



---

**Title:** Über sich selbst reproduzierende Systeme  
**Author(s):** Konrad Zuse  
**Date:** 1967  
**Published by:** Konrad Zuse Internet Archive  
**Source:** Document - ZIA ID: 0073

---

The Konrad Zuse Internet Archive preserves and offers free access to the digitized original documents of Konrad Zuse's private papers and to other related sources.

The Konrad Zuse Internet Archive is a nonprofit service that helps scholars, researchers, students and other interested parties discover, use and build upon a wide range of content in a digital archive. For more information about the Konrad Zuse Internet Archive, please contact [zusearchive@zib.de](mailto:zusearchive@zib.de).

---

Your use of the Konrad Zuse Internet Archive indicates your acceptance of the Terms & Conditions of Use (<http://zuse.zib.de/tou>) including the following license agreement. If you do not accept the Terms & Conditions of Use you are not permitted to use the material.

This work by Konrad Zuse Internet Archive is licensed under a  
Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported License  
(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>).  
Based on a work at <http://zuse.zib.de>



**Attribution (BY)** - You must attribute the work in the manner specified by the author or licensor (but not in any way that suggests that they endorse you or your use of the work). Attribute with "Konrad Zuse Internet Archive (<http://zuse.zib.de>)".

**Noncommercial (NC)** - You may not use this work for commercial purposes.

**Share Alike (SA)** - If you alter, transform, or build upon this work, you may distribute the resulting work only under the same or similar license to this one.

The usage of this document requires the consideration of possible third party copyrights, and might necessitate obtaining the consent of the copyright holder. The Konrad Zuse Internet Archive assumes no liability with respect to the rights of third parties. The Konrad Zuse Internet Archive is not responsible for the claims of any third party resulting from any infringement of copyright laws.

# Über sich selbst reproduzierende Systeme\*

On self-reproducing systems

Von K. ZUSE  
Hünfeld/Hessen

Elektron. Rechenanl. 9 (1967), H. 2, S. 57 - 64  
Manuskripteingang: 10. 3. 1967

Die Möglichkeiten sich selbst reproduzierender Systeme werden in erster Linie vom montage- und fertigungstechnischen Standpunkt aus untersucht. Rein schaltungsmäßig aufgebaute Systeme entsprechend John von Neumann dienen als Ausgangspunkt der Betrachtung. Vergleiche mit biologischen Systemen werden durchgeführt. Die Idee des reinen Nachbaues wird erweitert auf den Nachbau in verschiedenen Maßstäben und Ausbaustufen. Hierauf baut sich die Idee der technischen Keimzelle auf. Beziehungen der Theorie der sich selbst reproduzierenden Systeme zur Automatentheorie und zur Theorie der sich selbst organisierenden Systeme werden kurz erwähnt. Die Bedeutung für die Raumfahrt wird besonders hervorgehoben.

The possibilities for self-reproducing systems are analysed mainly from the viewpoint of assemblage and production. Systems consisting of pure switching circuitry as described by John von Neumann form the basis of the considerations made. Comparisons are made with biological systems. The idea of pure reproduction is amplified by the reconstruction at variable scales and perfection levels. This forms the basis for the „technical germ cell“. Relations between the theory of selfreproducing systems, the automata theory and the theory of self-organising systems are briefly discussed. Finally, attention is drawn to the impact of self-reproducing systems on space exploration.

---

\*ZIA 0073. ZuP 038/008. Version 1, Abbildungen fehlen. Durchgesehen von R. Rojas, G. Wagner, L. Scharf

Der Gedanke sich selbst reproduzierender Einrichtungen (Maschinen, Werkzeuge, Fabriken) ist schon verschiedentlich ausgesprochen worden. Im folgenden sollen hierzu einige Ideen entwickelt werden und auf die wirtschaftliche Bedeutung solcher Systeme hingewiesen werden. Ein materielles System, das sich selbst nachzubauen in der Lage ist, besteht im wesentlichen aus Fertigungseinrichtungen. Da der Nachbau automatisch (sich selbst reproduzierend) erfolgen soll, basiert das gestellte Problem somit auch auf der Automation von Fertigungseinrichtungen. Nach dem heutigen Stand der Technik sind zunächst mehr Verfahrenseinrichtungen der Vollautomation zugänglich. Auch einige sehr spezielle Fertigungsbetriebe sind schon voll automatisiert. Im wesentlichen erstreckt sich bei Fertigungseinrichtungen die Automation jedoch auf einzelne Werkzeugmaschinen. Auch hier lassen sich verschiedene Stufen unterscheiden.

So sind z.B. bei allen spanabhebenden Werkzeugmaschinen die Werkstücke und Werkzeuge in bestimmter Weise gegeneinander zu bewegen. Im allgemeinen erfolgt dies durch Schlittenverschiebungen. Der erste Schritt ist dabei das Erreichen einer bestimmten Position (Positionierung). Der nächste Schritt ist das gleichmäßige Durchfahren einer bestimmten Strecke (Streckensteuerung), und die steuerungstechnisch schwierigste Aufgabe ist die Bahnsteuerung, bei der beispielsweise durch eine Fräseinrichtung beliebige Formen hergestellt werden können (Bild 1). Die Einspannung der Werkstücke und das Einsetzen der Werkzeuge erfolgt dabei im allgemeinen noch von Hand. Heute werden bereits einige Werkzeugmaschinen angeboten, bei denen auch diese Vorgänge automatisiert sind. Insbesondere in stark spezialisierten Betrieben wird der gesamte Transport der Werkstücke und ihre Zu- und Abführung von den einzelnen Maschinen in die Automation mit einbezogen. Bild 2 zeigt einen Überblick über einen automatisierten Betrieb. Wir wollen in Anlehnung an die Ausdrucksweise der Datenverarbeitungstechnik von Eingabe und Ausgabe sprechen. Auch wenn der Werkzeugwechsel in die Automation mit einbezogen wird, liegt doch der Reparaturdienst einschließlich der Ersatzteilmontage außerhalb der Automation.

Abbildung 1: Schema der Automatisierung einer einzelnen Werkzeugmaschine. Normalerweise beschränkt auf Positionierung, Streckensteuerung und Bahnsteuerung. Zuführung von Werkstück und Werkzeug von Hand.

Abbildung 2: Die Automatisierung eines Betriebes erstreckt sich vom Halbfabrikate- und Rohmaterial-Lager über die Fertigung bis zum Fertigteillager (1). Der Werkzeugfluß und -Wechsel kann in die Automation einbezogen sein (11) oder nicht. Reparatur und Ersatzteilfluß liegen außerhalb der Automation.

Bild 3 zeigt das Schema eines universellen Betriebes, welcher derartig vielseitig eingerichtet ist, daß er Halbfabrikate, Werkzeuge und Ersatzteile selbst herstellen kann. Wir entfernen uns bei dieser Idee bereits vom heute in der Industrie

Üblichen. Nach dem heutigen Stand der Technik müßte ein solcher Betrieb außerordentlich umfangreich sein.

Abbildung 3: Ein Universalbetrieb könnte im Prinzip Ersatzteile, Werkzeuge und Halbfabrikate selbst herstellen. Nur Rohmaterial brauchte angeliefert zu werden. Die Bereitstellung der Produktionsmittel selbst ist jedoch Sache der Außenwelt.

Der Sinn dieses Aufsatzes ist es jedoch nicht, den heutigen Zustand zu demonstrieren, sondern prinzipielle Möglichkeiten aufzuzeigen. In Bild 3 besteht also die Eingabe nur noch aus Rohmaterial und Energie, während verschiedene Produkte ausgegeben werden können. Voll zur Außenwelt gehört die Herstellung und der Aufbau der Produktionsmittel selbst, also im wesentlichen der Bau der Fabrikgebäude, die Einrichtung in Form von Maschinen usw. und die zugehörige Installation.

Wenn wir aber an dem Gedanken des universellen Betriebes festhalten, so ließe sich ein Betrieb vorstellen, der in der Lage ist, seine eigenen Produktionsmittel nachzubauen und zu einer neuen Fabrik bzw. Werkstatt zu montieren. Bild 4 zeigt das Schema eines solchen Betriebes. Eingegeben werden jetzt nur noch Rohmaterial und Energie. Dabei könnte im Prinzip auch die Energie noch in eigenen Kraftwerken aus Rohmaterial (Öl) hergestellt werden, falls der Produktionsprozeß so universell ist, daß auch die Möglichkeit der Produktion von Kraftwerken besteht.

Abbildung 4: Ein Universalbetrieb könnte aber auch sich selbst nachbauen. Bedingung ist, daß er bis auf die Anlieferung von Rohmaterial und Energie voll autark ist.

An dieser Stelle wollen wir einen Seitenblick auf unsere große Lehrmeisterin, die Natur, werfen und feststellen, daß die organische Zelle in idealer Weise einen solchen Betrieb darstellt (Bild 5).

Abbildung 5: Die organische Zelle stellt einen Universalbetrieb entsprechend. Bild 4 dar. An Hand der in den Chromosomen festgelegten Erbinformation erfolgt der Aufbau einer neuen Zelle völlig autark. Die Zelle verfügt über eigene Kraftwerke (Mitochondrien), streifengesteuerte Werkzeugmaschinen (Ribosomen) usw. Die zugeführten Rohmaterialien müssen jedoch zum Teil hochgezüchtete Spezialstoffe sein (Eiweiß).

Anhand der in den Chromosomen festgelegten Erbinformation erfolgt der Aufbau einer Zelle völlig autark. Die Zelle verfügt über eigene Kraftwerke (Mitochondrien) und befehlsfolgend gesteuerte Werkzeugmaschinen (Ribosomen) usw. Die zugeführten Rohmaterialien müssen jedoch zum Teil hochgezüchtete Spezialstoffe

sein (Eiweiß). Dies alles nimmt in der organischen Zelle überdies einen außerordentlich geringen Raum ein, welcher kleiner ist, als die feinsten Einzelteile, die wir in der Technik verwenden. Der enorme Vorsprung der Natur kann uns also als Ansporn dienen, ein Projekt, welches zunächst dem Stand der Technik nach absurd erscheint, weiterzuverfolgen.

Die Idee einer sich selbst reproduzierenden Fabrik ist nach dem heutigen Stand der Technik zwar noch nicht zu verwirklichen. Praktisch ergibt erst die Verflechtung einer gesamten Volkswirtschaft ein solches autarkes System (Bild 6). Dabei ist innerhalb der Volkswirtschaft eines einzelnen Staates dieses Ziel mit wirtschaftlichen Mitteln kaum erreichbar (wirtschaftlich autarker Staat). Vielmehr haben wir heute den Fall, daß erst die Verflechtung der Gesamtwirtschaft globaler Wirtschaftsgebiete solche Systeme ergibt.

Abbildung 6: In der heutigen Industrie ergibt erst die Verflechtung einer ganzen Volkswirtschaft ein autarkes System.

Wir wollen nun zunächst rein theoretisch untersuchen, wie sich selbst reproduzierende Systeme aussehen müßten und welche Gesichtspunkte dabei zu beachten sind. Bild 7 zeigt das allgemeine Schema einer solchen Anlage. Die Eingabe besteht aus Material, Energie und Information. Die Eingabe von Energie kann, wie schon gesagt, bei Vorhandensein eigener Kraftwerke in Form von Rohmaterial erfolgen. Die Zuführung von Informationen für die nachzubauenden Systeme kann ebenfalls entfallen, wenn in den Systemnachbau die Weitergabe von Informationen eingeschlossen ist. Wir wollen noch den Begriff des 'Rahmens' einführen. Dieser stellt die Umwelt dar, innerhalb deren die Systeme lebensfähig sind. Hierzu gehören alle äußeren Einrichtungen, welche die Eingabe technisch ermöglichen, ferner gewisse vorbereitete Einrichtungen zur Aufnahme der nachgebauten Systeme, beispielsweise ein vorbereitetes Fundament, auf dem die nachzubauenden Einrichtungen zu montieren sind. Im Extremfall müßte dieser Rahmen natürlich auch in den Nachbau eingeschlossen sein. Jedoch empfiehlt es sich bei den weiter unten besprochenen einfachen Startsystemen, einen solchen Rahmen vorauszusetzen. Zu diesem Rahmen kann man auch die Einrichtungen zur Energieversorgung usw. rechnen.

Abbildung 7: Start mit Produktionssystem I. Dieses produziert System II usw. Material, Energie, Produktions- und Information werden zugeführt. Die Zuführung von Energie kann entfallen, wenn das Produktionssystem eigene Kraftwerke enthält. Die Zuführung von Information kann entfallen, falls mit dem Systemnachbau Information weitergegeben wird. Der Rahmen stellt die Umwelt dar, die bestimmte Voraussetzungen erfüllen muß.

Wir haben dann in Bild 7 ein Startsystem 1 mit Fertigung und Kreislauf für Ei-

genverbrauch, welches ein System II gleicher Ausführung nachbaut. Damit ist selbstverständlich die Möglichkeit gegeben, im Prinzip beliebig viele Systeme nachzubauen. Es könnte nicht nur das System II wiederum ein System III produzieren, sondern System I könnte weitere Systeme Ila usw. produzieren, womit sich die Anzahl der Gesamtsysteme nach der Formel des organischen Wachstums vermehren würde und lediglich Begrenzungen durch die Eingabe und den Rahmen gegeben wären.

Man kann nun auch schon mit den heutigen technischen Mitteln ein solches System aufbauen, wenn man als Eingabe verhältnismäßig komplexe Teile zuläßt und auch den Rahmen verhältnismäßig leistungsfähig ausbaut. Diesen Gedanken hat der Mathematiker John von Neumann bereits entwickelt (Bild 8). Die Eingabe besteht aus einer Reihe verschiedener 'Einschübe', welche elektrische Grundschaltungen enthalten. Der Rahmen besteht aus einem Schaltbrett mit Steckbuchsen, in welche die Einschübe eingesetzt werden können, und weiteren Steckbuchsen oder Verdrahtungseinrichtungen, mit welchen die Verbindungen zu den einzelnen Einschüben hergestellt werden können. Dementsprechend gehören zum Rahmen auch noch eine Einschubsetzeinrichtung und eine Verdrahtungsvorrichtung. Die Steuerung dieser Einrichtungen erfolgt über Steuerleitungen, welche Bestandteil des Schaltbrettes sind und den Anschluß an die Rahmen erlauben, so daß das Programm für das Setzen der Einschübe und die Verdrahtung durch die aufgebauten Schaltungen selbst gegeben werden kann. Selbstverständlich muß diese Anlage erst einmal durch eine vorgegebene Startkombination in Gang gesetzt werden, welche so komplex sein muß, daß sie die Aufgabe der Steuerung des weiteren Aufbaues übernehmen kann. Dieses System ist nicht auf reinen Nachbau beschränkt, sondern es können im Prinzip aus der Startkombination heraus kompliziertere Systeme aufgebaut werden, ähnlich wie ja auch der Aufbau eines aus Zellen bestehenden Organismus mit einer Keimzelle beginnt und sich hieran der Aufbau komplizierterer Formen anschließt.

Abbildung 8: Sich selbst reproduzierende Anlage nach John von Neumann. Eingabe: Hochwertiges Material in Form von vorgefertigten Einschüben. Rahmen: Montageeinrichtungen und Schaltbrett. Die Anlage muß mit einer vorgegebenen Startkombination in Gang gesetzt werden. Das System ist leicht mit Computern simulierbar.

Das von John von Neumann entwickelte System ist theoretisch sehr interessant, praktisch jedoch nur von geringem Wert, weshalb es auch in dieser reinen Form bis heute eine Idee auf dem Papier geblieben ist. Außerdem lassen sich die theoretischen Folgerungen und die Möglichkeiten des Aufbaus komplizierterer Systeme aus einfachen Startsystemen leicht von Rechenmaschinen simulieren. Gewisse praktische Anwendungen finden diese Gedanken bei der heute bereits weit ausgebauten Berechnung von Schaltunterlagen für Computer durch Computer

selbst. Durch diese errechneten Unterlagen können wiederum automatische Verdrahtungsmaschinen gesteuert werden.

Damit ist eine heute bereits zu verwirklichende Möglichkeit gefunden, sich selbst reproduzierende Systeme aufzubauen. Dies erfolgt allerdings so, daß der Fertigungsprozeß, also der eigentliche Nachbauprozeß, verhältnismäßig einfach ist und daß verhältnismäßig komplizierte 'Nahrungsmittel' verwendet werden, die wiederum von verhältnismäßig komplizierten Montageeinrichtungen montiert werden.

In Bild 9 ist eine Übersicht über die möglichen Systeme mit verschiedenem technischen Niveau und verschiedenen Graden der Autarkie gegeben. Das oben besprochene System von John von Neumann liegt dabei als einfachste Form in der linken unteren Ecke; das System der gesamten Volkswirtschaft rechts oben. In dem Maße, wie die Autarkie zunimmt (von links nach rechts), geht die Eingabe von komplexen zu einfachen Teilen (Rohmaterial) über. Der Rahmen macht eine entsprechende Entwicklung vom komplexen zum einfachen durch. Dagegen werden die Fertigungsverfahren mit zunehmender Autarkie komplizierter. Bei den einzelnen Stadien kann noch verschiedenes technisches Niveau unterschieden werden. Dieser Begriff ist allerdings nicht klar formulierbar und soll hier auch nur zu einer rohen Unterscheidung verhelfen. Das technische Niveau ist beim John-von-Neumann-System insofern niedriger, als der Nachbau selbst lediglich in dem Setzen von Einschüben besteht. Dementsprechend ist in dem Schema in der rechten unteren Ecke die weiter unten zu besprechende mechanische Minimalwerkstatt aufgeführt; links oben eine Montagewerkstatt für kompliziertere Formen. Etwa unter 45° lassen sich Gebiete gleicher Schwierigkeit bilden. Links oben sind in dem Schema Gebiete unterschieden, für welche die Automation leicht, in absehbarer Zeit und in ferner Zukunft realisierbar erscheint.

Abbildung 9: Übersicht über mögliche Systeme mit verschiedenem technischen Niveau und verschiedener Autarkie

Wir wollen nun noch die kostenmäßige Seite solcher Systeme untersuchen. Betrachten wir ein System mit den Produktionsstellen  $P_1 - P_n$ , bei dem außer Rohmaterial auch Spezialteile eingegeben werden. Die Kosten der Ausgabe sind dann wesentlich von den Kosten dieser Eingabeartikel beeinflusst, selbst wenn der weitaus größte Teil des Materialflusses innerhalb des Systems autark erfolgt. In dem Augenblick, wo es gelingt, die letzte Lücke dieses Systems zu schließen, so daß nur noch Rohmaterial als Eingabe benötigt wird, liegt eine grundsätzlich neue Situation vor. Es ergibt sich ein nur noch vom Rohmaterial abhängiges Kostenniveau. Diese zunächst banal erscheinende Folgerung hat sehr wesentliche Konsequenzen. Für die Wirtschaftlichkeit einzelner Fertigungsverfahren und Geräte innerhalb eines solchen Systems im einzelnen ist jetzt nicht mehr die direkte Konkurrenzlage zur übrigen Volkswirtschaft maßgebend. Nur in bezug auf die Ausgabe des Gesamtsystems unterliegt dieses den Konkurrenzbedingungen. Die

Kosten des Rohmaterials bleiben aber die gleichen, ob für einen einzelnen Detailvorgang ein umständliches oder ein elegantes Verfahren angewandt wird, sofern das an sich schlechtere Verfahren nicht wesentlich mehr Rohmaterial benötigt als das elegantere. An einem Beispiel möge dies demonstriert werden:

Ein heutiger Maschinenbaubetrieb ist nur dann leistungs- und konkurrenzfähig, wenn er sich einrichtungsmäßig auf der Höhe der Technik befindet. So muß durch eine sorgfältige Arbeitsvorbereitung eine gute Ausnutzung aller Maschinen gewährleistet sein. Nach Möglichkeit müssen für jedes einzelne Teil diejenigen Maschinen belegt werden, welche gerade dieses Teil am wirtschaftlichsten zu fertigen gestatten. Dies führt bei größeren Betrieben dazu, daß eine Reihe von Spezialmaschinen vorhanden ist. Ein Betrieb kommt nicht mit einem einzigen Drehbanktyp aus, sondern hat den verschiedenen Anforderungen entsprechend sehr spezialisierte Bänke, selbst wenn im Prinzip ein oder zwei Drehbanktypen genügen würden, um alte Dreharbeiten zu übernehmen. Diese Spezialisierung der Werkzeugmaschinen führt dazu, daß diese selbst sehr kompliziert sind und ihre Fertigung wiederum noch wesentlich kompliziertere Spezialgeräte erfordert usw.

Anders liegen die Verhältnisse in einem vollautomatisierten System. Die Auslegung des Maschinenparks kann hier auf wesentlich weniger Variationsmöglichkeiten beschränkt werden. Im Vergleich zu den hochgezüchteten Werkstatteinrichtungen der heutigen Industrie wären solche radikal vereinfachten Systeme zwar nicht konkurrenzfähig. Eine Drehbank, die zwar im Aufbau einfach ist, aber für den Fertigungsprozeß gegenüber üblichen Drehbänken die 10fache Zeit benötigt, hat im normalen Wirtschaftsleben nur Schrottwert. In einem in sich geschlossenen System jedoch kann sie große Bedeutung erlangen, denn nur durch radikale Vereinfachungen können sich selbst reproduzierende Systeme aufgebaut werden. Sind diese einmal lebensfähig, so hängt ihre Vermehrung nur noch vom zugeführten Rohmaterial ab. Der Gesichtspunkt der Konkurrenzfähigkeit im einzelnen fällt weg.

Wir kommen also zu folgendem Ergebnis:

Um beim heutigen Stand der Technik arbeitsfähige, in sich selbst geschlossene Spezialsysteme zu erhalten, müssen radikale Vereinfachungen durchgeführt werden.

Praktisch bedeutet das, daß wir den Mut haben müssen, mit Systemen zu beginnen, die zunächst nur die Bedeutung von Spielereien haben. Bild 10 zeigt das Schema eines mechanischen Systems, bei dem der Fertigungsprozeß nur aus Montage besteht. Es ist kombiniert mit einem System entsprechend Bild 8, wobei die aufgebauten Schaltungen der Steuerung dienen. Hierauf kann verzichtet werden, wenn dem System von außen Informationen (Montageanweisungen) zugeführt werden. Die Eingabe des mechanischen Teiles besteht aus Teilen eines Metallbaukastens, der allerdings zu diesem Zweck erst besonders entwickelt werden müßte. Eine Montagevorrichtung erlaubt ihren eigenen Nachbau.



Abbildung 10: Einfaches, sich nachbauendes System, bei dem der Fertigungsprozeß nur aus Montage besteht.

Der nächste Schritt wäre nun der, den Produktionsprozeß von der Montage auf einfache formgebende Prozesse zu erweitern (Bild 11). Dies kann wiederum auch in Stufen erfolgen, wobei zunächst die spanabhebende Bearbeitung in mehreren Stufen, z.B. Sägen, Bohren, Gewindeschneiden, Drehen usw., eingeführt wird. Das Startsystem ist dann eine Anlage entsprechend Bild 10, welche die weiteren Anlagen montiert. Bei den späteren Systemen wird der Fertigungsprozeß dann komplizierter, jedoch können die zugeführten Materialien einfacher sein, da aus Profilen, Platten usw. die Einzelteile des Materials baukastenmäßig selbst gefertigt werden.

Abbildung 11: Eine Montageanlage entsprechend Bild 13 baut stufenweise technisch komplexere Anlagen auf. Im Beispiel: Erweiterung auf einfache spanabhebende Verformung.

Bild 12 zeigt ein Schema weiterer Entwicklungsmöglichkeiten. Die Fertigung wird dabei immer komplexer und führt von der Montage über spanabhebende Bearbeitung, Werkzeugherstellung, Bau von Steuerungseinrichtungen und Bau von Meßgeräten zu autarken Systemen. Selbstverständlich müssen bei allen diesen Vorgängen radikale Vereinfachungen in der Normung der Einzelteile durchgeführt werden. Zu beachten ist dabei noch, daß die Startsysteme und weitere Zwischensysteme lediglich Übergangsformen darstellen, welche nur eine kurze Lebensdauer zu haben brauchen. Dies erleichtert ihre Konstruktion erheblich. Ist ein solches System erst einmal geschaffen, so ergeben sich von hier aus interessante weitere Entwicklungsmöglichkeiten.

Abbildung 12:

Es sind z.B. Entwicklungslinien denkbar, die von Systemen geringer Genauigkeit zu solchen höherer Genauigkeit führen, wobei ein grobes System sich nicht einfach selbst nachbaut, sondern ein feines System erzeugt. Selbstverständlich ist hierbei eine Reihe technologischer Gesichtspunkte zu beachten. Es dürfte nach dem heutigen Stand der Forschung die Frage nicht einfach zu beantworten sein, ob überhaupt und wie weit ein solcher Prozeß technisch möglich ist.

Eine andere Entwicklungsmöglichkeit ist die von Systemen, welche in ihren einzelnen Nachbaustadien verschiedene Maßstäbe durchlaufen. Dies kann beispielsweise so erfolgen, daß ein System sich selbst nicht im Maßstab 1 : 1, sondern 1 : 2 nachbaut. Dieses zweite System baut wiederum einen verkleinerten Nachfolger usw. Selbstverständlich liegen auch hier technologische Grenzen vor. Ein solcher

Prozeß ist sicher nicht beliebig weit fortzusetzen. Bei kleineren Maßstäben liegen andere technische Bedingungen vor. So wird es kaum möglich sein, etwa magnetische Steuerungseinrichtungen, welche bereits Spulen mit sehr feinen Drähten enthalten, noch wesentlich weiter zu verkleinern. Von einer gewissen Stufe ab müßten dann grundsätzlich andere Wege gegangen werden, etwa der Übergang zu hydrodynamischen Steuerelementen. Es haben bei kleinen Systemen andere physikalische Gesetze Bedeutung als bei großen Systemen. Z.B. spielt das Eigengewicht bei kleinen Systemen kaum eine Rolle, dagegen aber die Adhäsion eine sehr wesentliche. Verkleinerungsfähige Systeme müßten in der Größenordnung ihrer Teile einigermaßen homogen sein. Werkzeugmaschinen, die z.B. in ihren Meßeinrichtungen bereits in bezug auf Feinheit an die technischen Grenzen gehen, können nicht mehr maßstabsgerecht verkleinert werden.

Die dabei angeschnittenen Fragen sind technisch äußerst interessant. Es dürfte bis heute kaum systematisch untersucht worden sein, welche minimalen Ausmaße z.B. Bohrer oder Leitungsdrähte haben können. Diese Dinge sind ja auch bisher nur aus der Sicht der 'Makrotechnik' heraus gesehen worden. Das heißt, wir haben heute noch keinen 'Mikro'-Fertigungsprozeß, der es gewissermaßen mit einer automatischen Fabrik unter dem Mikroskop erlaubt, sehr feine Werkzeuge herzustellen. Die heutigen Mikrowerkzeuge müssen mit Makrowerkzeugen hergestellt werden.

Eine entsprechende Entwicklung kann in Richtung größerer Maßstäbe oder Systeme erfolgen. Hierbei erfolgt eine stufenweise Anpassung an die bestehenden industriellen Anlagen, nicht nur in bezug auf die Größe, sondern auch in bezug auf die Mannigfaltigkeit der genormten Teile.

Ein Startsystem führt über ein komplexeres System (Bild 11 und 12) zu einem verkleinerten komplexen System. Von hier aus führt der Weg einmal entsprechend Bild 12 zur Industrieautomation und zum anderen zur Mikrotechnik. Hierunter werden alle technischen Möglichkeiten und Systeme verstanden, die sich aus dem Verkleinerungsprozeß automatischer Fertigungseinrichtungen ergeben. Eine wesentliche Folgerung der Mikrotechnik wäre die Werkstatt unter dem Mikroskop. Wir können heute noch nicht voraussehen, wie weit dieses Ziel erreichbar ist, da zunächst umfangreiche Forschungen in dieser Richtung geleistet werden müssen.

In gewisser Hinsicht ist die Entwicklung einer Mikrotechnik heute bereits im Gange.

Unter dem Namen „Mikro-Elektronik“, „Festkörper-Physik“, „integrierte Schaltungen“, „Mikro-Modultechnik“ usw. laufen Fertigungs- und Schaltungstechniken, welche den Bau sehr kleiner Schaltungen zum Ziel haben. Man geht hierbei allerdings nicht den Weg, die traditionelle Fertigungstechnik von Schaltelementen wie Dioden, Transistoren usw. auf kleinere Maßstäbe zu übertragen, sondern wählt grundsätzlich neue Verfahren wie Aufdampfen, Ätzen und dergleichen.

Trotz aller Erfolge dieser neuen Verfahren darf nicht vergessen werden, daß diese in der Makrotechnik verankert sind und prinzipielle Grenzen haben. Auch diese Technik benötigt gewisse Teile wie Schablonen, welche in traditioneller Technik gefertigt werden müssen. Außerdem bereitet der Anschluß der Mikroelektronik an die makrotechnischen Schaltelemente Schwierigkeiten. Hier könnte die eigentliche Mikrotechnik im oben erwähnten Sinn neue Perspektiven eröffnen. Eine voll im kleinen arbeitende Fertigungs- und Montagetechnik kann die heutige Mikrotechnik wesentlich ergänzen.

Eine weitere Konsequenz dieser Mikrowerkstatt ist die technische Keimzelle. Diese stellt eine technische Minimalform einer arbeitsfähigen Zelle dar, welche weitere Systeme zu produzieren in der Lage ist. Von einer solchen Keimzelle aus können durch Vergrößerung und Erweiterung der Variationsbreite wieder andere Systeme entwickelt werden. Bei konsequenter Verfolgung dieser Idee müßte es - allerdings in einem sehr reifen Stadium der Entwicklung - möglich sein, ganze Fabriken aus Keimzellen, lediglich unter Zuführung von Rohmaterial, entstehen lassen. Wir haben uns dann weitgehend dem großen Vorbild der Natur genähert.

Bei den Systemen und Entwicklungsmöglichkeiten entsprechend den Bildern 10 – 13 wurden hauptsächlich die fertigungstechnischen Seiten betrachtet.

#### Abbildung 13:

Eine wesentliche Voraussetzung für die Durchführbarkeit derartiger Entwicklungen ist die Lösung des damit zusammenhängenden Informations- und Steuerungsproblems. Wir sahen bereits, daß in der Natur bei jeder Neubildung einer Zelle die Information für den gesamten Aufbauplan des biologischen Systems mitgegeben wird. Vom Standpunkt unserer Technik gesehen, bedeutet dies eine große Verschwendung und ist nur durch die unvergleichliche Feinheit der von der Natur verwendeten Bauelemente erklärbar. Auch die Steuerungsimpulse werden rein intern entwickelt. Der Zellteilungsprozeß läuft weitgehend autark ab. Allerdings übernehmen gewisse „Botenstoffe“ wie Enzyme und Fermente Steuerungsfunktionen. Es kann jedoch nicht davon die Rede sein, daß von einem zentralen Steuerwerk aus ins einzelne gehende Befehle an die einzelnen „Montageplätze“ gehen, um den Aufbau zu steuern.

Bei technischen Einrichtungen wären wahrscheinlich andere Verfahren vorteilhafter. Man könnte im Prinzip die ganze informationstechnische Seite einschließlich der Entwicklung der Steuerungsimpulse an die Montageeinrichtungen, Werkzeugmaschinen usw. von dem aufzubauenden System isolieren und diesem von außen zuführen. Selbstverständlich hat dieses Verfahren technische Grenzen, insbesondere bei der Verkleinerung des Systems. Außerdem fragt es sich, wieweit man dann noch von „sich selbst nachbauenden Systemen“ sprechen könnte.

Ähnlich liegt der Fall bei der Weitergabe von Urmaßen. Es handelt sich dabei

nicht ohne weiteres um eine Informationsweitergabe; es sei denn, man baut das Urmaß auf echten, reproduzierbaren, natürlichen Maßen auf, z.B. einer charakteristischen Wellenlänge. Dies würde aber sehr komplizierte Einrichtungen zum Ableiten eines solchen Maßes erfordern.

In der Natur scheinen wir keine direkte Weitergabe von Urmaßen zu haben. Das ganze System des funktionsfähigen Zellhaufens ist ja bereits auf Naturmaßen aufgebaut, die sich aus den natürlichen Größen der Eiweißmoleküle ergeben. Die Programmierung des Aufbaues erfolgt sicher nicht durch Festlegung von Maßen, sondern in bezug auf Menge, Reihenfolge und Anordnung der Bauelemente.

Wir sind in der heutigen Technik völlig auf die ordnungsgemäße Vermaßung eines jeden einzelnen Teiles eingestellt. Es könnte durchaus sein, daß bei sich selbst aufbauenden Systemen, insbesondere solchen mit stufenweiser Maßstabänderung, die absolute Vermaßung durch eine relative ersetzt werden muß. Dies bedeutet z.B. bei technischen Keimzellen, daß die praktischen Maßsysteme der einzelnen Stufen von den theoretischen abweichen können. Startet man mit einem System großen Maßstabes und geht über stufenweise Verkleinerung wieder stufenweise zur Vergrößerung über, so wird das sich ergebende System Maßstabsdifferenzen gegenüber dem Startsystem aufweisen. Ein besonderes Anpassungsprogramm könnte jedoch nach Zuführung eines gegebenen Urmaßes ein diesem angepaßtes System entwickeln.

Ähnliche Probleme wie bei der Übertragung eines Urmaßes liegen bei der Übertragung eines „Urwinkels“, nämlich des Rechten Winkels, vor. Allerdings ist dieser ein „echtes Urmaß“ und stets nachkonstruierbar (z.B. durch ein rechtwinkliges Dreieck mit den Seitenverhältnissen 3:4:5).

Auch die Weitergabe eines Zeitmaßstabes könnte eine Rolle spielen, sofern die Systeme eigene Takteinrichtungen aufbauen. Es sei noch ein Seitenblick auf andere Disziplinen und Theorien geworfen, die im Zusammenhang mit sich selbst nachbauenden Systemen Bedeutung haben könnten. Hierzu gehören die Automatentheorie und die Theorie der sich selbst organisierenden Systeme.

Die Automatentheorie ist eine sehr abstrakt aufgezugene Lehre, welche zum Ziel hat, das Verhalten von mehr oder weniger automatisch arbeitenden Geräten und Systemen intern und extern in bezug auf Ein- und Ausgabe formal zu untersuchen. Sie eignet sich z.B. sehr gut zur Untersuchung von Schaltungen, Netzwerken und dergleichen. Man strebt möglichst mathematische Formulierungen an und geht wenig auf spezielle konstruktive Probleme ein. Diese Formulierungen ermöglichen es auch, die Theorie der Formelsprache als Teil der Automatentheorie zu betrachten.

Somit ist die Automatentheorie im wesentlichen eine Angelegenheit der Mathematiker und weniger der Ingenieure. Ohne weiteres könnte die Theorie der sich selbst nachbauenden Systeme, so wie sie von John von Neumann skizziert wurde,

ein Bestandteil der Automatentheorie werden. Dieses wäre jedoch vom praktischen Standpunkt aus nicht die interessanteste Entwicklung. Sobald es sich um echten Nachbau im Sinne von „Fertigung“ handelt, haben zunächst die konstruktiven Probleme den Vorrang. Schon das Teilproblem der Montagevorrichtung, die sich selbst aus gegebenen Teilen aufbauen kann, wirft eine Fülle von rein konstruktiven Problemen auf, die in diesem Aufsatz nicht im einzelnen behandelt werden können.

Sicher könnte man auch solchen konstruktiven Gesichtspunkten ein mathematisches Gerüst unterlegen. Die Automatentheorie benutzt z.B. bei der Untersuchung formaler Sprachen Begriffe der Mengenlehre und der Gruppentheorie, um Wörter als Folgen von Zeichen und Sätze als Folgen von Wörtern, die einer Syntax unterworfen sind, zu definieren. Ebenso könnte man bei konkreten Gegenständen, wie Montagevorrichtungen, Klassen und Mengen von Einzelteilen formulieren, die entsprechend syntaktischen Gesetzen zusammengesetzt werden können. Die Mengen der Einzelteile sind durch Prädikate gekennzeichnet wie „Profile mit Löchern genormter Größen in diskreten Punkten“. Der Syntax würden die konstruktiven Gesichtspunkte bei der Montage entsprechen. In diesem Sinne wäre eine Erweiterung der Automatentheorie durch rein konstruktive Gesichtspunkte denkbar. Wieweit hierdurch allerdings die Arbeit befruchtet werden könnte, kann noch nicht übersehen werden. Vielleicht ist dies erst in einem sehr späten Stadium der Entwicklung zu erwarten.

Die Theorie der sich selbst organisierenden Systeme hat in den letzten Jahren erhebliche Bedeutung erlangt [2].

An ein solches System könnte man denken, wenn man von den lediglich sich selbst nachbauenden Systemen zur Keimzelle übergeht, welche ja aus einem Startsystem heraus komplexe Systeme aufbaut. Hier entsteht von selbst aus einer einfachen Organisation eine komplizierte. Jedoch findet dieser Aufbau, soweit er in diesem Aufsatz betrachtet wurde, ohne Einwirkung von außen statt. Die Verbindung mit der Außenwelt besteht lediglich in der Aufnahme von „Nahrungsmitteln“, wobei vorausgesetzt wird, daß das ganze nach einem starren Programm abläuft und die benötigten Materialien stets zum richtigen Zeitpunkt an der vorgeplanten Stelle zur Verfügung stehen. Die in der Literatur behandelten sich selbst organisierenden Systeme enthalten aber im allgemeinen gerade den Einfluß der Außenwelt als wesentliches Element der Entwicklung. Das System soll sich den willkürlich veränderten Umweltbedingungen selbsttätig anpassen. Es sucht einen der geänderten Situation angepaßten neuen Gleichgewichtszustand. Lernprozesse spielen dabei eine wesentliche Rolle. In diesem Sinne wäre der Aufbau eines Organismus aus einer Keimzelle heraus kein sich selbst organisierendes System, sondern lediglich ein starr vorgeplanter Ablauf. Allerdings könnte man sich vorstellen, daß die Theorie der Keimzelle im Sinne sich selbst organisierender Systeme erweitert werden könnte. Dieses wäre aber mehr eine Angelegenheit der

software als der hardware, d. h. eine Angelegenheit des zugleich mit den konstruktiven Elementen aufzubauenden steuernden Systems. Am besten eignet sich hier wieder der rein schaltungsmäßige Aufbau von Systemen.

Zu den sich selbst organisierenden Systemen zählt man auch die sich selbst reparierenden Systeme. Auch dieses Problem ist bisher nur schaltungsmathematisch behandelt worden [3]. Bei automatischen Montage- und Fertigungseinrichtungen spielt das Reparaturproblem selbstverständlich eine wesentliche Rolle. Man darf sich nicht der Illusion hingeben, daß bei solchen Systemen stets alles programmgemäß abläuft. Es gibt wohl noch keine automatische Fabrik, welche selbsttätig Reparaturen verrichtet, wohl aber gibt es bereits automatische Werkzeugwechselsvorrichtungen, welche abgenutzte Werkzeuge durch neue ersetzen. Die Frage ist hier, ob man die Standzeit eines Werkzeuges fest kalkulieren kann (Soll-Wert) oder ob man den Zeitpunkt des Wechsels von der tatsächlichen Abnutzung abhängig macht (Ist-Wert). Das erste Verfahren erfordert einmal eine sehr homogene Werkzeug- und Materialqualität, ferner eine hohe Zuverlässigkeit der Werkzeugmaschinen (kein falsches Anstellen des Werkzeuges) und schließlich eine gute Vorausberechenbarkeit der Standzeit. Es hat eine gewisse Verschwendung zur Folge, da die Standzeit aus Sicherheitsgründen an der unteren Grenze der möglichen Werte gewählt werden muß.

Das zweite Verfahren erfordert Meß- bzw. Meldeeinrichtungen, wodurch die Gesamtanlage erheblich komplizierter wird und eine starre Programmierung ausgeschlossen ist.

Für die hier betrachteten sich selbst aufbauenden Systeme ergibt sich folgendes: Faßt man zunächst nur die starre Programmierung ins Auge, so kommt nur das Verfahren der vorgewählten Standzeit infrage. Bei Vollautomation unter Einbeziehung der Werkzeugherstellung spielt die Frage des Aufwandes allerdings eine nicht so wesentliche Rolle wie in der heutigen Industrie. Es kann eine größere Verschwendung getrieben werden, indem sehr kurze Standzeiten gewählt werden.

Diese Vorausberechnung der Standzeit ist bei Werkzeugen noch am leichtesten möglich. Werkzeugwechsel ist aber in der üblichen Auffassung noch keine eigentliche Reparatur. In einem heutigen System von mehr oder weniger automatischen Fertigungs- und Montagevorrichtungen erfolgt die Überwachung der Einrichtungen in bezug auf ihre Funktionsfähigkeit durch menschliche Arbeitskräfte, welche evtl. durch Meldeeinrichtungen und Meßgeräte unterstützt werden. Defekte Maschinen werden durch den Menschen stillgelegt und nach Möglichkeit sofort durch andere ersetzt. Die defekte Maschine wird in einer besonderen Reparaturwerkstatt untersucht und die mangelhaften Teile werden nach Möglichkeit ersetzt. Die Einbeziehung dieses Reparaturdienstes in die Vollautomation würde einen außerordentlichen Aufwand bedeuten. Die Feststellung der Ursache des Versagens einer Maschine (z.B. gebrochenes Zahnrad), der Ausbau des defekten Teiles und sein Ersatz wären wesentlich aufwendiger als der Neubau der ganzen Maschine.

Hinzu kommt, daß z.B. bei den besprochenen Systemen, welche sich aus Keimzellen entwickeln, die meisten Einrichtungen nur kurze Übergangsstadien bilden und somit auch nur eine kurze Lebensdauer haben. Dies vereinfacht einmal die Konstruktion (Fortfall von Härtingen, geringe Genauigkeit usw.) und zum anderen wird dadurch die Wahrscheinlichkeit, daß ein Teil sich vorzeitig abnutzt, entscheidend herabgesetzt.

Redundanz im Sinne von verschwenderischem Einsatz von zahlreichen, jedoch einfachen Vorrichtungen, ist auch hier das Mittel, um die Systeme lebensfähig zu halten.

Insbesondere für die Raumfahrt kann die beschriebene Entwicklung in verschiedener Hinsicht entscheidende Bedeutung erlangen. Einmal kann durch die damit verbundene Förderung der allgemeinen Industrieautomation die Herstellung der sehr teuren Raketen und der zugehörigen Steuerungseinrichtungen wesentlich verbilligt werden. Zum anderen erlaubt die Mikrotechnik die Herstellung von Bordgeräten sehr kleinen Ausmaßes, was in der Raumfahrt von entscheidender Bedeutung ist.

Schließlich könnte die, wenn auch erst nach sehr langer Entwicklung, zu erwartende Möglichkeit der technischen Keimzelle ganz neue Perspektiven eröffnen: Hochgezüchtete Keimzellen könnten auf Weltraumkörper abgeworfen werden, welche selbsttätig und automatisch zu Industrieanlagen „auskristallisieren“. Man würde also Industrieanlagen „pflanzen“. Dabei würde man genau wie ein Gärtner vorgehen und die gepflanzte Anlage zunächst „düngen“, d. h. mit hochgezüchtetem Rohmaterial versehen, bis das wachsende System so weit ist, die in der Umgebung der Abwurfstelle vorhandenen Materialien selber für den weiteren Aufbau zu verwenden. Diese Perspektive mag heute noch etwas phantastisch erscheinen, jedoch müssen wir den Mut haben, auch solche Möglichkeiten in unsere Betrachtungen einzubeziehen.

## Literatur

- [1] K. Zuse, Gedanken zur Automation und zum Problem der technischen Keimzelle. Unternehmensforschung. Band I (1956/57), Heft 4, Seite 160.
- [2] Heinz V. Foerster, George W. Zopf, Jr., Principles of Self-Organization. (International Tracts in Computer Science and Technology and Their Application, Volume 9.). Pergamon Press, Oxford. London. New York. Paris 1962.
- [3] Lars Lofgren, Self-Repair as the limit for automatic error correction. Principles of self-Organization (International Tracts in Computer Science and Technology and Their Application. Volume 9), Seite 181. Pergamon Press. Oxford/London/New York/Paris 1962.