

Das Anwenden von Computern zur Lösung von Simulationsproblemen

Teil 1*)

Von Hans Kühlborn, Wolfsburg

DK 681.3:62-272.1:631.3

Auf Grund der sich ständig ändernden Marktsituation ist man gezwungen, den für das Entwickeln neuer Maschinen – von der Idee bis zur Serienreife – benötigten Zeitaufwand zu minimieren. Da außerdem die Entwicklungskosten eine steigende Tendenz zeigen, ergibt sich aus wirtschaftlichen Erwägungen die Forderung, von den bisherigen Methoden abzugehen und neue Wege beim Lösen dieser wichtigen Aufgabe zu beschreiten. Eine erfolgversprechende Möglichkeit, die anstehenden Probleme schneller und billiger als bisher zu beherrschen, bietet das Benutzen von elektronischen Datenverarbeitungsanlagen. Für technische Optimierungsprobleme werden sowohl Analog- als auch Digitalrechner eingesetzt. Beiden Maschinen haften allerdings jeweils spezifische Vor- und Nachteile an. Anlagen jedoch, in denen ein Digital- und ein Analogrechner in Form eines Hybridsystems miteinander gekoppelt sind, bieten die meisten Vorteile.

Im Hinblick auf eine Entscheidungshilfe soll ein Simulationsprozeß im wesentlichen dazu dienen, eine aus vielen einzelnen Informationen (Elementen) bestehende Menge zu strukturieren, wichtige wechselseitige Abhängigkeiten von Systemparametern sichtbar zu machen sowie die bei verschiedenen möglichen Handlungen wahrscheinlich zu erwartenden Ergebnisse innerhalb eines Bezugsrahmens miteinander zu vergleichen, der die wichtigsten Wertdimensionen des Entscheidenden umfaßt.

Eine Simulation erfordert das Verwenden von Rückkopplungen, da die beim Nachbilden gewonnenen Einsichten neue Erkenntnisse und Informationen liefern, sodann dazu benutzt

Eine Simulation erfordert das Verwenden von Rückkopplungen, da die beim Nachbilden gewonnenen Einsichten neue Erkenntnisse und Informationen liefern, die sodann dazu benutzt werden sollen, Ausgangsannahmen und auf diesen beruhende Urteile zu verbessern. Das Ergebnis einer Simulation vermittelt zusätzliche Einblicke in die wechselseitigen Abhängigkeiten der Parameter von komplexen technischen Systemen.

1. Erläuterung des Begriffs „Simulation“

Die Simulation – das Nachbilden des Ablaufs natürlicher Prozesse oder des Verhaltens technischer Systeme – ist eines der vielen Hilfsmittel zur Vorbereitung von Entscheidungen. Sie dient nicht nur dazu, eine Lösung zu finden; sie soll vor allem auch bei der Suche nach einer optimalen Lösung helfen, bei der meist viele und verschiedenartige Einflüsse nach vorgegebenen Kriterien beurteilt werden müssen.

*) Teil 2 vgl. *Grundl. Landtechnik* Bd. 23 (1973) Nr. 2, S. 41/45.

Dr.-Ing. Hans Kühlborn war wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Betriebstechnik (Direktor: Prof. Dr. agr. Sylvester Rosegger) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode, und ist seit 1. Mai 1971 bei der VW AG, Wolfsburg, in der Forschung tätig. Diese Arbeit entstand während seiner Tätigkeit im Institut für Betriebstechnik der FAL.

2. Struktur der benötigten Computer

Forschungs- und Entwicklungsaufgaben führen sehr häufig zu sehr umfangreichen und u.U. nichtlinearen mathematischen Problemen. Eine Bearbeitung solcher Aufgaben mit herkömmlichen Methoden ist infolge des zeitlichen Aufwands sowie der erforderlichen Näherungsmethoden mit all ihren Einschränkungen entweder nicht empfehlenswert oder sogar unmöglich. Deshalb erweist sich der Einsatz elektronischer Rechenmaschinen als vorteilhaft oder als unerlässlich.

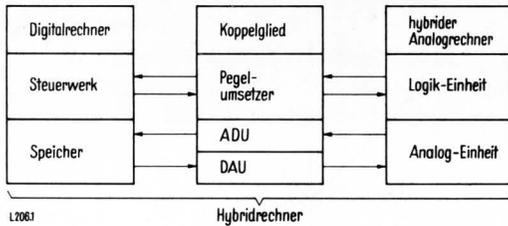
Die Analogrechner erlangten bisher bei weitem nicht die gleiche Bedeutung wie die Digitalrechner. Sie eignen sich jedoch besonders gut zur Simulation von durch Differentialgleichungen erfaßbaren Vorgängen und damit auch für das Untersuchen von Schwingungsproblemen. Dieser Vorzug des Analogrechners beruht auf seiner Eigenschaft, sämtliche erforderlichen Integrationen gleichzeitig und kontinuierlich ausführen zu können.

Im Digitalrechner hingegen werden zur Integration numerische Näherungsverfahren benutzt und das Integrieren geschieht außerdem zeitlich nacheinander und diskret. Ihr Einsatz ist stets dann sinnvoll, wenn sehr viele Daten – beispielsweise in Form von vorgegebenen Kennfeldern – verarbeitet oder gleichartige Berechnungen (Rechenoperationen) sehr häufig ausgeführt werden müssen.

Die Vorzüge, die jede dieser beiden verschiedenartigen Maschinen prinzipiell bietet, lassen sich dann gleichzeitig ausnutzen, wenn man beide Maschinen miteinander koppelt. Ein solches gekoppel-

Bild 1. Struktur eines Hybridrechners.

ADU Analog-Digital-Umsetzer
DAU Digital-Analog-Umsetzer



tes System heißt Hybridrechner. **Bild 1** zeigt schematisch den Aufbau eines solchen Rechners. Der Digitalrechner mit dem Kernspeicher und dem Steuerwerk als seinen beiden wichtigsten Einheiten ist über ein Koppelglied (interface) mit dem Analogrechner gekoppelt; dieser umfaßt eine Analog- und eine Logik-Einheit. Die auch mit Interface bezeichnete Koppel-einheit besteht aus sog. Pegelumsetzern; sie haben die Aufgabe, die den einzelnen Steuerungssignalen zugeordneten Spannungspegel in bezug auf ihre Höhe einander anzupassen. Die Analog-Digital-Umsetzer (ADU) bzw. die Digital-Analog-Umsetzer (DAU) dienen dazu, analoge in digitale Signale und digitale in analoge Signale umzusetzen.

Früher gehörten zum Analogrechner ausschließlich Einheiten zum Aufbereiten und Verarbeiten von Größen in analoger Form. Moderne Analogrechner umfassen auch eine sog. Logik-Einheit in der – den Gesetzen der mathematischen Logik entsprechend – das Bilden digitaler Steuergrößen geschieht, die zum Steuern des Rechenablaufs benutzt werden. Solche Analogrechner nennt man auch hybride Analogrechner.

3. Simulation mit dem Analogrechner

In Digitalrechnern werden – nach einer jeweils bestimmten Vorschrift verschlüsselte – diskrete Größen (Zahlen) verarbeitet; sie eignen sich deshalb insbesondere zum Lösen von Aufgaben, die im kaufmännischen Bereich anfallen. Im Analogrechner hingegen entsprechen analogen physikalischen Größen elektrische Spannungen. Dem System, dessen Verhalten auf einem Analogrechner simuliert (nachgebildet) werden soll, muß man deshalb zunächst ein elektrisches Modell (Analogon) zuordnen. Den Lösungen derjenigen mathematischen Gleichungen, die das Verhalten des Ersatzsystems (Modells) – und auch das des „Originals“ – beschreiben, entsprechen elektrische Spannungen, die beispielsweise in Abhängigkeit von der Zeit auf einem Bildschirm oder mit Hilfe eines Zweikoordinatenschreibers aufgezeichnet werden können. Dabei ist es stets erforderlich, die durch elektrische Spannungen dargestellten Größen zu normieren.

Analogrechner eignen sich besonders gut zum Lösen von gewöhnlichen Differentialgleichungen. Ihr Hauptanwendungsgebiet betrifft das Berechnen des dynamischen Verhaltens physikalischer technischer Systeme. Da es möglich ist, auf einem Analogrechner durch Ändern der an Potentiometern einstellbaren Koeffizienten (Koeffizienten-Einstellpotentiometer) Parameterabhängigkeiten zu berechnen und diese unmittelbar graphisch darzustellen, gelingt es, Tendenzen hinsichtlich des Verhaltens des jeweils nachgebildeten Systems schnell abzuschätzen. Außerdem lassen sich auf einem Analogrechner die jeweils zu lösenden Differentialgleichungen schnell (praktisch verzögerungsfrei) integrieren; deshalb kann man einen solchen Rechner „on line“ betreiben und auf diese Weise mit Hilfe einer Echtzeitsimulation unmittelbar diejenigen Informationen bereitstellen, die zum Steuern oder Regeln von Prozessen benötigt werden.

Wichtig ist für viele Anwendungen auch die Tatsache, daß sich auf einem Analogrechner vorgegebene Kennlinien nachbilden lassen. Diese Möglichkeit nutzt man z.B. beim Nachbilden der Übertragungseigenschaften von Antriebssystemen, die aus vielen Maschinenelementen mit voneinander verschiedenen Übertragungseigenschaf-

ten (Kennlinien) bestehen. Durch Variieren dieser Kennlinien läßt sich der Einfluß einzelner Maschinenelemente auf das Übertragungsverhalten des zu untersuchenden Gesamtsystems schnell und leicht ermitteln.

Bevor eine solche Analyse vorgenommen werden kann, ist es erforderlich, bestimmte Übertragungsfunktionen zu programmieren. Eine Übertragungsfunktion ist nach Definition das Verhältnis der Ausgangs- zur Eingangsgröße eines Übertragungsglieds; ihr entspricht die Kennlinie des jeweiligen Übertragungsglieds (Übertragungselements). Oft ist es möglich, eine vorgegebene Kennlinie auf verschiedene Weisen zu programmieren. Dies nutzt man aus, wenn man beispielsweise beim Lösen von umfangreichen Problemen – infolge der begrenzten Anzahl verfügbarer Rechenelemente – beim Programmieren auf verschiedenartige Recheneinheiten zurückgreifen muß.

3.1. Das Programmieren einer Totzone

Infolge von Herstellungsfehlern und Abnutzungserscheinungen können Übertragungselemente mit einem Spiel behaftet sein. Dies hat z.B. zur Folge, daß beim Belastungsnulldurchgang in einem bestimmten Winkelbereich kein Moment übertragen werden kann.

Eine solche Abhängigkeit zeigt **Bild 2**; ihr entspricht eine Kennlinie mit Totzone, die sich über den Winkelbereich $-\varphi_2 \leq \varphi \leq \varphi_1$ erstreckt. In diesem Intervall ist das übertragbare Moment $M_d = 0$. Außerhalb des Bereichs – und zwar an den Intervallgrenzen beginnend – hängt das Moment M_d linear vom Verdrehwinkel φ ab.

Eine Kennlinie nach **Bild 2** läßt sich mit Hilfe der Schaltung gemäß **Bild 3** verwirklichen. Zum Nachbilden der Kennlinien-Knick-

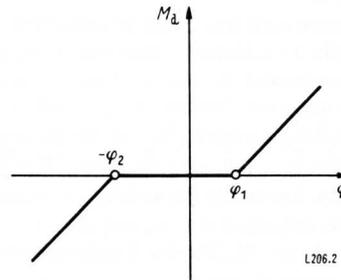


Bild 2. Die einer Getriebelose zugeordnete nichtlineare Drehfeder-Kennlinie.

φ Verdrehwinkel
 φ_1, φ_2 Werte von φ , die eine Totzone abgrenzen
 M_d Moment

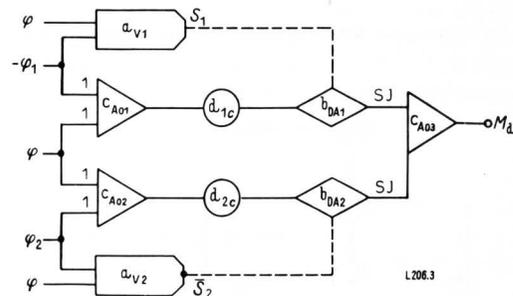


Bild 3. Allgemeine Programmierskizze einer Schaltung zum Nachbilden einer Kennlinie nach **Bild 2**.

a_{V1}, a_{V2} Vergleicher
 b_{DA1}, b_{DA2} elektronische Schalter
 c_{A01} bis c_{A03} Verstärker
 d_{1c}, d_{2c} Koeffizienten-Einstellpotentiometer (Federkonstante)
SJ
 S_1, \bar{S}_2 Steuervariable
 $\varphi, \varphi_1, \varphi_2$ den Eingangssignalen zugeordnete Größen
 M_d dem Verstärker Ausgangssignal zugeordnete Größe

punkte, die bei $\varphi = -\varphi_2 < 0$ und $\varphi = \varphi_1 > 0$ auftreten, dienen zwei Vergleichern (Komparatoren). Sie prüfen das Vorzeichen der Summe ihrer Eingangssignale gemäß den beiden Kriterien

$$\varphi - \varphi_1 > 0 \quad (1)$$

bzw.

$$\varphi > \varphi_1 \quad (2)$$

und

$$\varphi + \varphi_2 < 0 \quad (3)$$

bzw.

$$\varphi < -\varphi_2 \quad (4)$$

Wird die Eingangsgröße $\varphi > \varphi_1$, dann nimmt das im Ausgang des Vergleichers a_{V1} anstehende Steuersignal S_1 (binäre Variable) den Wert L und das Steuersignal¹⁾ \bar{S}_2 den Wert 0 an. Das Steuersignal $S_1 = L$ bewirkt das Schließen des elektronischen Schalters b_{DA1} und der Verstärker c_{A03} wird so angesteuert, daß sein Ausgangssignal dem Moment M_d gemäß der Kennlinie nach Bild 2 entspricht.

Wird hingegen $\varphi < -\varphi_2$, dann nimmt das im Ausgang des Vergleichers a_{V2} anstehende Steuersignal \bar{S}_2 den Wert L an und der elektronische Schalter b_{DA2} schließt. Da in diesem Fall die Ungleichung gemäß Gl. (1) nicht gilt, ist auch $S_1 = 0$ und somit der elektronische Schalter b_{DA1} geöffnet.

Trifft schließlich $\varphi_1 > \varphi > -\varphi_2$ zu, dann sind die beiden Ungleichungen nach Gl. (2) und (4) nicht erfüllt und deshalb die beiden Schalter b_{DA1} und b_{DA2} geöffnet. In diesem Fall entspricht der Ausgangsgröße des Verstärkers c_{A03} das Moment $M_d = 0$.

Die Kennlinie mit Totzone nach Bild 2 läßt sich auch mit Hilfe der Schaltung gemäß Bild 4 nachbilden. Diese umfaßt ein sehr häufig benutztes Rechelement, den (auch „Limiter“ genannten) Begrenzer e_{Lim} . Im Ausgang des Verstärkers c_{A01} nach Bild 4 steht beim Aufschalten der Eingangsgröße $-\varphi$ infolge einer Vorzeichenumkehr ein Signal $S_{c_{A01}}$ an, dem die gestrichelte Kurve $f(\varphi)$ in Bild 5 entspricht. Der in der Rückführung liegende Begrenzer e_{Lim} sorgt dafür, daß alle $\varphi < -\varphi_2$ und alle $\varphi > +\varphi_1$ die Ausgangsgröße $S_{c_{A01}}$ = konst. ist. Die den Knickpunkten der Kennlinie entsprechenden Winkelwerte $-\varphi_2$ und φ_1 lassen sich in normierter (auch skaliertes) Form mit Hilfe von zwei Potentiometern am Begrenzer einstellen.

¹⁾ \bar{S}_2 ist das in bezug auf das Steuersignal S_2 negierte Steuersignal.

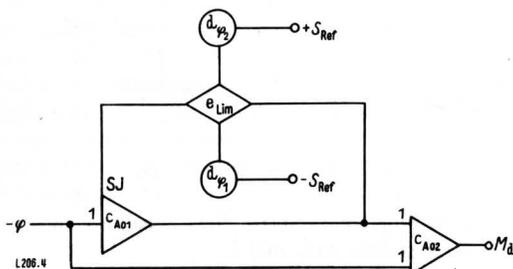
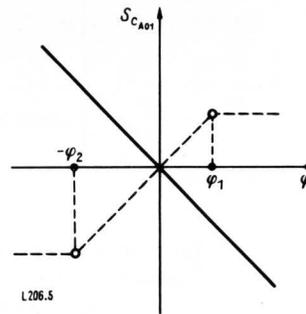


Bild 4. Allgemeine Programmierschizze einer Schaltung zum Nachbilden einer Kennlinie nach Bild 2 mit Hilfe eines Begrenzers.

- $d_{\varphi_1}, d_{\varphi_2}$ Koeffizienten-Einstellpotentiometer (Winkel)
- e_{Lim} Begrenzer
- S_{Ref} Referenzsignal
- übrige Bezeichnungen gemäß Bild 3

Bild 5. Das Ausgangssignal $S_{c_{A01}}$ des Verstärkers c_{A01} nach Bild 4 als Funktion des Winkels φ .

Erklärungen im Text



Dem Verstärker c_{A02} werden sowohl das Signal $S_{c_{A01}}$ als auch das der Eingangsgröße $-\varphi$ zugeordnete Signal – dem in Bild 5 die ausgezogene Gerade entspricht – zugeführt. Durch additive Überlagerung dieser beiden Signale läßt sich, wie aus dem Verlauf der beiden Funktionen nach Bild 5 unmittelbar hervorgeht, nach einer Vorzeichenumkehr ein Signal bilden, dem eine Kennlinie nach Bild 2 entspricht. Dies geschieht mit Hilfe des Verstärkers c_{A02} nach Bild 5; sein Ausgangssignal bildet als Funktion vom Drehwinkel φ eine Kennlinie mit Totzone nach.

3.2. Stückweise lineare Federkennlinie

Auch die stückweise lineare Kennlinie nach Bild 6 läßt sich mit Hilfe einer Schaltung nachbilden, die Vergleichern und elektronische Schalter enthält. Eine solche Federkennlinie entsteht, wenn das durch eine zusätzliche Drehfeder verursachte Rückstellmoment vom Verdrehwinkel φ_0 ab wirksam wird.

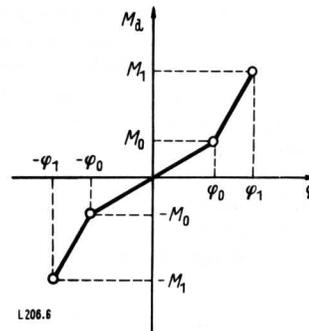


Bild 6. Stückweise lineare Drehfeder-Kennlinie.

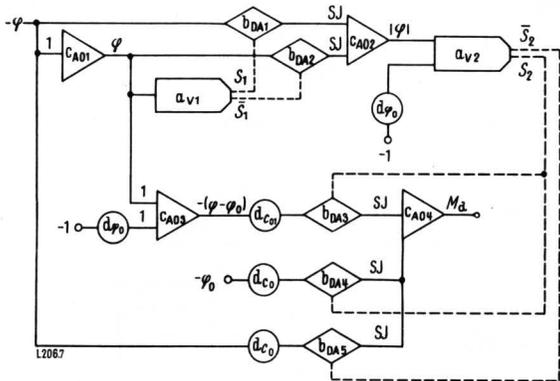
- φ Verdrehwinkel
- φ_0, φ_1 den Knickpunkten zugeordnete Winkel
- M_d Moment
- M_0, M_1 den Knickpunkten zugeordnete Momente

Beim Nachbilden einer Kennlinie, der eine ungerade Funktion²⁾ entspricht, benutzt man zum Steuern der elektronischen Schalter vorteilhafterweise den absoluten Betrag der Eingangsfunktion. Ein solches Verfahren bietet bei einer Kennlinie mit mehreren Knickpunkten Vorteile, da weniger elektronische Schalter als bei einer vorzeichenbehafteten Eingangsfunktion benötigt werden. Der Grund hierfür ist die Tatsache, daß man bei diesem Verfahren

²⁾ Die von der Veränderlichen x abhängende Funktion heißt ungerade, wenn $f(-x) = -f(+x)$ gilt.

Bild 7. Allgemeine Programmierskizze einer Schaltung zum Nachbilden einer Kennlinie nach Bild 6.

- a_{V1}, a_{V2} Vergleichler
- b_{DA1} bis b_{DA5} elektronische Schalter
- c_{A01} bis c_{A03} Verstärker
- $d_{\varphi 0}$ Koeffizienten-Einstellpotentiometer (Winkel)
- d_{c0}, d_{c01} Koeffizienten-Einstellpotentiometer (Federkonstante)
- übrige Bezeichnungen wie in Bild 3, Erklärungen im Text



beispielsweise nur die Knickpunkte zu berücksichtigen braucht, denen positive Werte der Veränderlichen φ entsprechen.

Zum Nachbilden der Kennlinie nach Bild 6 dient die Schaltung gemäß der Programmierskizze nach **Bild 7**. Mit Hilfe der beiden Vergleichler a_{V1} und a_{V2} wird abgefragt, in welchem Bereich die Eingangsgröße φ liegt. Das dem Abfrageergebnis zugeordnete Steuersignal S_1 bewirkt das Nachbilden der jeweiligen Federsteifigkeit. Hierzu ermittelt der Vergleichler a_{V1} , ob die Eingangsgröße $\varphi > 0$ oder aber $\varphi < 0$ ist. Wird φ positiv gemäß

$$\varphi > 0 \tag{5}$$

dann gelten für die Steuervariablen S_1 und \bar{S}_1 (Negation) die Zuordnungen $S_1 = L$ und $\bar{S}_1 = 0$. Ist hingegen die Ungleichung

$$\varphi < 0 \tag{6}$$

erfüllt, dann stehen im Ausgang des Vergleichlers a_{V1} die Steuervariablen $S_1 = 0$ und $\bar{S}_1 = L$ an.

Mit Hilfe der beiden Steuervariablen S_1 und \bar{S}_1 wird die Funktion $f = |\varphi|$ gebildet. Gilt $\varphi > 0$, dann bewirkt $S_1 = L$ das Schließen des elektronischen Schalters b_{DA1} ; da unter dieser Bedingung $\bar{S}_1 = 0$ ist, bleibt dabei der Schalter b_{DA2} geöffnet. Mithin steht am Ausgang des Verstärkers c_{A02} das $f = +\varphi$ entsprechende Signal an. Wird jedoch $\varphi < 0$, dann bewirkt die Steuervariable $\bar{S}_1 = L$ das Schließen des elektronischen Schalters b_{DA2} und die Steuervariable $S_1 = 0$ das Öffnen des elektronischen Schalters b_{DA1} . Infolge einer zusätzlichen Vorzeichenumkehr von φ entspricht das am Ausgang des Verstärkers c_{A02} anstehende Signal auch für $\varphi < 0$ der Funktion $f = +\varphi$.

Der zweite Vergleichler a_{V2} in der Schaltung nach Bild 7 prüft, ob die Veränderliche φ der Bedingung

$$\varphi_0 \geq \varphi > 0 \tag{7}$$

oder aber der Bedingung

$$\varphi_1 \geq \varphi \geq \varphi_0 \tag{8}$$

genügt. Gilt z.B. gemäß der durch Gl. (8) ausgedrückten Bedingung

$$|\varphi| > \varphi_0 \tag{9}$$

bzw.

$$|\varphi - \varphi_0| > 0 \tag{10}$$

dann ist die Steuervariable $S_2 = L$ und die Steuervariable $\bar{S}_2 = 0$.

Unter dieser Voraussetzung bewirkt die Steuervariable S_2 das Schließen der beiden elektronischen Schalter b_{DA3} und b_{DA4} und die Steuervariable \bar{S}_2 das Öffnen des elektronischen Schalters b_{DA5} . Nach diesem Vorgang steht im Ausgang des Verstärkers c_{A04} ein Signal an, daß dem Moment

$$M_d = M_0 + \Delta M \tag{11}$$

entspricht. Das dem elektronischen Schalter b_{DA4} zugeordnete konstante Moment M_0 genügt der Beziehung

$$M_0 = c_0 \varphi_0 \tag{12}$$

mit c_0 als einer am Potentiometer d_{c0} einstellbaren Federkonstanten, die der Kennlinie nach Bild 6 im Intervall $-\varphi_0 < \varphi < \varphi_0$ zugeordnet ist. Das dem Schalter b_{DA3} entsprechende Moment ΔM hängt vom Verdrehwinkel φ ab gemäß

$$\Delta M = c_{01} (\varphi - \varphi_0) \tag{13}$$

dabei ist c_{01} eine am Potentiometer d_{c01} einstellbare Federkonstante, die der Kennlinie nach Bild 6 in den Intervallen $-\varphi_1 < \varphi < -\varphi_0$ und $\varphi_0 < \varphi < \varphi_1$ zugeordnet ist.

Gilt hingegen gemäß der durch Gl. (7) ausgedrückten Bedingung

$$|\varphi| < \varphi_0 \tag{14}$$

bzw.

$$|\varphi - \varphi_0| < 0 \tag{15}$$

dann ist die Steuervariable $\bar{S}_2 = L$ und die Steuervariable $S_2 = 0$. In diesem Fall bewirkt die Steuervariable \bar{S}_2 das Schließen des elektronischen Schalters b_{DA5} und die Steuervariable S_2 das Öffnen der elektronischen Schalter b_{DA3} und b_{DA4} . Nach diesem Vorgang steht im Ausgang des Verstärkers c_{A04} ein Signal an, das nunmehr dem Moment

$$M_d = c_0 \varphi \tag{16}$$

entspricht.

Beim Nachbilden einer Kennlinie nach Bild 2 erwies es sich als vorteilhaft, einen Begrenzer zu benutzen, vgl. Bild 4. Dies trifft auch für das Nachbilden einer stückweise linearen Kennlinie gemäß Bild 6 zu. Im Vergleich zur Schaltung nach Bild 4 benötigt man hierzu gemäß **Bild 8** zwei zusätzliche Koeffizienten-Einstellpotentiometer. Sie dienen zum Einstellen der Richtungskoeffizienten k_1 und k_2 der Geraden, die nach **Bild 9** den beiden Eingangssignalen des Verstärkers c_{A02} in der Schaltung nach Bild 8 zugeordnet sind. In Bild 9 entspricht der ausgezogenen Kurve die Ausgangsgröße des Verstärkers c_{A01} ; k_2 ist der Richtungskoeffizient des durch $\varphi = -\varphi_0$ und $\varphi = \varphi_0$ bestimmten Geradenabschnitts. Dem nach Bild 8 der Eingangsgröße $-\varphi$ zugeordneten Signal entspricht in Bild 9 die strichpunktierte Gerade mit dem Richtungskoeffizienten k_1 . Wenn $k_1 \neq k_2$ ist, ergibt sich durch additive Überlagerung der beiden Signale nach Bild 9 ein Signal, dem nur für $\varphi = 0$ ein Moment $M_d = 0$ entspricht. Wird dieses

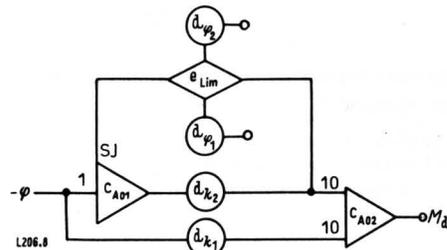
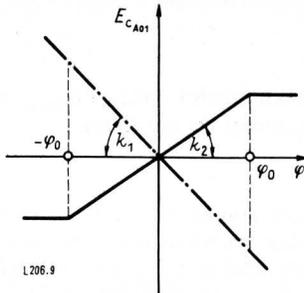


Bild 8. Allgemeine Programmierskizze einer Schaltung zum Nachbilden einer Kennlinie nach Bild 6 mit Hilfe eines Begrenzers.

- d_{k1}, d_{k2} Koeffizienten-Einstellpotentiometer (Richtungskoeffizient einer jeweils bestimmten Geraden)
- übrige Bezeichnungen wie in Bild 4, Erklärungen im Text

Bild 9. Das Eingangssignal $E_{c_{A02}}$ des Verstärkers c_{A02} nach Bild 8 in Abhängigkeit von der Veränderlichen φ .

Erklärungen im Text



Summensignal invertiert, so erhält man das der Kennlinie nach Bild 6 zugeordnete Signal.

Das Nachbilden der Kennlinie nach Bild 10, der keine ungerade Funktion²⁾ entspricht, erfordert gemäß Bild 11 in bezug auf das Programmieren einen größeren Aufwand als das Nachbilden der Kennlinie nach Bild 6. Die Schaltung nach Bild 11 umfaßt zwei Vergleicher sowie ein UND-Verknüpfungsglied, die es ermöglichen, die den verschiedenen Kennlinienbereichen zugeordneten Federkonstanten c_0 (Bereich: $-\varphi_2 \leq \varphi \leq \varphi_0$), c_{01} (Bereich: $\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_1$) und c_{23} (Bereich: $-\varphi_3 \leq \varphi < -\varphi_2$) zu erfassen.

Betrachtet werde zunächst der Bereich $\varphi_0 \leq \varphi \leq -\varphi_2$ der Kennlinie nach Bild 10. In diesem Bereich bewirkt die vom UND-Verknüpfungsglied ausgegebene Steuervariable S_3 das Auslösen der erforderlichen Schaltvorgänge. In der Tat, da für

$$\varphi < \varphi_0 \quad (17)$$

bzw.

$$\varphi - \varphi_0 < 0 \quad (18)$$

die Steuervariable $\bar{S}_1 = L$ und für

$$\varphi > -\varphi_2 \quad (19)$$

bzw.

$$\varphi + \varphi_2 > 0 \quad (20)$$

die Steuervariable $S_2 = L$ ist, bewirkt die gemäß

$$S_3 = \bar{S}_1 \wedge S_2 \quad (21)$$

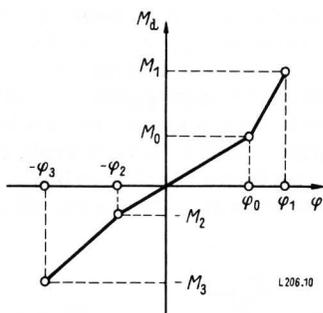


Bild 10. Stückweise lineare Drehfeder-Kennlinie, der keine ungerade Funktion entspricht.

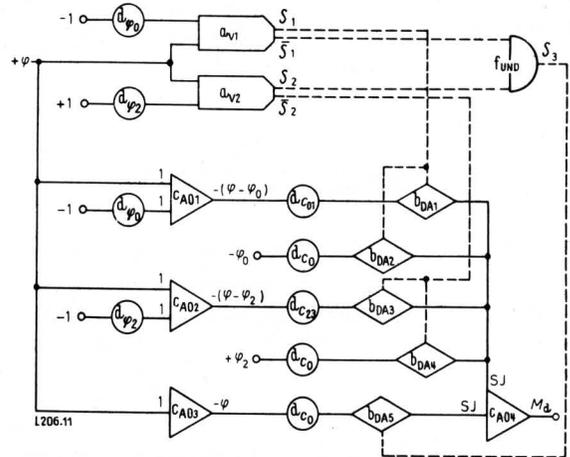
φ Verdrehwinkel
 φ_0 bis φ_3 den Knickpunkten zugeordnete Winkel
 M_0 bis M_3 den Knickpunkten zugeordnete Momente
 M_d Moment

Bild 11. Allgemeine Programmierskizze einer Schaltung zum Nachbilden einer Kennlinie nach Bild 10.

a_{V1}, a_{V2} Vergleicher
 b_{DA1} bis b_{DA5} elektronische Schalter
 c_{A01} bis c_{A04} Verstärker
 $d_{\varphi 0}, d_{\varphi 2}$ Koeffizienten-Einstellpotentiometer (Winkel)
 $d_{c_0}, d_{c_{01}}, d_{c_{23}}$ Koeffizienten-Einstellpotentiometer (Federkonstante)

f_{UND} UND-Verknüpfungsglied

Erklärungen im Text



durch eine UND-Verknüpfung³⁾ definierte Steuervariable S_3 das Schließen des Schalters b_{DA5} ; im Ausgang des Verstärkers c_{A04} steht dann das dem Moment

$$M_d = c_0 \varphi \quad (22)$$

entsprechende Signal an.

Gilt hingegen

$$\varphi > \varphi_0 \quad (23)$$

bzw.

$$\varphi - \varphi_0 > 0 \quad (24)$$

so ist die Steuervariable $S_1 = L$ (und $\bar{S}_1 = 0$). Sie bewirkt das Schließen der beiden elektronischen Schalter b_{DA1} und b_{DA2} ; dadurch entsteht gemäß Bild 11 im Ausgang des Verstärkers c_{A04} ein Signal, dem das Moment

$$M_d = c_0 \varphi_0 + c_{01} (\varphi - \varphi_0) \quad (25)$$

entspricht.

Schließlich wird für

$$\varphi < -\varphi_2 \quad (26)$$

bzw.

$$\varphi + \varphi_2 < 0 \quad (27)$$

die Steuervariable $\bar{S}_2 = L$ (und $S_2 = 0$). Sie verursacht das Schließen der beiden elektronischen Schalter b_{DA3} sowie b_{DA4} und im Ausgang des Verstärkers c_{A04} steht das dem Moment

$$M_d = -c_0 \varphi_2 + c_{23} (\varphi + \varphi_2) \quad (28)$$

zugeordnete Signal an.

L 206

³⁾ Das Symbol \wedge kennzeichnet eine UND-Verknüpfung.