004, S. 191–207, hier S. 191.

10 Die englische Originalbezeichnung lautet *operational amplifier*, vgl. John R. Ragazzini, Robert H. Randall und Frederick A. Russell. „Analysis of Problems in Dynamics by Electronic Circuits“. In: *Proceedings of the I. R. E.* (Mai 1947), S. 444–452.

11 Hier als aktuelles Beispiel: Ulmann, *Analogrechner*, S. 92 ff.

perimentalsysteme, als Arbeitseinheiten der Forschung, sind Anordnungen zur Manipulation von Objekten des Wissens, die eingerichtet werden, um unbekannte Antworten auf Fragen zu geben, die wir ihrerseits noch nicht klar zu stellen vermögen.“¹² Innerhalb solcher Experimentalsysteme entstehen die Forschungsgegenstände als „Wissenschaftsobjekt[e] oder auch ‚epistemischen Ding[e]‘“, denen zunächst eine „irreduzible[] Vagheit“ eigentümlich sei.¹³ Rheinberger meint damit, dass ein epistemisches Ding, als welches der Operationsverstärker im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden soll, niemals von Beginn an als Forschungsziel feststünde, also zunächst auch nicht konkret benannt werden könne. „Zuerst und vor allem weiß man nie genau, wohin ein solches System führt.“¹⁴ Erst im Verlauf der experimentellen Praxis werden die das epistemische Ding charakterisierenden Eigenschaften langsam, wie in Listenform, zusammengetragen, wobei man den Gegenstand und die Experimentalanordnung dabei jedes mal „umdefinier[e].“¹⁵ Am Ende dieses Prozesses stehen schließlich „technische Objekte“, die als stabilisierte „Subroutine[n]“ wiederum Experimentalanordnungen bilden, die ihrerseits neue epistemische Objekte hervorbringen können.¹⁶ Aus dem technischen Ding des Operationsverstärkers sind dies erstens der elektronische Analogrechner und zweitens die Kybernetik.

Es werden daher im Verlauf dieser Arbeit drei Experimentalsysteme untersucht, in denen sich das epistemische Ding des Operationsverstärkers als Kernbestandteil elektrischer Analogrechner wie auch als rückgekoppelte Hardware der Kybernetik langsam herauskristallisiert. Zunächst steht in Kapitel 2 Peenemünde im Blick, ein Experimentalsystem, das wesentlich für die Entwicklung des elektrischen Analogrechnens war. Dort wurden während des Zweiten Weltkriegs die ersten Steuergeräte gebaut, die mathematische Operationen auf elektrischem Wege durchführten, um die Flugbahn der Aggregat-4-Rakete in der Luft zu stabilisieren und am Boden zu berechnen.¹⁷ Kapitel 3 springt etwa zehn Jahre zurück; in die Bell Laboratories nach Murray Hill, New Jersey, wo im Zuge der Vergrößerung des amerikanischen Telefonnetzes möglichst lineare, d. h. nicht verzerrende, elektronische Verstärker konstruiert werden mussten. Dafür wurde das Konzept der *negativen Rückkopplung* entwickelt, auf das sich auch Rosenblueth, Wiener und Bigelow beziehen,¹⁸ die den Operationsverstärker damit in das epistemologische Fundament der Kybernetik integrieren, das in Kapitel 4 thematisiert wird. Die interessante Frage: Bis zu welchem Punkt reicht die Wirkung des Operationsverstärkers als ‚epistemologisches Ding‘ der Kybernetik? Wo „verliert [er] seine Funktion als ein epistemischer ‚Generator von Überraschungen‘“?¹⁹

12 Hans-Jörg Rheinberger. „Experimentalsysteme, Epistemische Dinge, Experimentalkulturen. Zu einer Epistemologie des Experiments“. In: *Deutsche Zeitschrift für Philosophie* 42.3 (1994), S. 405–417, hier S. 408.

13 Ebd.

14 Ebd., S. 410.

15 Vgl. ebd., S. 409. Rheinberger argumentiert hier mit einem Zitat von Bruno Latour.

16 Ebd.

17 Bekannt ist das Aggregat-4 (kurz: A-4) auch unter der Propagandabezeichnung „Vergeltungswaffe 2“ (V-2).

18 Vgl. Rosenblueth, Wiener und Bigelow, „Behavior, Purpose, and Teleology“, S. 19.

19 Rheinberger, „Experimentalsysteme, Epistemische Dinge, Experimentalkulturen“, S. 410.

2 „Mischgeräte“ und ein früher elektronischer Analogrechner

Die Pionierarbeiten zum elektronischen Analogrechner fanden auf beiden Seiten des Atlantiks parallel statt und eskalierten – diesseits wie jenseits – während des Zweiten Weltkriegs angesichts der zunehmenden Beschleunigung im Luftkampf – im Angriff wie auch in der Abwehr. Auf deutscher Seite werden diese Pionierarbeiten hauptsächlich mit dem Namen Helmut Hoelzer verbunden.²⁰ Dieser arbeitete nach seinem Studium der Elektrotechnik in Darmstadt zunächst als Fernmeldeingenieur bei Telefunken in Berlin, wurde dann im Jahr 1939 dienstverpflichtet nach Peenemünde beordert und arbeitete in der dortigen „Heeresversuchsanstalt“, bzw. der „Erprobungsstelle der Luftwaffe ‚Peenemünde-West‘“ zunächst an der Funk-Fernsteuerung der Aggregat-4-Rakete.²¹ Nachdem sich die für die Rakete geplante mechanische Kreiselsteuerung als zu instabil herausstellte, begann Hoelzer außerdem mit der Entwicklung einer elektrischen Lösung des Problems. In eigener Erzählung:

Die Stabilitätstheorie verlangte, daß außer der seitlichen Abweichung auch die seitliche Komponente der Geschwindigkeit verwendet wird. Falls permanenter Seitenwind besteht, müßte dann auch noch das Integral der Abweichung aufgeschaltet werden. Woher kriegt man nun einen Echtzeitintegrator und einen Echtzeitdifferentiator? [...] Für einen Fernmeldeingenieur gab es da nur eine Lösung und zwar für beide Anforderungen: den Kondensator.²²

Der Fernmeldeingenieur in Diensten der Luftwaffe, zivil passenderweise leidenschaftlicher Segelflieger, weiß selbstverständlich einen trefflichen Ursprungsmythos zu berichten:

Im Jahre 1935 war ich Student in Darmstadt. Ich war auch Segelflieger. Ich habe es im Segelflug nie zu etwas Ordentlichem gebracht, aber mir fiel auf, daß es in der ganzen Fliegerei nicht ein einziges Gerät gab, welches die absolute Geschwindigkeit eines Flugzeugs, d. h. die Geschwindigkeit gegenüber der Erde messen kann. Aha, dachte ich, das ist ja ganz einfach, man nimmt die Beschleunigung, die man ja messen kann, integriert sie und – „voilà!“ hier ist die Geschwindigkeit.²³

Die theoretischen Zusammenhänge von elektrischer Spannung u , dem Stromfluss i und der Kapazität C des Kondensators, die seinen Einsatz als elektronischen Differenzierer oder Inte-

²⁰ Vgl. hierzu z. B. James E. Tomayko. „Helmut Hoelzer’s Fully Electronic Analog Computer“. In: *Annals of the History of Computing* 7.3 (Juli 1985), S. 227–240, Helmut Hoelzer. „50 Jahre Analogcomputer“. In: *Computer als Medium*. Hrsg. von Norbert Bolz, Friedrich Kittler und Christoph Tholen. Literatur- und Medienanalysen 4. München: Wilhelm Fink, 1999 [1994], S. 69–90 und das Kapitel „Helmut Hoelzers Arbeiten“ in Ulmann, *Analogrechner*, S. 68–90.

²¹ Vgl. Hoelzer, „50 Jahre Analogcomputer“, S. 72.

²² Ebd., S. 72 f.

²³ Ebd., S. 71 f.

grierer ermöglichen, und die Hoelzers Ausführungen zugrunde liegen, nennt er explizit erst in seiner 1946 veröffentlichten Dissertation:²⁴

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (2.1)$$

$$u = \frac{1}{C} \int i dt \quad (2.2)$$

Hier soll jedoch nicht primär Hoelzers Dissertation untersucht, sondern der Fokus auf die Entwicklungen der Peenemünder Forscher gelenkt werden, die erste Eigenschaften eines noch nicht konkretisierten epistemischen Dings formulieren, das einmal Operationsverstärker genannt werden wird. Der Titel der Dissertation erwähnt nur verschleiert, dass das Peenemünder Forschungsziel nicht die Lösung von Differentialgleichungen auf elektrischem Wege, sondern der stabile Flug der „Vergeltungswaffe 2“ war. Zu Hoelzers Verteidigung ist jedoch einzuwenden, dass es dieser Verschleierung bedurfte, um im Jahr 1946 überhaupt promovieren zu können. Seine erste eingereichte Fassung behandelte hauptsächlich die Steuerung des A-4 und wurde folglich von der alliierten Militäraufsicht abgelehnt. Eine frühere Veröffentlichung der laut Tomayko schon 1941 fertiggestellten Arbeit²⁵ scheiterte an kriegsbedingter Geheimhaltung und einem Bombenangriff auf Peenemünde im Jahr 1943. Dieser Bombenangriff selbst ist jedoch ein Beleg für Rheinbergers Thesen. Er ist nämlich die Antwort der Alliierten auf die „vielen hundert Flüge,“ die laut Hoelzer nötig waren, „um zu einer zuverlässigen Konstruktion zu gelangen“.²⁶ Hier wird der von Rheinberger beschriebene komplexe und zeitintensive Prozess deutlich, der erst ermöglicht, dass „[...] sich in einem wissenschaftlichen Sinne bedeutungsvolle Dinge als einfache Dinge abzeichnen;“²⁷ und stark komprimiert in einer vermeintlich harmlosen Dissertation über die „Anwendung elektrischer Netzwerke zur Lösung von Differentialgleichungen und zur Stabilisierung von Regelvorgängen“ erscheinen können.

2.1 Das „Mischgerät“

Die letztendlich realisierte Steuerung des A-4 erfolgte, wie oben bereits erwähnt, elektromechanisch. Sie sorgte dafür, dass die Rakete während des Flugs ihre Pfeilstabilität beibehielt, die nicht, wie sonst bei ballistischen Geschossen üblich, „durch Drall, sondern durch feste Flossen“

24 Helmut Hoelzer. „Anwendung elektrischer Netzwerke zur Lösung von Differentialgleichungen und zur Stabilisierung von Regelvorgängen“. Diss. Darmstadt: Technische Hochschule, 1946, S. 7.

25 Vgl. Tomayko, „Helmut Hoelzer’s Fully Electronic Analog Computer“, S. 236.

26 Hoelzer, „50 Jahre Analogcomputer“, S. 90.

27 Rheinberger, „Experimentalsysteme, Epistemische Dinge, Experimentalkulturen“, S. 408.

gewährleistet wurde.²⁸ Jegliche Abweichung der Rakete von ihrer normalen Parabelflugbahn²⁹ musste demnach korrigiert werden. Neigungen und Rotationen der Rakete um ihre drei Achsen³⁰ affizierten daher zunächst zwei mechanische Kreiselssysteme, die die Schleifkontakte je zweier elektrischer Potentiometer verstellten. An den Ausgängen dieser sogenannten „Richtgeber“ liegen folglich elektrische Spannungen an, die zu den unerwünschten Neigungswinkeln der Rakete proportional sind.

Bei den während des Raketenflugs auftretenden Störungen handelt es „sich um Schwingungen, also um sinusförmige“,³¹ mithin also periodisch zu- und abnehmende Vorgänge. Der von den Richtgebern in Form elektrischer Spannungen angezeigte Fehlwinkel bildet jedoch lediglich die veränderte Neigung der Rakete ab, die sich erst zeitlich verzögert zur einwirkenden Störung, z. B. durch Seitenwind, einstellt. Eine direkte Ansteuerung der Rudermaschine mit den Richtgeberspannungen würde folglich zu einem zunehmenden Aufschaukeln der unerwünschten Kursabweichungen führen, da die Korrektur stets zu spät käme.³² Die Korrektursignale benötigen also eine ausreichende „voreilende Phasenverschiebung“, um die Störung abdämpfen zu können.³³ „Es ist also notwendig, nicht nur den Fehlwinkel, sondern auch die Winkelgeschwindigkeit und die Winkelbeschleunigung zu messen, mit der sich das Gerät aus der Sollschußrichtung in die Fehllage dreht.“³⁴ Die physikalischen Größen der Winkelgeschwindigkeit und der Winkelbeschleunigung stellen mathematisch betrachtet die erste bzw. zweite Ableitung des Fehlwinkels dar und eilen diesem im Falle der hier vorliegenden Sinusschwingungen um 90°, bzw. 180° voraus. Um diese mathematische Rechenoperation mit den elektrischen Ausgangsspannungen der Richtgeber durchzuführen, wurde der als „Mischgerät“ bekannte Teil der Steuerung des A-4 konstruiert; laut Tomayko „[...] the first onboard electronic guidance computer ever constructed.“³⁵ In seinem Innern befanden sich insgesamt drei RC-Glieder.³⁶ gemäß Abb. 2.1.

Die eigentliche Rechenoperation besorgen die zwei in Reihe geschalteten Kondensatoren C. Die Differentiation der Eingangsspannung bildet sich im Ladestrom eines Kondensators ab, der einer angelegten Spannung um 90° voreilt. Diesen physikalischen Zusammenhang zeigt Glei-

28 *Das Gerät A4 Baureihe B. Gerätebeschreibung.* Geheime Kommandosache. Anlage zu Bb. Nr 19/45 gK. OKH/Wa A/Wa Prüf Nr 27. 1. Feb. 1945. URL: http://www.aggregat4.de/pdf/Gerätebeschreibung_A4.pdf (besucht am 19. 04. 2012), S. 173.

29 Visualisiert z. B. in: ebd., S. 217, Abb. 91.

30 Diese wurden als *A*-, *E*- und *D*-Achse bezeichnet, siehe ebd., S. 173: „*A*-Achse oder *Drallachse* heißt die Längsachse des Gerätes. *E*-Achse heißt die parallel zur Achse der Ruder I und III durch den Schwerpunkt laufende Gerade. *D*-Achse heißt die parallel zur Ruderachse II und IV durch den Schwerpunkt laufende Gerade. Sie steht zugleich senkrecht auf A und E.“

31 Ebd., S. 182.

32 Dies zeigt Fall a in ebd., S. 191, Abb. 82.

33 Diesen Zusammenhang zeigt Fall b in ebd., S. 191, Abb. 82.

34 Ebd., S. 182.

35 Tomayko, „Helmut Hoelzer’s Fully Electronic Analog Computer“, S. 232.

36 Einfache passive Schaltungen bestehend aus elektrischen Widerständen (*R*) und Kondensatoren (*C*).

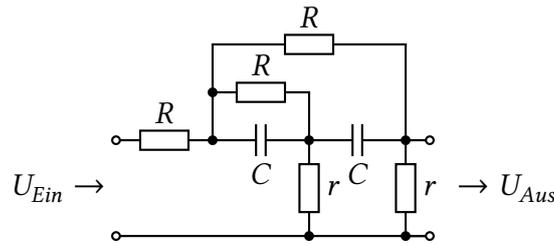


Abbildung 2.1: Prinzipschaltbild eines RC-Glieds zur doppelten Differentiation aus dem „Mischgerät“ des A-4.

chung (2.1) oben. Eine diesem Ladestrom proportionale Spannung kann über dem Widerstand r abgeriffen werden. Durch die Reihenschaltung der zwei Kondensatoren liegt am Ausgang eines jeden RC-Glieds eine der jeweiligen Eingangsspannung um 180° voreilende Spannung an. Diese wird anschließend in einem Ringmodulator einer Wechselspannung aufmoduliert, um sie mittels Transformatoren mit den Ausgangsspannungen der anderen RC-Glieder „mischen“,³⁷ – oder mathematisch gesprochen: *addieren* – zu können. Nach Verstärkung der schwachen Rechenspannung durch einen Elektronenröhrenverstärker konnten sie nun zur Ansteuerung der Rudermaschinen verwendet werden. Die zunächst von Hoelzer entwickelte Funkfernsteuerung war zwar ebenfalls im „Mischgerät“ integriert – und besaß ebenfalls ein RC-Glied –, kam jedoch meist nicht zum operativen Einsatz.³⁸

Das „Mischgerät“ lieferte dank doppelter elektrischer Differentiation, deren Ergebnis sich stets unmittelbar am Ausgang einstellt, die nötigen Korrektursignale, um die Rakete wieder auf Kurs zu bringen. Schon dieser frühe Steuercomputer besitzt also die Eigenschaft, die dem elektronischen Analogrechner lange Zeit einen entscheidenden Vorteil gegenüber den zunächst noch langsamen Digitalcomputern verschaffen sollte: die Unverzögerlichkeit des Rechenergebnisses, also Berechnungen in *Echtzeit*. Eine gute Definition der Bedingung für *Echtzeitberechnungen* liefert Stankovic: „[T]he objective of real-time computing is to meet the individual timing requirement of each task.“³⁹ Im Falle des A-4 erfüllt das „Mischgerät“ diese Bedingung dank der voreilenden Phasenverschiebung von Winkelgeschwindigkeit und -beschleunigung. Die verblüffend einfache Implementation mittels RC-Gliedern ermöglichte obendrein eine drastische Reduktion der Produktionskosten, wie Tomayko schreibt: „The rate gyros cost approximately \$7000. Their electronic replacements cost about \$2.50 each!“⁴⁰

Mit dem Gebrauch von RC-Gliedern zur Durchführung mathematischer Operationen an elek-

³⁷ Hier erklärt sich der Tarnname des „Mischgeräts“, vgl. auch Hoelzer, „50 Jahre Analogcomputer“, S. 77.

³⁸ Vgl. Ulmann, *Analogrechner*, S. 79. Die *Gerätebeschreibung* des A-4 weist die Steuerung per Funkleitstrahl ebenso lediglich als „Sonderfall“ aus, siehe *Das Gerät A4*, S. 173.

³⁹ John A. Stankovic. „Misconceptions About Real-Time Computing. A Serious Problem for Next-Generation Systems“. In: *IEEE Computer* 21.10 (Okt. 1988), S. 10–19, hier S. 11. Der Autor zeigt ebenfalls, dass die Garantie von Echtzeitberechnungen auf Digitalcomputern noch Ende der 1980er Jahre große Schwierigkeiten bereitete, da sie nicht ausschließlich durch steigende Rechengeschwindigkeit gegeben ist.

⁴⁰ Tomayko, „Helmut Hoelzer’s Fully Electronic Analog Computer“, S. 232.

trischen Strömen und Spannungen werden berechenbare Steuersignale erzeugt. Aus elektrischer *Energie* wird mathematisch berechenbare *Information*. Elektrizität wird in Peenemünde so zu einem handhabbaren Werkzeug, mit dessen *mathematischer Verrechnung* im „Mischgerät“ die Stabilisierung der Flugbahn des A-4 in Echtzeit gelingt.

2.2 Vom A-4-Flugsimulator zum elektronischen Allzweck-Analogrechner

Angesichts der zunächst geplanten rein mechanischen Steuerung des Aggregats-4 ist auch der noch 1939 ebenfalls rein mechanisch konzipierte Simulator nicht verwunderlich,⁴¹ der im Mai 1940 in Betrieb genommen wurde.⁴² Der Nutzen eines Simulators in der Raketenentwicklung erschließt sich relativ schnell, liest man Tomaykos treffende Beschreibung des Peenemünder Experimentalsystems:

[...T]he German rocket team was the first to work with truly large-scale liquid-fuel engines. They were essentially doing the basic research necessary to understand such beasts hand-in-hand with what is called applications work. Obviously, not much can be learned about a failing control system during the few seconds of frustration while the rocket is tumbling end-over-end into the Baltic. It was necessary to find a method to test the system under realistic conditions on the ground.⁴³

Letztendlich erfolgte auch die Simulation des Raketenflugs mithilfe eines größtenteils elektronischen Geräts, da sich die rein mechanische Simulation genauso wie die rein mechanische Raketensteuerung als zu ungenau herausstellte.⁴⁴ Den elektronischen Simulator konstruierte Hoelzer mithilfe seines Assistenten Otto Hirschler – zunächst vor seinen Vorgesetzten versteckt.⁴⁵ Laut Hosenthien und Boehm war dieses ausschließlich für die A-4-Simulation gedachte Gerät noch eine „[...] special-purpose machine. Its amplifiers, integrators, cam unit, etc., were permanently interconnected.“⁴⁶ Die beschriebene Transformation des elektrischen Stroms zu

41 Hoelzer weist darauf hin, dass der Begriff des *Simulators*, ebenso wie der Begriff des *Computers* zur genannten Zeit noch nicht üblich waren: „Wir nannten es ‚elektrische Modelle‘ oder ‚elektrische Analogien‘.“ Siehe Hoelzer, „50 Jahre Analogcomputer“, S. 75 f. Dennoch scheint die Verwendung des Begriffs *Simulator* im Zusammenhang dieser Arbeit sinnvoll, da er besonders auf die modellierte Nachbildung des *Echtzeitverhaltens* im untersuchten System hinweist.

42 Vgl. H. H. Hosenthien und J. Boehm, „Flight Simulation of Rockets and Spacecraft“. In: *From Peenemünde to Outer Space. Commemorating the Fiftieth Birthday of Wernher von Braun*. Hrsg. von Ernst Stuhlinger u. a. Huntsville: George C. Marshall Space Flight Center, 1962, S. 437–469. URL: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19630006100_1963006100.pdf (besucht am 20.04.2012), hier S. 437 und S. 439. Dort findet sich auch eine schematische Darstellung dieses mechanischen Simulators, siehe ebd., S. 440, Abb. 20.1.

43 Tomayko, „Helmut Hoelzer’s Fully Electronic Analog Computer“, S. 233.

44 Vgl. z. B. ebd.

45 In nahezu jeder Publikation über Hoelzers Arbeiten finden sich Anekdoten zur meist ablehnenden Haltung seiner Vorgesetzten, vgl. z. B. Tomayko, „Helmut Hoelzer’s Fully Electronic Analog Computer“, S. 234; Hoelzer, „50 Jahre Analogcomputer“, S. 71 f., 78.

46 Hosenthien und Boehm, „Flight Simulation of Rockets and Spacecraft“, S. 453.

einem Werkzeug operativer Mathematik, die sich in Hoelzers Arbeiten am „Mischgerät“ und am elektronischen Flugsimulator abzeichnete, entwirft jedoch bereits das epistemische Objekt eines elektronischen Allzweck-Analogrechners, in dem für jede mathematische Operation diskrete Module vorhanden sind, die sich in Analogie zu den einzelnen Elementen einer Differentialgleichung verbinden lassen:

[...W]ir [ersetzen] die mathematischen Ausdrücke wie ein Integral durch einen Integrator, einen Differentialquotienten durch einen Differentiator, eine Multiplikation durch einen [...] „Multiplizierer“ usw. Nun haben wir also ein Gerät, welches nach einer mathematischen Gleichung gebaut ist und welches uns die Lösung dieser Gleichung liefern kann.⁴⁷

Dieser Allzweck-Analogrechner, dessen verschiedene Module in Hoelzers Dissertation beschrieben werden,⁴⁸ wurde parallel zum A-4-Flugsimulator gebaut und gelangte nach dem Krieg nach Amerika, wo er – von einer Arbeitsgruppe der NASA nachgebaut – noch in den 1950er Jahren z. B. zur Simulation der Jupiter-C-Rakete und des Satelliten „Explorer 1“ verwendet wurde.⁴⁹

Das grundlegende Konstruktionsprinzip der einzelnen Module soll hier beispielhaft anhand einem im A-4-Flugsimulator verwendeten Integrierer dargelegt werden.⁵⁰ Das die eigentliche mathematische Integration durchführende Element ist hier wiederum ein *RC*-Glied, wobei der Kondensator *C* nun nicht mehr in Reihe, sondern parallel zur Signalspannung liegt. Die Kondensatorspannung bildet hier das Zeitintegral des Ladestroms ab, wie Gleichung (2.2) zeigt. Der wesentliche Unterschied zu den einfachen *RC*-Gliedern im „Mischgerät“ zeigt sich im Einsatz von regelbarer Rückkopplung auf elektronischem Wege, wozu der Einsatz von Verstärkern in den Rechenschaltungen notwendig wurde.

Dass noch bei den doppelten *RC*-Differentiationsgliedern im „Mischgerät“ auf eine solche Rückkopplung mittels Verstärkern verzichtet werden konnte, lag im übergeordneten Regelkreis, den die Rakete selbst bildete: Die auf die Lage und die Bewegung der Rakete reagierenden Richtgeber zeigten jede durch die elektronische Berechnung hervorgerufene Kurskorrektur unmittelbar an, was kontinuierlich neue Eingabewerte für die *RC*-Glieder zur Folge hatte. Durch diesen Umstand konnte bei der Raketensteuerung ein Rechenfehler vernachlässigt werden,⁵¹ der beim Simulator jedoch unterbunden werden musste. Andernfalls wäre das Rechenergebnis proportional zur verstrichenen Zeit verfälscht worden, wie Hosenthien und Boehm ausführen:

The integration of the demodulated ac signal by the rc lag networks [...] is imperfect because the capacitor voltage influences the charging current. [...] However, if by means of positive feedback [...]

47 Hoelzer, „50 Jahre Analogcomputer“, S. 71.

48 Vgl. Hoelzer, „Anwendung elektrischer Netzwerke“.

49 Vgl. Hosenthien und Boehm, „Flight Simulation of Rockets and Spacecraft“.

50 Eine schematische Darstellung dieses Integrierers findet sich in Hoelzer, „Anwendung elektrischer Netzwerke“, S. 52, Abb. I,11. Das komplette Simulationssystem der A-4 findet sich z. B. in Hoelzer, „50 Jahre Analogcomputer“, S. 89, Abb. 12.

51 Vgl. Hoelzer, „50 Jahre Analogcomputer“, S. 77; Ulmann, *Analogrechner*, S. 75 ff., bes. auch S. 78, Anm. 73.

the capacitor voltage is added to the input voltage, the effect of the capacitor voltage upon the charging current can be cancelled, leading to nearly perfect mathematical integration within bounds set by the accuracy of the positive feedback adjustment and amplifier linearity.⁵²

Hoelzers Analogrechner arbeitete sowohl mit Gleich-, wie mit Wechselspannung. Gleichspannung war nötig, um Integration und Differentiation mittels Kondensatoren zu ermöglichen, da die o. g. Gleichungen nur im Gleichstromkreis gelten. Dagegen hatten „Gleichstromverstärker [...] bekanntlich ihre Mucken.“⁵³ Verstärker, die zur Korrektur der Rechenfehler durch Rückkopplung benötigt wurden, waren auf Wechselstrombasis leichter zu konstruieren. So mussten zusätzlich Umwandler von Gleich- in Wechselspannung und zurück in jeder Schaltung vorhanden sein.⁵⁴

Diese deutlich komplexere Schaltung mit zwei Verstärkerstufen hatte ihre Vorteile. Die Eingangs- und die Ausgangsverstärkerstufe isolierte das *RC*-Glied in ihrem Innern von möglichen vorhergehenden oder nachfolgenden Rechenschaltungen. Die Rückkopplung ermöglichte somit einerseits eine mathematisch genaue Rechnung auch über eine lange Rechenzeit, andererseits ist sie damit die epistemische Grundlage des Allzweck-Analogrechners selbst. Denn erst sie erlaubte die oben beschriebene Modularisierung in je diskrete, für einzelne mathematische Operation gedachte Einheiten. Diese wurden so zu stabilisierten Subroutinen des elektronischen Analogrechners. Man konnte den Ausgang des ersten Rechenelements direkt mit dem Eingang des zweiten verbinden, ohne dass sich die Schaltungen gegenseitig beeinflussten. Durch den Einsatz von Rückkopplung funktionierten diese Einzelschaltungen mathematisch zwar sehr genau, hatten jedoch den Nachteil, dass sie nur für die bei ihrer Konstruktion angedachte Operation einsetzbar waren. Für jede Rechenoperation (Integration, Differentiation, etc.) musste eine eigene, diskrete Schaltung entworfen werden.

Das folgende Kapitel soll den Fokus nun zunächst auf dasjenige Experimentalsystem legen, dem das epistemische Objekt der Rückkopplung und speziell der *negativen Rückkopplung* in elektronischen Verstärkerschaltungen entspringt. Denn in diesem epistemischen Objekt liegt bereits die Lösung des hier angesprochenen Nachteils versteckt, woraus schließlich eine universell einsetzbarer Verstärkerschaltung entsteht: der Operationsverstärker.

52 Hosenthien und Boehm, „Flight Simulation of Rockets and Spacecraft“, S. 450 ff.

53 Hoelzer, „50 Jahre Analogcomputer“, S. 73.

54 In Hoelzer, „Anwendung elektrischer Netzwerke“, S. 52, Abb. I,11 sind diese Modulatoren und Demodulatoren zwischen den Verstärkerröhren und dem *RC*-Glied zu erkennen.

3 Das Prinzip der Gegenkopplung

There is one thread, [...] which appears to run through the whole background of the analog doctrine, [...] that thread is *feedback*.

(George A. Philbrick⁵⁵)

3.1 “Like any modern episteme worthy of the name...”

Auch die Geschichte des Operationsverstärkers als Rückkopplungssystem besitzt ihren Ursprungsmythos. Sein Protagonist ist der Bell Ingenieur Harold S. Black, dem angeblich auf dem Weg zur Arbeit mit der Lackawanna Ferry auf dem Hudson River – wie es sich für einen amerikanischen Mythos gehört: mit Blick auf die Freiheitsstatue – der entscheidende Einfall kam, wie die Verstärker des US-Telefonnetzes stabilisiert werden konnten:⁵⁶ „I suddenly realized, that if I fed the amplifier output back to the input, *in reverse phase*, and kept the device from oscillating [...], I would have exactly what I wanted: a means of canceling out the distortion at the output.“⁵⁷

Diesem Geistesblitz, der gern als Geburtsstunde⁵⁸ des Prinzips der Gegenkopplung (engl.: *negative feedback*⁵⁹) in der Elektronik erwähnt wird, geht die mehrjährige Beschäftigung der Bell Ingenieure mit dem Problem instabiler Verstärker voraus. Instabilität meint in diesem Fall zweierlei: erstens die Anfälligkeit der in den Verstärkern verwendeten Elektronenröhren in unkontrollierbare Eigenschwingung, also Oszillation, „singing, as we called it then“,⁶⁰ zu geraten, zweitens die Eigenschaft nichtlinear, d. h. bestimmte Frequenzen stärker als andere zu verstär-

55 George A. Philbrick. „Analog Yesterday, Today, and Tomorrow, or Metaphors of the Continuum“. In: *Analog Circuit Design. Art, Science, and Personalities*. Hrsg. von Jim Williams. Boston u. a.: Butterworth-Heinemann, 2010 [1991, 1963], S. 5–14, hier S. 6.

56 David A. Mindell. „Opening Black’s Box. Rethinking Feedback’s Myth of Origin“. In: *Technology and Culture* 41 (Juli 2000), S. 405–434, hier S. 405. Dieser Artikel erscheint leicht verändert unter dem Titel „Opening Black’s Box. Bell Labs and the Transmission of Signals“ in: David A. Mindell. *Between Human and Machine. Feedback, Control, and Computing Before Cybernetics*. Baltimore und London: John Hopkins University Press, 2002, S. 105–137.

57 Vgl. Harold S. Black. „Inventing the negative feedback amplifier“. In: *IEEE Spectrum* 14 (Dez. 1977), S. 54–60, hier S. 59, Herv. J. M.

58 Die Authentizität dieses Ereignisses wird dokumentiert mit dem Abdruck der handschriftlichen Skizzen Blacks auf einer Seite der New York Times vom 6. August 1927, vgl. Black, „Inventing the negative feedback amplifier“, S. 54.

59 Den Unterschied zwischen *positiver* und *negativer* Rückkopplung (dt. auch: *Mit-*, bzw. *Gegenkopplung*) beschreiben Rosenblueth, Wiener und Bigelow: „Positive feed-back adds to the input signals, it does not correct them. The term feed-back is also employed in a more restricted sense to signify that the behavior of an object is controlled by the margin of error at which the object stands at a given time with reference to a relatively specific goal. The feed-back is then negative, that is, the signals from the goal are used to restrict outputs which would otherwise go beyond the goal.“, Rosenblueth, Wiener und Bigelow, „Behavior, Purpose, and Teleology“, S. 19.

60 Black, „Inventing the negative feedback amplifier“, S. 59.

ken, sodass es zu Verzerrungen kommt. Das epistemische Ding, dem die Wissenschaftler und Ingenieure der 1925 gegründeten Bell Telephone Laboratories (kurz: Bell Labs oder BTL)⁶¹ zunächst auf der Spur sind, ist demnach ein idealer, linearer Verstärker:

An ideal amplifier is a pure multiplier, taking an input signal and multiplying it by some number (called *gain*) to produce an output. On a graph of output versus input the amplifier's response is literally a straight line whose slope is the gain: a perfect amplifier has a linear relationship between input and output.⁶²

Dieses Experimentalsystem erwuchs aus den Herausforderungen, die die geografische Expansion des Telefonnetzes über die gesamte Fläche der USA an die verwendeten Technologien stellte.⁶³ Während dieser Expansion wurde mithilfe von Lee DeForest's Elektronenröhre nach der Jahrhundertwende aus *passiven* Telefonleitungen ein *aktives* Netz. Die Einführung der Elektronenröhre erhöhte jedoch nicht nur die mögliche Reichweite der Telefonverbindungen durch wiederholte Verstärkung des andernfalls mit zunehmender Distanz immer schwächer werdenden Signals. Sie markierte außerdem den Beginn der Elektronik als *Signalverarbeitung*: „[...]The network became a machine. [...]it effectively decoupled the wave that represented the conversation from its physical embodiment in the cable.“⁶⁴ Dies bedeutete in der Folge auch die Umformulierung des Experimentalsystems. Zum epistemischen Objekt wurde das störungs- und verzerrungsfreie *Signal*:

[...] I was accepting an imperfect amplifier and regarding its output as composed of what was wanted plus what was unwanted. I considered what was not wanted to be distortion (regardless of whether it was due to nonlinearity, variation in the tube gain, or whatever) and I asked myself how to isolate and then eliminate this distortion.⁶⁵

Im Mai 1928 wurde Black von Harry Nyquist, dessen Arbeiten in der Folge ebenfalls einen großen Beitrag zur Entwicklung des Gegenkopplungsverstärkers leisteten,⁶⁶ engagiert, seinen Schaltungsentwurf⁶⁷ experimentell zu erproben. Während des sogenannten „Morristown Trial“ wurde in einem Labor in Morristown, New Jersey, eine 850 Meilen-Kabelstrecke mit Hin- und Rückleitung simuliert, indem das unterirdisch verlegte Kabel nach jeweils 25 Meilen wieder im Labor ankam, wo je zwei von Blacks Gegenkopplungsverstärkern (einer für jede Signalrichtung) installiert waren.⁶⁸ Diese konnten sich hierbei als funktionstüchtig behaupten. Es zeigte

61 Vgl. Mindell, „Opening Black's Box“, S. 413.

62 Mindell, *Between Human and Machine*, S. 116.

63 Vgl. Abschn. „Network Geography“ in Mindell, „Opening Black's Box“, S. 408 ff.

64 Ebd., S. 412.

65 Black, „Inventing the negative feedback amplifier“, S. 58.

66 Vgl. z. B. Harry Nyquist, „Regeneration Theory“. In: *Bell System Technical Journal* 11.1 (Jan. 1932), S. 126–147.

67 Nachträglich veröffentlicht in: Harold S. Black. „Stabilized Feedback Amplifiers“. In: *Bell System Technical Journal* 13.1 (Jan. 1934), S. 1–18, hier S. 4.

68 Vgl. A. B. Clark und B. W. Kendall. „Carrier in Cable“. In: *Bell System Technical Journal* 12.3 (Juli 1933), S. 251–263, S. 251 und S. 252, Abb. 1.

sich nämlich, dass die Linearität, also Verzerrungsfreiheit der Verstärker lediglich von der Beschaffenheit ihrer Rückkopplungswege abhängt.

Letzteres erkannte ein weiterer Bell Ingenieur namens Hendrik W. Bode. Dieser hatte sich mit der Reduktion von Verzerrungen in Telefonkabeln mithilfe passiver Entzerrnetzwerke, sogenannten *Equalizern*, beschäftigt und dabei bemerkt, dass ein solches Netzwerk genau die reziproken Eigenschaften der Leitung besitzen musste, um Verzerrungen vollständig zu unterdrücken.⁶⁹ Mindell beschreibt die Problematik dabei: „[...]reating a network as the inverse of the line might [...] even be impossible.“⁷⁰ Blacks Verstärker sorgte jedoch bereits für eine Vorzeichenumkehr des Ausgangssignals gegenüber dem Eingang, um die Gegenkopplung leicht zu ermöglichen. Ein passiver Equalizer im Rückkopplungsweg musste so lediglich der Charakteristik des Verstärkers und der Leitung selbst entsprechen – „A network to model the transmission line itself could easily be built“⁷¹ –, der Verstärker sorgte für die nötige Invertierung. Diese wurde durch einen dreistufigen, d. h. drei Elektronenröhren verwendenden Entwurf erreicht, da jede einzelne Stufe eine Invertierung des Eingangssignals bewirkt.⁷²

Der Verstärker muss dabei über eine ausreichend hohe Leerlaufverstärkung verfügen, da die negative Rückkopplung von einem Teil des Ausgangssignals auf den Eingang die Gesamtverstärkung der Schaltung entsprechend reduziert. Der Verlust im Verstärkungsfaktor durch die Gegenkopplung wird jedoch durch die gleichzeitige Reduktion der Verzerrung aufgewogen: „With negative feedback, gain stability is always improved by an amount at least as great as corresponds to the reduction in gain and generally more; [...]“ – die Charakteristik *linearisiert* sich.⁷³ Mindell gibt ein Beispiel: „[...]A] feedback amplifier with a vacuum-tube gain of 100,000 is enclosed in a feedback loop that reduces its gain to 1,000. The linearity of the amplifier overall increases by a factor of 100, an incredible improvement.“⁷⁴

Der Operationsverstärker liegt also bereits ein Jahrzehnt vor Peenemünde in der Luft: wird bei hoher Leerlaufverstärkung eine ausreichend gedämpfte Gegenkopplung verwendet, ist einzig die Beschaffenheit des Rückkopplungswegs ausschlaggebend für das Gesamtverhalten des Verstärkers. Es fehlte lediglich ein Schritt, um ihn zur Rechenhardware zu machen: anstatt analoge Telefonsignale zu *verstärken*, mathematische Steuersignale zu *verrechnen*. Hier ist die Analogie zur Entwicklung des Digitalcomputers zu verorten, bei dem die Elektronenröhre zunächst einen ähnlichen Sprung machen musste, „indem sie ihre Eingangssignale nicht mehr nur analog

69 Vgl. Hendrik W. Bode. „Variable Equalizers“. In: *Bell System Technical Journal* 17.2 (Apr. 1938), S. 229–244.

70 Mindell, *Between Human and Machine*, S. 128.

71 Ebd.

72 Vgl. Ulmann, *Analogrechner*, S. 60 f. Auch die Entwickler des Feuerleitrechners T-10, der im folgenden Abschnitt beschrieben wird, nutzten eine dreistufige Verstärkerschaltung bei der das Ausgangssignal an der Anode der ersten Röhre dem Gitter der zweiten zugeführt wird, usw., s. Clarence A. Lovell, David B. Parkinson und Bruce T. Weber. „Electrical Computing System“. US-Pat. 2.404.387. 23. Juli 1946, Abb. 5.

73 Black, „Stabilized Feedback Amplifiers“, S. 9.

74 Mindell, „Opening Black’s Box“, S. 418.

verstärkte [...], sondern vielmehr zu zählen [...] begann.“⁷⁵

3.2 Der Feuerleitrechner und der Operationsverstärker

Dieser Schritt fand ebenfalls im Zweiten Weltkrieg statt. Die Forschungen und Entwicklungen der Bell Labs spielten hier eine wichtige Rolle in der Entwicklung elektromechanischer Feuerleitrechner, die auf Seiten der Alliierten zur Abwehr der deutschen Luftangriffe auf England zum Einsatz kamen. Wie Helmut Hoelzer auf deutscher Seite, wurden auch jenseits des Atlantiks, bzw. des Ärmelkanals und der Nordsee, zu Kriegsbeginn Kommunikationsingenieure in die Entwicklung und Produktion von automatisierten Waffensystemen eingebunden:

Normally as communications engineers, they had dealt with current and inductance and band width and distortion. Suddenly they found themselves worrying about velocity and mass and lag and error. Instead of speech transmission, they had the problems of gun-pointing and bomb-sighting.⁷⁶

Das technische Gerät, das in diesem Zusammenhang in den Bell Laboratories unter der Leitung von Hendrik W. Bode entworfen und von General Electric gebaut wurde, war der erste auf elektronischer Signalbasis arbeitende Feuerleitrechner, der sogenannte T-10. Dieser stand in Tradition mechanisch arbeitender Geräte, wie sie z. B. von der Sperry Gyroskope Company gebaut wurden.⁷⁷ Tatsächlich arbeitete der T-10 nach dem gleichen mathematischen Algorithmus wie das zur damaligen Zeit weit verbreitete mechanische Sperry M-4-System.⁷⁸

Drei Soldaten verfolgen mittels optischer Peilgeräte ein feindliches Flugzeug: der erste misst die Entfernung des Flugzeugs, der zweite den seitlichen Abstand zur Grundstellung der Flugabwehrkanone und der dritte die Flughöhe. Diese drei Werte dienen dem T-10 über elektrische Potentiometer als Eingabegrößen, mit denen durch analog zu trigonometrischen Funktionen operierenden Schaltungen die nötigen Steuersignale berechnet werden. Mittels Differenzierern werden von den Eingangsgrößen außerdem die ersten Ableitungen gebildet, die sich somit proportional zur aktuellen Geschwindigkeit und Flugrichtung des Ziels verhalten. So kann eine lineare Extrapolation der Flugkurve in die Zukunft erfolgen, wodurch ein entsprechender Vorhalt der Kanone berechnet wird. Dieser ist nötig, da die abgefeuerten ballistische Granate eine gewisse Zeit benötigt, um das Flugzeug zu erreichen, das in dieser Zeit selbstverständlich weitergeflogen ist. Sämtliche Steuersignale sind dabei Gleichspannungen, elektronische Repräsentationen des Azimut- und des Elevationswinkels, die direkt zur Ansteuerung der Servomotoren dienen, mit denen die Flugabwehrkanone ausgerichtet wird.⁷⁹

⁷⁵ Ernst, „Den A/D-Umbruch aktiv denken“, S. 57.

⁷⁶ Enoch Ferrell, zit. n. Mindell, *Between Human and Machine*, S. 258.

⁷⁷ Ein großer Teil der ersten Hälfte von Mindells Buch *Between Human and Machine* beschäftigt sich mit diesen mechanischen Feuerleitrechnern, auf die in dieser Arbeit nicht genauer eingegangen werden kann.

⁷⁸ Vgl. ebd., S. 237 f.

⁷⁹ Der vollständige mathematische Algorithmus, bestehend aus insg. 30 Rechenverstärkern gemäß Lovell, Parkinson und Weber, „Electrical Computing System“, Abb. 5 zur Addition bzw. Differentiation, kann hier nicht wie-

Wie bei Hoelzers Analogrechner finden sich in den schematischen Darstellungen des T-10 Elemente mit Bezeichnungen wie „Differentiator“ und „Summing Repeater“, die auf Schaltungen speziell für die angegebenen Rechenoperationen hindeuten.⁸⁰ Tatsächlich konnte jedoch für jede benötigte Rechenfunktion die gleiche Grundschaltung verwendet werden, auch für die Addition, die bei Hoelzer durch „Mischung“ von Wechselspannungen an Transformatoren stattfand. Beim T-10 wurden hingegen sämtliche elektronischen Rechenoperation mit Gleichspannungen durchgeführt werden. Die Verstärkerschaltung ist in der entsprechenden Patentschrift von Lovell, Parkinson und Weber schematisch dargestellt, hier als Summierer.⁸¹ Sollte statt der Addition die Ableitung der Eingangssignale ausgegeben werden, mussten lediglich entsprechende Kondensatoren in Reihe direkt hinter die Eingangswiderstände geschaltet werden.⁸²

In der Entwicklung des T-10 wurde also deutlich: „[...] Black, Nyquist, and Bode’s stabilized feedback amplifiers had applications far beyond telephone repeaters and could themselves perform computations.“⁸³ Der in den Experimentalsystemen bisher nur zu erahnende Operationsverstärker war realisiert worden und benötigte nur noch eine theoretische Stabilisierung, um fortan als technisches Objekt genutzt werden zu können. Dies geschah 1947 durch Ragazzini, Randall und Russell. Die Autoren waren im Zuge der Entwicklungen am T-10 Feuerleitrechner, der in der Nomenklatur der amerikanischen Armee als „M-9 Gun Director“ bezeichnet wurde, auf die universell einsetzbare Verstärkerschaltung aufmerksam geworden und nutzten ihn im Labor – ähnlich Hoelzer im Falle des A-4 – „to model missiles and guidance systems“.⁸⁴ Sie gaben der Liste an einzelnen Eigenschaften, die das epistemische Objekt bisher je nach Einsatzbereich grob umrissen hatte, in ihrem eingangs schon erwähnten Artikel durch die Namensgebung zum *Operationsverstärker* nun den Status eines stabilisierten technischen Objekts:

The technique described herein employs as its basic tool a stabilized feed-back amplifier of standard design, which by mere external changes in connection will serve as integrator, differentiator and sign changer. [...] As an amplifier so connected can perform the mathematical operations of arithmetic and calculus on the voltages applied to its input, it is hereafter termed an “operational amplifier.”⁸⁵

dergegeben werden. Detaillierte Beschreibungen desselben finden sich sowohl in zwei Patentschriften von 1946 und 1950, vgl. Lovell, Parkinson und Weber, „Electrical Computing System“; W. H. Boghosian, S. Darlington und H. G. Och, „Artillery Director“. US-Pat. 2,493,183. 3. Jan. 1950, sowie im Abschnitt *Der Feuerleitrechner T-10* in Ulmann, *Analogrechner*, S. 56 ff.

80 Vgl. z. B. Boghosian, Darlington und Och, „Artillery Director“, Abb. 2 und 3.

81 Vgl. Lovell, Parkinson und Weber, „Electrical Computing System“, Abb. 5.

82 In der Abb. 5 der Patentschrift von Lovell, Parkinson und Weber sind die Eingangswiderstände mit den Ziffern 95 und 96 gekennzeichnet. Vgl. auch Boghosian, Darlington und Och, „Artillery Director“, Abb. 10B. Die Verwendung von Gleichspannungsverstärkern hatte zunächst den Nachteil, dass diese aufgrund von Driftfehlern regelmäßig nachjustiert werden mussten. Außerdem führte der Einsatz von Differenzierern häufig zu ungenauen Vorhersagen über die Flugbahn des Ziels, Ulmann, *Analogrechner*, S. 63 f. Da dies in der folgenden Argumentation jedoch zu vernachlässigen ist, wird hierauf nicht weiter eingegangen.

83 Mindell, *Between Human and Machine*, S. 239.

84 Ebd.

85 Ragazzini, Randall und Russell, „Analysis of Problems in Dynamics“, S. 444.

Die Kerneigenschaft des Operationsverstärkers ist ein möglichst hoher Verstärkungsfaktor. Diese Notwendigkeit hatten Black, Nyquist und Bode erkannt und auch Hoelzer schreibt in seiner Dissertation, dass mittels negativer Rückkopplung der durch Schaltungscharakteristiken auftretende Fehler beliebig verkleinert werden kann, „wenn der Verstärkungsgrad V genügend hoch ist.“⁸⁶ 1947 lautete die Definition: „5000 is a practical value“.⁸⁷ Um die negative Rückkopplung durch ein direktes Verdrahten von Ausgang und Eingang zu ermöglichen, wird der bisher zumeist dreistufige Verstärkerentwurf, wie er beim Morristown Trial und auch im T-10 zum Einsatz kam, generalisiert als „direct current amplifier having an odd number of stages“ festgelegt.⁸⁸ Ist die Gegenkopplung hergestellt, versucht der Verstärker stets, an seinen Eingängen einen stabilen Zustand herzustellen. Ein solcher ist z. B. dann erreicht, wenn kein Stromfluss in den Eingang stattfindet. Denn jede Veränderung im Eingangssignal erscheint am Ausgang sofort in invertierter Form und wirkt durch die Rückkopplung der Veränderung entgegen. Wird nun der Widerstand des Rückkopplungswegs genauso wie der Eingangswiderstand gewählt, so ist der Stromfluss in den Eingang dann null, wenn am Ausgang die selbe Spannung wie am Eingang anliegt, nur mit umgekehrtem Vorzeichen: „the amplifier will perform the simple operation of sign changing“;⁸⁹ oder eine Multiplikation mit dem Wert -1 .

Die Schaltungen, die den Operationsverstärker zum mächtigen Rechenwerkzeug in der Differentialrechnung werden lassen, sind diejenigen, die aus ihm einen Integrierer oder einen Differenzierer machen. Hier erscheint wiederum die Gegenkopplung als entscheidende Eigenschaft. Wie Mindell schreibt, war Bode schon in den 1930er Jahren aufgefallen: „the overall amplifier behaved like the *reciprocal* of its feedback elements: when the feedback path divided, for example, the amplifier multiplied.“⁹⁰ Dass sich mit einem Kondensator in Reihenschaltung auf elektrischem Wege die Ableitung bilden lässt, war Hoelzer nach eigener Aussage bereits 1935 aufgefallen,⁹¹ auch im T-10 Feuerleitrechner wurde mit einem Kondensator in Reihe zum Verstärkereingang differenziert. Schaltet man den Kondensator in den Rückkopplungsweg, so dass dieser *differenziert*, verhält sich die gesamte Verstärkerschaltung reziprok, mathematisch betrachtet als *Integrierer*. Auch Hoelzer hatte dies theoretisch durchdacht, denn er schreibt in seiner Dissertation, dass es möglich sei „nur mit einem Verstärker zu arbeiten und durch geeignete Ausbildung des Rückkopplungsnetzwerkes zu differenzieren oder zu integrieren.“⁹² In „50

⁸⁶ Hoelzer, „Anwendung elektrischer Netzwerke“, S. 21.

⁸⁷ Ragazzini, Randall und Russell, „Analysis of Problems in Dynamics“, S. 445. Walt Jung weist in seinem *Op Amp Applications Handbook* darauf hin, dass diese Angabe deutlich unter dem damals technisch Möglichen lag. Der *gain* der Verstärker, die im T-10 benutzt wurden, lag bspw. bei 60.000, vgl. Walter G. Jung, Hrsg. *Op Amp Applications Handbook*. Amsterdam u. a.: Elsevier, 2005, S. 778 f. Ulmann schreibt, dass man bereits in den 1960er Jahren „[...] dem Ideal einer unendlich hohen (Leerlauf-)Verstärkung mit $V = 10^8$ im Rahmen praktisch messbarer Größenordnungen schon sehr nahe [...]“ gekommen sei, siehe: Ulmann, *Analogrechner*, S. 94, Anm. 7.

⁸⁸ Ragazzini, Randall und Russell, „Analysis of Problems in Dynamics“, S. 444.

⁸⁹ Ebd., S. 445.

⁹⁰ Mindell, *Between Human and Machine*, S. 128.

⁹¹ Siehe oben, Kapitel 2.

⁹² Hoelzer, „Anwendung elektrischer Netzwerke“, S. 21.

Jahre Analogcomputer“ präsentiert er dann auch das Schema eines solchen Integrierers mit einem Wechselstromverstärker,⁹³ der jedoch erst im NASA-Nachbau von 1950 realisiert wurde.⁹⁴ Ragazzini, Randall und Russell dokumentieren o. g. Integrier- und Differenzierschaltungen mit ihrem Operationsverstärker auf Gleichspannungsbasis.⁹⁵

In allen diesen Schaltungen fungiert der Operationsverstärker als Rechenhardware. Er hat dabei die Eigenschaft, im Vollzug praktisch unsichtbar zu werden: „If ideal op amps were used, the function performed by such a circuit would depend solely on its configuration and the properties of the external components used to establish the function.“⁹⁶ Der mathematisch interpretierbare Output wird einzig durch externe Beschaltung und speziell die des Rückkopplungswegs bestimmt. Der Operationsverstärker in seinem operativen Verschwinden ist somit ein Medium *par excellence* sowohl im McLuhanschen Sinn,⁹⁷ wie auch im Sinne der Kybernetik, mit der man argumentieren kann, dass „alles was Rückkopplung organisiert, als Medium begriffen werden“ kann.⁹⁸ Im nun folgenden Abschlusskapitel soll daher untersucht werden, wie der Operationsverstärker als technisches Ding im Experimentalsystem der frühen Kybernetik wirkt.

93 Vgl. Hoelzer, „50 Jahre Analogcomputer“, S. 80, Abb. 5a und 5b.

94 Vgl. Hosenthien und Boehm, „Flight Simulation of Rockets and Spacecraft“, S. 453.

95 Ragazzini, Randall und Russell, „Analysis of Problems in Dynamics“, S. 445 f.

96 Dan Sheingold. „Op Amps and Their Characteristics“. In: *Analog Circuit Design. Art, Science, and Personalities*. Hrsg. von Jim Williams. Boston u. a.: Butterworth-Heinemann, 2010 [1991], S. 361–386, hier S. 361.

97 Vgl. Marshall McLuhan. *Die magischen Kanäle. „Understanding Media“*. Aus dem Amerikanischen übers. von Meinrad Amann. Düsseldorf u. a.: Econ, 1992 [1964], bes. d. Kap. *Das Medium ist die Botschaft*, S. 17 ff.

98 Claus Pias. „Zeit der Kybernetik. Zur Einführung“. In: *Kursbuch Medienkultur. Die maßgeblichen Theorien von Brecht bis Baudrillard*. Hrsg. von dems. u. a. 2. Aufl. Stuttgart: DVA, 2000 [1999], S. 427–431, hier S. 427.

4 Das ‚epistemische Ding‘ der Kybernetik

Die Kriegssituation führte die wissenschaftlichen Arbeiten formaler divergenter Disziplinen wie z. B. Mathematik, Telekommunikation, Maschinenbau, Physiologie, Psychologie und Sozialwissenschaft zusammen. Die aus dieser zunächst kriegsbedingten Kooperation hervorgehende *Kybernetik* setzte die während des Zweiten Weltkriegs begonnene Zusammenführung von Theorie und Praxis in Fragen nach den Rückkopplungsprozessen in Maschinen und im Menschen sowie nach der Informationsverarbeitung und -übertragung in Kommunikationsvorgängen fort. Dies hängt nicht zuletzt mit den beteiligten Personen zusammen und ihrem Interesse, die zu Kriegszeiten begonnenen Forschungsarbeiten fortzusetzen, wobei der Ursprung dieser Forschungen aus einem Kriegszusammenhang nicht selten kaschiert wird.⁹⁹ Auch der Namensgeber der Kybernetik, Norbert Wiener, der nicht zuletzt mit seinem 1948 erschienenen Buch maßgeblich für das frühe Programm der Kybernetik verantwortlich war,¹⁰⁰ verschleierte zumindest einige theoretische Spuren. Den Namen *Kybernetik* entlehnte er dem griechischen Wort für „Regler“, (*κυβερνήτης*), unter Verweis auf einen Artikel von James Clerk Maxwell über mechanische Fliehkraftregler,¹⁰¹ berief sich jedoch nicht auf diejenigen Arbeiten zur Rückkopplung, mit deren Autoren er während des Krieges in Kontakt war:

In all his writings on cybernetics he never cited Elmer Sperry, Nicholas Minorsky, Harold Black, Harry Nyquist, Hendrik Bode or Harold Hazen. All had published on the theory of feedback before 1940; [...] all had speculated on the human role in automatic control; some had even written on the merger of communications and control or on philosophies of feedback. But Wiener only rarely cited any theory later than Maxwell's 1867 [sic!] paper "On Governors." Wiener called this paper fundamental, but it lacks the basic idea of a feedback loop which Wiener himself found so central.¹⁰²

Wiener war mit seinem technischen Assistenten Julian Bigelow am *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) selbst an der Entwicklung elektromechanischer Feuerleitrechner beteiligt.¹⁰³ Sein Forschungsprojekt an einem elektronischen Gerät zur Prognose der zukünftigen Bahn eines feindlichen Flugzeugs basierend auf statistisch gewonnenen Daten wurde jedoch Anfang

⁹⁹ Diesen Umstand beschreibt z. B. Wolfgang Hagen in „Die Camouflage der Kybernetik“ anhand John von Neumanns Mitarbeit in der Entwicklung der Wasserstoffbombe.

¹⁰⁰ Vgl. Norbert Wiener. *Kybernetik. Regelung und Nachrichtenübertragung im Lebewesen und in der Maschine*. Hrsg. von Ernesto Grassi. Aus dem Amerikanischen übers. von E. H. Serr und E. Henze. 2. Aufl. Düsseldorf und Wien: Rowohlt/Econ, 1968 [1963, 1948].

¹⁰¹ Vgl. James Clerk Maxwell. „On Governors“. In: *Proceedings of the Royal Society of London* 16 (1868), S. 270–283.

¹⁰² Mindell, *Between Human and Machine*, S. 286.

¹⁰³ Vgl. bes. d. Kap. *Cybernetics and the Ideas of the Digital* in ebd., S. 276 ff.

1943 gestoppt.¹⁰⁴ Es wäre über die tatsächlich im T-10 implementierte lineare Prädiktion durch einfache Ableitung der aktuellen Position – die vereinfachend davon ausging, das Flugzeug würde geradeaus weiterfliegen und der Pilot keine Ausweichmanöver unternehmen – hinausgegangen.

Wieners Ausscheiden aus der Entwicklung von Feuerleitrechnern markiert den Beginn seiner Arbeit am Grundprogramm der Kybernetik, in dem das epistemische Ding des Operationsverstärkers immer wieder aufblitzt. Der schon erwähnte Artikel „Behavior, Purpose, and Teleology“ von 1943 enthält neben dem offensichtlichen Verweis auf den *electrical amplifier with feed-back*, der schon in der Einleitung zitiert wurde, noch weitere Hinweise. So wird schon in der dem Artikel zugrundeliegenden Unterscheidung zwischen *aktivem* und *passivem* Verhalten eine Analogie zum Rechnen mittels Operationsverstärkerschaltungen hergestellt: „Active behavior is that in which the object is the source of the output energy involved in a given specific reaction.“¹⁰⁵ Rechenschaltungen mit Operationsverstärkern liefern an ihrem Ausgang selbst diejenige Energie, die, rückgekoppelt auf den Eingang, den Fehler passiver Komponenten wie den Kondensatoren minimiert.

Die Autoren machen sich für eine „behavioristische Analyse“ von Rückkopplungsprozessen stark: „Given any object, relatively abstracted from its surroundings for study, the behavioristic approach consists in the examination of the output of the object and of the relations of this output to the input.“¹⁰⁶ Hier sehen sie die Vergleichbarkeit zwischen zielgerichtetem Verhalten bei Lebewesen und dem Verhalten rückgekoppelter Maschinen gegeben. Ein zentrales Argument ist der Vergleich gewisser Störungen im Kleinhirn mit einer Maschine, deren Rückkopplung nicht ausreichend gedämpft ist. Beschrieben wird ein einfacher diagnostischer Test: Patienten mit einer solchen Störung gelingt es nicht, ein Glas Wasser zum Mund zu führen, ohne es dabei zu verschütten: „The analogy with the behavior of a machine with undamped feed-back is so vivid that we venture to suggest that the main function of the cerebellum is the control of the feed-back nervous mechanisms involved in purposeful motor activity.“¹⁰⁷ Wiener und seine Koautoren vergleichen die Kleinhirnstörung hier buchstäblich mit instabilen, d. h. übersteuernden Operationsverstärkern, für die in Nyquists „Regeneration Theory“ von 1932 ein „behavioristisches“ Testverfahren beschrieben ist.¹⁰⁸

Auch Warren S. McCulloch, Psychiater und Vorsitzender der Macy-Konferenzen zur Kybernetik, deren Untertitel „Circular Causal and Feedback Mechanisms in Biological and Social Sys-

104 Vgl. Mindell, *Between Human and Machine*, S. 282. Wiener berichtet von seiner Arbeit an Feuerleitlösungen in der Einleitung zu *Kybernetik* und im (1963 nachträglich veröffentlichten) Kapitel *Über lernende und sich selbst reproduzierende Maschinen*, vgl. Wiener, *Kybernetik*, S. 24 ff., 208 ff.

105 Rosenblueth, Wiener und Bigelow, „Behavior, Purpose, and Teleology“, S. 18.

106 Ebd.

107 Ebd., S. 20.

108 Dieses als „Nyquist-Stabilitätskriterium“ bekannte Verfahren wird bis heute auf elektronische Verstärker angewandt. Eine vereinfachende Beschreibung findet sich bspw. in Mindell, *Between Human and Machine*, S. 126 f.

tems“ lautete, ruft diesen Vergleich 1953, in der letzten Konferenz, noch ein wenig deutlicher ins Gedächtnis der Teilnehmer zurück. Er weist konkret auf den modernen Feuerleitrechner hin, in dessen Innern Operationsverstärker durch entsprechende Be- und Verschaltung ihrer Rückkopplungswege Steuersignale *berechnen*:

Wiener drew a most illuminating comparison between the cerebellum and the control devices of gun turrets, modern winches and cranes. The function of the cerebellum and of the controls of those machines is, in each case, to precompute the orders necessary for servomechanisms, and to bring to rest at a preassigned position, a mass that has been put in motion which otherwise, for inertial reasons, would fall short of, or overshoot, the mark.¹⁰⁹

Die Vorträge und Diskussionen der ersten Macy-Konferenzen beschäftigten sich dementsprechend hauptsächlich mit der Anwendung dieser durch das epistemische Ding eines Operationsverstärkers – als Gerät, das negative Rückkopplung und damit Selbstregulierung ermöglicht – gewonnenen Analyseansätze in so verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen wie Neuropsychologie, Psychologie, Sozialwissenschaft, Anthropologie und Ökonomie. McCulloch berichtet in seiner Zusammenfassung zunächst von seinen, Wieners, Walter Pitts und Rosenblueths Untersuchungen homöostatischer Prozesse in biologischen Organismen und speziell im menschlichen Zentralnervensystem. Dort wird die Stabilisierung motorischer Prozesse wie der Haltung und der Bewegung mithilfe derjenigen epistemischen Begrifflichkeiten interpretierbar, die aus der Beschreibung von Operationsverstärkerschaltungen stammen:

The general organization was found to consist of multiple closed loops of control, but the circuit action was extremely nonlinear, and consequently not amenable to any general simple mathematical analysis in terms of the Fourier Theory. Generally multiple loops, severally stable by inverse feedback, may be unstable in conjunction, but the system can be stabilized by *adding* a portion of each of the returns and *subtracting the sum* from one or more of the servos.¹¹⁰

In diesen Aussagen wird die maßgebliche Prägung der frühen Kybernetik als Experimentalsystem durch den Operationsverstärker als stabilisiertes technisches Ding deutlich. Seine zentrale Funktion ist das Verrechnen von Information und nicht mehr nur das Verstärken (oder Abschwächen) von Energie. Die Bewegung träger Massen wie der von Flugabwehrkanonen, ist ein energieintensiver Vorgang und als solcher auch in den neuen Feuerleitsystemen des Zweiten Weltkriegs immer noch von leistungsstarken Servomotoren zu erledigen, die mit den elektronischen Signalen aus dem Feuerleitrechner jedoch analog gesteuert werden können. Die Analogie besteht darin, dass sich die Servomotoren proportional zu den Steuersignalen bewegen, trotz des Unterschieds im Energieniveau.

109 Warren S. McCulloch. „Summary of the Points of Agreement Reached in the Previous Nine Conferences on Cybernetics“. In: *Cybernetics – Kybernetik. The Macy-Conferences 1946–1953*. Bd. 1: *Transactions/Protokolle*. Hrsg. von Claus Pias. Zürich und Berlin: Diaphanes, 2003 [1953], S. 719–725, hier S. 720 f.

110 Ebd., S. 721, Herv. J. M.

Aus diesem Blickwinkel ist Mindells Kritik an Wieners unvollständigen Verweisen zu verstehen.¹¹¹ Maxwells *Fliehkraftregler* ist eher analog zum Servomotor denn, wie der Operationsverstärker, als Rechenhardware analoger Information zu denken. Die epistemologische Rückkopplung vollzieht die Kybernetik dann auch folglich im Vokabular der Nachrichtentechnik, die den Operationsverstärker als Rechenwerkzeug hervorgebracht hat, und nicht in der Sprache der Energietechnik: „The language, experience, and ways of thought, say, of communication engineering, seem to be admirably adapted to make us recognize explicitly that the nerve impulse is not merely some physical-chemical event but a physical-chemical event carrying meaning.“¹¹² Und auch McCulloch fasst zusammen: „Moreover, we had all come to realize that for problems of feedback, energy was the wrong thing to consider. The crucial variable was clearly information.“¹¹³

111 Siehe oben, S. 18.

112 Ralph W. Gerard, zit. n. Pias, *Transactions/Protokolle*, S. 171.

113 McCulloch, „Summary of the Points of Agreement“, S. 722.

5 Fazit

Die ersten zwei Kapitel der vorliegenden Arbeit haben die Entstehung des Operationsverstärkers rekapituliert. Als technisches Ding, wie er uns auch heute noch in jedem Elektronikfachhandel zumeist als integrierter Schaltkreis in unzähligen Modellen zu Centpreisen verkauft wird, besitzt er einen langwierigen experimentellen Entwicklungsprozess, währenddessen er sich erst langsam in den genannten Experimentalsystemen zu erkennen gab. In Hoelzers Analogrechsaltungen ist es zunächst nur ein einfacher Wechselstromverstärker mit positiver Rückkopplung, um die passiven *RC*-Rechenglieder zu stabilisieren und von den anderen Schaltungsteilen zu isolieren. Hoelzer konnte dabei auf das Wissen aus den Bell Labs zurückgreifen,¹¹⁴ wo etwa zehn Jahre zuvor das Konzept des Gegenkopplungsverstärkers entwickelt wurde, um die störungsfreie Verstärkung analoger Telefonsignale zu ermöglichen. Dazu ist, bei ausreichend hohem Verstärkungsfaktor, einzig der Rückkopplungsweg des Verstärkers mit einem passiven Equalizernetzwerk entsprechend den Charakteristiken der Leitung und des Verstärkers auszustatten. Die Stabilisierung des epistemischen Objekts zum *Operationsverstärker* erfolgte während des Zweiten Weltkriegs experimentell-praktisch im Feuerleitrechner T-10 und 1947 theoretisch im Artikel von Ragazzini, Randall und Russell. Mittels einer einzigen Verstärkergrundsaltung und entsprechenden externen Komponenten konnten nun analoge Steuersignale so verrechnet werden, dass mit diesen eine Flugabwehrkanone inklusive eines vorausgerechneten Vorhalts in Echtzeit auf angreifende deutsche Flugzeuge ausgerichtet werden konnten. An dieser Entwicklung war auch Norbert Wiener beteiligt, der sein Wissen über diese Rückkopplungssysteme nach dem Krieg in die Kybernetik einfließen ließ.

Das vorherige Kapitel hat nun diejenigen Verbindungen aufgezeigt, die dem Operationsverstärker in der frühen Kybernetik seine epistemologische Macht verliehen haben. Er stellte zunächst *die* zentrale Experimentalbedingung der Kybernetik dar und wählte so gleichzeitig ihre möglichen Untersuchungsgegenstände aus: „Die Experimentalbedingungen *beschränken* das Wissenschaftsobjekt im doppelten Sinne dieses Wortes: Sie betten es ein, und sie zwingen ihm Grenzen auf.“¹¹⁵ McCulloch berichtete im Verlauf seiner Zusammenfassung dann auch von den Problemen, die das epistemische Vokabular von Rückkopplungsprozessen bei der Beschreibung von Denkvorgängen, Gedächtnisfunktionen und speziell Lernvorgängen in Lebewesen bereitete: „Closed loops within the nervous system [...] were mentioned as possible accounting for transitory memories by McCulloch and Pitts, who indicated that they were logically

¹¹⁴ Hoelzer nutzt Nyquists Stabilitätskriterium aus dessen „Regeneration Theory“ umfänglich in seiner Dissertation, vgl. Hoelzer, „Anwendung elektrischer Netzwerke“, S. 21 f. sowie den Anhang ab S. 41.

¹¹⁵ Rheinberger, „Experimentalsysteme, Epistemische Dinge, Experimentalkulturen“, S. 409.

sufficient, but physiologically improbable, as an explanation for all forms of memory.“¹¹⁶

Dieses veränderte Interesse der Kybernetik erwuchs unter dem Einfluss eines anderen epistemischen Objekts: dem speicherprogrammierbaren Digitalcomputer. Dies geschah nicht zuletzt dank John von Neumann, der die Nähe zur Kybernetik laut Wolfgang Hagen nicht in erster Linie aus Überzeugung von der Notwendigkeit interdisziplinärer Zusammenarbeit suchte, sondern, um für die Wasserstoffbombenentwicklung Forschungs- und Finanzierungskapazitäten zu gewinnen.¹¹⁷ Unabhängig von von Neumanns Ambitionen und Absichten wandelte sich unter dem Einfluss des Digitalcomputers jedoch das Experimentalsystem der Kybernetik selbst, sichtbar auch im verwendeten Vokabular, das Information fortan in der Einheit *bit* zählbar machte. Norbert Wiener beschreibt diesen Paradigmenwechsel im Vorwort zur 2. Auflage seines Buchs *Kybernetik*:

Darum ist es angebracht, daß sich der Kybernetiker neuen Gebieten widmet und einen großen Teil seiner Aufmerksamkeit auf Ideen richtet, die im Laufe der Entwicklungen des letzten Jahrzehnts entstanden sind. Die einfachen linearen Rückkopplungen, deren Untersuchung für das Aufmerksamwerden der Wissenschaftler auf die Bedeutung kybernetischer Forschungen so wichtig war, werden jetzt als wesentlich weniger einfach und als weit weniger linear angesehen, als sie zunächst erscheinen.¹¹⁸

Das Nervensystem wird nicht mehr nur nach Rückkopplungsschleifen abgesucht, sondern nach den enthaltenen Informationen Ausschau gehalten, wobei auch dies Schwierigkeiten bereitet: „These traces cannot be simply localized; each bit is an alteration of synapses effective somewhere in the net, and the alteration is not confined to some one junction.“¹¹⁹

Die viel zitierte Diskussion zum Unterschied zwischen analog und digital in der siebten Macy-Konferenz zur Kybernetik im Jahr 1950 lässt sich dementsprechend auch als Kampf der zwei epistemischen Dinge interpretieren, die in der neuen Ausrichtung der Kybernetik hin zu Fragen von Gedächtnis, Lernen und Speicherung von Information miteinander ringen: der Operationsverstärker, als epistemisches Ding der Gegenkopplung und den mit ihr erzeugten sich selbst regulierenden Regelkreisen auf der Seite des Analogrechners, gegen die Eccles-Jordan-Schaltung von 1918, bekannt als „Flip-Flop“, die dem Digitalcomputer zugrundeliegt.¹²⁰ Gerard macht dies in seiner Zusammenfassung der Diskussion mit John Stroud am unterschiedlichen Einsatz der Elektronenröhre in den beiden genannten Schaltungen – dem Operationsverstärker und dem „Flip-Flop“ – deutlich:

Stroud used the example of the electron tube working on its characteristic or off its characteristic; on the characteristic one has continuous relations or an analogical behaviour; off the characteristic it

116 McCulloch, „Summary of the Points of Agreement“, S. 721.

117 Vgl. Hagen, „Die Camouflage der Kybernetik“, S. 201.

118 Wiener, *Kybernetik*, S. 9 f.

119 McCulloch, „Summary of the Points of Agreement“, S. 724.

120 Zur Geschichte des „Flip-Flops“, vgl. z. B. Robert Dennhardt. *Die Flipflop-Legende und das Digitale. Eine Vorgeschichte des Digitalcomputers vom Unterbrecherkontakt zur Röhrenelektronik 1837–1945*. Berliner Programm einer Medienwissenschaft 6. Berlin: Kadmos, 2009.

“flip-flops,” Yes or No. [...] Now most of the physiological evidence I gave was to the effect that in the nervous system, in the body of afferent receptors and efferent effectors, in the synapses, and perhaps even in the nerve fibres, operations are much more on the characteristic of the tube than we have usually assumed in our physiological thinking.¹²¹

Die Diskussion ist medientheoretisch also auch insofern interessant, als Gerard die Teilnehmer der Konferenz im Angesicht des neuen Mediums Digitalcomputer – der nach einem Zitat Friedrich Kittlers einmal im „totale[n] Medienverbund auf Digitalbasis [...] den Begriff Medium selber kassieren [wird]“,¹²² da er jedes andere Medium simulieren kann¹²³ – darauf hinweist, dass ihr bisheriger Diskurs sich vornehmlich durch das Medium des Operationsverstärkers und seiner Epistemologie geprägt war. Zu diesem Vorgang bemerkte McLuhan treffend:

Knapp bevor ein Flugzeug die Schallmauer durchbricht, werden die Schallwellen an den Tragflächen des Flugzeugs sichtbar. Das plötzliche Sichtbarwerden des Schalls gerade dann, wenn der Schall aufhört, ist ein treffendes Beispiel jener großen Seinsgesetzmäßigkeit, die neue und gegensätzliche Formen offenbart, wenn frühere Formen gerade den Höhepunkt ihrer Entwicklung erreichen.¹²⁴

Der Operationsverstärker hatte zu diesem Zeitpunkt seinen epistemologischen Höhepunkt innerhalb der Kybernetik erreicht. Denn für Funktionen des Speicherns von Information eignen sich Schaltungen mit Operationsverstärkern nur eingeschränkt. Ulmann beschreibt dementsprechend die Möglichkeit, den Rückführungskondensator eines Integrierers in einem elektronischen Analogrechner als Zwischenspeicher zu nutzen, als „Zweckentfremdung von Integrierern“.¹²⁵ Aus diesem Grund ist ein Allzweck-Analogrechner auch nie ohne externe Ausgabegeräte zu denken, die das Aufzeichnen der Rechenergebnisse, sofern nötig, ermöglichen: z. B. (x, y) - oder (x, t) -Schreiber oder Speicheroszilloskope.¹²⁶ Das Speichern von Information ist eine wesentliche Eigenschaft des Digitalcomputers, der nun zum maßgeblichen epistemischen Ding im Diskurs der Kybernetik wird. Der Neurologe Hans Lukas Teuber ist dabei in der Diskussion derjenige, dem es wohl am treffendsten gelingt, auch die Grenzen dieser neuen Epistemologie darzulegen:

To assume digital action is permissible as long as we remember that we are dealing with a model. The only justification for using the model is its heuristic value. It may turn out to be inapplicable to the central nervous system, but finding out *why* it is inapplicable, we shall have discovered facts about the nervous system which we don't have in our hands at present.¹²⁷

121 Gerard, zit. n. Pias, *Transactions/Protokolle*, S. 194.

122 Friedrich Kittler, *Grammophon, Film, Typewriter*. Berlin: Brinkmann & Bose, 1986, S. 8.

123 So auch den Analogrechner, z. B. durch die Software „PERTECS“, vgl. Mark R. Titchener, *Signal Processing: PERTECS. A Reconfigurable UNIX Tool Emulating an Analogue Computer*. 11. Jan. 2011. URL: <http://tcode.auckland.ac.nz/~mark/Signal%20Processing%3A%20PERTECS.html> (besucht am 28.04.2012).

124 McLuhan, *Die magischen Kanäle*, S. 22.

125 Ulmann, *Analogrechner*, S. 102.

126 Vgl. ebd., S. 111 f.

127 Hans L. Teuber, zit. n. Pias, *Transactions/Protokolle*, S. 189.

Abbildungsverzeichnis

- 2.1 **Prinzipschaltbild eines RC-Glieds aus dem „Mischgerät“ des A-4, nach-**
gezeichnet nach:
Das Gerät A4 Baureihe B. Gerätebeschreibung. Geheime Kommandosache. An-
lage zu Bb. Nr 19/45 gK. OKH/Wa A/Wa Prüf Nr 27. 1. Feb. 1945. URL: [http :](http://www.aggreat4.de/pdf/Gerätebeschreibung_A4.pdf)
//www.aggreat4.de/pdf/Gerätebeschreibung_A4.pdf (besucht am
19.04.2012), S. 183, Abb. 79. 7

Literaturverzeichnis

Sind zu einem Eintrag mehrere Jahreszahlen angegeben, so gibt die erste Jahreszahl stets die in dieser Arbeit verwendete Ausgabe an, auf die sich auch die in den Zitaten angegebenen Seitenzahlen beziehen. Die in eckigen Klammern angegebenen Jahreszahl bezieht sich auf die Erstveröffentlichung. Befinden sich zwei Jahreszahlen innerhalb der eckigen Klammern, so gibt die erste die Erstveröffentlichung des verwendeten Sammelbands oder der Übersetzung und die zweite das Jahr der Originalpublikation an.

- Black, Harold S. „Stabilized Feedback Amplifiers“. In: *Bell System Technical Journal* 13.1 (Jan. 1934), S. 1–18.
- „Inventing the negative feedback amplifier“. In: *IEEE Spectrum* 14 (Dez. 1977), S. 54–60.
- Bode, Hendrik W. „Variable Equalizers“. In: *Bell System Technical Journal* 17.2 (Apr. 1938), S. 229–244.
- Boghosian, W. H., S. Darlington und H. G. Och. „Artillery Director“. US-Pat. 2,493,183. 3. Jan. 1950.
- Clark, A. B. und B. W. Kendall. „Carrier in Cable“. In: *Bell System Technical Journal* 12.3 (Juli 1933), S. 251–263.
- Das Gerät A4 Baureihe B. Gerätebeschreibung.* Geheime Kommandosache. Anlage zu Bb. Nr 19/45 gK. OKH/Wa A/Wa Prüf Nr 27. 1. Feb. 1945. URL: http://www.aggregat4.de/pdf/Gerätebeschreibung_A4.pdf (besucht am 19.04.2012).
- Dennhardt, Robert. *Die Flipflop-Legende und das Digitale. Eine Vorgeschichte des Digitalcomputers vom Unterbrecherkontakt zur Röhrenelektronik 1837–1945.* Berliner Programm einer Medienwissenschaft 6. Berlin: Kadmos, 2009.
- Ernst, Wolfgang. „Den A/D-Umbruch aktiv denken – medienarchäologisch, kulturtechnisch“. In: *Analog/Digital – Opposition oder Kontinuum? Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung.* Hrsg. von Jens Schröter und Alexander Böhnke. Medienumbrüche 2. Bielefeld: Transcript, 2004, S. 49–65.
- Hagen, Wolfgang. „Die Camouflage der Kybernetik“. In: *Cybernetics – Kybernetik. The Macy-Conferences 1946–1953. Bd. 2: Essays & Documents/Essays & Dokumente.* Hrsg. von Claus Pias. Zürich und Berlin: Diaphanes, 2004, S. 191–207.
- Hoelzer, Helmut. „Anwendung elektrischer Netzwerke zur Lösung von Differentialgleichungen und zur Stabilisierung von Regelvorgängen“. Diss. Darmstadt: Technische Hochschule, 1946.
- „50 Jahre Analogcomputer“. In: *Computer als Medium.* Hrsg. von Norbert Bolz, Friedrich Kittler und Christoph Tholen. Literatur- und Medienanalysen 4. München: Wilhelm Fink, 1999 [1994], S. 69–90.
- Hosenthien, H. H. und J. Boehm. „Flight Simulation of Rockets and Spacecraft“. In: *From Peenemünde to Outer Space. Commemorating the Fiftieth Birthday of Wernher von Braun.* Hrsg. von Ernst Stuhlinger u. a. Huntsville: George C. Marshall Space Flight Center, 1962, S. 437–469. URL: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi/ntrs.nasa.gov/19630006100_1963006100.pdf (besucht am 20.04.2012).
- Jung, Walter G., Hrsg. *Op Amp Applications Handbook.* Amsterdam u. a.: Elsevier, 2005.
- Kittler, Friedrich. *Grammophon, Film, Typewriter.* Berlin: Brinkmann & Bose, 1986.
- Lovell, Clarence A., David B. Parkinson und Bruce T. Weber. „Electrical Computing System“. US-Pat. 2.404.387. 23. Juli 1946.

- Maxwell, James Clerk. „On Governors“. In: *Proceedings of the Royal Society of London* 16 (1868), S. 270–283.
- McCulloch, Warren S. „Summary of the Points of Agreement Reached in the Previous Nine Conferences on Cybernetics“. In: *Cybernetics – Kybernetik. The Macy-Conferences 1946–1953*. Bd. 1: *Transactions/Protokolle*. Hrsg. von Claus Pias. Zürich und Berlin: Diaphanes, 2003 [1953], S. 719–725.
- McLuhan, Marshall. *Die magischen Kanäle. „Understanding Media“*. Aus dem Amerikanischen übers. von Meinrad Amann. Düsseldorf u. a.: Econ, 1992 [1964].
- Mindell, David A. „Opening Black’s Box. Rethinking Feedback’s Myth of Origin“. In: *Technology and Culture* 41 (Juli 2000), S. 405–434.
- *Between Human and Machine. Feedback, Control, and Computing Before Cybernetics*. Baltimore und London: John Hopkins University Press, 2002.
- Nyquist, Harry. „Regeneration Theory“. In: *Bell System Technical Journal* 11.1 (Jan. 1932), S. 126–147.
- Pflüger, Jörg. „Wo die Quantität in Qualität umschlägt. Notizen zum Verhältnis von Analogem und Digitalem“. In: *HyperKult II. Zur Ortsbestimmung digitaler Medien*. Hrsg. von Martin Warnke, Wolfgang Coy und Georg Christoph Tholen. Bielefeld: Transcript, 2005, S. 27–94.
- Philbrick, George A. „Analog Yesterday, Today, and Tomorrow, or Metaphors of the Continuum“. In: *Analog Circuit Design. Art, Science, and Personalities*. Hrsg. von Jim Williams. Boston u. a.: Butterworth-Heinemann, 2010 [1991, 1963], S. 5–14.
- Pias, Claus. „Zeit der Kybernetik. Zur Einführung“. In: *Kursbuch Medienkultur. Die maßgeblichen Theorien von Brecht bis Baudrillard*. Hrsg. von dems. u. a. 2. Aufl. Stuttgart: DVA, 2000 [1999], S. 427–431.
- Hrsg. *Cybernetics – Kybernetik. The Macy-Conferences 1946–1953*. Bd. 1: *Transactions/Protokolle*. Zürich und Berlin: Diaphanes, 2003.
- Ragazzini, John R., Robert H. Randall und Frederick A. Russell. „Analysis of Problems in Dynamics by Electronic Circuits“. In: *Proceedings of the I. R. E.* (Mai 1947), S. 444–452.
- Rheinberger, Hans-Jörg. „Experimentalsysteme, Epistemische Dinge, Experimentalkulturen. Zu einer Epistemologie des Experiments“. In: *Deutsche Zeitschrift für Philosophie* 42.3 (1994), S. 405–417.
- Rosenblueth, Arturo, Norbert Wiener und Julian Bigelow. „Behavior, Purpose, and Teleology“. In: *Philosophy of Science* 10.1 (Jan. 1943), S. 18–24.
- Schröter, Jens und Alexander Böhnke, Hrsg. *Analog/Digital – Opposition oder Kontinuum? Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung*. Medienumbrüche 2. Bielefeld: Transcript, 2004.
- Sheingold, Dan. „Op Amps and Their Characteristics“. In: *Analog Circuit Design. Art, Science, and Personalities*. Hrsg. von Jim Williams. Boston u. a.: Butterworth-Heinemann, 2010 [1991], S. 361–386.
- Stankovic, John A. „Misconceptions About Real-Time Computing. A Serious Problem for Next-Generation Systems“. In: *IEEE Computer* 21.10 (Okt. 1988), S. 10–19.
- Titchener, Mark R. *Signal Processing: PERTECS. A Reconfigurable UNIX Tool Emulating an Analogue Computer*. 11. Jan. 2011. URL: <http://tcode.auckland.ac.nz/~mark/Signal%20Processing%3A%20PERTECS.html> (besucht am 28. 04. 2012).
- Tomayko, James E. „Helmut Hoelzer’s Fully Electronic Analog Computer“. In: *Annals of the History of Computing* 7.3 (Juli 1985), S. 227–240.
- Ulmann, Bernd. *Analogrechner. Wunderwerke der Technik*. Grundlagen, Geschichte und Anwendung. München: Oldenbourg, 2010.

- Warnke, Martin, Wolfgang Coy und Georg Christoph Tholen, Hrsg. *HyperKult II. Zur Ortsbestimmung digitaler Medien*. Bielefeld: Transcript, 2005.
- Wiener, Norbert. *Kybernetik. Regelung und Nachrichtenübertragung im Lebewesen und in der Maschine*. Hrsg. von Ernesto Grassi. Aus dem Amerikanischen übers. von E. H. Serr und E. Henze. 2. Aufl. Düsseldorf und Wien: Rowohlt/Econ, 1968 [1963, 1948].
- Williams, Jim, Hrsg. *Analog Circuit Design. Art, Science, and Personalities*. Boston u. a.: Butterworth-Heinemann, 2010 [1991].
- „Is Analog Circuit Design Dead?“ In: *Analog Circuit Design. Art, Science, and Personalities*. Hrsg. von dems. Boston u. a.: Butterworth-Heinemann, 2010 [1991], S. 17–20.