

SELBSTORGANISATION IN PROZESSEN - AUS SYSTEMTHEORETISCHER SICHT

Willy Schweiger, Christoph Heynen

Kurzfassung

Komplexe Prozesse - Produktentwicklungsprozesse sind sicher solche - können nicht mehr durch starre Strukturen modelliert werden. Strukturflexibilität ist nur durch Selbstorganisation erreichbar. Zur Selbstorganisation können sogenannte Leitwerte die Strategien für einen Strukturwandel bilden. Der Beitrag skizziert einige Aspekte aus systemtheoretischer Sicht. Ein Einsatz für praktische Anwendungen ist allerdings noch nicht in Sicht, er bedarf weiterer Untersuchungen.

1 Einleitung

Der vorliegende Beitrag befaßt sich mit der *Selbstorganisation in Prozessen*. Der Begriff Prozeß kann dabei so weit wie möglich aufgefaßt werden. Demnach könnte es sich um physikalische Prozesse, Simulationsprozesse, Produktionsprozesse, Geschäftsprozesse, gesellschaftliche Prozesse, im besonderen um Entwicklungsprozesse handeln. Das entscheidende Kriterium ist, daß diese Prozesse durch *Selbstorganisation*, allgemein auf äußere Einflüsse reagieren sollen.

Zur Modellierung von Prozessen steht eine Reihe von Werkzeugen zur Verfügung. Unter anderen sind dies Workflows einschließlich ad-hoc Workflows, Petri-Netze (PN) in verschiedenen Ausprägungen (deterministische oder stochastische PN, zeitabhängige PN, farbige PN mit attribuierten Markierungen, PN mit verschiedenen Warteschlangenstrategien, Prädikat/Ereignisnetze, deren Markierungen *individuelle Objekte* sein können), allgemeine Blockdiagramme usw. um nur einige zu nennen.

Die meisten dieser Prozeßmodellierungen haben einen gravierenden Nachteil: sie sind *topologisch starre* Strukturen, welche, einmal instantiiert, immer nur ein und denselben Prozeßablauf beschreiben. Mehr Flexibilität streben ad-hoc-Workflows an, welche prinzipiell in der Lage sein sollen, mehr oder weniger spontan auf sich ändernde Bedingungen zu reagieren [1]. Als Nachteil wird dabei der Umstand betrachtet, daß es sich bei den durch Workflows repräsentierten Teilprozessen nur um einfache Abläufe handelt. Durch diese Beschränkung werden aber gerade die in der Produktentwicklung relevanten Prozesse unzureichend erfaßt.

Die Antwort auf sich ändernde Bedingungen sind *topologisch veränderbare* Prozeßstrukturen, welche nur durch Selbstorganisation zu erreichen sind. Der vorliegende Beitrag versucht auf systemtheoretischer Basis einige Probleme bei der Modellierung derartiger Prozesse zu erfassen und Lösungsansätze zu skizzieren. Es wird sich allerdings schnell zeigen, daß noch ein weiter Weg bis zum praktischen Einsatz zurückzulegen sein wird. Ausgehend von der Automatentheorie zur Modellbildung von technischen Systemen [2] soll dargelegt werden, wie entsprechende Modifikationen dieses Automatenparadigmas zur Modellierung von selbstorganisierenden Prozessen herangezogen werden können. Systematische Modifikationen der kanonischen Automaten Gleichungen führen zur notwendigen Änderung der Struk-

turtopologie. Die Systematik dieser Veränderungen folgt dabei sogenannten Leitwerten, deren formale Beschreibung allerdings auf erhebliche Schwierigkeiten stoßen kann.

2 Das Automatenparadigma

Technische Systeme sind sogenannte Ein-Ausgabesysteme, welche von Massen-, Energie und Informationsflüssen durchsetzt werden. Entscheidend ist, daß kein reales System *trägheitslos*, also ohne Zeitverzug reagiert. Diese Tatsache führt dazu, daß in einem technischen System stets Rückkopplungen vorhanden sein müssen, welche für die Verzögerung verantwortlich sind. Bild 1 symbolisiert diesen Sachverhalt. Eine derartige Struktur wird als *endlicher deterministischer Automat* bezeichnet.

Die Ein-Ausgabeströme des technischen Systems werden beim Übergang zur Automaten-darstellung zu je einem Vektor X bzw. Y zusammengefaßt. Das "Innenleben" des Systems zeigt symbolisch die Rückkopplung in Form eines Verzögerungsbausteins (Delay oder inverser Integrationsoperator). Man bezeichnet dies auch als Gedächtnis des *endlichen* Automaten an vorangegangene Zustände.

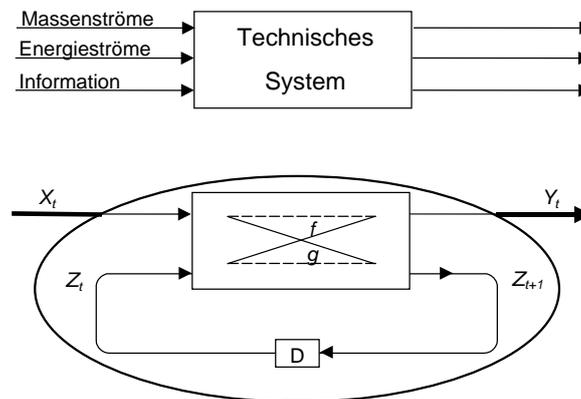


Bild 1 Technisches System und endlicher Automat

Die Endlichkeit des Automaten bedeutet, daß seine *Geschichte* nur eine endliche Zeit zurück reicht. Ein derartiger endlicher Automat ist neben seinen Ein-Ausgabevektoren durch seine beiden charakteristischen (kanonischen) Funktionen: f Überföhrungsfunktion (Zustandsfunktion) zur Beschreibung der inneren Zustände des Automaten und g Ergebnisfunktion (Verhaltensfunktion) definiert. Je nach Form dieser Funktionen können mit dieser Automatenbeschreibung sowohl zeitkontinuierliche als auch ereignisgesteuerte Modelle beschrieben werden. Man kann zeigen, daß für die beiden fundamentalen Ingenieurtheorien - die Mechanik einschließlich der Thermodynamik und die Elektrodynamik - kanonische Automatengleichungen angegeben werden können [2]. Damit kann das Automatenparadigma als Basis für eine umfassende Modellerstellung betrachtet werden. Der Automat erlaubt eine interdisziplinäre gleichlautende Beschreibung von Modellen und Prozessen.

In einer hierarchischen Einteilung von Systemen [3] bilden *strukturstarre* Automaten die einfachsten Strukturen. Bei diesen Systemen ändern sich weder die Systemstruktur noch deren Parameter. Eine Veränderung des Verhaltens (Ausgabevektor) bei Änderungen der Eingabe erfolgt nur über eine präjudizierte systeminterne Rückkopplung im Sinne einer Regelung. In einer nächst höhere Stufe sind die adaptiven Systeme angesiedelt. Ihre Kennzeichen sind sich adaptiv verändernde Systemparameter, jedoch unter Beibehaltung der Systemtopologie. Beide Arten sind nicht für die Beschreibung selbstorganisierender Prozesse geeignet. Deren Beschreibung erfordert in einer weiteren Komplexitätsstufe in jedem Falle einen *Struktur-*

wandel. Die Veränderung einer ursprünglichen Wirkstruktur setzt *Selbstorganisation* voraus [3]. Mit dieser Selbstorganisation einher gehend, ist eine erweiterte Festlegung der Systemgrenzen zwingend notwendig. Der sich selbst organisierende Automat muß *autonom* sein. Diese Autonomieforderung bedeutet, daß alle jene äußeren dynamischen Einflüsse, welche auf den Automaten einwirken, in die Modellbildung einbezogen werden müssen.

3 Qualitative Beschreibung von Selbstorganisation - Leitwerte

Bei strukturstarren Systemen werden Kriterien zur gezielten Beeinflussung des Systemverhaltens beim Reglerentwurf ein für allemal festgelegt. Man spricht von Gütekriterien (Gütefunktionalen), welche das künftige Verhalten des Reglers im gewünschten Sinne beeinflussen.

Sowohl bei adaptiven und erst recht bei sich selbst organisierenden Systemen müssen Kriterien vorhanden sein, welche eine dynamische Veränderung der Parameter und vor allem der Wirkstruktur in der gewünschten Richtung bewirken. Hier besteht die Einflußnahme grundsätzlich in einer Änderung der Zustandsfunktion (f) und/oder der Verhaltensfunktion (g). Während sich bei einem Verhaltenswandel das System im Kern nicht ändert, geht mit einer Änderung der Struktur der Zustandsfunktion eine grundsätzliche Systemveränderung einher. Die Zustandsfunktion ist der Kern des Systems und bestimmt seine Identität. Nach einer strukturellen Veränderung ist das System nicht mehr das alte; es hat seine Systemidentität verändert [3]. Es ist in erster Linie dieser Aspekt der Veränderung der Systemidentität, also des Veränderns der Zustandsfunktion, welcher für die hier interessierenden Prozesse in Frage kommt.

Es erhebt sich natürlich sofort die Frage, welche Kriterien - sie werden nach BOSSEL Leitwerte genannt [3] zur dynamischen Entwicklung von Selbstorganisation anwendbar sind und wie diese formalisiert werden können, um ein rechnerunterstütztes Prozeßmodell zu ermöglichen. Es wird sich zeigen, daß es mehrere Leitwerte sein werden, welche gleichzeitig berücksichtigt werden müssen, um die Systemexistenz nicht zu gefährden. Die Beschreibung dieser Leitwerte wird aber auch deutlich machen, daß ihre Formalisierung auf erhebliche Schwierigkeiten stoßen kann. Die weiteren Darlegungen zu diesen Leitwerten folgen direkt [3].

3.1 Der Leitwert *Existenz*

Ein System existiert im Rahmen seiner Identität, solange es seinem Zweck entsprechend funktioniert. Dies setzt voraus, daß sich seine Zustandsgrößen in gewissen Grenzen halten oder bewegen: $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$. Daraus wird der Leitwert *Existenz* abgeleitet. Dieser Leitwert führt zu Anforderungen an das System (interne Komponente) und seine Umwelt (externe Komponente):

- In der Systemumwelt dürfen keine Bedingungen auftreten, die z spontan aus dem sicheren Bereich bringen können, d.h. auch die Umwelteinwirkungen müssen sich in einem sicheren Bereich bewegen: $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$.
- Ist dies nicht der Fall, so muß das System über einen entsprechenden Schutz verfügen, der schädliche Umwelteinflüsse fernhält oder filtert.
- Die Systemstruktur selbst darf nicht zu existenzbedrohenden Zuständen führen.

3.2 Der Leitwert *Wirksamkeit*

Systemverhalten kostet immer Energie. Die Mindestanforderung der Energieeffizienz sollte in jedem Fall, mindestens über einen längeren Zeitraum zu einer positiven Bilanz führen. Kein System kann über längere Zeit mehr verbrauchen als einnehmen. Dies führt zum Leitwert *Wirksamkeit*:

- Die interne Systemstruktur (beschrieben durch die Zustandsfunktion f) muß eine wirksame Nutzung der für die Systemerhaltung und -entfaltung notwendigen und verfügbaren Ressourcen innerhalb der verfügbaren Zeit ermöglichen.
- Das äußere Verhalten des Systems $y = g(x,z,t)$ als Konsequenz von Umwelteinflüssen x und Systemzustand z muß wirksame Eingriffe in die spezifische Systemumwelt gestatten.

3.3 Der Leitwert *Handlungsfreiheit*

Im allgemeinen Fall wird die vom System wahrnehmbare Umweltvielfalt die Systemvielfalt bei weitem übersteigen. Der Leitwert *Handlungsfreiheit* soll es dem System ermöglichen, sich vor Überforderung durch die Umweltvielfalt zu schützen:

- Das System reagiert mit einer angemessenen Reaktion z aus seinem Zustandsrepertoire.
- Das System versucht über eine angemessene Verhaltensreaktion y aus seinem Verhaltensrepertoire Einfluß auf die Umwelt zu nehmen, so daß diese in einen Bereich verschoben wird, der mit der Systemvielfalt bewältigt werden kann.

3.4 Der Leitwert *Sicherheit*

Der Systemzustand darf nicht in kritischer Weise von nicht absehbaren Veränderungen der Umwelt abhängen. Der Leitwert *Sicherheit* soll dafür Sorge tragen. Die Reaktionen beziehen sich wiederum auf interne Prozesse des Systems oder auf gezielte Veränderungen seiner externen Umwelt:

- Weitgehende Abkopplung von instabilen Umweltfaktoren durch (teilweise) Isolierung, selektive Aufnahme oder Sättigungseffekte.
- Schaffung einer selbststabilisierenden Struktur (mit regelnden Rückkopplungen) und Absicherung gegen Umkippen in instabile Attraktionsbereiche.
- Abpufferung durch Speicher zum Auffangen von Überlasten und Überbrücken von Versorgungslücken.
- Entschärfung potentiell gefährlicher Bedrohungen aus der Umwelt. Dies ist gleichbedeutend mit einer Veränderung der Umwelteinwirkungen durch gezieltes Verhalten.
- Das Aufsuchen einer Umwelt mit höherer Sicherheit für das System. Das ist offensichtlich nur möglich, wenn die Umwelt eine räumliche Differenzierung aufweist.

3.5 Der Leitwert *Wandlungsfähigkeit*

Zur Erfüllung des Leitwertes *Wandlungsfähigkeit* stehen dem System grundsätzlich zwei Wege offen:

- Veränderung der Verhaltensfunktion $g(x,z,t)$, so daß bei gleichem Zustandsvektor z ein verändertes Verhalten resultiert, das mit den veränderten Umwelteinwirkungen x besser zurecht kommt.

- Veränderung der Zustandsfunktion $f(x,z,t)$, so daß sich aus dem den (veränderten) Umwelteinwirkungen x ein anderer (besser angepaßter) Zustandsvektor z ergibt.

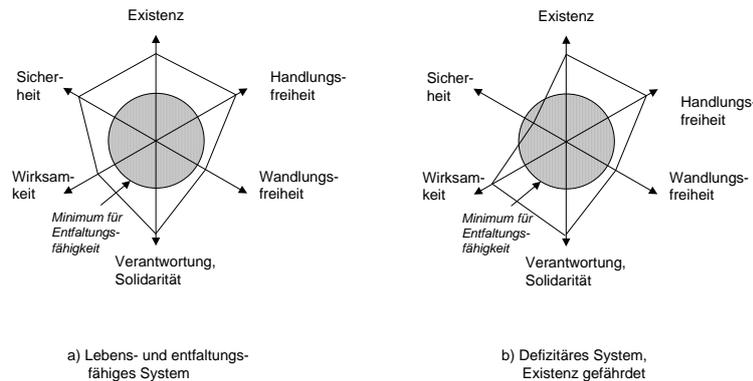


Bild 2 BOSSELScher Leitwertstern

3.6 Der Leitwert *Rücksichtnahme*

Ein System wird im allgemeinen auch auf das Verhalten anderer Systeme reagieren müssen. Diese Beachtung des Verhaltens anderer Systeme geschieht in der Regel selektiv. Dies führt zum Leitwert *Rücksichtnahme*, welcher die verschiedenen Partnersysteme der Umwelt mit unterschiedlichen Gewichtungen behandelt. Von *Rücksichtnahme* kann aber erst gesprochen werden, wenn die Beachtung des anderen Systems über die normale Berücksichtigung als einer von vielen Umweltfaktoren hinausgeht, wenn also die Systeminteressen des anderen Systems auch mit einer gewissen Gewichtung neben den eigenen berücksichtigt werden. Damit kommt das Problem der relativen Gewichtung der Interessen anderer - und damit die Ethik - ins Spiel, denn die relativen Gewichtungen können vom nackten Egoismus bis zum aufopfernden Altruismus reichen (in einer spieltheoretisch basierten Ethik wird gezeigt, daß letztlich nur Mischstrategien zu stabilen Zuständen führen, also zyklischer Wechsel zwischen Egoismus und Altruismus [4]). Dieser Leitwert kann wiederum durch Änderung der Zustandsfunktion und/oder der Verhaltensfunktion beeinflusst werden.

Für die Erhaltung und Entfaltung eines Systems muß ein gewisses Minimum aller Leitwerte erfüllt sein. Das bedeutet vor allem auch, daß Leitwerterfüllungen nicht miteinander verrechnet werden dürfen, solange noch Defizite herrschen. Es überleben auf Dauer nur Systeme, die eine ausreichende Leitwerterfüllung bieten, oder negativ ausgedrückt: ein System ist dann auf Dauer nicht lebens- und entfaltungsfähig, wenn auch nur einer der Leitwerte defizitär ist. Der Bosselsche Leitwertstern gemäß Bild 2 verdeutlicht diese Zusammenhänge. Soweit die (hier gekürzten) Ausführungen von [3] zum Leitwertprinzip. Aus diesen verbal formulierten Ansprüchen der Leitwerte dürfte erkennbar sein, daß ihre formale Beschreibung im allgemeinen auf erhebliche Schwierigkeiten stoßen kann.

4 Quantitative Modellierung von Selbstorganisation

Haken [5] beschreibt den Unterschied zwischen Organisation und Selbstorganisation *qualitativ* durch folgende kleine Parabel:

- "*Organisation*

Wir betrachten als Beispiel eine Gruppe von Arbeitern. Wir sprechen dann von Organisation oder, genauer, von organisiertem Verhalten, wenn jeder Arbeiter auf vorgegebene

äußere Anweisungen - d.h. des Chefs - in wohl definierter Weise reagiert. Es wird unterstellt, daß ein so reguliertes Verhalten zu einem Zusammenwirken zur Herstellung eines Produktes führt.

- **Selbstorganisation**

Denselben Vorgang würden wir dann als selbstorganisiert bezeichnen, falls keine äußeren Anweisungen gegeben werden (Autonomie), die Arbeiter vielmehr über eine Art von gegenseitigem Verständnis (Leitwert, Anm. Verf.) zusammenarbeiten, wobei jeder seinen Arbeitsgang wie bei der organisierten Herstellung eines Produkts verrichtet."

Ziel ist es, eine rechnerunterstützte Prozeßsimulation zu ermöglichen. Dazu müssen sowohl Organisation und Selbstorganisation als auch die Leitwerte *quantifiziert* werden. Im folgenden werden am Beispiel eines sehr einfachen kontinuierlichen Systems [3] die charakteristischen Eigenschaften von Organisation und Selbstorganisation skizziert.

Eine Zustandsgröße z möge sich frei, also ohne Einwirkung von außen entsprechend eines logistischen Wachstumsgesetzes mit Kapazitätsgrenze entwickeln. Die dieses Verhalten beschreibende Zustandsgleichung lautet:

$$dz/dt = r z (1 - z/k), \quad r \text{ spez. Wachstumsrate, } k \text{ Kapazitätsgrenze}$$

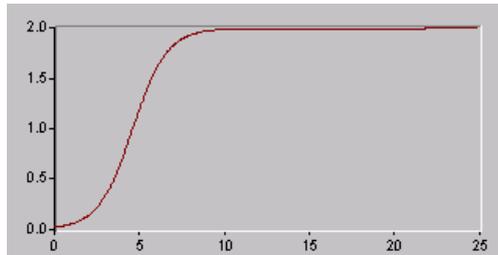


Bild 3 Ungestörtes individuelles Systemverhalten

Das System entwickelt sich aus einem gegebenen Anfangszustand heraus gemäß Bild 3. Wird dieses System nun durch ein zweites System durch einen Konkurrenzeffekt gestört, so hängt das Überleben eines Systems von seiner Wechselwirkung mit dem anderen System derart ab, daß bei einer angenommenen geringfügigen Differenz ihrer Wachstumsraten nur das stärkere System überlebt. Die Systemgleichungen lauten in diesem Falle:

$$\begin{aligned} dz_1/dt &= r z_1 (1 - z_1/k) - a z_1 z_2, & a & \text{ (multiplikativer) Konkurrenzeffekt von } z_2 \text{ auf } z_1 \\ dz_2/dt &= s z_2 (1 - z_2/l) - b z_1 z_2, & b & \text{ (multiplikativer) Konkurrenzeffekt von } z_1 \text{ auf } z_2 \end{aligned}$$

Das zeitliche Verhalten dieser beiden sich selbstorganisierenden Systeme ist in Bild 4 dargestellt. Eine Betrachtung der Systemgleichungen macht deutlich, daß derartige Systeme durch nichtlineare autonome Zustandsgleichungen mit entsprechenden Wechselwirkungstermen charakterisiert sind.

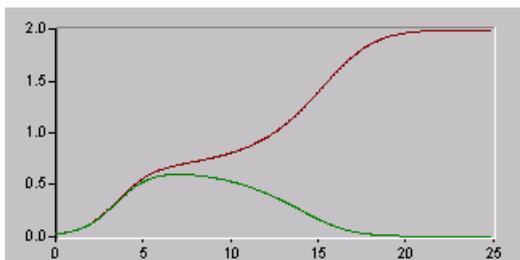


Bild 4 Konkurrierendes Systemverhalten

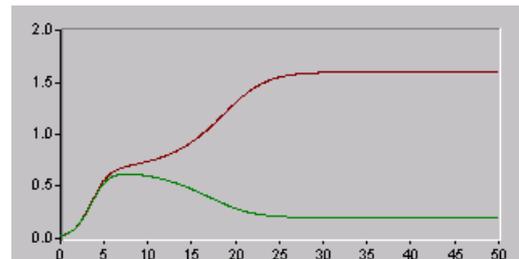


Bild 5 Koexistentielles Systemverhalten

Aus systemtheoretischer Sicht wird damit bestätigt, daß Selbstorganisation auf Strukturveränderung basiert. Die jeweilige topologische Systemstruktur der beiden ungestörten Systeme wird durch die infolge Konkurrenz entstehende Wechselwirkung verändert. Bei entsprechender Vorgabe eines Leitwertes - hier z.B. des Leitwertes gegenseitige *Rücksichtnahme*, - stellt sich eine derartig katastrophale Situation für das zweite System nicht ein, Bild 5 zeigt das entsprechende Systemverhalten (friedliche Koexistenz). Der Leitwert wird ebenfalls als Wechselwirkung beschrieben und ändert daher ebenfalls die Topologie des Gesamtsystems. *Mathematisch* bedeutet Strukturveränderung eine Modifikation der Zustandsgleichungen. Soll dies rechnerunterstützt passieren, so müssen diese Modifikationen auch rechnerintern erzeugt werden können.

Die allgemeine Struktur der Zustandsgleichungen selbstorganisierender Systeme wird also von der Form

$$dz_i/dt = F(z_i,t) - W(z_i,z_j,t) + k L(z_i,z_j,t)$$

sein. Der erste Term auf der rechten Gleichungsseite beschreibt die individuelle Entwicklung eines Teilsystems, die Wechselwirkungsfunktion W im allgemeinen einen negativen Einfluß und die Wechselwirkungsfunktion L einen positiven Einfluß (Leitwerte) auf diese Entwicklung. Mit einem *Ethik*-Faktor $k(t)$ (siehe Abschnitt 3.6) kann z.B. der Leitwert *Rücksichtnahme* zwischen purem Egoismus und totalem Altruismus gesteuert werden. Diese Beschreibung erlaubt die Simulation des zeitlichen Verhaltens eines derartigen autonomen Systems und damit insbesondere die Bestimmung zukünftiger stabiler Zustände (Attraktoren), falls diese existieren. Zu deren Kenntnis muß aber eine komplette Simulation durchgeführt werden, da die Einhaltung einzelner Leitwerte (z.B. Wirksamkeit) zu ihrer Bilanzierung Integrationen über endliche Zeitabschnitte erfordert.

Wird dieses System gestört, so ist die Simulation anzuhalten und der zuletzt erreichte Zustand als Anfangszustand *inklusive* der Störung auf eine oder mehrere Zustandsgrößen für eine neue Simulation zu verwenden (die Lösungen autonomer Systeme besitzen im allgemeinen die Eigenschaft, sehr stark von ihren Anfangsbedingungen abzuhängen).

Die Simulationen wurden mit dem Programm WinFACT Demoversion 3.0 durchgeführt.

5 Hierarchische Prozeßstruktur

5.1 Vision

Es liegt auf der Hand, diese Erkenntnisse und die Modellierungsmöglichkeit selbstorganisierender Prozesse auf den sehr komplexen Produktentwicklungsprozeß anwenden zu wollen. Bei diesem Versuch wird man mit drei schwerwiegenden Problemen konfrontiert:

1. dynamische Zerlegung des Gesamtprozesses in sinnvolle, aussagekräftige Teilprozesse (dynamische Modularisierung), vgl. dazu auch [6] dieses Symposiums,
2. geeignete Modellierung dieser Teilprozesse z.B. über entsprechende Automaten (Subautomaten) und
3. dynamische Steuerung des Gesamtprozesses durch Leitwerte.

Ad 1. und 2.

Das Automatenparadigma gemäß Abschnitt 2 stellt zwar grundsätzlich eine Struktur für die Modellierung kontinuierlicher, diskreter und ereignisgesteuerter Prozesse dar, verfügt aber über keine Vorschrift die kanonischen Automaten Gleichungen in einem konkreten Falle zu

konstruieren. Insofern ist die Automatentheorie keine Metamodelltheorie. Im Falle von Entwicklungsprozessen müssen die entsprechende Teilprozesse als Ergebnis konstruktionsmethodischer Überlegungen gewonnen werden. Als Paradigma für einen Teilprozeß bietet sich der allgemeine Lösungsprozeß nach [7] an, welcher wiederum dem Automatenparadigma folgt.

Ad 3.

Die Modellierung von Leitwerten zur Selbstorganisation eines globalen Systems bedarf zunächst deren formaler Beschreibung (ein einfaches Beispiel findet man in [3]). Das weitaus größere Problem dürfte aber die Flexibilisierung dieser Leitwerte sein, in anderen Worten, eine dynamische Einstellung der Wechselwirkungsfunktionen vorzusehen (z.B. bestehende Kopplungen aufzulösen und/oder neue zum Zwecke einer Änderung der Strukturtopologie zu generieren). Hier ist erheblicher Forschungsbedarf vorhanden.

5.2 Hierarchische Prozeßstruktur

Aus den bisherigen Darlegungen läßt sich folgende hierarchische Prozeßstruktur ableiten. Der als Superautomat abstrahierte Gesamtprozeß in einer *Makroebene* muß zu seiner Beherrschung in entsprechende Teilprozesse in einer *Mesoebene* zerlegt werden.

5.2.1 Zerlegung in Teilprozesse

Die bei der Zerlegung des Gesamtprozesses entstehenden Teilprozesse müssen ihrerseits sinnvoll beschreibbar sein. Als Paradigma bietet sich, wie bereits erwähnt, die Struktur eines allgemeinen Lösungsprozesses nach [7] an. Dieser stellt den kleinsten sinnvollen Automaten zur Beschreibung von Teilprozessen dar. Die Zerlegung in Teilprozesse muß darüber hinaus derart vor sich gehen, daß sich entsprechend einer Leitwertsteuerung die Topologie der Mesoebene selbstorganisieren kann.

5.2.2 Teilprozesse als n-stufige Entscheidungsprozesse

Der allgemeine Lösungsprozeß nach [7] kann seinerseits als n-stufiger Entscheidungsprozeß aufgefaßt werden. Zur Optimierung derartiger Entscheidungsprozesse stehen entsprechende Algorithmen zur Verfügung [8], vorausgesetzt die einzelnen Stufen des Entscheidungsprozesses sind entsprechend formalisierbar. Dies ist dann der Fall, wenn jede einzelne Stufe wiederum als Automat beschrieben wird.

5.2.3 Der Mikroautomat

Jede Stufe des n-stufigen Entscheidungsprozesses besitzt ihre eigene Transferfunktion. Sie bildet damit einen Automaten auf der untersten, sogenannten Mikroebene. Im Extremfall kann ein derartiger Mikroautomat zu einem kombinatorischen System ohne Geschichte entarten.

Zusammenfassend läßt sich folgende Prozeßhierarchie erkennen:

- Gesamtprozeß in Makroebene (Superautomat),
- Topologisch-veränderliches Netz von Teilprozessen in Mesoebene durch Leitwertsteuerung (Subautomaten), vgl. obiges Beispiel,
- Teilprozeß ist n-stufiger Entscheidungsprozeß,
- eine Stufe dieses Entscheidungsprozesses stellt einen Mikroautomaten dar.

Eine graphische Darstellung dieser Hierarchie zeigt Bild 6.

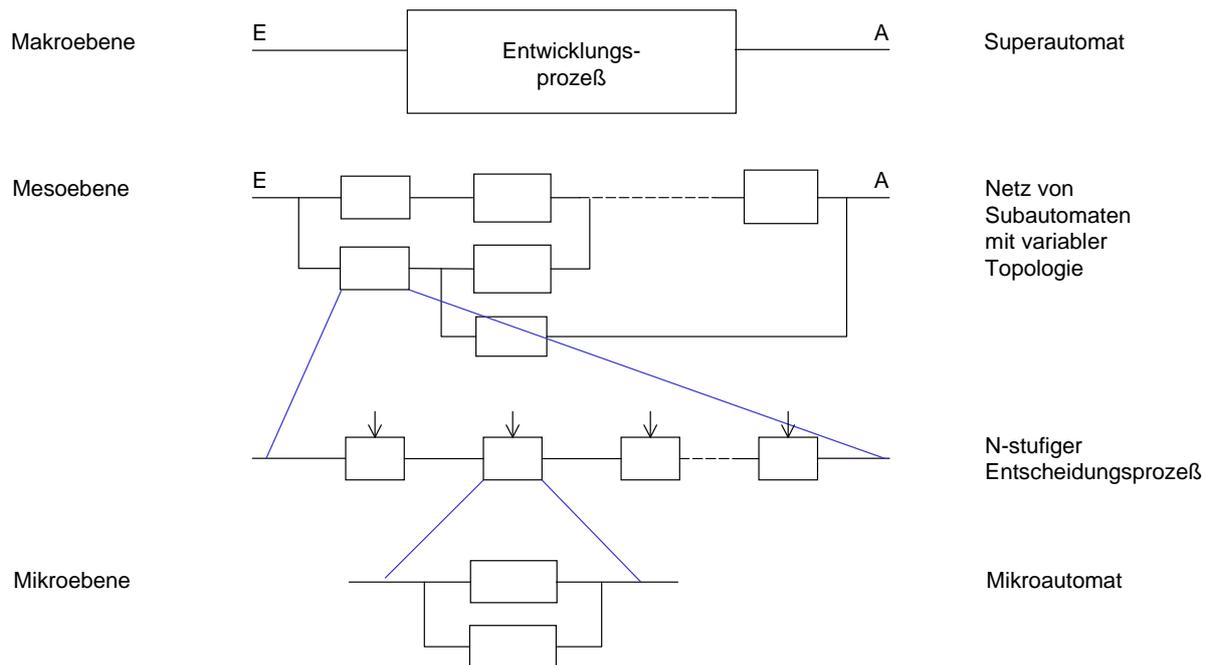


Bild 6 Hierarchische Prozessstruktur

6 Zusammenfassung

Der Versuch, Produktentwicklungsprozesse zum Zwecke ihrer Simulation durch systemtheoretische Modelle zu beschreiben, führt zum einen auf eine hierarchische Struktur und zum anderen auf das wesentlich schwierigere Problem der Selbstorganisation entsprechend vorgegebener Leitwerte. Dazu ist eine flexible topologische Prozessstruktur zwingend erforderlich.

Die Simulation eines komplexen Entwicklungsprozesses eröffnet zum einen die Möglichkeit, tiefere Einblicke in das dynamische Verhalten eines derartigen Prozesses zu gewinnen und sie bietet zum anderen die enorme Chance einer Prozessoptimierung und der Erfahrung der Auswirkungen von getroffenen Entscheidungen im Sinne seines predictive engineering.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Jablonski; S., Böhm; M., Schulze; W. (Hrsg.) "Workflow_Management Entwicklung von Anwendungen und Systemen", Dpunkt.Verlag, 1997.
- [2] Schweiger, W. "Vorlesung Modellbildung und Simulation in Konstruktion und Entwicklung", Rev. 3.0, 1998 (unveröffentlicht, Vorlesungsunterlagen auf Anfrage erhältlich)
- [3] Bossel, H. "Modellbildung und Simulation", 2. Aufl., Vieweg, 1994.
- [4] Mohr H. in "Evolutionäre Ethik - zwischen Naturalismus und Idealismus (Hrsg. W. Lüttenfelds], WBG Darmstadt, 1993.
- [5] Haken, H. "Synergetik", 2. Aufl., Springer, 1983.
- [6] Heynen, Ch., Schweiger, W. "Dokumentation von Berechnungen", i.d. Bd.
- [7] Pahl, G., Beitz, W.: Konstruktionslehre, 4. Auflage, Springer Verlag, 1997.
- [8] Bryson A. E., Ho Y. "Applied Optimal Control", Hemisphere Publ. Corp. Washington, New York, London, 1975.

Prof. Dr.-Ing. W. Schweiger
Dipl.-Ing. Ch. Heynen
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Martensstrasse 9 - D-91058 Erlangen
Tel: xx49-(9131) 6199-11
Fax: xx49-(9131) 6199-30
Email: schweiger@mfk.uni-erlangen.de
<http://www.mfk.uni-erlangen.de>