

Franz-Heinrich Lange

## Perspektiven einer methodischen Systemtheorie - Brücken zur Informatik

Vortrag, gehalten in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 25. November 1993<sup>1</sup>

### Problemstellung:

**Eigenschaften und Verwendung von doppelt angesteuerten Systemen zwecks Modellierung und Charakterisierung von informationsverarbeitenden Methoden**

Ausgehend von der Feststellung, daß es keine universelle Systemtheorie für die Informationstechnik gibt, sondern nur anwendungsgebundene Systemtheorien für die Teildisziplinen der Nachrichten-, der Meß- und der Regelungstechnik, ergab sich die Frage, woran dies liegt und inwieweit sich dieses Ziel einer umfassenden Systemtheorie erreichen läßt (Bild 1).

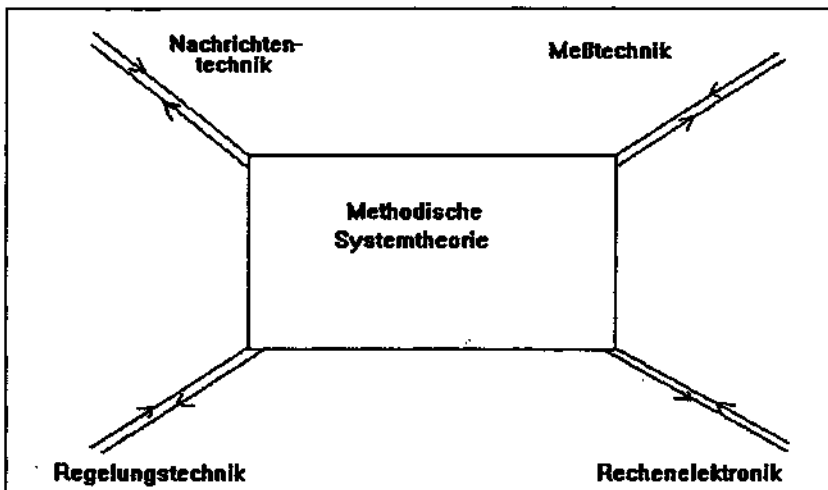


Abb. 1: Die methodische Systemtheorie als Sammelbecken der Methoden

<sup>1</sup> für die Sitzungsberichte der Leibniz Sozietät überarbeitete Fassung

Die Notwendigkeit ist unbestritten, da der von Jahrzehnt zu Jahrzehnt anwachsende Wissensbestand sich im Rahmen der Hochschulausbildung kaum noch befriedigend vermitteln läßt. Auch für Forschung und Entwicklung besteht ein Bedarf eines Sammelbeckens der Methoden der Signalverarbeitung, um gegenseitig Erfahrungen auszutauschen und um Doppelentwicklungen zu vermeiden, zumindestens im wissenschaftlichen Bereich.

### **Modellierungsprobleme**

Der eigentliche Hemmschuh für den Ausbau einer methodischen Systemtheorie ist nach Ansicht des Autors die Tatsache, daß man an einem zu primitiven Systemmodell festhielt, das nur für die linearen zeitinvarianten Systeme (*LTI-Systeme*) der Nachrichtentechnik - für die Zwecke der Frequenzselektion - ursprünglich eingeführt wurde und sich dafür auch voll bewährt hat.

Nach Abschluß der Entwicklung der Filtertheorie standen die zeitlich in stationären Systeme im Vordergrund des Interesses. Es erfolgte ein Qualitätssprung dank der Computertechnik und der Informatik. Das Interesse an der spektralen Darstellung ist so weit gesunken, daß für sie die Gefahr besteht, aus dem Lehrplan des Grundlagenstudiums gestrichen zu werden. Dieses Schicksal hat schon manches Arbeitsgebiet erlitten. Es soll zu dieser Situation ein Ausweg gezeigt werden.

Dieser Ausweg besteht darin, daß die verschiedenartigen Methoden der Nachrichten-, Meß- und Regelungstechnik unabhängig von ihren Anwendungen in einer universellen Systemtheorie zusammengefaßt werden. Es besteht für die Ingenieurpraxis das Bedürfnis nach einer möglichst aussagekräftigen und knappen Charakterisierung der Funktionsweise des Systems. Hierzu bedarf es eines geeigneten Modells.

### **Übergang von einer einfachen zu einer doppelten Systemaussteuerung**

Wir gehen hierbei von dem üblichen Black-Box-Modell eines einfach angesteuerten Systems aus. Nach Bild 2 erkennt man hieraus die drei Hauptaufgaben der Informationstechnik:

- a) die Untersuchung des Systemausgangssignals in der Nachrichtentechnik für die Informationsübertragung,
- b) die Untersuchung des Systemeingangssignals in der Meßtechnik zur Informationsgewinnung,
- c) die Untersuchung der Systemstruktur, vorzugsweise in der Regelungstechnik zur Informationsverarbeitung.

Bei diesen drei Aufgaben treten unterschiedliche Optimierungskriterien auf. Bei (a) die Übertragungsgüte, bei (b) die Meßgenauigkeit und bei (c) die Stabilität des Systems. Eine strenge Trennung ist hierbei nicht möglich, da es sich nur um Schwerpunktaufgaben handelt, die methodisch untereinander ausgetauscht werden. Gerade hierin liegt die Notwendigkeit einer methodischen Systemtheorie begründet.

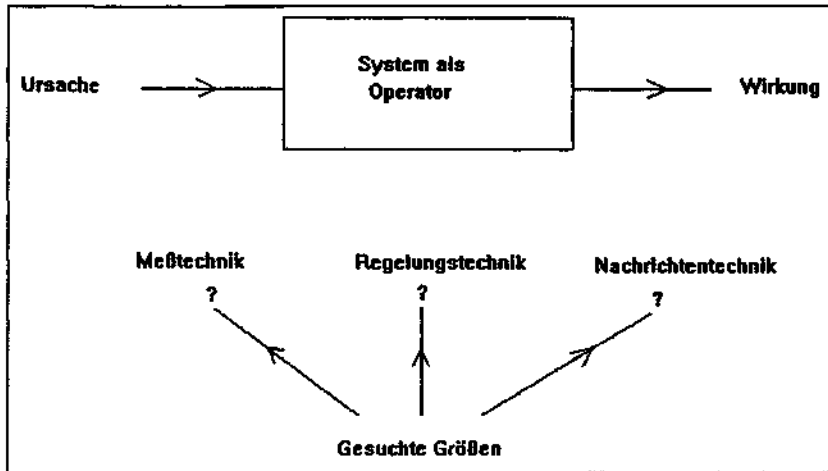


Abb. 2: Das Blackboxmodell für einfach angesteuerte Systeme

Die Arbeitsweise kann in einer Analyse bestehen, vorzugsweise in der Physik und anderen Naturwissenschaften oder in einer Synthese, die typisch für die technischen Wissenschaften ist.

Bei **einfacher** Systemaussteuerung kann die Signalwandlung eindeutig linear oder nichtlinear sein. Daher werden in Lehrbüchern der Nachrichtentechnik lineare und nichtlineare Systeme unterschieden. Die Linearität bedeutet die Gültigkeit des Additionstheorems. In linearen Netzwerken (LTI-Systemen) entstehen keine neuen Frequenzen, additive Komponenten durchlaufen das lineare Netzwerk (z. B. ein Filter) ohne Wechselwirkung. Die nachfolgenden Ausführungen werden aufzeigen, warum diese Selbstverständlichkeiten hier erwähnt werden. Für die Wirkungsweise von dynamischen Systemen gilt ganz generell die Ursache-Wirkung-Relation:

$$y(t) = Op \{x(t)\}$$

Ein lineares System muß die Bedingungen erfüllen

$$y(t) = \text{Op}\{x_1(t) + x_2(t)\} = \text{Op}\{x_1(t)\} + \text{Op}\{x_2(t)\}$$

mit  $y(t)$  als Ausgangssignal und  $x(t)$  als Eingangssignal. Genau so lautet das Additionstheorem für spektrale Funktionen.

### Der Weg zum Verbundsystem

Für rein ohmsche Signalwandler (ohne Induktivitäten und Kapazitäten) gilt die Potenzreihenentwicklung:

$$y(t) = a_0 + a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + a_3 x^3(t) + L$$

linearer Anteil + nichtlinearer Anteil

Betrachten wir den linearen Anteil bei Einfluß von langsam einwirkenden Störungen. Dann wird der Koeffizient  $a_0$  oder  $a_1$  zeitvariabel. Man nennt diese Störerscheinung *Drift*. Wenn das einwirkende Störpektrum tiefrequent ist, also nicht das Eingangssignalspektrum überdeckt, dann spricht man in der Schwingungstechnik von *rheolinen* Systemen.

Nachfolgend setzen wir den Faktor  $a_0$  gleich Null und bezeichnen das Stör-signal  $a_1(t)$  mit  $x_1(t)$  und das Nutzsignal mit  $x_2(t)$ . Dann ergibt sich als Systemfunktion:

$$y(t) = x_1(t) \times x_2(t)$$

Dies stellt einen *Zeitfunktions-Multiplikator* dar.

Die Abbildung dieser Relation in den spektralen Bildbereich durch Fouriertransformation ergibt die Beziehung

$$Y(j\omega) = X_1(j\omega) * X_2(j\omega).$$

Dieses Faltungsintegral, auch als Faltungsprodukt bezeichnet, ist für eine Systemanalyse und Systemsynthese ungeeignet, da sich die spektralen Eigenschaften der beiden Faktoren  $x_1(t)$  und  $x_2(t)$  bei der Faltung vermischen.

Zumindest in der deutschen Fachliteratur hat man das doppelt angesteuerte System des Zeitfunktionsmultiplikators "stark vernachlässigt" (Zitat von G. Wunsch).

Einige Autoren bezeichnen ein doppelt angesteuertes System bei Aussteuerung nur eines Eingangs und Festlegung des anderen Eingangs als ein *bi-lineares System*.

Nachfolgend wird ein doppelt angesteuertes System als *Verbundsystem* (Bild 3) bezeichnet. Es ist merkwürdig, daß sich auf einem Grundlagengebiet

wie der Systemtheorie noch etwas Neues feststellen läßt. In unserem Fall handelt es sich um die Klassifikation der Methoden, die doppelt angesteuerte Systeme benutzen.

Der Grundgedanke, der hier auf Neuland führt, besteht in der Erweiterung der multiplikativen Verknüpfung auf andere Relationen und damit in dem Ausbau einer Methodischen Systemtheorie, die die instationären Systeme mit umfaßt und die sich nicht auf die LTI-Systeme beschränkt. Um ihren integrierenden Charakter zu bewahren, soll, wie Abb. 1 veranschaulicht, der technische Anwendungszweck nicht als Klassifikationsmerkmal dienen. Hieran besteht kein Mangel, denn es gibt sehr ausführliche Fachliteratur für die wichtigsten Fachgebiete.

Die Klassifikation der Verbundsysteme soll sich beschränken auf

- (a) die Verknüpfungsoperation,
- (b) Typ des Eingangssignals (z. B. der Nachricht oder der Meßinformation),
- (c) das Hilfs- oder Referenzsignal als die zweite Aussteuerung eines Verbundsystems.

Ein Verbundsystem realisiert im Idealfall ein System, das zwei Informationsflüsse zu einem resultierenden Informationsfluß oder zu einer resultierenden Information umwandelt (Bild 3).

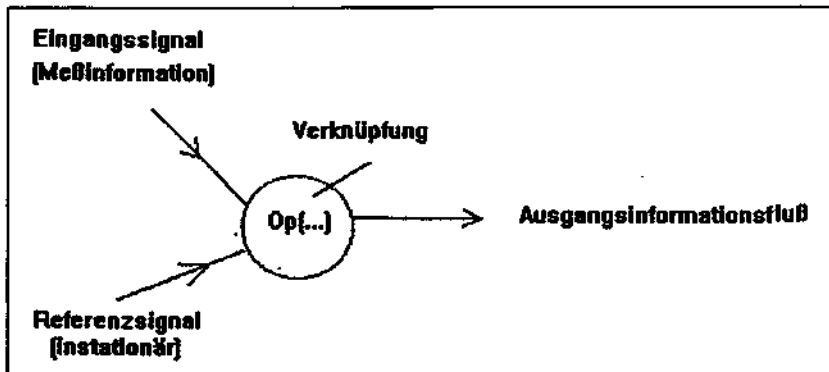


Abb. 3: Reziproke Systeme: Vertauschung der Verknüpfungsrelationen

### Verbundsysteme zur Modellierung instationärer Systeme

Die Verallgemeinerung eines multiplikativen Verbundsystems lautet im Zeitbereich einfach

$$y(t) = Op\{x_1(t), x_2(t)\}.$$

Der Operator charakterisiert die Verknüpfung der Informationsflüsse. Es werden drei Verknüpfungen unterschieden, nämlich Verbundsysteme mit

- (1) multiplikativer,
- (2) gewichteter additiver,
- (3) logischer

Verknüpfung. (1) ist der Ausgangspunkt, (2) dient der Erweiterung und Einordnung der LTI-Systeme und (3) bedeutet eine Erweiterung der klassischen Systemtheorie.

Ehe nachfolgend hierzu einige charakteristische Beispiele für eine methodische Systemtheorie angeführt werden, die die derzeitige Entwicklungstendenz charakterisieren und zur Gedankenwelt der Informatik hinführen, sollen einige Eigenschaften oder Begriffe der Verbundsysteme erläutert werden.

### Reziproke Systeme

Die Angabe der Verknüpfungsrelation ist nur dann eindeutig, wenn angegeben wird, ob sie für den Zeitbereich, den Spektralbereich oder einen anderen Bildbereich gilt. So besteht der Unterschied zwischen einem LTI-System und einem Zeitfunktionsmultiplikator in einer Vertauschung der Verknüpfungsrelationen (vgl. Bild 4). Ein derartiges Systempaar nennen wir reziproke Systeme. Es fehlt hier noch eine Untersuchung zur Verallgemeinerung des Begriffes.

Systemklasse	Eingangs-Ausgangs-Relation	
	im Zeitbereich	im Spektralbereich
lineare Netzwerke	Faltungsprodukt	algebraisches Produkt
Zeitfunktionsmultiplikator	algebraisches Produkt	Faltungsprodukt

Abb. 4: Reziproke Systeme: Vertauschung der Verknüpfungsrelationen

### Verallgemeinerung der Verknüpfungsoperation

Das erwähnte reziproke Paar LTI-System und Multiplikator im Zeitbereich ist das erste Beispiel für die Verallgemeinerung einer multiplikativen Verknüpfung. Darauf weist auch die in der Fachliteratur übliche Bezeichnung *Faltungsprodukt* hin.

Es gelingt damit auf eine einfache Weise, die linearen und zeitinvarianten Systeme in die Klasse der Verbundsysteme einzuordnen.

Hierbei bleibt offen, welche Verknüpfungsoperation den LTI-Systemen zugeordnet wird. Die Bezeichnung *Faltungsprodukt* erscheint von unserem Standpunkt aus nicht zutreffend, da es sich bei den LTI-Systemen um eine gewichtete Addition handelt. Wir ziehen die Einordnung in die Klasse der gewichtet additiven Verbundsysteme für die LTI-Systeme vor. Dies ist aber eine unbedeutende Frage.

Wenn man die aus der klassischen Einteilung bekannten

- (1) Linearen Systeme
- (2) Rhenolinearen Systeme
- (3) Nichtlinearen Systeme

als einfach ausgesteuerte Systeme bezeichnet, so darf man die Verbundsysteme nicht einfach als vierte Systemklasse hinzunehmen. Man kann die unter (1) bis (3) genannten klassischen Systeme vielmehr in die Verbundsysteme eingliedern. Mit dieser Auffassung gewinnt aber die *Verbundanalyse* erheblich an Bedeutung.

### Linearität und Nichtlinearität - pseudolineare Systeme

Um Widersprüche zu vermeiden, empfiehlt es sich, bei den Verbundsystemen die Begriffe lineare Systeme und nichtlineare Systeme zu ersetzen durch die Begriffe lineare Operatoren und nichtlineare Operatoren ! Hat doch ein Verbundsystem eingangsseitig zwei Freiheitsgrade der Aussteuerung und kann daher auch zwei sich scheinbar widersprüchliche Eigenschaften haben, wie Linearität und Nichtlinearität. In der Atomphysik nennt man nach Max Born (1928) dies Komplementarität wie bei der Erscheinung eines Elektrons als Welle oder als Korpuskel. Ob dieser Vergleich mehr als nur formale Bedeutung hat, bleibt eine offene Frage.

Nachfolgend wird hier der Begriff *Pseudolinearität* verwendet. Dieser Begriff erweist sich für Verbundsysteme als typisch, wie nachfolgende Beispiele zeigen (Bild 5).

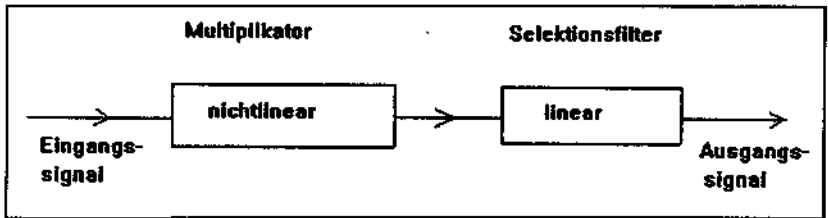


Abb. 5: Pseudolineare System für die Informationsübertragung

Pseudolarität liegt vor, wenn auf eine nichtlineare Signalwandlung ein lineares Filter folgt, das die unerwünschten spektralen Komponenten unterdrückt, so daß das Additionstheorem erfüllt ist. Das resultierende Gesamtverhalten ist dann linear! In einem solchen linearen Systemkomplex entstehen auch neue Frequenzen, was bei einfach ausgesteuerten Systemen nicht möglich ist.

Man beachte, daß der Begriff Linearität mathematisch eindeutig durch die Gültigkeit des Additionstheorems festgelegt ist und nicht etwa durch die Eigenschaft des Systems, daß keine neuen Frequenzen entstehen.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Systemtheorie als Grundlagenvorlesung einiger Ergänzungen bedarf, für die das Verständnis im Anfang des Studiums fehlt. Erst nach den Spezialvorlesungen in der Nachrichten-, Meß- oder Regelungstechnik wird eine zusammenfassende Darstellung oder Methodik als *methodische Systemtheorie* zweckmäßig sein, wie Bild 6 darstellt.

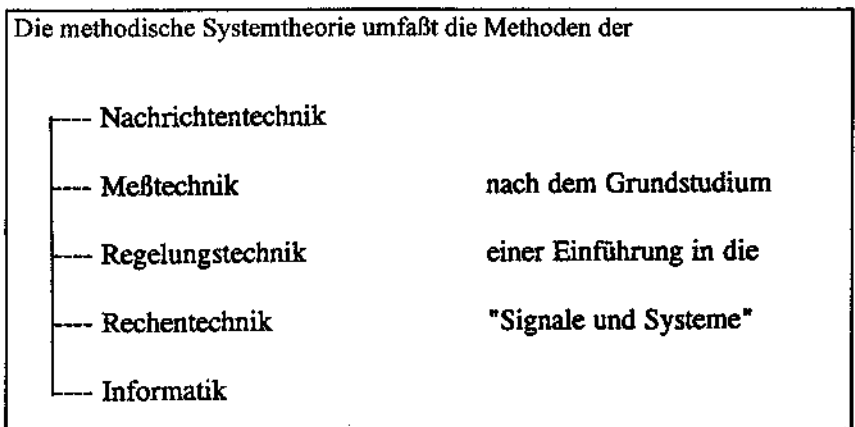


Abb. 6: Konzept einer methodischen Übersichts-Vorlesung im Hauptstudium



## Beispiel für multiplikative Verknüpfungen

### (a) Amplitudenmodulator

Ausgerechnet der uralte Amplitudenmodulator der Rundfunktechnik (Bild 7) ist ein typisches Beispiel eines Verbundsystems. In den Lehrbüchern der Nachrichtentechnik äußern sich die Autoren nicht über die Zugehörigkeit zu den linearen oder zu den nichtlinearen Systemen, auch wenn diese Einteilung benutzt wird. Der AM wird nebenbei eingeordnet. In der Tat läßt sich die Frage nicht eindeutig beantworten. Es handelt sich hier um ein typisches pseudolineares System (vgl. Bild 5). Es entstehen zwar neue Frequenzen, aber durch die Verschiebung auf die Trägerfrequenz bleibt das Basispektrum (Nachricht) in den beiden Seitenbändern erhalten und kann durch Demodulation unverzerrt und verlustfrei zurückgewonnen werden. Das nachfolgende Bandfilter unterdrückt das Basisband nach der Modulation, die durch die Aussteuerung einer nichtlinearen quadratischen Kennlinie realisiert wird. Alles, was bereits oben über die Verbundsysteme gesagt wurden, gilt auch hier. Trotz der nichtlinearen Umwandlung bleibt für das Komplexsystem aus Verbundsystem und linearem Filter das Additionstheorem gültig. Dies garantiert die Übertragungsgüte und Verzerrungsfreiheit.

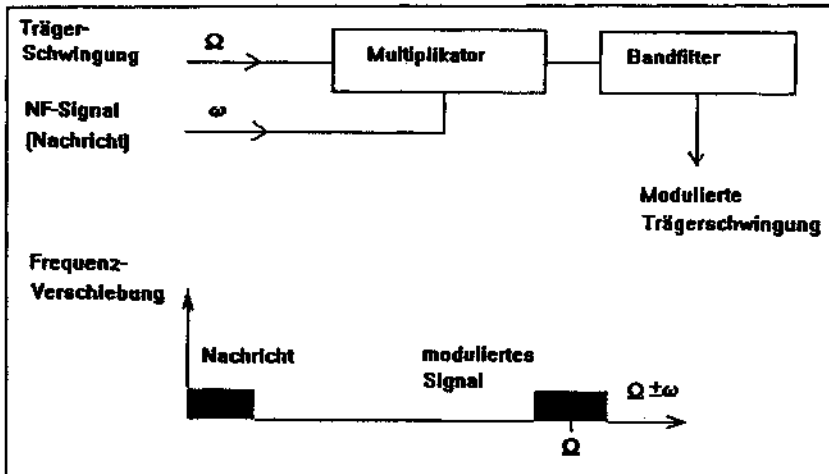


Abb. 7: Amplituden-Modulator als Verbundsystem

### (b) Phasenkopplungssysteme (PLL-phase locked loop)

Dieses als bekannt vorausgesetzte System mit multiplikativer Verknüpfung von harmonischen Schwingungen (quarzgesteuerte Frequenznormale und mechanische Antriebsfrequenz) verdient hier als interessantes und vielseitig

verwendbares Verbundsystem erwähnt zu werden. Es wird einerseits zur Regelung einer mechanischen Antriebsfrequenz verwendet, andererseits aber auch zur Demodulation von frequenzmodulierten Schwingungen.

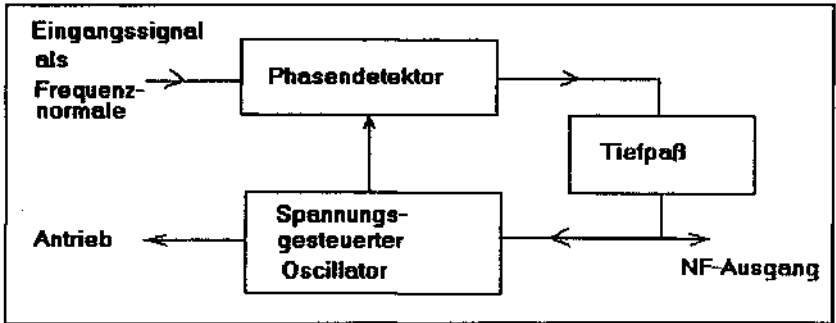


Abb. 8: Anwendung der Phasenkopplung: hoch genaue Antriebsregelung oder zur Frequenzmodulation

Bild 8 zeigt das Prinzipschema. Es besteht aus einem Phasendetektor in Form eines Multiplikators, einem nachfolgenden Tiefpaß und einem spannungsgeregelten Oszillator (VCO), der mit dem mechanischen Antrieb im Falle der Geschwindigkeitsregelung verbunden ist. Damit handelt sich auch hier um ein pseudolineares System. Gleichgewicht ist vorhanden, wenn der Multiplikator keine Regelspannung abgibt und dies ist bei einer Phasenverschiebung von 90 Grad der Fall, unabhängig von den Amplituden der harmonischen Schwingungen. Im Fall einer additiven Verknüpfung müßte die Phasenverschiebung 180 Grad sein bei Amplitudengleichheit der beiden harmonischen Schwingungen.

### (c) Korrelator als Verbundsystem

Als drittes Verbundsystem mit multiplikativer Verknüpfung betrachten wir den Korrelator, der zahlreiche Anwendungen anbietet, so z. B. die berührungslose Entfernung- und Geschwindigkeitsmessung oder die tieffrequente Schwingungs- und Strömungsanalyse auf dem Umweg über Autokorrelationsanalyse und anschließende Fouriertransformation in das zugehörige Leistungsspektrum, wenn dies meßtechnisch nicht direkt ermittelt werden kann (vgl. Bild 9).

Der Korrelator eröffnet das Tor zu dem Gebiet der regellosen Prozesse, d. h. zur Stochastik mit dem Begriff der statistischen Verwandtschaft (=Korrelation) von Vorgängen. Das Referenzsignal erscheint hier nicht als Hilfssignal, sondern als gleichberechtigter Informationsfluß nach Bild 3.

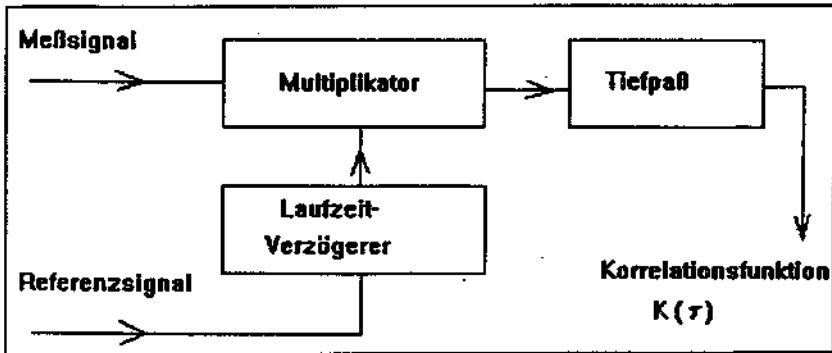


Abb. 9: Der Korrelator, ein Verbundsystem

Auch hier handelt es sich wieder um die Kombination von einer nichtlinearen Signalwandlung mit einer nachfolgenden spektralen Selektion. Im Gegensatz zum Amplitudenmodulator wird hier kein Bandpaß, sondern ein Tiefpaß benötigt. Dieser unterdrückt im Idealfall (hinreichend lange Integrationszeit) alle Wechselstromkomponenten des Ausgangs-Signals des Multiplikators. Nur gleichfrequente spektrale Komponenten liefern einen Beitrag zur Korrelationsfunktion  $K(t)$ . Bei konstanter Zeitverzögerung stellt das Ausgangssignal des Korrelators keinen Informationsfluß, sondern nur eine Information dar.

### Zeitdiskrete Verbundsysteme

Es wird allgemein angenommen, daß allein mit einem A/D-Wandler der Übergang von der Analogtechnik zur Digitaltechnik vollzogen wird. Aber daß dadurch auch neue Methoden gewonnen werden, wird in diesem Zusammenhang nicht beachtet, auch wenn diese Methoden an sich bekannt sind.

Wenden wir uns also den zeitdiskreten Verbundsystemen und ihren methodischen Eigentümlichkeiten zu, zunächst ein Hinweis auf die Signaltheorie.

Man hat zwei Sorten von Signalen zu unterscheiden: die sogenannten *Leistungssignale* und die *Energiesignale*. Im ersten Fall wird ein fortlaufender Prozeß betrachtet, der im Grenzfall zeitlich unbegrenzt andauert und der fortlaufend bearbeitet wird. Im Fall einer multiplikativen Verknüpfung handelt es sich um ein inneres Produkt, das gebildet wird. Es werden in jedem Zeitpunkt  $t$  die beiden Signalamplituden miteinander multipliziert.

Energiesignale, speziell in binärer Form mit den beiden Amplitudenwerten 0 und 1 als Kodewörter, umfassen einen Zeitabschnitt (als Kodewortlänge) mit  $n$  zeitdiskreten Elementarsignalen. Zur Kodierung von  $n$  Kodewörtern benötigt man  $ld(n)$  Binärsignalstellen. Die Signalverarbeitung geschieht hier durch Vertauschung der Reihenfolge der Binärstellen und von Hinzufügen von Stellen als Prüfbits.

Die multiplikative Verknüpfung von derartigen binärwertigen Signalen erfolgt hier auf verschiedene Weise. Als Beispiel soll nachfolgend die

### Polynommultiplikation

dienen. Zeitdiskrete Verbundsysteme dieser Art dienen der Erhöhung der Störfestigkeit. Für diese Annahme finden Methoden und Begriffe der abstrakten Algebra Anwendung.

Die Störfestigkeit kann nach der Informationstheorie von Shannon und von Kotelnikow durch Redundanz, also durch einen Mehraufwand bei der Signalverarbeitung erreicht werden. Dies wird in der Analogtechnik bei der Frequenzmodulation mittels einer Vergrößerung der Bandbreite realisiert.

In der Digitaltechnik wird das gleiche Ziel mittels eines Mehraufwandes an Stellenzahl des Kodewortes erreicht.

Das Prinzip der *Polynom-Kodierung* zur automatischen Fehlerkorrektur soll an einem Beispiel erläutert werden. Sie erfolgt in vier Schritten:

1. Die Binärwerte  $a_0 a_1 a_2 a_3 a_4$  eines 5stelligen Kodewortes lauten  $1 0 1 0 1$ . Sie werden als binäre Koeffizienten eines Polynoms in der Form  $1+x^2+x^4=I(x)$  verwendet.  $x$  stellt hier eine Unbestimmte dar und wird in ihren Potenzen zur Kennzeichnung der Position im Kodewort verwendet. Die Potenzen mit den Null-Koeffizienten fallen einfach fort.  $I(x)$  nennt man das *Informationspolynom*.

2. Es erfolgt nun zur Einfügung einer Redundanz eine Polynommultiplikation mit einem sogenannten *Generatorpolynom*  $G(x)$ . Man erhält dann das *Sendepolynom*  $S(x)=G(x) \times I(x)$ . hierbei wählt man für  $G(x)$  einen irreduziblen Faktor des Kreisteilungspolynom  $x^n-1$ . Gerechnet wird Modulo  $(x^n-1)$ , d.h.  $x^n-1=0$ . Der sich ergebende zweite Faktor sei das *Dekodierpolynom* für die Fehlerkorrektur  $H(x)$ . Es gilt also  $G(x) \times H(x)=x^n-1=0$ .

3. Wenn bei der Übertragung des Sendepolynoms  $S(x)$  eine Stelle  $i$  invers übertragen wird (1 statt 0 oder 0 statt 1), dann kann man dies durch Addition

von  $x^i$  modellieren. Das Fehlerpolynom lautet  $F(x)=x^i$ . Am Empfangsort kommt das gestörte Sendesignal in der Form an

$$E(x) = G(x) \times I(x) + x^i.$$

4. Nun kommt der Sinn des Ganzen: Wenn man am Empfangsort das empfangene Signal  $E(x)$  mit dem dort bekannten Dekodierungspolynom  $H(x)$  multipliziert, dann erhält man den Fehler in der Form  $x^i \times H(x)$  und durch Division mit  $H(x)$  den Fehler  $x^i$ . Denn es gilt

$$E(x) \times H(x) = [I(x) \times G(x) + x^i] \times H(x) = I(x) \times (x^n - 1) + x^i \times H(x) = x^i \times H(x).$$

Die Korrektur der  $i$ -ten Binärstelle kann automatisch erfolgen.

Man beachte, daß es sich bei dieser multiplikativen Verknüpfung um kein inneres Produkt handelt. Es werden Signalamplituden miteinander verknüpft, die zu verschiedenen Zeiten am Empfangsort eingetroffen sind. Beim inneren Produkt dagegen werden gleichzeitig eingetroffene Signalamplituden miteinander verbunden (Bild 10).

#### Schritte der Signalumwandlung:

1. Bildung des Informationspolynoms  $I(x)$  mit den binären Koeffizienten des Informationssignals.
2. Multiplikation des Informationspolynoms mit einem Generatorpolynom  $G(x)$  als irreduzibler Teiler des Kreispolynoms  $(x^n - 1) = 0$ :  $I(x) \cdot G(x)$  als Sendepolynom.
3. Annahme eines einfachen Fehlers  $F(x)$  bei der Übertragung. Das Empfangssignal lautet dann:  $E(x) = I(x) \cdot G(x) + F(x)$ .
4. Multiplikation des Empfangssignals  $E(x)$  mit dem Dekodierungspolynom  $H(x)$ . Man erhält dann:  $I(x) \cdot G(x) \cdot H(x) + F(x) \cdot H(x)$ , wenn  $H(x)$  der zweite Faktor des Kreisteilungspolynoms ist, d. h. wenn die Beziehung gilt:  $G(x) \cdot H(x) = (x^n - 1) = 0$ !  $H(x)$  wirkt hier als Nullteiler. Da  $H(x)$  bekannt ist, erhält man auf der Empfangsseite die Fehlstelle  $F(x)$  und kann sie korrigieren.

Abb. 10: Fehlerkorrektur von binären Signalen mittels Polynomkodierung

#### Verbundsysteme mit (gewichteter) additiver Verknüpfung

Der Grundgedanke der Verbundanalyse ist die Doppelaussteuerung. Sie kann, wie bereits erwähnt, nicht nur mit einer multiplikativen Verknüpfung, sondern auch mit einer additiven Verknüpfung verbunden sein. Wie oben bemerkt, treten bei LTI-Systemen beide Verknüpfungen auf - die multiplika-

tive Verknüpfung von Werten des Eingangssignals und der Impulsreaktion und die Addition dieser Produkte als Approximation des Faltungsintegrals.

### Rückkopplungsschaltungen

Hierbei wird das zweite Signal nicht einer zweiten Informationsquelle, sondern zu einem Bruchteil dem Ausgangssignal entnommen, entweder gleichphasig (Mitkopplung zur Selbsterregung) oder gegenphasig (Gegenkopplung zur Entzerrung). Dieses uralte Prinzip der Funktechnik erfuhr erst im letzten Jahrzehnt eine überraschende Erweiterung durch die Entdeckung, daß auch regellose (stochastische oder chaotische) Prozesse determiniert erzeugt werden können. Dies wurde möglich durch den Einbau von nichtlinearen Bauelementen (Chua-Schwingkreis).

### Fraktale Systeme

Nicht zu den Verbundsystemen gehörig, aber eng verwandt sind die fraktalen Systeme von Mandelbrot (USA). Die bestehen aus einem rückgekoppelten digitalen Computer, der eine Folge von komplexen Zahlen berechnet, angefangen mit einem Ausgangspunkt einer komplexen Zahl  $Z_k$  nach einer vorgegebenen Relation, z.B.  $Z_{k+1}=Z_k^2+p$  oder  $Z_{k+1}=1+(1-Z_k)$  als logistische Gleichung in fortlaufender Folge, bis ein Endzustand erreicht wird, der farbig gekennzeichnet wird. So wird ein Teilbereich der komplexen Zahlenebene kontinuierlich mit bizarren Figuren (*Apfelmännchen*) bedeckt. Verblüffend ist dabei, daß mit einer primitiv einfachen Relation solche komplizierten Muster determiniert werden können.

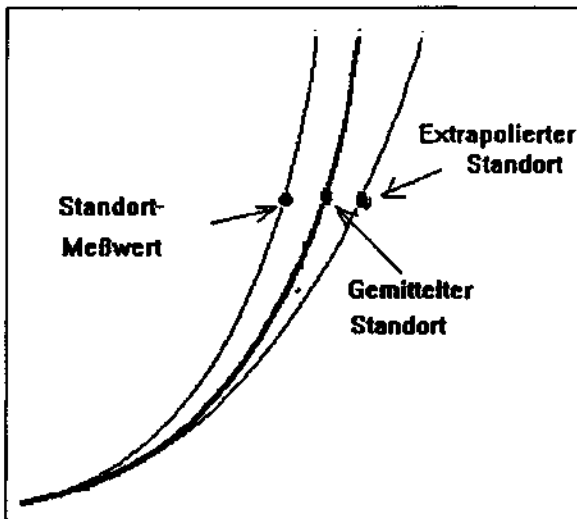


Abb. 11:  
Grundgedanke des  
Kalmanfilters:  
Bewertung nach der  
Fehlervarianz der  
Werte

### Kalmanfilter

Das Kalmanfilter stellt ein echtes additives Verbundsystem nach Abb. 11 dar und wird in der Schifffahrt zur Navigation angewendet. Es kombiniert eine Messung des Standortes mit einer Extrapolation auf Grund des bisherigen Kursverlaufes.

Es soll eine gewichtete Mittelwertbildung beider Standortwerte vorgenommen werden, bei der die Methode mit der größeren Genauigkeit, also mit geringerem Störrauschen ein größeres Gewicht erhält.

Der Ansatz lautet: Der Schätzwert ist gleich dem Extrapolationswert plus dem Gewichtungsfaktor, multipliziert mit der Differenz von Meßwert minus Extrapolationswert.

Der Gewichtungsfaktor  $C$  lautet:

$$C = \frac{\sigma_{\text{exp}}^2}{\sigma_{\text{exp}}^2 + \sigma_{\text{meß}}^2}$$

Wenn das Meßrauschen sehr groß ist ( $\sigma_{\text{meß}}^2 \gg \sigma_{\text{exp}}^2$ ), dann geht  $C$  gegen Null und es gilt Schätzwert gleich Extrapolationswert.

Wenn das Extrapolationsrauschen sehr groß ist ( $\sigma_{\text{exp}}^2 \gg \sigma_{\text{meß}}^2$ ), dann geht  $C$  gegen 1 und es gilt Schätzwert gleich Meßwert.

Diese Ausgleichsmethode läßt sich formal bei jeder doppelten Messung (mit 2 verschiedenen Methoden) anwenden. Man muß dabei jedoch die zu vergleichenden Werte in dem gleichen Maßsystem (Maßraum) bewerten.

### Digitale Schaltungstechnik

Additive Verknüpfung ist das Kernstück der Informationsverarbeitung in der Rechenelektronik. Hier finden seit jeher Laufzeitketten Verwendung. Als Beispiel sei hier nur das Schema der Impulskompression von Hüttman (1944) erwähnt. Die Wichtung wird hierbei durch einen Polarisationswechsel vorgenommen.

Hier besteht eine enge Verbindung zur Informatik und ihrer spezifischen Auffassung zur Informationsverarbeitung im engeren Sinne, in der Nachrichtentechnik als Digitaltechnik bezeichnet. In der Computerwissenschaft kommt die Automatentheorie hinzu, die leider nicht die Entwicklung der Computertechnik wesentlich beeinflusst hat

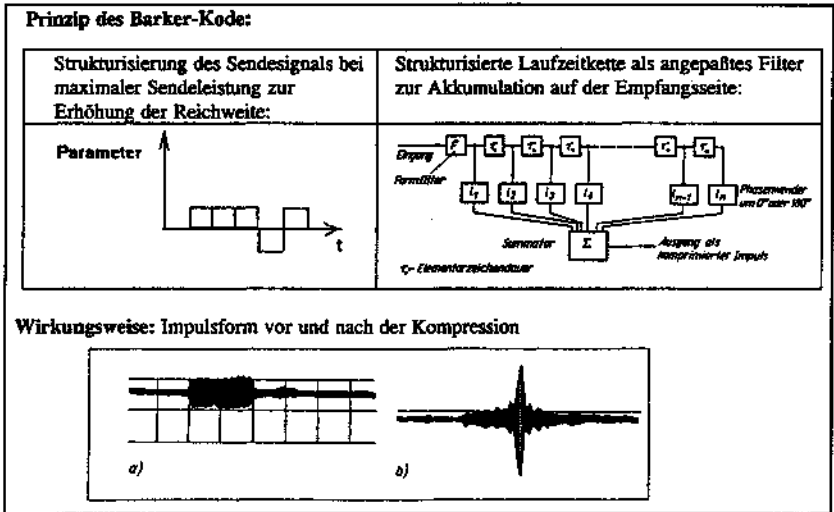


Abb. 12: Prinzip der Impulskompression mit angepaßten Filtern

Eine Darstellung dieses umfangreichen Spezialgebietes vom Standpunkt der Informationstechnik ist das Buch von A. Finger "Digitale Signalstrukturen in der Informationstechnik" (Verlag Technik, Berlin 1985) mit einem ausführlichen Literaturverzeichnis bis zum Anfang der 80er Jahre.

### Verbundsysteme mit logischen Verknüpfungen - Brücken zur Informatik

Bereits oben wurde erwähnt, daß die Informatik nicht nur die mathematisch-algebraischen Verknüpfungsoperationen, sondern auch die logischen Verknüpfungen verwendet.

Dies hatte zur Folge, daß dank dieser Erweiterung des theoretischen Werkzeugs die Informationsverarbeitung nicht nur *quantitative* (zahlenmäßige) *Meßwerte* liefert, sondern auch *qualitative Entscheidungen*. Es entstand in der Fachliteratur dadurch ein Streit, daß dieser Tatbestand die Grenzen der Meßtechnik überschreitet. Dies muß vom Standpunkt der Gesetzgeber (Eich-, Maß- und Toleranzvorschriften) bejaht werden. Hier liegt die Grenze der Meßtechnik und der Beginn der Informatik. Es existiert eine Grauzone, in der eine Zuordnung unklar ist, z. B. bei binären Entscheidungen (Ja-Nein-Angaben).

So ergibt ein Radarempfänger (Meßstochastik!) eine Ja- oder Nein-Entscheidung, ob ein Ortungssignal eingetroffen ist oder nicht. Der Zeitpunkt des Eintreffens wird jedoch quantitativ ausgenutzt, um die Laufzeit des Ortungs-



signals zu ermitteln und damit eine quantitative Meßgröße, die Objektentfernung.

### Weitere Perspektiven der methodischen Systemtheorie

Die ursprüngliche Aufgabe der Informationstechnik und der Informatik war das Auffinden eines Algorithmus zur Berechnung einer Meßgröße unter Benutzung des großen Komplexes von Informationen, d. h. die Aufstellung eines Programms (Software).

Der Trend der Weiterentwicklungen ging dabei in zwei Richtungen:

- (a) Anwendung von logischen Verknüpfungen (Expertensysteme)
- (b) Analyse des Zusammenwirkens von mehreren gleichberechtigten Prozessen (Petrietze).

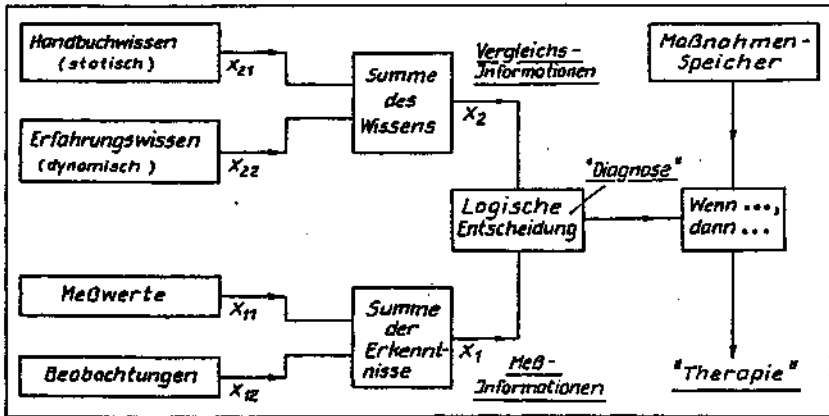


Abb. 13: Schema eines Expertensystems

### Logische Verknüpfungen

Bild 13 zeigt das Schema eines Expertensystems als Kombination von mehreren Verbundsystemen. Es wird aus dem Handbuchwissen (statische Aussage) und dem Erfahrungswissen (dynamische Aussage) die problemrelevante Summe des Wissens festgestellt. Desgleichen wird durch ein zweites Verbundsystem aus den vorhandenen Meßwerten (objektive Aussagen) und aus den erfolgten Beobachtungen (subjektive Aussagen) als Prozeßanalyse als Summe der Erkenntnisse festgestellt. Die Summe des vorhandenen Wissens (vergangenheitsbezogen) und die Summe der gewonnenen Erkenntnisse (gegenwartsbezogen) wird in einem verallgemeinerten Korrelator miteinander verglichen und daraus wird die Diagnose gestellt.

Das vierte Verbundsystem arbeitet als logische Verknüpfung mit den Relationen wenn ..., dann... (Implikation). Aus dem festgestellten Sachverhalt, der Diagnose, wird aus einem Maßnahmespeicher die entsprechende zugeordnete Therapie entnommen.

Die eigentlichen Schwierigkeiten bestehen bei den Experten-Systemen, den Wissenbestand logisch und widerspruchsfrei zu ordnen und binär zu kodieren. Daher kommen sie nur für einige Wissensgebiete in Frage, z. B. für die Medizin, Geologie, Havarietechnik und Prüfwesen u. a., also jeweils für eine beschränkte *Mikrowelt*. Das Fachgebiet muß stark eingegrenzt werden. Trotzdem stellen Expertensysteme ernst zu nehmende Beispiele für Systeme mit *künstlicher Intelligenz* dar.

### **Entscheidungsfindung mittels Petrinetzen**

Die meisten Aufgaben der Automatisierungstechnik sind dank des Einsatzes der Computer für eindeutige Zielstellungen gelöst worden, für eine *Mono-Optimierung*. Hierbei triumphiert die Rechenelektronik mittels ihrer Programmierung.

Erheblich schwieriger ist die *Poly-Optimierung*, bei der mehrere Optimierungskriterien existieren, die sich oft widersprechen, z. B. der Widerspruch von Kosten und Leistung. Es ist ein alltägliches Problem der Technik.

*Carl Adam Petri* hat in seiner Dissertation 1961 als Mathematiker ein allgemein gültiges Modell für den Informationsaustausch zwischen Teilsystemen oder Zuständen (!) geschaffen, das seinen Namen trägt: Petrinetze. Es handelt sich hierbei um den Informationsaustausch zwischen gleichberechtigten Partnern, also um den gleichzeitigen Informationsfluß verschiedener Teilprozesse. Es ist dies ein *Kommunikationsnetz ohne eine zentrale Steuerung, ohne einen zentralen Algorithmus*. Ein Anwendungsbeispiel ist das Handelsnetz einer Volkswirtschaft in friedlichen Zeiten. Es wird hier von *Nebenläufigkeit* gesprochen, (engl. concurrency). Das Netz wird reduziert auf eine Menge von *Zuständen* (oder Objekten oder Teilsystemen), die passiv sind und einer Menge von dazwischen geschalteten Informationswandlern. Sie folgen stets wechselseitig aufeinander (Bild 14).

Ein anderes Anwendungsbeispiel ist ein universelles, globales Nachrichtennetz, bei denen jede Teilstation Informationen empfängt und weitergibt. Die graphische Netzdarstellung hat vor einer einfachen Matrizenanordnung den Vorteil, daß man leicht erkennt, welche Teilsysteme (Zustände) voneinander unabhängig sind, sich also nicht beeinflussen können. Das Petrinetz stellt also kein Schritt für Schritt ablaufendes Verfahren dar, das am Ende die Lösung eines einzigen Problems findet. *Die Zielstellung ist hier der möglichst ungestörte Ablauf von mehreren parallel laufenden Prozessen*. Es ist eine

*Polyoptimierung*, realisiert durch mehrfach angesteuerte Verbundsysteme. Es zeigt zugleich die vielseitige Bedeutung des Begriffes *Verbundsystem*.

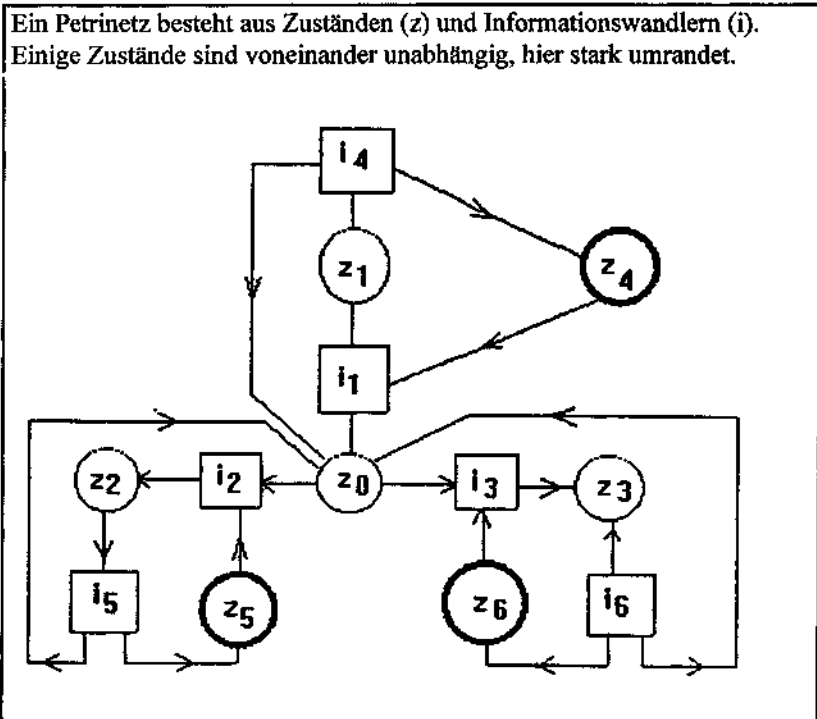


Abb. 14: Schema eines Petrinetzes für dreifachen, voneinander unabhängigen Parallelbetrieb

Die technische Weiterentwicklung ist eindeutig gekennzeichnet durch eine immer weitergehende Anpassung der Modellierung an den tatsächlichen Prozessablauf und die auftretenden Störungen durch Umwelteinflüsse. Daher sind die Steuerungsbefehle an sich unscharf, bis durch die den Prozeß begleitende Umweltbeobachtung der Eingriff in den Prozeß präzisiert werden kann, wie es jeder Autofahrer erlebt. Das technische Problem ist die Automatisierung dieser Strategie. Dies führt in die Welt unscharfer Systeme.

### Zusammenfassung

Es wird gezeigt, daß sich ein doppelt angesteuertes System - ein Verbundsystem - sowohl als Modell für zeitlich stationäre und lineare Systeme, d. h.

für LTI-Systeme, als auch für nichtstationäre Systeme eignet. Im letzteren Fall kann man, ausgehend von Verbundsystemen mit multiplikativer Verknüpfung, eine Fülle von klassischen Systemen einordnen und charakterisieren. Mit der Erweiterung auf Systeme mit logischer Verknüpfung ergibt sich eine Brücke zur Informatik, die wegen der unterschiedlichen Auffassungen von "Informationsverarbeitung" noch weiter ausbaufähig erscheint.

Insgesamt wurde versucht, altbekannte Dinge einmal unter einem anderen Gesichtswinkel zu betrachten und hierbei auf einige Lücken und Erweiterungsbedarf der klassischen Systemtheorie hinzuweisen. Schon die alten griechischen Philosophen stellten bei der Betrachtung der Welt fest: "Pantarei" (alles fließt). Dies gilt ganz besonders für die Informationstechnik, die in ununterbrochener Weiterentwicklung begriffen ist.

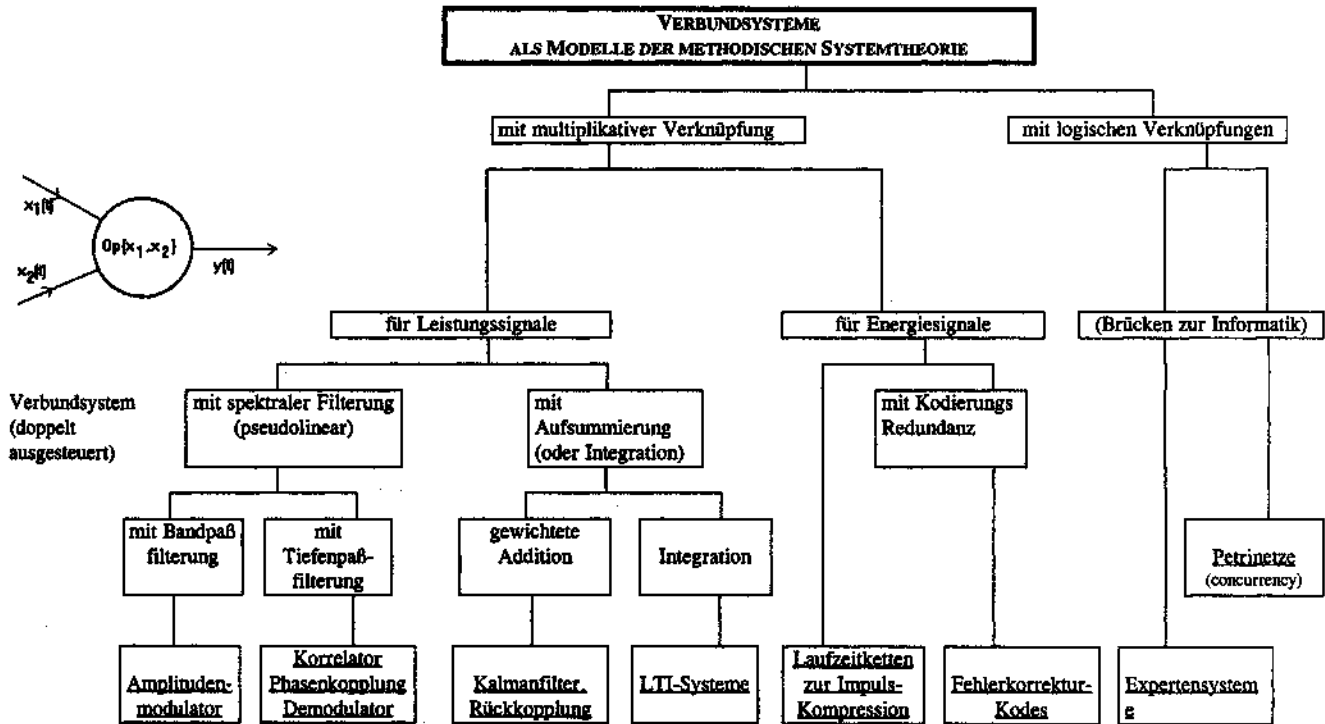
Abschließend sind drei Anlagen beigelegt, die die wichtigsten Überlegungen enthalten.

**Anlage 1:** Verbundsysteme als Modelle einer methodischen Systemtheorie.

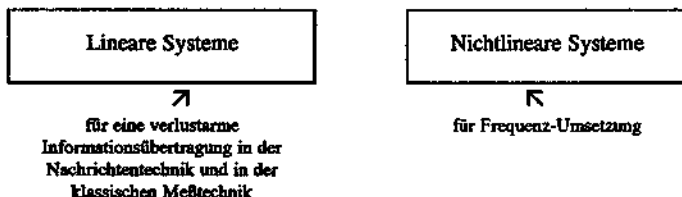
**Anlage 2:** stellt die Einordnung der Verbundsysteme in die methodische Systemtheorie dar.

**Anlage 3:** grenzt die Verbundanalyse gegen die klassische Theorie der linearen Systeme ab und charakterisiert den methodischen Unterschied zwischen Informationsübertragung und der Informationsverarbeitung.

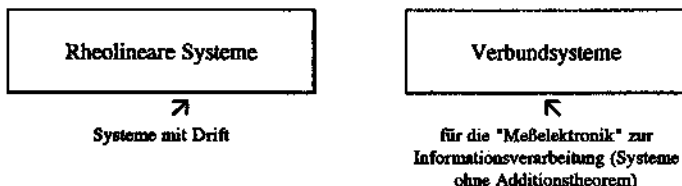
Anlage 1



unterstrichen: Typenmuster

**Anlage 2****EINORDNUNG DER "VERBUNDSYSTEME" IN DIE METHODISCHE SYSTEMTHEORIE****Einfach angesteuerte Systeme (zeitinvariant)**

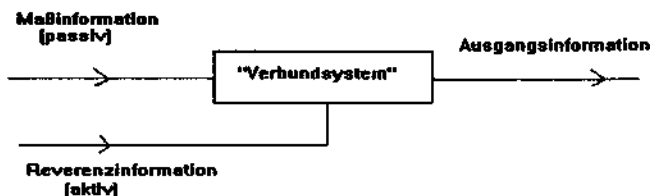
Systeme mit Additionstheoren: Linearität auch am Eingang (Sensoren zur Informationsgewinnung und am Ausgang (Informationsabgabe durch Instrumente u. a.))

**Doppelt angesteuerte Systeme (zeitvariant)**

Die Verbundsysteme stellen die logische Weiterentwicklung der rheolinearen Systeme (der driftenden Systeme) dar.

**Unterschied:**

Bei den Verbundsystemen überlappen sich das Nutzsignalspektrum und das Störsignalspektrum, bei den rheolinearen Systemen dagegen nicht.

**Schema der Informationsverarbeitung in der "Meßelektronik"**

**Anlage 3****ABGRENZUNG DER VERBUNDANALYSE GEGEN DIE KLASSISCHE  
THEORIE DER LINEAREN SYSTEME**

<b>Aufgabe:</b>	Informationsverarbeitung statt Informationsübertragung
<b>Technik:</b>	Meßelektronik statt Nachrichtentechnik
<b>Prinzip:</b>	Ungültigkeit des Additionstheorems, Auftreten von Wechselwirkungen zwischen additiven Komponenten
<b>Optimierung:</b>	Meßgenauigkeit oder Empfindlichkeit (soweit notwendig), Informationsverlust zulässig
<b>Verknüpfungsrelationen:</b>	im Zeitbereich algebraische Multiplikation, im Spektralbereich Faltungsprodukt
<b>Modellierung:</b>	Zeitfunktionsmultiplikator für zeitvariante Proportionalität!
<b>Charakterisierung:</b>	Aussagen über die Eingangssignale für die Meßinformation (informativ passiv) und für die Referenzinformation (informativ aktiv) und über die Verknüpfungsrelation
<b>Entwicklungsperspektiven</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Anwendung von nichtspektralen Bildbereichen, speziell für binärwertige Energiesignale (z. B. mit Polynommultiplikation),</li> <li>b) Anwendung von logischen Verknüpfungen mit Brücken zur Informatik (Expertensysteme),</li> <li>c) Anwendung auf Differentialgleichungen mit zeitvarianten Koeffizienten</li> </ul>