

MATHEMATISCHE  
UND  
PHYSIKALISCH-TECHNISCHE PROBLEME  
DER KYBERNETIK

*Vorträge,*  
*gehalten auf der Konferenz der Forschungsgemeinschaft*  
*der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*  
*vom 20. bis 23. März 1962 in Berlin-Adlershof*

*Mit 230 Abbildungen und 17 Tabellen*



AKADEMIE-VERLAG · BERLIN  
1963

Prof. Dr. LÁSZLÓ KALMÁR

*Mitglied der Ungarischen Akademie der Wissenschaften*

*Professor an der Universität Szeged*

*Vorsitzender der Kybernetik-Kommission der Ungarischen Akademie der Wissenschaften*

## ÜBER EINE VARIANTE DES NEUMANNSCHEIN SELBSTREPRODUZIERENDEN AUTOMATEN<sup>1)</sup>

Am 20. September 1948 hat der berühmte ungarische Mathematiker JÁNOS NEUMANN (VON MARGITA) oder — wie er sich damals bereits nannte — JOHN VON NEUMANN auf dem Hixon-Symposium in Pasadena (California/USA) einen sehr inhaltsreichen kybernetischen Vortrag über die allgemeine und logische Theorie der Automaten gehalten.<sup>2)</sup> In diesem Vortrag wies er unter anderem die Existenz eines selbstreproduzierenden Automaten nach, d. h. eines Automaten, der — unter Aufnahme von Material und Energie — neue Automaten in Serienfabrikation erzeugt, die ihm selbst kongruent sind, sich daher ebenso verhalten wie der ursprüngliche Automat und insbesondere auch die Fähigkeit der Selbstreproduktion aufweisen. Meines Wissens hat man bisher noch kein Exemplar eines solchen selbstreproduzierenden Automaten wirklich konstruiert. Es wird ja allgemein die Ansicht vertreten, daß die Herstellung eines solchen Automaten wohl nicht ohne großen Aufwand möglich sei.

In dieser Arbeit werde ich nach einer Skizze des v. NEUMANNschen Gedankengangs eine vereinfachte Variante des selbstreproduzierenden Automaten darlegen, von der ich vermute, daß ihre wirkliche Herstellung bereits im Rahmen der praktischen Möglichkeiten liegt.

1. Das Material wird von dem in Frage kommenden Automaten in Form von genormten „Elementarbauteilen“ aufgenommen, von denen vorausgesetzt wird, daß sie in beliebiger Anzahl zur Verfügung stehen. Was als Elementarbauteil gilt, wird nicht genau angegeben, und die Frage an sich wäre trivial, würde man etwa selbstreproduzierende Automaten selbst als Elementarbauteile zulassen. Offenbar läßt man aber vernünftigerweise nur solche Elementarbauteile zu, deren Existenz bereits nachgewiesen ist und für die nach Möglichkeit eine (nicht allzu komplizierte) Produktionstechnologie vorliegt. Ich gehe auf diese Frage nicht näher ein, sondern nehme an, es sei eine geeignete endliche Menge  $M$  von Elemen-

<sup>1)</sup> Ausführliche Ausarbeitung eines Vortrags, der am 17. 2. 1961 in Pécs (Ungarn) anlässlich der feierlichen Gründungsversammlung der Ortsvereinigung der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Meßtechnik und Automatisierung sowie am 23. 3. 1962 in Berlin auf der Tagung über „Mathematische und physikalisch-technische Probleme der Kybernetik“ gehalten wurde.

<sup>2)</sup> NEUMANN, J. von, The general and logical theory of Automata. The Hixon Symposium on Cerebral Mechanism in Behaviour (Editor: L. A. Jeffres), New York 1951, S. 1–41.

tarbauteilen gegeben, deren Elemente, wie gesagt, in beliebiger Anzahl zur Verfügung stehen. Ebenfalls wird vorausgesetzt, daß (etwa elektrische) Energie in beliebiger Menge zur Verfügung steht.

Nun geht JOHN VON NEUMANN von der Tatsache aus, daß es im Falle einer geeigneten Wahl der Menge  $M$  prinzipiell möglich ist, einen „universellen Konstruktionsautomaten“  $K$  anzugeben, der die folgenden Eigenschaften besitzt:  $K$  soll aus zur Menge  $M$  gehörigen Elementarbauteilen bestehen. Es sei ferner für einen beliebigen Automaten  $X$ , der ebenfalls aus zur Menge  $M$  gehörigen Elementarbauteilen besteht,  $B(X)$  die „Beschreibung“ von  $X$ . Nun soll  $K$ , falls er mit der Beschreibung  $B(X)$  eines Automaten  $X$  der genannten Art in geeigneter Weise gekoppelt wird (diese Art der Koppelung wird die Eingabe von  $B(X)$  im Automaten  $K$  genannt) und ihm ein Startsignal gegeben wird, unter Aufnahme von Material, nämlich zur Menge  $M$  gehöriger Elementarbauteile, sowie von Energie ein Exemplar des Automaten  $X$  erzeugen und danach ein Rückmeldesignal ausgeben.

Auf die Frage, was eigentlich unter Beschreibung eines Automaten  $X$  zu verstehen ist und wie die Existenz eines Automaten  $K$  der genannten Art begründet wird, komme ich später zurück. Man denke sich  $B(X)$  vorläufig als eine Information über ein technologisches Programm für die Produktion von  $X$ , freilich in geeigneter Weise materiell repräsentiert. Jedenfalls wird vorausgesetzt, daß  $B(X)$  in der Form eines Komplexes von zur Menge  $M$  gehörigen Elementarbauteilen, also nicht etwa in Form eines Lochstreifens, materiell repräsentiert wird, was offenbar möglich ist, da eine beliebige Informationsmenge durch eine hinreichend lange Folge von Elementen der Menge  $M$  vertreten werden kann.

Ferner ist es, bei geeigneter Wahl der Menge  $M$ , möglich, einen „Reproduktionsautomaten“  $R$  anzugeben, der die folgenden Eigenschaften besitzt:  $R$  soll ebenfalls aus lauter zur Menge  $M$  gehörigen Elementarbauteilen bestehen. Ferner soll  $R$ , falls er mit einer Beschreibung  $B(X)$  im obigen Sinne in geeigneter Weise gekoppelt wird (was wieder bedeutet, daß  $B(X)$  dem Automaten  $R$  eingegeben wird) und ihm ein Startsignal gegeben wird, unter Aufnahme von Material, nämlich zur Menge  $M$  gehöriger Elementarbauteile, sowie von Energie von der ihm eingegebenen Beschreibung  $B(X)$  eine zweite Ausfertigung erzeugen und danach ein Rückmeldesignal ausgeben (das sich von dem vom Automaten  $K$  ausgegebenen Rückmeldesignal unterscheidet).

Endlich ist es bei geeigneter Wahl der Menge  $M$  möglich, einen ebenfalls aus lauter zur Menge  $M$  gehörigen Elementarbauteilen bestehenden „Steuerungsautomaten“  $S$  anzugeben, der die folgenden Eigenschaften hat: Wird er in geeigneter Weise mit den Automaten  $K$  und  $R$  gekoppelt und wird ihm, nach Eingabe der Beschreibung  $B(X)$  eines aus zur Menge  $M$  gehörigen Elementarbauteilen bestehenden Automaten  $X$  in den Automaten  $K$  und Erzeugung von  $X$  durch  $K$ , das von  $K$  ausgegebene Rückmeldesignal zugeführt, so soll er, unter Aufnahme von Energie, sowohl den Automaten  $X$  als auch die Beschreibung  $B(X)$  von  $K$  abtrennen, danach  $B(X)$  dem Automaten  $R$  eingeben und ihm sein Startsignal geben. Falls ferner, nach Erzeugung einer zweiten Ausfertigung  $B'(X)$

von  $B(X)$  durch  $R$ , das von  $R$  ausgegebene Rückmeldesignal dem Automaten  $S$  eingegeben wird, so soll er, wieder unter Aufnahme von Energie, sowohl  $B(X)$  als auch  $B'(X)$  von  $R$  abtrennen,  $B(X)$  wieder dem Automaten  $K$  und, falls die Eingabe von  $B'(X)$  für den Automaten  $X$  definiert ist,  $B'(X)$  dem Automaten  $X$  eingegeben und danach dem Automaten  $K$  sowie, falls dies für den Automaten  $X$  definiert ist, auch dem Automaten  $X$  sein Startsignal geben.

Nun sei  $U$  der Automat, der in der soeben genannten Weise aus  $K$ ,  $R$  und  $S$  zusammengesetzt und darüber hinaus so gekoppelt ist, daß sowohl das von  $K$  als auch das von  $R$  ausgegebene Rückmeldesignal sofort nach Ausgabe in den Automaten  $S$  eingegeben werden. Man definiert die Eingabe einer Beschreibung  $B(X)$  eines aus lauter zur Menge  $M$  gehörigen Elementarbauteilen bestehenden Automaten  $X$  in den Automaten  $U$  als Eingabe von  $B(X)$  in den Automaten  $K$ , der ja einen Teil von  $U$  bildet, und als Startsignal für den Automaten  $U$  das Startsignal des Automaten  $K$  als Teil von  $U$ .

Man konstruiere nunmehr einen Prototyp von  $U$  sowie eine Beschreibung  $B(U)$  von  $U$  und gebe  $B(U)$  dem Automaten  $U$  im eben definierten Sinne ein. Man sieht sofort, daß der so konstruierte Automat  $V$  (der aus dem Automaten  $U$  und dessen Beschreibung  $B(U)$  besteht, wobei beide auf eine bestimmte Art gekoppelt sind, nämlich so, wie es unter Eingabe von  $B(U)$  in den Automaten  $U$  verstanden wird), wenn dem Automaten  $U$  als Teil von  $V$  im oben definierten Sinne mit der Hand sein Startsignal gegeben wird, die selbstreproduzierende Eigenschaft aufweist.

2. Offenbar ist der springende Punkt des v. NEUMANNSchen Gedankengangs der Nachweis der Existenz eines universellen Konstruktionsautomaten  $K$ . Um diesen Punkt zu klären, muß ich zuerst auf die Frage nach dem Begriff der Beschreibung eines Automaten zurückkommen.

Zunächst könnte man daran denken, unter einer Beschreibung  $B(X)$  eines Automaten  $X$ , der aus lauter zur Menge  $M$  gehörigen Elementarbauteilen besteht, eine (in geeigneter Form, nämlich in der Form eines Komplexes von zur Menge  $M$  gehörigen Elementarbauteilen, materiell repräsentierte) Information darüber zu verstehen, wieviele der einzelnen Elemente von  $M$  der Automat  $X$  enthalten soll und wie diese gekoppelt (etwa gelötet usw.) werden sollen, um  $X$  zu erhalten. Eine solche Beschreibung könnte man als eine *strukturelle* Beschreibung bezeichnen.

Nun bezieht sich v. NEUMANN auf eine Analogie des von ihm verwendeten Beschreibungsgriffs mit dem Begriff der Beschreibung einer TURING-Maschine  $T$ . Letztere gibt eine in einer geeigneten Form (nämlich in Form einer auf einen endlichen Teil des Bandes einer TURING-Maschine geschriebenen, mittels zweier verschiedener Zeichen aufgebauten Zeichenreihe) kodierte Information darüber, wie der neue innere Zustand von  $T$ , die Bewegung (um  $-1, 0$  oder  $+1$  Schritte) des Schreib- und Lesekopfs von  $T$  längs des Bandes von  $T$  sowie das von  $T$  gedruckte Zeichen vom alten inneren Zustand von  $T$  und dem von  $T$  vom Band abgelesenen Zeichen abhängen. Das ist aber keine strukturelle, sondern eine *funktionelle* Beschreibung; eine TURING-Maschine ist ja eine nur durch ihre Funktionsweise festgelegte abstrakte Maschine, deren Struktur überhaupt nicht definiert ist. Offenbar denkt also v. NEUMANN ebenfalls an eine funktionelle

Beschreibung  $B(X)$  des Automaten  $X$ , d. h. an eine vollständige (in oben angegebener Form repräsentierte) Information über die Verhaltensweise des Automaten  $X$ . Dies hat den Vorteil, daß man sich beim Nachweis der Existenz eines universellen Konstruktionsautomaten  $K$  auf den TURINGschen Beweis<sup>3)</sup> der Existenz einer universellen TURING-Maschine berufen kann, der sich, wie v. NEUMANN zu Recht behauptet, ohne prinzipielle Schwierigkeiten auf Automaten übertragen läßt, deren Produkte nicht Zeichen auf einem Band, sondern Automaten sind.

Eine gewisse Schwierigkeit tritt jedoch bei der Verwendung des funktionellen Beschreibungs begriffs auf, wenn man unter kongruenten Automaten solche versteht, die in genau derselben Weise aus Elementarbauteilen zusammengesetzt sind (also durch die gleiche Kopplung von Elementarbauteilen entstehen), und nicht auch solche, die sich zwar stets in gleicher Weise verhalten, die aber verschiedene Strukturen haben. Der oben angegebene Automat  $V$  ist dann nämlich nur im funktionellen, nicht aber notwendigerweise auch im strukturellen Sinne selbstreproduzierend, d. h., seine Produkte  $V', V'', \dots$  verhalten sich zwar stets in gleicher Weise, sind aber nicht notwendigerweise mit  $V$  kongruent.

Nimmt man aber an, was offenbar erlaubt ist, daß  $V$  eine determinierte Verhaltensweise aufweist, so läßt sich diese Schwierigkeit leicht umgehen. In der Tat besitzt dann auch der Automat  $V'$  offensichtlich stets dieselbe Verhaltensweise wie  $V$ , erzeugt also dieselben Automaten (auch im strukturellen Sinne) wie  $V$ , d. h. solche, die dem Automaten  $V'$  kongruent sind. Daher ist  $V'$  auch im strukturellen Sinne selbstreproduzierend.

3. Wenn man an eine wirkliche Konstruktion des obigen selbstreproduzierenden Automaten denkt, so sieht man, daß die Herstellung des universellen Konstruktionsautomaten  $K$  die schwierigste Teilaufgabe darstellt, unabhängig davon, ob man den Beschreibungs begriff im strukturellen oder im funktionellen Sinne versteht. Im Vergleich zu  $K$  ist die wirkliche Herstellung des Reproduktions-Automaten  $R$  und auch des Steuerungsautomaten  $S$  eine leichte Sache.

Nun läßt sich aber die Konstruktion eines Automaten  $X$  auf Grund seiner Beschreibung  $B(X)$  auf die Erzeugung einer zweiten Ausfertigung von  $X$  und damit die Herstellung des universellen Konstruktionsautomaten  $K$  auf die des Reproduktions-Automaten  $R$  zurückführen, sofern man unter der Beschreibung  $B(X)$  eines Automaten  $X$  den Automaten  $X$  selbst versteht. Damit gewinnt man eine Variante des v. NEUMANNschen selbstreproduzierenden Automaten, deren wirkliche Herstellung wesentlich weniger Aufwand als die ursprüngliche erfordert. Ich werde nunmehr diese Variante etwas ausführlicher beschreiben, wobei ich auch auf einige unwesentliche, aber die Vorstellung erleichternde Einzelheiten eingehen will.

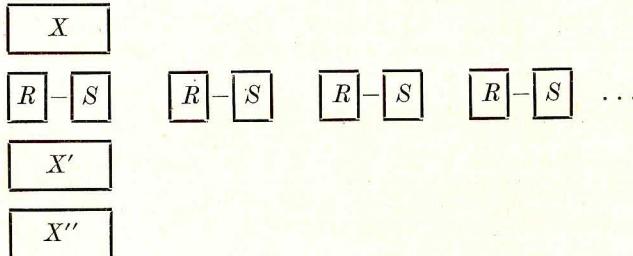
Der selbstreproduzierende Automat  $V$  besteht aus zwei in geeigneter Weise gekoppelten Teilautomaten — einem Reproduktions-Automaten  $R$  (der bei dieser

<sup>3)</sup> TURING, A. M., On computable numbers with an application to the Entscheidungsproblem. Proceedings of the London Mathematical Society (2) **42** (1937) 230—265, insb. S. 241—246.

Variante auch die Rolle des universellen Konstruktions-Automaten  $K$  übernimmt) und einem Steuerungs-Automaten  $S$ . Beide Teile, wie auch  $V$  selbst, stelle man sich anschaulich etwa als Aggregate mit einer annähernd quadratischen Grundfläche vor; die Quadratseiten entsprechen der Vorderfront, den beiden Seiten und der Hinterfront des betreffenden Automaten, so daß man von der Gegenüberstellung usw. zweier solcher Automaten sprechen kann. Den selbst-reproduzierenden Automaten sowie dessen „Nachfolger“ denke man sich so, daß sie Seite an Seite in einer Reihe nebeneinander stehen; über diese Reihe, die ich als Grundreihe bezeichnen werde, soll die (etwa elektrische) Energieleitung laufen.

Es sei  $M$  wieder eine geeignet zu wählende Menge von Elementarbauteilen, von welchen wir wiederum annehmen, daß sie (sowie die Energie) in beliebiger Menge zur Verfügung stehen. Unter Materialaufnahme verstehen wir auch weiterhin die Aufnahme von Elementarbauteilen, die der Menge  $M$  angehören.

Bei geeigneter Wahl der Menge  $M$  ist es möglich, aus zu dieser Menge gehörigen Elementarbauteilen einen Reproduktions-Automaten  $R$  zu konstruieren, der die folgenden Eigenschaften aufweist: Wird ihm gegenüber (in einer geeigneten, nicht allzu engen, etwa die eigenen Abmessungen um das Doppelte übertreffenden Umgebung von  $R$ ) ein anderer, aus zu der Menge  $M$  gehörigen Elementarbauteilen bestehender Automat  $X$  aufgestellt und wird dem Automaten  $R$  nach Verbindung mit der Energieleitung ein Startsignal gegeben, so soll  $R$  zunächst den Automaten  $X$  abtasten. Dabei ist dieses „Abtasten“ nicht unbedingt als rein mechanischer Vorgang aufzufassen; vielmehr kann es auch eine Gewinnung von Informationen über  $X$  durch Meßapparate beinhalten. (Z. B. läßt sich von einem Stück isolierten Drahts ohne Beschädigung der Isolation, etwa durch Widerstands- und Kapazitätsmessungen, ermitteln, woraus Draht und Isolation bestehen. Sollte  $R$  für solche Messungen Teile von  $X$  abtrennen, so gehört die Wiedervereinigung solcher Teile mit  $X$  zum Abtasten.) Nach dem Abtasten soll  $R$ , auf Grund der dabei gewonnenen Informationen und unter Material- und Energieaufnahme, *zwei* weitere Ausfertigungen  $X'$  und  $X''$  von  $X$  erzeugen und danach ein Rückmeldesignal ausgeben. (Die eine der Ausfertigungen  $X'$  entspricht beim ursprünglichen v. NEUMANNschen Gedankengang dem von  $K$  erzeugten Exemplar von  $X$ , die andere  $X''$  dagegen der von  $R$  erzeugten zweiten Ausfertigung der *Beschreibung* von  $X$ .) Man stelle sich das anschaulich etwa so vor, daß  $R$  die Automaten  $X'$  und  $X''$  nach der Erzeugung hinter sich stellt. (Siehe Figur, in die mehrere Exemplare von  $R$  und auch des Steuerungsautomaten  $S$  eingezeichnet wurden.)



Weiterhin ist es bei geeigneter Wahl der Menge  $M$  möglich, aus zu dieser Menge gehörigen Elementarbauteilen einen Steuerungsaufschaltung  $S$  zu konstruieren, der — wenn man ihn in geeigneter Weise mit  $R$  koppelt (was auch die Verbindung von  $S$  mit der Energieleitung einschließt) — folgende Eigenschaften aufweist: Wenn ihm, nach Erzeugung von zwei Ausfertigungen  $X'$  und  $X''$  eines aus lauter zu der Menge  $M$  gehörigen Elementarbauteilen bestehenden Automaten  $X$  durch  $R$ , das von  $R$  ausgegebene Rückmeldesignal eingegeben wird, so sucht er eine freie Stelle in der Grundreihe, baut die Energieleitung (etwa durch einen T-Stecker, verbunden durch isolierte Drähte mit einer Steckdose) unter Material- und Energieaufnahme bis zu dieser Stelle weiter, setzt  $X'$  an diese Stelle und  $X''$  ihm gegenüber, verbindet  $X'$  mit der Energieleitung und gibt sowohl  $R$  als auch, falls dies möglich ist,  $X'$  ihr Startsignal.

Nun bedeute  $V$  den Automaten, der aus  $R$  und  $S$  besteht, diese in der oben angegebenen Weise und darüber hinaus so gekoppelt, daß das von  $R$  ausgegebene Rückmeldesignal in den Automaten  $S$  gegeben wird. Man definiere die Gegenüberstellung eines Automaten  $X$  zum Automaten  $V$  als seine Gegenüberstellung zum Automaten  $R$ , der ja einen Teil von  $V$  bildet, ferner die Verbindung von  $V$  mit der Energieleitung als Verbindung von  $R$  (als Teil von  $V$ ) mit der Energieleitung und nehme als Startsignal von  $V$  das Startsignal des Automaten  $R$  an.

Man konstruiere nun *zwei* kongruente Prototypen von  $V$ ; sie seien durch  $V'_0$  und  $V''_0$  bezeichnet. Den Automaten  $V'_0$  stelle man von Hand in die Grundreihe und  $V''_0$  ihm gegenüber, sodann verbinde man  $V'_0$  mit der Energieleitung und gebe  $V'_0$  sein Startsignal (im eben definierten Sinne). Dann wird der Teil  $R$  von  $V'_0$ , der mit der Energieleitung verbunden und dem das Startsignal gegeben wurde,  $V''_0$  abtasten, von ihm zwei weitere Ausfertigungen  $V'_1$  und  $V''_1$ , die also beide dem Automaten  $V'_0$  kongruent sind, erzeugen und danach dem Teil  $S$  von  $V'_0$  ein Rückmeldesignal geben. Daraufhin wird  $S$  eine freie Stelle in der Grundreihe suchen, die Energieleitung bis zu dieser Stelle weiterbauen,  $V'_1$  auf diese Stelle setzen,  $V''_1$  ihm gegenüberstellen,  $V'_1$  mit der weitergebauten Energieleitung verbinden und sowohl  $V'_0$  als auch  $V'_1$  ihr Startsignal geben. Darauf wird der Teil  $R$  von  $V'_0$  bzw.  $V'_1$  den Automaten  $V''_0$  bzw.  $V''_1$  abtasten, je zwei weitere Ausfertigungen  $V'_2$  und  $V''_2$  bzw.  $V'_3$  und  $V''_3$  von ihnen erzeugen und den Teilen  $S$  von  $V'_0$  bzw.  $V'_1$  ein Rückmeldesignal geben, die daraufhin je eine freie Stelle für  $V'_2$  bzw.  $V'_3$  in der Grundreihe suchen, die Energieleitung bis zu diesen Stellen weiterbauen,  $V'_2$  bzw.  $V'_3$  auf diese Stellen setzen,  $V''_2$  bzw.  $V''_3$  ihnen gegenüberstellen,  $V'$  und  $V'_3$  mit der Energieleitung verbinden und sowohl  $V'_0$  als auch  $V'_2$  und  $V'_3$  ein Startsignal geben usw. (Dabei wird angenommen, daß die von mehreren Automaten-Exemplaren eines Automaten  $V$  gegebenen Startsignale als ein einziges Startsignal wirken und daß die Frage der Zeitfolge des Suchens einer freien Stelle in der Grundreihe durch verschiedene Automaten-Exemplare mittels Präzedenzregeln gelöst wird.) Damit weist  $V'_0$  die Fähigkeit des Selbstreproduzierens auf.

4. Die Bemerkungen, die v. NEUMANN a. a. O. obigem Gedankengang über die Existenz eines selbstreproduzierenden Automaten hinzufügt, gelten auch für die hier angegebene Variante, wenngleich deren Funktionsweise der genetischen

Selbstreproduktion von natürlichen Lebewesen weniger ähnlich ist als im Falle des v. NEUMANNSchen Gedankengangs. Insbesondere läßt sich durch Gegenüberstellung eines beliebigen, aus lauter zur Menge  $M$  gehörigen Elementarbauteilen bestehenden Automaten  $X$ , außer  $V_o$ , mit dem Automaten  $V'_o$  erreichen, daß  $V'_o$ , neben der Selbstreproduktion, zusätzlich jedesmal auch noch eine Ausfertigung von  $X$  liefert und ein Reproduktionsfehler, der nur in diese zusätzliche Reproduktion von  $X$  eingeht, keine „lätale Mutation“ auslöst. Auch zeigt die oben angegebene, von den von v. NEUMANN vermuteten Vereinfachungen (die durch eine engere Simulation des natürlichen genetischen Vorgangs erzielt werden könnten) jedenfalls abweichende Vereinfachung des v. NEUMANNSchen Gedankengangs, daß die untere Grenze der Komplexität eines Automaten, bei welcher eine Selbstreproduktion möglich sein kann, etwas niedriger liegt, als man auf Grund des ursprünglichen v. NEUMANNSchen Gedankengangs vermutet hätte.