



Elektronica componenten

Operationele versterkers



8.1 Inleiding

8.1.1 Naamgeving

Operationele versterkers, in het Engels 'Operational Amplifiers' worden meestal naar de Engelse afkorting 'OpAmp' genoemd. Het zijn in feite kant en klare analoge versterkers, waarvan we de eigenschappen (parameters) via eenvoudige ingrepen kunnen aanpassen. Het vastleggen van deze parameters gebeurt hoofdzakelijk door de keuze van de componenten die de *tegenkoppeling* beïnvloeden.

Definitie

Een **operationele versterker** is een actieve elektronische component, meestal in de vorm van een geïntegreerde schakeling (IC), met een zeer hoge versterkingsfactor.

8.1.2 Toepassingsgebied

Geïntegreerde schakelingen

Elke OpAmp bestaat uit een vrij ingewikkelde transistorschakeling en bevat soms honderden transistoren. De huidige technologie heeft er voor gezorgd dat deze grote schakelingen werden geminiaturiseerd. Deze kant en klare versterkers huizen nu in piepkleine IC's. 'IC' staat voor 'Integrated Circuit' of geïntegreerde schakeling. We kunnen nu op een vrij eenvoudige manier verschillende applicaties ontwerpen door rond deze IC's passieve componenten (weerstand, condensatoren, spoelen, diodes,...) te plaatsen en op de juiste manier met de pinnen te verbinden.

Analoge techniek

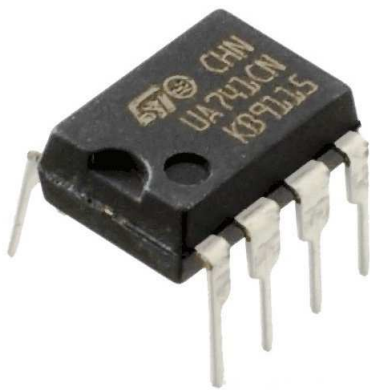
Het domein van de **analoge techniek** maakt dankbaar gebruik van deze bouwsteen. Hieronder staat een lijstje met enkele voorbeelden:

- Audio-voorversterkers
- Analoge computers
- Meet-en regeltechniek (PID-regelaars)
- Elektronische filters
- Labo-testversterkers
- Meetapparatuur
- Oscillatoren en functiegeneratoren
- ...

8.1.3 Package & schemasymbool

Package

OpAmps komen voor in vele maten en gewichten. Figuur 8.1 toont twee van de vele mogelijke behuizingen. Links staat een zg. DIL-package^[37] in vol ornaat te blinken en rechts probeert een TO5-8-package^[38] ons te verleiden...

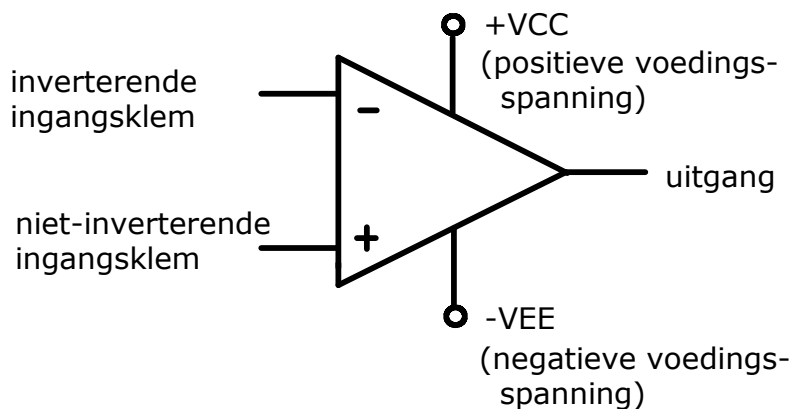


△ Fig.8.1 Enkele OpAmp-packages
Bron1: <https://www.autodesk.com>
Bron2: <https://commons.wikimedia.org>

[37] DIL-package: 'Dual In Line' (2 rijen) duidt op een patroon van aansluitpennen

[38] TO5-8-package: 'TO' staat voor 'Transistor Outline'

Schemasymbool



△ Fig.8.2 | Schemasymbool van een OpAmp
Bron: W. Van Wichelen

8.2 De ideale OpAmp

8.2.1 Open-lus-versterking

Zowel op de **inverterende ingang** als op de **niet-inverterende ingang** kan er signaal ingestuurd worden. De OpAmp kijkt enkel naar het *verschil* tussen z'n beide ingangsklemmen. Is er een verschilspanning aanwezig, dan versterkt hij dit verschil met een factor A_{OL} . ' A_{OL} ' staat voor *open-loop-amplification* of de spanningsversterking bij een *open-lus-schakeling*. Met **open-lus** bedoelen we dat we de OpAmp laten versterken zonder negatieve *terugkoppeling* (negative feedback). Er wordt met andere woorden geen uitgangssignaal teruggevoerd naar de ingangsklemmen.

8.2.2 Eigenschappen van een ideale OpAmp

Een ideale OpAmp beschikt over volgende parameters:

- open-lus-versterking A_{OL} : oneindig groot
- ingangsimpedantie: oneindig groot
- ingangsstroom: 0 ampère
- uitgangsimpedantie: 0 ohm^[39]
- bandbreedte: oneindig groot^[40]
- CCMR: zeer groot^[41]

[39] elke ideale spanningsbron bezit een uitgangsimpedantie van nul ohm

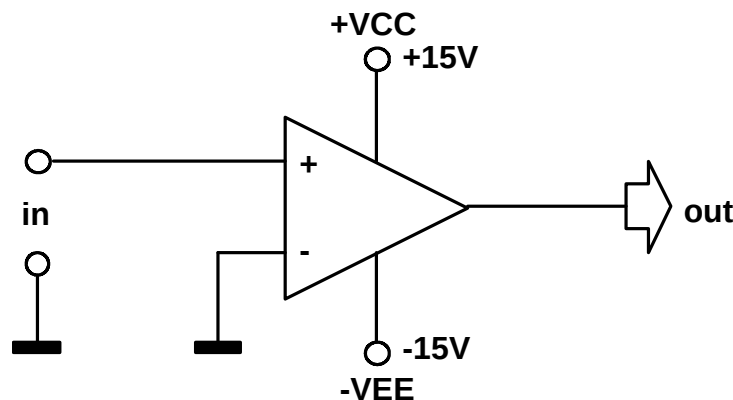
[40] een ideale blokgolf wordt zonder harmonische vervorming versterkt

[41] 'CMRR': Common Mode Rejection is een maatgetal dat aangeeft hoe goed een gemeenschappelijk ingangssignaal wordt weggefilterd

8.3 OpAmp als schakelaar

8.3.1 Comparatorschakelingen

Een OpAmp waarvan de uitgang niet via een *feedback-weerstand* wordt teruggekoppeld naar de inverterende ingangsklem wordt ook wel **comparator** genoemd. Laten we eens de schakeling van figuur 8.3 bekijken. De operationele versterker wordt gevoed met een symmetrische voedingsspanning van $V_{CC}=+15V$ en $V_{EE}=-15V$. De min-klem wordt constant aan massapotentiaal gehouden. Dus, op de min-klem staat altijd nul volt. Wanneer de spanning op de plus-klem nu ietsje boven nul volt is, dan zal de OpAmp deze kleine verschilspanning versterken met een factor die grenst aan oneindig. Er is immers geen negatieve terugkoppeling om de open-lus-versterking te begrenzen.



△ Fig.8.3 | OpAmp als comparator
Bron: W. Van Wichelen

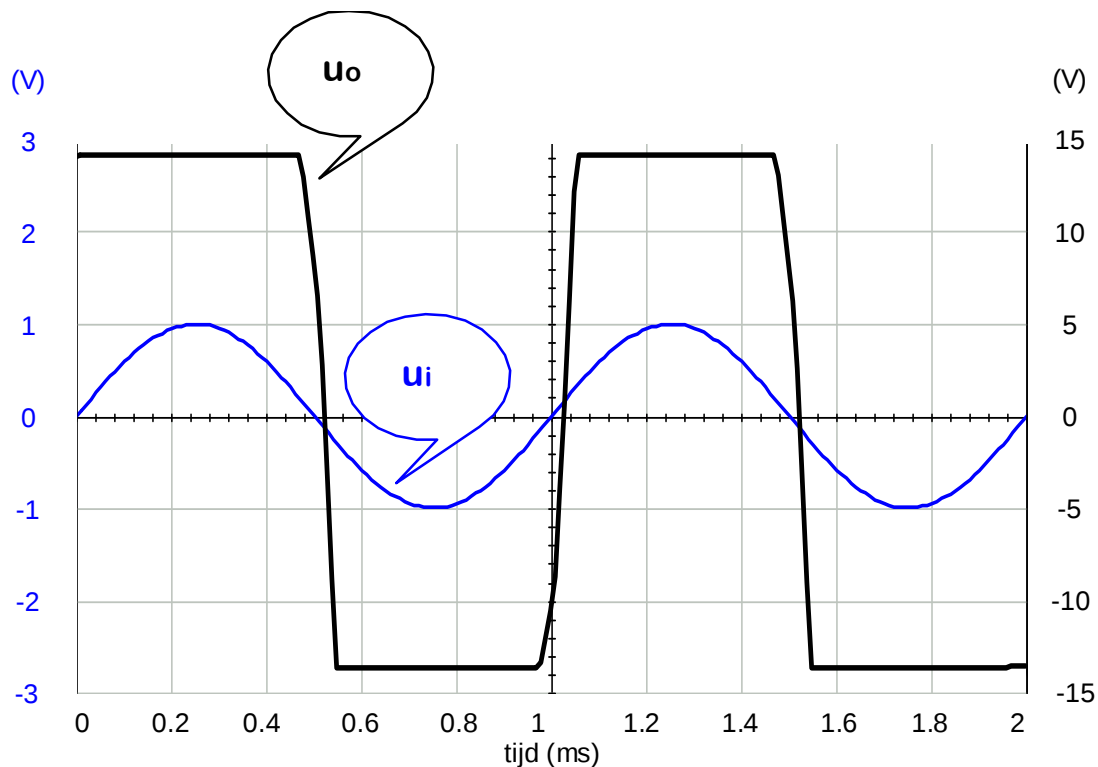
Positieve & negatieve saturatie

De OpAmp zal de uitgang naar **positieve saturatie** sturen wanneer de spanning op de niet-inverterende klem hoger is dan op de inverterende ingangsklem.

Hij zal zijn uitgang naar **negatieve saturatie** sturen wanneer de spanning op de niet-inverterende klem lager is dan op de inverterende ingangsklem.

8.3.2 Nuldoorgangdetector

In de comparatorschakeling van figuur 8.3 zal de uitgang naar positieve saturatie omklappen wanneer de spanning aan de ingang ietsje boven nul volt ligt. Zakt de ingangsspanning ietsje onder nul volt, dan zal de uitgang omklappen naar de negatieve voedingsspanning. De OpAmpschakeling die dit gedrag vertoont heet een **nuldoorgangdetector**.

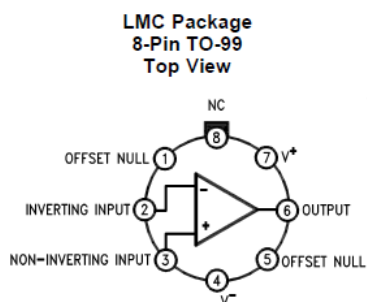


△ Fig.8.4 OpAmp als comparator: uitgangsspanning en ingangsspanning.
Bron: W. Van Wichelen

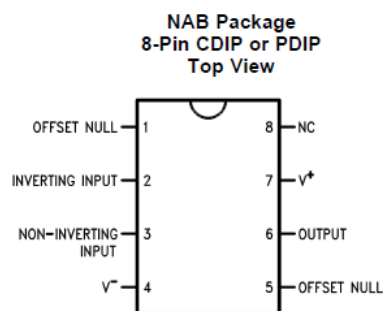
Tijdens de nuldoorgangen van het ingangssignaal klapt de OpAmp om van positieve naar negatieve saturatie of omgekeerd. Bij een positieve ingang is de uitgang gelijk aan de positieve saturatiespanning. Bij een negatieve ingang is de uitgang gelijk aan de negatieve saturatiespanning. Je zou kunnen denken dat deze saturatiespanningen gelijk zijn aan de respectievelijke voedingsspanningen. Maar dat is niet zo. We verliezen ongeveer 1 volt. In de datasheets (figuur 8.5) kunnen we de exacte waarden aflezen. In de figuur 8.4 zien we dat de uitgang omklapt van ca. +14V naar ca. -14V.

Datasheet '741'

5 Pin Configuration and Functions



LM741H is available per JM38510/10101



Pin Functions

PIN		I/O	DESCRIPTION
NAME	NO.		
INVERTING INPUT	2	I	Inverting signal input
NC	8	N/A	No Connect, should be left floating
NONINVERTING INPUT	3	I	Noninverting signal input
OFFSET NULL	1, 5	I	Offset null pin used to eliminate the offset voltage and balance the input voltages.
OFFSET NULL			
OUTPUT	6	O	Amplified signal output
V+	7	I	Positive supply voltage
V-	4	I	Negative supply voltage

6.5 Electrical Characteristics, LM741⁽¹⁾

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Input offset voltage		$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1	5	mV
			$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			6	mV
Input offset voltage adjustment range		$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20\text{ V}$			± 15		mV
Input offset current		$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			20	200	nA
					85	500	
Input bias current		$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			80	500	nA
						1.5	μA
Input resistance		$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20\text{ V}$		0.3	2		M Ω
Input voltage range		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		± 12	± 13		V
Large signal voltage gain		$V_S = \pm 15\text{ V}, V_O = \pm 10\text{ V}, R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		50	200	V/mV
			$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		25		
Output voltage swing		$V_S = \pm 15\text{ V}$	$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$		± 12	± 14	V
			$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$		± 10	± 13	
Output short circuit current		$T_A = 25^\circ\text{C}$			25		mA
Common-mode rejection ratio		$R_S \leq 10\text{ }\Omega, V_{\text{CM}} = \pm 12\text{ V}, T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		80	95		dB
Supply voltage rejection ratio		$V_S = \pm 20\text{ V to } \pm 5\text{ V}, R_S \leq 10\text{ }\Omega, T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		86	96		dB
Transient response	Rise time	$T_A = 25^\circ\text{C}, \text{unity gain}$			0.3		μs
	Overshoot				5%		
Slew rate		$T_A = 25^\circ\text{C}, \text{unity gain}$			0.5		V/ μs
Supply current		$T_A = 25^\circ\text{C}$			1.7	2.8	mA
Power consumption		$V_S = \pm 15\text{ V}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		50	85	mW
			$T_A = T_{\text{AMIN}}$		60	100	
			$T_A = T_{\text{AMAX}}$		45	75	

△ Fig.8.5 | Uittreksel datasheet OpAmp 741.
Bron: datasheet Texas Instruments

Let op!

Bij het geringste spanningsverschil tussen de twee ingangsklemmen van de OpAmp wordt de uitgang naar saturatie gedwongen.

Wensen we de OpAmp *niet* in verzadiging te sturen, dan moeten we er voor zorgen dat de verschilspanning tussen de twee ingangsklemmen **nul volt** is.

Laboproef 12

Pas de OpAmp 741 toe als schakelaar.

Breng twee comparatorschakelingen in praktijk:

1. OpAmp als **niet-inverterende nuldoorgangdetector** die schakelt tussen de twee saturatiespanningen.
2. OpAmp als **inverterende niveau-detector** met een referentiespanning van 0.5 volt waarbij zenerdiodes de uitgangsspanningen begrenzen tot ca. +/- 5 volt.

Aan de ingangsklem leg je een driehoekspanning aan met een amplitude van 1 volt en een frequentie van 1kHz. Voorspel het gedrag en teken een theoretisch signaal/tijd-diagram en breng daarna ingangsspanning en uitgangsspanning in beeld met een oscilloscoop.

8.4 OpAmp als versterker

8.4.1 Feedback en stabiliteit

Terugkoppeling

In ons taalgebruik nemen we te pas en te onpas het woord **'feedback'** in de mond. Een leraar in de leraarskamer: *"Ik krijg in die klas geen enkele feedback; lesgeven lukt gewoon niet!"* Wat wil onze arme leraar nu aan zijn collega's duidelijk maken? Wel, een woordenboek Engels-Nederlands brengt ons al een heel eind op weg: *feedback = terugkoppelen, terugvoeren.*



"It looks like you have everything under control."

△ Fig.8.6 | Een onstabiel systeem: leraar zonder terugkoppeling vanuit de klas.
Bron: <https://nl.123rf.com>
Auteursrecht: Andrew Grossman

Onze leraar is wanhopig omdat hij geen **'input'** vanuit de klas ontvangt, er is slechts *éénrichtingsverkeer*: de leraar^[42] blijft maar informatie over de arme hoofdjes uitstrooien, maar de klas *ondergaat* slechts. De klas geeft geen teken dat ze onze arme leerkracht begrepen heeft, dat hij goed bezig is, of dat hij niet goed bezig is...

[42] De cartoon toont het stereotiepe rollenpatroon van een *mannelijke* directeur en een *vrouwelijke* leerkracht. Weet dat het in de praktijk dikwijls andersom is!

Stabiliteit

Een leraar die niet kan genieten van feedback geeft les voor de muren en blaast zichzelf op ('burn-out'). Technisch gesproken is dit een **onstabiel systeem**. Wat onze arme leraar hier overkomt, is ook het arme lot van een elektronische versterker die geen deel uitmaakt van een feedback-systeem.

Transfertfunctie

Nee, dit is geen voetbaljargon. Maar de betekenis kunnen we wel via het voetbal achterhalen. Immers, wanneer een speler getransfereerd wordt, dan wordt hij *overgedragen* van de ene club naar de nadere. In de techniek spreken we van '**overdrachtsfuncties**'.

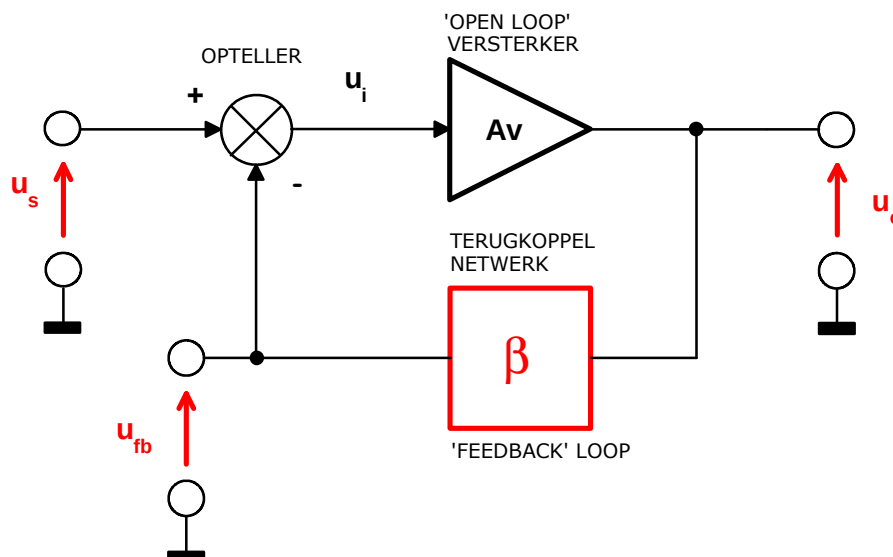
Definitie

Met **transfertfunctie** bedoelen we hoe de uitgang zich verhoudt tot de ingang van een bepaald systeem. Dikwijls komt dit neer op het bepalen van de spannings-**versterking**^[43] (of verzwakking):

$$A = \frac{out}{in} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

Transfertfunctie met tegenkoppeling

Figuur 8.7 toont de schematische voorstelling van een **tegengekoppelde versterker**.



△ Fig.8.7 | Systeem met negatieve terugkoppeling.
Bron: W. Van Wichelen

[43] 'Versterking' in het Engels: 'Amplification'
'Verzwakking' in het Engels: 'Attenuation'
Vandaar de 'A' voor transfertfunctie.

[44] 'Tegengekoppelde versterker' in het Engels: 'Negative Feedback Amplifier'

In het schema van het feedback-systeem van figuur 8.7 is:

- u_s : signaalspanning
- u_i : ingangsspanning open-lus-versterker
- u_o : uitgangsspanning (output) teruggekoppelde versterker
- β : transfert terugkoppelnetwerk
- A_v : transfert open-lus-versterker (voltage amplification)
- u_{fb} : feedback-spanning

De uitgang wordt via een **terugkoppelnetwerk** teruggevoerd naar de ingang (letterlijk: 'to feed back'). We kunnen aantonen dat wanneer $\beta \times A_v$ veel groter is dan 1 de totale versterking *enkel* bepaald wordt door de **terugkoppelfactor** β !

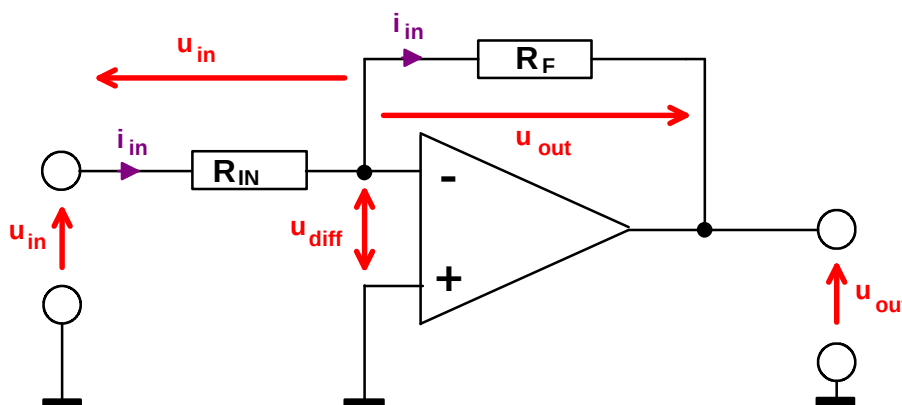
Stabiliteit en tegenkoppeling

De **stabiliteit** van een negatief teruggekoppelde versterker neemt toe bij *dalende* waarden voor de totale versterking.

8.4.2 Inverterende versterker

Tegenkoppeling

Wanneer we het over *tegengekoppelde versterkers* hebben, dan sturen we het uitgangssignaal terug naar de inverterende ingangsklem. Figuur 8.8 toont het schema van een **inverterende versterker**. Voor de duidelijkheid laten we de positieve en negatieve voedingsklemmen even weg. Let wel op: om een OpAmp te kunnen laten versterken moet je hem wel degelijk van voedingsspanning voorzien!



△ Fig.8.8 | OpAmp als inverterende versterker.
Bron: W. Van Wichelen

In het schema van figuur 8.8 is:

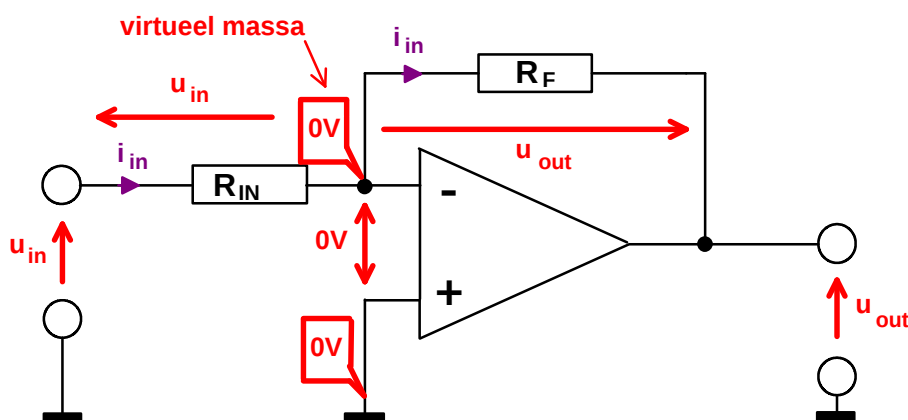
- R_F : feedback weerstand
- R_{in} : ingangsweerstand
- u_{in} : ingangsspanning
- u_{out} : uitgangsspanning
- i_{in} : ingangsstroom
- u_{diff} : verschilspanning tussen de ingangsklemmen

Voorwaarden lineaire werking

1. We werken steeds met een **onverzadigde** OpAmp: de uitgangsspanning loopt *nooit* vast tegen één van de twee saturatiespanningen.
2. De **ingangsimpedantie** is *zeer groot* in verhouding tot de instelweerstand R_{in} en R_F .

Virtueel massapunt

Uit voorwaarde 1 volgt dat de verschilspanning u_{diff} gelijk moet zijn aan nul volt. Eerder zagen we dat een OpAmp satureert wanneer één van de twee ingangsklemmen op een verschillend potentiaal staat t.o.v. de andere. De verschilspanning wordt dan versterkt met de factor A_{OL} , met als gevolg dat de uitgang vast loopt tegen de negatieve of de positieve voedingsspanning. De spanning op de inverterende ingangsklem is dan bijgevolg ook nul volt. De plusklem ligt immers aan massa en $u_{diff} = 0V$, dus de spanning op de plusklem is de som van beide, dus ook 0V. We zeggen dat de inverterende klem *virtueel* aan massa hangt.



△ Fig.8.9 | Virtueel massapunt.
Bron: W. Van Wichelen

Uit voorwaarde 2 volgt dat de ingangsstroom i_{in} zowel vloeit door R_{in} als door R_F . Er vloeit immers geen stroom in de OpAmp want de ingangsweerstand is praktisch gezien 'oneindig' groot. Laten we dit even samenvatten:

Let op!

- $U_{\text{INVERTERENDE INGANG}} = 0\text{ V}$ (virtueel)
- $i_{RIN} = i_{RF} = i_{IN}$

Spanningsversterking

$$\begin{aligned} i_{in} &= \frac{U_{in}}{R_{in}} \\ &= \frac{U_{out}}{R_F} \\ \Leftrightarrow \frac{U_{out}}{U_{in}} &= \frac{R_F}{R_{in}} \\ \Leftrightarrow |A_v| &= \frac{R_F}{R_{in}} \end{aligned}$$

We sturen in op de **inverterende** ingang, dus bovenstaand resultaat laat zich herschrijven als:

Let op!

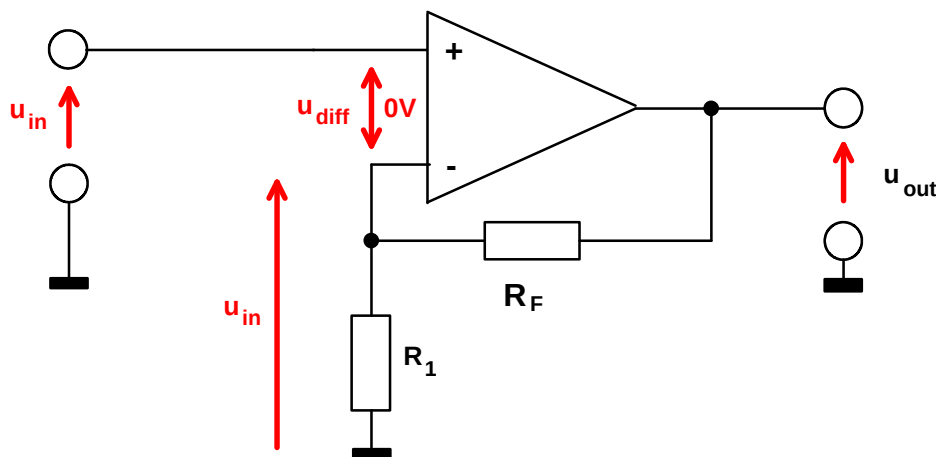
$$A_v = -\frac{R_F}{R_{IN}}$$

Spanningsversterking A_v van een *inverterende versterker* is dus onafhankelijk van de open-lus-versterking A_{OL} ; ze is enkel en alleen afhankelijk van de *weerstandsverhouding* R_F/R_{IN} .

Laboproef 13

Ontwerp een **inverterende spanningsversterker** m.b.v. OpAmp 741 met een ingangsweerstand van 10K en een spanningsversterking van 10. Voorzie een symmetrische voedingsspanning van +/- 15V_{DC}.

8.4.3 Niet-inverterende versterker



△ Fig.8.10 | OpAmp als niet-inverterende versterker.
Bron: W. Van Wichelen

Spanningsversterking

Figuur 8.10 toont het schema van een **niet-inverterende versterker**. Om de waarde van de spanningsversterking te bepalen stellen we weerom volgende eisen:

1. We werken *niet* in saturatie, dus $+u_{in} = -u_{in}$
2. Er vloeit *geen* stroom in de OpAmp

Doordat de verschilspanning $u_{diff}=0V$, staat de ingangsspanning u_{in} ook over R_1 . De spanning over R_1 berekenen we via de befaamde *spanningsdelingswet*:

$$u_{in} = \frac{u_{out} \times R_1}{R_1 + R_F} \Leftrightarrow \frac{u_{out}}{u_{in}} = A_v = \frac{R_1 + R_F}{R_1}$$

Let op!

$$A_v = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

Omdat we insturen op de niet-inverterende ingangsklem is de ingang **in fase** met de uitgang.

Zeer grote ingangsweerstand

Bij de *inverterende* versterker was de ingangsweerstand gelijk aan R_{in} . Hoe groot is de ingangsweerstand nu? Er kan geen stroom in de OpAmp vloeien. We zien ook dat er geen stroom kan weglekken via de instelweerstand. Dus, je voelt wel aan dat de ingangsweerstand van de niet-inverterende versterker immens groot moet zijn:

Let op!

$$Z_{IN} \approx \infty$$