

Digital konfigurierbarer Analogrechner

Rainer Glaschick, Paderborn
2017-09-04, updated 2021-12-01

Einleitung

Mit dem Begriff *elektronischer Analogrechner* wird meist das Bild eines Steckbretts mit einem Gewirr von Steckverbindungen assoziiert. Diese Art der Programmierung ist zeitraubend und nur mühsam reproduzierbar. Auch das auswechselbare Steckbrett erfordert immer noch die Einstellung etlicher Potentiometer.

In der Arbeit von [[Hannauer](#)] werden diese Argumente wiederholt, und er untersucht Möglichkeiten, die Programmierung aus einem digitalen Speicher abzurufen. Ein weiteres Beispiel ist der Analog-Rechner auf einem Chip, siehe [[CowanMT](#)].

Auf den ersten Blick erscheint dies extrem aufwändig; hat doch der kleine EAI Mini-AC ein Steckbrett mit 450 Buchsen; es gibt also über 200 000 verschiedene steckbare Verbindungen. Davon sind aber nur kein kleiner Teil zulässig, es verbleiben etwas mehr als 3000 zulässige Verbindungen.

Durch weitere Maßnahmen kann die Anzahl auf 1000 Verbindungen reduziert werden; durch Einführung eines Bussystems wird deren Anzahl weiter wesentlich reduziert.

Insgesamt wird davon ausgegangen, dass ein System möglichst einheitlicher Struktur so viele Vorteile in der Benutzung bringt, dass selbst ein höherer Preis gerechtfertigt ist.

Terminologie

Alle (aktiven) Funktionselemente werden als *Funktoren* bezeichnet. Da die Potentiometer nicht mehr nur reine Potentiometer sind, sondern die Kopplung der Funktoren übernehmen, werden sie als *Koppler* bezeichnet. Da sie zudem als statische (multiplizierende) D/A-Wandler ausgeführt werden, wäre die Bezeichnung *Potentiometer* irreführend.

Abschätzung

Als Beispiel diene der Mini-AC, vereinfacht und reduziert auf die analogen Ein- und Ausgänge. Er hat:

- 6 Integrierer mit 6 Eingängen und 3 Ausgängen
- 6 Summierer mit 6 Eingängen und 3 Ausgängen
- 3 Multiplizierer mit 2 Eingängen und 2 Ausgängen
- 18 Potentiometer mit 1 Eingang und 1 Ausgang

Da die Ausgänge nur zum bequemeren Stecken mehrfach ausgebildet sind, gibt es 96 Eingänge und 33 Ausgänge, so dass ein Schaltmatrix 3168 Kreuzungspunkte haben müsste.

Ersetzt man die Spannungseingänge durch Stromeingänge (siehe auch [[CowanMT](#)]), dann wird jedesmal ein Potentiometer (mit Stromausgang) benötigt; davon sind ungefähr die doppelte Anzahl Potentiometer als Funktionselemente notwendig. Damit sind es für die Funktoren 9 Spannungsausgänge und 9 Stromeingänge (ohne Anfangswert und Multiplizierer).

Bei 18 Kopplern (Potentiometern) mit 18 Ein- und 18 Ausgängen sind also zwei Schaltmatrizen notwendig, beide mit $9 \cdot 18 = 162$ Koppelpunkten. zusammen nur noch 324 Koppelpunkte. Dazu kommen evtl. noch zweite Eingänge für Integrierer und Multiplizierer, so dass es 50% mehr, d.h. ca. 500 Koppelpunkte sind.

Im Jahre 1966 kostete ein einzelnes (Kamm-) Relais im Elektronikhandel (Schuricht) unter 10 DM; die Koppelmatrix ohne Ansteuerung also etwa 5000 DM. Eine IBM-Lochkarte hat $80 \cdot 12 = 960$ Löcher; sie ist also ausreichend, um die Koppelpunkte anzusteuern.

Um 1960 hatte Siemens die ESK-Relais entwickelt, die für Koppelpunkte in Telefonvermittlungen gedacht waren und immer 5 Relais als Einheit hatten. Da die Kosten in etwa denen eines Kammrelais vergleichbar sein dürften, ergeben sich 2DM pro Koppelpunkt, also 1000 DM, und damit eine Größenordnung, die weitere Untersuchungen sinnvoll macht.

Durch die Stromeingänge sind die Potentiometereinstellungen lastunabhängig; diskrete können direkt per Skala eingestellt werden. Viel sinnvoller ist der Einsatz von (statischen) D/A-Wandlern.

Anfangswerte und Multiplizierer

Um die Anfangswerte der Integrierer zu setzen, enthält jeder Funktor einen lokalen D/A-Wandler, der nicht so genau sein muss wie der in einem Koppler¹. Dennoch gibt es die Möglichkeit, die Anfangswerte über Koppler zu setzen, wenn sie z.B. extern vorgegeben werden.

Hierzu wird ein zweiter Eingang benötigt. Da die Funktoren auch als Multiplizierer arbeiten können, ist ein zweiter Eingang auch hier notwendig.

Bus-System

Im folgenden soll eine Anlage mit 16 Funktoren und 32 Kopplern als Beispiel dienen. Der — weniger häufig — benutzte zweite Eingang der Funktoren wird zunächst nicht einbezogen.

Die beiden Koppelmatrizen sind immer sparsam belegt, weil jeder Koppler (Potentiometer) immer nur einen Ausgang und einen Eingang belegt.

Da es mehr Koppler als Funktoren gibt, kann ein Bussystem die Koppelmatrix ersetzen; die Koppelmatrix ist dann dezentral in den Funktoren realisiert. Die Busleitungen werden fest den Ein- und Ausgängen der Funktoren zugeordnet.

Benötigt wird somit pro Koppler je ein 16-fach Multiplexer für den Eingang und den Ausgang.

Werden Relais-Multiplexer mit 2 Umschaltkontakten pro Relais verwendet, so benötigt jeder 16-fach Multiplexer 8 Relais (ohne Ansteuerung) also 16 pro Koppler und 512 für alle Koppler. Miniatur-Relais mit zwei Umschaltkontakten kosten unter 1€, so dass ein Multiplexer 1:16 mit diesen Relais weniger als 8€ kostet.

Früher wären zwar die Kosten mit 10€ pro Relais deutlich höher gewesen, aber immer noch tragbar. Auch hätte man Relais mit 4 Umschaltkontakten verwendet und davon nur 5 Relais benötigt.

Ein Analog-Multiplexer 1:16 wie der ADG406 kostet mit 14€ mehr als die Relais-Lösung, benötigt aber weniger Platz und Leistung.

Ein derartiges Bus-System hat auch den Vorteil, dass die Anzahl Koppler einfach erhöht werden kann.

Digital programmierbare Koppler

Anstelle von Servomotoren in Verbindung mit herkömmlichen Potentiometern ist es einfacher, einen multiplizierenden D/A-Wandler zu verwenden, wobei der Faktor während der Konfigurierung eingestellt und während der Rechnung nicht mehr verändert wird.

Im RG14 haben sich hierzu BCD-Schalter bewährt, bei denen auch Faktoren > 1 einstellbar sind. Hierbei werden Präzisionswiderstände mit den Faktoren 8, 4, 2, 1, 0.8, 0.4, 0.1, 0.1 usw. an den Eingang angeschlossen und liefern den Strom in eine Stromsenke auf Massepotential, d.h. den Knoteneingang des Operationsverstärkers im Funktor. Dazu ist nur ein einfacher Kontakt notwendig; also können Reed-Relais verwendet werden.

Anstelle einer binären Ansteuerung werden also 4 bzw. 5 Ziffern im BCD-Code verwendet; für den Bereich 0.01 bis 9.99 werden 12 Relais benötigt (2 mehr als im Binärmodus, dafür können die Faktor ohne Rundungsfehler eingestellt werden); der Bereich 0.001 bis 9.999 benötigt 16 Relais (anstelle von 13). Für die Faktoren 1, 2 und 4 wird derselbe Wert verwendet, indem für den Faktor 1 zwei in Serie, für 2 ein einzelner und für 4 zwei parallel verwendet werden. Derartige Präzisionswiderstände sind heute in 1% Toleranz serienmäßig lieferbar. Andernfalls muss man die Widerstände selektieren und gegebenenfalls zu exakten Paaren zusammenfassen.

Für die Schalter können anstelle von Relais FET-Transistoren wie die N-MOS-FET (BS170, 2N7000, 2N7002) verwendet werden, die weniger als 0.1€ kosten und unproblematisch von einem Schieberegister (CD4094, HC575), sogar mit 5V, angesteuert werden können. Da SMD-Widerstände mit 0.1% Toleranz lieferbar sind, ist der Bauteile-Preis des D/A-Wandlers vernachlässigbar. Dadurch, dass die FET-Source immer auf (virtuell) Masse liegt, werden die Ströme nur durch die Widerstände bestimmt, und die Spannung am FET ist <1mV. Wenn das Schieberegister einen Disable-Eingang hat, mit dem alle Ausgänge auf L gelegt werden, dann dient dieser Eingang zugleich zum Abschalten des Koppler.

Für die Auswahl der Busleitung vom und zum Funktor werden Relais verwendet, da Spannungen im Bereich $\pm 10V$ anliegen können (auch wenn ein ADG 406 dafür spezifiziert ist); auch um die Machbarkeit zu zeigen.

Der Eingang eines Kopplers kann zusätzlich an +1 oder -1 anstelle des Ausgangs eines Funktors gelegt werden.

Falls im Verlauf der Rechnung der Faktor geändert werden muss (und dies nicht ohnehin über Multiplizierer erfolgen muss), müssen externe Potentiometer verwendet werden. (Das Verstellen eines Potentiometers während der Rechnung ist bei einem klassischen Analogrechner ohnehin problematisch, weil meist die eingestellten Werte nicht genau verfügbar sind.)

Integrierte multiplizierende D/A-Wandler mit -10V..+10V Eingangsbereich, z.B. der DAC8811, kosten ca. 20€ und sind damit durchaus erschwinglich, aber nicht überall erhältlich. Damit lassen sich Faktoren >1 jedoch nicht einfach erreichen.

Transferbus

Zwar kann an der Konsole jeder Ausgang eines Faktors überwacht werden; dies ist jedoch zur Diagnose gedacht; zudem ist hier keine Einspeisung möglich.

Zum Anschluss externer Geräte wie Potentiometer, Funktionsgeneratoren, X/Y-Schreiber usw. gibt es einen zusätzlichen extern zugänglichen Spannungsbus von 16 Leitungen, den Transferbus. Eine Busschiene wird auch als (Transfer-) Tor bezeichnet. Es handelt sich um einen reinen Spannungsbus.

Um jedes Tor mit jedem Faktor verbinden zu können, sind einerseits eigene Transferkoppler für jedes Tor möglich. Diese müssen dann — wie die Koppler — über je einen Multiplexer für die Faktor-Busse verfügen.

Da andererseits diese ohnehin in den Faktoren vorhanden sind und die Funktorennummern ansonsten beliebig sind, wird der Zugang auf die Tore in die Koppler integriert. Hierzu wird jedem Koppler ein Tor zugeordnet, bevorzugt mit der Nummer des Kopplers. Da ohnehin mindestens 50% mehr Koppler als Faktoren vorhanden sind, ist ein Mangel an Kopplern nicht zu erwarten. Ausserdem kann die Anzahl der Tore bei einem System mit 16 Faktoren ohnehin auf 8 beschränkt sein.

Soll der Ausgang eines Faktors über ein Tor verfügbar werden, wird der selektierte Eingang des Kopplers auf den entsprechenden Bus geschaltet, also mit dem Faktor 1.0.

Soll ein Tor zu einem Eingang addiert werden, wird eine Verbindung vom Tor (mit dem Faktor 1.0, also einem 200kΩ Widerstand) zu dem selektierten Strombus geschaltet.

Beide Schaltungen sind unabhängig voneinander, d.h. der Koppler kann im ersteren Falle einen Faktor für einen anderen Eingang und im anderen Falle einen weiteren Input mit variablem Faktor bereitstellen.

Eine Pufferung ist dabei nicht notwendig und wird im Prototyp auch nicht verwendet. Lediglich ist der Eingangswiderstand zu berücksichtigen. Wegen der geringen Preise integrierter Operationsverstärker ist die Pufferung aber eine Option für zukünftige Versionen.

Technisch ist es unkritisch, beide Richtungen gleichzeitig einzuschalten; es ist aber wenig sinnvoll, weil damit lediglich der Faktor 1.0 addiert wird.

Wegen des geringen Aufwands sind die Transfertore auf jedem Koppler technisch vorhanden, nur nicht auf allen aktiviert, sondern offen gelassen. Damit ist ein Anschalten in beiden Richtungen wirkungslos.

Da die Koppler ansonsten frei verwendbar sind, schränkt dieses Feature die Möglichkeiten nicht ein, erfordert nur ggf. mehr Konfigurationsaufwand und evtl. mehr Koppler.

Kopplung von Rechnungen über den Transferbus

Erfahrungsgemäß werden bei den meisten Aufgaben Blöcke von Funktionen realisiert, die relativ unabhängig voneinander sind. Daher erlaubt es der Transferbus, mehrere Rechner modular zusammenzuschalten.

Werden nur wenige gebraucht, ist es ausreichend, diese 1:1 zu verbinden.

Für große Aufgaben wird eine Matrix gebildet, indem der Transferbus aufgeteilt wird; 8 der 16 Leitungen werden horizontal verbunden, die anderen 8 vertikal. Eine Matrix 4x4 erlaubt es so, 16 Moduln mit je 16 Faktoren, also insgesamt 256 Faktoren zu verwenden (entsprechend einem EAI 680).

Sofern dies nicht ausreicht, wären Moduln mit 32 Faktoren und ein Transferbus mit 32 Leitungen denkbar, die, in einer 8x8 Matrix angeordnet, 2048 Faktoren zulassen würden.

Diskontinuitäten

Für Diskontinuitäten zum Erzeugen von nicht-differenzierbaren und nicht-stetigen Funktionen gibt es:

- den Gleichrichter-Modus eines Summierers, der den Ausgang auf positive oder negative Spannungen (incl. Null) beschränkt (daher *limitier*).
- abschaltbare Koppler in Kombination mit dem Vergleichsmodus eines Summierers
- Speichermodus eines Integrierers

Der Gleichrichter-Modus bildet am Ausgang eines Summierers $\max(0, x)$ bzw. $\min(0, x)$. Damit kann z.B. ein Aufprall modelliert werden, indem beim Erreichen einer Grenze eine Gegenbeschleunigung erzeugt wird, siehe *Mondlandung*.

Abschaltbare Koppler erlauben die Modellierung einer Hysterese oder des Leerlaufen eines Tanks mit Brennstoff. Bislang bestand so keine Notwendigkeit, Integrierer in laufender Rechnung anzuhalten, da ohnehin meist nicht alle Eingänge abgeschaltet werden müssen. Hierzu wird im Koppler ein zusätzliches digitales Signal benötigt, das den Koppler ausschaltet. Erzeugt wird ein solches Signal von einem Summierer im Vergleichs-Modus; in diesem Fall ist das analoge Ausgangssignal nicht gültig; das digitale Ausgangssignal ist anstelle des analogen gültig.

Grundsätzlich ist die in den Integrierern verwendete Schaltung auch als Folge- und Halteschaltung (Track & Hold) geeignet; im Unterschied zum Integrierer kann dabei jedes Eingangssumme durchgeschaltet oder gehalten werden. Da diese Funktion selten benötigt wird (bislang ist kein praktisches Beispiel bekannt), ist der Aufwand für einen Multiplexer zur Anwahl des Vergleichers derzeit nicht sinnvoll.

Funktorenpaare

In Rechenschaltungen wird recht häufig ein Koppler mit dem Gewicht 1 benötigt. Da dies lediglich eine Verbindung über 200kΩ zwischen dem Spannungsausgang eines Funktors und dem Stromeingang des anderen Funktors erfordert, kann über ein Relais eben diese Verbindung in jedem Funktor geschaltet werden, jedoch nur mit dem Funktor der nächstniedrigen Nummer; es sind also nur ein Relais und ein Bit von der Steuerung erforderlich.

Da nicht selten die Hälfte der Koppler den Faktor 1.0 verwenden, ist die Ersparnis an Kopplern durchaus signifikant. Damit kann die Anzahl der Koppler auf das 1.5-fache der Funktoren beschränkt werden.

Der Aufwand bei der Programmierung ist gering, weil die Funktoren ansonsten frei wählbar sind; sie müssen also zunächst so nummeriert werden, dass diese Abkürzung möglich ist. Dies ist in vielen Fällen ohnehin gegeben, wenn die Nummern von links nach rechts vergeben werden.

Dies Funktionalität ist optional und kann im Laufe der Programmentwicklung hinzugefügt werden, wenn die Anzahl der Koppler knapp wird.

Das gleiche Prinzip wird auch verwendet, um den zweiten Eingangs-Bus zu sparen und den zweiten Eingang mit dem Faktor 1.0 mit dem vorigen Funktor zu verbinden, da die Anzahl der Multiplizierer meist nur klein ist und der zweite Eingang im Integrierer nur selten benötigt wird, wenn der Anfangswert dort direkt gesetzt werden kann. Dies erfordert einen höheren Aufwand beim Programmieren, da nicht optional, sondern von Anfang an berücksichtigt werden muss.

Im Schaltplan wird der zweite Eingang nicht als Stromeingang, sondern als Spannungseingang mit dem Faktor 1 dargestellt, der dann direkt (ohne Koppler) mit einem Ausgang verbunden wird. Die Bedingung, dass dies der Funktor der vorhergehenden Nummer ist, kann nicht dargestellt werden.

In den seltenen Fällen, dass es zu Konflikten führt, muss ein Summierer eingefügt werden. Da sich dies meist auf Multiplizierer beschränkt, ist zwar das Vorzeichen invertiert; dies ist aber bei jedem Multiplizierer einstellbar.

Steuerung

Wie allgemein üblich, erlaubt ein Betriebsartenschalter die Zustände:

- Anfangswerte setzen
- Rechnen
- Pause: die Integrierer werden angehalten

Es können jederzeit einzelne Konfigurations-Kommandos (s.u.) zur Veränderung eingegeben werden; dies wird in der Betriebsart *Rechnen* jedoch nicht empfohlen.

Universal-Funktoren

Ein weiteres Problem bei der Verwendung herkömmlicher Analogrechner ist die Spezialisierung der Funktoren; d.h. Integrierer, Summierer, Multiplizierer usw. sind getrennte Einheiten. Dies mag aus Kostengründen sinnvoll gewesen sein, wenn die Arbeitszeit eines Ingenieurs nicht berücksichtigt wird, der

bei der Aufbereitung eines Problems immer die Anzahl der jeweiligen Funktoren berücksichtigen muss und immer wieder Hilfskonstruktionen verwenden muss, da der benötigte Funktor fehlt. Beziehungsweise muss man deutlich mehr Funktoren bereitstellen als tatsächlich benutzt werden.

Daher stellen hier alle Funktoren alle Funktionen bereit, die über die Konfigurierung eingestellt werden:

```
S      Summierer
G,L    Gleichrichter ("limiter")
O      offener Verstärker
V,C    Vergleicher ("comparator")
I      Integrierer mit 1/s oder 100/s
T      Folge- und Halteglied ("track and hold")
M      Multiplizierer
D      Dividierer
Q      Quadrierer
W,R    Quadratwurzel ("root")
```

Konfiguration

Die Konfiguration erfolgt durch zeilenweise mittels über ein Terminal eingegebene Anweisungen (Großschreibung ist nicht notwendig). Diese werden mit OK quittiert, wenn kein Fehler auftrat, sonst mit einem anderen Resultat.

Zeilen, die nicht mit einem K, F oder T beginnen oder eine nicht vorhandene Nummer angeben, werden ignoriert und nicht quittiert, weder positiv noch negativ. Als Kommentarzeichen ist der inverse Rückstrich \ reserviert; ob er oder andere zu einem OK führen, ist der Dokumentation des jeweiligen Geräts zu entnehmen.

Als erstes wird der Typ und die Nummer angegeben, an den das Kommando adressiert ist. Dies erfolgt durch F1 ... F16 für Funktoren und K1 ... K32 für Koppler.

Sodann folgen ein oder mehrere Parameter, durch Leerzeichen (Tabulatoren) getrennt. Ein syntaktisch ungültiger Parameter wird als Kommandoende interpretiert und kann als Kommentar dienen; hier wird der inverse Rückstrich bevorzugt verwendet.

Für Funktoren ist der erste Parameter:

```
S Summierer
G Gleichrichter
O offener Verstärker
C Vergleicher (Comparator)
I Integrierer mit 1/s oder 100/s
T Folge- und Halteglied ("track and hold")
M Multiplizierer
D Dividierer
Q Quadrierer
R Quadratwurzel
```

Beim Integrierer wird der interne Anfangswert als zweiter Parameter in Form eines Dezimalbruchs (ggf. mit Vorzeichen) angegeben; die Polarität bezieht sich auf den Ausgang. Die Geschwindigkeit ist standardmäßig 1/s; wird 100/s benötigt, ist die Zahl 100 anzufügen (ohne Dezimalpunkt).

Beim Vergleicher und Gleichrichter wird mit P oder N die Polarität des Ausgangsignals gesetzt.

Beim Multiplizierer und Dividierer kann ein N verwendet werden, um das Ausgangssignal zu invertieren.

Beim Funktor T (Folge- und Halteglied) muss der zweite Eingang ein Digitalsignal von einem Vergleicher sein, das den Haltemodus aktiviert. Ein Anfangswert kann nicht angegeben werden.

Bei Kopplern ist der erste Parameter der Faktor als Dezimalbruch zwischen 0.0 und 9.999 ohne Vorzeichen, die nächsten beiden die Nummern der Funktoren, die verbunden werden. Anstelle des ersten kann auch +1 oder -1 verwendet werden.

Ein vierter Parameter gibt die Nummer eines als Vergleicher betriebenen Funktors an, der den Funktor dynamisch abschalten kann.

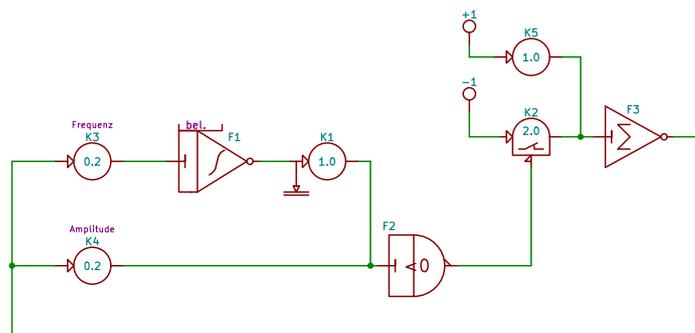
Die Tore des Transferbusses sind in die Koppler entsprechender Nummer integriert. Zu deren Aktivierung werden die üblichen Pfeilspitzen < (für vom Bus) und > (für zum Bus) verwendet, die als letzter Parameter angegeben wird. Dabei ist der Faktor für beide Richtungen immer 1.0 (nicht einstellbar). Der angegebene Faktor bezieht sich auf die Verbindung zwischen Funktoren. Wird der Koppler nicht zur Verbindung zwischen Funktoren verwendet, so wird der Faktor 0 verwendet und Ziel und Quelle gleich angegeben.

Da derzeit die Kommandos direkt vom Modul interpretiert werden, wird die Kopplung eines Funktorenpaars in dem zweiten Funktor durch ein & (kaufmännisches UND) als zusätzlichen Parameter angegeben.

Bei einem Multiplizierer ist die Paarverbindung der 2. Faktor, bei einem Dividierer der Divisor (Nenner).

Es ist ein Optimierer möglich, der eine Konfiguration analysiert und ggf. Funktorenpaare erkennt und eine geänderte Konfiguration ausgibt.

Beispiel Dreiecksgenerator



Es wird die übliche Schaltung verwendet, wobei der Koppler K2 von dem Ausgang des Vergleichers F7 aktiviert wird. Die Ausgabe auf Tor 1 erfolgt durch den Koppler K1.

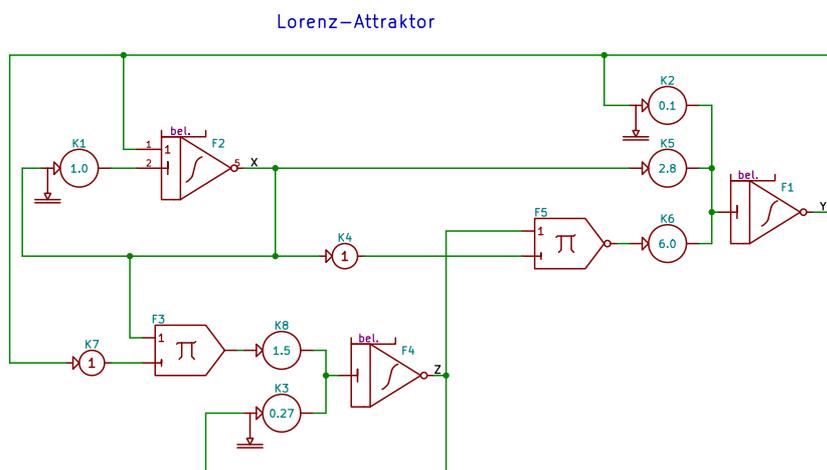
Konfiguration:

```

F1 I 0.5
F2 V N
F3 S
K1 1.0 F1 F2 >
K2 2.0 -1 F3
K3 0.2 F3 F1
K4 0.2 F3 F2
K5 1.0 +1 F3

```

Beispiel Lorenz-Attraktor



Da die Multiplizierer auch ein positives Ausgangssignal liefern können, sind keine Invertierer notwendig. Dennoch sind mit K1, K4 und K7 ungewöhnlich viele Koppler mit dem Faktor 1.0 notwendig. Die Ausgabe erfolgt über K1, K2 und K3.

Konfiguration:

```

f1 i 0.1

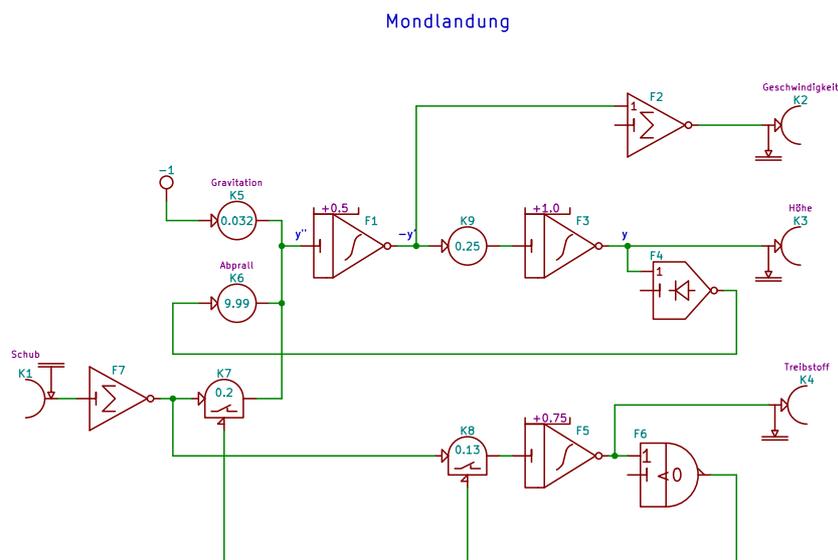
```

```

f2 i 0.2 &
f3 m &
f4 i 0.3
f5 m &
k1 1.0 f2 f2 >
k2 0.1 f1 f1 >
k3 0.27 f4 f4 >
k4 1.0 f2 f5
k5 2.8 f2 f1
k6 6.0 f5 f1
k7 1.0 f1 f3
k8 1.5 f3 f4

```

Beispiel Mondlandung



Bei den drei Integrierern für Geschwindigkeit, Weg und Treibstoff werden die Anfangswert, da über die Konfiguration eingestellt, direkt oberhalb des Symbols notiert. Der Koppler K1 erhält den Schub über Tor 1; Geschwindigkeit, Höhe und Treibstoff-Vorrat werden über die Tore T2, T3 und T4 ausgehen, die ansonsten keine Funktion haben, weil zu F4 und F6 Paarverbindungen verwendet werden.

Der Aufprall auf dem Mond wird über den Gleichrichter F4 bewirkt, der wie ein Ball ein dem negativen Abstand proportionale Beschleunigung entgegen der Gravitation bewirkt.

Wenn der Treibstoff-Vorrat erschöpft ist, schaltet der Vergleichler F6 über die Koppler K8 und K7 den Schub ab. Der Integrierer F1 erhält so keinen Schub mehr; es bleiben aber die Gravitation und der Rückprall wirksam.

Konfiguration:

```

f1 i +0.5
f2 s &
f3 i +1.0
f4 g p &
f5 i +0.75
f6 v n &
f7 s
k1 0 f7 f7 <
k2 0 f2 f2 >
k3 0 f3 f3 >
k4 0 f5 f5 >
k5 0.032 -1 f1
k6 9.99 f4 f1
k7 0.2 f7 f1 f6
k8 0.13 f7 f5 f6
k9 0.25 f1 f3

```

Prototyp

Generell

Als Prototyp wird ein Gerät mit 8 Funktoren und 12 Kopplern mit einer handelsüblichen durchverbundenen Busplatine mit 20+1 Plätzen verwendet.

Für Anwendungen, bei denen mehr Funktoren benötigt werden, kann ein zweites Gerät über den Transferbus gekoppelt werden.

Um zu demonstrieren, dass das Konzept nicht unbedingt moderne Bauelemente benötigt, werden die Multiplexer in den Kopplern mit Relais aufgebaut. Moderne Miniatur-Relais lassen dies auf einer Europa-Platine (100x160mm²) zu. Integrierte Analog-Multiplexer mit $\pm 10V$ Spannungsbereich sind nur wenige Typen verfügbar, z.B. der ADG406 als 16-fach Multiplexer, der in einer späteren Version mit 16 Funktoren eingesetzt werden könnte.

Auch die (bipolaren multiplizieren) AD-Wandler in den Kopplern werden diskret mit Stromaddition aufgebaut. Anstelle von Relais werden jedoch FET verwendet. Der Faktor ist dann vierstellig mit dem Maximum 9.999, d.h. mit 1% Auflösung. Unmittelbar einsetzbare analoge integrierte Schaltungen sind derzeit nicht bekannt.

Um eine vorgefertigte durchverbundene Busplatine verwenden zu können, werden die fest vorgegebene Busleitungen auf den Einschüben durch (mechanische) Schalter und nicht durch die Position auf dem Bus eingestellt. Das sind die Busleitungen für die Funktoren und die Transferleitungen für die Koppler.

Damit müssen die Koppler auf jeden Fall zwei Multiplexer für die Ausgänge und die (primären) Eingänge der Funktoren haben. Da die Koppler dynamisch abschaltbar sind, ist ein weiterer Multiplexer notwendig, der den Ausgang eines Vergleichers — unabhängig von dem zu verbindenden Funktor-Ausgang — auswählt. Zudem müssen mehrere Koppler von demselben Signal ausschaltbar sein, so dass eine vorgegebene Zuordnung nicht möglich ist.

In einigen Funktionen benötigen die Funktoren einen sekundären Eingang, insbesondere für die Multiplikation. Das würde einen weiteren Bus und in jedem Koppler einen weiteren Multiplexer erfordern.

Da der sekundäre Eingang aber praktisch nie bei weniger als der Hälfte der Funktoren benötigt wird, kann eine spezielle Lösung mit geringem Verlust an Flexibilität verwendet werden, die den zweiten Bus und damit einen Multiplexer in jedem Koppler spart. Dabei wird der zweite Eingang mit einem fest vorgegebenen Funktor, dem mit der vorherigen Nummer, über den Faktor 1.0 verbunden. Da ansonsten die Funktoren alle gleich ausgestattet sind und die Nummern frei vergeben werden können, ist diese Lösung immer möglich, wenn auch manchmal ein Summierer benötigt wird.

Im Speichermodus (*track and hold*) wird der primäre Eingang für den analogen Eingangswert und der sekundäre Eingang für das digitale Signal aus einem als Vergleichler geschalteten Funktor verwendet. Mangels Beispiele wird der Speichermodus (zunächst) nicht vorhanden sein.

Der Anfangswert eines Integrierers wird durch einen D/A-Wandler auf dem Funktor statisch per Konfiguration eingestellt. Als A/D-Wandler wird der MCP4921 verwendet mit 0..4000 auf ± 1 abgebildet; also 0.5% Auflösung. Um den Anfangswert flexibel zu setzen, kann der Anfangswert additiv über den sekundären Eingang gesetzt werden, muss dann aber über einen Funktor, z.B. einen Summierer oder einen Haltespeicher, bereitgestellt werden.

Wird dieser zweite Eingang nicht benötigt, kann er zusätzlich auf den primären Eingang geschaltet und dann anstelle eines Kopplers des Faktors 1.0 verwendet werden.

Da ein als Vergleichler geschalteter Funktor keinen sinnvollen analogen Ausgang hat, wird der Ausgabebus für das Schaltsignal verwendet.

Zwar wird in einem Funktor nur ein Rechenverstärker benötigt; der einfacheren Steuerbarkeit halber besteht im Prototypen ein Funktor aus getrennten Abschnitten für den Multiplizierer, den Integrierer und den Summierer, eingeschlossen die jeweiligen Varianten, die dann per Relais mit dem Bus verbunden werden.

Busbelegung

Die Variante mit 16 Funktoren ohne zweiten Analogbus benötigt:

- 16 analoge Ausgangsschienen
- 16 analoge Eingangsschienen
- 16 analoge Transferschienen
-
- 48 analoge Kontakte

- 6 Versorgungsschienen (+/- 15V, Masse, +/- 10V, Masse)

```

2 Zustandssteuerung (run, init)
2 RS232 Control bus
1 Masse vorherige Signale
---
11 sonstige Kontakte

====
59 Kontakte

```

Bei Verwendung der VG-Steckverbinder (DIN 41612) sind dann bei zwei Reihen 5 Kontakte als Reserve verfügbar.

Eine halbierte Variante mit 8 Funktoren hätte:

```

8 analoge Ausgangsschienen
8 analoge Eingangsschienen
8 analoge Transferschienen
---
24 analoge Kontakte

6 Versorgungsschienen (+/- 15V, Masse, +/- 10V, Masse)
2 Zustandssteuerung (run, halt, init)
2 RS232 Control bus
1 Masse vorherige Signale
---
11 sonstige Kontakte

====
25 Kontakte

```

Zuordnung

```

a1  GND
c1  GND
a2  TTYcmd
c2  TTYack
a3  NC
c3  NC
a4  Init
c4  Run
a5  -15V
c5  -15V
a6  Fout1
c6  Fout2
a7  Fout3
c7  Fout4
a8  Fout5
c8  Fout6
a9  Fout7
c9  Fout8
a10 Fout9
c10 Fout10
a11 Fout11
c11 Fout12
a12 Fout13
c12 Fout14
a13 Fout15
c13 Fout16
a14 AGND
c14 +10V
a15 Fin1
c15 Fin2
a16 Fin3
c16 Fin4
a17 Fin5
c17 Fin6
a18 Fin7
c18 Fin8
a19 Fin9
c19 Fin10
a20 Fin11
c20 Fin12
a21 Fin13

```

```

c21  Fin14
a22  Fin15
c22  Fin16
a23  AGND
c23  -10V
a24  Tor1
c24  Tor2
a25  Tor3
c25  Tor4
a26  Tor5
c26  Tor6
a27  Tor7
c27  Tor8
a28  Tor9
c28  Tor10
a29  Tor11
c29  Tor12
a30  Tor13
c30  Tor14
a31  Tor15
c31  Tor16
a32  +15V
c32  +15V

```

Bemerkungen

Hier werden Punkte geparkt, die später in die aktuelle technische Spezifikation übernommen werden.

VG-Steckverbinder nach DIN 41612 an Europakarten 100x160mm

19"-Gehäuse mit 3 HE (132mm) und 84 TE (427mm): 21 Steckkarten x 21mm (4TE)

Prototyp: 8 Funktoren, 12 Koppler, 1 Steuerung

Die Steuerung hat neben 3 LED für Run, Halt und Init und einem Schalter mit Mittelstellung für letztere lediglich einen DB-Stecker für ein externes Bedienteil.

Die Funktoren haben eine LED-Anzeige für die gewählte Funktion.

Die Nummer des Funktors bzw. Kopplers und die Anwahl der Busleitungen erfolgt nicht durch die Position im Bussystem, sondern auf dem Board; es sind alle Steckplätze gleich verdrahtet.

Dies kann über DIP-Schalter erfolgen. Es kann aber auch ein über ein steckbares passives Modul erfolgen, dass lediglich die Busleitung(en) auswählt und die Nummer für den Controller bereitstellt.

Für die Anfangswerteinstellung der Integrierer kann der PWM-Ausgang des Microcontrollers verwendet werden; durch Einspeisen von $-50\mu\text{A}$ von -10V in den Knotenpunkt kann die Ausgabe bipolar erfolgen.

Als Microcontroller wird ein ATmega328 mit der Arduino-IDE eingesetzt. Von den 20 möglichen I/O-Pins werden:

- TxD und RxD für die Kommunikation
- 5 Bit für die Modulnummer
- 3 oder mehr Bit für Relais und FET
- 1 PWM-Ausgang für den Anfangswert im Integrierer.

Für die Ansteuerung der Relais und FET sind entweder die Schieberegister HEF4094 oder HC595 oder der adressierbare Speicher HC259 verwendbar. Letzterer ist einfacher und erlaubt das Verändern einzelner Bits; es müssen aber alle Bits einzeln gesetzt werden. Um nahe an einer historischen Realisierbarkeit zu sein, werden alle Schalter über ein (langes) Schieberegister aktiviert. Der HC595 ist das neuere und preiswertere Bauteil.

Literatur

Ulmann:

Bernd Ulmann: Analogrechner. Oldenbourg 2010.

Massen:

R. Massen: *Stochastische Rechentechnik*. Carl Hanser Verlag, München 1977

Hannauer:

Georg Hannauer: *Stored Program Concept for Analog Computers*. EAI, Princeton N.J., 1968.

BryantSTFK:

Bryant, M.D.; Shouli Yan; Tsang, R.; Fernandez, B.; Kumar, K.K.: *A Mixed Signal (Analog-Digital)*

Integrator Design In: IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol.59, no.7 pp.1409-1417 (2012)
CowanMT:
Cowan, G. E R; Melville, R.C.; Tsividis, Y.: *A VLSI analog computer/digital computer accelerator*.
IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 41, no. 1, pp. 42-53 (2006)

¹Differentialgleichungen, deren Lösung extrem von den Anfangswerten abhängt, sind selten.