Aufbau und Arbeitsweise des Hybrid-Rechners TRICE

Construction and operation of the Hybride Computer TRICE

Elektron. Rechenanl. 5 (1963), H. 1, S, 28—41
Manuskripteingang: 8. 1. 1963

von W. AMELING,
Consultant der ERA-GmbH Aachen

Die zunehmenden Forderungen an die Genauigkeit des elektronischen Analogrechners in äußerst wichtigen Anwendungsgebieten können von diesem nicht voll erfüllt werden. Mit dem TRICE-Rechner wurde ein Rechner geschaffen, der die Vorteile der analogen Rechentechnik mit der vom Digitalrechner her gewohnten Genauigkeit verbindet. Damit ist ein lang gehegter Wunsch der Ingenieure erfült. Jetzt können Aufgabengebiete nach dem Analogrechnerprinzip gelöst werden, bei denen man ungern auf einen Analogrechner verzichtet, der normale Analogrechner aber aus Genauigkeitsgründen ausscheidet. Der TRICE-Rechner kann als unabhängiger Rechner oder in Verbindung mit elektronischen Analogrechnern normaler Bauart arbeiten. Nach einer kurzen Darstellung der Grundrecheneinheiten, der zugehörigen Symbole und der Wirkungsweise wird an verschiedenen Beispielen die Art der Programmierung durchgeführt. Zum Schluß wird der Geräteaufwand eines ausgeführten Simulationssystems angegeben. Bei diesem System werden die normalen Rechenoperationen von einem Präzisions-Analogrechner üblicher Bauart und die für das System entscheidenden Gleichungssysteme und Koordinatentransformationen mit dem TRICE-Rechner durchgeführt.

The increasing demand for higher accuracy of electronic analog computers on highly essential sectors cannot be fulfilled by them. Now by the TRICE-Computer a machine was developed which combines the advantages of analog computation with the accuracy of digital computers. By this a since long existing demand of the engineers was accomplished. Now problem sectors for which one hardly liked to renounce to the analog computer but for which his accuracy was not sufficient can now be solved in the analog manner. The TRICE-Computer can work as an individual computer or combined with analog computers of normal construction. After a short description of the basic computation modules, the relative symbols and the operation, the kind of programming is demonstrated by aid of different examples.

Finally the necessary accessories for an executed simulation system are mentioned. Fot this system the normal computation was done by a precision analog computer of usual kind and the decissive equation systems and coordinate transformations for this system were executed by a TRICE-Computer.

1. Einleitung

Der neue Packard-Bell-Rechner TRICE (Transistorized Real-time Incremental Computer Expandable) ist ein beliebig ausbaufähiger transistorisierter Rechner hoher Rechengeschwindigkeit und Genauigkeit. Bei diesem Rechner kommt sowohl die analoge als auch die digitale Rechentechnik voll zur Geltung. Die Kombination der Analogrechner-Programmierungsmethoden mit einer vom Digitalrechner her gewohnten Genauigkeit läßt den Einsatz dieses Rechners auch für die Lösung solcher Aufgaben zu, für die der normale elektronische Analogrechner aus Genauigkeitsgründen ausscheidet, für die man aber ungern aus anderen Gründen auf einen Analogrechner verzichtet.

Der PB-Rechner ist ein „solid state digital differential analyzer" und arbeitet mit Logikbauelementen unter Verwendung der binären Arithmetik bei 3 MHz. Der TRICE-Rechner ist aufgebaut wie ein üblicher Analogrechner, d. h. er besitzt einzelne spezielle Recheneinheiten wie Summierer, Integratoren, Multiplikatoren, Funktionsgeneratoren usw. Diese werden entsprechend der zu lösenden Aufgabe auf dem Problembrett zusammengeschaltet, wobei die Anzahl der erforderlichen Recheneinheiten nur von der zu lösenden Aufgabe bestimmt wird.

Das TRICE-System kann als Hybridrechner oder als unabhängiger Rechner verwendet werden. Er kann überall dort in Verbindung mit einem normalen Analogrechner oder mit einem Simulationssystem zu einem Hybridsystem ergänzt werden, wo Problemlösungen mit Genauigkeiten gewünscht werden, die weit über die Genauigkeitsgrenzen von Analogrechnern üblicher Bauart hinausgehen (z. B. bei Koordinatentransformationen). Der TRICE-Rechner enthält spezielle Analog-Digital-Umsetzer mit einer Abtastfrequenz von 2^{17} Hertz.

Die Probleme dürfen Differentiale, Integrale, Logarithmen, Exponentialfunktionen, trigonometrische Funktionen, Umkehrfunktionen usw. enthalten. Von oft entscheidender Bedeutung bei der Lösung von Differentialgleichungssystemen ist die Integration nach jeder beliebigen unabhängigen Veränderlichen und nicht nur, wie sonst üblich, nach der Zeit.

Dadurch, daß die vom Analogrechner her bekannten Programmierungsmethoden übernommen werden, ist die Programmierungsarbeit von Problemen wesentlich geringer als beim Digitalrechner und kann nach kurzer Zeit selbständig durchgeführt werden.

Eine der wichtigsten Grundeinheiten des TRICE-Systems ist der Digitalrechner PB-250. Die universelle Verwendbarkeit des PB-250 im Gesamtsystem des TRICE ergibt eine besondere Beweglichkeit bei der Behandlung von Echtzeitproblemen. Der Ingenieur kann bei seinen Problemen direkt mit dem Rechner arbeiten, die Problemlösungen beobachten, Parameterwerte oder aber Teile eines Modells ändern — um gewünschte Ergebnisse zu erhalten. Da die Anlage auch repetierend rechnen kann (bis 100 Hz), können die Ergebnisse als stehendes Bild auf dem Bildschirm eines Elektronenstrahl-Oszillographen dargestellt werden.

Vorhandene Analogrechner mit einem Ausgangsspannungsbereich von $\pm$ 10 V oder von $\pm$ 100 V können im Hybridsystem mit dem TRICE-Rechner zusammenarbeiten. 30 unabhängige analoge Ein- und Ausgänge können gleichzeitig betrieben werden.

Die Kombination der analogen und digitalen Arbeitsweise bringt so entscheidende Vorteile, daß die Einsatzmöglichkeiten des TRICE-Rechners in Industrie und Wissenschaft immer mehr wachsen.

2. Die Grundeinheiten des TRICE-Systems

Das TRICE-System setzt sich aus unabhängigen Recheneinheiten zusammen, die alle in der Technik der gedruckten Schaltung hergestellt werden. Von ganz entscheidendem Vorteil ist, daß sämtliche an der Rechnung beteiligten Einheiten parallel arbeiten. Auf diese Weise ist eine hohe Rechengeschwindigkeit zu erzielen, die stets gleich und unabhängig von der Anzahl der Recheneinheiten ist. Diese Recheneinheiten werden auf dem Problembrett zusammengeschaltet. In Bild 1 sind die Bezeichnungen der verschiedenen Recheneinheiten, ihre Symbole und die mathematische Formulierung angegeben.

So wie man sich beim elektronischen Analogrechner aus rein technischen Überlegungen für das Verfahren der wiederholt angewandten Integration entschieden hat, so wollen wir nach den im Bild 1 dargestellten Symbolen auch hier bei unseren Rechenschaltungen ganz entsprechend verfahren. Auf die Frage der Programmierung werden wir noch zurückkommen. Grundsätzlich sind gemäß der Rechenvorschrift des zu lösenden Problems die verschiedenen Rechenkomponenten derart zu einer Rechenschaltung zusammengeschaltet, daß die erhaltene Lösungsfunktion der Lösung des mathematischen oder physikalischen Problems entspricht. Das zu lösende Differentialgleichungssystem wird jeweils nach der höchsten Ableitung aufgelöst. Von diesen höchsten Ableitungen kommen wir durch entsprechend oft angewandte Integration zu den unter Umständen benötigten Ableitungen und zur Originalfunktion selbst. Die Grundelemente mit ihren Symbolen entsprechend Bild 1 (Summierer, Integrierer, Multiplizierer, Analog-Digital- und Digital-Analog-Umsetzer) werden so zu einer Rechenschaltung zusammengeschaltet, wie es die mathematischen Gleichungen vorschreiben.

Bezeichnung	Symbol	Mathematische Formulierung
Summierer	dy_1, dy_2, …, dy_5, dy_6 → ΔY Summierer → dz	$dz = \sum_{\nu=1}^{n} dy_\nu$
Einfacher Integrator	Integrator (y; dx, dz, dy)	$dz = y\,dx$
Summen-Integrator	Integrator (dx, dz, dy_n, dy_1)	$dz = (\sum_{\nu=1}^{n} y_\nu)\,dx$
Konstanten-Multiplizierer	dx → k Konstanten-Multiplizierer → $dz = k\,dx$	$dz = k \cdot dx$ mit $k = \text{const.}$
Variablen-Multiplizierer	dx, dy → Variablen Multiplizierer → dz	$dz = d(xy)$
Servo	Servo (dx, dz, dy_2, dy_1)	$dz = (\text{Sign.}\,\lvert y_1 + y_2 \rvert\, dx)$
Analog-Digital-Umsetzer	→ A-D-Umsetzer →	
Digital-Analog-Umsetzer	→ D-A-Umsetzer →	
Anzeigegerät	$f(\tau)$, τ	$e_0 = f(\tau)$

Bild 1. Symbole der Recheneinheiten.

Zu den verwendeten Bezeichnungen der Symbole und mathematischen Formulierungen ist zu sagen, daß man korrekterweise in der schematischen Darstellung und der Programmierung das Differentialzeichen für die Ein- und Ausgangsgrößen durch den endlichen Zuwachs Δx, Δy, Δz ersetzen sollte. An diese Tatsache sollte man zumindest denken, auch wenn sich in der Praxis die angegebene Schreibweise durchsetzt.

Als Speicher-Bauelemente für die verschiedenen Recheneinheiten werden magnetostriktive Verzögerungsleitungen verwendet.

Die Eingabe in den TRICE-Rechner kann von Hand oder automatisch erfolgen. Analog-Digital- und Digital-Analog-Umsetzer werden zur Umkehrung der jeweils vorliegenden Information in die gewünschte Information benutzt.

Die Ausgangsgrößen können somit in analoger oder in digitaler Form (binär oder dezimal) vorliegen, je nachdem, welche Ausgabeeinheiten angeschlossen werden sollen. Als weitere Einheiten sind Lochstreifen-Ein- und Ausgabegeräte, Schreiber und Anzeigegeräte erforderlich. Die Vielgestaltigkeit des Einsatzes wird wesentlich durch den eingebauten Digitalrechner PB-250 als Steuereinheit erhöht. Mit ihm können Programmspeicherung oder gewünschte Programmänderung vorgegeben werden und Steuervorgänge in simulierten Systemen ausgelöst werden. Auf Grund relativ kleiner Rechenzeiten, Addition eines 22-Bit-Wortes 12 μs, Multiplikation 276 μs, Zugriffszeit 12—3072 μs können bei langsam veränderlichen Vorgängen Umformungen, Datensortierungen sowie Kennzeichnungen teilweise während der Rechenzeit vorgenommen werden. Das TRICE-System ist jederzeit aus der Grundeinheit, bestehend aus Problembrett, Ein- und Ausgabe und Digitalrechner PB-250, weiter ausbaufähig. Alle Recheneinheiten und Umsetzer sind in Einschubtechnik in genormten Größen ausgeführt und werden in Gestellreihen mit eigener Stromversorgung untergebracht. Die Bausteine laufen auf Gleitschienen, so daß jedes Element für die Instandhaltung und die Überprüfung einzeln herausgezogen werden kann.

Auf Grund der Transistorisierung des Rechners ist die Leistungsaufnahme so niedrig, daß auf die Verwendung von Belüftungs- oder Klimaanlagen stets verzichtet werden kann. Die Leistungsaufnahme des PB-250 beträgt etwa 30 Watt, die eines einzelnen Integrierers 9 Watt und die eines Summierers 5 Watt. Der Multiplikator für veränderliche Eingangsgrößen benötigt etwa 11 Watt. Im Bild 2 ist der Aufbau eines Multiplizierers für veränderliche Größen dargestellt.

Der Geräteaufbau eines TRICE-Systems mittleren Umfangs ist in Bild 3 gezeigt. Die verschiedenen Recheneinheiten sind in dem äußeren Gestellrahmen untergebracht. Im Mittelteil ist die Grundrecheneinheit mit Problembrett und Digitalrechner PB-250 zu erkennen.

Da der Integrator eines der wesentlichsten Grundelemente des TRICE-Rechners darstellt, soll dieser im folgenden Abschnitt ausführlicher behandelt werden.

2.1 Der Integrator

Gemäß dem in Bild 1 gegebenen Symbol soll es sich bei dem Integrator um eine Einheit handeln, die in der Lage ist, das Integral einer beliebigen Größe zu bilden. Der hier verwendete Integrator ermittelt den Integralwert, indem er die jeweiligen Zuwachsflächen aufsummiert. Die Summe dieser Zuwachsflächen ist eine Näherung für den Integralwert. Die Genauigkeit der Integration hängt von der Größe des angewandten Zuwachses in x-Richtung, d. h. von der Abschnittsweite oder Schrittweite, ab. Das Bild 4 soll als Blockschaltung die prinzipielle Arbeitsweise eines Integrators zeigen.

Der jeweilige Augenblickswert von y wird im y-Register gespeichert. Dies geschieht durch die dauernde Zuführung der y-Änderungen (geschrieben als dy) über den zweiten Eingang in das y-Register. Auf diese Art und Weise wird

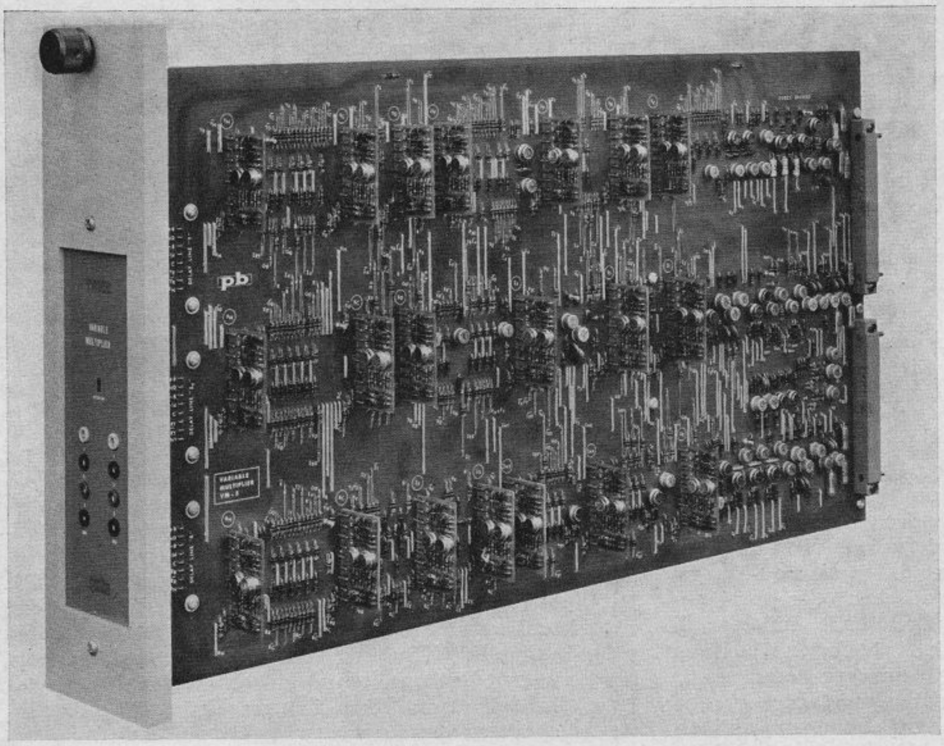


Bild 2.
Aufbau eines Multiplizierers.

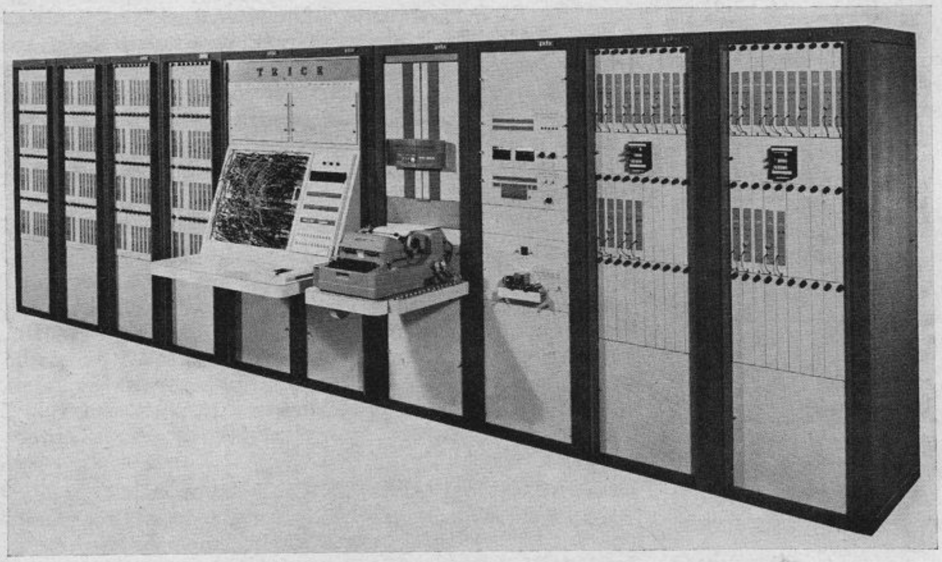


Bild 3.
Ansicht einer TRICE-Anlage.

der y-Wert entsprechend der gewünschten Funktion geändert. Dieser jeweilige Wert, d. h. der Augenblickswert von y im y-Register wird entweder zum Wert im R-Register addiert oder davon subtrahiert, wenn eine dx-Änderung der Eingangsgröße am Addierer anliegt. Es wird also y zum R-Register addiert, wenn dx positiv ist und y wird vom R-Register subtrahiert, wenn dx negativ ist. Das R-Register erzeugt ein positives Δz als Ausgangsgröße bei positiver Änderung von y und ein negatives Δz bei negativer Änderung. Die Summe sämtlicher Änderungen Δz des R-Registers ist proportional dem Integral:

$$\int y \, \mathrm{d}x.$$

Im Bild 5 ist die graphische Darstellung der Integration wiedergegeben. Grundsätzlich erhält der Integrator zwei Eingangsgrößen, und zwar die Differenzen Δx und Δy. Er erzeugt neben der augenblicklichen Größe y im y-Register als Ausgangsgröße Δz. Diese endlichen Differenzen Δx, Δy und Δz sind in der Symbolik und Darstellung durch die zugehörigen Differentiale dx, dy und dz ersetzt. Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, daß jede

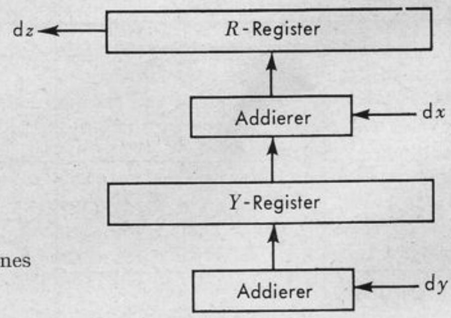


Bild 4.
Blockschaltbild eines Integrators

beliebige Größe als unabhängige Veränderliche verwendet werden kann. Das bedeutet, daß die Integrator-Ausgangsgröße für andere TRICE-Einheiten als Eingangsgröße dienen kann. Der im y-Register entsprechend Bild 4 gespeicherte Wert nach i Schritten ergibt sich zu

$$y_i = y_0 + h \sum_{k=1}^{k=i-1} \mathrm{d}y_k,$$

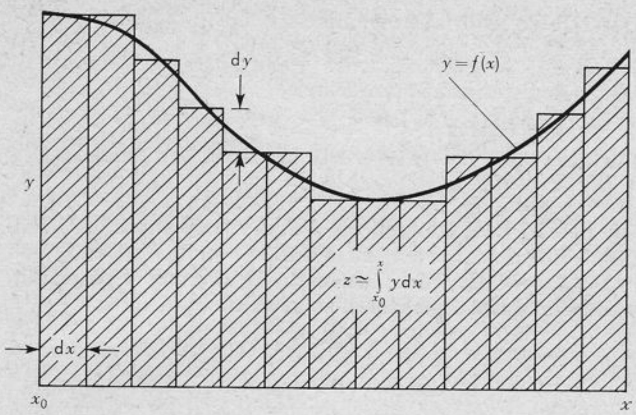


Bild 5. Graphische Darstellung der Integration.

wobei y_0 der Anfangswert von y ist. y_0 wird von einem sogenannten I-Register geliefert, worin der Anfangswert für die Dauer der Rechnung gespeichert bleibt, damit auch im repetierenden Betrieb dieser Wert jederzeit zugänglich bleibt. Der Maßstabsfaktor h ist durch die Stellung des Meßstabsbit bestimmt. Der dy-Zuwachs beträgt entweder 0, ein positives oder negatives Bit. Für den Bereich von y soll stets

$$-1 \leqq y_i < +1$$

gelten. Bei dieser Art Bildung von y_i ergibt sich graphisch für die Integration eine rechteckförmige Näherung.

Um Verfeinerungen, d. h. eine Genauigkeitssteigerung bei der Integration zu erreichen, wird nicht von einer rechteckförmigen Näherung, sondern von einer trapezförmigen Näherung Gebrauch gemacht. Diese Verbesserung erfordert ein zusätzliches I-Register. Entsprechend Bild 6 wird die Integration mittels extrapolierter trapezförmiger Näherung durchgeführt, wobei der Integrator die Fläche des $(i+1)$-ten Intervalls während des i-ten Schrittes berechnet. Hiervon macht man zweckmäßig Gebrauch, da die zweite Eingangsgröße dy vielfach als Ausgangsgröße eines anderen Integrators auftritt.

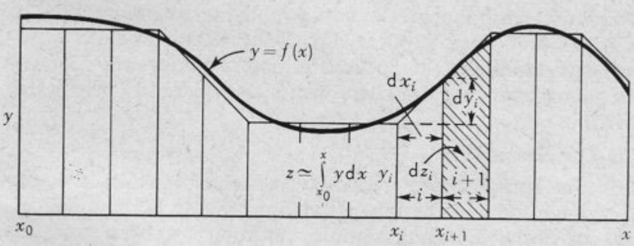


Bild 6. Graphische Darstellung der Integration.

Während eines beliebigen Rechenintervalls i wird die folgende Größe S_i ins R-Register gebracht:

$$S_i = (y_i + \mathrm{d}y_i)\,\mathrm{d}x_i + {}^1\!/_2\,\mathrm{d}y_i\,[\mathrm{Sign.}\ (\mathrm{d}x_i)]\,\mathrm{d}x_i,$$

worin dx_i selbst aus einer Binärziffer und einem Vorzeichen besteht. [Sign. (dx_i)] bedeutet:

[Sign. (dx_i)] gleich $+1$, wenn dx_i positiv ist,

[Sign. (dx_i)] gleich -1, wenn dx_i negativ ist.

Die Größe y_i ist der Wert von y zu Beginn der i-ten Periode. Der zweite Ausdruck in der Gleichung $\frac{1}{2}$ (dy_i) [Sign. (dx_i)] ist die trapezförmige Korrektur. Die Größe d$y_i \cdot$ (dx_i) ist die extrapolierte Verbesserung.

Eine etwas abgeänderte, aber gleichwertige Form wird häufig für die Darstellung von S_i gebraucht:

$$S_i = [(y_i + \mathrm{d}y_i) \cdot |\,\mathrm{d}x_i\,| + {}^1\!/_2\,(\mathrm{d}y_i)] \cdot \mathrm{Sign.}\ (\mathrm{d}x_i)].$$

Es sei darauf hingewiesen, daß die erste Eingangsgröße des Integrators, dx, die Werte $+1$; 0; -1 annehmen kann. Deshalb kann der erste Ausdruck in vielen Integrationsschritten selbst Null sein und wir erhalten in diesem Fall:

$$S_i = ({}^1\!/_2)\,(\mathrm{d}y_i) \cdot [\mathrm{Sign.}\ (\mathrm{d}x_i)];$$

wobei der Ausdruck Sign. (dx_i) das Vorzeichen des letzten von Null abweichenden dx_i ist. Ganz entsprechend erinnern sich alle TRICE-Recheneinheiten und benutzen stets das Vorzeichen des letzten von Null abweichenden Zuwachses. Wenn die Kapazität des R-Registers groß genug wäre, würde der Inhalt angenähert:

$$z_i \approx \int_{x_0}^{x} y\,\mathrm{d}x.$$

Es wird jedoch nicht das ganze Integral gebildet, sondern man erzeugt stets nur die Änderungen des Integrals dz bzw. Δz und speichert nur den Rest im R-Register.

Damit ist der Inhalt des R-Registers zu Beginn des i-ten Schrittes:

$$R_i = \frac{1}{2} + \sum_{k=0}^{k=i-1} (S_k - \mathrm{d}z_k),$$

wobei R_i den Bereich zwischen 0 und 1 hat. Das R-Register wird auf einen Anfangswert ${}^1\!/_2$ gebracht, um den Abrundungsfehler klein zu halten.

Die jeweilige Ausgangsgröße dz als Änderung des Integralwertes besteht stets aus einer binären Ziffer und einem Vorzeichen. Diese Ausgangsgröße wird wie folgt definiert:

1. [Sign. (dz_i)] = [Sign. S_i], d. h. das Vorzeichen der Änderung ist gleich dem Vorzeichen von S_i;
2. dz = $+1$, wenn $(R_i + S_i) \geqq 1$. Es wird also eine positive Ausgangsänderung erzeugt, wenn der Rest des R-Registers des vorhergehenden Rechenschrittes und der in dem gegenwärtigen Intervall erzeugte Wert gleich oder größer als 1 ist.
3. dz = -1, wenn $(R_i + S_i) < 0$. Ist der Rest des R-Registers des vorhergehenden Rechenschrittes und der Wert des gegenwärtigen Intervalls negativ, so ist der Wert der Ausgangsänderung dz negativ.
4. dz = 0, wenn $0 \leqq (R_i + S_i) < 1$. Der Zuwachs dz ist 0, wenn der Wert des Restes des R-Registers vom vorhergehenden Rechenschritt plus dem Wert des gegenwärtigen Intervalls gleich oder größer ist als Null, jedoch kleiner als 1 ist.

Arbeitet der Integrator nach dieser angegebenen trapezförmigen Näherung, so kann die Ausgangsgrößenänderung dz bzw. Δz während der i-ten Periode wie folgt geschrieben werden:

$$\mathrm{d}z_i = [(y_i + \mathrm{d}y_i)\,|\mathrm{d}x_i| + {}^1\!/_2\,\mathrm{d}y_i] \cdot [\mathrm{Sign}\ \mathrm{d}x_i]$$

und bei Vorzeichenänderung:

$$\mathrm{d}z_i = [(y_i + \mathrm{d}y_i)\,|\mathrm{d}x_i| - {}^1\!/_2\,\mathrm{d}y_i] \cdot [\mathrm{Sign}\ \mathrm{d}x_i].$$

Die Integration kann somit auf dem Wege der Interpolation wie auch der Extrapolation durchgeführt werden. Die Integratoren der TRICE können für die Interpolation oder für die Extrapolation programmiert werden.

2.2 *Die Multiplikation mit einer Konstanten*

Zur Multiplikation einer Größe mit einer Konstanten wird auch die im letzten Abschnitt beschriebene Integrationseinheit verwendet. Man ändert den Integrator insofern ab, als keine dy-Änderungen zugelassen sind. Der Wert des y-Registers wird in gleicher Weise wie bei den anderen Einheiten eingegeben. y wird also als Konstante im Konstanten-Multiplizierer verwendet.

2.3 *Die Multiplikation veränderlicher Größen*

Zur Multiplikation veränderlicher Größen geht man hier ganz entsprechend wie beim mechanischen Analogrechner

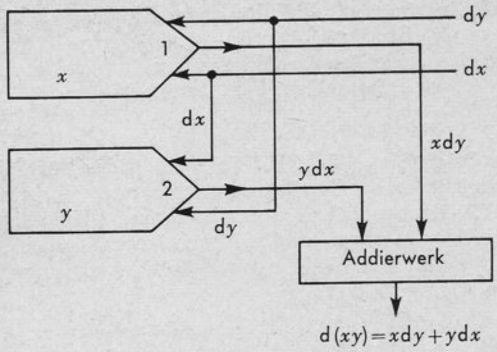


Bild 7. Multiplikation veränderlicher Größen.

vor. Die Integration wird gemäß der folgenden Beziehung

$$\mathrm{d}(xy) = y\mathrm{d}x + x\mathrm{d}y,$$

oder angenähert $\mathrm{d}(xy) = (y + \mathrm{d}y)\,\mathrm{d}x + x\mathrm{d}y$,

bzw. $\mathrm{d}(xy) = x\mathrm{d}y + y\mathrm{d}x + \mathrm{d}y\mathrm{d}x$,

unter Benutzung zweier Integratoren durchgeführt. Im Bild 7 ist die Zusammenschaltung der Integratoren gezeigt.

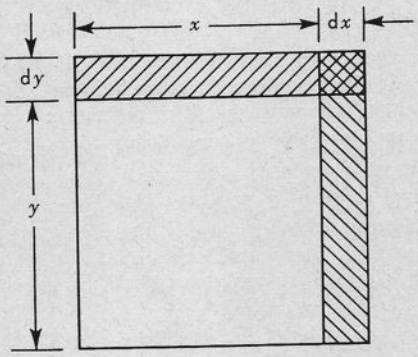


Bild 8. Graphische Darstellung der Multiplikation.

Entsprechend dem Bild 8 ergibt sich bei der rechteckförmigen Näherung der Integration ein Fehler der Größe $\mathrm{d}x\mathrm{d}y$, da

$$\mathrm{d}(xy) = (y + \mathrm{d}y)\,\mathrm{d}x + (x + \mathrm{d}x)\,\mathrm{d}y,$$

oder $\mathrm{d}(xy) = y\mathrm{d}x + x\mathrm{d}y + 2\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y$ ist.

Die Rechnung entsprechend dem Ausdruck

$$\mathrm{d}(xy) = (y + \mathrm{d}y)\,\mathrm{d}x + x\mathrm{d}y$$

wird ausgeführt, indem der alte Wert x mit $\mathrm{d}y$ und der neue Wert $y + \mathrm{d}y$ mit $\mathrm{d}x$ multipliziert wird. Beide Produkte werden im Addierwerk summiert und ins R-Register gegeben. Auf diese Art und Weise wird die Größe $\mathrm{d}x\mathrm{d}y$ nur einmal addiert. Die Einsparung in dieser Rechenschaltung besteht im wesentlichen in der Benutzung nur eines R-Registers, eines Addierers und eines Ausgangskreises für die Summierung des Produktes und der Möglichkeit der Umwandlung in Differenzengrößen. Alle Funktionen wie Eingabe, Zeitablauf und Übersteuerungsanzeige werden mittels der üblichen Schaltungen auf die beiden zu multiplizierenden Faktoren x und y verteilt. Der Multiplizierer für veränderliche Eingangsgrößen hat die folgenden fünf Register:

1. y-Register,
2. x-Register,
3. y-Anfangsbedingungs-register
4. x-Anfangsbedingungs-register,
5. R-Register.

Die Werte der Anfangsbedingungen werden in gleicher Weise wie für die normalen Integratoren gespeichert.

Das x-Register erfaßt den Bereich

$$-1 \leqq x \leqq +1.$$

Das y-Register erfaßt den Bereich

$$-1 \leqq y \leqq +1.$$

Für die Größe $S = y\mathrm{d}x + x\mathrm{d}y$ gilt auch der Bereich

$$-1 \leqq S \leqq +1.$$

Die beiden Bedingungen für x und y sind durch die Wahl der Maßstabsfaktoren zu erfüllen, wenn $|x| < 1$ und $|y| < 1$ gewählt wird. Die letzte Bedingung wird erfüllt, wenn die Maßstabsfaktoren so gewählt werden, daß

$$|x| < {}^1/_2$$

und

$$|y| < {}^1/_2$$

sind.

2.4 Die Wirkungsweise der Servos

Der Servo wird als Komparator bei der Lösung von Differentialgleichungen oder zur Erzeugung von unstetigen und nichtlinearen Funktionsverläufen verwendet. Der Servo reagiert auf jede Abweichung von Null und bringt diese in sein y-Register. Zu Beginn der Rechnung ist das y-Register auf den Wert Null gebracht worden.

Der Servo erhält zwei differentielle Eingangsgrößen, $\mathrm{d}y_1$ und $\mathrm{d}y_2$ und speichert sie im y-Register. Die differentielle Ausgangsgröße ist

$$|\Delta z| = 1 \text{ für } |\Delta x| = 1, \text{ wenn } 0 < |y| < 1.$$

$$\operatorname{Sign} \Delta z = (\operatorname{Sign} \Delta x) \cdot (\operatorname{Sign} y).$$

Wird die Ausgangsgröße direkt von y und Δx abgeleitet, so wird kein R-Register benötigt.

Zur Erzeugung von unstetigen und nichtlinearen Funktionen, wie z. B. Rechteck- oder Sägezahnfunktionen, kann der Servo ebenfalls verwendet werden.

Das Symbol für den Servo als Funktionsgenerator ist gleichfalls in Bild 1 gezeigt. Die mathematische Formulierung seiner Arbeitsweise lautet wie folgt:

$$|\Delta z| = 1 \text{ für } \left\{\begin{matrix} 0 < y < \frac{1}{2} \\ 0 > y > \frac{1}{2} \end{matrix}\right\} \text{wenn } |\Delta x| = 1,$$

$$\operatorname{Sign} \Delta z = (\operatorname{Sign} \Delta x) \cdot (\operatorname{Sign} y).$$

Wird die Ausgangsgröße von y und Δx abgenommen, so wird kein R-Register benötigt. Das y-Register wird automatisch beim Befehl „Rückstellung" wieder auf die Anfangsbedingung gebracht, wenn repetierend gearbeitet wird.

2.5 Der Summierer

Für die Integratoren und Servos stehen jeweils zwei $\mathrm{d}y$-Eingänge zur Verfügung. Vom Summierer können jedoch bis zu sechs Eingangssignale summiert werden und als Eingang für den an ihn angeschlossenen Integrator oder Servo benutzt werden. Die Teilsummen $\mathrm{d}y_1 + \mathrm{d}y_2 + \mathrm{d}y_3$ und $\mathrm{d}y_4 + \mathrm{d}y_5 + \mathrm{d}y_6$ werden in der ersten Phase der Rechenoperation gebildet. Diese Teilsummen liegen im Bereich -3 bis $+3$. Während der zweiten Phase der Rechnung werden diese Teilsummen addiert und man erzeugt so die Endsumme im Bereich -6 bis $+6$. Diese Endsumme wird dann in das y-Register derjenigen Einheit gebracht, an die der Summierer angeschlossen ist. (Ein Integrator oder ein Servo.)

2.6 Analog-Digital-Umsetzer

Die Eingangsgröße eines Analog-Digital-Umsetzers ist eine Spannung, die als analoge Größe eine beliebige Veränderliche z darstellt. Eingangsspannungsänderungen in Form verschiedener Spannungsniveaus bestimmen den digitalen Ausgang des Analog-Digital-Umsetzers. Wenn die Spannung bis zum nächst höheren Niveau ansteigt, wird ein positiver Zuwachs erzeugt (positiver Ausgang). Sinkt die Spannung zum nächst niederen Niveau, wird ein negatives Differential gebildet. Damit ist die Zahl, mit der das Ausgangsdifferential vorkommt, abhängig von der Steigung der analogen Eingangsspannungsfunktion. Das Symbol für den Analog-Digital-Umsetzer ist ebenfalls in Bild 1 angegeben.

In Verbindung mit einem Präzisionsspannungsteiler wird eine 14stufige Zähleinheit zur Erzeugung einer Spannung benutzt, mit der die Eingangsgröße z an einem Summierungspunkt zu vergleichen ist. Der Spannungskomparator (Vergleicher) wird durch einen Uhrenimpuls der Kontrolleinheit bei jedem Rechenschritt getriggert, um den Fehler am Summierungspunkt mit Null zu vergleichen. Wenn der Fehler $+(^1/_2)\,\mathrm{d}z$ oder $-(^1/_2)\,\mathrm{d}z$ übersteigt, wird der Zähler beeinflußt, durch einzelne dz-Änderungen herauf- oder herunterzuzählen. Diese Zählimpulse bestimmen den dz-Zuwachs des Umsetzers. Die fünfzehnte Stelle im Zähler wird zur Anzeige der Bereichsüberschreitung des Umsetzers benutzt.

2.7 Digital-Analog-Umsetzer

Der Digital-Analog-Umsetzer erhält die Information in Digitalform und formt diese in eine analoge Spannung um. Das Symbol des Digital-Analog-Umsetzers ist in Bild 1 dargestellt. Jeder Analog-Digital-Umsetzer kann so geschaltet werden, daß er auch als Digital-Analog-Umsetzer arbeitet. Über den Bereich des Umsetzers hinausgehende Änderungen werden durch eine Bereichsüberschreitungsanzeige angezeigt.

3. Die Programmierung

In diesem Abschnitt sollen nunmehr nach der Beschreibung der Grundrecheneinheiten des TRICE-Rechners die Methoden behandelt werden, um ein gegebenes mathematisches Problem für den TRICE-Rechner vorzubereiten. Jeder Analyse eines physikalischen Problems mit einem Rechner geht die Aufstellung des zu lösenden Gleichungssystems voraus. Nachdem man das entsprechende Differentialgleichungssystem hat, ist man in der Lage, eine Rechenschaltung unter Verwendung der verschiedenen Symbole entsprechend der durchzuführenden Rechenoperationen herzustellen. Der nächste Schritt ist die Wahl der Maßstabsfaktoren. Diese hat nun so zu erfolgen, daß während des gesamten Rechenvorgangs keine Übersteuerung irgendeiner Recheneinheit erfolgen darf. Um Fehlrechnungen auf Grund von Übersteuerungen zu vermeiden oder zu erkennen, wird der jeweiligen Recheneinheit je eine Übersteuerungsanzeige zugeordnet. Der letzte Schritt ist dann noch die Codierung. Unter Codierung verstehen wir denjenigen Prozeß, der unser Rechenprogramm in die Sprache der Maschine umsetzt.

Die folgenden Punkte:

Aufstellen des Gleichungssystems;

Einführung von Maßstabsfaktoren;

Codierung

fassen wir unter dem Begriff der Programmierung zusammen.

Der Aufwand für die verschiedenen Punkte ist unterschiedlich groß. Bei technischen Problemen hat über die physikalischen Gesetze die mathematische Formulierung des Problems zu erfolgen. Diese, unter Umständen nicht unerhebliche Arbeit, muß bei allen Rechnern stets durchgeführt werden. Sie geht der eigentlichen Rechnung voraus und wird deshalb in vielen Fällen nicht zur Programmierung gezählt. Bei rein mathematischen Problemen muß die jeweilige Gleichung oder das Differentialgleichungssystem stets maschinengerecht, d. h. unter dem Blickwinkel der Rechenmaschine, umgeformt werden.

Man kann für ein Problem im allgemeinen viele verschiedene Programme aufstellen. Wenn auch der direkte Weg der Lösung einer Differentialgleichung, die Durchführung der Integration ausgehend von der höchsten Ableitung, der häufigst angewendete Weg ist, so sind die Lösungsmethoden doch stark vom Problem und dem jeweiligen Programmierer abhängig. Man sollte grundsätzlich jedes Problem vor der Programmierung auf Vereinfachungsmöglichkeiten untersuchen. Da der TRICE-Rechner wirkliche Differentialgleichungen löst, sollte zuerst sichergestellt sein, daß das Problem sich als Differentialgleichung darstellen läßt. Im weiteren soll das Problem so weit analysiert werden und Betrachtungen darüber angestellt werden, welche Grundrecheneinheiten des TRICE-Rechners die verschiedenen Glieder des Systems zu lösen gestatten. Es werden z. B.

1. Integratoren zur Erzeugung von Ableitungen jeder Ordnung verwendet. Setzen wir voraus, daß der Integrand eine Ableitung n-ter Ordnung ist, so erhalten wir bei der Integration hinsichtlich der unabhängigen Veränderlichen durch Summierung der Ausgangsgröße die Ableitung $(n\text{-}1)$-ter Ordnung.
2. Konstanten-Multiplizierer werden benutzt, um eine veränderliche Größe mit einer Konstanten zu multiplizieren.
3. Variablen-Multiplizierer werden gebraucht, um das Produkt aus zwei veränderlichen Funktionen zu bilden.
4. Servos werden eingesetzt, um eine Funktion u als Funktion von v zu erzeugen. Hierbei wird u implizit als Funktion von v definiert: $F(u, v) = 0$. Servos werden auch dort verwendet, wo die Zahl der ersten Eingänge nach anderen Recheneinheiten vergrößert werden soll. Weiterhin können Servos eingesetzt werden zur Erzeugung von Unstetigkeiten und von nichtlinearen Funktionen, wie z. B. Rechteck- und Sägezahnfunktionen oder die Bildung des Absolutbetrags.
5. Summierer werden stets dann angewendet, wenn die Zahl der zweiten Eingänge einer Einheit vergrößert werden soll. Normalerweise sind maximal zwei zweite Eingänge in einer Einheit vorgesehen. Mit dem Summierer ist es möglich, bis insgesamt sechs zweite Eingänge zu erfassen. Jeder Summierer ist direkt an einen Integrierer oder an einen Servo angeschlossen.

Nachdem man sich auf die Anzahl und Art der Recheneinheiten festgelegt hat, sind die Anfangswerte zu bestimmen und die maximalen bzw. minimalen Werte des Problems abzuschätzen. Für die Integration muß man sich außerdem noch für die anzuwendende Integrationsformel entscheiden.

Die Anfangsbedingungen werden vor Rechenbeginn sowohl den Registern der Integratoren als auch denen der Variablen-Multiplizierer und Servos zugeführt und in diesen gespeichert. Beim repetierenden Betrieb werden am Ende jeder Rechnung diese Anfangswerte wieder in die Rechenregister neu hereingegeben. Aus diesem Grunde ist es erforderlich, die Anfangswerte für jedes verwendete Register durch die Problemanalyse zu bestimmen. Dadurch, daß Anfangsbedingungen vorgegeben werden, erhalten wir stets nur diejenige partikuläre Lösung unseres mathematischen Problems, die diesen Anfangsbedingungen genügt. Es sind zwar im allgemeinen die für das System erforderlichen Anfangsbedingungen gegeben, aber entsprechend dem folgenden Beispiel müssen auch für die anderen Recheneinheiten, wie Multiplizierer und Servos, Anfangswerte ermittelt werden. Es werde die Differentialgleichung zweiter Ordnung

$$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} + \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} - y^2 - \sin y - k = 0$$

betrachtet. Gegeben seien die folgenden zwei Anfangsbedingungen

$$y_{(x=0)} = 0;\ \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2}_{(x=0)} = k.$$

Die Bezeichnung der erforderlichen Integratoren ist der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Integrator	1	2	3	4	5
Integrand	$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2}$	$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}$	y	$\sin y$	$\cos y$

Bei fortgesetzter Integration ist somit für den ersten Integrator:

$$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d} x^2}_{(x=0)} = k.$$

Für den zweiten Integrator wird bei $y = 0$:

$$\frac{\mathrm{d} y}{\mathrm{d} x}_{(x=0)} = k - \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d} x^2}_{(x=0)} = k - k = 0.$$

Folglich ist der Anfangswert der Registeranfangsbedingung für den zweiten Integrator gleich Null. Für den dritten Integrator ist die Registeranfangsbedingung mit $y = 0$ gegeben. Zur Erzeugung von $\sin y$ mit Hilfe von zwei Integratoren sind wegen $y = 0$, $\sin y = 0$ und $\cos y = 1$. Die Anfangsbedingungen der Integratoren 4 und 5 sind somit Null und 1.

Ganz entsprechend müssen stets sämtliche Anfangswerte in die Register gegeben werden.

Eine besondere Bedeutung sollte man den Maximal- bzw. Minimalwerten eines Problems beimessen. Diese Werte beeinflussen den Aufwand, der bei der Auswahl der günstigsten Rechenschaltung erforderlich ist. Ebenso wird die Länge der verschiedenen Rechenregister entsprechend dem gewählten Maßstabsfaktor durch den Wert dieser Maxima oder Minima bestimmt. Diesen Werten entsprechen im allgemeinen physikalische Grenzwerte des Problems, wie z. B. maximale Geschwindigkeit, Höhe, Beschleunigung oder minimaler Druck.

3.1 Entwurf der Rechenschaltung

Die Rechenschaltung stellt zeichnerisch die Verkopplung der verschiedenen Grundrecheneinheiten unter Verwendung der im Bild 1 angegebenen Symbole dar. Es wird der jeweilige Ausgang einer Einheit mit dem gewünschten Eingang einer anderen Einheit verbunden. Für die günstigste Rechenschaltung lassen sich keine allgemeinen Angaben machen, da die angewendete Lösungsmethode für die verschiedenen Probleme auf Grund der Erfahrung der Programmierer unterschiedlich ist. Beim Entwurf der Rechenschaltung ist die übliche Methode die Anwendung der fortgesetzten Integration. Im folgenden sollen die Grundgedanken der Programmierung und der Entwurf der Rechenschaltung an Beispielen entwickelt werden. Die Recheneinheiten werden nunmehr so geschaltet, daß jedes Glied der das System beschreibenden Differentialgleichung vom Rechner erzeugt wird. Bei der fortgesetzten Integration gehen wir von der höchsten Ableitung aus. Vielfach ist es nicht erforderlich, diese höchste Ableitung selbst zu ermitteln, da diese nicht von Interesse ist. Es ergibt sich dann unter Einsparung von Recheneinheiten eine andere Rechenschaltung.

Bei einem gegebenen System von Differentialgleichungen n-ter Ordnung lösen wir verabredungsgemäß zuerst nach den Gliedern mit dem höchsten Differentialquotienten auf. Daher ergeben sich Differentialgleichungen folgender Form:

$$\frac{\mathrm{d}^n y}{\mathrm{d} t^n} = f\left(\frac{\mathrm{d}^{n-1} y}{\mathrm{d} t^{n-1}}; \frac{\mathrm{d}^{n-2} y}{\mathrm{d} t^{n-2}}; \dots \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d} t^2}; \frac{\mathrm{d} y}{\mathrm{d} t}; y\right). \tag{1}$$

Ausgehend von $\frac{\mathrm{d}^n y}{\mathrm{d} t^n}$ bilden wir durch fortgesetzte Integration die Ableitungen

$$\frac{\mathrm{d}^{n-1} y}{\mathrm{d} t^{n-1}}; \frac{\mathrm{d}^{n-2} y}{\mathrm{d} t^{n-2}}; \dots; \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d} t^2}; \frac{\mathrm{d} y}{\mathrm{d} t}$$

und y. Damit können wir jedes Glied der Differentialgleichung aufbauen. Für eine Differentialgleichung n-ter Ordnung sind somit n Integratoren erforderlich, um jede erforderliche Ableitung und die Originalfunktion selbst zu erzeugen.

Die Maschinenveränderliche $\mathrm{d}x$ oder $\mathrm{d}t$ kann sowohl abhängige als auch unabhängige Veränderliche sein. Zur Darstellung der mathematischen Formulierung der Ein- und Ausgangsgröße eines Integrators wird im allgemeinen von einer Gleichung in Differentialform Gebrauch gemacht, da sowohl die Ein- und Ausgangsgrößen als Differentiale bzw. Differenzen vorliegen.

Allgemein gilt:

$$\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t} = \frac{d}{\mathrm{d}t}(\Theta),$$

$$\frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}t^2} = \frac{d}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}\right),$$

$$\frac{\mathrm{d}^n\Theta}{\mathrm{d}t^n} = \frac{d}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\mathrm{d}^{n-1}\Theta}{\mathrm{d}t^{n-1}}\right).$$

Mit der üblichen Schreibweise der Trennung der Veränderlichen erhält man:

$$\mathrm{d}(\Theta) = \left(\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}\right)\mathrm{d}t,$$

$$\mathrm{d}\left(\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}\right) = \left(\frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}t^2}\right)\mathrm{d}t,$$

$$\mathrm{d}\left(\frac{\mathrm{d}^{n-1}\Theta}{\mathrm{d}t^{n-1}}\right) = \left(\frac{\mathrm{d}^n\Theta}{\mathrm{d}t^n}\right)\mathrm{d}t.$$

Ganz entsprechend gilt z. B. für die Exponentialfunktion

$$\frac{\mathrm{d}\,\mathrm{e}^\Theta}{\mathrm{d}\Theta} = \mathrm{e}^\Theta \text{ bzw. } \mathrm{d}\,\mathrm{e}^\Theta = (\mathrm{e}^\Theta)\,\mathrm{d}\Theta.$$

Bei der Integration hinsichtlich der unabhängigen Veränderlichen t erhalten wir

$$\int \frac{\mathrm{d}^{n-1}\Theta}{\mathrm{d}t^{n-1}}\,\mathrm{d}t = \frac{\mathrm{d}^{n-2}\Theta}{\mathrm{d}t^{n-2}}.$$

Da die Integratoren gemäß Bild 4 als Ausgangsgrößen die endlichen Differenzen Δz bzw. $\mathrm{d}z$ erzeugen, ergibt sich am Ausgang des ersten Integrators

$$\mathrm{d}\left(\frac{\mathrm{d}^{n-2}\Theta}{\mathrm{d}t^{n-2}}\right).$$

Am Ausgang des folgenden Integrators erhält man mit dem Integranden $\frac{\mathrm{d}^{n-2}\Theta}{\mathrm{d}t^{n-2}}$ bei der Integration hinsichtlich t

$$\mathrm{d}\left(\frac{\mathrm{d}^{n-3}\Theta}{\mathrm{d}t^{n-3}}\right).$$

Ganz entsprechend würde man weiter verfahren, bis daß das Differential der Ausgangsgröße $\mathrm{d}(\Theta)$ selbst vorliegt. Im I-Register des jeweiligen Integrators gemäß Bild 4 liegt die Größe des Integranden an, so daß wir für den Integrator die Bezeichnungsweise nach Bild 9 wählen.

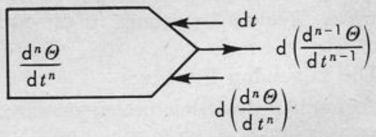


Bild 9. Integrator.

Nachdem die Differentialgleichung oder daß System von Differentialgleichungen nach der höchsten Ableitung wie Gleichung 1 aufgelöst worden ist, wird diese wie folgt umgeschrieben:

$$\frac{\mathrm{d}^n y}{\mathrm{d}t^n} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\mathrm{d}^{n-1}y}{\mathrm{d}t^{n-1}}\right) = f\left(\frac{\mathrm{d}^{n-1}y}{\mathrm{d}t^{n-1}}; \frac{\mathrm{d}^{n-3}y}{\mathrm{d}t^{n-3}}; \frac{\mathrm{d}^{n-2}y}{\mathrm{d}t^{n-2}}; \dots \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2}; \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}; y\right),$$

$$\mathrm{d}\left(\frac{\mathrm{d}^{n-1}y}{\mathrm{d}t^{n-1}}\right) = \left[f\left(\frac{\mathrm{d}^{n-1}y}{\mathrm{d}t^{n-1}}; \frac{\mathrm{d}^{n-2}y}{\mathrm{d}t^{n-2}}; \frac{\mathrm{d}^{n-3}y}{\mathrm{d}t^{n-3}}; \dots \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2}; \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}; y\right)\right]\mathrm{d}t. \tag{2}$$

Nach Gleichung 2 wird die Rechenschaltung aufgebaut. Es soll z. B. für die Differentialgleichung

$$\frac{\mathrm{d}^3\Theta}{\mathrm{d}t^3} - t\,\frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}t^2} = \Theta + \mathrm{e}^\Theta \tag{3}$$

die Rechenschaltung mit TRICE-Recheneinheiten entworfen werden.

Lösen wir nach der höchsten Ableitung auf, so ergibt sich:

$$\frac{d^3\Theta}{dt^3} = \Theta + e^{\Theta} + t\,\frac{d^2\Theta}{dt^2}, \tag{4}$$

oder

$$d\left(\frac{d^2\Theta}{dt^2}\right) = (\Theta)\,dt + (e^{\Theta})\,dt + \left(t\cdot\frac{d^2\Theta}{dt^2}\right)dt,$$

bzw.

$$d\left(\frac{d^2\Theta}{dt^2}\right) = (\Theta)\,dt + (e^{\Theta})\,dt + t\left[d\left(\frac{d\Theta}{dt}\right)\right]. \tag{5}$$

Die zugehörige Rechenschaltung ist im Bild 10 dargestellt. Die Integratoren 1—3 bilden $d\left(\frac{d\Theta}{dt}\right)$, $d(\Theta)$ und $(\Theta)\,dt$. Im Integrator 4 können wir mit Hilfe der so erzeugten Veränderlichen $d\Theta$ leicht e^{Θ} bzw. $d(e^{\Theta})$ bilden und mit dem folgenden Integrator 5 durch Integration hinsichtlich t $(e^{\Theta})\,dt$. Am Ausgang des Summierers 1 liegt dann der entsprechend Gleichung 5 gewünschte Ausdruck für $d\left(\frac{d^2\Theta}{dt^2}\right)$ vor. Wie man der Rechenschaltung ansieht, sind wir nicht in der Lage, auch noch die Größe $\frac{d^3\Theta}{dt^3}$ abzugreifen. Falls auch die höchste Ableitung selbst gewünscht ist, wird man von Gleichung 4 ausgehend einen anderen Weg einschlagen. Die Gleichung 4

$$\frac{d^3\Theta}{dt^3} = \Theta + e^{\Theta} + t\,\frac{d^2\Theta}{dt^2}$$

ergibt in differentieller Form:

$$d\left(\frac{d^3\Theta}{dt^2}\right) = d(\Theta) + d(e^{\Theta}) + d\left(t\,\frac{d^2\Theta}{dt^2}\right) \tag{6}$$

Gehen wir von $d\left(\frac{d^3\Theta}{dt^3}\right)$ aus, so erhalten wir mit Hilfe von drei Integratoren $d\left(\frac{d^2\Theta}{dt^2}\right)$; $d\left(\frac{d\Theta}{dt}\right)$ und $d(\Theta)$. Mit einem weiteren Integrator erzeugen wir e^{Θ} bzw. $d(e^{\Theta})$. Den letzten Ausdruck in Gleichung 6 erhalten wir mit Hilfe eines Multipli-

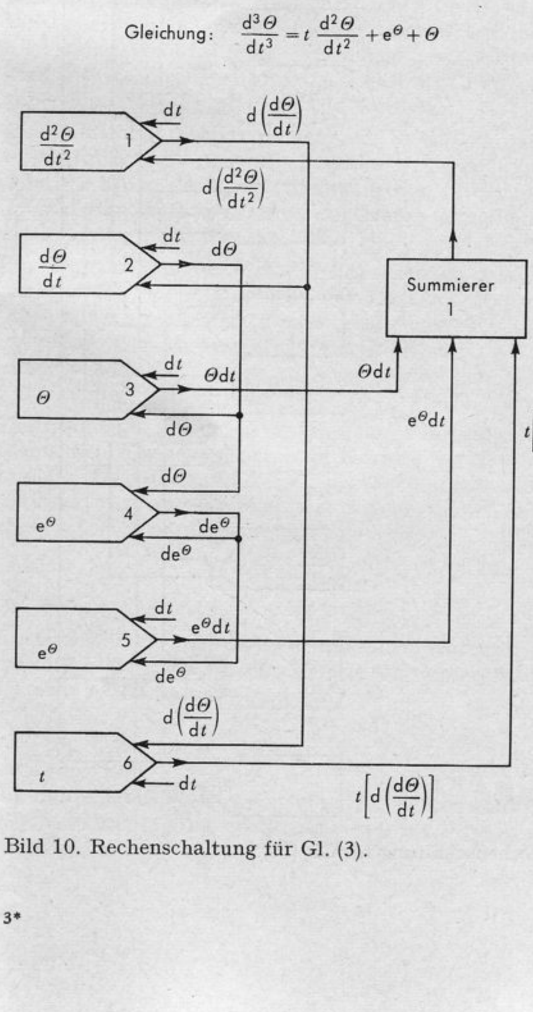


Bild 10. Rechenschaltung für Gl. (3).

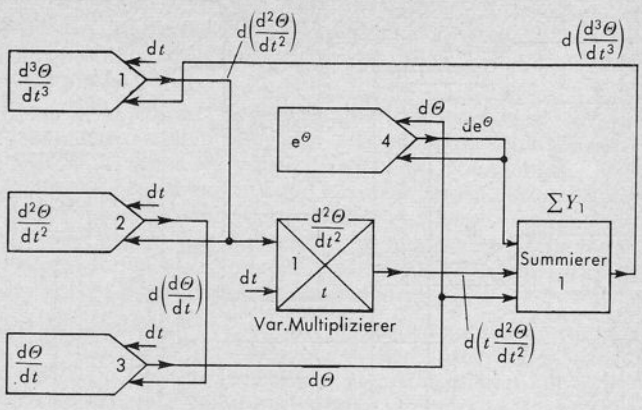


Bild 11. Rechenschaltung für Gl. (3).

kators, der die Multiplikation veränderlicher Größen erlaubt. Auch diesem Multiplikator werden die Variablen Größen als differentielle Größen zugeführt. In unserem Falle somit dt und $d\left(\frac{d^2\Theta}{dt^2}\right)$. Im Bild 11 ist die volllständige Rechenschaltung für die Differentialgleichung 3 bei Verwendung eines Multiplikators angegeben. Ein Summierer ist erforderlich, da beim normalen Integrator als Summenintegrierer nur zwei zweite Eingänge vorhanden sind.

Ist man an der graphischen Darstellung $\Theta = f(t)$ interessiert, so würde man in Bild 10 die Ausgangsgröße des Integrators 2 ($d\Theta$) und in Bild 11 die Ausgangsgröße des Integrators 3 ($d\Theta$) als Eingangsgröße in einen Digital-Analog-Umsetzer geben, der die $d\Theta$-Werte aufsummieren würde und damit Θ selbst als Ausgangsgröße erzeugt. Da im vorliegenden Fall die Größe Θ eine Funktion der Zeit sein sollte, kann die Ausgangsgröße des Digital-Analog-Umsetzers für die Vertikalablenkung eines x-y-Schreibers benutzt werden. Das Ergebnis wäre für bestimmte Werte t jeweils ein Punkt. Der Punktabstand ergibt sich entsprechend der gewählten Schrittweite Δt. In gleicher Weise werden die jeweiligen Werte $\frac{d\Theta}{dt}$, $\frac{d^2\Theta}{dt^2}$ und $\frac{d^3\Theta}{dt^3}$ mit Hilfe weiterer Digital-Analog-Umsetzer ermittelt oder bei geeigneter Rechengeschwindigkeit mittels Speichereinheiten über einen selbsttätig umgeschalteten Digital-Analog-Umsetzer an das Registriergerät weitergegeben.

Die punktförmige Aufzeichnung nähert sich bei geringer Schrittweite Δt bzw. Δx immer mehr dem geschlossenen Linienzug. Durch eine Nachlaufsteuerung kann das Registriergerät auch ohne großen Mehraufwand die Verbindungslinie zugehöriger Punkte aufzeichnen.

An dem folgenden Beispiel der Lösung der Differentialgleichung eines selbsterregten Generators

$$\frac{d^2x}{dt^2} + K(x^2 - 1)\frac{dx}{dt} + x = 0 \tag{7}$$

sollen sämtliche erforderlichen Einheiten mit eingesetzt werden. Wir gehen davon aus, daß nur die Größe x als Funktion von t gesucht ist. Damit können wir auf die höchste Ableitung verzichten. In der Gleichung 8

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -K(x^2 - 1)\frac{dx}{dt} - x \tag{8}$$

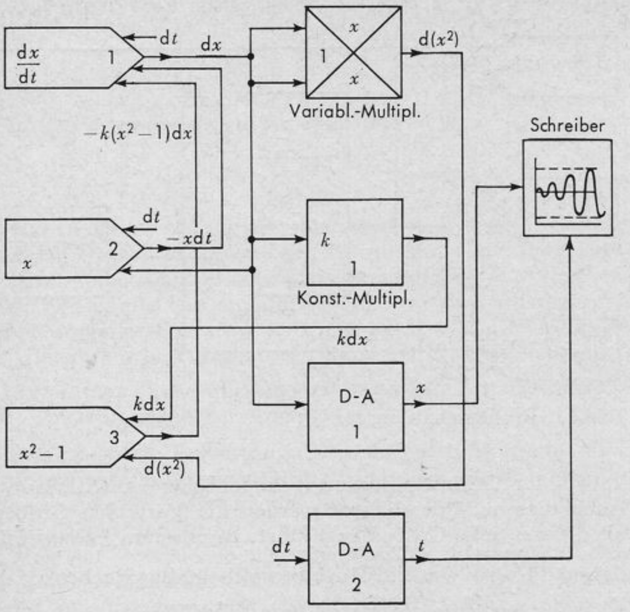
stehen nur zwei Glieder auf der rechten Seite der Gleichung. Wir verzichten deshalb auf einen Summierer und werden den ersten Integrator als Summenintegrierer verwenden.

Formen wir Gleichung 8 um, so ergibt sich

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dx}{dt}\right) = -K(x^2 - 1)\frac{dx}{dt} - x,$$

oder

$$d\left(\frac{dx}{dt}\right) = -\left\{\left[K(x^2 - 1)\frac{dx}{dt}\right]\right\}dt - (x)\,dt. \tag{9}$$



Gleichung: $d\left(\frac{dx}{dt}\right) = -k(x^2-1)dx - xdt$

Bild 12. Rechenschaltung für Gl. (7).

Die Integration hinsichtlich der Zeit t wird im Integrator 1 und 2 durchgeführt. Damit erhalten wir am Ausgang von Integrator 1, den wir als Summenintegrierer verwenden, $d(x)$. Integrator 2 liefert $x\,dt$. Der Variablen-Multiplizierer erzeugt $d(x^2)$ und der Konstanten-Multiplizierer $K \cdot dx$. Im Integrator 3 integrieren wir hinsichtlich x. Zur Darstellung der Lösungsfunktion x als Funktion von t sind ein Schreiber und zusätzlich zwei Digital-Analog-Umsetzer erforderlich. Die vollständige Rechenschaltung ist im Bild 12 angegeben.

Ganz entsprechend ist die Rechenschaltung für ein System von Differentialgleichungen zu entwerfen. Das System

$$\begin{aligned} \frac{d^3w}{dt^3} &= w\frac{dv}{dt} + v, \\ \frac{d^3v}{dt^3} &= w\frac{dw}{dt} + vt, \end{aligned} \tag{10}$$

wird umgeformt und wir erhalten in differentieller Schreibweise Gleichung 11:

$$\begin{aligned} d\left(\frac{d^2w}{dt^2}\right) &= w\,dv + v\,dt, \\ d\left(\frac{d^2v}{dt^2}\right) &= w\,dw + v\,t\,dt. \end{aligned} \tag{11}$$

Unter Verwendung der Symbole gemäß Bild 1 ergibt sich sofort die im Bild 13 dargestellte vollständige Rechenschaltung.

3.2 Die Skalierung

Unter der Skalierung verstehen wir den Arbeitsvorgang, der die Ein- und Ausgangsgrößen der verschiedenen Recheneinheiten so aufeinander abstimmt, daß Übersteuerungen vermieden werden. Dies setzt sowohl eine gewisse Kenntnis der Problemveränderlichen als auch der maximalen Eingangs- und Ausgangsbereiche der Recheneinheiten voraus. Die Maßstabsfaktoren sind Proportionalitätsfaktoren zwischen Maschinengröße und physikalischer bzw. mathematischer Größe. Von den gewählten Skalierungsfaktoren der Recheneinheiten hängt die Geschwindigkeit und auch die Genauigkeit des TRICE-Rechners ab. Die Geschwindigkeit kann bei Verringerung der Genauigkeit und die Genauigkeit bei Verringerung der Geschwindigkeit erhöht werden.

Die verschiedenen Recheneinheiten haben die folgenden ersten und zweiten Eingänge und Ausgänge:

Die Integratoren haben einen ersten Eingang und zwei zweite Eingänge (wenn kein Summierer benutzt wird), einen positiven und einen negativen Ausgang.

Der Konstantenmultiplizierer hat einen ersten Eingang und einen positiven und negativen Ausgang.

Der Variablenmultiplizierer hat zwei Eingänge, einen positiven und einen negativen Ausgang.

Servos haben einen ersten und zwei zweite Eingänge, einen positiven und einen negativen Ausgang.

Die Summierer haben sechs Eingänge, die als zweite Eingänge für die Integratoren und Servos verwendet werden, an die sie fest angeschlossen werden. Aus diesem Grunde ist auch der Ausgang eines Summierers nicht frei auf dem Steckbrett verfügbar.

Der maximale Ausgangsbereich der Analog-Digital-Umsetzer beträgt $\pm 2^{13}$ Zuwachsraten und die maximale Eingangsgröße des Digital-Analog-Umsetzers hat den gleichen Wert. Wenn andere Einheiten mit dem TRICE-Rechner zusammenarbeiten, muß dieser Grenzwert beachtet werden.

Die Maßstabsfaktoren sind die Potenzen einer ausgewählten Basis. Für binäre Maschinen ist diese Basis die Zahl 2. Der Skalierungsfaktor (Exponent des Maßstabsfaktors) bestimmt die Länge des rechnenden Registers der Recheneinheiten. Jedes Register des TRICE-Rechners hat 24 oder 30 Binärstellen. Ein Skalierungsbit und ein Vorzeichenbit muß in jedem Register verwendet werden. Das Vorzeichenbit steht immer an der ersten Stelle des Registers. Eine 1 als Vorzeichenbit kennzeichnet negative Werte und eine 0 als Vorzeichenbit positive Werte. Die beiden Wortlängen sind an die Iterationsfrequenz des Rechners gebunden. Bei einer Iterationsfrequenz von 100 kHz sind 30 bit

Gleichung: $\frac{d^3w}{dt^3} = w\frac{dv}{dt} + v$; $\frac{d^3v}{dt^3} = w\frac{dw}{dt} + vt$

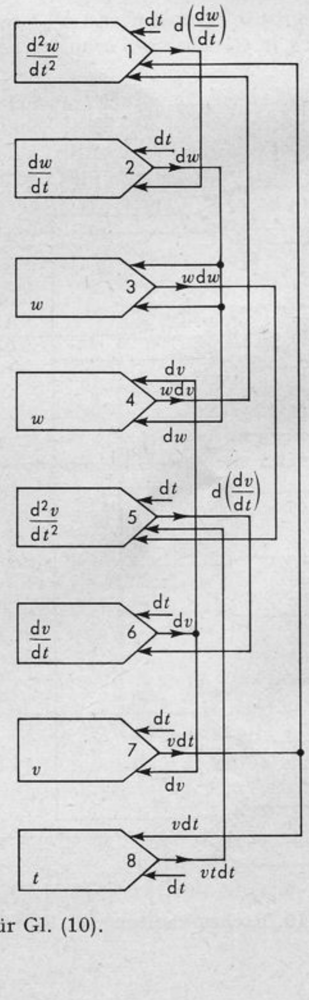


Bild 13. Rechenschaltung für Gl. (10).

und bei einer Iterationsfrequenz von $2^{17} = 131\,072$ Hz sind 24 bit als Registerlänge zu erzielen. Die maximal brauchbare Wortlänge beträgt in diesen beiden Fällen 26 bit + Vorzeichen bzw. 20 bit + Vorzeichen.

Um die Registerlänge zu kürzen, wird das Skalierungsbit (eine 1) näher an das Vorzeichenbit gebracht und alle anderen Stellen hinter dem Skalierungsbit werden mit Nullen gefüllt. Wegen der Zeitbeschränkung soll bei der Iterationsfrequenz von 2^{17} Hz die maximale Länge eines Registers 20 Rechenbits, ein Vorzeichenbit und ein Skalierungsbit betragen. Ein gewählter Wert: + 4 würde z. B. wie folgt aussehen:

0	0100	1	000000000000000000
Vorzeichenbit	Rechenbit	Skalierungsbit	

Die Länge der beiden variablen Register im Variablen-Multiplizierer müssen gleich gewählt werden, d. h., die Skalierungsbits müssen an gleicher Stelle stehen.

Es soll nochmals daran erinnert werden, daß die Werte y des Variablenregisters den folgenden Bereich einnehmen:

$$-1 \leqq y < 1$$

Aus diesem Grunde muß der Skalierungsfaktor negativ sein, wenn der absolute Wert einer Größe, die eingegeben werden soll, größer als 1 ist. Ist z. B. der Maximalwert von $y = 10$, so muß der Skalierungsfaktor — 4 sein, weil 2^{-4} der größte Wert der Potenz von 2 ist, der mit 10 multipliziert ein Ergebnis liefert, dessen absoluter Wert kleiner als 1 ist.

Die Bestimmung der Maßstabsfaktoren für ein Problem geht der eigentlichen Rechnung voraus. Sowohl die Grenzwerte als auch die Anfangswerte des Problems sind im allgemeinen bei physikalischen und mathematischen Problemen bekannt. Für die Ermittlung der Maxima oder Minima bestimmter Ableitungen werden die aus der numerischen Mathematik her bekannten Methoden angewandt. Erfordern diese Methoden einen zu großen Arbeitsaufwand, so müssen die Maxima oder Minima abgeschätzt werden, und man legt sich auf einen bestimmten gewählten Wert fest. Die spätere Rechnung zeigt, ob diese gewählten Werte vernünftig lagen oder nicht. Kommt bei dem gewählten Maßstabsfaktor eine Bereichsüberschreitung vor, so wird die Rechnung automatisch gestoppt und es muß ein neuer Maßstabsfaktor festgelegt werden.

Die Maßstabsfaktoren mögen mit α, die Skalierungsfaktoren sollen mit dem Buchstaben S bezeichnet werden. Damit ist also der Maßstabsfaktor des Integranden y als α_y und der Maßstabsfaktor der ersten Eingangsgröße dx als α_{dx} gekennzeichnet.

Zur Darstellung der Maßstabsfaktoren ist zu sagen, daß wir vielfach den Zahlenwert des Exponenten zur Basis 2 schreiben. $S_y = -4$ bedeutet also einen Maßstabsfaktor $\alpha_y = 2^{-4}$. Der Maßstabsfaktor wird stets so gewählt, daß er bei der Multiplikation mit dem tatsächlichen Wert eine Zahl kleiner als 1 ergibt.

Die übliche Wahl des Amplitudenmaßstabes α beim elektronischen Analogrechner erfolgt durch Division der maximalen Maschinengröße $|\bar{y}|_{\max}$ (Spannung) durch den maximal vorliegenden Wert der physikalischen Größe $y_{\max}$. Dort schreibt man allgemein:

$$\alpha \leqq \frac{|\bar{y}|_{\max}}{|y|_{\max}}.$$

Entsprechend wird hier der Maßstabsfaktor festgelegt. Als maximale Maschinengröße gilt, wie schon gesagt, die Zahl 1. Man muß sich nun aus

$$\alpha \leqq \frac{1}{|y|_{\max}}$$

für denjenigen Wert α entscheiden, der sowohl diese angegebene Bedingung erfüllt als auch als Potenz von 2 zu schreiben ist.

Für den Multiplizierer veränderlicher Größen haben wir zwei variable Register und somit auch zwei Maßstabsfaktoren.

Die Integratoren, Konstantenmultiplizierer und Servos haben einen ersten Eingang. Die zugehörigen Maßstabsfaktoren werden mit dem Symbol α_{dx} bezeichnet. Alle Recheneinheiten mit Ausnahme des Konstantenmultiplizierers haben auch zweite Eingänge. Diese werden mit α_{dy} bezeichnet. Als zusätzlichen Index erhalten alle Maßstabsfaktoren die Nummer des zugehörigen Integrators der vorher entworfenen Rechenschaltung.

Die Maßstabsfaktoren der zweiten Eingänge sind bestimmt durch die kleinsten Änderungen der Integranden; d. h. durch den Zuwachs bei einem Iterationsschritt. Ist z. B. eine Genauigkeit von 0,1 erwünscht, so muß der Maßstabsfaktor 2^4 sein, da 0,1 zwischen $1/8 = 1/2^3$ und $1/16 = 1/2^4$ liegt. Alle Maßstabsfaktoren von Größen, die als Eingänge einer Recheneinheit dienen, müssen gleich sein. Die Maßstabsfaktoren der Ausgangsgrößen aller Recheneinheiten werden mit α_z bezeichnet. Dieser Maßstabsfaktor ergibt sich als Produkt aus dem Maßstabsfaktor des Integranden und der ersten Eingangsgröße. Die Potenzexponenten S werden bei der Multiplikation von Potenzen addiert. Dies ist der Grund dafür, daß stets nur der Zahlenwert des Exponenten und nicht der tatsächliche Wert des Maßstabsfaktors angegeben wird. Es gilt also:

$$S_z = S_y + S_{dx}.$$

(Hierin bedeutet S_{dx} den Potenzexponenten des Maßstabsfaktors α_{dx} der ersten Eingangsgröße und S_y den Potenzexponenten des Maßstabsfaktors α_y der zweiten Eingangsgröße.)

Der Skalierungsfaktor der Ausgangsgröße des Konstantenmultiplizierers ist:

$$S_z = S_K + S_{dx}.$$

(Hierin ist S_K derjenige Potenzexponent von 2, der mit der gegebenen Konstanten K multipliziert einen Wert kleiner als 1 ergibt. S_{dx} ist der Potenzexponent des Maßstabsfaktors der ersten Eingangsgröße.)

Für den Multiplizierer veränderlicher Größen muß für den Skalierungsfaktor stets folgende Beziehung gelten:

$$S_z = S_y + S_{dx} = S_x + S_{dy}.$$

Die Länge in Bit eines Registers bezüglich der Rechenbits (ausschließlich Vorzeichenbit und Skalierungsbit) ist bestimmt als Differenz der Potenzexponenten der zweiten Eingangsgröße und des Integranden.

Registerlänge in Rechenbits = Potenzexponent des Maßstabsfaktors der zweiten Eingangsgröße — Potenzexponent des Maßstabsfaktors des Integranden.

Registerlänge in Rechenbits $= S_{dy} - S_y$.

Die Registerlängen des Variablen-Multiplizierers sind beide einander gleich und bestimmen sich zu:

Registerlänge in Rechenbits $= S_{dx} - S_x = S_{dy} - S_y$.

3.3 Die Codierung

Unter der Codierung verstehen wir denjenigen Arbeitsvorgang, der das Rechenprogramm in die Maschinensprache des TRICE-Rechners übersetzt. Die Rechenschaltung wird gebraucht, um die Recheneinheiten auf dem Steckbrett zusammenzuschalten. Die Maßstabsfaktoren und die Anfangsbedingungen müssen in die variablen Register gebracht werden. Diese Größen können in Oktal- oder in Dezimalform angegeben werden. Im Gegensatz zum Dezimalsystem ist das Oktalsystem allgemein nicht gebräuchlich, aber genau so einfach und für die Verwendung im TRICE-Rechner geeigneter. Beim Oktal-Code wird die Eingangsgröße durch acht Verschlüsselungen, die den binären Zahlen entsprechen, dargestellt. Die Zuordnung ist aus umstehender Tabelle ersichtlich.

Schlüssel	Binärziffern
0	0 0 0
1	0 0 1
2	0 1 0
3	0 1 1
4	1 0 0
5	1 0 1
6	1 1 0
7	1 1 1

Will man ein Register mit 30 Stellen mit dem Anfangswert Null bei dreizehn Rechenstellen füllen, so ergibt sich die folgende Darstellung:

0	0000000000000	1	000000000000000
Vorzeichen-bit	Rechenbit	Skalierungs-bit	

Man gibt nacheinander die Zahl Null im Oktal-Code viermal, die Zahl 1 im Oktal-Code einmal und nochmals die Zahl Null im Oktal-Code fünfmal ein.

In Kurzschreibweise würde man hierfür

$$0_4 \quad 1_1 \quad 0_5 \quad \text{oder} \quad 0_4 \quad 1 \quad 0_5$$

schreiben.

Ein anderes Register, welches mit O_4 1 3 0_2 1 0_1 gefüllt werden soll, würde ausführlich beschrieben wie folgt aussehen:

000 000 000 000 001 011 000 000 001 000.

Wird ein Dezimal-Code für die Anfangsbedingungen und die Skalierung verwendet, so wird dieser Dezimal-Code durch den TRICE-Rechner in einen Oktal-Code umgewandelt. Auf die näheren Einzelheiten und Befehls-Code sowie die Prüfprogramme sei an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Sämtliche Probleme müssen nach den grundsätzlichen Überlegungen der vorhergehenden Abschnitte vorbereitet werden. Es gibt jedoch gewisse Problemkreise, bei denen man bereits in der Programmierung Rücksicht auf die Fehlereinflüsse der Recheneinheiten nehmen muß. Bei der normalen Programmierung nehmen wir an, daß

$$dz = y\,dx$$

ist und daß sowohl dz als auch dx als infinitesimal kleine Zuwachsraten betrachtet werden. Da wir es aber stets mit endlichen Differenzen Δz und Δx zu tun haben, entstehen Fehler in der Größenordnung dieser Differenzen durch obige Voraussetzungen. Im allgemeinen ist dieser Fehler sehr klein und hat so lange keinen nennenswerten Einfluß auf die Genauigkeit der Rechnung, wie der Änderungsbereich der Zuwachsrate vergleichbar mit der typischen Registerkapazität ist. Wenn also die Länge des Registers n bit beträgt und die Lösung nach 2^n oder weniger Rechenschritten erhalten wird, kann dieser Einfluß vernachlässigt werden. Bei großen Rechenzeiten und periodischen Vorgängen ist der Fehler nicht vernachlässigbar. Der größte Fehlerbeitrag kommt durch die vorhandenen Verzögerungszeiten, die zwischen dem (dx) Eingang, der Rechnung und dem Erscheinen der zugehörigen Ausgangsgrößen entstehen. Alle Rechenoperationen werden beim TRICE-Rechner durch den nächsten Schritt der unabhängigen Veränderlichen eingeleitet. Man muß also sicherstellen, daß die erzeugten abhängigen Veränderlichen am Eingang des Integrators der unabhängigen Veränderlichen wieder anliegen, bevor der nächste Schritt einen Zuwachs der unabhängigen Veränderlichen ergibt. Da durch jede Recheneinheit zur Erzeugung abhängiger Veränderlicher eine Verzögerungszeit entsprechend einem Iterationsschritt entsteht, muß der nächste Zuwachs der unabhängigen Veränderlichen um mindestens die Zeit verzögert werden, die gleich der Verzögerung ist, die durch die Ermittlung der Größe der abhängigen Veränderlichen entsteht. Die exakten Ausdrücke der verschiedenen Elemente, die diese Verzögerung erzeugen, sind folgende:

1. Integrator
   Rechteckförmige Näherung: $\Delta z_{i+1} = y_i \cdot \Delta x_i$
   Extrapolierte Näherung: $\Delta z_{i+1} = y_i \cdot \Delta x_i + \frac{1}{2} h \cdot \Delta y_i \,(\text{Sign}\, \Delta x_i)$
2. Konstantenmultiplizierer: $\Delta z_{i+1} = y \cdot \Delta x_i$
3. Variablenmultiplizierer: $\Delta z_{i+1} = y_i \cdot \Delta x_i + x_{i-1} \cdot \Delta y_i$
4. Servo $\Delta z_{i+1} = \begin{cases} (\text{Sign}\; y_i) \cdot \Delta x_i \\ 0 \end{cases}$ falls $0 < |y_i| < 1$

Um optimale Genauigkeit bei der Programmierung einer Differentialgleichung zu erzielen, muß also dafür gesorgt sein, daß zwischen den Schritten der unabhängigen Veränderlichen genügend Zeit vorhanden ist, so daß die erzeugten abhängigen Veränderlichen wieder zum Eingang des Integrators mit der unabhängigen Veränderlichen zurückgekehrt sind.

An zwei einfachen Beispielen soll die Programmierung, d. h. die Wahl der Maßstabsfaktoren und der Registerlänge durchgeführt werden. Mit dem TRICE-Rechner werde die Funktion

$$y = A \cdot \sin t$$

erzeugt.

Wie beim elektronischen Analogrechner müssen wir auch hier von der Differentialgleichung und Differentialformulierung ausgehen. Es gilt:

$$\frac{dy}{dt} = A \cdot \cos t,$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -A \sin t,$$

$$\text{bzw.} \quad \frac{d^2y}{dt^2} = -y,$$

und in differentieller Form:

$$d\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right) = -d\,(y).$$

Zur Lösung genügen zwei Integratoren, da an jedem Integrator die Ausgangsgröße mit positivem und negativem Wert vorliegt. Entsprechend Bild 9 erhalten wir die in Bild 14 dargestellte Rechenschaltung.

Durch die Verbindung der negativen Ausgangsgröße des Integrators 2 mit dem zweiten Eingang des Integrators 1 ist die Differentialgleichung erfüllt. Das Minuszeichen am Ausgang von Integrator 2 soll diese Bedingung, die durch Schaltungszwang erreicht wird, andeuten. Am Ausgang

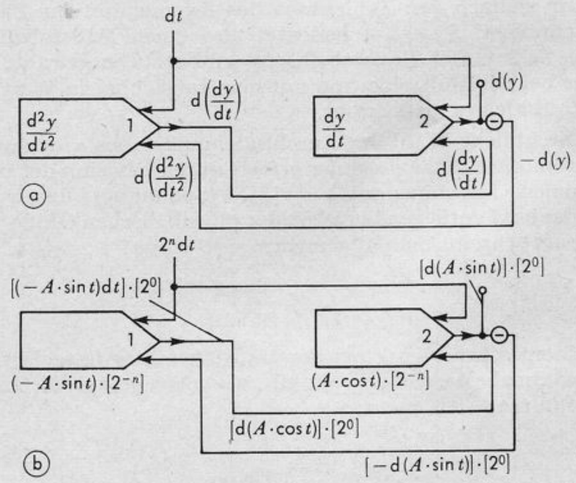


Bild 14. Rechenschaltung für die Differentialgleichung

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -y.$$

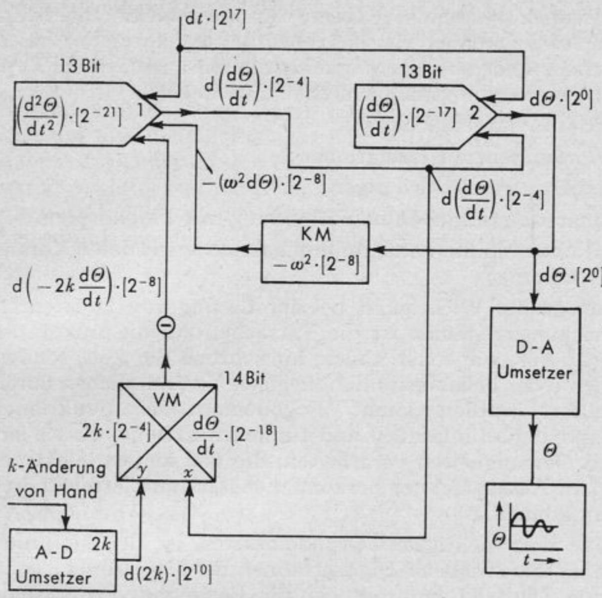


Bild 15. Rechenschaltung für die Differentialgleichung

$$\frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}t^2} + 2K\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t} + \omega^2\Theta = 0.$$

des Integrators 2 erhalten wir wie gewünscht d (A sin t). Als Anfangsbedingung gilt: $y_{(t=0)} = 0$,

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}_{(t=0)} = A.$$

Damit muß das I-Register des Integrators 1 auf den Wert Null und das I-Register des Integrators 2 auf den Wert A gesetzt werden. Da die I-Register der beiden Integratoren $-A$ sin t und A cos t enthalten, die beide den gleichen Maximalwert A haben, muß die Länge der beiden Register gleich gewählt werden. In diesem Fall heißt also Skalieren lediglich Festlegen der Registerlänge. Je größer die Registerlänge, um so größer ist die Genauigkeit. In der Tabelle 1 sind die charakteristischen Größen mit den zugehörigen Registerlängen dargestellt. Durch Verkürzen der Registerlänge wird die Rechengeschwindigkeit erhöht. Bei der üblichen Iterationsfrequenz von 2^{17} Hz = 131072 Hz ist der Zuwachs von t gleich einem Zuwachs der Maschinenzeit, das heißt $= 2^{-17}$ s. Schreiben wir $2^n \mathrm{d}t$, so bedeutet dies 2^n Zuwachsraten in der Zeiteinheit. Eine Zeiteinheit beträgt deshalb 2^{n-17} s. Die Frequenz f ergibt sich aus

$$2\pi f \cdot (2^n \mathrm{d}t) = 1 \; Zn \; f = \frac{1}{2\pi(2^n \mathrm{d}t)}.$$

Tabelle 1.

n	2^n	Anzahl der Amplituden-zuwachs-raten = 2^n-1	Perioden-dauer als Anzahl der Iterations-schritte	Perioden-dauer in ms	Frequenz in Hertz
1	2	1	12,6	0,096	10400
2	4	3	25,1	0,192	5210
3	8	7	50,3	0,384	2605
4	16	15	101	0,768	1302
5	32	31	201	1,53	653
6	64	63	402	3,06	327
7	128	127	805	6,13	163
8	256	255	1610	12,3	81,3
9	512	511	3220	24,6	40,6
10	1024	1023	6450	49,1	20,4
11	2048	2047	12900	98,2	10,2
12	4095	4096	25700	196,4	5,09
13	8192	8191	51400	393	2,54
14	16384	16383	103000	786	1,27

Für die Durchverbindung der einzelnen Recheneinheiten auf dem Steckbrett, die Eingabe der Anfangsbedingungen und das Füllen der Register mit dem Vorzeichenbit und Skalierungsbit gilt das schon früher gesagte. Je nach der gewünschten Genauigkeit haben wir die Anzahl der Rechenbits festzulegen.

Im folgenden Beispiel werden die Maßstabsfaktoren und Registerlängen mit ermittelt. Eine gedämpfte Sinusfunktion ist gegeben als Lösung der Differentialgleichung

$$\frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}t^2} + 2K\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t} + \omega^2\Theta = 0.$$

Gegeben: $K = 3$; $\omega = 16\,\mathrm{sec}^{-1}$

$$\Theta_{(t=0)} = 0; \quad \frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}_{(t=0)} = 2^{17}\,\mathrm{sec}^{-1}.$$

Für $0 < K \ll \omega$ erhalten wir als Lösungsfunktion für kleine Zeiten: $\Theta \approx A \sin \omega t$.

Wir lösen diese Differentialgleichung nach der höchsten Ableitung auf und erhalten

$$\frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}t^2} = -2K\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t} - \omega^2\Theta.$$

Ausgehend von der Lösung im nur sehr schwach gedämpften Fall ergeben sich zur Abschätzung die folgenden Maximalwerte:

$$\Theta = A \cdot \sin \omega t \quad \Rightarrow |\Theta|_{\max} = A,$$

$$\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t} = A \cdot \omega \cdot \cos \omega t \quad \Rightarrow \left|\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}\right|_{\max} = A \cdot \omega,$$

$$\frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}t^2} = -A\,\omega^2 \cdot \sin \omega t \Rightarrow \left|\frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}t^2}\right|_{\max} = A\,\omega^2.$$

Mit den gegebenen Werten erhalten wir die folgenden maximalen Größen:

$$\left|\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}\right|_{\max} = 2^{17}\,\mathrm{sec}^{-1}.$$

Aus $\left|\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}\right|_{\max} = A \cdot \omega = 2^{17}\,\mathrm{sec}^{-1}$ erhalten wir

$$A = \frac{2^{17}\,\mathrm{sec}^{-1}}{\omega} = \frac{2^{17}\,\mathrm{sec}^{-1}}{2^4\,\mathrm{sec}^{-1}} = 2^{13},$$

$$\left|\frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}t^2}\right|_{\max} = A \cdot \omega^2 = 2^{13}. \quad (2^4)^2\,\mathrm{sec}^{-2} = 2^{21}\,\mathrm{sec}^{-2}.$$

Damit bestimmen sich die Maßstabsfaktoren wie folgt:

$$\alpha_0 \leqq \frac{1}{|\Theta|_{\max}} = \frac{1}{2^{13}}, \quad \text{gewählt } \alpha_0 = 2^{-13},$$

$$\alpha_1 \leqq \frac{1}{\left|\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}\right|_{\max}} = \frac{1}{2^{17}\,\mathrm{sec}^{-1}}, \quad \text{gewählt } \alpha_1 = 2^{-17}\,\mathrm{sec},$$

$$\alpha^2 \leqq \frac{1}{\left|\frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}t^2}\right|_{\max}} - = \frac{1}{2^{21}\,\mathrm{sec}^{-2}}, \quad \text{gewählt } \alpha_2 = 2^{-21}\,\mathrm{sec}^2.$$

In die Rechenschaltung tragen wir die Maschinengrößen ein; diese ergeben sich zu:

$$\left(\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}\right)[\alpha_1] = \left(\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}\right) \cdot [2^{-17}],$$

$$\left(\frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}t^2}\right)[\alpha_2] = \left(\frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}t^2}\right) \cdot [2^{-21}].$$

Die Rechenschaltung unter Verwendung eines Multiplizierers ist in Bild 15 dargestellt.

Nehmen wir weiter an, daß die Maschine im Echtzeitbetrieb arbeiten soll, so entspricht dem bei der Iterationsfrequenz von 2^{17} Hz ein Zeitmaßstabsfaktor von 2^{17}. Damit erhalten wir als unabhängige Veränderliche $[2^{17}]$ dt.

Die Skalierungsfaktoren für den Integrator 1 bestimmen sich wie folgt:

$$S_{y1} = -21, \; S_{dx1} = 17,$$

$$S_{z1} = S_{y1} + S_{dx1} = -21 + 17 = -4.$$

Man erhält also am Ausgang des Integrators 1

$$\mathrm{d}\left(\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}\right)\cdot[2^{-4}].$$

Die Ausgangsgröße des Integrators 1 ist ein zweiter Eingang von Integrator 2. Deshalb gilt für den Integrator 2:

$$S_{\mathrm{d}y2} = -4.$$

Weiterhin ist

$$S_{y2} = -17,\ S_{dx2} = +17,$$
$$S_{z2} = S_{y2} + S_{dx2} = -17 + 17 = 0.$$

Für den Variablenmultiplizierer 1 soll $|x| < 1/2$ und $|y| < 1/2$ sein, damit in jedem Falle eine Übersteuerung vermieden wird.

Da

$$\left|\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}\right|_{\max} = 2^{17}$$

war, muß man den Maßstabsfaktor zu $[2^{-18}]$ wählen. Damit hat der erste Eingang die Maschinengröße $\left(\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}\right)[2^{-18}]$ und den Skalierungsfaktor $S_x = -18$.

Für den Konstantenmultiplizierer 2 ist die Eingangsgröße die Ausgangsgröße des Integrators 2. Daher ist

$$S_{dxM2} = 0.$$

Da eine Multiplikation mit $w^2 = (2^4)^2 = 2^8$ durchzuführen ist, wird der Maßstabsfaktor $\alpha_{KM} = 2^{-8}$ und somit der Skalierungsfaktor

$$S_{KM} = -8.$$

Aus

$$S_z = S_{KM} + S_{dx}$$

folgt

$$S_z = -8 + 0 = -8.$$

Für den Variablenmultiplizierer muß der zweite Eingang mit $2K$, da $K = 3$ sein soll, mit einem Maßstabsfaktor von 2^{-3} multipliziert werden, um die Maschinengrößen zu erhalten. Wählt man aber 2^{-4}, so kann $2K$ im Bereich $0 < 2K < 8$ variiert werden. Damit ergibt sich, da $S_z = -8 = S_{2KM}$ sein soll, aus

$$S_z = S_x + S_{dy}$$

S_{dy} zu:

$$S_{dy} = S_z - S_x = -8 - (-18) = 10.$$

Weiterhin ist $S_y = S_z - S_{dx} = -8 - (-4) = -4$.

Über einen Analog-Digital-Umsetzer müssen wir $\mathrm{d}(2K\cdot 2^{10})$ in den zweiten Multiplizierer eingeben. Die Variation von K wird von Hand durchgeführt.

Mit den Skalierungsfaktoren liegen die Registerlängen fest:

Integrator 1: Registerlänge $= S_{dy} - S_y = (-8) - (-21) = 13$ bit,

Integrator 2: Registerlänge $= S_{dy} - S_y = (-4) - (-17) = 13$ bit.

Variabler Multiplizierer:

Registerlänge $= S_{dy} - S_y = S_{dx} - S_x = 10 - (-4) = 14$ bit.

Das Register des Konstantenmultiplizierers muß groß genug sein, um alle Bits von ω^2 aufzunehmen.

Damit liegt die Skalierung vor. Die gegebenen Anfangsbedingungen müssen wie bereits früher angegeben in die zugehörigen I-Register eingegeben werden.

4. Einsatzmöglichkeiten des TRICE-Rechners

Nachdem in den vorhergehenden Abschnitten der Aufbau und die Arbeitsweise des TRICE-Rechners dargestellt worden sind, sollen nunmehr noch kurz die wichtigsten Einsatzmöglichkeiten aufgezeigt werden. Der TRICE-Rechner kann grundsätzlich überall dort eingesetzt werden, wo die Problemstellung einer zu lösenden Aufgabe auf lineare oder nichtlineare Differentialgleichungen oder Systeme von Differentialgleichungen führt. Er kann für die Aufgaben verwendet werden, für die zweckmäßigerweise ein Analogrechner eingesetzt würde, der normale Analogrechner aber aus Genauigkeitsgründen ausscheidet. Typische Anwendungsmöglichkeiten sind deshalb

Stabilitätsuntersuchungen;

Koordinatentransformationen;

Flugkörperuntersuchungen;

Simulationsaufgaben in Verbindung mit Flugkörpern.

Parameterstudien an Satellitenbahnen sowie deren Vorausberechnung;

Von großer Wichtigkeit bei der Lösung von Differentialgleichungssystemen ist die Tatsache, daß die Integration nicht nur, wie sonst üblich, hinsichtlich der Zeit, sondern nach jeder beliebigen unabhängigen Veränderlichen durchgeführt werden kann. Trigonometrische Funktionen, Exponentialfunktionen und Umkehrfunktionen lassen sich mit Genauigkeiten verarbeiten, die von keinem elektronischen Analogrechner herkömmlicher Bauart erreicht werden können.

Eine der wichtigsten Grundeinheiten ist der hier nicht näher beschriebene Digitalrechner PB-250. Dieser „solid-state Digital Computer" ist für Rechnung, Prozeßsteuerung, Datenerfassung und Datenverarbeitung gedacht. Er kann für sich allein als reiner Digitalrechner mit Lochstreifen-Ein- und -Ausgabe arbeiten und besitzt drei voneinander unabhängige Eingangs- und Ausgangssysteme. Schnellstanzer und Schnelleser, Magnetbandein- und -ausgabe, Multiplexer usw. können als externe Zusatzgeräte angeschlossen werden. Die standardmäßige Speicherkapazität beträgt 2300 Worte und kann auf 15888 Worte erweitert werden. Die universale Verwendbarkeit des Digitalrechners PB-250 im Gesamtsystem der TRICE-Anlage gibt dem Benutzer einen großen Spielraum bei der Behandlung von Problemen wie Parameterstudien, Optimierungsproblemen, Simulationsaufgaben usw.

Der TRICE-Rechner kann für sich allein oder in Kombination mit normalen elektronischen Analogrechnern arbeiten. Bei sehr umfangreichen Problemen ist diese Kombination die z. Z. häufigste Verwendung des TRICE-Rechners. Bei Simulationsproblemen in Verbindung mit Flugkörpern sind einige Hundert Verstärker in der Analogrechnerschaltung erforderlich. Die Lösung derjenigen Systemgleichungen und die Ausführung der Operationen, bei denen die Genauigkeit der normalen Analogrechner nicht ausreicht (oder zu völlig falschen Ergebnissen führt), wird dann vom TRICE-Rechner durchgeführt. Ohne die Aufgabenstellung mit den verschiedenen Differentialgleichungssystemen und den nötigen Koordinatentransformationen hier anzugeben, soll der Aufwand an TRICE-Einheiten bei einem gelösten Flugkörperproblem angegeben werden. Dieses Problem konnte nicht ohne den im Gesamtsystem eingesetzten TRICE-Rechner zu vollständig befriedigenden Ergebnissen führen. Die Ausrüstung des Gesamtsystems bestand aus folgenden Einheiten:

Analogrechner:	200 Operationsverstärker
	14 Elektronische Multiplikatoren
	5 Funktionsgeneratoren
	20 Servos
TRICE-Einheiten:	42 Integratoren
	11 Variablenmultiplikatoren
	5 Konstantenmultiplikatoren
	5 Servos
	6 Analog-Digital-Umsetzer
	13 Digital-Analog-Umsetzer

Es sei darauf hingewiesen, daß eine Einsparung an TRICE-Einheiten gegenüber dem Analogrechner auch dadurch zustande kommt, daß bei jeder Einheit die Ausgangsgröße mit positivem und negativem Vorzeichen vorliegt. Umkehreinheiten entsprechend den Umkehrverstärkern beim Analogrechner sind also nicht erforderlich. Bei diesem Flugkörperproblem mit Bahnbestimmung werden sämtliche Koordinatentransformationen vom TRICE-Rechner durchgeführt. Es scheint, daß der TRICE-Rechner in der Zukunft gerade auf diesem Aufgabengebiet viele Anwendungsmöglichkeiten finden wird. Durch seine beliebige Ausbaufähigkeit hat der TRICE-Rechner den Vorteil, daß er mit Zunahme des Umfangs der Problemstellung erweitert werden kann. Auch hier ist wie beim elektronischen Analogrechner die Anzahl der an der Rechnung beteiligten Recheneinheiten nur von der Aufgabenstellung bestimmt.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß beim TRICE-Rechner sowohl die Vorteile der analogen Rechentechnik als auch die der digitalen Technik voll zur Geltung kommen. Die Kombination der wenig aufwendigen Programmierungsmethoden mit einer vom Digitalrechner her gewohnten Genauigkeit, sind seit langem der Wunsch der Ingenieure. Nunmehr lassen sich Aufgaben lösen, für die zwar die Lösung mit dem Analogrechner erwünscht ist, der normale Analogrechner aber wegen der begrenzten Genauigkeit ausscheidet.

Jahresbericht 1962 des Fachnormenausschusses Informationsverarbeitung im Deutschen Normenausschuß

Elektron. Rechenanlagen 5 (1963), H. 1, S. 41—44
Manuskripteingang: 12. 1. 1963

von C. MOHR, Berlin

1. Vom Ausschuß Datenverarbeitung zum FNI

Vor etwa einem Jahr wurde im „Jahresbericht 1961" über die Gründung und den Aufbau des Ausschusses Datenverarbeitung im Deutschen Normenausschuß (DNA) berichtet[1]). Es wurde dort mitgeteilt, daß — zeitlich später — die internationalen Normenausschüsse ISO/TC 97 und IEC/TC 53 den Namen „Computers and Information Processing" gewählt haben. Es erschien sinnvoll, nun auch unseren Namen noch einmal zu überprüfen — zu einem Zeitpunkt, wo die Arbeiten noch in den Anfängen steckten und deshalb eine Änderung relativ leicht durchführbar war.

Nach eingehenden Diskussionen im Ausschuß stellte dessen Beirat fest, daß „Daten" einen Unterbegriff zu den — mit gleicher Bedeutung zu verwendenden — Begriffen „Information" und „Nachricht" darstellen. Die beiden letztgenannten Ausdrücke werden im heutigen Sprachgebrauch teils mit gleicher Bedeutung, teils aber auch mit unterschiedlicher (jedoch in der Zuordnung stark streuender oder gar widersprechender) Bedeutung benutzt. Das Wort „Nachricht" hat den Nachteil, daß es mit „message" ins Englische übersetzt werden kann, was im Zusammenhang mit „Nachrichtenverarbeitung (information processing)" falsch und irreführend ist.

Die bessere internationale Verständlichkeit des Wortes „Information" gab den Ausschlag für den Entschluß, den Ausschuß Datenverarbeitung am 1. August 1962 in den Fachnormenausschuß Informationsverarbeitung (FNI) im DNA umzuwandeln.

Bei dieser Gelegenheit ist zugleich dem starken Anwachsen des Ausschusses Rechnung getragen worden, indem dieser in einen Fachnormenausschuß umgewandelt wurde. Nach den Richtlinien des DNA sind die selbständigen Ausschüsse für Aufgaben begrenzten Umfangs gedacht, für deren Lösung nur ein entsprechend kleiner Aufwand nötig ist. Diese Voraussetzungen waren beim Ausschuß Datenverarbeitung schon nach einem Jahr seines Bestehens nicht mehr gegeben. In der Berichtszeit mußten neue Unterausschüsse und Arbeitskreise aufgestellt werden.

Der FNI ist jetzt wie folgt unterteilt:

Beirat	
Arbeitsausschuß 1	Begriffe und Symbole
Unterausschuß 1a	Begriffe und Benennungen
Arbeitskreis 1a1	Programmierung
Arbeitskreis 1a2	Schaltnetzwerke
Unterausschuß 1b	Begriffe und Symbole für Darstellungen von Abläufen
Arbeitsausschuß 2	Auswahl, Gruppierung und Darstellung von Zeichen bei Eingabe und Ausgabe
Unterausschuß 2a	Codierung und verwandte Probleme
Arbeitskreis 2a1	Codes für Werkzeugmaschinen-Steuerung[2])
Unterausschuß 2b	Zeichenerkennung
Arbeitsausschuß 3	Physikalische Eigenschaften der Informationsträger bei Eingabe und Ausgabe
Arbeitsausschuß 4	Schnittstellen zwischen informationsverarbeitenden Anlagen, Anschlußgeräten und Datenübertragungseinrichtungen
Unterausschuß 4a	Digitale Anschlußgeräte
Unterausschuß 4b	Datenübertragung
Arbeitskreis 4c	Analogtechnik und Prozeß- und Werkzeugmaschinensteuerung
Arbeitsausschuß 5	Programmierungssprachen

[1]) siehe Elektronische Rechenanlagen 4 (1962), Nr. 1, S. 36—38.
[2]) Der Arbeitskreis 2a1 wird 1963 seine Arbeit aufnehmen.