

JOHN HAUGELAND

ANALOG UND ANALOG*

Als ich (vor Jahren) mit diesem Aufsatz begann, befasste ich mich mit der kühnen Behauptung, dass jeder Analogrechner bis zu jedem gewünschten Präzisionsgrad digital simuliert werden könne. Dabei jedoch bemerkte ich, dass die Definitionen von ‚digital‘ und ‚analog‘ selbst tückisch und interessant sind; ihnen widmet sich nun der Hauptteil dieses Aufsatzes. Gleichwohl kehrt die Ausgangsproblematik am Ende des Textes wieder; ihre Lösung führt auch zur Unterscheidung engerer und weiterer Bedeutungen von ‚analog‘ – daher der eigentümliche Titel meines Aufsatzes.

1. Digital

Definitionen von Begriffen wie ‚analog‘ und ‚digital‘ werden zunächst von beispielhaften Fällen geleitet sowie von den unmittelbaren Erkenntnissen darüber, was diesen Fällen gemein ist. In letzter Instanz jedoch sollte eine Definition mehr als nur passend zu den intuitiven Tatsachen sein: Sie sollte vielmehr zeigen, dass die Fälle, die herangezogen werden, Beispiele von theoretisch interessanter, allgemeiner Art sind und den grundlegenden Hauptbestandteil des theoretischen Interesses hervorheben. Eine ideale Definition macht deutlich, warum die Definition des zur Diskussion stehenden Begriffs der Mühe wert ist. Dieser Idealität kann man sich in Bezug auf ‚digital‘ eher annähern als in Bezug auf ‚analog‘.

Standardbeispiele für digitale Vorrichtungen sind arabische Zahlenzeichen, der Abakus, Alphabete, Elektroschalter, Notenschrift, Spiel-

* Anm. d. Hrsg.: Wir danken John Haugeland und der University of Arkansas Press (Christopher Hill), die den Aufsatz als „Analog and Analog“ in: *Philosophical Topics*, Jg. 12 (1981) S. 213-225 erstmalig abdruckte, für die Genehmigung zum Wiederabdruck und zur Übersetzung.

marken und (digitale) Rechner.¹ Was ist an diesen Fällen wichtig und zeichnet sie aus? Es fallen einige Gemeinsamkeiten auf:

1) Bei allen ist fehler- und verlustfreies Kopieren (und Bewahren) möglich. Keine Kopie eines Gemäldes, zum Beispiel von Rembrandt, kommt dem Original ästhetisch gleich; darüber hinaus verfallen diese Gemälde langsam. Im Gegenzug gibt es Millionen vollkommener Kopien von den (meisten) Sonetten Shakespeares, die Sonette selbst aber verfallen nicht. Der Unterschied besteht darin, dass ein Sonett durch eine Buchstabenfolge bestimmt wird, und Buchstaben leicht reproduzierbar sind, weil kleine Kleckse und Schnörkel hierbei nichts ausmachen. Das gleiche gilt für Partituren, Spielmarkenstapel usw.

2) Interessante Fälle tendieren zu Komplexität: Etwa Zusammensetzungen, die aus einem Satz standardisierter Komponenten bestehen – so etwa Moleküle aus Atomen. Komplexität kann auch diachron erscheinen; in diesem Fall sind die standardisierten Komponenten eigentlich standardisierte Schritte oder ‚(Spiel-)Züge‘, die ein sequenzielles Muster bilden. So reichen zum Beispiel nur zehn standardisierte Ziffernvarianten sowie Vorzeichen und Komma aus, um jedes beliebige arabische Zahlzeichen schreiben zu können; darüber hinaus reicht eine Schrittsequenz mit wenigen standardisierten Elementen aus, um jegliche Multiplikation in dieser Notation zu ermöglichen. Auf ähnliche Weise kann das komplizierteste Netzwerk aus den schlichtesten Relais gebaut sein; auch bestehen die Partituren aller klassischen Symphonien aus der gleichen Handvoll grundlegender Symbole.

3) In unterschiedlichen Medien können genau gleichwertige Strukturen vorkommen. So könnten die Sonette kursiv gesetzt, in Stein gemeißelt, in Blindenschrift geprägt oder per Morsezeichen übertragen werden – und nichts ginge verloren. Das gleiche Rechnerprogramm kann über Vakuumröhren oder Halbleiter-Hardware ausgeführt werden; als Spielmarken können Plastikscheibchen, getrocknete Bohnen oder Streichhölzer fungieren.

Entsprechend nenne ich diese Eigenschaften *Kopierbarkeit*, *Komplexität* und *Medienunabhängigkeit*. Die Frage ist: Was ist ihre gemeinsame Voraussetzung? Welchen gemeinsamen Ursprung haben sie?

1 Ich greife auf den unverfänglichen Begriff ‚device‘ zurück, da jeder genauere Begriff falsch zu sein scheint; da (wie die Liste zeigt) nicht alles, was digital ist, eine Darstellung, ein Prozess, ein Rechner, eine Maschine oder was auch immer ist. In dem Begriff ‚device‘ [der in dieser Übersetzung mit ‚Vorrichtung‘ wiedergegeben wird, Anm. d. Übers.] sollte auch die Implikation von Planung oder Erfindung ignoriert werden, denn manche biologischen Systeme können digital sein.

Alle digitalen Vorrichtungen arbeiten mit einer Form des *Schreibens* und des anschließenden *Lesens* verschiedener *Tokens* bestimmter *Types*. Das heißt, es gibt Verfahren² zur Herstellung von Tokens – die Types, denen sie entsprechen, vorausgesetzt – und Verfahren, um die Types gegebener Tokens zu benennen oder zu bestimmen. Wenn man zum Beispiel mit einem Bleistift auf weißem Papier eine einzelne Inskription des Buchstabens ‚A‘ vornimmt, so ist dies eine Weise, einen Token dieses alphabetischen Types zu schreiben, der dann vom Auge gelesen werden kann. Aber auch wenn ein Schalter in einer bestimmten Position einrastet, ist dies eine ‚Schreib‘-weise eines Token in diesem Kontext (Type), und dieser Token kann dadurch ‚gelesen‘ werden, dass man feststellt, welcher von den angeschlossenen Schaltkreisen nun unter Strom steht. Diese Beispiele machen deutlich, dass die Tokens keineswegs Symbole sein *müssen* (d.h., sie müssen weder etwas darstellen noch bedeuten) und dass Schreiben und Lesen hier verallgemeinert werden, um alle Fälle des Erstellens und Erkennens relevanter Tokens abzudecken. Eine Vorrichtung erweist sich aber erst dann als digital, wenn eine Besonderheit hinsichtlich der Schreib- und Leseverfahren eingehalten wird; diese müssen ‚sicher‘³ und ‚zuverlässig‘ sein. Ein *sicheres Verfahren* kann nur absolut und ohne jegliche Klassifizierung erfolgreich sein – d.h. nicht nur bis zu einem hohen Grade, mit erstaunlicher Präzision, oder fast vollständig, sondern nur vollkommen und hundertprozentig! Ob etwas ein sicheres Verfahren ist, hängt natürlich davon ab, was man als Erfolg ansieht. Ein Auto (auf normale Art und Weise) in die Garage einzuparken, ist ein sicheres Verfahren, wenn als Erfolg gilt, dass Fahrzeug irgendwie hineinzubekommen; wenn aber ein vollkommener Erfolg darin besteht, den Wagen ganz genau zwischen den Wänden zu zentrieren, dann gibt es kein Einparkverfahren, das sicher sein kann. Es gibt kein sicheres Verfahren, ein Brett auf zwei Meter Länge zu schneiden, aber viele, wenn man es auf zwei Meter mit einer Abweichung von fünf Zentimetern nach oben und unten bringen will. Dass etwas ‚erfolgreich sein kann‘, bedeutet, dass es durchführbar ist, was von der jeweiligen Technologie und den zur Verfügung stehenden Mitteln abhängt. Wir müssen uns aber über die Grenzen der Durchführbarkeit keine Gedanken machen, denn uns beschäftigen nur die Verfahren, die auch *zuverlässig* sind – also solche, die, unter geeigneten Umständen, praktisch jedes Mal als erfolgreich gewertet werden können. Wenn Technologie

2 Je nach konkretem Kontext wird der für diesen Text zentrale Begriff ‚procedure‘ mit *Verfahren* oder *Vorgang* wiedergegeben [Anm. d. Übers.].

3 Mit *sicher* wird der Begriff ‚positive‘ wiedergegeben [Anm. d. Übers.].

und Mittel vorhanden sind, sind sichere Verfahren gewissermaßen ‚einfach‘, oder zumindest haben sie sich durchgesetzt und sind zur Routine geworden.

Was gilt als Erfolg für Schreib- und Leseverfahren? Offensichtlich, dass der Schreibvorgang tatsächlich ein Token des verlangten Types erstellt, und dass der Lesevorgang den Type des vorliegenden Token korrekt identifizieren kann. Doch diese Vorgänge laufen nicht unabhängig voneinander ab, da sie normalerweise gemeinsam als Arbeitsdefinition der Types fungieren – was als Inskription des Buchstabens ‚A‘ zählt, ist dadurch festgelegt, dass Schreibende es als solches erstellen und Lesende es als solches erkennen. Die wesentliche Einschränkung besteht hierbei darin, dass beides das Gleiche ist, oder genauer: Was immer auch die Schreibenden erstellen, die Lesenden müssen es korrekt erkennen, und nichts anderes darf von diesen Lesenden erkannt werden. Mit anderen Worten: Diese Anforderung bezieht sich wirklich auf die gemeinsame ‚Rundreise‘ der Schreib-/Leseverfahren zuzüglich der Festlegung der entsprechenden Umweltbedingungen. Zudem ist eine Art von ‚Spiel‘ in der Strenge der verschiedenen Abschnitte dieser Rundreise; wenn etwa die Schreibvorgänge sehr genau sind und die entsprechenden Bedingungen eine sehr saubere, ‚rauschfreie‘ Umwelt gewähren, reicht es, wenn die Lesevorgänge ziemlich lax sind usw.

Eine digitale Vorrichtung können wir somit definieren als:

- (i) Ein Set von Types,
- (ii) ein Set von möglichen Schreib- und Leseverfahren für Tokens dieser Types, sowie
- (iii) eine Festlegung der entsprechenden Betriebsdaten, so dass,
- (iv) unter diesen Bedingungen die Verfahren für den Schreib-Lese-Zyklus sicher und zuverlässig sind.

Zu beachten ist, dass die Erfolgsbedingung, geschriebene Tokens korrekterweise so zu lesen, wie sie geschrieben worden sind (und nichts anderes daraus gelesen werden kann), indirekt verlangt, dass kein Token ein Token für mehr als einen bestimmten Type sein darf; dies bedeutet, dass die Types nicht zusammenhängen dürfen und daher nur eine Relation ‚vom gleichen Type‘ eine Äquivalenzrelation darstellen darf.

Jetzt, wo die Definition gegeben wurde, möchte ich fünf Folgerungen daraus ziehen, die das Problem etwas deutlicher und die tieferen Beweggründe dieser Definition sichtbar machen sollten.

1) Dass digitale Vorrichtungen die Eigenschaft der Kopierbarkeit haben, ist leicht zu erklären; tatsächlich beinhaltet diese Definition bei-

nahe eine komplette Aussage darüber, was diese Eigenschaft ist. Das Original kann sicher und zuverlässig gelesen werden; und diese Lesevorgänge (Identifizierungen von Typen) können einfach und direkt als Anweisungen für die nächste Token-, Runde‘ fungieren. Die neuen Tokens können gleichfalls sicher und zuverlässig sein und sind somit dasselbe wie die Originale, in dem Sinne, dass ihre Typen identisch sind – es handelt sich somit um eine *vollkommene* Kopie.

2) (Nicht-verderbte) ‚Digitalität‘ ist nicht ubiquitär. Man hört oft, dass Systeme nur ‚in bezug auf Beschreibungen‘ digital seien; und zu oft wird daraus geschlossen, dass jeder beliebige Gegenstand als digitales System ausgedeutet werden könne; freilich bezogen auf *irgendeine* abwegige (aber wahre) Beschreibung. ‚Digital sein‘ hat keinen größeren Bezugswert als ‚eine Fuge sein‘ oder ‚ein Verstärker sein‘. Zugestanden, die Types und Vorgänge (wie ein musikalisches Thema oder die Ein- und Ausgänge eines Verstärkers) müssen festgelegt werden, bevor die Definition greift; doch ob es solch eine Festlegung gibt, laut welcher die Definition tatsächlich erfüllt ist, ist keinesfalls Sache eines (konstruierten) Bezugs noch ist es trivial oder geschieht automatisch.

3) Unsere Definition unterscheidet sich von der Nelson Goodmans (durch den sie freilich weitgehend angeregt wurde) in zwei maßgeblichen Punkten. Er sagt eigentlich, dass ein nicht zusammenhängendes Set von Types nur in einem Fall digital ist: ‚Anhand eines beliebigen fraglichen Token und *anhand wenigstens eines* beliebigen Type-Paars [oder Gegenstücks] (in einem Set), ist es theoretisch möglich zu belegen, dass der fragliche *kein* Token dieses Types ist.⁴ Mit anderen Worten: Für jeden beliebigen fraglichen Token gilt, dass alle bis auf einen Type mit Sicherheit ausgestrichen werden können (anhand einer theoretisch möglichen Methode) – kein Token kann jemals zweideutig zwischen zwei Types stehen.

Dies kann man am besten anhand von Beispielen erklären. Nehmen wir an, die Tokens wären mit Bleistift gezogene Liniensegmente, die kürzer als 30 cm sind; L_x sei die Länge des Segments x (in cm), n sei

4 Vgl. Goodman, Nelson: *Sprachen der Kunst*, Frankfurt a.M. 1995, S. 133/134 und 154/155. Wir geben hier eine Umschreibung seiner Definition einer ‚syntaktisch endlichen Differenzierung‘ in unserer Terminologie wieder; diese ist seine notwendige Bedingung für ein digitales *Schema*. Er hat auch einen festeren Begriff eines digitalen *Systems*, das sich ähnlichen Bedingungen in Hinsicht auf seine Semantik ausgesetzt sieht (S. 147/148 und 154/55). Den letzteren Punkt berücksichtige ich nicht, da meiner Meinung nach digitale Vorrichtungen nicht notwendigerweise darstellend oder symbolisch sein müssen.

ganzzahlig. Wir können dann vier unterschiedliche Systeme in Gleichungen festlegen; diese enthalten die folgenden vier Bedingungen für zwei Liniensegmente, die als Tokens des gleichen Types fungieren:

- (a) $Lx = Ly$ (jeder Längenunterschied ist ein Type-Unterschied);
- (b) $n < Lx, Ly < n+1$ (die Segmente sind vom gleichen Type, wenn deren Längen zwischen die gleichen aufeinander folgenden Zentimetermarken fällt);
- (c) $n + \frac{1}{2} < Lx, Ly < n+1$ (wie oben, außer dass Segmente zwischen einer Zentimetermarke und der nächsthöheren Halbzentimetermarke ‚ungestalt‘ sind – d.h.: keine Tokens eines Type sind); und
- (d) $Lx = Ly = n$ (wie (a), außer dass nur Segmente akzeptiert werden, die eine genaue ganzzahlige Länge haben – alle anderen sind ungestalt).

Das erste System ist nicht digital, denn egal welche (theoretisch mögliche) Messmethode man auch anwenden würde, gäbe es immer unendlich viele Types, zu denen ein gegebener Token gehören könnte, so weit man das freilich sagen kann. Ähnliches gilt für (b), nur dass hier die Problemfälle lediglich die Segmente sind, die einer ganzzahligen Länge sehr nah kommen; es können nur zwei Types nicht ausgestrichen werden. (c) ist das Musterbeispiel einer digitalen Vorrichtung (vorausgesetzt, dass man mit einer Genauigkeit von einem Viertelzentimeter messen kann).

Der letzte Fall bereitet Kopferbrechen; nach Goodmans Kriterien ist er digital, aber es fehlt das Merkmal der Kopierbarkeit – und dies aus zwei Gründen. 1) Selbst wenn es entsprechende Tokens geben würde, könnten sie als solche – als den ungestalten ‚Kritzeleien‘ (Rauschen) entgegengesetzt – nicht erkannt werden; und 2) es könnten niemals genau gleiche Tokens hergestellt werden (außer durch einen wundersamen Zufall). Beide Fehler können unter der Bedingung behoben werden, dass der Lese-Schreib-Zyklus sicher (und zuverlässig) ist.

Auf den zweiten Unterschied zwischen unserer und Goodmans Definition wurde bereits hinsichtlich des möglichen ‚Spiels‘ hingewiesen. In der Digitalelektronik ist es gängige Praxis Impulsdetektoren zu konstruieren, die bei Signalen über 2,5 Volt nach oben und bei darunter liegenden Signalen nach unten ausschlagen. Da dies ein scharfer Schwellenwert ist, der zudem von Bauteil zu Bauteil oder von Moment zu Moment nicht einmal beständig ist, kann mit diesen Detektoren kein Tokenschema im Sinne Goodmans bestimmt werden. Für die Ingenieure wird die Lage dadurch gerettet, dass ein *Impulsgenerator* nur Signale erzeugt, die sehr nahe an 0 bzw. 5 Volt liegen, und die ganze Anlage gut gegen atmosphärische Störungen abgeschirmt werden kann, so dass die

Detektoren niemals wirklich durcheinandergebracht werden. Es ist wiederum ein definitorisches Mittel, den Schreib-Lese-Zyklus hinsichtlich seiner Umweltbedingungen in den Blick zu nehmen. Aber ich denke, dass dies breiter diskutiert werden kann. Indem Goodman seine Bestimmungen als allein ‚theoretisch möglich‘ charakterisiert, ohne die Bestimmungsvorgänge zu erwähnen, geschweige denn die Produktionsabläufe oder die Arbeitsbedingungen, verrät er die Abscheu des Mathematikers gegenüber der kleinteiligen Kniffligkeit von Geräten, die *funktionieren* sollen. Aber ‚digital‘ ist – wie ‚exakt‘, ‚wirtschaftlich‘ oder ‚dauerhaft‘ – vom Scheitel bis zur Sohle ein diesseitiger Ingenieursbegriff. Dieser Begriff macht nur Sinn als praktisches Hilfsmittel, um mit den Unwägbarkeiten und der Unbeständigkeit, dem Lärmen und dem Treiben irdischer Existenz klarzukommen. Die Definition sollte diese Eigenschaften widerspiegeln.

4) Meine vierte Folgerung ist eine Antwort auf David Lewis und umfasst einige Kommentare zum Thema Komplexität. Lewis nennt ein Gegenbeispiel zu Goodman, das, wenn es überhaupt funktionieren würde, ebenfalls ein Gegenbeispiel zu unserer Sicht der Dinge wäre.⁵ Man stelle sich vor, Zahlenwerte würden durch variable Widerstände dargestellt – eine Einstellung von $137\ \Omega$ stelle die Zahl 137 dar usw. Man nehme weiterhin an, das Potentiometer bestehe aus einem Drehschalter und vielen einzelnen 1Ω -Widerständen, so dass bei der Schalterstellung ‚137‘ 137 Widerstände in Serie geschaltet sind und einen Gesamtwiderstand von $137\ \Omega$ ergeben. Dies sei, laut Lewis, eine analoge (und somit nicht digitale) Darstellung, so als bestünde dieses Potentiometer aus einem Gleitkontakt, der sich sanft an einem Kupferdraht entlangbewegte und gleichen Widerstand bei gleicher Längeneinheit erwarten ließe. Da jenes Potentiometer aber über eine Einrastfunktion verfügt, behauptet er, dass es von Goodman (fälschlicherweise) als digital klassifiziert würde.

Ich denke, dieser Fall ist nicht genau genug beschrieben. Wenn man annimmt, dass die Werte [representations] an einem Ohmmeter abgelesen werden, dann müssen wir wissen, wie genau dieses Messgerät ist, wie präzise und stabil die einzelnen 1Ω -Widerstände sind, und welche Gesamtzahl an Schalterpositionen es gibt. Wenn es tausend Positionen gibt und Messgerät und Widerstände nur zu einem Prozent nicht

5 Vgl. Lewis, David: „Analog and Digital“, in: *Nous*, Jg. 5 (1971) S. 321-327, hier S. 322. Er nennt eigentlich zwei Gegenbeispiele, aber sie gehen auf denselben Grundgedanken zurück; so beschäftigen wir uns nur dem mit einfacheren.

in Ordnung sind, dann ist das Gerät sicherlich nicht digital – gleichgültig, ob es nun analog ist oder nicht; es genügt weder Goodmans noch unseren Bedingungen. Wenn es andererseits nur 200 Positionen gibt und Messgerät und Widerstände zu einem Promille nicht in Ordnung sind, dann entspricht das Gerät sowohl Goodmans als auch unseren Bedingungen. Aber ich denke, es ist eindeutig digital – genauso wie ein Stapel von Silberdollars, auch wenn der Croupier sie ihrer Höhe nach ‚zählt‘.

Doch Lewis will noch auf eine andere Sache hinaus. Er erwähnt „die vielen Zusammenstellungen von Werten“⁶, die möglich werden, verwendet man verschiedene Parameter zusammen.

So könnte beispielsweise jede beliebige ganze Zahl bis zu 1.000.000 durch eine Reihe von sechs Schaltern dargestellt werden, wenn jedem Schalter zehn Positionen zukommen – und dies gilt auch für die simpelsten Gerätschaften. Dies ist ein Sonderfall des Merkmals der Komplexität; Lewis nennt es ‚Multidigitalität‘ und schlägt es als zusätzliche mögliche Bedingung für eine digitale Darstellung vor. Um diesen Vorschlag einzuschätzen, sollten wir uns ansehen, wie sich die Bedingung der Multidigitalität (Komplexität) zu den anderen, ob nun Goodmans oder unseren, Bedingungen verhält.

Erwägen wir zwei ähnliche Darstellungssysteme von Einsätzen bei einem Pokerspiel. Bei jedem kommen unterschiedlich gefärbte Tokens für unterschiedliche Nennwerte zum Einsatz; Rot ist zehnmal, Blau einhundertmal mehr wert als Weiß. Aber bei dem einen System sind die Tokens standardisierte farbige Scheibchen („Marken“), bei dem anderen sind es abgemessene Mengen von farbigem Sand, von dem ein Esslöffel voll z.B. einer Spielmarke entsprechen könnte. Obwohl beide Systeme in Lewis’ Sinne multidigital sind, ist die Komplexität in Bezug auf den Sand albern und nutzlos. Nehmen wir an, die Spieler könnten die Mengen mit einer Abweichung von 2% abmessen, und stellen wir uns vor, der Einsatz läge bei 325 Einheiten. Das wäre Irrsinn! Die erwartbare Abweichung hinsichtlich des blauen Sands (etwa die Körner, die am Löffel haften blieben) wäre wertvoller als fünf volle Löffel weißen Sands. Im Gegensatz dazu kann ein Stapel mit drei blauen Chips sicher und zuverlässig gezählt werden (ohne jegliche Fehlerabweichung); so können auch die weißen Chips in ihrem Wert nicht untergraben werden und ihren Zeichenwert zur Gänze behalten.

Natürlich würde Lewis den Pokersand ebenso wenig für digital halten wie wir: Seine Multidigitalität ist eine *weitere* Bedingung und keine Alternative. Das Beispiel zeigt aber, dass Multidigitalität sich nur

6 Lewis: „Analog and Digital“ (Anm. 5), S. 326.

in Systemen auszahlt, die bereits in unserem Sinne digital sind – in dem Sinne nämlich, in dem auch Spielmarken selbst dann noch digital wären, wenn sie alle dieselbe Farbe hätten. Daraus kann man schließen, dass unsere Definition bereits das grundlegende Phänomen erfasst und dass komplexe Systeme nur wichtige Sonderfälle sind, die durch die zugrunde liegende Digitalität überhaupt erst ermöglicht werden. Wir betrachten das Merkmal der Komplexität nicht als wesentlich für die Einschätzung, ob eine Vorrichtung digital ist – *wenn* überhaupt, gilt dieses Abhängigkeitsverhältnis umgekehrt.

In Anbetracht komplexer Types ist es notwendig, dass nicht nur die sie bildenden Type-,Atome‘ digital sind, sondern auch die Arten ihrer Zusammenstellung. Die Wirkmächtigkeit arabischer Zahlzeichen z.B. erklärt sich nicht nur aus ihren zuverlässigen und sicheren Verfahren, einzelne Ziffern-Tokens zu schreiben und zu lesen, sondern genauso aus ihren zuverlässigen und sicheren Verfahren, diese von links nach rechts zu verknüpfen usw. Somit müssen auch syntaktische Strukturen selbst digitale Types sein. Und dies gilt gleichermaßen für diachrone Komplexität: Jeder einzelne ‚Schritt‘ (Umformung, Zug) muss das Token eines Types aus einem Set sein, dessen weitere zugehörige Tokens verlässlich und sicher hergestellt und erkannt werden können. Die Types in diesem Set können mit ausführbaren Befehlen, wie in Computer,sprachen‘, oder mit zulässigen Regeln, wie in logischen Herleitungen oder regelhaften Spielen wie Schach oder Dame, gleichgesetzt werden. Es dürfte klar sein, dass Komplexität in digitalen Vorrichtungen sehr weit über arithmetische (oder spielmarkenhafte) Multidigitalität hinausgeht, und dass mit der Kompliziertheit und Feinheit die entscheidende Abhängigkeit von zuverlässigen und sicheren Vorgängen erheblich zunimmt.

5) Meine fünfte Folgerung ist weiter nichts als eine Fußnote zum bereits Gesagten. Für digitale Vorrichtungen gilt, dass es am wichtigsten ist, Verwirrungen über die Zuordnung eines Types zu einem Token auszuschalten; der wichtigste Antrieb („das Ausschlaggebende“) ist hierbei die Fähigkeit, umfangreiche Komplexität handhabbar und zuverlässig zu halten. In solchen Fällen ist es immer die Komplexität selbst, d.h. die Struktur, die Form oder das Muster der komplexen Tokens und Vorgänge, auf die es ankommt; die digitalen Token-,Atome‘ sind nur Mittel zu diesem größeren Zweck. Somit würde auch jedes digitale Token-,Atom‘ ausreichen, das eine entsprechende Anzahl digitaler Zusammenstellungen und Umwandlungen zuließe. Da die gesamte zweckdienliche Struktur digital ist, wird ihr Ersatz nicht nur eine Formähnlichkeit aufweisen, sondern vielmehr vollkommen isomorph sein. (Die Shakespeare-

Sonette können mit Morsezeichen vollständig wiedergegeben werden.) Die gleichen Merkmale, die die Wiedergabe zuverlässig und sicher machen, machen auch die regelhaften Wandlungen zuverlässig und sicher. Präzise gesprochen nennen wir eine Vorrichtung digital, wenn sie komplexe Formen zuverlässig und sicher von Gegenständlichkeit/Materialität abstrahieren kann – dies ist das Merkmal der Medienunabhängigkeit.

2. Analog

„Analog“ kann im weiteren oder engeren Sinn verstanden werden; aber selbst eine analoge Vorrichtung letzterer Art beinhaltet ein bunt-scheckiges Durcheinander. Ich bin mir keineswegs sicher, ob eine befriedigende allgemeine Definition überhaupt möglich ist; dies läuft meines Erachtens darauf hinaus, zu bezweifeln, ob analoge Vorrichtungen wirklich eine gut definierte eigene Klasse darstellen. Standardbeispiele analoger Vorrichtungen sind Schieblehren, maßstäbliche Modelle, Regelwiderstände, Fotografien, lineare Verstärker, Fadenmodelle von Schienennetzen, Lautsprecher und elektronische Analogrechner. Wie für „digital“, können wir auch hier einige auffallende gemeinsame Merkmale ableiten; drei stechen hervor:

1) Veränderungen gehen sanft oder stetig vonstatten, ohne jegliche „Lücke“. Einrastfunktionen sind ausgeschlossen, ebenso verbotene Zwischenpositionen auf einer Schieblehre oder bei einem Regelwiderstand; Fotografien verfügen (in der Regel) über eine stetige Grauskala, die sich innerhalb zweier stetiger Dimensionen (Höhe und Breite) bewegt. Das stellt sich jeder zuerst intuitiv unter einem analogen System vor; anders als bei Schaltern, Abakussen oder alphabetischen Inskriptionen, ist jede (relevante) Einstellung oder Gestalt zugelassen – es gibt nichts Ungestaltetes.

2) Innerhalb der relevanten Veränderungen bedeutet jeder Unterschied auch einen Unterschied. Die kleinste Drehung eines Regelwiderstands etwa zählt als (kleine) Einstellungsveränderung; leichtes Verstellen verändert das Ausgangssignal eines Lautsprechers; ein fotografischer Abzug ist nicht vollkommen, wenn er etwas verschwommen, etwas dunkler oder etwas kontrastreicher ist. Dies ergänzt das vorherige Merkmal; es sind nicht nur alle *Variationen* erlaubt, jede von ihnen ist von Bedeutung (auch dies unterscheidet analoge Vorrichtungen von Schaltern, Abakussen oder Buchstaben).

3) Dennoch sind nur bestimmte „Dimensionen“ von Varianten relevant. Es ist gleichgültig, ob eine Schieblehre aus Metall oder Bambus

hergestellt wurde; auch ihre Farbe und ihr Gewicht haben (grundsätzlich) keine Bedeutung. Die Dicke des Papiers und selbst die chemische Zusammensetzung der lichtempfindlichen Schicht sind für eine Fotografie irrelevant – vorausgesetzt die Verteilung der Graustufen wird nicht beeinflusst. Wir nennen diese Merkmale *Glätte*,⁷ *Empfindlichkeit* bzw. *Dimensionalität*.

Obwohl es (aus welchen theoretischen Gründen auch immer) nicht der beste Ansatz sein mag, können wir nach dem Muster von ‚digital‘ die Definition von ‚analog‘ aufstellen. D.h. wir beginnen mit einem Set von Types und erwägen die Vorgänge zur Herstellung und Erkennung von Tokens dieser Types. Bei analogen Vorrichtungen haben die Vorgänge im Schreib-Lese-Zyklus den Status von *Näherungswerten* – d.h. es sind Vorgänge, die dem vollkommenen Erfolg ‚nahe kommen‘. Genauer gesagt gibt es hier einen Begriff von Fehlerspielraum (Grad der Abweichung vom vollkommenen Erfolg), so dass gilt:

- (i) Je kleiner dieser Spielraum ist, desto schwieriger ist es, in ihm zu bleiben;
- (ii) die verfügbaren Verfahren können (zuverlässig) in einem recht kleinen Spielraum bleiben;
- (iii) es gibt keine Grenze für die Verkleinerung dieses Spielraums, die bessere (zukünftige, teurere) Verfahren ermöglichen könnten;⁸ aber
- (iv) der Spielraum kann niemals Null werden – vollkommene Vorgänge sind ausgeschlossen.

Alle gewöhnlichen (und ungewöhnlichen) Verfahren, um ein Fahrzeug zentriert in einer Garage zu parken, Bretter auf zwei Meter zuzuschneiden, drei Teelöffel mit blauem Sand abzumessen sowie eine Fotografie abziehen, sind Näherungsverfahren. Aber es gibt keine Näherungsverfahren für die Auferweckung von Toten, um Gedichte zu schreiben, beim Roulette zu gewinnen oder kleine Stapel von Spielmarken zu zählen. Näherungsverfahren verhalten sich – um es deutlich zu sagen – antithetisch zu sicheren Vorgängen; die beiden schließen sich aus, wenn auch freilich nicht vollständig. Es gibt keinen Grund, die Definition einer *analogen Vorrichtung* ganz auszuformulieren – sie ist die gleiche wie für digitale, mit der Ausnahme, dass bei analogen Vorrichtungen ‚sicher‘ durch ‚annähernd‘ ersetzt wird (und ein Fehlerspielraum in den festgelegten Bedingungen einbegriffen ist).

7 Im Original ‚smoothness‘ [Anm. d. Übers.].

8 Quantenmechanische Grenzwerte sind fast immer verwirrend und langweilig; ignorieren wir sie einfach.

Die Folgerungen machen es abermals deutlich. 1) Zunächst sagt Goodman, dass ein Schema dann analog ist, wenn es ‚dicht‘ ist, d.h. wenn sich zwischen zwei beliebigen Types immer ein dritter befindet.⁹ Die Hauptschwierigkeit liegt darin, dass ‚zwischen‘ nicht für alle Fälle, die offensichtlich analog zu sein scheinen, hinreichend definiert ist. Worin liegt beispielsweise der Unterschied ‚zwischen‘ einer Fotografie von Carter und einer von Reagan? Gleichwohl ist es einfach, Grenzen der Auflösung und der Linienzeichnung so festzulegen, dass das Abziehen von Fotografien als Näherungsverfahren erscheint. Ähnliche Beobachtungen lassen sich anhand maßstäblicher Modelle machen.

2) Lewis schlägt vor, dass eine analoge Darstellung eine Darstellung in Größenbegriffen ist, die einfach oder – in einer richtigen Anlehnung an die Sprache der Physik – ‚fast einfach‘ ist.¹⁰ Er erwähnt nur die Darstellungen von Zahlen und es wird nicht deutlich, wie er dieses Kriterium in Bezug auf nicht-zahlenmäßige Darstellungen (wie z.B. Porträts) oder nicht-darstellende analoge Vorrichtungen verallgemeinern kann. Genauer gesagt, sehe ich keinen Grund, warum es keine analogen Zahlendarstellungen etwa durch Verfärbungen (wie bei Lackmuspapier oder verschiedenen Feuerproben) oder sogar durch Wachstumsraten von Bakterien (z.B. in dem Modell einer Kettenreaktion mit begrenzten Ressourcen) geben sollte; gleichwohl ist keins dieser Beispiele ‚fast einfach‘ (was immer das genau bedeuten mag).¹¹

3) Drittens scheint es mir, dass es einen wichtigen quasi-digitalen Zug an allen normalen analogen Vorrichtungen gibt – besonders in Bezug auf das Merkmal der Dimension. Um es frei zu formulieren: Es ist wesentlich für die digitalen Types (Type-,Atome‘), dass es tendenziell nur verhältnismäßig wenige von ihnen gibt und dass sie klar unterschieden sowie voneinander getrennt sind. Obwohl die Types analoger Schemata selbst diese Eigenschaften nicht teilen (sie ‚gehen glatt ineinander über‘), sind die *Dimensionen*, in denen sie sich bewegen, relativ wenige und klar voneinander geschieden. So gibt es für Fotografien genau drei rechtwinklig aufeinander stehende Dimensionen: die Horizontale, die Vertikale und die Graustufigkeit [die quasi als Tiefendimension fungiert, Anm. d. Übers./Hrsg.]. Ein Fadenmodell eines Schienennetzes verfügt über genau einen Faden für jede Schienen-

9 Vgl. Goodman: *Sprachen der Kunst* (Anm. 4), S. 154 u. 132f.

10 Vgl. Lewis: „Analog and Digital“ (Anm. 5), S. 324f.

11 Ned Block und Jerry Fodor haben sich in einem alten Manuskript (von ca. 1971) grundlegend mit diesem Problem befasst; meines Wissens ist der Text nicht publiziert worden.

verbindung und genau einen Knoten für jeden Verkehrsknotenpunkt (wobei Fäden und Knoten klar differenziert sein müssen). Aber das beste Beispiel ist ein gewöhnlicher Analogrechner mit seinen elektronischen Addierern, integrierten Schaltungen, Multiplizierern, Invertern, und Ähnlichem, wobei alles so diskret und Type-mäßig bestimmt ist wie jedes beliebige mathematische Zeichen, und ihre Schaltverbindungen so hinreichend definiert ist wie die Bildung einer Gleichung. Obwohl in der Tat die Zustands- und einstellbaren Types eines analogen Computers analog sind, ist die Anordnung der Types vollkommen digital – die Identifikation einzelner Komponenten und die der Verbindungen ist sicher und zuverlässig.

Diese Digitalität ‚zweiter Ordnung‘ von analogen Vorrichtungen ist aus zwei Gründen wichtig. Zunächst ist sie – zumindest grob gesehen – eine notwendige Bedingung dafür, dass die Schreib-/Lese-Vorgänge in komplexen Systemen Näherungsverfahren sind. In eindimensionalen Vorrichtungen wie Regelwiderständen und Schieblehren reicht es aus, zu konstatieren, dass zwischen allen verschiedenen Typen ein dritter liegt. Aber in mehrdimensionalen Fällen, in denen dieses ‚Dazwischensein‘ allgemein nicht hinreichend definiert ist, ist es entscheidend, ein bestimmtes Set unabhängiger Dimensionen zu haben, so dass eine Kopie, die jeder Dimension (des Originals) nahe kommt, allein durch diese Tatsache dem Ganzen nahe kommt – daher rührt die verständliche Bedeutung der Auflösung bei der Erstellung fotografischer Abzüge oder von Präzisionskomponenten in Analogrechenern usw. Das ist es, was den Begriff *Annäherung* überhaupt sinnvoll macht. Diese Konstellation ist es auch, die der digitalen Simulation eine Zugriffsmöglichkeit lässt, und dies im Wesentlichen aus dem gleichen Grunde. Jedermann weiß, dass Fotografien durch die Aufteilung ihrer Fläche in ein regelmäßiges Punktraster und die Aufteilung der Grauskala in regelmäßig aufgeteilte Schattierungen ‚digitalisiert‘ werden können; die Feinheit der jeweiligen Abstände bestimmt die Qualität dieser digitalen Umrechnung, genau wie die Kleinheit des Fehlerspielraums die Genauigkeit der Annäherung bestimmt. Ähnlich verhält es sich, wenn das Programm eines Digitalrechners einen Analogrechner simuliert: Die Werte aller festen Komponenten und die Ausgangswerte aller Variablen sind in bestimmten Registern gespeichert, sodann werden die Werte der Variablen der Reihe nach ihrem Zuwachs nach berechnet; dabei benutzt man Gleichungen, die die durch die Schaltstruktur des Analogrechners bedingten Wechselwirkungen beschreiben, wobei die Genauigkeit der Simulation (in erster Linie) durch die Bitzahl in all diesen Registern festgelegt wird sowie

durch die Feinheit der Zeittaktung. Wenn das System nicht digital in zweiter Ordnung wäre, könnte solch eine Simulation gar nicht von der Stelle kommen; es gäbe kein besonderes Set von Parametern, die in bestimmten Registern digitalisiert werden könnten (ganz zu schweigen von den Gleichungen zur Berechnung der Wechselwirkungen).

4) Meine vierte Folgerung besteht in der Hauptfrage: Ist *jede* Analogvorrichtung digital in zweiter Ordnung? Oder anders gefragt: Ist es wirklich wahr, dass jede Analogvorrichtung prinzipiell bis zu jedem gewünschten Genauigkeitsgrad digital simuliert werden kann? Soweit die Überlegungen in den letzten drei Absätzen aufrechterhalten werden können, sieht es so aus, als ob die Antwort ‚ja‘ wäre. Digitalität zweiter Ordnung ist gleichermaßen die allgemeine Bedingung für die Möglichkeit approximativer Schreib-/Leseverfahren und digitaler Simulationstechniken; Näherungsverfahren für den Schreib-/Lese-Zyklus sind Kriterien analoger Vorrichtungen. Dies gilt aber nur für analoge Vorrichtungen, die im *engeren* Sinne analog sind – nur diese haben wir bislang diskutiert. Doch der Anspruch einer universalen digitalen Simulierbarkeit wird oft in einem schwungvolleren Ton vorgetragen, so als ob diese Simulierbarkeit auf *alles* übertragbar sei. Gibt es Systeme, die vielleicht gleichsam ‚analog‘ in einem weiteren Sinne und nicht digital in zweiter Ordnung wären und somit nicht notwendigerweise digital simulierbar (bis zu jedem beliebigen Präzisionsgrad usw.)? Natürlich gibt es alle möglichen Arten von hybriden Vorrichtungen, die in mancher Hinsicht oder in ihren Bauteilen analog, in anderen digital sind; aber diese stellen kein größeres Problem für eine Simulation dar, als es reine Vorrichtungen tun. Wenn wir uns digitale Vorrichtungen als ordentlich und anpassungsfähig vorstellen, analoge hingegen als unordentlich und empfindlich/riskant (eingedenk der Hybridformen dazwischen?), dann lautet die Frage: Kann es Systeme geben, die noch unordentlicher und empfindlicher sind als rein analoge – gibt es sozusagen eine Unordentlichkeit zweiter Ordnung?

Ich wüsste nicht, warum nicht. Man erwäge nur das System des Stoffwechsels der Ratte, deren Tokens oft als ‚Analogien‘ unseres eigenen Stoffwechsels gebraucht werden, um etwa die Wirkungen von Medikamenten im Versuchsstadium vorherzusagen usw. Nun sind einige allgemeine Beziehungen dieser Stoffwechsel bekannt, und wir verstehen einige weitere spezifische örtliche Wirkungsweisen. Diese bieten aber keineswegs eine vollständige Beschreibung, mittels welcher die Reaktionen auf fremde Chemikalien zuverlässig vorausgesagt werden könnte. Es gibt Millionen feiner hormonaler Gleichgewichte, katalytischer Reaktio-

nen, Oberflächeneffekte und immunologischer Reaktionen, die alle in einer biochemischen Raserei schwankender Verhältnisse voneinander abhängig sind; diese können durch die bizarrsten ‚Nebenwirkungen‘ katastrophal zersprengt werden. Die Folgen des geringsten Vorkommnisses auf einer bestimmten Seite einer winzigen Membrane können sich vollkommen von denen unterscheiden, die das gleiche Vorkommnis auf der anderen Seite der Membrane nach sich ziehen würde – und jede Ratte verfügt über Millionen solcher Membranen.

Es gibt tatsächlich keine Möglichkeit, eine detaillierte, quantifizierbare Kontrolle über dieses Durcheinander zu erlangen – es gibt keine Hoffnung, ein Set von ‚Zustandsgrößen‘ genau zu beschreiben, die es zu einem bestimmten Zeitpunkt voll charakterisieren könnten. Obgleich Langzeitprognosen riskant sind, halte ich es für ausgeschlossen, dass es jemals eine digitale Simulation menschlicher Physiologie geben könnte, die zuverlässig genug die biologischen und chemischen Testreihen neuer Medikamente ersetzen (oder diese gar übertreffen) könnte. Der wesentliche Grund hierfür ist, dass Stoffwechselsysteme nicht digital in zweiter Ordnung sind. Daraus geht hervor, dass es keine Möglichkeit gibt, die ‚Körnung‘ oder ‚Auflösung‘ eines Näherungsverfahrens für biochemische Duplikationen, von z.B. gesunden Ratten, zu bestimmen; es gibt keine relevanten Dimensionen, in denen solche Spezifikationen sinnvoll wären.

5) Die fünfte und letzte Folgerung lautet: ‚Aber ist die Physik nicht digital in zweiter Ordnung? Was ist mit digitalen Simulationen auf der Ebene von Atomen und Molekülen (Quarks und Leptonen, oder was auch immer)?‘ Ich habe zwei verschiedenen Antworten auf diese Fragen. Zunächst ist diese Idee absolut lächerlich. Man erinnere sich, wie beeindruckt man war, als man das erste Mal hörte, dass ein Rechner mit der Kapazität des menschlichen Gehirns so groß wie Texas und 20 Etagen hoch sein müsste.¹² Gleichwohl, die schnellsten und größten heutigen *state-of-the-art*-Rechner können schon mit der Aufgabe der atomweisen Simulation eines einzigen großen organischen Moleküls überfordert sein; dabei gibt es im menschlichen Körper mehr Moleküle, als es Taschenrechner geben würde, wenn die Erde mit diesen vollständig angefüllt wäre.¹³ Aber die Simulation eines einzelnen Moleküls wäre nur der Trop-

12 Ich habe vergessen, wo und wann ich das gehört habe; und der Herr weiß, wie diese Berechnung angestellt wurde. Dieses Bild aber habe ich nie vergessen.

13 $81 \text{ Kg} = 5 \times 10^{28}$ Wasserstoff-Massen; das Volumen der Erde beträgt $1.083.319.780.000 \text{ km}^3$ [Haugeland spricht von 7×10^{25} Kubik-Inch, um seine oben aufgestellte These zu verdeutlichen, Anm. d. Hrsg.].

fen auf den heißen Stein: Wenn nämlich die Wechselwirkungen der Moleküle berücksichtigt würden, stiege die Zahl der Berechnungen kombinatorisch an.

Zweitens aber, und dies ist wesentlicher für unsere Fragestellung, ändert die Applikation auf die atomare Ebene die ganze Lage. Wenn man den Anspruch erhebt, Fotografien, lineare Verstärker und Analogrechner bis zu jedem gewünschten Präzisionsgrad simulieren zu können, so hat dies nichts mit Grundlagenphysik zu tun; es täte hierbei nichts zur Sache, wenn die Physiker in einem Plenum¹⁴ drehende Wirbel oder unendlich viele unendlich kleine Monaden gefunden hätten. Der Anspruch digitaler Simulierbarkeit analoger Vorrichtungen kann nur in Hinsicht auf *makroskopische* Phänomene erhoben werden. Der Bereich und die Vielfalt der Umstände, innerhalb derer digitale Simulierbarkeit möglich ist, sind wahrhaft erstaunlich und von großer Bedeutung (die wissenschaftliche Revolution wäre ohne sie nicht möglich gewesen); aber es ist gleichsam von Bedeutung, dass diese Simulierbarkeit (d.h. diese Digitalität zweiter Ordnung) *nicht* universal ist. Diese zweite wichtige Tatsache wird vollständig übergangen und verheimlicht, wenn man die Frage nach der Simulierbarkeit auf unvorsichtige Weise auf den Gegenstand der Mikrophysik überträgt.

3. Fazit

‚Digital‘ und ‚analog‘ (im engen und strengen Sinne) können am besten als Arten von praktischen Verfahren verstanden werden, die das Schreiben und Lesen von Tokens eines erlaubten Types ermöglichen – dies sind sichere bzw. Näherungsverfahren. Hält man sich an den engen Sinn, ist der Fall plausibel, dass jede analoge Vorrichtung (prinzipiell) bis zu jedem gewünschten Präzisionsgrad digital simuliert werden kann. Aber es gibt andere Fälle, die, obgleich sie nicht in diese strenge Form passen, trotzdem ‚analog‘ in einem weiteren Sinn zu sein scheinen; und für wenigstens einige dieser Fälle ist der Anspruch digitaler Simulierbarkeit äußerst unwahrscheinlich.

Übersetzt von Holger Steinmann unter Rückgriff auf Vorarbeiten von Anneli Fritsch

14 Ein mit komprimierter Luft gefüllter Raum [Anm. d. Übers.].