

De leugendetector

Jacco Dekkers

April 11, 2007

1 De elektronische componenten

In dit hoofdstuk beschrijven we de toepassing van een populaire bouwblok: de operationele versterker (opamp). Het elektrische symbool van de operationele versterker is gegeven in figuur 1.

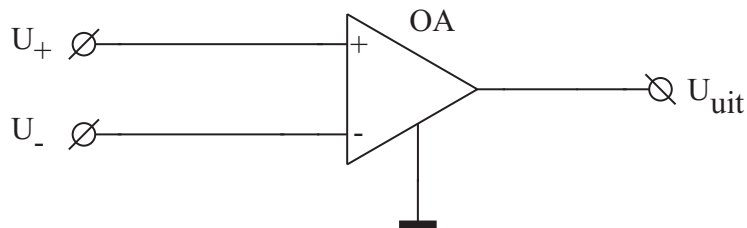


Figure 1: Elektrisch symbool voor de operationele versterker met een aarde aansluiting.

Zoals je ziet heeft de opamp twee ingangen: U_+ en U_- , en een uitgang: U_{uit} . Verder heeft de opamp ook altijd een verbinding met de aarde, maar die wordt meestal niet getekend.

De werking van de opamp kan beschreven worden door in een grafiek het verschil tussen de tweeingangsspanningen uit te zetten tegen de waarde van de uitgangsspanning. Dat ziet er uit als in figuur 2:

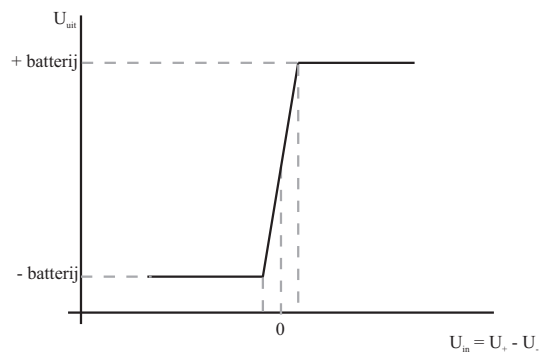


Figure 2: Uitgangs- versus ingangsspanning van een operationele versterker.

De opamp heeft twee belangrijke toepassingen: de eerste toepassing is het gebruik als **comparator** en de tweede toepassing is het gebruik als **signaalversterker**. Een kenmerkende grootheid van een signaalversterker is de spanningsversterking A_u . Dat is de ratio tussen uitgangsspanning en ingangsspanning, of in formulevorm:

$$A_u = \frac{U_{uit}}{U_{in}} \quad (1)$$

Hierbij kan een signaalversterker beschouwd worden als bouwblok met een ingang en een uitgang.

1.1 De comparator

In het kort komt de werking van de comparator er op neer dat de schakeling de twee ingangen vergelijkt met elkaar en aan de hand daarvan een groot uitgangssignaal of een klein uitgangssignaal afgeeft. Vaak wordt er bijvoorbeeld een referentiespanning aangeboden op de negatieve ingang en als het te vergelijken signaal groter in amplitude is dan de referentie, geeft de comparator een hoog uitgangssignaalniveau. Als het te vergelijken signaal kleiner is, is het niveau van het uitgangssignaal laag.

Voor de comparator functie strekt het werkgebied van de opamp zich dus uit van linksonder tot rechtsboven in de grafiek van figuur 2, maar beperkt zich tot de twee vlakke gebieden links en rechts. Voor de duidelijkheid is in figuur 3 in rood dit comparator werkgebied aangegeven.

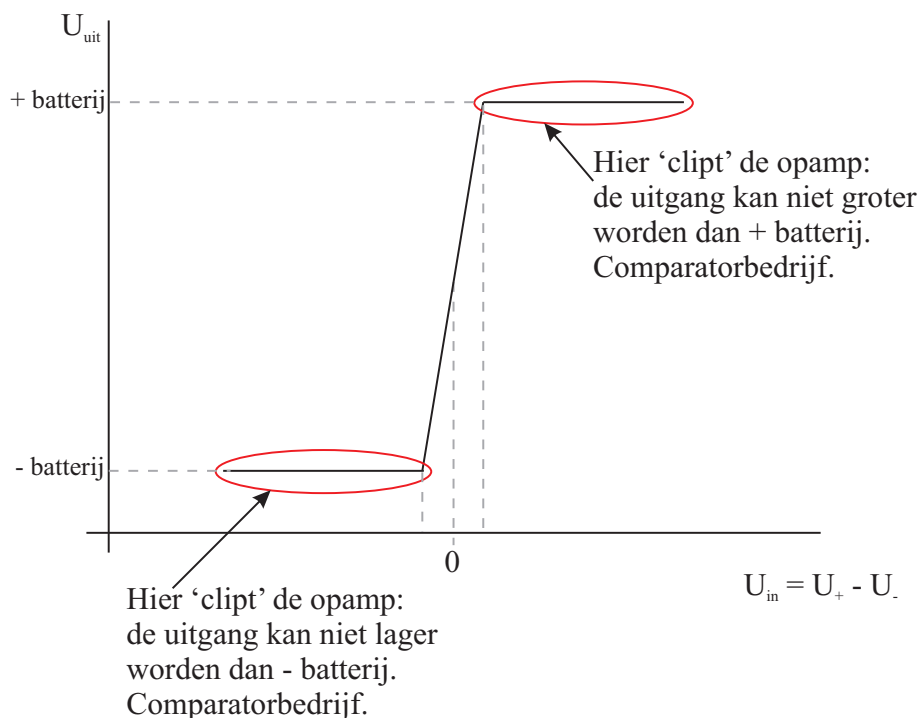


Figure 3: Uitgangs- versus ingangsspanning van een operationele versterker.

1.1.1 Een praktische implementatie van een comparator

Eigenlijk is een transistor al een soort comparator: als de basis-emitter spanning boven de 0,6 V stijgt, verandert de weerstand opeens enorm. Een klein probleem bij het gebruik van een enkele transistor als comparator is dat we de drempelwaarde niet vrij kunnen kiezen. We zitten namelijk vast aan het kleine gebiedje rond de 0,6 V basis-emitter spanning waarin de transistor steeds beter gaat geleiden. Het liefst wil je de drempelwaarde wel zelf kunnen kiezen, net zoals je bijvoorbeeld wilt dat temperatuur van je douchewater niet alleen goed geregeld is, je wilt ook nog zelf kunnen bepalen wat de waarde van die temperatuur is. Met de verbeterde comparator uit de figuur hieronder kan de drempelwaarde wel zelf ingesteld worden.

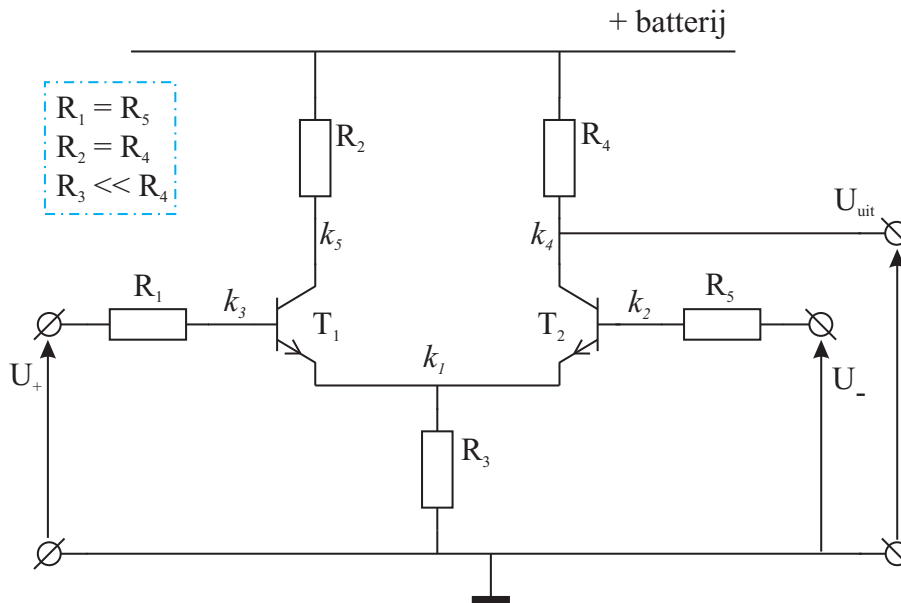


Figure 4: Schema van een praktische implementatie van een verbeterde comparator.

Stel, we beginnen met een toestand waarin de spanning op de + ingang ongeveer de helft van de voedingsspanning is, en de spanning op de - ingang bijna gelijk is aan nul Volt. Aangenomen dat er stroom I loopt door een van beide transistoren, zal op knooppunt k_1 een spanning staan gelijk aan $I \cdot R_3$. Omdat de - ingang bijna nul is, kan T_2 nooit de benodigde basis-emitter spanning van 0,6 Volt hebben om stroom te geleiden: de basis-emitter spanning is juist negatief. Daarom spert T_2 .

Transistor T_1 kan juist goed geleiden. Omdat de basisstroom maar heel klein is, staat er nauwelijks spanning over weerstand R_1 , zodat de spanning op de basis van T_1 nagenoeg gelijk is aan de spanning op de + ingang. Er loopt nu precies zoveel stroom door T_1 dat $I \cdot R_3$ gelijk is aan de spanning op de basis van T_1 min de basis-emitter spanning van 0,6 Volt. (Want de basis moet altijd 0,6 V hoger zijn dan de emitterspanning als de transistor geleidt.)

De uitgang van onze comparator zal nu gelijk zijn aan de voedingsspanning omdat T_2 spert, en er dus geen stroom door weerstand R_4 kan lopen (want dan staat er ook geen spanning over: $I \cdot R = 0$). Met andere woorden: als de + ingang hoog is en de - ingang is laag, dan is de uitgangsspanning gelijk aan de voedingsspanning.

Stel nu dat we de spanning op de - ingang langzaam gaan verhogen. Eerst zal er niets gebeuren, totdat de spanning op de basis van T_2 hoger wordt dan 0,6 V plus de emitterspanning van T_2 , want dan komt transistor T_2 in geleiding. Maar op het moment dat de basis-emitter spanning van T_2 gelijk is aan 0,6 Volt, is spanning op de - ingang precies gelijk aan de spanning op de + ingang omdat over de basis-emitter junctie van T_1 ook 0,6 Volt staat.

Als op de twee ingangen dezelfde spanning staat, dan zullen beide transistoren geleiden. De spanning op de uitgang van de comparator zal hierdoor dalen omdat de stroom door T_2 voor een spanning over R_4 zorgt. Bij verdere toename van de spanning op de - ingang zal bovendien de emitterspanning van T_2 mee omhoog getrokken worden, want de basis-emitter spanning kan nooit veel groter zijn dan 0,6 Volt. De stroom door R_3 neemt dan ook toe; er staat immers meer spanning over.

Wat gebeurt er dan met transistor T_1 ? Aangezien de spanning op de + ingang niet verandert, moet de basis-emitter spanning van T_1 wel afnemen, en daardoor zal de stroom door T_1 instorten: T_1 gaat sperren.

Samenvattend: De uitgangsspanning van de comparator is gelijk aan de voedingsspanning als de + ingang duidelijk groter is dan de - ingang, en is gelijk aan nul als de - ingang duidelijk groter is dan de + ingang. Als op beide ingangen ongeveer dezelfde spanning staat, dan verschijnt dat (kleine) spanningsverschil flink versterkt aan de uitgang.

1.2 De signaalversterker

We hebben nu twee van de drie werkgebieden uit figuur 3 gehad:

- de te vergelijken ingangsspanning is groter in amplitude dan de referentiespanning
- de te vergelijken ingangsspanning is kleiner in amplitude dan de referentiespanning

En deze twee situaties zijn dus van toepassing als de operationele versterker als comparator gebruikt wordt. De derde mogelijkheid is dat de ingangsspanning precies gelijk is aan de referentiespanning. Dan en slechts dan kunnen we de schakeling gebruiken als **signaalversterker**. Figuur 5 laat de drie werkgebieden zien. In rood is het reeds behandelde comparator werkgebied aangegeven en in groen het signaalversterker werkgebied.

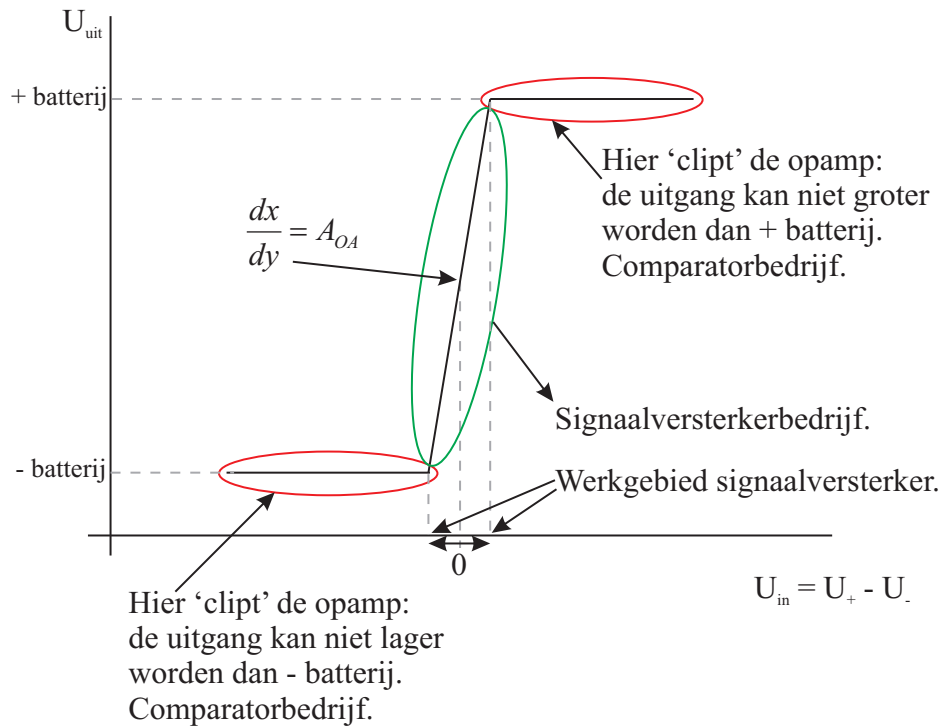


Figure 5: Uitgangs- versus ingangsspanning van een operationele versterker.

We spreken van een goede opamp als het werkgebied van het signaalversterkingsbedrijf klein tot zeer klein is. De richtingscoëfficiënt ($\frac{dx}{dy}$) is dan heel groot.

Om eenvoudig aan de versterkerschakelingen te kunnen rekenen, stellen we dat deze richtingscoëfficiënt oneindig is.

In de praktijk betekent dit dat de spanningsversterking van de operationele versterker oneindig hoog wordt. Met het heel groot zijn van deze spanningsversterking uit figuur 5 kunnen we een belangrijke voorwaarde aflezen op de x-as:

$$U_+ - U_- = 0 \quad (\text{stelling 1}) \quad (2)$$

Ofwel, de spanning die staat tussen de + en de - ingang is altijd nul. Stelling 1 impliceert tevens dat de stroom die loopt tussen deze twee nodes door de opamp ook nul moet zijn, er is immers geen potentiaalverschil. We vereenvoudigen dit verder tot de tweede stelling

$$I_+ = I_- = 0 \quad (\text{stelling 2}) \quad (3)$$

Verrassend is dat genoeg om de werking van de als signaalversterker geschakelde opamp te beschrijven: er loopt nooit stroom door de ingang, en de als signaalversterker geschakelde opamp zorgt er altijd voor dat de spanning op de uitgang zo aangepast wordt dat de spanning op de - ingang gelijk is aan de spanning op de + ingang. Door deze twee regeltjes samen met de wet van Ohm toe te passen kunnen we heel gemakkelijk rekenen aan de signaalversterker. Voor het bewijs dat de 2 stellingen toegepast mogen worden, verwijzen we naar bijlage A: vergelijkingen (22) en (24).



1.2.1 Enkele rekenvoorbeelden van signaalversterkers met een opamp als implementatie

We zullen aan de hand van de stellingen (vergelijking 2 en 3) nagaan wat de spanningsversterking is van enkele veel voorkomende schakelingen. Als eerste de **spanningsvolger**, zie figuur 6.

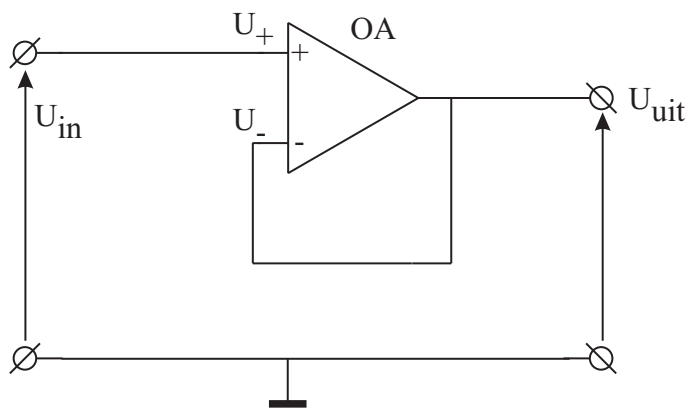


Figure 6: Een operationele versterker gebruikt als signaalversterker. Dit circuit heet de spanningsvolger.

We zien hier dat $U_{in} = U_{+}$. Als stelling 1 wordt toegepast, dan volgt daar direct uit dat

$$U_{-} = U_{in} \quad (4)$$

De spanning op deze node is gelijk aan de uitgangsspanning, ofwel

$$U_{uit} = U_- \quad (5)$$

En daar volgt dan weer uit dat we voor de spanningsversterking kunnen schrijven (zie vergelijking 1)

$$A_u = \frac{U_{uit}}{U_{in}} = \frac{U_{in}}{U_{in}} = 1 \quad (6)$$

Waardoor de naam spanningsvolger verklaard is: de uitgangsspanning volgt precies de ingangsspanning.

Een andere veel voorkomende configuratie is de **niet-inverterende versterker**, zie figuur 7.

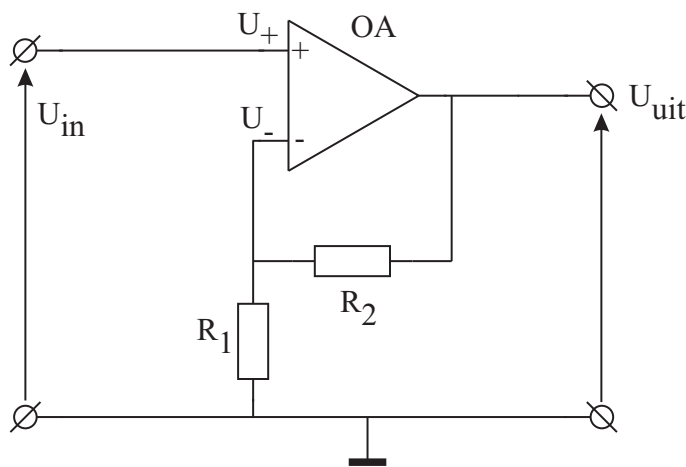


Figure 7: Een operationele versterker gebruikt als niet-inverterende versterker.

Net als bij de spanningsvolger is het zo dat $U_{in} = U_+$ en dat houdt tevens in dat

$$U_- = U_{in}, \quad (7)$$

omdat stelling 1 ook hier van toepassing is. De schakeling kan sterk vereenvoudigd worden tot het schema van figuur 8.

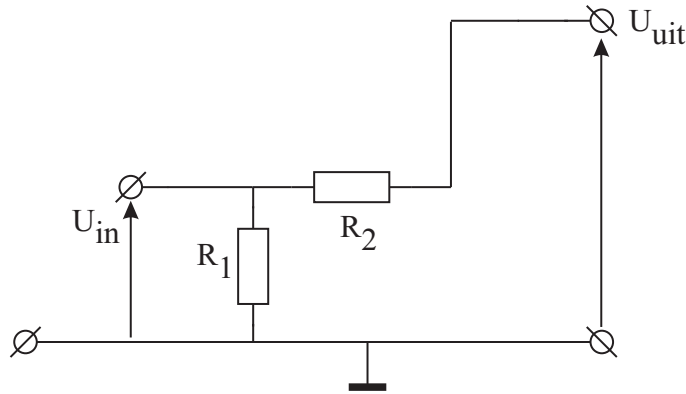


Figure 8: Vereenvoudiging niet-inverterende versterker.

Door toepassing van de wet van Ohm kunnen we een stroom I door weerstand R_1 berekenen,

$$I = \frac{U_{in}}{R_1} \implies U_{in} = I R_1 \quad (8)$$

Door toepassing van stelling 2 moeten we concluderen dat de stroom I niet door de opamp kan gaan en dus door weerstand R_2 moet gaan. De uitgangsspanning kunnen we als volgt schrijven

$$U_{uit} = U_{in} + I R_2 = I R_1 + I R_2 \quad (9)$$

, waardoor de spanningsversterking te schrijven is als

$$A_u = \frac{U_{uit}}{U_{in}} = \frac{I R_1 + I R_2}{I R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (10)$$

De spanning U_{in} wordt dus versterkt met de factor $\frac{R_2}{R_1}$, en verschijnt aan de uitgang. Tevens staat daarbij opgeteld U_{in} onversterkt op de uitgang.

Ten slotte kijken we naar de schakeling zoals deze gebruikt is in de leugendetector. Figuur 9 geeft deze schakeling weer.

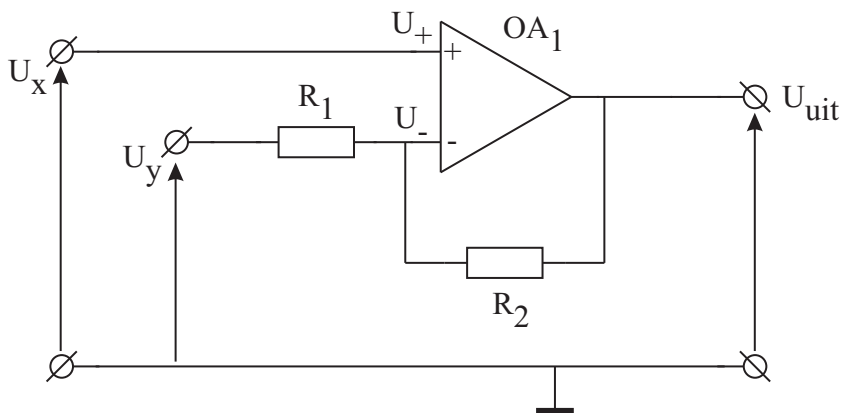


Figure 9: De signaalversterker zoals hij gebruikt is in de leugendetector.

Dit is een niet-inverterende versterker zoals in figuur 7, waarbij de - batterij aansluiting van R_1 is komen te vervallen. Hiervoor in de plaats bieden wij spanning U_y aan. Bij deze schakeling hangt de uitgangsspanning af van twee ingangsspanningen, U_x en U_y .

Door toepassing van stelling 1 kunnen we schrijven voor de spanning op de - ingang van de opamp

$$U_- = U_x, \quad (11)$$

Door toepassing van de wet van Ohm kunnen we de stroom door weerstand R_1 schrijven als

$$I = \frac{U_x - U_y}{R_1} \quad (12)$$

Dankzij stelling 2 moeten we concluderen dat deze stroom I door weerstand R_2 loopt. De spanningsval over deze weerstand is gelijk aan

$$IR_2 = \frac{U_x - U_y}{R_1} \cdot R_2 \quad (13)$$

De uitgangsspanning kunnen we schrijven als

$$\begin{aligned} U_{uit} &= U_y + IR_1 + IR_2 \\ &= U_y + U_x - U_y + \frac{U_x - U_y}{R_1} \cdot R_2 \end{aligned} \quad (14)$$

Na herschikking van de termen kunnen we de uitgangsspanning schrijven als

$$U_{uit} = U_x + \frac{R_2}{R_1} \cdot (U_x - U_y) \quad (15)$$

De verschilspanning $U_x - U_y$ wordt dus versterkt met de factor $\frac{R_2}{R_1}$ en verschijnt aan de uitgang. Tevens staat daarbij opgeteld de ingangsspanning U_x op de uitgang.

De schakeling bij figuur 9 is bij lange na niet het enige bruikbare circuit met een opamp en een paar weerstanden. Kijk bijvoorbeeld eens in Wikipedia naar de opamp. Daar staan allerlei basiscircuits met een opamp en enkele weerstanden.

1.2.2 Geïntegreerde circuits

De opamp met de twee toepassingen als comparator en signaalversterker zijn veel gebruikte schakelingen in de elektronica. Om die reden zijn er geïntegreerde circuits (IC's) gemaakt, die een comparatorfunctie en/of een versterkerfunctie realiseren. Dit type IC's werd al in de jaren '70 van de vorige eeuw geïntroduceerd.

Voor onze leugendetector gaan we onder andere gebruik maken van de LM324. Dit is een IC dat maar liefst 4 opamps bevat.

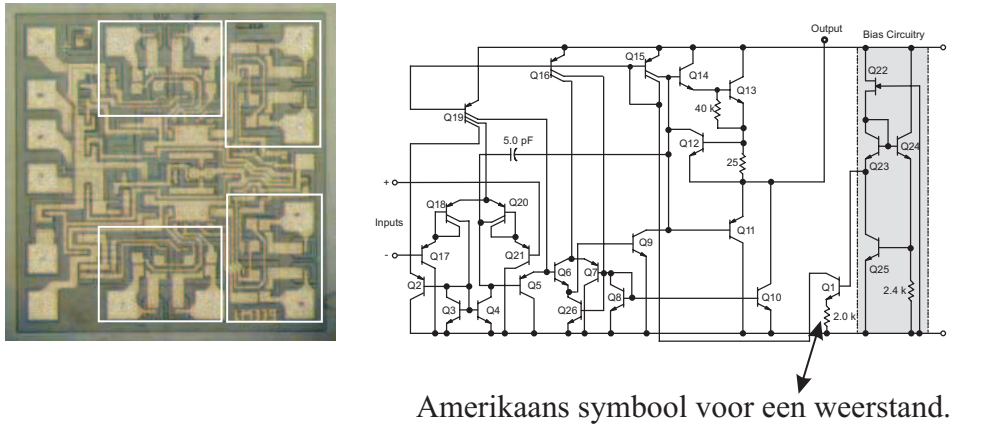


Figure 10: Chip lay-out en schema van een van de vier opamps van een LM324.

Je zult herkennen dat het linker deel van het IC heel erg lijkt op de comparator met twee transistoren die we eerder besproken hebben. Het belangrijkste verschil is dat in het IC PNP-transistoren gebruikt worden in plaats van NPN-transistoren, waardoor het hele schema op z'n kop staat. Als je de plus- en minvoedingen verwisselt, krijg je bijna onze comparator (zie figuur 4):

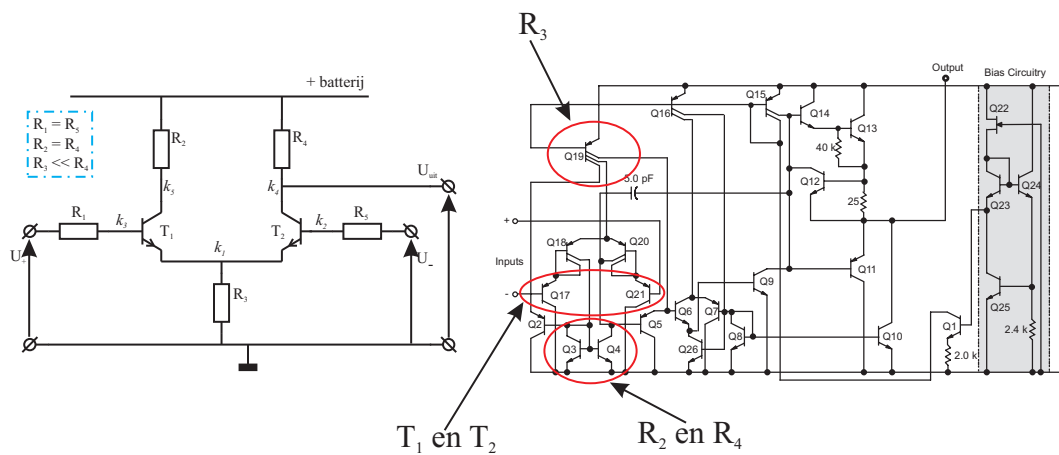


Figure 11: Ons schema van de comparator naast het schema van een LM324.

1.3 Vragen en opdrachten

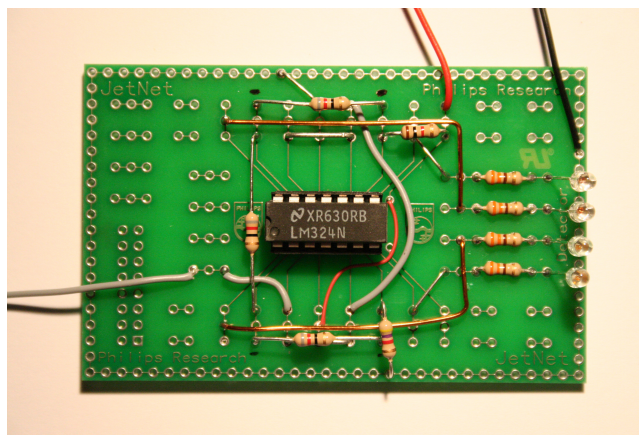
1. Bekijk de comparator uit figuur 4. Beschrijf in je eigen woorden wat er gebeurt als de spanning op de - ingang zakt.
2. Maak zelf een schema met een transistor en een paar weerstanden waarmee je een soort comparator maakt.
3. Zoek het schema op van een sommatoren zoals die met een opamp gemaakt kan worden. Laat zien dat je met de twee stellingen van een als signaalversterker geschakelde opamp

de formule zoals die op Wikipedia gegeven wordt, kunt berekenen. Waar zou je een sommatoren voor kunnen gebruiken?

2 Aanvulling voor het practicum

In dit hoofdstuk beschrijven we puntsgewijs een viertal onderwerpen die extra aandacht verdienen.

- Op bladzijde 29 van de lesbrief, hoofdstuk 5, staat in figuur 29 een fout. Het middelste plaatje is foutief en moet vervangen worden door onderstaande figuur.



- Het is gebruikelijk om de - batterij in schema's te vervangen door het symbool voor Ground (GND). In werkelijkheid is deze node dus de - batterij aansluiting. Ofwel,

$$\perp = \text{- batterij}$$

Figure 12: Het symbool voor Ground of GND staat voor de - batterij aansluiting.

- We hebben ons gehouden aan de nu geldende tekenafspraken bij het publiceren van de schema's. Hierbij is het zo dat elkaar kruisende lijnen geen verbinding vormen. Ze gaan als het ware over elkaar heen en maken geen contact. In het schema van de leugendetector zijn er 5 van die "fly-overs" en die zijn rood omcirkeld in figuur 13.

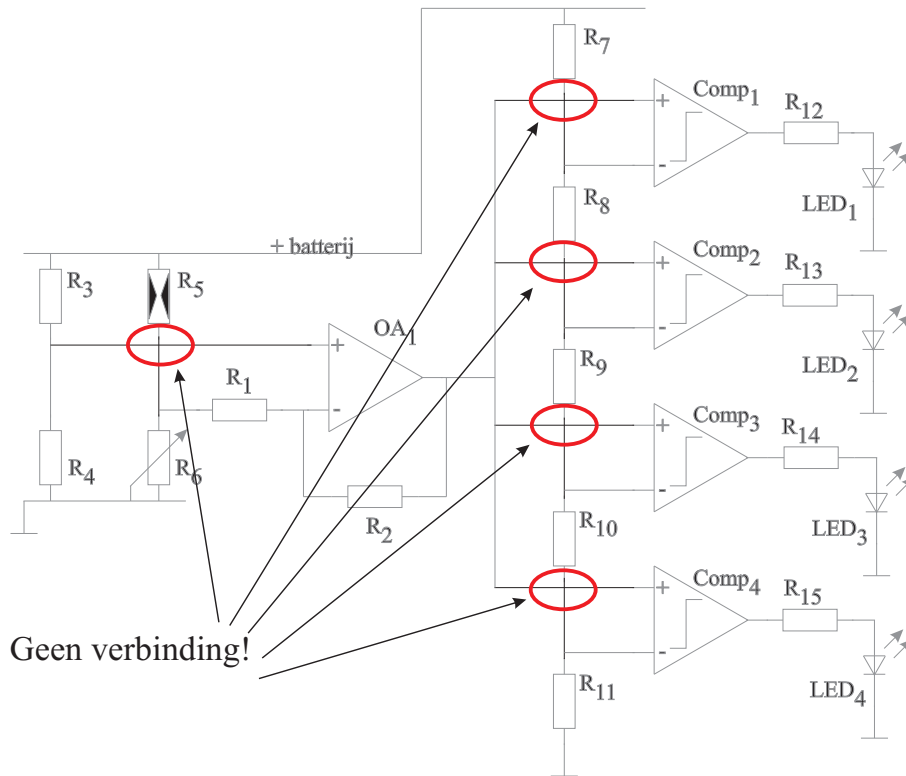


Figure 13: Het schema van de leugendetector met in rood aangegeven waar verbindinglijnen elkaar kruisen en derhalve geen contact maken.

• Last but not least: de voedingsspanning voor de twee IC's. Dit zijn OA1 en Comp 1 t/m 4. In het schema van de leugendetector zijn deze niet expliciet aangegeven, het is slechts in woord vermeld onder de afbeeldingen van de IC's in de lesbrief. Voor de volledigheid is in figuur 14 aangegeven hoe de batterij spanningen aangesloten moeten worden.

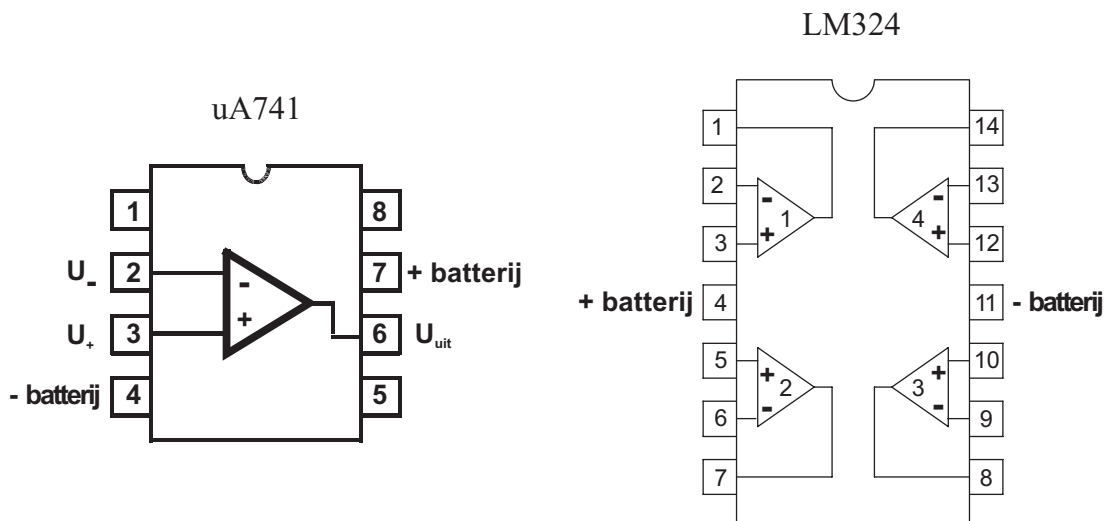


Figure 14: Bovenaanzicht van de twee IC's met de aansluitingen voor de batterij.

A Terugkoppeling

Aan het eind van de jaren twintig van de vorige eeuw ontdekte men het principe van terugkoppeling of feedback. Dit bestaat hieruit, dat bij een versterker een deel van het uitgangssignaal wordt teruggevoerd naar de ingang en bij het ingangssignaal wordt opgeteld of ervan wordt afgetrokken. De meeste eigenschappen van de versterker worden door toepassing van dit principe ingrijpend gewijzigd. Een van die veranderingen is een grotere constantheid van de versterking. Bovendien wordt de versterking eenvoudig voorspelbaar.

Om het gedrag van een teruggekoppelde versterker nader te onderzoeken gaan we uit van het model van figuur 15. Dit bestaat uit een lineaire versterker A waarvan het uitgangssignaal y wordt teruggevoerd naar een terugkoppelnetwerk waarvan de overdracht met β wordt aangegeven. Ook zien we nog een overdracht q van ingang naar uitgang aangegeven. Dit is een ongewenste directe overdracht via het tegenkoppelnetwerk, maar gelukkig is deze invloed meestal verwaarloosbaar.

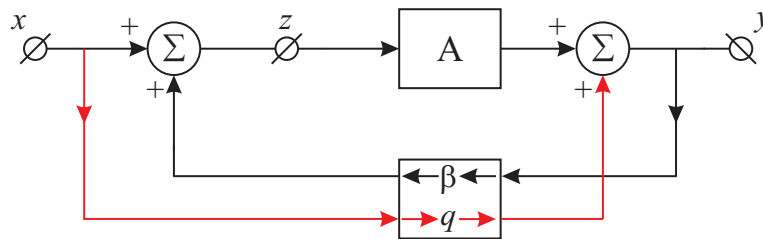


Figure 15: Algemeen model van terugkoppeling. In rood is de rechtstreekse overdracht aangegeven.

Uit figuur 15 volgen de vergelijkingen:

$$\begin{cases} z = x + \beta y \\ y = Az + qx \end{cases} \quad (16)$$

De overdracht nadat terugkoppeling is aangebracht wordt A_t genoemd, de zogenaamde **gesloten-lusversterking** (Engels: closed loop gain). Deze grootheid stelt het verband voor tussen x en y en is te vinden door vergelijking (16) te herschrijven tot:

$$A_t = \frac{y}{x} = \frac{A + q}{1 - A\beta} = \frac{A}{1 - A\beta} + \frac{q}{1 - A\beta} \quad (17)$$

Hierin is A de versterking zonder terugkoppeling of **open-lusversterking** (Engels: open loop gain).

De grootheid $A\beta = A_r$ wordt de **rondgaande versterking** of **lusversterking** genoemd (Engels: loop gain).

Uit vergelijking (17) blijkt dat de overdracht A_t van een teruggekoppelde versterker een eindige waarde zal aannemen als de open-lusversterking A naar oneindig nadert. Bovendien ontstaat

een eenvoudige overdracht en deze wordt aangeduid met $A_{t,\infty}$. De versterking simplificeert dan naar:

$$A_{t,\infty} = \lim_{A \rightarrow \infty} A_t = -\frac{1}{\beta} \quad (18)$$

Bij een als signaalversterker geschakelde operationele versterker is dit de overdracht als de 2 stellingen worden toegepast ($U_+ - U_- = 0$ en $I_+ = I_- = 0$). Daar was immers ook de versterking A heel groot gesteld (zie figuur 5)

De versterking nadat terugkoppeling is toegepast wordt vaak opgesplitst in 2 factoren: de overdracht in het ideale geval en een factor die aangeeft hoe ver de praktijk van die ideale situatie af is. In formulevorm is dat:

$$\begin{aligned} A_t &= A_{t,\infty} \cdot \frac{-A\beta}{1 - A\beta} + \frac{q}{1 - A\beta} \\ &= A_{t,\infty} \cdot \frac{-A_r}{1 - A_r} + \frac{q}{1 - A_r} \end{aligned} \quad (19)$$

Waarbij het gewenst is dat de lusversterking $|A_r| \gg 1$ om de ideale overdracht te benaderen.

A.1 Rekenvoorbeeld met een spanningsvolger

We hebben kennis gemaakt met de spanningsvolger waarbij de stellingen zonder meer werden gesteld. Aan de hand van die schakeling zal nu het bewijs geleverd worden. Ter herinnering nog even de schakeling:

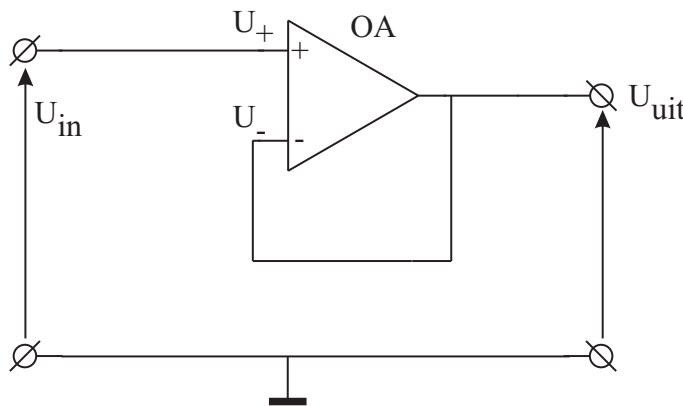


Figure 16: Een operationele versterker gebruikt als signaalversterker.

Om het gedrag te analyseren wordt de opamp vervangen door een spanningsgestuurde spanningsbron. Deze schakeling is gegeven in figuur 17.

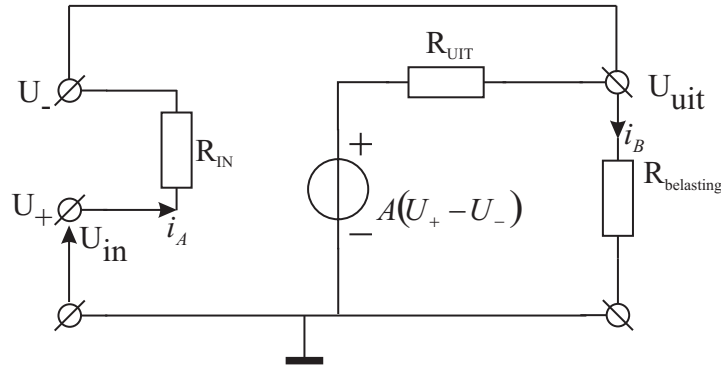


Figure 17: De spanningsvolger met een opamp gemodelleerd als een spanningsgestuurde spanningsbron. Deze spanningsbron heeft bovendien een ingangs- en een uitgangsweerstand. De stromen i_A en i_B zijn willekeurig aangenomen en dienen voor een systematische oplosmethode.

Door gebruik te maken van een systematische oplosmethode¹ kunnen we schrijven:

$$\begin{cases} 0 = -R_{IN} \cdot i_A - R_{UIT} (i_A - i_B) - A \cdot (U_+ - U_-) + U_{IN} \\ 0 = -R_{UIT} \cdot (i_B - i_A) + A \cdot (U_+ - U_-) - R_{belasting} \cdot i_B \end{cases} \quad (20)$$

Waarbij de stromen i_A en i_B de kringstromen zijn. Bovendien geldt dat

$$U_+ - U_- = R_{IN} \cdot i_A \quad (21)$$

Het stelsel (20) kan worden opgelost naar i_A :

$$i_A = U_{IN} \cdot \frac{R_{belasting} + R_{UIT}}{R_{IN} \{(A + 1) R_{belasting} + R_{UIT}\} + R_{belasting} \cdot R_{UIT}} \quad (22)$$

en naar i_B :

$$i_B = U_{IN} \cdot \frac{A \cdot R_{IN} + R_{UIT}}{R_{IN} \{(A + 1) R_{belasting} + R_{UIT}\} + R_{belasting} \cdot R_{UIT}} \quad (23)$$

Wanneer de versterkingsfactor van de opamp naar oneindig nadert, dan volgt direct uit (22) dat

$$\lim_{A \rightarrow \infty} i_A = 0 \quad (24)$$

, en daarmee is stelling 2 bewezen. Voor de verschilspanning geldt dat deze eveneens nul wordt, immers $U_+ - U_- = R_{IN} \cdot i_A$. Hiermee is ook stelling 1 aangetoond.

De gesloten-lusversterking A_t of spanningsversterking is te schrijven als:

$$A_t = \frac{U_{UIT}}{U_{IN}} = \frac{i_B \cdot R_{belasting}}{U_{IN}} = \frac{R_{belasting} (A \cdot R_{IN} + R_{UIT})}{R_{IN} \{(A + 1) R_{belasting} + R_{UIT}\} + R_{belasting} \cdot R_{UIT}} \quad (25)$$

¹Hierbij wordt een van de wetten van Kirchhoff toegepast die zegt dat alle spanningen in een kring opgeteld nul oplevert.

Als de versterking A maar groot genoeg wordt, zal de gesloten-lusversterking naar 1 naderen. De $A_{t,\infty}$ is dus 1.

Voor de berekening van de lusversterking A_r moeten we in de lus gaan staan en een rondje maken langs de lus om uiteindelijk weer op het beginpunt uit te komen. Voor het gemak beginnen we met de stroom die door het tegenkoppelnetswerk loopt en we noemen deze stroom i_1 . Zie figuur 18.

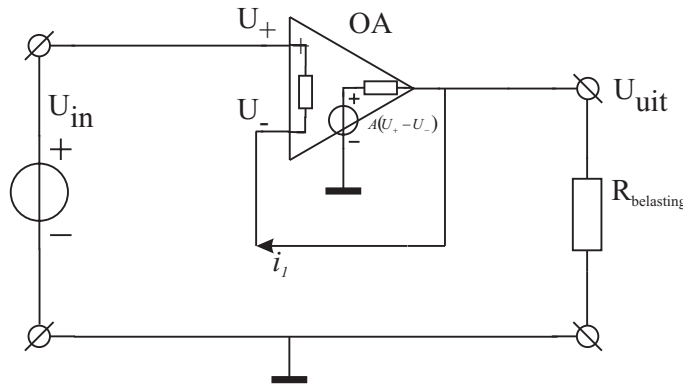


Figure 18: De spanningsvolger met interne weerstanden en spanningsgestuurde spanningsbron om de lusversterking te bepalen.

De spanning over de interne weerstand R_{IN} is de verschilspanning $U_+ - U_-$ en is gegeven door $-i_1 \cdot R_{IN}$. Dus om van i_1 naar $U_+ - U_-$ te komen, moeten we met een factor $-R_{IN}$ vermenigvuldigen. Om van de verschilspanning naar de waarde van de spanningsgestuurde spanningsbron te gaan, moeten we vermenigvuldigen met A .

We moeten vervolgens naar een stroom, naar i_1 om precies te zijn. De totaalstroom die uit de opamp gaat lopen is

$$i_{opamp} = \frac{U_{opamp}}{R_V} \quad (26)$$

, waarbij U_{opamp} de spanning is die we net hebben uitgerekend en R_V een vervangingsweerstand. Deze vervangingsweerstand is gegeven door

$$R_V = R_{UIT} + \frac{R_{belasting} \cdot R_{IN}}{R_{belasting} + R_{IN}} \quad (27)$$

Ten slotte is er een stroomdeling tussen de belastings- en de ingangsweerstand van de opamp. Deze deling is gegeven door $\frac{R_{belasting}}{R_{belasting} + R_{IN}}$ en nu zijn we weer bij de stroom i_A . De lusversterking is dan alle overdrachten met elkaar vermenigvuldigd en ziet er dan als volgt uit:

$$A_r = \frac{-A \cdot R_{IN} \cdot R_{belasting}}{\left(R_{UIT} + \frac{R_{belasting} \cdot R_{IN}}{R_{belasting} + R_{IN}}\right) (R_{belasting} + R_{IN})} = \frac{-A \cdot R_{belasting} \cdot R_{IN}}{R_{IN} \cdot R_{UIT} + R_{belasting} (R_{IN} + R_{UIT})} \quad (28)$$

De uA741 opamp heeft de volgende eigenschappen:

- $A = 200.000$;
- $R_{IN} = 2 \text{ MOhm}$ en
- $R_{UIT} = 75 \text{ Ohm}$.

Een veel voorkomende waarde voor $R_{belasting}$ is 2 kOhm . De lusversterking wordt dan -192764 . De afwijking van de ideaal veronderstelde spanningsvolger is dan

$$\frac{-A_r}{1 - A_r} \approx 0,999995 \quad (29)$$

De rechtstreekse overdracht q is zeer gering en is te berekenen door de versterking A nul te maken. De overdracht is dan

$$q = \lim_{A \rightarrow 0} A_t = \frac{R_{belasting} \cdot R_{UIT}}{R_{belasting} \cdot R_{UIT} + R_{IN} (R_{belasting} + R_{UIT})} \approx \frac{R_{UIT}}{R_{IN}} \quad (30)$$

En dat blijkt ongeveer $38 \cdot 10^{-6}$ te zijn. De ongewenste overdracht is dus

$$\frac{q}{1 - A_r} \approx \frac{38 \cdot 10^{-6}}{1 - (-192764)} \approx 197 \cdot 10^{-12} \text{ en dat is te verwaarlozen ten opzichte van } 0,999995.$$