

Humboldt - Universität zu Berlin
Kultur -, Sozial- und Bildungswissenschaftliche Fakultät
Institut für Musikwissenschaft und Medienwissenschaft

Medientheorie und Medienarchäologie
Prof. Dr. Wolfgang Ernst
Wintersemester 2018/2019

Xenodigital Storage
Zu Gast im fremden System

David Friedrich
friedrich.david@gmx.net

Inhalt

1. Anklang	2
2. Téchne & Bíos	4
3. Xenodigital Storage – Der codierte Code	15
4. Ausklang	22
5. Literaturverzeichnis	23

Anhang: Eigenständigkeitserklärung
 Prüfungsprotokoll

Anklang

Unter dem Titel *Harvard scientists pioneer storage of video inside DNA* beschreibt der *Guardian*, wie es im Jahr 2017 Wissenschaftlern um Seth L. Shipman gelungen ist, einen Teil der bekannten Fotoreihe *Sallie Gardner at a Gallop* von Eadweard Muybridge in einem *Escherichia coli* Bakterium zu speichern.¹ Das aus fünf Bildern und 21 Graustufen bestehende GIF² wurde zunächst separiert und als einzelne Nukleotid-Stränge codiert, um diese mittels der CRISPR-Cas³ Methode in die DNA⁴ des Bakteriums einzuschleusen.⁵ Das Bakterium fungiert bei Shipman *et al.* als Träger der in der DNA enthaltenen binären Information, was der Künstler Joe Davis mit seinem Werk *Microvenus* bereits 1988 – und ohne CRISPR-Cas – realisierte.⁶ Davis sah im Bakterium, diesem lebenden Organismus, einen äußerst vorteilhaften Speicherträger, da dieser robust gegenüber seiner Umwelt sei und sich zudem selbst kopiere: „Once inside the bacteria into which it can be introduced, DNA can be robust. Bacteria have been shown to survive extreme pressures and temperatures. [...] Another important feature of biological data storage is that it is self-copying“⁷ – quasi *Cybergenetic Media*⁸.

Doch auch ohne Träger – in diesem Fall das Bakterium – zeigt sich, dass DNA als Langzeitspeicher äußerst kompakt und attraktiv ist, vor allem in der heutigen Informationsgesellschaft und der damit verbundenen Anhäufung digitaler Daten.⁹ Mit einer Speicherdichte von 1 Exabyte/mm³ (10⁹ GB/mm³) und einer Halbwertszeit von 500 Jahren übertrifft DNA alle etablierten Speichermedien, wie etwa das Magnetband (Halbwertszeit von ca. 30 Jahren).¹⁰ Und auch wenn diese Form der Speicherung noch in keiner Relation zu den Kosten steht,¹¹ wird nichtsdestotrotz mit geschickten Überschriften, wie etwa „Next-Generation Digital Information Storage in DNA“¹²,

¹ Vgl. Sample 2017.

² GIF (Graphics Interchange Format) ist ein Grafikformat, welches „ausschließlich für die Bildschirmdarstellung gedacht“ (Waldruff 2004, S. 121) ist. Dieses wird mit maximal 256 möglichen Farben definiert. (Vgl. ebd., S. 27).

³ CRISPR-Cas ist ein Verfahren, mit dem gezielt eine beliebige Stelle der im Organismus liegenden DNA geöffnet werden kann, um dort Veränderungen durchzuführen. (Vgl. Doudna/ Sternberg 2018, S. XV) Jennifer Doudna, Professorin für Chemie, Molekular- und Zellbiologie an der Universität von California, Berkeley, und Miterfinderin der CRISPR-Technologie, bezeichnet diese als „DNA-cutting machine“ (Ebd., S. 80).

⁴ Obwohl im deutschsprachigen Raum **D**esoxyribonukleinsäure mit DNS abgekürzt wird, nutzt die aktuelle Literatur den Terminus DNA (A= acid). Diese Arbeit schließt sich dem aktuellen Kanon an.

⁵ Vgl. Shipman *et al.*, 2017, S. 345ff; Anm.: Die Absicht der Forscher um Seth L. Shipman war es zu demonstrieren, „that this system can capture and stably store practical amounts of real data within the genomes of populations of living cells.“ (Ebd., S. 345).

⁶ Vgl. Church *et al.* 2012a, S. 1628; vgl. Davis 1996.

⁷ Davis 1996, S. 73.

⁸ Anm.: *Cybergenetic Media* ist eine von mir aufgestellte Hypothese, in der Bakterien eine neue Form des Speicherträgers darstellen könnten; selbstkopierend und -erhaltend. Spannend ist hierbei, dass Information mutieren kann. *Cybergenetic* ist angelehnt an den Begriff Kybernetik.

⁹ Vgl. Church *et al.* 2012a, S. 1628.

¹⁰ Bornholt *et al.* 2016, S. 1.

¹¹ Vgl. Bornholt *et al.* 2016, S. 3; Anm.: „The current commercial cost of the Agilent OLS process is approximately \$25,000 for 244,000 designed oligos of length 200 bases (approximately \$0.05/100 bases).“ (Goldman *et al.* 2013a, S. 13).

¹² Church *et al.* 2012a, S. 1628.

diese Art der Datenspeicherung propagiert. Die vorliegende medienwissenschaftliche Arbeit widmet sich der Frage, inwieweit es sich hierbei tatsächlich um den Beginn einer neuen Speichertechnologie handelt.

Xenodigital Storage – Zu Gast im fremden System untersucht die DNA-basierte Speicherung digitaler Information aus einer medienarchäologischen Perspektive.¹³ In diesem Sinne bewegt sich diese Arbeit zwischen den Diskursen und Disziplinen.¹⁴ Bei der DNA-basierten Speicherung nach Church *et al.* (2012) – dessen Grundprinzip sich aktuell als vielversprechend für die DNA-Codierung darstellt und in dieser Arbeit im Zentrum steht – handelt es sich um zuvor binär codierte Information, die nochmals quartär codiert wird. Um Klarheit zu schaffen, wird deshalb zunächst in *Téchne & Bíos* eine Trennung zwischen der Operation des Digitalcomputers und der Reproduktion des Organismus vorgenommen. Denn auch wenn es der Genetiker und Nobelpreisträger François Jacob vermag, „die Logik der Vererbung [mit] derjenigen einer Rechenmaschine gleichzustellen“¹⁵, liegt der bedeutende Unterschied in der Differenzierung zwischen *Technologik* ‚Operation‘ und *Biologik* ‚Vererbung‘. Es wird sich zeigen, dass beide ihrer eigenen Programmatik (griech. *próγραμμα* = Vorschrift) folgen, um ihren jeweiligen Aufgaben gerecht zu werden.

Im zweiten Teil *Xenodigital Storage – Der codierte Code* wird sich dem Codierungsverfahren von George M. Church *et al.* angenommen. Dabei wird zunächst auf die Informationstheorie von Claude E. Shannon eingegangen, die als epistemische Schnittstelle zwischen Technologie und Biologie fungierte und damit letztlich die Gedanken der Wissenschaftler¹⁶ in Richtung DNA-basierter Speicherung digitaler Information lenkte. Anschließend wird das Verfahren der DNA-basierten Speicherung beschrieben und analysiert. Am Ende wird für dieses Speicherverfahren, das digitale Information nicht lediglich transformiert und speichert – siehe Magnetband –, sondern im gleichen Moment Auswirkung auf das ‚Programm Vererbung‘ hat, der Terminus *Xenodigital* angeboten, ein von der Medizin, der *Xenotransplantation*, inspirierter Begriff.

¹³ Diese Arbeit versteht sich als ein erster Vorstoß, in ein von der Medienwissenschaft bisher vermutlich noch unberührtes Forschungsfeld.

¹⁴ Vgl. Huhtamo/ Parikka 2011, S. 14.

¹⁵ Jacob 1972, S. 283.

¹⁶ Ich verwende ausschließlich die männliche Form, die weibliche ist stets mitgemeint.

Téchne & Bíos

Wenn im 21. Jahrhundert die Rede vom Computer ist, ist nahezu immer der speicherprogrammierte Digitalrechner gemeint, der im Prinzip dem Entwurf von John von Neumann folgt.¹⁷ Denn auch wenn heutzutage Interfaces dem User vorgaukeln es mit einem Fernseher oder einer Schreibmaschine zu tun zu haben – um nur zwei Beispiele zu nennen –, bleibt der *Computator* das, was der Name bereits verspricht: Ein (Be-)Rechner. Organisiert durch Algorithmen¹⁸, werden aus binär codierten Signalen Rechenergebnisse provoziert,¹⁹ die sich am Ende dem User (audio-)visuell oder auditiv präsentieren. Grundsätzlich und auf einer abstrakten Ebene lässt sich laut dem Informatiker Wolfgang Coy die maschinelle Verarbeitung von Information in drei Arbeitsbereiche einteilen: *Dateneingabe*, wie etwa Texte oder sensorische Meßdaten; *Verarbeitung und Speicherung* der Eingabedaten auf Ebene der Maschine; *Datenausgabe* von beispielsweise Texten, akustischen Signalen oder mechanischen Bewegungen.²⁰ Was einst zur schnellen „Berechnung der Strömungsprobleme im Explosionsraum der Wasserstoffbombe eingesetzt“²¹ wurde, findet sich nun als Massenmedium in den Haushalten und unterhält die digitale Gesellschaft unter anderem mit Katzenvideos.

Der speicherprogrammierte Digitalcomputer ist ein durch Menschenhand erschaffenes Artefakt; die Verschränkung zwischen „handwerkliche[m] Können (téchne)“ und „digitaler, sprich: numerischer (lógos) Medienoperation“²² – Technologie im wahrsten Sinne des Wortes.²³ Im weiteren Verlauf soll sich nun zunächst der *Téchne*, sprich der Operation des Digitalcomputers, angenommen werden, indem die grundlegenden Aspekte dieses Artefaktes erläutert werden.²⁴

Der technische Terminus ‚Digital‘ taucht laut dem Medienwissenschaftler Shintaro Miyazaki erstmalig 1934 auf, in einer veröffentlichten Patentschrift von Charles

¹⁷ Coy 1988, S. 14; Anm.: „Rechner, deren Architektur von den von Neumannschen Entwurfsprinzipien wesentlich abweichen [*sic*], werden im technischen Jargon manchmal *Non-von-Computer* genannt.“ (Ebd., S. 16)

¹⁸ „[D]as Charakteristische an Algorithmen ist: Sie sind schrittweise Verfahren zur Berechnung von gesuchten aus gegebenen Größen. [...] Wesentlich ist, daß die Schritte *eindeutig* beschrieben sind, daß sie für einen Menschen oder einen Computer *ausführbar* sind und daß es nur *endlich* viele Schritte sind, denn sonst würde der Algorithmus nie an ein Ende kommen und nie Ergebnisse liefern.“ (Rechenberg 2000, S. 93).

¹⁹ Vgl. Ulmann 2016, S. 96; Vgl. Rechenberg 2000, S. 93.

²⁰ Vgl. Coy 1988, S. 8; Anm.: „Die Verarbeitung im Rechner [...] erfolgt durch einen Zentralprozessor (engl. CPU – *Central Processing Unit*), der ein Steuerwerk zur Steuerung des Programmablaufs und ein Rechenwerk zur Verarbeitung der Daten enthält (engl. *Control Unit* bzw. *Arithmetical and Logical Unit*, kurz ALU). Zusammen mit einem Programm- und Datenspeicher, dem Hauptspeicher, bildet der Prozessor die *Zentraleinheit*, den eigentlichen Rechenkern, der durch Ein/Ausgabegeräte Daten austauschen kann und über seine Zusatzspeicher langfristig maschinelle Datenhaltung vornehmen kann.“ (Ebd.).

²¹ Ebd., S. 3.

²² Ernst 2018, S. 11.

²³ Vgl. ebd.; vgl. Rechenberg 2000, S. 13.

²⁴ Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu strapazieren, werden nur die Aspekte aufgegriffen, die für die Arbeit von Bedeutung sind. Eine kompakte Geschichte über die Anfänge des Digitalrechners, sowie eine ausführliche Funktionsbeschreibung findet sich unter anderem in Coy 1988 und Rechenberg 2000.

Cambell, die allerdings erst 1938 publiziert wurde.²⁵ Schließlich unterscheidet Georg R. Stibitz 1943, in *Digital Computation for A[ir] A[craft] Directors*, zwischen analoger und digitaler Rechenmaschine.²⁶ Im Unterschied zum Kontinuierlichen, dem Analogen, ist das Digitale diskret²⁷, sprich diskontinuierlich, worauf die Etymologie bereits verweist (*digitus* = Finger).²⁸ „Der Preis des Digitalen ist die Reduktion und Rasterung physikalischer Komplexität. Das Analoge erinnert an die Welt der Physik, die das Digitale ausfiltert; das Digitale ist immer nur ein Modell von Welt.“²⁹ Folglich werden zunächst ganz banal, alle unendlichen Werte durch endliche Werte ersetzt bzw. diskretisiert.³⁰ ‚Digital‘ ist jedoch mehr als lediglich ein Synonym des Diskreten. Dem Medienwissenschaftler Wolfgang Ernst zufolge ist es das maschinelle und zeitkritische Rechnen mit eben diesen diskreten Werten:

Die Von-Neumann-Architektur mit ihrer strikten Umsetzung des Turing'schen Diktums, immer jeweils nur ein bit pro Zeitmoment abzuarbeiten, ist die Bedingung, die das Binär-Digitale an seine technische Implementierung stellt: weg von dem aus Parallelität und Sukzessivität der Zeichen kombinierten System analoger Datenverarbeitung hin zur reinen Sukzessivität in der Prozessierung.³¹

Laut Coy liegt die logische Basis der maschinellen Informationsverarbeitung in der eindeutigen Darstellung von Zeichen mittels Signalen: „In der digitalen Schaltungstechnik haben sich binäre Kodierungen durchgesetzt, bei denen auf der Leitung genau zwei verschiedene bedeutungstragende Signale unterschieden werden. Die Signale werden meist als *null* und *eins* bezeichnet [...]“³² Der Nachteil dieser Bezeichnung ist, dass sie auf das Dezimalsystem referiert.³³ Tatsächlich handelt es sich hierbei meist um elektrische Signale, die klar voneinander abgrenzbar sind, unabhängig von dem eigentlichen Wert der Spannung.³⁴

Um nun mit diesen binären Spannungen „*high* und *low*“³⁵ effizient arbeiten zu können, bedarf es zunächst eines sich „ständig gleichmäßig wiederhol[enden]“³⁶ Taktes – also Zeit. Dieser „Taktimpuls“³⁷ steuert laut dem Informatiker Peter Rechenberg den gesamten Rechner und ist letztlich für die Bestimmung von 0 und 1 entscheidend: „Der Abfragetaktimpuls tritt immer in der Mitte zwischen zwei Umschalttaktimpulsen auf.“

²⁵ Vgl. Miyazaki 2013, S. 33.

²⁶ Vgl. ebd.

²⁷ „*Diskret* bedeutet im Sprachgebrauch von Mathematik und Informatik *unstetig, getrennt*.“ (Rechenberg 2000, S. 27).

²⁸ Vgl. Ernst 2004, S. 49; vgl. Rechenberg 2000, S. 26.

²⁹ Ernst 2004, S. 54.

³⁰ Vgl. Rechenberg 2000, S. 27.

³¹ Ernst 2004, S. 56.

³² Coy 1988, S. 3.

³³ Vgl. Rechenberg 2000, S. 25.

³⁴ Vgl. ebd., S. 28, 45; vgl. Coy 1988, S. 3; Anm.: Neben den elektrischen Signalen, lassen sich der Vollständigkeit halber ebenso gestanzte Löcher in Lochkarten als eindeutige Signale nennen. (Vgl. Coy 1988, S. 3).

³⁵ Coy 1988, S. 3, 5.

³⁶ Rechenberg 2000, S. 45.

³⁷ Ebd.

Zu diesem Zeitpunkt kann man sich sicher sein, daß die Signale, die ihren Zustand beim letzten Umschalttaktimpuls verändert haben, inzwischen auf ihren Endwerten 0 oder 1 angekommen sind.“³⁸ Auf dieser Basis, also mit dem Bewusstsein über jenen binären Zustand, lässt sich via Binärcodierung mit der Maschine ‚kommunizieren‘.

Ein Code ist zunächst laut der Molekularbiologin und Wissenschaftshistorikerin Lilly E. Kay „[w]eder [...] ein Ding, noch eine Sprache.“³⁹ Es handelt sich hierbei um eine Transformationsregel, eine Zuordnung zwischen zwei unterschiedlichen (Sprach-)Systemen.⁴⁰ Der Physiker Horst Völz bezeichnet deshalb unsere Buchstaben als einen Code für unsere Lautsprache (Phoneme) – eine *Kulturtechné* im wahrsten Sinne des Wortes.⁴¹ Ein Code kann demnach als ein Indikator für *Téchné* verstanden werden. „Die Kodierung *K* ist mathematisch gesehen eine Abbildung einer endlichen Menge von Zeichen, des Alphabets *A* in eine geeignete Signalfolge über der unterliegenden Signalmenge *S*:“⁴²

$$K=A \rightarrow S^n.$$

Im Rahmen der Binärcodierung wird im Computer eine Menge *x* an Zeichenfolgen durch eine Folge von binären Signalen bzw. Zeichen ersetzt.⁴³

Während eine Binärziffer als *Bit* (binary digit) aufgefasst wird, bezeichnet *Byte* eine Bitkette aus 8 Bit.⁴⁴ Bitketten, die länger oder kürzer sind als ein Byte, werden *Maschinenwort* oder lediglich *Wort* genannt.⁴⁵ Eine der womöglich bekanntesten Transformationsregeln in Bezug auf den Computer ist der 7 Bit lange *American Standard Code for Information Interchange* – kurz ASCII-Code. Um nationale Sonderzeichen und Grafiksymbole darstellen zu können, so Coy, wird der ASCII-Code auf 8-Bit erweitert. Hierbei beginnt dieser mit einer führenden 0.⁴⁶ Folglich lassen sich mit einem 8-Bit-ASCII-Code $2^8 = 256$ mögliche Zeichen darstellen.⁴⁷ Während der Großteil der Zeichen zur Textdarstellung verwendet wird, ist ein Bruchteil des Codes für die sogenannten Steuerzeichen reserviert, die für die Geräte- und Leitungssteuerung des Computers

³⁸ Rechenberg 2000, S. 45.

³⁹ Kay 2001, S. 35.

⁴⁰ Vgl. ebd., 48; vgl. Völz 2001, S. 371.

⁴¹ Vgl. Völz 2001, S. 371; vgl. Ernst 2016, S. 50

⁴² Coy 1988, S. 4; Anm.: Die auf das Zitat folgende Gleichung ist Teil des Zitates.

⁴³ Vgl. Rechenberg 2000, S. 26; Anm.: Oder plastisch beschrieben am Beispiel der ‚Phonem-Codierung‘: Phonem \rightarrow Buchstabe \rightarrow Binärsignal /-zeichen.

⁴⁴ Vgl. Coy 1988, S. 5; vgl. Rechenberg 2000, S. 25.

⁴⁵ Vgl. Coy 1988, S. 5; vgl. Rechenberg 2000, S. 30; Anm.: Wolfgang Coy nennt zusätzlich die Unterscheidung eines 4 Bit langen Wortes, dass als Halbbyte oder *nibble* bezeichnet wird. (Vgl. Coy 1988, S. 5).

⁴⁶ Vgl. Coy 1988, S. 6f.

⁴⁷ Vgl. Rechenberg 2000, S. 29.

verantwortlich sind.⁴⁸ Auf diese Weise lässt sich das technische System – welches ja nur die binären Spannung high und low kennt – durch den Menschen steuern bzw. programmieren.⁴⁹

Für die Programmierung des Computers ist der Speicher von entscheidender Bedeutung. Grundsätzlich – und Völz zufolge – ist die Aufgabe eines Speichers, *Etwas*⁵⁰ zu einem Zeitpunkt x so festzuhalten, dass es zu einem zukünftigen Zeitpunkt möglichst originalgetreu wiedergegeben werden kann.⁵¹ Demnach „setzt Speichern relativ schnell Vergängliches voraus. Nur dieses lohnt es sich zu speichern. Andererseits soll Gespeichertes auf lange Sicht zur Verfügung stehen.“⁵²

Im Computer unterscheidet man zwischen *Read Only Memory* (ROM) und *Random Access Memory* (RAM), einem Halbleiterspeicher mit einer geringen Zugriffszeit.⁵³ Letzteres lässt sich als ein „Speicher mit wahlfreiem Zugriff“ bezeichnen, „der gelesen und beschrieben werden kann.“⁵⁴ Aus diesem Grund ist der Arbeitsspeicher auch als Halbleiterspeicher ausgelegt, so Rechenberg.⁵⁵ Das RAM ist kein Permanentspeicher, da ohne „Zusatzmaßnahmen wie einer Pufferbatterie“ der „Speicherinhalt bei Abschalten des Rechners“⁵⁶ verloren geht. Deshalb wird der Rechner um einen größeren und meist auswechselbaren Zusatzspeicher erweitert, wie etwa einem Festplattenspeicher oder einem Magnetbandspeicher – um nur zwei Beispiele zu nennen.⁵⁷ Diese lassen unter dem Begriff des *nichtflüchtigen Speichers* zusammenfassen, da diese auch nach Abschalten des Computers die Information festzuhalten vermögen.⁵⁸ Rechenberg bezeichnet deshalb den Zusatzspeicher als das „Langzeitgedächtnis“⁵⁹ des Computers.

Im Unterschied zum RAM, lässt sich das gespeicherte *Etwas* im ROM – wie der Name bereits *verspricht* – lediglich lesen. Der einst festverdrahtete Speicher, der jetzt in Chipform geliefert wird, lässt sich demnach nicht ohne weiteres verändern – er ist quasi Geschützt vor dem leihenhaften ‚Griffel‘ der User. Somit werden hier Anwendungen

⁴⁸ Vgl. Coy 1988, S. 7; Anm.: „Auf der untersten Ebene gibt es Steuerprogramme, die nur vom Hersteller oder Systemprogrammierer verändert werden können (*Mikroprogrammierung*) oder gar fest verschaltet sind. Darüber ist die erste vom Benutzer programmierbare Schicht, die *Maschinensprache*. Sie kann in Form einer strukturgleichen *Assemblersprache* programmiert werden. Diese Programme werden dann von einem Assembliererprogramm in die Maschinensprache übersetzt. Assemblersprachen werden mit Recht *maschinenorientiert* genannt. Die eigentlichen Programmiersprachen wie z.B. Pascal, Modula-2, C, COBOL, FORTRAN, Ada, LISP oder Prolog, werden als *problemorientierte* oder höhere *Programmiersprachen* bezeichnet. Sie müssen zur Ausführung auf dem Rechner durch Übersetzerprogramme (*Compiler*) in die binär kodierte Maschinensprache übersetzt werden.“ (Ebd., S. 17f).

⁴⁹ Vgl. Coy 1988, S. 16; vgl. Rechenberg 2000, S. 37; Anm.: „Durch die Binärcodierung bekommen [...] alle Daten die gleiche Form, und es ist ihnen dann nicht mehr anzusehen, was sie bedeuten.“ (Ebd.)

⁵⁰ „Dieses *Etwas* kann insbesondere stofflich, energetisch oder informationell sein.“ (Völz 2003, S. 4)

⁵¹ Vgl. Völz 2003, S. 5.

⁵² Ebd., S. 3.

⁵³ Vgl. Coy 1988, S. 9f.

⁵⁴ Rechenberg 2000, S. 337.

⁵⁵ Vgl. ebd., S. 58.

⁵⁶ Coy 1988, S. 10.

⁵⁷ Vgl. ebd., S. 10f.

⁵⁸ Vgl. Rechenberg 2000, S. 62.

⁵⁹ Ebd., S. 62.

gespeichert, deren Inhalt nur unverändert benötigt wird, wie etwa das BIOS (Basic Input/Output System).⁶⁰

Der Computer ist im Grunde genommen frei programmierbar, soll sagen, dass aufgrund seines Programmspeichers eine Vielzahl von unterschiedlichen Programmen gespeichert und realisiert werden kann.⁶¹ Via Algorithmen, die Rechenberg als mechanische Rechenverfahren betitelt, führt der Computer das Programm maschinell und bedingungslos; Schritt für Schritt und nacheinander bis zum Ergebnis aus.⁶² Es ist eben diese mathematisch determinierte Funktionsweise, die – wieder Rechenberg – den Computer von Instrumenten differenziert, deren Handlungsspielraum durch ihre Struktur festgelegt ist:⁶³ „Die freie Programmierbarkeit ist es, die den Computer, ungleich dem Fernrohr oder Mikroskop, zu einem vielseitigen, man möchte sagen, universellen Instrument macht, mit dem man die verschiedenartigsten Aufgaben lösen kann.“⁶⁴

Zusammenfassend lassen sich folgende zentrale Merkmale für den modernen Digitalrechner nennen, die der Mathematiker Norbert Wiener bereits 1940 definierte und bis die heute – im Grunde – Bestand haben:⁶⁵

[N]umerische anstelle analoger Berechnungsverfahren; elektronische Röhren⁶⁶ anstelle mechanischer Schaltrelais; binäre anstelle dezimaler Repräsentationen; eingebaute logische Fähigkeiten, welche die Datenmanipulation durch Menschen überflüssig mach[en]; und ein Speicher, der zur schnellen Speicherung, Abrufung und Löschung der Daten in der Lage [ist] [...].⁶⁷

Nachdem die wesentlichen Aspekte der *Téchneloglek*, hier des speicherprogrammierten Digitalcomputers, des auf Binärcodierung beruhenden Rechenartefaktes, erläutert wurden, soll sich nun der Logik des *Bios* angenommen werden, also der Basis der Vererbung. Hierbei zeigt sich die von Jacob beschriebene Gleichheit zwischen *Technologik* ‚Operation‘ und *Biologik* ‚Vererbung‘:

Die moderne Biologie will die Eigenschaft des Organismus aus der Struktur der ihn aufbauenden Moleküle erklären. In diesem Sinn entspricht sie einem neuen Zeitalter des Mechanismus. Das Programm ist ein den elektronischen Rechenmaschinen entliehenes Modell. Es stellt das genetische Material im Ei dem magnetischen Band eines Computers gleich. Es bedingt eine Reihe durchzuführender Operationen, die Starrheit ihres zeitlichen Ablaufs und den ihnen zugrunde liegenden Zweck.⁶⁸

⁶⁰ Vgl. Völz 2018, S. 233.

⁶¹ Vgl. Rechenberg 2000, S. 14.

⁶² Vgl. ebd., S. 13; Anm.: In Anlehnung an Rechenberg 2000 werden Programm und Algorithmus als gleichbedeutend begriffen. (Vgl. ebd., S. 14).

⁶³ Vgl. ebd., S. 14; Anm.: Als Beispiel lässt sich die Staffelwalze von Gottfried Wilhelm Leibnitz (1673) nennen. (Vgl. Coy 1988, S. 1).

⁶⁴ Rechenberg 2000, S. 14

⁶⁵ Vgl. Kay 2001, S. 118.

⁶⁶ Freilich besitzen moderne Computer keine Elektronenröhren mehr. Diese wurden durch die deutlich kleineren und leistungsfähigeren Transistoren und später durch Microchips abgelöst.

⁶⁷ Kay 2001, S. 118; vgl. Wiener 1968, S. 23f.

⁶⁸ Jacob 1972, S. 17.

Zu Beginn soll auf die DNA als solche eingegangen werden, da diese als Basis der *Biologie* ‚Vererbung‘ von Bedeutung ist, da sie die Produktion der Proteine bestimmt und damit ebenso die Erscheinung sowie Funktion des lebenden Organismus prägt.

Zunächst einmal ist die Desoxyribonukleinsäure (DNA), die sich bei Eukaryoten (z.B. Mensch) im Zellkern befindet und in Prokaryoten (Bakterien) frei in der Zelle schwimmt, als diskret zu betrachten.⁶⁹ Sie besteht aus zwei miteinander verbundenen Quatärketten, die Völz als „das 4-Zeichen-Alphabet der genetischen Speicherung“⁷⁰ bezeichnet. Die DNA ist der Schlüssel für die exakte Produktion der Aminosäuren, die in Form langer, diskret organisierter Ketten Proteine bilden und als „[d]ie Grundsubstanz des irdischen Lebens“⁷¹ betitelt werden können.⁷² Demnach – und Jacob zufolge – wird durch die Weitergabe der DNA Information von einer Generation zur nächsten Generation übermittelt: „Sie [die Vererbung] wird zur Fähigkeit der identischen Reproduktion, die jede Zelle besitzt und über die Generationen hinweg weitergibt. Diese Eigenschaft, Strukturen und Reaktionen auf dem Wege der Vermehrung zu reproduzieren, wird zum Hauptprinzip der Vererbung. Ohne sie gibt es keinen lebenden Organismus.“⁷³

Die aus Nukleotiden bestehende DNA wird seit 1944 – dazu später mehr – als „Grundbaustein[] der Vererbung“ verstanden und setzt sich nach Völz aus den drei Substanzen „Orthophosphorsäure H_3PO_4 , Zucker (Desoxy-Ribose) $C_5H_4O_4$ und organische[r] Base“⁷⁴ zusammen. Nukleotide werden durch ihre vier Basen Adenin (A), Guanin (G), Cytosin (C) und Thymin (T) unterschieden.⁷⁵ Phoebus Levene, der den Begriff des Nukleotids prägte, beschrieb 1929 die Zusammensetzung der Nucleinsäuren (ein Terminus von Richard Altmann aus dem Jahr 1889), die sich laut dem Chemiker Georg Schwedt heute wie folgt beschreiben lässt:⁷⁶

Nucleinsäuren bestehen aus einzelnen Bausteinen, den *Nucleotiden* als Makromolekülen. Zucker wie die Ribose und Phosphorsäureester bilden eine Kette, in der an jeden Zucker eine Base gebunden ist. Die bekanntesten und wichtigsten Vertreter der Nucleinsäuren sind die RNA und die DNA. Nucleinsäuren sind Ketten mit Nucleotiden, in denen das ringförmige Zuckermolekül den zentralen Teil darstellt.⁷⁷

Dank James Watson, Francis Crick und Maurice Wilkins ist seit 1953 die Struktur der DNA in Form einer Doppelhelix bekannt:⁷⁸ Demnach geht die Purin-Base Adenin eine zwei lineare Wasserstoffbrücke mit der Pyrimidin-Base Thymin ein, während das

⁶⁹ Vgl. Völz 2003, S. 171.

⁷⁰ Ebd., S. 180.

⁷¹ Ebd., S. 181.

⁷² Vgl. ebd.

⁷³ Jacob 1972, S. 281.

⁷⁴ Völz 2003, S. 179.

⁷⁵ Vgl. ebd., S. 180.

⁷⁶ Vgl. Schwedt 2011, S. 137f.

⁷⁷ Ebd., S. 139.

⁷⁸ Vgl. ebd.; vgl. Völz 2003, S. 167; Anm.: Watson und Crick weisen in ihrer Arbeit darauf hin, dass die Struktur der Nucleinsäure bereits durch Pauling und Corey bekannt ist. (Vgl. Watson/ Crick 1953, S. 737).

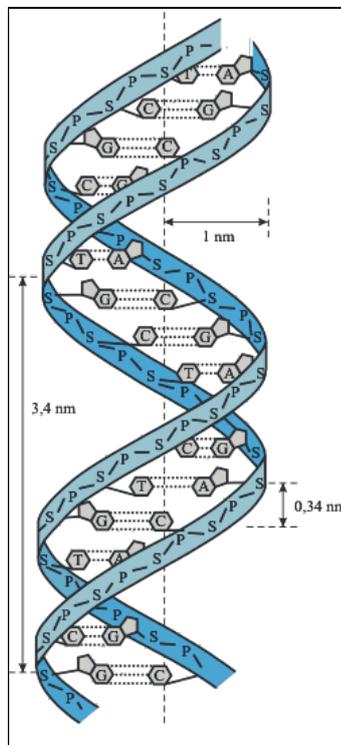


Abb. 1.: Watson-Crick-Modell.

Purin Guanin eine drei lineare Verbindung zu dem Pyrimidin Cytosin bildet (Abb. 1).⁷⁹ „In jeder Art von DNA sind die Gehalte von Adenin und Thymin einerseits und von Guanin und Cytosin andererseits gleich groß; das Verhältnis der jeweiligen Summen beider Gruppen jedoch ist von Organismus zu Organismus verschieden.“⁸⁰ Die Anzahl der Wasserstoffbrücken deuten bereits auf den GC- bzw. AT-Gehalt hin.⁸¹ Aufgrund der drei linearen Wasserstoffbrücken wird die DNA bei einem erhöhten GC-Gehalt ‚starr‘, während sie sich bei einem erhöhten AT-Gehalt instabiler verhält.⁸²

Die DNA besteht zusammenfassend also aus zwei Quartärketten, bei denen einerseits A mit T und andererseits G mit C in Verbindung treten: „Diese Fähigkeit der spezifischen *Basenpaarung* spielt die entscheidende Rolle für die biologische Funktion von Nucleinsäuren, der Speicherung und Verarbeitung genetischer Information.“⁸³ Die DNA kann folglich als Träger der *Erbinformation* betrachtet werden und ist somit Bestandteil des ‚Programms‘ Vererbung. Denn das „Ziel besteht darin, für die folgende Generation ein völlig gleiches Programm vorzubereiten; und das heißt sich zu reproduzieren. Ein Organismus ist immer nur ein Übergang, eine Etappe zwischen dem, was war, und dem, was sein wird. Die Reproduktion stellt gleichzeitig seinen Ursprung und sein Ende dar, Ursache und Ziel.“⁸⁴ Im Folgenden soll nun erläutert werden, wie aus der in DNA gespeicherten Information Aminosäuren produziert werden und letztlich damit auch die bedeutungsvollen Proteine, „die [...] in der Zelle alle möglichen

⁷⁹ Vgl. Schwedt 2011, S. 141.

⁸⁰ Ebd.

⁸¹ Der GC- und AT-Gehalt ist von entscheidender Bedeutung für die Speicherung von digitaler Information in DNA. Im Kapitel *Xenodigital Storage* wird dies deutlich.

⁸² Vgl. Schwedt 2011, S. 141f.

⁸³ Ebd., S. 143.

⁸⁴ Jacob 1972, S. 10.

biologischen Funktionen übernehmen.“⁸⁵ Dabei ist zu erwähnen, dass es für diese Arbeit ausreicht, die Schritte bis zum Ende der Proteinbiosynthese im Wesentlichen nachzuzeichnen.⁸⁶

Für die Synthese von Proteinen im lebenden Organismus bedarf es eines Regelwerkes, das es ermöglicht, aus den einzelnen Nukleotiden A, T, G, C Aminosäureketten herzustellen.⁸⁷ Die „Daten und Regeln“ finden sich nach Völz in der DNA und „werden [...] möglichst unverändert an die Folgezellen und schließlich an die Folge-Generationen der Lebewesen weitervermittelt.“⁸⁸ Schwedt zufolge sind für die Produktion von Proteinen „Tausende von Genen“⁸⁹ in einem Organismus zuständig. Sie enthalten die Information über die Reihenfolge der Aminosäurereste von körpereigenen Proteinen.⁹⁰ Es besteht also ein Zusammenhang zwischen Basensequenz, einer quartären Kette aus A,T,G und C, und Protein.⁹¹

Um eine Sequenz aus Aminosäuren zu produzieren, muss die DNA zunächst ‚geöffnet‘ werden, damit die Ribonukleinsäure (RNA) den Informationsspeicher der DNA kopieren kann, um diese Kopie anschließend im Ribosom zu Aminosäuren zu verarbeiten.⁹² Die RNA unterscheidet sich laut Völz von der DNA wie folgt: „Sie [RNA] bleibt *einsträngig* [...]. Sie ist relativ kurz, bis zu wenige tausend Nukleotide. Sie enthält einen anderen Zucker (Ribose [...]). An die Stelle von T [...] tritt das leicht veränderte U (Uracil [...]).“⁹³

Im ersten Schritt wird während der *Transkription* ein Strang der DNA „komplementär mit Nukleotiden kopiert.“⁹⁴ Diese erste Ribonukleinsäure bezeichnet man als *messenger-RNA* (mRNA).⁹⁵ „Ihr Name geht auf Message für Botschaft zurück, denn ihre Nukleotid-Sequenz bestimmt das zu erzeugende Protein.“⁹⁶ Die mRNA wandert aus dem Zellkern ins Zytoplasma. So bleibt die DNA unverändert.⁹⁷ „Die eigentliche Informationsübertragung erfolgt dann durch die Wechselwirkung zwischen mRNA-Codons⁹⁸ und *Transfer-RNA* (tRNA). So stellt entsprechend der Sequenzinformation die

⁸⁵ Synthetische Biologie (Website der MPG).

⁸⁶ Eine ausführliche Beschreibung der Proteinbiosynthese findet sich unter anderem in Schwedt 2017, S. 139 ff; Völz 2003, S. 188ff; Graw 2015, Kapitel 3.

⁸⁷ Vgl. Völz 2003, S. 188.

⁸⁸ Ebd.

⁸⁹ Bevor DNA als Träger von Erbinformation begriffen wurde, verstand man unter Gen (griech. *genos* = Ursprung) (vgl. Völz 2003, S. 167) „etwas höchst Abstraktes und Formales [...]“. (Knippers 2017, S. 9) Heute wird das Gen wie folgt beschrieben: „Als *Gene* werden einzelne funktionelle Abschnitte der DNA bezeichnet, also Nucleotidsequenzen innerhalb einer DNA. Je nach ihrer Funktion unterscheidet man das für ein bestimmtes Polypeptid codierende *Struktur-Gen*, das aktivierende *Operator-Gen* und das die Transkription steuernde *Regulator-Gen*.“ (Schwedt 2011, S. 143).

⁹⁰ Schwedt 2011, S. 143.

⁹¹ Vgl. Völz 2003, S. 188.

⁹² Vgl. Schwedt 2011, S. 141ff.

⁹³ Völz 2003, S. 190.

⁹⁴ Ebd.

⁹⁵ Vgl. Schwedt 2011, S. 144.

⁹⁶ Völz 2003, S. 190

⁹⁷ Vgl. ebd., S. 189.

⁹⁸ „Zu jedem Aminosäurerest existiert in der entsprechenden DNA-Sequenz ein Codewort, *Codon* genannt. Das Codon für die Aminosäure Phenylalanin beispielsweise ist TTC.“ (Schwedt 2011, S. 143).

1. Position (5'-Ende)	2. Position				3. Position (3'-Ende)
	U	C	A	G	
U	Phe	Ser	Tyr	Cys	U
	Phe	Ser	Tyr	Cys	C
	Leu	Ser	STOP	STOP	A
	Leu	Ser	STOP	Trp	G
C	Leu	Pro	His	Arg	U
	Leu	Pro	His	Arg	C
	Leu	Pro	Gln	Arg	A
	Leu	Pro	Gln	Arg	G
A	Ile	Thr	Asn	Ser	U
	Ile	Thr	Asn	Ser	C
	Ile	Thr	Lys	Arg	A
	Met	Thr	Lys	Arg	G
G	Val	Ala	Asp	Gly	U
	Val	Ala	Asp	Gly	C
	Val	Ala	Glu	Gly	A
	Val	Ala	Glu	Gly	G

Abkürzungen

U Uracil (bei DNA steht T [= Thymin] an der Stelle von U)
C Cytosin
A Adenin
G Guanin

Ala Alanin Gly Glycin Pro Prolin
Arg Arginin His Histidin Ser Serin
Asn Asparagin Ile Isoleucin Thr Threonin
Asp Asparaginsäure Leu Leucin Trp Tryptophan
Cys Cystein Lys Lysin Tyr Tyrosin
Gln Glutamin Met Methionin Val Valin
Glu Glutaminsäure Phe Phenylalanin
STOP bedeutet »beende die Kette«

Abb. 2.: Der vermeintliche genetische Code.

mRNA jeweils die richtige Aminosäure am Ribosom zur Synthese funktioneller Proteine bereit.⁹⁹ Im Ribosom werden dann auf Basis der tRNA aus jeweils drei Nucleotiden die unterschiedlichen Aminosäuren gebildet.¹⁰⁰ „Für ein Eiweiß¹⁰¹ von z.B. 1000 Aminosäuren sind die zugehörigen 3000 Nucleotide aus der vergleichsweise sehr langen DNS von 10^7 bis 10^{10} Nucleotiden zu finden.“¹⁰²

Die Proteinbildung ist demnach auf Nucleotid-Tripletts zurückzuführen. So wird beispielsweise die Aminosäure *Phenylalanin* aus dem Triplet *UUC* gebildet.¹⁰³ Es ließe sich nun annehmen, dass es aufgrund 4^3 möglicher Tripletts 64 Aminosäuren gäbe. Stattdessen existieren nur 20 Aminosäuren. Mit dieser Redundanz werden Fehler, die beispielsweise während des Kopiervorgangs entstanden sind, automatisch korrigiert.¹⁰⁴

⁹⁹ Schwedt 2011, S. 144.

¹⁰⁰ Vgl Völz 2003, S. 188; Anm.: „Erste Erkenntnisse hierzu legten 1961 Marshall Warren *Nirenberg* [...] und Johann *Matthaei* vor.“ (Ebd.).

¹⁰¹ Synonym für Protein.

¹⁰² Völz 2003, S. 189.

¹⁰³ Vgl. Schwedt 2011, S. 143f.

¹⁰⁴ Vgl. Völz 2003, S. 188.

Des Weiteren bilden nicht alle Triplets (nur) eine Aminosäure. Denn um ein Protein produzieren zu können, das aus einer Kette von Aminosäuren besteht, braucht es einen Anfang und ein Ende. Folglich bilden einige wenige Triplets Start- und Stopp-„Befehle“ innerhalb der Proteinbiosynthese.¹⁰⁵

Dieses beschriebene Regelwerk, welches für die Bildung von Proteinen von Bedeutung ist, wird fälschlicher Weise als *genetischer Code* bezeichnet. Diese Bezeichnung hat sich jedoch fest in unsere Kultur eingeschrieben: „Von linguistischem und kryptoanalytischem Standpunkt aus gesehen ist der genetische Code kein Code: Er ist nur eine Tabelle mit Entsprechungen[...].“¹⁰⁶ Tatsächlich handelt es sich hierbei um eine Chiffrierung, wie Crick später zugab: „Der angemessene technische Begriff für eine solche Translations-(Übersetzungs-)Regel ist, genaugenommen, nicht ‚Code‘, sondern ‚Chiffrierung‘. [...] Mir war das damals nicht klar – glücklicherweise, denn ‚genetischer Code‘ klingt weit interessanter als ‚genetische Chiffrierung‘.“¹⁰⁷ Demnach müsste es korrekterweise *genetische Chiffre* heißen und diese ist sogar universell, soll heißen, dass im Grunde jeder Organismus mit den gleichen Triplets die gleiche Aminosäure bildet.¹⁰⁸ „Die Regeln des genetischen Spiels sind für alle dieselben“¹⁰⁹ – so Jacob.

Die Logik der Operation des Computers ist also in gleichem Maße gültig wie die der Vererbung, da beide als geregelte Programme verstanden werden können. So bildet die Max-Planck-Gesellschaft auf ihrer Website für synthetische Biologie eine deutliche Analogie:

Aus Sicht der Bioingenieure ist die Erbinformation [...] eine Art Betriebsanleitung, mit der sich die Aktivität von Genen und Proteinen gezielt beeinflussen lässt. Die komplette Erbinformation eines Organismus – das Genom – vergleichen manche Forscher aus dem Feld der Synthetischen Biologie gerne mit einem Programmcode, einer Software, die Instruktionen für die Zelle – also den biologischen Computer – bereitstellt.¹¹⁰

Nichtsdestotrotz unterscheiden sich nach Jacob Operation und Vererbung in vielerlei Hinsicht.¹¹¹ Zwar arbeiten beide mit diskreten Werten und speichern diese als solche, doch der Computer errechnet ein Ergebnis, welche er dann via Output ausgibt. Der Binärcode bildet hierbei die Schnittstelle zwischen elektrischen Signalen und Mensch. Demnach handelt es sich beim Computer um Elektronik und nicht wie bei der Vererbung um chemische Zustände. Dabei bleibt der Computer bei Ausführung der durch den User provozierten Instruktionen auf struktureller Ebene unberührt; seine

¹⁰⁵ Vgl. Völz 2003, S. 189.

¹⁰⁶ Kay 2001, S. 19.

¹⁰⁷ Zitiert nach Crick in: Kay 2001, S. 206; Anm.: „Chiffre oder Verschlüsselung heißt eine Transformation, die von einem geheimen Schlüssel abhängt und daher nur von genau bestimmten Zielpersonen rückgängig gemacht werden kann, nämlich von denen, die im Besitz des Schlüssels sind. Codierung ist eine Transformation, die nicht geheim ist und daher von jedem rückgängig gemacht werden kann.“ (Pommerening 2007).

¹⁰⁸ Vgl. Baudrillard 1991, S. 91; vgl. Graw 2015, S. 61; vgl. Kay 2001, S. 20.

¹⁰⁹ Jacob 1972, S. 281.

¹¹⁰ Synthetische Biologie (Website der MPG).

¹¹¹ Vgl. Jacob 1972, S. 17.

Architektur ist autonom gegenüber der Operation.¹¹² Basierend auf Mathematik führt der Computer sein Programm mechanisch, sowie autonom aus und ist somit zunächst mathematisch und dann technologisch – quasi mathematisch-technologisch. Es handelt sich bei dem ausführenden Programm des Computers also – und nach Rechenberg – um eine digitale Darstellung.¹¹³ Ein und dieselbe Maschine kann aufgrund ihrer Architektur unterschiedliche Rechenprobleme lösen. Sie ist demnach universell in Bezug auf ihre Architektur.¹¹⁴ Oder im heutigen Sprachjargon gesprochen: Auf einem ‚Mac‘ laufen auch Linux und Windows.

Dem gegenüber bestimmt das ‚Programm‘ Vererbung „den Aufbau seiner eignen Bestandteile [der des Organismus], d.h. der Organe, die mit der Durchführung des Programms beauftragt sind.“¹¹⁵ Universell ist hier folglich das Programm selbst. Egal ob ‚Architektur‘ Mensch oder Tier, das Regelwerk der Vererbung bleibt identisch. Ein und dasselbe Programm organisiert somit auf Basis der DNA – die von Generation zu Generation weitergegeben wird – die Proteinbiosynthese und bildet damit ebenso jedes Lebewesen aus. Der Organismus ist ein durch Reproduktion geschaffenes lebendes Wesen; ein System dessen Logik bis heute vom Einfluss durch Menschenhand befreit war.¹¹⁶ In Anlehnung an den Digitalcomputer ließe sich mit den Termini der *Téchné* folgende Differenzierung verdeutlichen: Die *Dateneingabe* erfolgt durch die Fortpflanzung; DNA und RNA bilden bei der Proteinbiosynthese *Verarbeitung und Speicherung*; *Datenausgabe* ist das Wesen selbst.¹¹⁷ Folglich bedarf es hier keiner Algebra, die Ordnung schafft, um das ‚Programm‘ Vererbung auszuführen. Die Mathematik bildet nicht die Basis, sondern kann lediglich zur Beschreibung des Verlaufs dienen, wie etwa die Dissertationsschrift *An algebra for theoretical genetics* (1940) des Mathematikers Shannon.¹¹⁸ In diesem Fall wäre die *Biologie* folglich als biologisch-mathematisch zu betrachten. Somit fehlt der Vererbung jedoch das Digitale. Die Basis der Vererbung fußt stattdessen – und laut dem Physiker Erwin Schrödinger – auf einem bereits geordneten Zustand, nämlich dem der DNA, wie wir heute wissen: „Das Leben scheint ein

¹¹² Vgl. Jacob 1972, S. 17.

¹¹³ Vgl. Rechenberg 2000, S. 26.

¹¹⁴ Vgl. ebd., S. 14.

¹¹⁵ Jacob 1972, S. 17; Anm.: „Auch wenn sich eine Maschine konstruieren ließe, die fähig wäre, sich zu reproduzieren, würde diese doch nur Kopien dessen hervorbringen, was sie selbst im Augenblick des Kopierens ist. Jede Maschine nutzt sich mit der Zeit ab. Zwangsläufig würden die Töchter mit der Zeit etwas weniger vollkommen werden als die Mütter. Mit jeder Generation würde das System etwas mehr in Richtung auf die statistische Unordnung zutreiben. Das Geschlecht wäre zum Tode bestimmt. Beim Lebewesen entsteht jedoch im Augenblick der Zeugung nicht einfach eine genaue Kopie der Eltern, ein neues Wesen wird erschaffen. Das bedeutet von einem Ausgangszustand aus einer Reihe von Vorgängen einzuleiten, die zum Zustand der Eltern führen.“ (Ebd., S. 17f).

¹¹⁶ Jacob unterscheidet 1972 die Maschine vom Organismus aufgrund der fehlenden Möglichkeit, in die DNA einzugreifen: „[...] dagegen ist die Struktur der Nukleinsäure der erworbenen Erfahrung unzugänglich und bleibt im Verlauf der Generation unverändert.“ (Jacob 1972, S. 17) Auch Baudrillard hebt 1991 hervor, dass die DNA fern unserer Kontrolle liegt: „Das ist der genetische Code: eine stillgestellte, unbewegliche Signalscheibe, und wir sind nur ihre Lesezellen.“ (Baudrillard 1991, S. 91) Dies ändert sich jedoch mit der ‚Genschere‘ CRISPR-Cas, die eine Umprogrammierung der DNA im lebenden Organismus ermöglicht. (Vgl. Doudna/ Sternberg 2018, S. XV).

¹¹⁷ Vgl. Jacob 1972, S. 16f.

¹¹⁸ Shannon beschreibt die Vererbung jedoch auf Basis der Erkenntnisse von Mendel. (Vgl. Shannon 1940, S. 1) Als Beispiel für eine mathematische Beschreibung der Proteinbiosynthese lässt sich der Aufsatz von Drew 2001 nennen.

geordnetes und gesetzmäßiges Verhalten der Materie zu sein, das nicht ausschließlich auf ihrer Tendenz, aus Ordnung in Unordnung überzugehen, beruht, sondern zum Teil auf einer bestehenden Ordnung, die aufrechterhalten bleibt.“¹¹⁹

Nachdem nun eine Differenzierung zwischen *Téchnologie* und *Bioslogie* vorgenommen wurde, kann sich im nächsten Kapitel der DNA-basierten Speicherung digitaler Information angenommen werden. Es wird sich zeigen, dass die Informationstheorie hierbei eine Schnittstelle bildet, die in mancher Hinsicht den Blick auf diese spektakuläre Speichertechnologie entzaubert. Indem das Verfahren im Wesentlichen vorgestellt wird, kristallisiert sich das *Xenodigitale* heraus, ein vorgeschlagener Terminus, der von der Medizin, der *Xenotransplantation*, inspiriert ist.

Xenodigital Storage – Der codierte Code

Es ist Oswald T. Avery, Colin M. MacLeod und Maclyn McCarty zu verdanken, dass es 1944 zu einem epistemischen Zusammenstoß zweier Disziplinen kam, die die junge Genetik¹²⁰ mit der noch jüngeren Molekularbiologie vereinte.¹²¹ In *Studies on the Chemical Nature of the Substance Inducing Transformation of Pneumococcal Types* wiesen die Wissenschaftler experimentell nach, dass die Spezifität, „ein biologisches Konzept [...], das Lebensphänomene, -prozesse und -merkmale bezeichnete“¹²², an die DNA gebunden ist. Während sich zuvor das Verständnis der Vererbung laut Kay auf Georg Mendel bezog und lediglich als *explanandum* (Erklärendes) betrachtet werden konnte, führte Avery *et al.* mit seinem Nachweis die DNA als Speicher der Erbinformation ein, womit diese zum *explanans* (Erklärung) wurde.¹²³

Der Physiker Warren Weaver prägte bereits 1938 den Begriff *Molekularbiologie*, eine neue interdisziplinäre Biologie, die mit Theorien und Techniken der physikalischen Wissenschaft arbeitete – quasi der Einbruch der *Téchne* ins *Bios*.¹²⁴ Weaver, der seit 1932 Direktor der *Natural Sciences Division* der Rockefeller-Stiftung war,¹²⁵ ist nach Kay maßgeblich daran beteiligt, dass die von Shannon entwickelte Informationstheorie letztlich an eine breite Leserschaft gelangte.¹²⁶ Im Gegensatz zu Wiener, dessen *Kybernetik* gleichzeitig mit Shannons *The Mathematical Theory of Communication* erschien (weshalb beide Theorien zusammenfassend früher als *Wiener-Shannon-Kommunikationstheorie* betitelt wurden), stellte Shannon Phänomene positiv dar:¹²⁷ „Ich

¹¹⁹ Schrödinger 1944, S. 122.

¹²⁰ „Genetik ist die Wissenschaft von der Vererbung. Sie betrifft vor allem die Weitergabe körperlicher Merkmale von einer Generation auf die nächste.“ (Völz 2003, S. 167).

¹²¹ Vgl. Kay 2001, S. 20, 90f; vgl. Avery *et al.* 1943; vgl. Schwedt 2011, S. 138.

¹²² Kay 2001, S. 77.

¹²³ Vgl. ebd.; Anm.: Würde man eine Medienarchäologie des *Cybergenetic Media* schreiben, so wäre hier vermutlich ein interessanter Einstieg.

¹²⁴ Vgl. ebd., S. 76.

¹²⁵ Vgl. ebd., S. 118.

¹²⁶ „Vielleicht als Reaktion auf den donnernden Applaus für Wieners *Kybernetik* und deutlich aus begeisterter Anerkennung für Shannons Überlegungen setzte Weaver sein Talent in Wissenschaftsmanagement und -vermittlung dazu ein, um Shannons technische Arbeit einer breiteren Leserschaft zugänglich zu machen.“ (Ebd., S. 142)

¹²⁷ Vgl. ebd., S. 137f.

betrachte, wieviel Information *erzeugt* wird, wenn eine Auswahl aus einer Menge getroffen wird – je größer die Menge, desto mehr Information. Sie [Wiener] betrachten die größere Unsicherheit im Falle einer größeren Menge, woraus sich eine geringere Kenntnis der Situation und demnach *weniger* Information ergibt.“¹²⁸ Information ist also nach Shannon das Maß der Ordnung.¹²⁹

Während Anfang des 20. Jahrhunderts „die Aktion des *Informierens*“ als das „Formieren[] oder die Bildung von Geist und Charakter, Unterrichtung, Unterweisung (einschließlich göttlicher Unterweisung und Inspiration), übermittelte Wissensinhalte, Nachrichten und Einsicht (im Unterschied zu Daten)“¹³⁰ verstanden wurde, wandelte Shannons technische Theorie Information zu einem physikalischen Parameter.¹³¹ Denn Shannon trennte den Inhalt der Kommunikation von der Information: Die „semantischen Aspekte der Kommunikation stehen nicht im Zusammenhang mit den technischen Problemen. Der technisch bedeutungsvolle Aspekt ist, daß die tatsächliche Nachricht *aus einem Vorrat von möglichen Nachrichten ausgewählt worden ist.*“¹³² Damit ließ sich letztlich der Informationsgehalt einer Nachricht errechnen; sprich ermitteln, welches Minimum an Zeichen benötigt wird, um eine Nachricht erfolversprechend zu übermitteln.¹³³ Auch wenn Shannons Informationstheorie auf die Kommunikation zwischen Maschinen auslegt ist, „wo Information völlig getrennt von Inhalt, Gegenstand oder Natur des Übertragungskanal konzeptualisiert war“¹³⁴, extrapolierte sie letztlich Projektionen über die elektrische Information hinaus.¹³⁵

Kay beschreibt in *Das Buch des Lebens. Wer schrieb den genetischen Code?*, wie die Informationstheorie die Molekularbiologie bis heute prägt.¹³⁶ Die Informationsmetapher wird zur gemeinsamen sprachlichen Währung; eine Verbindung zwischen Biochemie und Molekularbiologie.¹³⁷ Entleert ihres technischen Inhalts, so Kay, wird die Metapher Information zur Metapher für biologische Spezifität.¹³⁸ Durchzogen von technischen Tropen wurde folglich die biologische Spezifität re-repräsentiert – Information im Kontext der Molekularbiologie also nun als ein Maß für biologische Spezifität.¹³⁹ Information wurde quasi materialisiert, indem „alle organisierten Entitäten Information“ enthielten, wie etwa „Kohlenhydrate, Proteine, Nukleinsäuren.“¹⁴⁰ Doch wie Wiener bereits schrieb, „Information ist Information, weder Materie noch Energie.“¹⁴¹ Und auch der Kognitionswissenschaftler Colin Cherry unterstreicht die

¹²⁸ Zitiert nach Shannon in: Kay 2001, S. 137.

¹²⁹ Vgl. Shannon 2000, S. 9.

¹³⁰ Kay 2001, S. 43.

¹³¹ Vgl. ebd.

¹³² Zitiert nach Shannon in: Kay 2001, S. 140.

¹³³ Vgl. Ernst 1998, S. 239; vgl. Kay 2001, S. 143f; vgl. Shannon 2000, S. 9.

¹³⁴ Kay 2001, S. 142.

¹³⁵ Vgl. ebd.

¹³⁶ Vgl. ebd., S. 32.

¹³⁷ Vgl. ebd., S. 260.

¹³⁸ Vgl. ebd., S. 178.

¹³⁹ Vgl. ebd., S. 71, 233f.

¹⁴⁰ Ebd., S. 178.

¹⁴¹ Wiener 1968, S. 166.

stofflich befreite Information: „Die Signale übermitteln nicht Information, wie etwa Güterzüge Kohle transportieren. Wir sollten besser sagen: Die Signale besitzen, vermöge ihrer *Fähigkeit zur Auswahl*, einen Informationsgehalt.“¹⁴²

Es muss folglich klar sein, dass wenn beispielsweise die Rede von der *Erbinformation* ist, es sich hierbei nicht um technische Nachrichtenkommunikation handelt und damit auch nicht um Information im Sinne Shannons bzw. Wieners.¹⁴³ Die Informationstheorie ist hier vielmehr ein sprachliches Bindeglied, das *Téchne* und *Bíos* zusammenführt. Sie ist der Vermittler zwischen der digitalen Operation des Computers und der Reproduktion des Organismus – quasi eine epistemische Schnittstelle. Sie ermöglicht es, dass „Tier und Maschine [...] somit Modelle füreinander“¹⁴⁴ sind – nicht mehr und nicht weniger. Nichtsdestotrotz bildet diese Schnittstelle das Fundament der DNA-basierten Speicherung digitaler Information (Shannon), da diese sonst – vermutlich – nicht denkbar gewesen wäre.¹⁴⁵

Im Folgenden wird das Verfahren von George M. Church, Yuan Gao und Sriram Kosuri, die in *Next-Generation Digital Information Storage in DNA* beschreiben, wie sie einen Binärcode in DNA codierten, im Wesentlichen erläutert.¹⁴⁶ Bereits hier wird deutlich, dass der Ausgangspunkt der zu speichernden Information elektro-technischer ‚Natur‘ ist. Anschließend soll das Verfahren medienarchäologisch eingeordnet werden. Da es sich bei diesem Speicherverfahren um mehr als die Codierung eines diskreten Zustandes in einen anderen, ebenso diskreten Zustand, handelt, wird der Terminus *Xenodigital* vorgeschlagen.¹⁴⁷

Im Grunde ist das Verfahren nach Church *et al.* von der Idee her ziemlich simpel: Man nehme eine digitale Datei, sprich einen diskreten Binärcode, übertrage diesen auf die bereits diskrete DNA und rufe zu einem Zeitpunkt x das gespeicherte Etwas wieder auf. Folglich ist Speicherung ein Prozess, gefolgt von einem Zustand, gefolgt von einem Prozess:

In der Gegenwart erfolgt die *Aufzeichnung* (als Prozess). Dann wird das *Etwas* über eine längere Zeit in einen *allgemeinen Speicher-Zustand* [...] überführt, der danach über eine lange Zeit weitgehend unveränderlich bestehen soll. Zu einem späteren Zeitpunkt (in der Zukunft) erfolgt die *Wiedergabe* (als Prozess), bei der möglichst originalgetreu das ursprüngliche Etwas wieder zur Verfügung gestellt wird.¹⁴⁸

¹⁴² Zitiert nach Cherry in: Kay 2001, S. 178.

¹⁴³ Vgl. Kay 2001, S. 177f.

¹⁴⁴ Jacob 1972, S. 271.

¹⁴⁵ Einer der vermutlich Ersten, der einen Kurzschluss zwischen dem ‚Programm‘ Vererbung und Technik beschrieben hat, war der Physiker Mikhail S. Neiman: „Die allgemeinen Aspekte des Problems der Mikrominiaturisierung diskreter elektronischer Elemente werden betrachtet. Es werden Fragen zur Verwendung einzelner Mikroprozesse für die Informationsverarbeitung gestellt. Unter diesem Gesichtspunkt werden der aktuelle Stand der Quantenmechanik und die Theorie der biologischen Übertragung von Erbinformationen diskutiert.“ (Neiman 1964, S. 3) Natürlich gab es bereits vorher Analogien zwischen Technologie und Biologie, doch hier wird es konkret.

¹⁴⁶ Eine eskalierte Form der Church *et al.* Methode, die vor der DNA-Codierung den gleichmäßigen Binärcode mittels Huffman-Code zum Präfixcode komprimiert, (vgl. Völz 2001, S. 374, 376) findet sich beispielsweise bei Bornholt *et al.* 2016 oder Goldman *et al.* 2013.

¹⁴⁷ Ein Beispiel für das Codieren eines diskreten Zustandes in einen anderen diskreten Zustand: Alphabet → Binärcode.

¹⁴⁸ Völz 2003, S. 5.

Wenn also nun das Gespeicherte, in unserem Fall die digitale Datei in der DNA, analysiert werden soll, muss sich ebenso der Prozesse angenommen werden, also der Aufzeichnung und Wiedergabe.

Man stelle sich zunächst die Frage, was gespeichert werden soll. In diesem Fall handelt es sich um digitale Dateien,¹⁴⁹ die in ihrer Basis aus einem Binärcode bestehen, also aus einer Kette von Nullen und Einsen bzw. den elektrischen Spannungen high und low. Bei der Methode von Church *et al.* wird nun diese binäre Kette auf die quartäre Struktur der DNA übertragen: „We encode one bit per base (A or C for zero, G or T for one), instead of two. This allows us to encode messages many ways in order to avoid sequences that are difficult to read or write such as extreme GC content, repeats, or secondary structure.“¹⁵⁰ Bereits hier lassen sich einige wichtige zentrale Merkmale dieser Methode nennen: Zunächst einmal ist die Codierung in einem kleinen Maße willkürlich. Ebenso gut hätte man für Null auch A oder G und für Eins C oder T wählen können. Damit geht im Sinne der Informationstheorie die Eindeutigkeit verloren, da einem die Zuordnungsregel bekannt sein muss.¹⁵¹ Des Weiteren determiniert der GC- bzw. AT-Gehalt (*-Content*) die Form der Codierung, da dieser zum einen entscheidend bei der Synthese der Nukleotidstränge ist und zum anderen Einfluss auf die Stabilität nimmt:

Biochemical constraints dictate that DNA sequences with high GC content or long homopolymer runs (e.g., AAAAAA...) are undesirable, as they are difficult to synthesize and prone to sequencing errors. Second, oligonucleotide¹⁵² (hereafter “oligo”) synthesis, polymerase chain reaction (PCR)¹⁵³ amplification, and decay of DNA during storage can induce uneven representation of the oligos. This might result in dropout of a small fraction of oligos that will not be available for decoding.¹⁵⁴

Da der zu speichernde Binärcode relativ lang ist, die Nukleotidsynthese via PCR jedoch limitiert in Bezug auf die mögliche Länge der Oligos ist, muss die digitale Datei in einzelne Abschnitte geteilt werden. Hier wird deutlich, wie die Prozesse, also Aufzeichnung und Wiedergabe, den Speicherzustand bestimmen. Bei der Methode von

¹⁴⁹ „We [Church *et al.*] converted an html-coded draft of a book that included 53,426 words, 11 JPG images, and one JavaScript program into a 5.27-megabit bitstream.“ (Church *et al.* 2012a, S. 1628).

¹⁵⁰ Church *et al.* 2012a, S. 1628.

¹⁵¹ Vgl. Ernst 1998, S. 239.

¹⁵² Griech. *oligos* = wenig, klein. Es handelt sich also hierbei um kurze Nukleotidsäurestücke. (Vgl. Knippers 2017, S. 151).

¹⁵³ „PCR is a method for exponentially amplifying the concentration of selected sequences of DNA within a pool. A PCR reaction requires four main components: the template, sequencing primers, a thermostable polymerase and individual nucleotides that get incorporated into the DNA strand being amplified. The template is a single- or double-stranded molecule containing the (sub)sequence that will be amplified. The DNA sequencing primers are short synthetic strands that define the beginning and end of the region to be amplified. The polymerase is an enzyme that creates double-stranded DNA from a single-stranded template by “filling in” individual complementary nucleotides one by one, starting from a primer bound to that template. PCR happens in “cycles”, each of which doubles the number of templates in a solution. The process can be repeated until the desired number of copies is created.“ (Bornholt *et al.* 2016, S. 2).

¹⁵⁴ Erlich/ Zielinski 2017, S. 950.

Decoding self-referential DNA that encodes these notes.

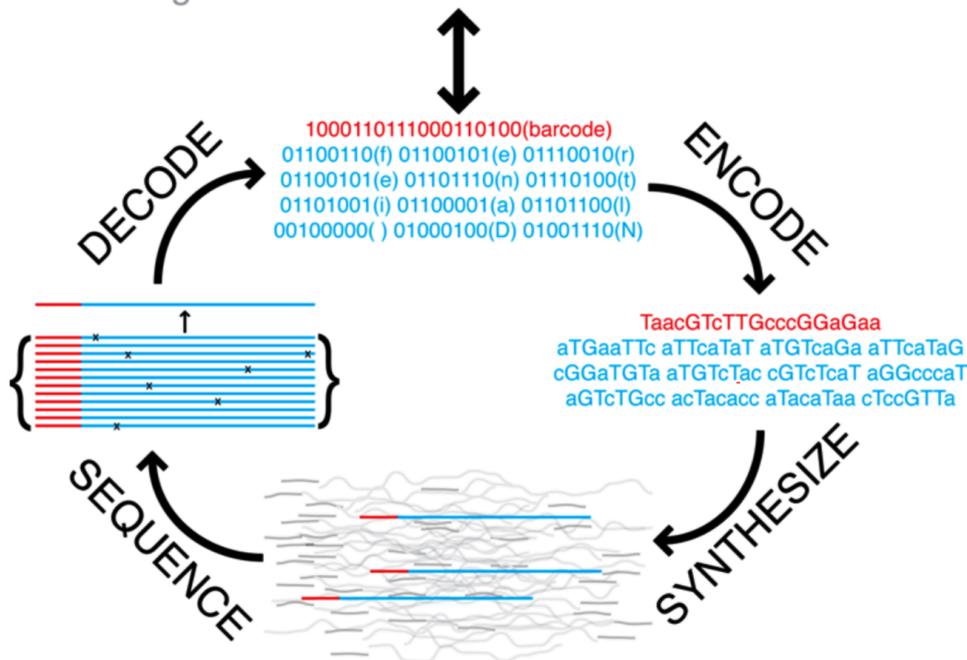


Abb. 3.: Schematische Darstellung der DNA-basierten Speicherung.

Church *et al.* werden die einzelnen Bits Datenblockweise in 96-nt¹⁵⁵ der 159-nt langen Oligos codiert – quasi eine Codierung des Codes. Die ersten 19-nt stellen dabei eine Art Barcode dar, eine 19-Bit lange Adresse, damit der Computer beim Abrufen des Speichers die ursprüngliche, binäre Reihenfolge des Codes wieder herstellen kann.¹⁵⁶ Die letzten 22-nt sind eine Art Puffer, da während der Synthese der Oligos vor allem die letzteren Abschnitte anfällig für Fehler sind, wodurch die vorausgegangenen 96-nt laut Church *et al.* verstärkt werden.¹⁵⁷ Die einzelnen Oligos, die nun jeweils 96-Bit tragen und aufgrund der Fehlerrate mehrmals vorhanden sind, werden in einem ‚Pool‘ aufbewahrt, um dann mittels DNA-Sequenzierung wieder decodiert werden zu können (Abb. 3).¹⁵⁸ Folglich geht hierbei ebenso die Einfachheit, die nach Rechenberg das Speichern binärer Werte mit sich führt, ‚schwimmen‘:

Binäre Werte lassen sich einfach und sicher speichern; elektrisch in integrierten Schaltungen, magnetisch auf Magnetbändern, Magnetplatten und Disketten, mechanisch in Lochkarten und Lochstreifen. Im Gegensatz zur Speicherung physikalischer Größen mit stetigen Werten (z.B. auf Magnetband) ist die Speicherung binärer Werte verlustlos, denn wenn man eine Folge Binärzeichen

¹⁵⁵ Maßeinheit für Anzahl der Nukleotide.

¹⁵⁶ Vgl. Church *et al.* 2012a, S. 1628.

¹⁵⁷ Vgl. Church *et al.* 2012b, S. 4.

¹⁵⁸ „There are several high-throughput sequencing techniques, but the most popular methods [...] use DNA polymerase enzymes and are commonly referred to as ‚sequencing by synthesis‘. The strand of interest serves as a template for the polymerase, which creates a complement of the strand. Importantly, *fluorescent* nucleotides are used during this synthesis process. Since each type of fluorescent nucleotide emits a different color, it is possible to read out the complement sequence optically. Sequencing is error-prone, but as with synthesis, in aggregate, sequencing typically produces enough precise reads of each strand.“ (Bornholt *et al.* 2016, S. 2); Anm.: Church *et al.* scheint die gleiche Methode genutzt zu haben, allerdings wird dies nicht ersichtlich aus den für die Presse bereitgestellten Unterlagen. Es ist lediglich die Rede von ‚Sequenzierung‘, als würde man sich auf ein allgemeingültiges Verfahren beziehen. (Vgl. Church *et al.* 2012b, S. 4f.)

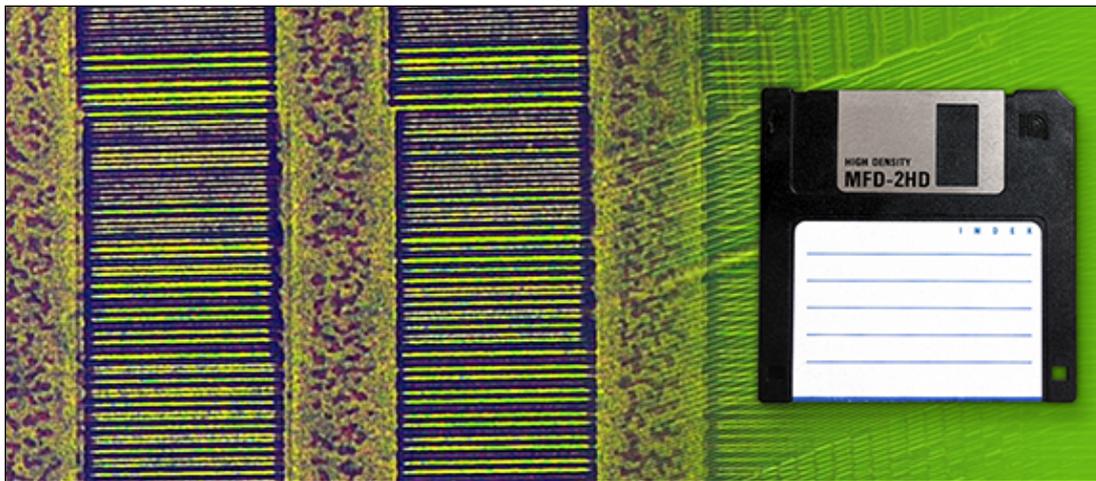


Abb. 4.: Untersuchung von magnetischen Strukturen auf Datenträgern (FDD).

speichert und sie später wieder abrufen, kann man sicher sein, daß man genau dieselbe Binärzeichenfolge, ohne den Verlust, die Hinzufügung oder die Änderung eines Bits zurückbekommt, während die Speicherung stetig veränderlicher Werte immer mit einem Genauigkeitsverlust verbunden ist.¹⁵⁹

Diese Art der Speicherung, das Zerteilen der Binärkette und das Hinzufügen eines zusätzlichen Barcodes, bildet einen epistemischen Bruch innerhalb der Speicherung von digitalen Dateien, auf den im Folgenden eingegangen wird.

Unter Datei versteht Rechenberg „[e]ine beliebig große logisch zusammengehörige Anzahl von Blöcken“, wobei ein „Block [...] hunderte oder tausende Bytes umfassen kann.“¹⁶⁰ In der Regel wird bei der externen Speicherung einer solchen Datei die Form gewahrt, soll sagen, dass die Blöcke nicht von einander getrennt werden. Zwar findet eine Transformation statt, wie etwa beim Magnetband, wo die elektrischen Binärsignale magnetisch auf dem Band gehalten werden, doch bleibt der Code ursprünglich – quasi codeursprünglich. In Anlehnung an Ernst und dessen Beschreibung des *Gleichursprünglichen*, gleicht hier der Code also seinem Ursprung, folglich den elektrischen Signalen im Computer.¹⁶¹ So lässt sich bei Sichtbarmachung des magnetischen Potenzials, der Binärcode auf einem Magnetband trotz Transformation lesen (Abb. 4).¹⁶² Bei der Methode von Church *et al.* geht jedoch ein Barcode voraus, eine hinzugefügte Adressierung, die nicht zur eigentlichen Datei gehört. Der Binärcode ist folglich nicht mehr ursprünglich, da dieser seine sequenzielle Ordnung verloren hat. Im Gegensatz zum Magnetband, wo das Ablesen der Information (Shannon) sequenziell und einmalig erfolgt, müssen die einzelnen Bits, codiert in den Oligos, wie ein Puzzle zunächst zusammengesetzt werden, was sehr zeitintensiv ist.¹⁶³

Durch die Methode nach Church *et al.* wird deutlich, dass der speicherprogrammierte Digitalcomputer die Bedingung für diese Speichertechnologie darstellt – im Gegensatz

¹⁵⁹ Rechenberg 2000, S. 29.

¹⁶⁰ Vgl. ebd., S. 62.

¹⁶¹ Vgl. Ernst 2012, S. 47.

¹⁶² Vgl. Coy 1988, S. 195; Anm.: „Zur magnetischen Aufzeichnung werden unterschiedliche Kodierungen der binären Daten als magnetische Nord- und Südpole verwendet [...]. Die am häufigsten verwendeten Verfahren sind Frequenzmodulation (FM) und modifizierte Frequenzmodulation (MFM) und darauf aufbauende datenkomprimierende Verfahren wie RLL (*Run Length Limited Code*).“ (Ebd.).

¹⁶³ Vgl. Church *et al.* 2012b, S. 3f.

zu frühen Überlegungen und Versuchen, wie etwa denen von M.R. Wallace 1978, der in Anlehnung an den ASCII-Code die Zeichen als Aminosäure-Dublett codierte, oder Taylor Clelland *et al.* 1999, die Basentriplets zur Codierung von Buchstaben und Zeichen nutzte.¹⁶⁴ Medienarchäologie identifiziert diesen markanten Unterschied und kritisiert folglich die von Goldman *et al.* beschriebene Historie¹⁶⁵ der DNA-basierten Speicherung: Demnach ist aus medienwissenschaftlicher Sicht zwischen einer bloßen Codierung, wie etwa bei Taylor Clelland *et al.*, und einer durch den Computer dominierenden Speichermethode (siehe Church *et al.*) zu differenzieren. Denn die DNA-basierte Speicherung von digitalen Dateien geht über das bloße ‚Transcodieren‘ hinaus. Folglich wird hier nicht ein diskreter Zustand in einen anderen überführt, wie es beispielsweise beim ASCII-Code der Fall ist. Stattdessen findet sich die *TechnoLogik* in einem ‚Programm‘ wieder, welches der *BioLogik* gehorcht.

Inspiziert vom Terminus *Xenotransplantation* (griech. *xénos* = Fremder), bei der beispielsweise ein Herz aus dem ‚System‘ Schwein in das eines Affen transplantiert wird,¹⁶⁶ lässt sich die DNA-basierte Speicherung digitaler Information (Shannon) als *Xenodigital*¹⁶⁷ beschreiben. Denn die mathematisch-technische Logik des Computers findet sich in der artfremden biochemisch-mathematischen Logik wieder. Erst jetzt lässt sich von einer digitalen DNA sprechen, da die elektrischen Binärsignale durch biochemische Basen repräsentiert werden. Dabei bleibt jedoch die Logik der Vererbung erhalten, soll sagen, dass weiterhin und theoretisch Proteine gebildet werden können – wenn denn die technologisch codierte DNA ihren Weg in einen Organismus findet. *Xenodigital* geht folglich über das Codieren zwischen zwei diskreten Zustände hinaus. Denn der Binärcode wird hierbei nicht lediglich transformiert, sondern hat im gleichen Moment Auswirkung auf das ‚Programm‘ Vererbung. Diese Eigenschaft ist vermutlich einmalig innerhalb der Speichertheorie und Medienwissenschaft.

¹⁶⁴ Vgl. Wallace 1978, S. 265ff; vgl. Taylor Clelland *et al.* 1999, S. 533f.

¹⁶⁵ Vgl. Goldman *et al.* 2013a, S. 2.

¹⁶⁶ Vgl. Mohiuddin *et al.* 2014.

¹⁶⁷ Korrekterweise müsste es *Xenotransdigital* heißen, da das ‚Digital‘ auf die DNA übertragen (lat. *trans-* = hinüber) wird. *Xenodigital* klingt meiner Meinung nach jedoch deutlich eingängiger.

Ausklang

Es wurde gezeigt, dass die Basis des Speicherverfahrens von Church *et al.* auf der Logik des Computers beruht, da der Binärcode das ‚Ausgangsmaterial‘ darstellt. Der speicherprogrammierte Digitalcomputer dominiert folglich den Speicherprozess, im Gegensatz zu beispielsweise Taylor Clelland *et al.*

Meiner Meinung nach – und mit einem medienarchäologischen Blick – stellt das Verfahren nach Church *et al.* eine Sackgasse dar. Dabei verweise ich an Edison und seine primäre Vorstellung, dass die eigentliche Verwendung des Phonographen in der Funktion des Diktiergeräts läge. Die Geschichte zeigt jedoch, dass dieses Medium am Ende seinen Platz in der Unterhaltungsbranche fand.¹⁶⁸

Ähnliches zeichnet sich bei der Speichermethode von Church *et al.* ab. Dabei stellt die lange Halbwertszeit der DNA den einzig positiven Effekt dar. Ansonsten ist diese Methode zeitintensiv und im Vergleich zu gegenwärtigen sowie etablierten Verfahren, beispielsweise dem Flashspeicher, ebenso kostspielig wie umständlich. Des Weiteren übergeht sie die eigentliche Programmatik der Vererbung. Folglich sehe ich in den Ansätzen von beispielsweise Wallace ein höheres Potenzial für die Entwicklung einer neuen ‚Technologie‘ – wenn das denn nötig ist. Dabei muss man sich jedoch von der Logik des Computers verabschieden.¹⁶⁹ Denkbar wäre dann beispielsweise die Programmierung von Bakterien via CRISPR-Cas, die vielleicht eines Tages als autonom-reproduzierender Rohstoff in anderen Gebieten der Wissenschaft von Bedeutung werden. Nichtsdestotrotz ließen sich mit dieser Arbeit neue medienwissenschaftliche Erkenntnisse formulieren, wie etwa das *Xenodigital*.

¹⁶⁸ Vgl. Friedrich 2018.

¹⁶⁹ Eine ethische Auseinandersetzung gehört ebenso dazu.

Literaturverzeichnis

Literatur

- Avery, Oswald T. / Colin M. MacLeod/ Maclyn McCarty, „Studies on the Chemical Nature of the Substance Inducing Transformation of Pneumococcal Types. Induction of Transformation by a Desoxyribonucleic Acid Fraction Isolated from Pneumococcus Type III“, in: *J. Exp. Med.* Vol. 79(2) (1944), S. 137–158.
- Baudrillard, Jean, *Der symbolische Tausch und der Tod*, München: Matthes & Seitz, 1991.
- Church, George M./ Yuan Gao/ Sriram Kosuri, „Next-Generation Digital Information Storage in DNA“, in: *Science* Vol. 337 (16.08.2012a), S. 1628.
- Clelland, Catherine Taylor/ Viviana Risca/ Carter Bancroft, „Hiding messages in DNA microdots“, in: *Nature* Vol. 399 (10.06.1999), S. 533–534.
- Coy, Wolfgang, *Aufbau und Arbeitsweise von Rechenanlagen. Eine Einführung in Rechnerarchitektur und Rechnerorganisation für das Grundstudium der Informatik*, Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1988.
- Davis, Joe, „Microvenus“, in: *Art Journal* Vol.55/1 (1996), S. 70–74.
- Doudna, Jennifer/ Samuel Sternberg, *A Crack in Creation. The New Power to Control Evolution*, London: Vintage, 2018.
- Drew, Donald A., „A Mathematical Model for Prokaryotic Protein Synthesis“, in: *Bulletin of Mathematical Biology* 63 (2001), 329–351.
- Erlich, Yaniv / Dina Zielinski, „DNA Fountain enables a robust and efficient storage architecture“, in: *Science* 355 (2017), S. 950–954.
- Ernst, Wolfgang, *Im Namen von Geschichte. Sammeln – Speichern – Er/Zählen; infrastrukturelle Konfigurationen des deutschen Gedächtnisses*, Habil.-Schr. an der Humboldt Uni. z. Berlin (1998), München: Fink, 2003.
- Ernst, Wolfgang, „Den A/D-Umbruch aktiv denken. Medienarchäologisch, kulturtechnisch“, in: *Analog/Digital - Opposition oder Kontinuum?: Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung*, hrsg. v. Jens Schröter u. Alexander Böhnke, Transcript: Bielefeld, 2004, S.49–65.
- Ernst, Wolfgang, *Gleichursprünglichkeit. Zeitwesen und Zeitgegebenheit von Medien*, Berlin: Kulturverl. Kadmos, 2012 (Berliner (Programm) einer Medienwissenschaft, Bd. 11).
- Ernst, Wolfgang, „'Electrified Voices'. Non-Human Agencies of Socio-Cultural Memory“, in: *Memory in Motion. Archives, Technology, and the Social*, hrsg. von Ina Blom/ Trond Lundemo/ Eivind Røssaak, Amsterdam: Amsterdam University Press, 2016, S. 41–59.

- Ernst, Wolfgang, „Das Wissen von Medien und seine techno-logische Erdung. Zum Geleit“, in: *Medientechnisches Wissen. Band 1: Logik, Informationstheorie*, hrsg. von Stefan Höltgen, Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2018, S. 5–12.
- Goldman, Nick *et al.*, „Towards practical, high-capacity, low-maintenance information storage in synthesized DNA“, in: *Nature* Vol. 494 (2013b), S. 77– 80.
- Graw, Jochen, *Genetik*, Berlin; Heidelberg: Springer Spektrum, 2015.
- Huhtamo, Erkki/ Jussi Parikka, „Introduction. An Archaeology of Media Archaeology“, in: *Media Archaeology. Approaches, Applications, and Implications*, hrsg. v. Erkki Huhtamo und Jussi Parikka, Berkeley, Calif.: University of California Press, 2011, S. 1–21.
- Jacob, François, *Die Logik des Lebenden. Von der Urzeugung zum genetischen Code*, Frankfurt a. M. : S. Fischer, 1972.
- Kay, Lily E., *Das Buch des Lebens. Wer schrieb den genetischen Code?*, München / Wien: Carl Hanser Verl., 2001.
- Knippers, Rolf, *Eine kurze Geschichte der Genetik*, Berlin: Springer, 2017.
- Miyazaki, Shintaro, *Algorithmiert. Eine Medienarchäologie digitaler Signale und (un)erhörter Zeiteffekte*, Berlin: Kulturverl. Kadmos, 2013 (Berliner (Programm) einer Medienwissenschaft, Bd. 12).
- Mohiuddin *et al.*, Muhammad M., „Genetically engineered pigs and target-specific immunomodulation provide significant graft survival and hope for clinical cardiac xenotransplantation“, in: *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* Vol. 148/3 (2014), S. 1106–1114.
- Neiman, Mikhail S., „Einige grundlegende Fragen der Mikrominiaturierung“, in: *Radiotekhnika* Vol. 19/1 (1964), S. 3–12, aus dem Russ. übersetzt (ohne Gewähr) via: <https://www.deepl.com>.
- Rechenberg, Peter, *Was ist Informatik? Eine allgemeinverständliche Einführung*, München/ Wien: Hanser, 2000.
- Schrödinger, Erwin, *Was ist Leben? Die lebende Zelle mit den Augen des Physikers betrachtet* (1944), Berlin/ München: Piper, 2017.
- Schwedt, Georg, *Die Chemie des Lebens*, Weinheim: Wiley-VCH-Verl., 2011.
- Shannon, Claude E. *Ein – Aus. Ausgewählte Schriften zur Kommunikations- und Nachrichtentheorie*, hrsg. von Friedrich A. Kittler, Berlin: Brinkmann und Bose, 2000.
- Shipman, Seth L. *et al.*, „CRISPR–Cas encoding of a digital movie into the genomes of a population of living bacteria“, in: *Nature* Vol. 547 (2017), S. 345–349.
- Taylor Clelland, Catherine/ Viviana Risca/ Carter Bancroft, "Hiding messages in DNA microdots", in: *Nature* Vol. 399 (10.06.1999), S. 533–534.

Ulmann, Bernd, „Man in the Loop – Zeitaspekte in analogen Simulationen und Spielen“, in: *Time to Play: Zeit und Computerspiel*, hrsg v. Stefan Höltgen & Jan Claas van Treeck, Glückstadt: vwh, 2016, S.95–119.

Völz, Horst, *Wissen-Erkennen-Information. Allgemeine Grundlagen für Naturwissenschaft, Technik und Medizin*, Aachen: Shaker, 2001.

Völz, Horst, *Handbuch der Speicherung von Information. Band 1: Grundlagen und Anwendung in Natur, Leben und Gesellschaft*, Aachen: Shaker, 2003.

Völz, Horst, „Teil II: Informations- und Speichertheorie“, in: *Medientechnisches Wissen. Band 1: Logik, Informationstheorie*, hrsg. von Stefan Höltgen, Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2018, S. 150–282.

Waldruff, Thomas, *Digitale Bildauflösung. Grundlagen, Auflösungsbestimmung, Anwendungsbeispiele*, Berlin/ Heidelberg: Springer, 2004.

Wallace, M.R., „Molecular Cybernetics. The Next Step?“, in: *Kybernetes* Vol. 7/4 (1978), S. 265–268.

Watson, James D. & Francis H. C. Crick, „Molecular Structure of Nucleic Acids. A Structure for Desoxyribose Nucleic Acid“, in: *Nature* 171 (25.04.1953), S. 737–738.

Wiener, Norbert, *Kybernetik. Regelung und Nachrichtenübertragung in Lebewesen und Maschine*, Reinbek b. Hamburg: Rowohlt, 1968.

Online-Quellen

Bornholt, James *et al.*, „A DNA-Based Archival Storage System“, veröffentlicht am 19.02.2016 durch: *University of Washington*, URL: <https://homes.cs.washington.edu/~luisceze/publications/dnastorage-asplos16.pdf> (28.08.2018).

Friedrich, David, *PAY. PLAY. REPEAT. Die medienkulturelle Zeitgestalt des Münzphonographen in den USA, 1889–1896*, Bachelor-Arbeit an der Humboldt Uni. z. Berlin 2018, URL: <http://edoc.hu-berlin.de/18452/20280> (Stand: 04.11.2018).

Church, George M./ Yuan Gao/ Sriram Kosuri, „Supplementary Materials for ‚Next-Generation Digital Information Storage in DNA‘“, veröffentlicht durch *Science* am 16.08.2012b, URL: <http://science.sciencemag.org/content/suppl/2012/08/15/science.1226355.DC1> (Stand: 02.01.2019).

Goldman, Nick *et al.*, „Supplementary Information 1 for ‚Towards practical, high-capacity, low-maintenance information storage in synthesized DNA‘“, veröffentlicht durch *Nature* am 14.02.2013a, URL: <https://media.nature.com/original/nature-assets/nature/journal/v494/n7435/extref/nature11875-s1.pdf> (Stand: 03.01.2019).

Pommerening, Klaus, „FAQ zur Kryptologie-Vorlesung“, veröffentlicht durch das *Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik* an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz am 24.10.2007, URL: <https://www.staff.uni-mainz.de/pommeren/Kryptologie/FAQ.html> (Stand: 28.01.2019).

Sample, Ian, „Harvard scientists pioneer storage of video inside DNA. Transfer of Eadweard Muybridge’s galloping horse opens possibility of using living cells to store information“, veröffentlicht durch *The Guardian* am 13.07.2017, URL: <https://www.theguardian.com/science/2017/jul/12/scientists-pioneer-a-new-revolution-in-biology-by-embedding-film-on-dna> (Stand: 04.01.2019).

Shannon, Claude E., *An algebra for theoretical genetics*, Dissertation am Department of Mathematics des MIT (1940), bereitgestellt durch DSpace@MIT, URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/11174#files-area> (Stand: 29.01.2019)

Synthetische Biologie (Website der MPG), „DNA und Genome herstellen“, veröffentlicht durch: *Max-Planck-Gesellschaft* (München), URL: <https://www.synthetische-biologie.mpg.de/6491/dna-und-genom-herstellen> (Stand: 31.08.2018).

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 „Watson-Crick-Modell“, in: Grundstruktur der DNA, veröffentlicht durch *D. Hannemann*: URL: https://dieterhannemann.de/lehre/NatWis_Demo/content/03biochem/0320biogrund/bilder/032020doppelhelix.gif (Stand: 21.01.2019).
- Abb. 2 „Der vermeintliche genetische Code“, in: Kay, Lily E., *Das Buch des Lebens. Wer schrieb den genetischen Code?*, München / Wien: Carl Hanser Verl., 2001, S. 21.
- Abb. 3 „Schematische Darstellung der DNA-basierten Speicherung“, in: George M. Church, Yuan Gao, Sriram Kosuri, „Supplementary Materials for ‚Next-Generation Digital Information Storage in DNA‘“, veröffentlicht durch *Science* am 16.08.2012, URL: <http://science.sciencemag.org/content/suppl/2012/08/15/science.1226355.DC1> (Stand: 02.01.2019).
- Abb. 4 „Untersuchung von magnetischen Strukturen auf Datenträgern (FDD)“, veröffentlicht durch: *Matesy GmbH*, URL: <https://www.matesy.de/images/products/mobjektiv-fdd-575x250.png> (Stand: 08.12.2018).