

Einfacher preiswerter Analogrechner RG14-Mini

Rainer Glaschick, Paderborn
2018-02-02

Einleitung

Da ein Analogrechner heute nicht mehr für professionelle Berechnungen gebraucht wird, gibt es kaum Anleitungen zum Selbstbau, erst recht keine einfachen Exemplare für Ausbildungszwecke. Denn ein Analogrechner klassischer Bauart ist entweder sehr eingeschränkt oder zu teuer, wenn er gut ausgestattet ist.

Der im folgenden beschriebene Analogrechner, der für weniger als 100€ selbst gebaut werden kann, weicht an einigen Stellen von der klassischen Variante ab, weil die verwendeten Techniken für einen vollständig digital konfigurierbaren Analogrechner konzipiert wurden. Hierbei ist es wesentlich, dass alle Einstellungen im ausgeschalteten Zustand erfolgen.

Beim klassischen Konzept können zwar mehrere Eingänge an einen Ausgang angeschlossen werden, aber nicht umgekehrt. Dies kann durch Stromeingänge anstelle von Spannungseingängen erreicht werden¹, da letztere es erlauben, an einen Eingang mehrere Stromquellen anzuschließen. Somit können sowohl die Spannungsausgänge wie auch die Stromeingänge der Rechenelemente auf Sammelschienen gelegt werden. Die Verschaltung erfolgt nicht durch galvanische Verbindungen, sondern durch passive Koppelemente, die die Spannung mit einem vorgegebenen, aber während der Rechnung konstanten Faktor in einen Strom umwandeln. Das sind überwiegende Potentiometer mit einem Ausgangswiderstand, der gegenüber der (virtuellen) Masse des Stromeingangs den Strom bestimmt. Der Vorteil erheblich einfacherer Verbindungen wird zwar durch mehr Koppler als in der klassischen Ausführung erkauft; insgesamt wird aber der Rechner einfacher und weniger restriktiv in der Konfiguration. Beispielsweise gibt es keinen Engpass an Eingängen zu einem Rechenelement. Zudem können die Potentiometer unabhängig von ihrer Verschaltung, z.B. durch Skalen oder (multiplizierende) D/A-Wandler, eingestellt werden².

Minimal-Version zur Überprüfung des Konzepts

Das klassische Konzept wurde hier — und nur in dieser Minimalversion — insofern beibehalten, als weiterhin die Ein- und Ausgänge der Rechenelemente durch Stecken verbunden werden. Dafür werden handelsübliche Prototypen-Boards verwendet, die viele Kontakte für einen kleinen Preis bieten. Die Verbindung soll über Drahtbrücken aus Volldraht erfolgen, weil so die Verschaltung wesentlich übersichtlicher und leichter nachvollziehbar ist. Auch wenn Bauelemente auf dem Steckbrett einfach einzufügen sind, sollte dies eine Ausnahme bleiben. Falls eine Sonderfunktion notwendig ist, kann ein eigenes Rechenelement einfach selbst hergestellt werden.

Da die Grundplatte mit dem Prototypen-Board nur 5€ kostet, ist es sinnvoller, die Rechenelemente einzustecken, als das Verbindungsboard über eine aufwändige Mechanik austauschbar zu machen. Zudem kosten die meisten Rechenelemente

weniger als 10€ und können in ausreichender Menge vorrätig sein. Ferner sind Varianten von beispielsweise Faktorkopplern möglich, da auch sie nach Bedarf gesteckt werden und eine fehlende Funktionalität keine Benutzung verhindert. (Dies gilt allerdings nur für diese Mini-Version; bei der Vollversion sind nur konfigurierbare Universal-Funktoren und verbindende Faktorkoppler vorgesehen).

Die aktiven Rechenelemente (Funktoren) haben immer einen Stromeingang (Summationspunkt) und einen Spannungsausgang. Der klassische Spannungseingang mit dem Gewicht 1 ist normalerweise zusätzlich vorhanden, aber nur für diese Minimalversion gedacht. Da das Steckbrett fünf Kontakte hat, sind zwei weitere möglich, die insbesondere für digitale Ein- und Ausgänge verwendet werden.

Die Funktoren werden über Schalter konfiguriert; meist über Jumper, da dies preiswert und platzsparend ist. Da jeder Summierer auch als Gleichrichter konfiguriert werden kann, sind Dioden auf dem Steckbrett nicht notwendig.

Die Verbindung der Spannungs-Ausgänge zu den Strom-Eingängen erfolgt über (passive) Faktor-Koppler, die im einfachsten Fall ein Potentiometer mit einem Widerstand am Ausgang sind; d.h. der üblicherweise im Eingang vorhandene Widerstand ist in das Potentiometer verlagert. Damit ist die Skala von der Belastung unabhängig, da der Summationspunkt eine virtuelle Masse darstellt. Zwar werden damit mehr Koppler benötigt als Rechenelemente; dafür sind aber keine Kunstgriffe auf Grund fehlender Eingänge notwendig. Der Standard-Koppler hat zudem einen Anlogschalter am Ausgang, der von einem als Vergleicher geschalteten Summierer bedient werden kann.

Die Integrierer haben für den Anfangswert ein eigenes, einfaches Potentiometer, mit dem eine Einstellung mit 5% Genauigkeit ohne einen Koppler möglich ist. Dieses wirkt wie jedes Potentiometer auf den Summenpunkt der Anfangswerteinstellung. Da dieser auch nach aussen geführt ist, kann mit einem der Koppler der Anfangswert genauer eingestellt werden. Die Integrierer verwenden eine schnelle Anfangswert-Einstellung, die auch als Halteschaltung (*sample-and-hold*) verwendet werden kann. Ein Anhalten der Integration ist nicht für alle Integrierer gemeinsam vorhanden; es kann lediglich jeder Integrierer individuell angehalten werden, indem die Schalter in den Faktorkopplern am Eingang ausgeschaltet werden.

Der Rechner benötigt lediglich eine Versorgungsspannung von 30V oder $\pm 15V$. Die Ein- und Ausgabe erfolgt über spezielle Rechenelemente, die im Normalfall nur die Ausgänge auf andere Anschlussarten umsetzen und Eingänge durch einen Präzisions-Vorwiderstand in Ströme umwandeln.

Die Umschaltung von Anfangswert- auf Rechenbetrieb erfolgt meist durch einen Schalter auf dem Modul für die Spannungsversorgung. Da das entsprechende Signal ein verdrahtetes Oder ist, kann dies u.a. durch einen als Vergleicher geschalteten Summierer erfolgen. Soll das Rücksetzen nach einer festen Zeit erfolgen, ist hierzu ein weiterer Integrierer zu verwenden.

Wird iterierendes Rechnen benötigt, so kann ein Zeitgeber-Modul erstellt werden, das die Sync-Leitung periodisch aktiviert.

Vollversion

Bei der noch in Planung befindlichen Vollversion werden die Rechenelemente und

Koppler digital konfiguriert, so dass ein Rechenprogramm in wenigen Minuten vollständig eingestellt werden und auch nach Monaten eine Konfiguration exakt reproduziert werden kann. Dies kann preisgünstig mit einer Lochkarte pro Rechenelement bewirkt werden; es werden ungefähr 10 Bit pro Rechenelement und 30 Bit pro Koppler (s.u.) benötigt. Statt dessen kann man die Konfiguration auch über Schieberegister gemeinsam einstellen; die Bits der Schieberegister schalten dann über Relais die Konfiguration. Manuelle Einstellungen sind weder notwendig noch vorgesehen³.

Es gibt nur einen - nicht austauschbaren — Funktor, das als Summierer, Gleichrichter, Vergleicher, Nullsetzer (offener Verstärker), Integrierer oder Multiplizierer konfiguriert werden kann⁴.

Zur Verbindung der Funktoren gibt es einen Spannungs- und einen Strombus. Die Schienen der beiden Busse werden fest den Funktoren zugeordnet; in den Funktoren sind also keine Auswahlwähler notwendig. Dies ist sinnvoll, weil immer nur eine Spannungsquelle bzw. eine Stromsenke auf eine Busschiene geschaltet werden kann.

Die Verknüpfung der Aus- und Eingänge erfolgt über Koppler, die eine Spannungs-Strom-Wandlung mit einstellbarem Faktor durchführen. Auf den Kopplern sind Auswahlwähler vorhanden, die eine Schiene des Spannungsbusses und eine des Strombusses auswählen und so einen Ausgang eines Funktors an den Eingang eines Funktors unter Verwendung eines konfigurierbaren — statischen — Faktors koppeln. Grundsätzlich werden auch Verbindungen mit dem Faktor 1 über einen Koppler geführt. Somit sind erheblich mehr (doppelt so viele) Koppler als Funktoren notwendig.. Pro Koppler wird daher ein D/A-Wandler und je ein Analog-Multiplexer für den Spannungs- und Strombus benötigt.

Da eine Multiplikation zwei Faktoren hat, würde ein Multiplizierer zwei Schienen des Strombusses benötigen. Statt dessen wird einer der Operanden mit dem Gewicht 1 vom Ausgang des vorhergehenden Funktors verwendet; der andere ist ein normaler Eingang. Anstelle der Multiplikation kann eine Division konfiguriert werden; der feste Faktor ist der Divisor (Nenner). Wird das Quadrat (oder die Quadratwurzel) konfiguriert, wird die Verbindung zum vorigen Funktor nicht benötigt. Zur Materialersparnis braucht nur jeder zweite Funktor als Multiplizierer verschaltbar zu sein (also jeder mit einer geraden Nummer).

Ein als Vergleicher konfigurierter Funktor sendet ein digitales anstelle des analogen Signals auf die zugeordnete Busschiene. Die Koppler umfassen (schnelle) Analogwähler, die — sofern aktiviert — durch das digitale Signal auf einer selektierten Busschiene den Ausgangsstrom abschalten.

Anstelle mit einer Schiene eines Spannungsbusses kann ein Koppler auch mit +1 oder -1 verbunden werden, um konstante Werte einzuspeisen.

Optimierte Vollversion

Man kann mehr als die Hälfte der Multiplexer einsparen, wenn jede Spannungsschiene fest mit einem Koppler und jede Stromschiene fest mit einem — anderen — Koppler verbunden ist (also die doppelte Anzahl der Koppler vorhanden ist). Man hat also einen selektiven Aus- bzw. einen selektiven Eingang. Damit können viele der untersuchten Beispiele konfiguriert werden, ohne dass zusätzliche freie Koppler notwendig sind.

Ein Konflikt tritt insbesondere dann auf (Beispiel Mondlandung), wenn sowohl ein schaltbarer Eingang als auch eine Konstante am Eingang eines Integrators benötigt werden. Hier muss ein freier Koppler oder ein weiterer Summierer eingesetzt werden.

Da zur Multiplikation ohnehin der Output des benachbarten vorigen Funktore (mit Faktor 1) schaltbar ist, kann diese Verbindung auch bei anderen Funktionen aktivierbar sein, nur dass sie dann auf den primären Eingang wirkt. Dies erfordert nur einen Schalter pro Funktor und ist damit kosteneffizient.

Da meist nur wenige schaltbare Koppler benötigt werden, werden diese in zusätzliche freie Koppler verlegt. Diese benötigen drei Multiplexer für den Signaleingang, den Schalteingang und den Signalausgang. Bei 15 Funktoren ergibt dies 5 freie Funktoren, die auch Probleme mit der festen Zuordnung von zwei Kopplern pro Funktor reduzieren. Dann kann auch die Schaltung von +1 oder -1 auf diese freien Funktoren beschränkt werden. Eventuell — noch zu evaluieren — könnte man anstelle der Eingangskoppler der Funktoren diese wieder zu freien Funktoren machen; bei 15 Funktoren ergibt dies 5 weitere freie Funktoren, die dann auch alle schaltbar sein könnten.

Die Logik sieht also jetzt so aus:

- Jeder Funktor hat einen zugeordneten Eingangs-Strom- und einen Ausgangs-Spannungs-Bus
- Jeder Funktor hat einen Eingangs-Koppler, der mit einem einstellbaren Faktor mit einer einstellbaren Spannungsschiene verbunden werden kann.
- Jeder Funktor-Eingang kann mit dem Faktor 1 mit dem Ausgang des (unteren) Nachbarn gekoppelt werden.
- Freie Koppler verbinden eine der Spannungs- (Ausgangs-) Schienen mit einer Strom- (Eingangs-) Schiene. Diese Koppler sind schaltbar über eine der Spannungsschienen. Zusätzlich können sie +1 oder -1 als Eingang verwenden.

Da ohne die freien Koppler bereits jeder Funktor mit zwei anderen verbunden werden kann, werden weniger freie Koppler als Funktoren, z.B. die Hälfte, benötigt.

Damit gehören zu einem Funktor zwei Kopplern; einer, der fest dem Eingang (selektiver Eingang), und einer, der fest dem Ausgang (selektiver Ausgang) zugeordnet ist. Da ein Digitalsignal eventuell mehr als einen Eingang ausschalten können muss, müssen die selektiven Eingänge schaltbar sein; bei den Ausgängen kann darauf verzichtet werden.

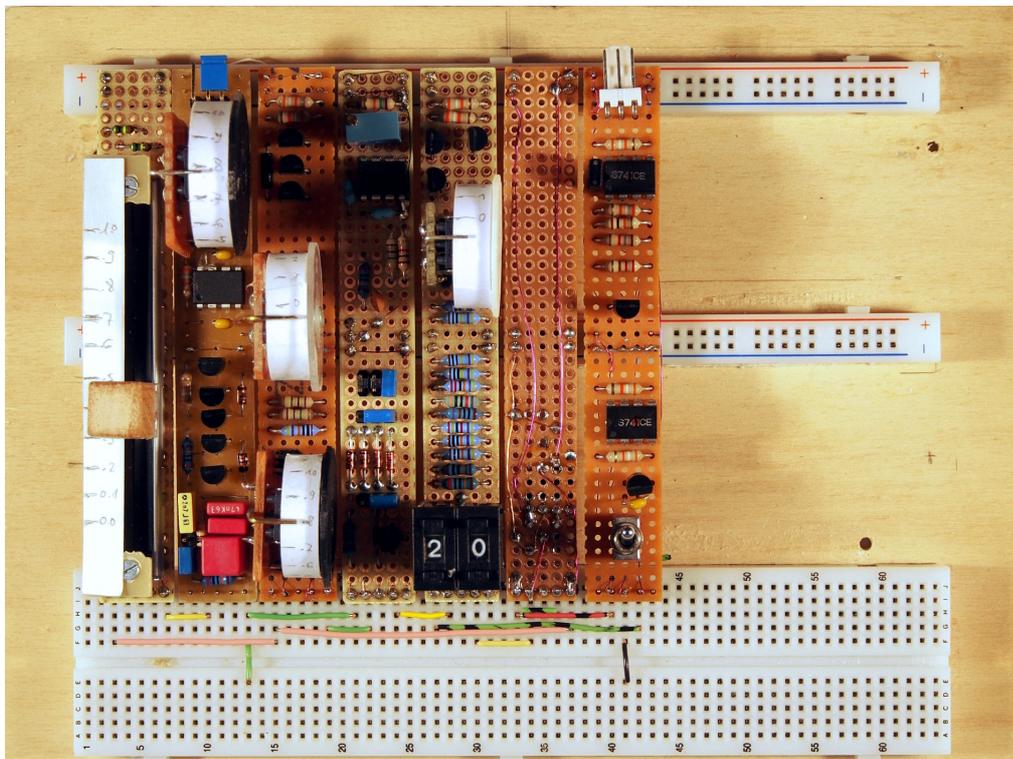
Dann benötigt selektive Eingang zwei und jeder selektive Ausgang einen Multiplexer. Es werden somit drei Multiplexer pro Funktor benötigt; also bei 15 Funktoren $3 \cdot 5 \cdot 15 = 225$ Relais, da für einen 4-Bit binär codierten 16-fachen Multiplexer 5 Relais mit je 4 Umschaltkontakten benötigt werden⁵.

Da der Aufbau sich doch erheblich von den gängigen Analogrechner unterscheidet, wird eine eigene Symbolik verwendet, die anderswo detailliert beschrieben wird. Insbesondere werden, wie in der Digitaltechnik üblich, der Ein- oder Ausgang mit einem kleinen Kreis als negierend gekennzeichnet.

Ein Stromeingang ist durch ein gedrehtes Massesymbol markiert, ein Spannungseingang, der immer das Gewicht 1 hat, mit einer Ziffer 1.

Aufbau

Das folgende Bild zeigt den RG14-Mini für 10, gesteckt mit 7 Moduln für die Erzeugung von Dreiecksschwingungen:

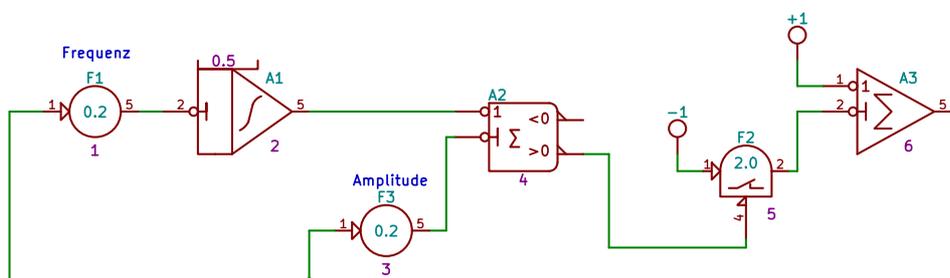


Jedes Modul ist 100mm lang und 14mm breit; das Raster der Moduln beträgt 600mil = 15.24mm. Oben ist eine doppelte Stromschine für die Versorgungsspannungen (+15V oben, rot; -15V unten, blau), in der Mitte die Masseleitung (blau, unten) und das Signal für das Setzen der Anfangswerte (rot, oben). Ganz unten ist der eigentliche Verdrahtungsbereich.

Von links nach rechts sind die Moduln:

- Faktorkoppler KL (Schieberegler)
- Integrierer mit Anfangswert 0.8
- Faktorkoppler KG mit Grob-Fein-Einstellung (Schalter am Ausgang wird nicht benötigt)
- Summierer als Vergleicher
- Faktorkoppler KS mit Ausgangsschalter und einem Bereich von 0.00 bis 9.90 digital und einer zusätzlich additiven Feineinstellung von 0.01 bis 0.09 über Potentiometer
- Summierer
- Spannungsversorgung mit Schalter Betrieb / Initialwerte

Die Schaltung ist:



Die Steckplätze werden im Schaltplan unterhalb der Symbole notiert.

Funktoren (Rechenelemente)

Die als *Funktoren* bezeichneten Rechenelemente sind die aktiven Module, die eine Ausgangsspannung als Funktion des Eingangsstroms (und ggf. der Zeit) liefern.

In der Mini-Version ist aus Platzgründen kein Universal-Funktor möglich; es gibt Integrierer, Multiplizierer und Addierer mit Gleichrichter- und Vergleicherefunktion.

Maschineneinheit sind $\pm 10\text{V}$ am Spannungsausgang und $\pm 50\mu\text{A}$ am Stromeingang. Pin 1 ist immer ein Spannungseingang mit dem Faktor 1 (d.h. $200\text{k}\Omega$) für den primären Stromeingang an Pin 2; Pin 5 ist der (analoge) Ausgang. Pins 3 und 4 sind – je nach Rechenelement – für analoge oder digitale Signale; letztere sind aktiv, indem sie einen Strom von max. 1mA gegen Masse leiten und somit als geschaltetes Oder wirken.

Summierer

Der Summierer kann durch Schalter auf folgende Funktionen konfiguriert werden:

- Summierer
- Begrenzer (Gleichrichter) positiv
- Begrenzer (Gleichrichter) negativ
- Vergleichere
- Nullsetzer (offener Verstärker)

Die Begrenzer sind Gleichrichter, die das Ausgangssignal auf positive bzw. negative Werte begrenzen. Da es ansonsten Summierer sind, kann durch Addition bzw. Negation eines Wertes die Schwelle verschoben werden; es sind aber immer am Ausgang keine negativen bzw. positiven Signale vorhanden. Im Symbol bezieht sich das Gleichrichtersymbol auf die Summe der Eingänge; die Negation am Ausgang zeigt an, dass es sich um einen invertierenden Verstärker handelt. Die gezeichnete Diode ist als ideale Diode im Eingang zu lesen.

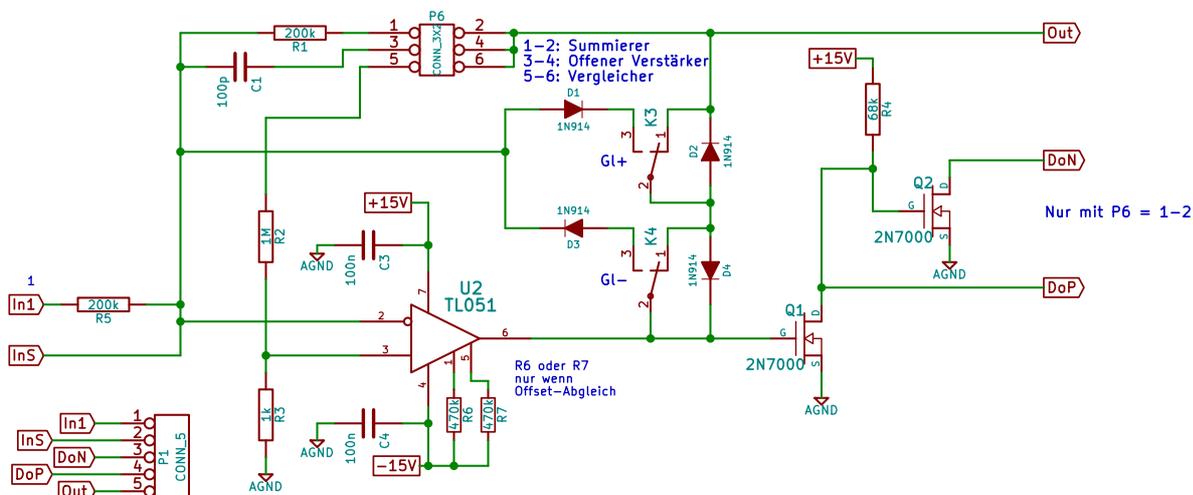
Der Nullsetzer ist ein offener Verstärker mit einem kleinen Kondensator im Rückkopplungsweig für die implizite Funktionstechnik.

Die Gleichrichterefunktion könnte auch mit einem Vergleichere und schaltbarem Koppler erzeugt werden; sie ist aber einfach zu realisieren und sicher ohne Diskontinuitäten.

Der Vergleichere hat eine kleine Hysterese von 1% , damit stabile Vergleichsergebnisse erreicht werden. Dies ist insbesondere wichtig, wenn der Eingang eines Integrierers abgeschaltet wird, dessen Ausgang direkt mit dem Vergleichere verbunden ist.

Pins 3 und 4 geben ein digitales Ausgangssignal für negatives bzw. positives Ergebnis und sind nur in Verbindung dem Betrieb als Vergleichere verwendbar. Der Ausgangs-FET könnte entfallen, da die Koppler Dioden und MOS-FET am Eingang verwenden und daher mit dem vollen Hub des Operationsverstärkers betrieben werden. Da aber der Inverter ohnehin sinnvoll ist, ist der Zusatzaufwand für den MOS-FET gering. In der Vollversion wird der Ausgang, wenn die Betriebsart *Vergleichere* gewählt ist, auch auf den positiven bzw. negativen Digitalausgang umgeschaltet; dieser Zusatzaufwand ist hier nicht sinnvoll.

Schaltung:



In den Schemata wird das Symbol ohne invertierende Kreise angezeigt; der Ausgang für eine Eingangssumme >0 wird auch so bezeichnet; dies ist das Signal DoN im gezeigten Schaltplan.

Beim zweifachen Koppler kann auch durch eine Konfiguration +1 oder -1 als Eingang verwendet werden; dann wird der Eingang In2 nicht verbunden. Dafür ist kein eigenes Symbol vorhanden; anstatt auf dem Steckbrett eine Verbindung zu legen, wird der Konfigurations-Stecker gesetzt.

Integrierer

Der Integrierer ist von 1/sec auf 100/sec umschaltbar.

Pin 3 ist ein Stromeingang für einen extern bestimmten Anfangswert; Pin 4 ist ein digitaler Eingang, um den Anfangswert während einer Rechnung einzustellen oder den Integrierer als Halteschaltung zu benutzen.

Der Anfangswert kann über ein Potentiometer mit etwa 5% Genauigkeit bestimmt werden, der aus den $\pm 15V$ Versorgungsspannung gewonnen wird und auf positive oder negative Werte umgeschaltet werden kann. Dieser Wert wird zu dem Stromeingang für den Anfangswert addiert und kann durch Einstellung auf Null deaktiviert werden. Würde das Potentiometer an +15V und an -15V gelegt, wäre kein Umschalten notwendig, aber ein Schalter zum Abschalten, da die Mittelstellung zum Deaktivieren nicht definiert ist. Zudem wäre die Einstellgenauigkeit halbiert.

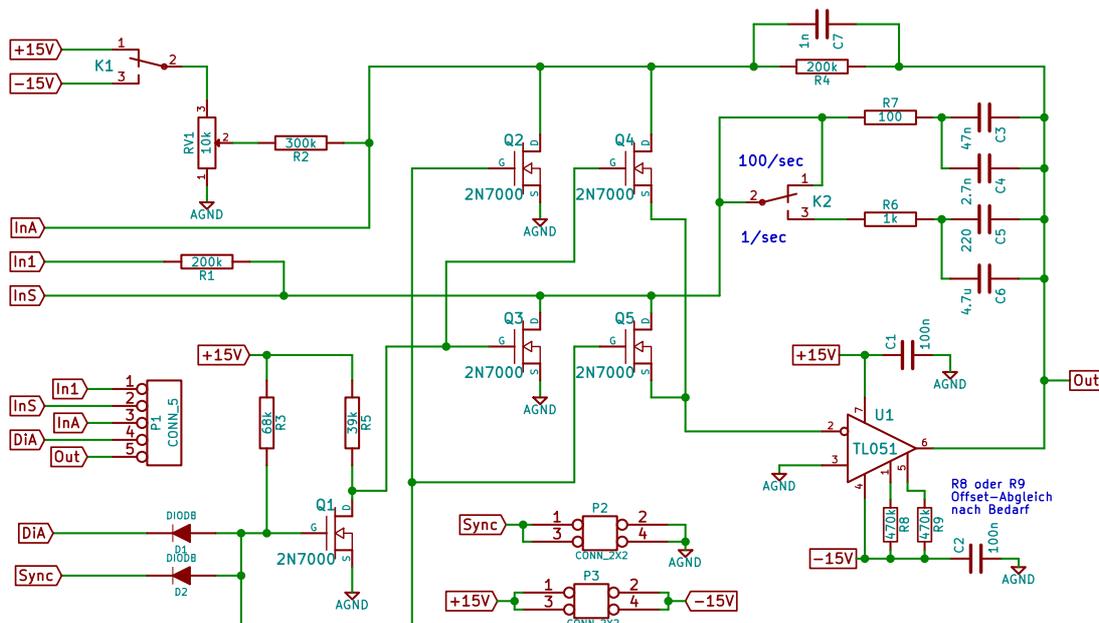
Für die Einstellung des Anfangswerts wird eine schnelle Schaltung verwendet, bei der der Kondensator zwischen Ausgang des Operationsverstärkers und Masse liegt. Die Einstellzeit beträgt weniger als 10ms im Bereich 1/sec für alle Ausführungen und weniger als 1ms für Varianten mit erhöhtem Ausgangsstrom. Damit kann der Integrierer als Speicher verwendet werden; ein spezielles Rechelement dafür wird nicht benötigt. In diesem Fall sind die Eingänge der Pins 1 und 2 offen zu lassen.

Die Drift bei Eingang Null beträgt weniger als 0.05/sec.

Der Integrationskondensator hat eine Toleranz von weniger als 1%; er wird aus zwei selektierten Kondensatoren zusammengesetzt.

Als Operationsverstärker ist meist ein TL051 ausreichend; alternativ kann ein AD711 oder AD820 eingesetzt werden.

Schaltung:



Multiplizierer

Es wird ein Steilheitsmultiplizierer AD633 verwendet.

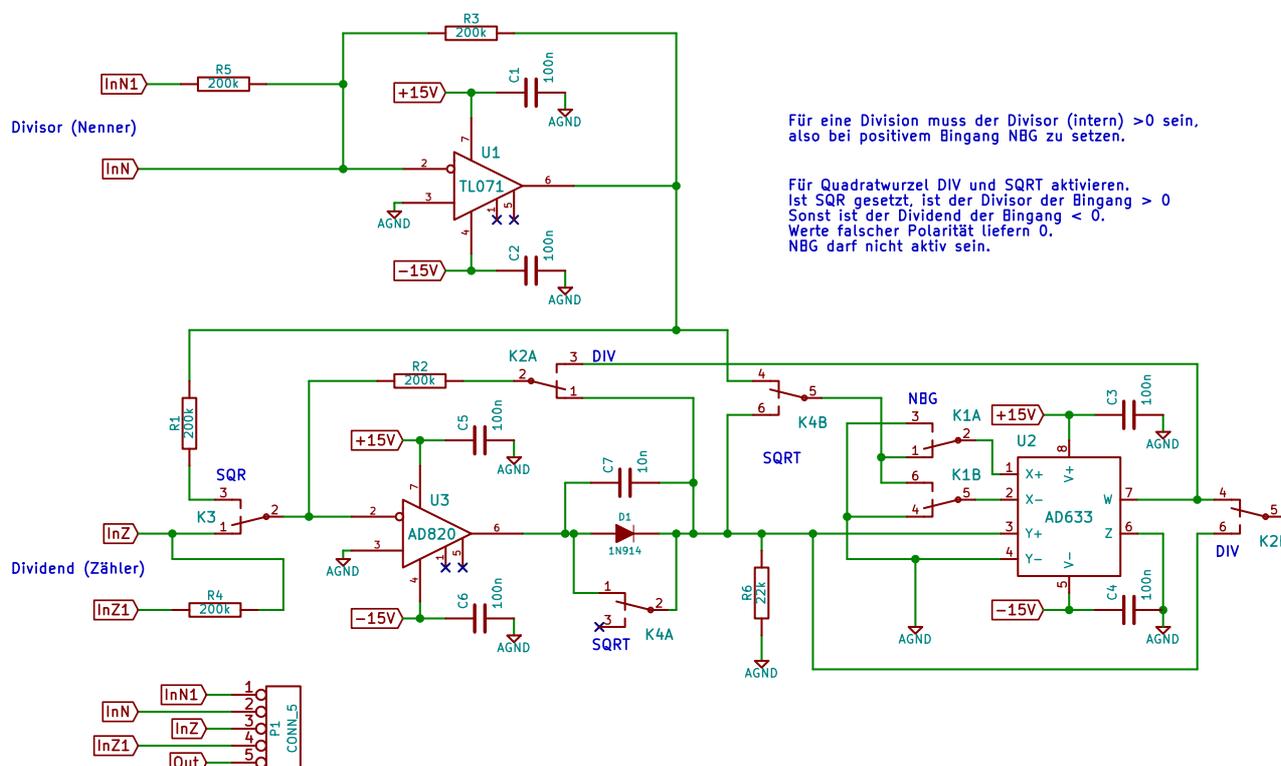
Pin 1 und 2 sind Spannungs- und Stromeingang für den ersten und Pin 4 und 3 (Achtung: Pin 4 ist Spannungseingang) entsprechend für den zweiten Faktor; Pin 5 ist der Ausgang.

Der Modul kann als Multiplizierer, Dividierer, Quadrierer und Wurzelzieher konfiguriert werden; zudem kann das Vorzeichen umgekehrt werden.

Im Betrieb als Dividierer sind Pin 1/2 der Nenner (Divisor) und Pin 3/4 der Zähler (Dividend).

Codes sind M, Q, D und W oder R für Multiplizierer, Quadrierer, Dividierer und (Quadrat-) Wurzel (bzw. *root*), mit einem angehängten Minus für die Negation.

Schaltung:



Bei einer neuen Version wird der Multiplizierer — in Anlehnung an die Vollversion — einen Faktor nur als Spannungseingang bereitstellen; dieser soll immer mit dem Ausgang eines unmittelbar daneben liegenden Integrierers oder Summierers verbunden werden. Dies könnte bei einer Division der Divisor (Nenner) sein, da vermutlich ein Dividend mit mehreren Termen häufiger ist.

Den Multiplizierer dann auch als Summierer konfigurierbar zu machen, ist wegen der leichten Austauschbarkeit und des geringen Preises der Operationsverstärker in der Mini-Version nicht sinnvoll.

Faktorkoppler

Ein Faktorkoppler, kurz Koppler, wandelt eine Spannung einer Spannungsquelle im Bereich $\pm 10V$ in einen Strom $\pm 50\mu A$ in eine Stromsenke mit einem einstellbaren konstanten Faktor um.

Die einfachste Version verwendet ein Potentiometer (10k Ω) mit einem Widerstand (200k Ω) vom Schleifer zum Ausgang; der Linearitätsfehler durch die Belastung liegt dabei bei maximal 0.75% bei einer Einstellung von 0.67 (siehe <http://rclab.de/analogrechner/potentiometerbelastung>).

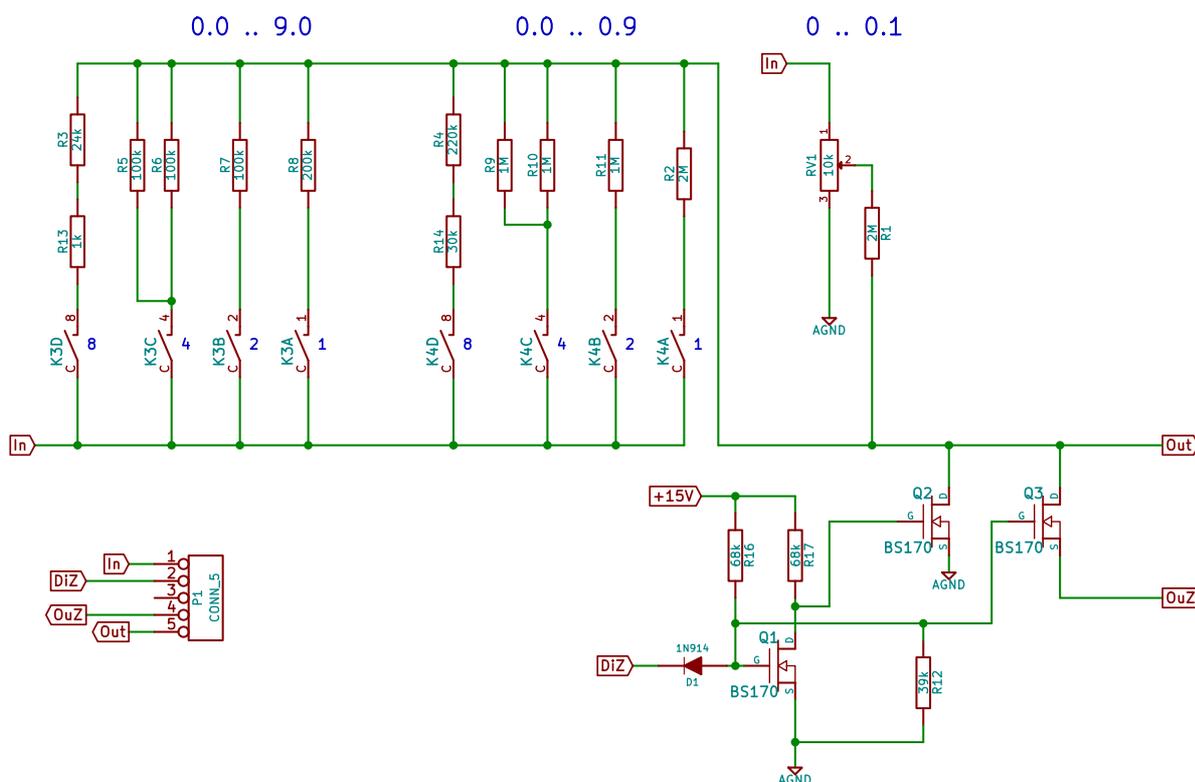
Weil der Ausgang immer an einen Stromeingang angeschlossen wird, ist der Faktor unabhängig von der Anzahl der angeschlossenen Koppler; damit entfällt das Einstellen der Potentiometer in der Schaltung vollständig; es ist aber auch nicht — wie bislang gewohnt — möglich, durch Antasten mit einem Spannungsmesser den Ausgangswert zu bestimmen.

Zehngang-Potentiometer werden, nicht nur aus Platzgründen, nicht auf Moduln bereitgestellt und müssen, wenn benötigt, über eine Übergabe-Schnittstelle angeschlossen werden. Dort kann auch ein Pufferverstärker verwendet werden, um die Nichtlinearität durch Belastung abzuwenden, da deren Skala ja vorgegeben ist.

Weiterhin haben einige Koppler einen Anlogschalter am Ausgang, mit dem er während der Rechnung abgeschaltet werden kann. Hierzu dient ein von einem als Vergleichler geschalteten Summierer erzeugtes Signal.

In den digital konfigurierbaren Bus-Varianten werden multiplizierende Digital-Analogwandler eingesetzt; entweder als integrierte Schaltungen oder mit einem Relais pro Bit, wie es in den Standard-Kopplern der Mini-Version gezeigt wird.

In denen werden die Ziffern vor und nach dem Komma digital, und die zweite Stelle nach dem Komma durch ein Potentiometer kontinuierlich eingestellt. Da ein Potentiometer mit einer kleinen Skala eine Einstellgenauigkeit von 1/20 der Skala hat, können Faktoren zwischen 0.00 und 9.99 mit einer Genauigkeit von 0.005, d.h. 0.5% bezogen auf die Maschineneinheit, eingestellt werden:



Der Spannungseingang liegt auf Pin 1 und der Stromausgang auf Pin 5.

Der Standard-Koppler hat einen Ausgangsschalter, der durch Pin 2 gesteuert wird; der gesteuerte Ausgang ist Pin 4. Wird Pin 4 verwendet, muss Pin 5 frei bleiben. (Pin 5 wird, wenn das digitale Eingangssignal aktiv wird, auf Masse gelegt und schließt damit den Stromeingang eines angeschlossenen Operationsverstärkers kurz, der damit je nach Offset-Spannung in die Begrenzung geht.)

Schaltungs-Details

Operationsverstärker-Auswahl

Für eine angestrebte Gesamtgenauigkeit von 1% sollten die einzelnen Fehler nicht wesentlich über 1‰ liegen, damit sich Toleranzen nicht zu schnell addieren können.

Summierer

Die Offsetspannung sollte 1‰ von 10V, also 10mV nicht überschreiten, weil bei der normalen Beschaltung mit gleichem Ausgangswiderstand der Koppler zum Rückkopplungswiderstand (beide 200kΩ) die Offsetspannung gleich dem Fehler am Ausgang ist. Da jedoch ein Koppler mit einem Faktor 10 einen Ausgangswiderstand von 20kΩ hat, erscheint die Offsetspannung mit dem Faktor 10 am Ausgang, so dass diese nicht über 1mV liegen sollte.

Nach Datenblatt ist daher beim TL071 (TL081) mit typisch 3mV, maximal 15mV die mögliche Offset-Kompensation erforderlich. Da ein Trimpotentiometer unabsichtlich verstellt werden kann (und eine Versuchung, dies zu tun, darstellt), sind zwei (SMD-) Widerstände von den Kompensations-Pins gegen -15V vorgesehen, von denen dann gegebenenfalls einer bei der Herstellung mit einem Widerstand bestückt wird. Um die Offset-Spannung zu bestimmen, wird der Stromeingang über 220Ω an Masse gelegt; eine Anzeige von 0.1 = 1V bedeutet dann einen Offset von 1mV. Darunter ist eine Offset-Kompensation nicht notwendig. Meist reicht hier ein 470kΩ Widerstand (Pin 1 bei positivem Ausgang, sonst Pin 5), um die Offsetspannung um 1mV auf weniger als 1mV zu reduzieren.

Wird statt dessen der TL051 mit 0.6mV/1.5mV verwendet, ist die Offset-Kompensation nicht notwendig. (Allerdings ist der TL051 in SMD-Ausführung weniger leicht erhältlich.) Demgegenüber stellt der erheblich teurere AD820 mit 0.4mV/2mV Offsetspannung keine wesentliche Verbesserung da; seine geringerer Eingangsstrom und die Rail-to-Rail-Eigenschaft werden hier nicht benötigt.

Ferner sollte der Eingangsstrom 1‰ des maximalen Querstroms von 50μA, also 50nA, nicht übersteigen, was aber von allen modernen FET-Operationsverstärkern weit unterschritten wird (ausgenommen sind damit der 741 und der OP27).

Integrierer

Beim Integrierer hat die Offsetspannung den Effekt, dass die Ausgangsspannung im Laufe der Zeit driftet. Wird ein Potentiometer mit 200kΩ Ausgangswiderstand an den Stromeingang gelegt, so bewirkt ein Offset von 1mV einen Strom von 5nA, also ein 10⁴stel des Eingangsstroms für 1/s. Das bedeutet in 100sec eine Drift von 1%, die selten stören dürfte. Somit kann auch hier der TL051 verwendet werden; der Einsatz eines AD820 ist nicht notwendig.

Durch dieselbe Einrichtung wie beim Summierer kann die Offsetspannung reduziert werden; hierzu wird der Stromeingang für den Anfangswert bei auf Null gestelltem Poti verwendet.

Das Umladen des 5μF-Integrationskondensators mit 20V erfolgt beim TL051 mit mehr als 10mA, so dass die Ladezeit weniger als 10ms beträgt. Für die Verwendung als Halteschaltung kann das zu groß sein. Daher sind zwei Bipolar-Transistoren vorgesehen, die von einem 100Ω Widerstand im Ausgang angesteuert werden, wenn der Ausgangsstrom größer als 6mA wird. Als Kurzschlusschutz sind 150Ω Widerstände zu den Betriebsspannungen vorhanden, so dass die Umladezeit unter 1ms liegt.

Eine kapazitive Last gegen Masse am Ausgang kann zu Schwingungen führen; dies betrifft insbesondere das Setzen des Anfangswerts bzw. die Haltefunktion. Der 100Ω-Widerstand am Ausgang hat hier bereits eine dämpfende Funktion. Zudem wird dem 200kΩ-Widerstand in der Rückkopplung bei der Anfangswerteinstellung ein Kondensator von 1nF parallelgeschaltet. Zudem wird in Serie mit dem 5μF-Kondensator ein Widerstand von z.B. 1kΩ geschaltet werden, der dann

allerdings auch im Rechenbetrieb wirksam ist und bei einem Eingangstrom von $50\mu\text{A}$ einen Spannungsabfall von 50mV (0.5%) bewirkt. Sollte es durch längere (induktive) Verbindungen zwischen dem Ausgang und dem invertierenden Eingang zu Schwingungen kommen, kann ein Kondensator mit 47pF direkt am IC den Ausgang auf den Eingang rückkoppeln.

Die Drift des Integrierers ohne Eingangssignal liegt in der Einstellung von $100/\text{sec}$ bei $0,05/\text{sec}$, und bei der Einstellung $1/\text{sec}$ entsprechend kleiner.

Faktor-Koppler

Im Gegensatz zu den eigentlichen Rechenelementen gibt es in dieser Mini-Version mehrere Varianten, die sich auch in Belegung der inneren Pins 2 bis 4 unterscheiden. Die Varianten enthalten beispielsweise zwei Koppler auf einem Modul, um Steckplätze zu sparen, oder haben einen weiteren Ausgang mit konstantem Faktor 0.1.

Lediglich die Pins 1 und 5 sind bei allen Varianten gleich belegt; daher ist ein Austausch nur möglich, wenn nur diese benutzt werden.

Die Skalen der Potentiometer werden sollen einzeln ausgemessen und beschriftet werden, um eine gute Genauigkeit auch bei preiswerten Potentiometern zu erhalten.

Standard-Variante KS

Die Standard-Variante hat zwei digitale Einsteller mit je 10 Ziffern für die Stellen vor und nach dem Komma, sowie aus Preisgründen ein Potentiometer für die zweite Nachkommastelle, Schaltplan siehe oben. Da das Potentiometer eine Genauigkeit von 5% hat, aber nur $1/10$ Gewicht hat, ist dessen Genauigkeitsanteil 0,5%. Daher können auch Potentiometer mit kleinem Einstellrad verwendet werden.

Bei den digitalen eingestellten Faktoren werden 1‰-Widerstände verwendet. Es sind maximal drei solche Widerstände in Betrieb, so dass der Maximalfehler für den Faktor 0.7 kleiner als 0.3% ist.

Da für die Faktoren >1 auch Widerstände mit 1‰ Genauigkeit verwendet werden, sind die eingestellten Widerstände besser als 3‰ genau. Da die Eingangswerte kleiner als der eingestellte Wert sind, ist die Genauigkeit auf den Ausgangswert zu beziehen; somit ist es nicht notwendig, geringer tolerierte Widerstände zu verwenden (so sie denn überhaupt verfügbar sind).

Ein- und Ausgang liegen auf Pin 1 und 5 (von links gezählt).

Pin 2 ist der Schalteingang zum Abschalten des geschalteten Ausgangs von Pin 4; dann ist Pin 5 offen zu lassen.

Pin 3 ist nicht belegt.

Einige Ausführungen verwenden BCD-Codierschalter, die mit einem Schraubendreher zu betätigen sind. Dies ist weniger störend als zunächst angenommen; diese Codierschalter sind wesentlich einfach beschaffbar als solche mit Achse oder Codierschalter mit Tasten.

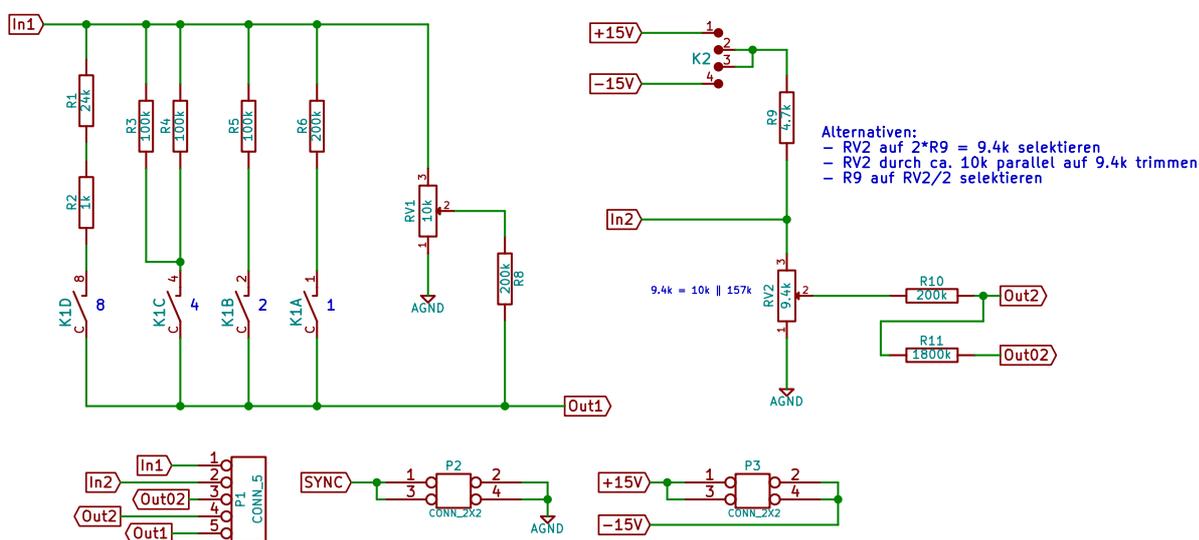
Doppel-Variante: KD

Es befinden sich zwei (nicht geschaltete) Koppler auf einer Trägerplatte.

Der erste Koppler für Faktoren bis 10.0 verwendet einen BCD-Codierer für die Stelle vor dem Komma, und ein Potentiometer für den Bereich nach dem Komma; somit ist die Genauigkeit ungefähr 5% (bezogen auf den Einheitswert 1.0), wenn das Potentiometer nicht auf Null steht. Pin 1 und 5 sind Ein- und Ausgang des ersten Kopplers.

Der zweite Koppler für Faktoren bis 1.0 verwendet nur ein Potentiometer. Pin 2 und 4 sind Ein- und Ausgang des zweiten Kopplers. Alternativ zu Pin 4 kann Pin 3 als Ausgang mit einem Zehntel Gewicht, also bis 0.1, verwendet werden. Dies wird durch den Text **10* kleiner unterhalb des nominellen Wertes angezeigt, der zu lesen ist als *Zehnfaches auf Skala einstellen*.

Schaltung:



Weiterhin kann der Eingang Pin 2 frei gelassen werden und statt dessen der Wert ± 1.0 aus der Betriebsspannung verwendet werden. Damit wird zwar die reduzierte Genauigkeit der Betriebsspannungen verwendet; es werden aber die Verbindungen zu den Werten für +1 und -1 nicht benötigt. Häufig wird damit ein Vergleichs- oder Gleichrichter einfacher einsetzbar.

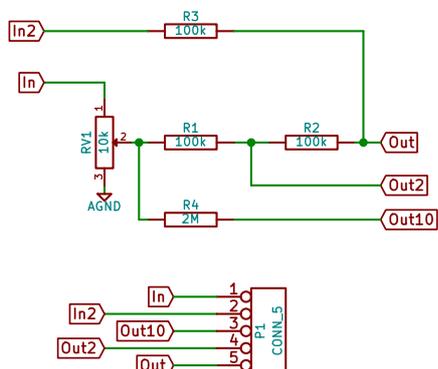
Ein Austausch mit einem Standard-Koppler ist nur dann möglich, wenn kein Ausgangsschalter benötigt wird, weil die Belegung von Pin 2 bis 4 unterschiedlich ist.

Es werden Potentiometer mit großen Einstellrädern verwendet, um die Einstellung zu erleichtern. Zwar kann für jedes Poti ein Testpunkt bereitgestellt werden, an dem die Spannung gemessen werden kann; der Faktor ist jedoch nur durch Division durch den Eingangswert ermittelbar.

Linearpoti-Variante KL

In der Normalbeschriftung zwischen Pin 1 und Pin 5 ist es ein einfaches, als Linear- oder Schieberegler ausgebildetes Potentiometer für Faktoren zwischen 0.0 und 1.0 mit etwa 3% Genauigkeit.

Dabei wird folgende Schaltung verwendet:



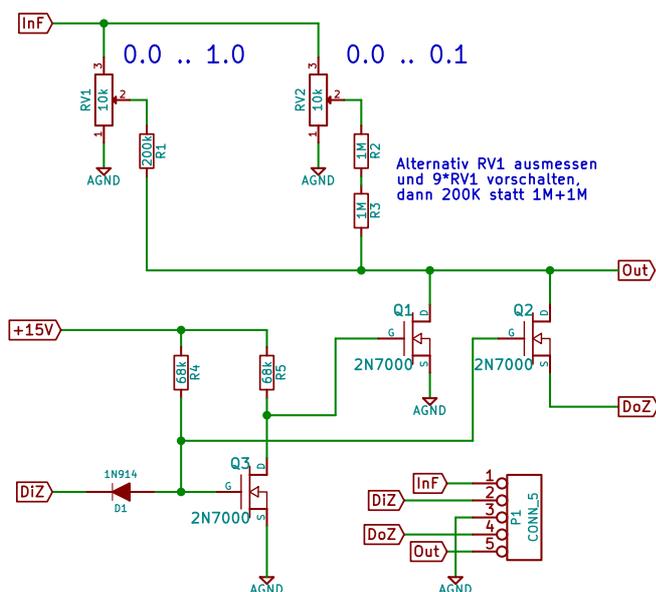
An Out10 (Pin 3) liegt der Wert mit dem Faktor 1/10, an Out2 (Pin 4) mit dem Faktor 2 an.

Wird In an +1 und In2 an -1 gelegt, dann kann an Out2 eine kontinuierlich einstellbare Konstante im Bereich von -1 bis +1 entnommen werden.

Ein Austausch mit einem Standard-Koppler ist nur dann möglich, wenn kein Ausgangsschalter benötigt wird, weil die Belegung von Pin 2 bis 4 unterschiedlich ist.

Grob-Fein-Variante KG

Hier können über einfache Potentiometer zwei additive Faktoren in den Bereichen bis 1.0 und bis 0.1 eingestellt werden, die addiert werden:



Normalerweise sollte entweder das erste Poti für den Bereich bis 1.0 (mit 5% Genauigkeit) verwendet und das zweite auf Null gestellt werden. Oder es wird das erste auf Null und mit dem zweiten ein Wert bis 0.1, dann mit 0.5% bezogen auf den Rechenbereich, eingestellt werden.

Die — ursprünglich als vorteilhaft angesehene — Addition beider Werte ist selten sinnvoll, da die Genauigkeit durch das erste Poti bestimmt wird. Allenfalls wenn eine geringe Variation des Faktors erprobt werden soll, ist eine Kombination beider Werte sinnvoll.

Die Ersparnis eines Schalters durch ein zweites Poti ist daher keine gute Lösung, die hier nur der Vollständigkeit halber beschrieben wird.

Eingang ist wie üblich Pin 1 und Ausgang Pin 5.

Ein Ausgangsschalter wird über Pin 2 gesteuert und wirkt auf Pin 4; Pin 5 sollte dann nicht benutzt werden.

Die Pinbelegung ist die gleiche wie des Standard-Kopplers (gleichfalls mit Ausgangsschalter). Pin 3 ist frei zu lassen.

Externe Koeffizienten

Andere Koeffizienten wie Zehngang-Potis oder Funktionsgeber müssen über einen Schnittstellen-Modul angeschlossen werden; ein Ausgangs-Schalter ist dann nicht vorhanden.

Schnittstellen

Für die externe Ein- und Ausgabe von Rechenwerten gibt es Schnittstellen-Moduln, die den Anschluss von weiteren Boards oder externer Elemente mit Spannungsschnittstelle erlauben, insbesondere einstellbare Funktionsgeneratoren oder 10-Gang Potentiometer, Plotter usw.

Schnittstellen verhalten sich wie Koppler, d.h. sie haben einen Spannungs-Eingang (Pin 1) und einen Strom-Ausgang (Pin 5), der mit einem Faktor versehen ist. Es sind keine aktiven Bauelemente notwendig, wenn die externen Spannungsquellen niederohmig sind und eine Belastung — insbesondere mit einem 10k Ω -Potentiometer — zulassen. Andernfalls ist ein Pufferverstärker vorgesehen.

In der Mini-Version gibt es zwei Schnittstellen pro Modul, einer gepufferten und einen ungepufferten. Die ungepufferte hat ein 10k Ω -Potentiometer und einen zusätzlichen Zehntel-Ausgang.

Für die externen Geräte sind je ein dreipoligen Steckverbinder vorhanden; (Ausgang, Masse und Eingang, vom Rechner aus gesehen) jeweils als Spannungen im Bereich $\pm 10V$.

Externe Ein- und Ausgänge enthalten Schutzwiderstände von 10 Ω und Dioden gegen die Betriebsspannung als elementare Schutzmaßnahme.

Wird ein Mehrgang-Potentiometer mit 10k Ω Querwiderstand an den gepufferten Aussen-Eingang angeschlossen, so ist der Fehler (durch den Eingangswiderstand von 1M Ω) 1.5‰ bei 2/3 des Endwerts bei einer Einstellauflösung von 2‰.

Grundsätzlich könnte sich eine Schnittstelle auch wie ein Funktor (Rechenelement) verhalten, d.h. mit einem Stromeingang und einem Spannungsausgang. Da bei der optimierten Vollversion die Busleitungen den Funktoren fest zugeordnet sind und die Anzahl der benötigten Schnittstellen ähnlich der Anzahl der benötigten Koppler je nach Rechenaufgabe unterschiedlich ist, wird eine Schnittstelle als Rechenelement nicht als sinnvoll angesehen.

Platinen-Layouts

Die Mini-Version hat Leiterbahnen auf der Unterseite (*Single Sided Bottom*, SSB).

Sie eignet sich für Eigenproduktion; allerdings sind die Kontakte zum Steckbrett diffizil einzulöten und weniger robust in Bezug auf eine Zugbelastung beim Herausziehen. Die meisten Bauelemente sind Durchloch-Version; aus Platzgründen sind einige Widerstände und Kondensatoren in SMD auf der Unterseite ausgeführt. Auf der Oberseite sind wenige kurze Drahtbrücken vorhanden.

Bei industrieller Fertigung mit Durchkontaktierungen sind die Kontakte zum Steckbrett besser einlötfar, sowie Steckbrücken und Potis stabiler befestigt.

Anstelle einer Leiterplatte kann auch doppelseitige Lochrasterplatte mit Fädeldraht verwendete werden.

Eine Version mit Leiterbahnen auf der Oberseite (*Single Sided Top*, SST) hätte bei einer Eigenproduktion den Vorteil, dass die Kontakte zum Steckbrett besser einzulöten sind. Dafür sind die Konfigurations-Schalter, gleich ob mit Steckbrücken oder SMD-Umschaltern, mit dem Kupfer auf der Oberseite befestigt und damit wenig robust befestigt. Die Verwendung von weiteren SMD-Bauelementen würde Bohrungen in der Eigenproduktion sparen, aber nur dann, wenn die Schalter als CMOS und beide IC als SMD-Versionen verwendet werden.

Anhang

Verbindungstabellen

Für einige Beispiele werden die Verbindungen tabellarisch für die optimierte Version angegeben. In der optimierten Version hat jeder Funktor zwei integrierte Koppler. Einer davon verbindet mit dem Faktor 1 mit dem vorigen Funktor, der andere mit einem einstellbaren Faktor mit dem Ausgang eines beliebigen anderen Funktors (Spannungs-Bus). Weitere Verbindungen erfolgen über freie Koppler, die zudem schaltbar sind.

In den folgenden Verbindungstabellen stehen die Spalten für die Ausgänge der Funktoren und die Zeilen für deren Eingänge. Zusätzliche Zeilen werden für die freien Funktoren verwendet. Die Verbindung mit dem Faktor mit dem vorigen Koppler wird durch eine einzelne Ziffer 1 angezeigt, während der zweite einstellbare Eingang einen Dezimalpunkt verwendet. In den Zeilen der freien Koppler steht der Faktor in der Spalte des Eingangs des Zielkopplers und die Ziffer 1 ohne Dezimalpunkt in der Spalte In der Kopfzeile werden die Eingänge der Moduln angegeben, in der ersten Spalte die Ausgänge. An einem Kreuzungspunkt steht der entsprechende Faktor. Eine +1 oder -1 in der ersten Zeile steht für die Konstante 1.

Ob der Input- oder Output-Koppler benutzt wird, wird vor dem Faktor notiert: ein Pfeil nach rechts (→) zeigt an, dass der Output, ein Pfeil nach unten (↓), dass der Input-Koppler verwendet wird. Dann darf pro Zeile nur ein Pfeil nach rechts und pro Spalte nur einer nach unten verwendet werden. Die Konstanten +1 und -1 können nur von dem Input selktiert werden. Ein Fragezeichen vor dem Faktor zeigt an, dass er geschaltet wird; bei dem steuernden Funktor steht dann ein Ausrufezeichen (!). Da in der optimalen Version nur die selektiven Eingängen geschaltet werden können, sind diese Zeichen einem Pfeil nach unten gleichwertig.

Die Funktoren werden mit einer Platznummer gefolgt von einem I für Integrierer, M für Multiplizierer und S für Summierer angegeben. Beim Summierer kann noch ein Modifizierer folgen: > und < für Gleichrichter mit positivem bzw. negativem Ausgang

(Dioden-Dreieck), + und - für Vergleiche mit aktivem Signal, wenn der Ausgang positiv bzw. negativ ist. Der Betrieb als Nullsetzer (offener Verstärker) wird durch ^ angezeigt. Beim Multiplizierer sind das: D für Division, Q für Quadrieren und W (oder R) für die Wurzel.

Bei einem Multiplizierer, der nicht quadriert oder wurzelt, wird immer der Ausgang des davorliegenden Funktors — der ansonsten als Faktor-1 Summand verwendet werden kann — als erster Operand (Dividend, Zähler) genommen; gegebenenfalls ist das ein Summierer, dessen Ausgang nicht beschaltet ist.

Dreieck-Generator

Spalte Output, Zeile Input

| | 1 | 2 | 3 | K1 | K2 |
|----|---|----|-----|-----|-----|
| 1 | | | 0.2 | | |
| 2S | 1 | | 0.2 | | |
| 3S | | | | 2.0 | 1.0 |
| K1 | | >0 | | -1 | |
| K2 | | | | | +1 |

Zeile Output, Spalte Input

| | 1 | 2 | 3 | K1 | K2 |
|----|-----|-----|-----|----|----|
| 1I | | 1 | | | |
| 2S | | | | >0 | |
| 3S | 0.2 | 0.2 | | | |
| K1 | | | 2.0 | -1 | |
| K2 | | | 1 | | +1 |

Sinus mit Gleichrichter

| | 1 | 2 | 3 | 4 | K1 |
|----|---|------|---|------|----|
| 1I | | 1 | | | |
| 2I | | | 1 | | |
| 3S | 1 | 0.02 | | 1 | |
| 4S | | 0.6 | | | |
| K1 | | | | 0.75 | -1 |

Lorenz-Attraktor

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----|---|------|-----|-----|-----|
| 1I | 1 | 1 | | 1 | 2.8 |
| 2M+ | | | 1.5 | | |
| 3I | | 0.27 | 1 | | |
| 4M- | | | | 0.1 | 6.0 |
| 5I | 1 | 1 | | | 0.1 |
| K1 | | | | | |

Mondlandung

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----|-----|-------|----|---|---|
| 1I | | →0.25 | | | |
| 2I | | | →1 | | |
| 3S> | →10 | | | | |

| | | | |
|-----|--------|-------|----|
| 4I | | | →1 |
| 5S+ | ±0.2 | ±0.13 | ! |
| -1 | ↓0.032 | | |

Es gibt in der dargestellten Form ein Konflikt für die Vollversion, da ein schaltbarer und ein mit ± 1 konfigurierbarer Eingang für den ersten Integrierer benötigt werden. Dies liegt aber daran, dass der Eingang vom Schieberegler ungepuffert ist; in Vollversion würde hier ein Schnittstellenverstärker verwendet, der sein Signal auf jeden Strombus (mit einem einstellbaren) Faktor legen kann.

Lorenz-Attraktor

folgt

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.; Tsvividis, Y.: *A VLSI analog computer/digital computer accelerator*. IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 41, no. 1, pp. 42-53 (2006)

¹Siehe auch [[CowanMT](#)]

²Der Schul-Analogrechner FEoLL-Anre der Univ. Paderborn hat statt dessen hinter jedem Potentiometer einen Pufferverstärker geschaltet, aber dennoch die Potentiometer nicht mit einer Skala versehen.

³Am besten, aber auch am teuersten, ist eine Ausführung, die die Einstellungen an der Frontplatte anzeigt und dort auch ändern kann, so dass eine vollständige Konfiguration auf Knopfdruck abgespeichert und geladen werden kann, beispielsweise durch Lesen und Stanzen von Lochstreifen oder Lochkarten.

⁴Im Gegensatz zu der klassischen Terminologie wird hier der Begriff Summierer, Multiplizierer und Integrierer benutzt, da ein Multiplikator der Faktor eines Produktes ist und ein Integrator bei irgendetwas eine Integration bewirkt.

⁵1966 kostete ein entsprechendes Kammrelais einzeln 12 DM, also (einmalig) 2700 DM; dazu kommt die Ansteuerung etc. Dafür kann dann der Rechner selbst innerhalb von kurzer Zeit für eine neue Berechnung konfiguriert werden, anstatt für Wochen für eine Aufgabe blockiert zu sein. Zudem kann auch noch nach Jahren eine Rechnung exakt reproduziert werden, ohne die konfigurierten Steckbretter archivieren zu müssen.