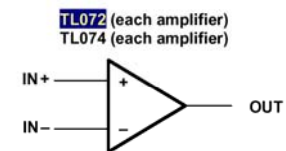
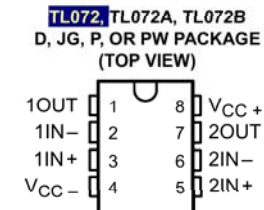
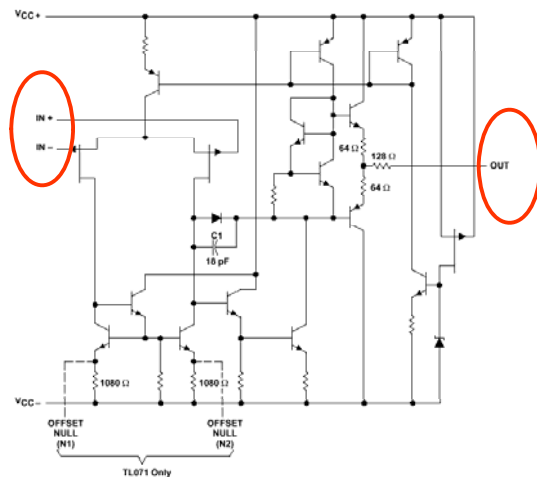
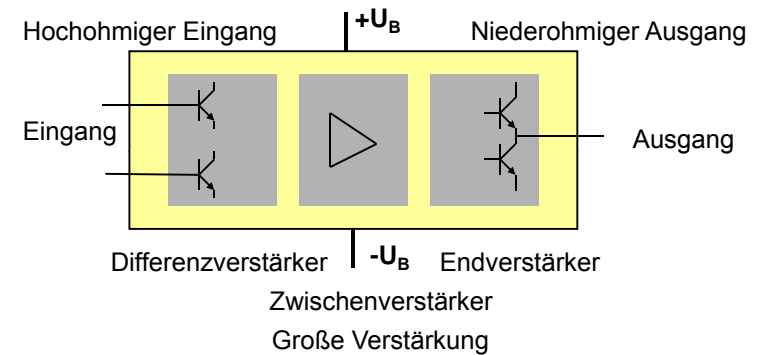


Kapitel 6: Operationsverstärker

- Aufbau, Funktion und Kenndaten
- Verstärkerschaltungen
- Addierer- und Subtrahiererschaltungen
- Komparatorschaltungen
- Integrierer- und Differenziererschaltung
- Anwendungsbeispiele

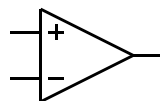


Verstärkungsfaktor	V	100000
Eingangswiderstand	R_E	1-1000 M Ω
Ausgangswiderstand	R_A	10 Ω
Untere Grenzfrequenz	f_{min}	0Hz
Obere Grenzfrequenz	f_{max}	100MHz
Rausch-Ausgangsspannung	U_{rausch}	3 μ V

Operationsverstärker können in Echtzeit analoge Signale verarbeiten und dabei folgende Operationen realisieren.

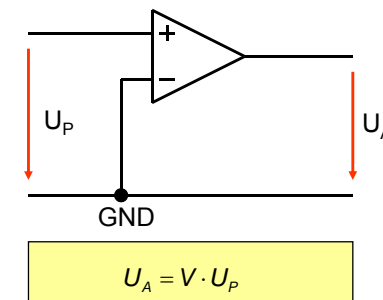
- Addition
- Subtraktion
- Multiplikation
- Division
- Integrieren
- Differenzieren
- Vergleichen
- Filtern

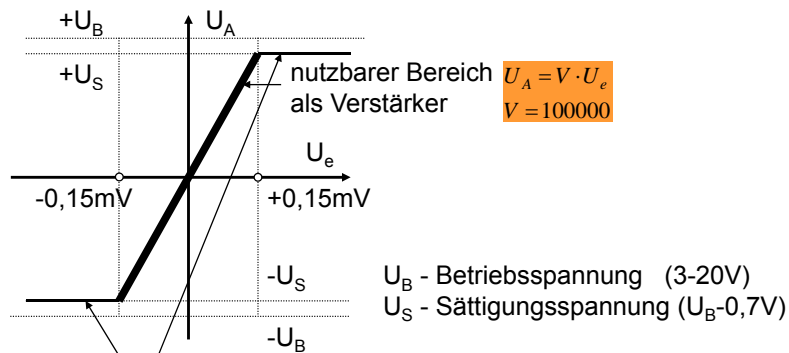
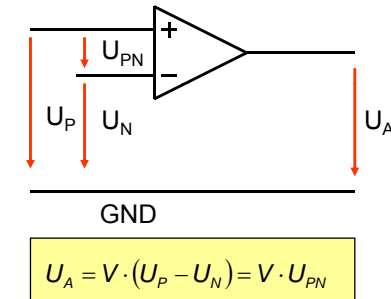
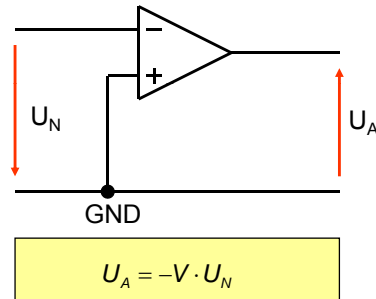
Nichtinvertierender Eingang



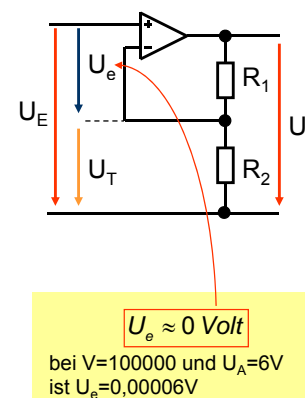
Ausgang

Invertierender Eingang





Der Sättigungsbereich wird für die Nutzung als Komparator genutzt



$$U_A = V \cdot U_e \quad U_A = V \cdot (U_E - U_T) \quad U_T = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_A$$

$$U_A = V \cdot \left(U_E - \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_A \right) \quad B = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_A = V \cdot U_E - V \cdot B \cdot U_A \quad U_E = U_A \cdot \frac{(1 + V \cdot B)}{V}$$

$$V_U = \frac{U_A}{U_E} = \frac{U_A}{U_A \cdot \frac{(1 + V \cdot B)}{V}} = \frac{V}{(1 + V \cdot B)} = \frac{1}{B} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$V_U = \frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

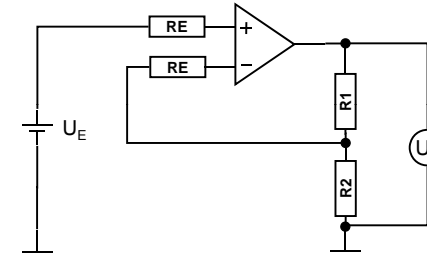
$V \gg B$
 $V = 100000$
 $B = 1000$

Nichtinvertierender Operationsverstärker

- Verstärker
- Spannungsfolger
- Wechselspannungsverstärker
- Addierer

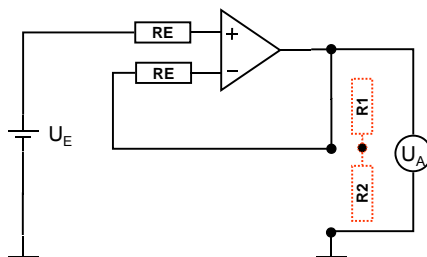
Invertierender Operationsverstärker

- Verstärker
- Differenzverstärker/Subtrahierer
- Wechselspannungsverstärker
- Addierer



$$U_A = U_E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Herleitung siehe
Folie 6.12.

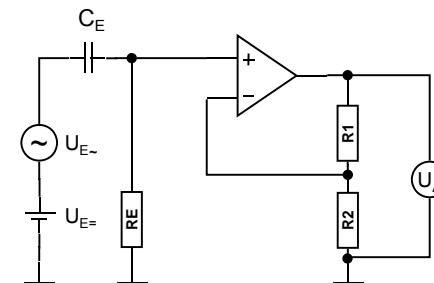


$$U_A = U_E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Da $R_1=0$ und $R_2 \gg R_1$
folgt:

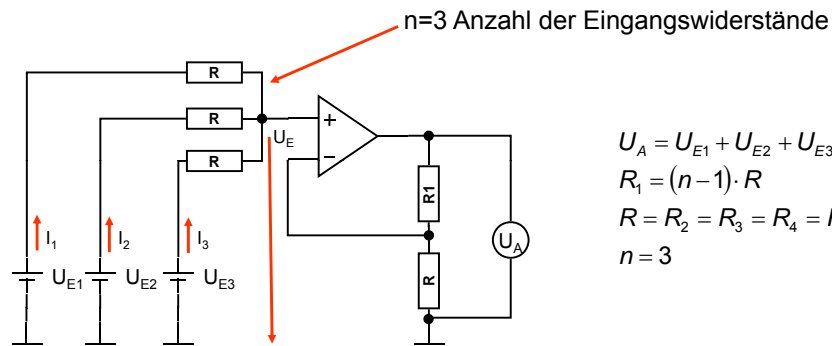
$$U_A = U_E$$

$U_{E=}$ wird durch das CR Glied ausgefiltert.



$$U_A = U_{E~} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$f_{gr} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_E \cdot C_E}$$



$$\begin{aligned} U_A &= U_{E1} + U_{E2} + U_{E3} \\ R_1 &= (n-1) \cdot R \\ R &= R_2 = R_3 = R_4 = R_5 \\ n &= 3 \end{aligned}$$

U_E kann auch eine Wechselspannung sein !!

$$\left. \begin{aligned} I_{11} &= \frac{U_{E1}}{R + \frac{R \cdot R}{R+R}} = \frac{U_{E1}}{1.5 \cdot R} & I_{21} = I_{31} &= \frac{I_{11}}{2} = \frac{U_{E1}}{3 \cdot R} \\ I_{22} &= \frac{U_{E2}}{R + \frac{R \cdot R}{R+R}} = \frac{U_{E2}}{1.5 \cdot R} & I_{12} = I_{32} &= \frac{I_{22}}{2} = \frac{U_{E2}}{3 \cdot R} \\ I_{33} &= \frac{U_{E3}}{R + \frac{R \cdot R}{R+R}} = \frac{U_{E3}}{1.5 \cdot R} & I_{13} = I_{23} &= \frac{I_{33}}{2} = \frac{U_{E3}}{3 \cdot R} \end{aligned} \right\} \text{Teilströme für jede Spannungsquelle}$$

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= +I_{11} - I_{12} - I_{13} & I_1 &= +\frac{U_{E1}}{1.5 \cdot R} - \frac{U_{E2}}{3 \cdot R} - \frac{U_{E3}}{3 \cdot R} = \frac{1}{3 \cdot R} (2U_{E1} - U_{E2} - U_{E3}) \\ I_2 &= -I_{21} + I_{22} - I_{23} & I_2 &= -\frac{U_{E1}}{3 \cdot R} + \frac{U_{E2}}{15 \cdot R} - \frac{U_{E3}}{3 \cdot R} = \frac{1}{3 \cdot R} (-U_{E1} + 2U_{E2} - U_{E3}) \\ I_3 &= -I_{31} - I_{32} + I_{33} & I_3 &= -\frac{U_{E1}}{3 \cdot R} - \frac{U_{E2}}{3 \cdot R} + \frac{U_{E3}}{15 \cdot R} = \frac{1}{3 \cdot R} (-U_{E1} - U_{E2} + 2U_{E3}) \end{aligned} \right\} \text{Überlagerung der Teilsysteme}$$

$$0 = +U_{E3} - U_R - U_E \quad \text{Maschensatz}$$

$$U_E = U_{E3} - I_3 \cdot R = U_{E3} - \frac{1}{3 \cdot R} (-U_{E1} - U_{E2} + 2U_{E3}) \cdot R$$

$$U_E = U_{E3} - \frac{1}{3}(-U_{E1} - U_{E2} + 2U_{E3}) = \frac{3}{3}U_{E1} + \frac{1}{3}U_{E1} + \frac{1}{3}U_{E2} - \frac{2}{3}U_{E3}$$

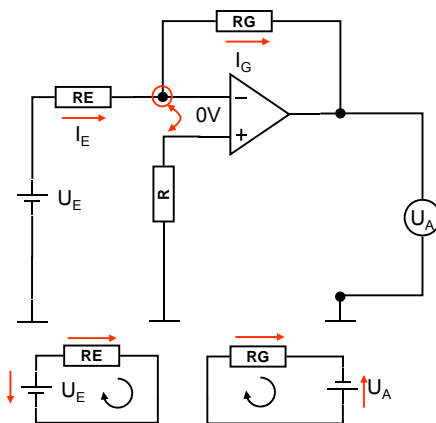
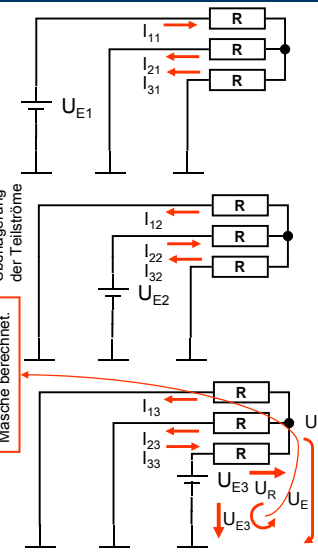
$$U_E = \frac{U_{E1} + U_{E2} + U_{E3}}{3}$$

$$V_U = \frac{R_1 + R}{R} = \frac{(n-1) \cdot R + R}{R} = \frac{R \cdot ((n-1) + 1)}{R} = n$$

$$U_A = V_U \cdot U_E = V_U \cdot \frac{-E_1 - E_2 - E_3}{3}$$

bei $V_U = n=3$ gilt

$$U_A = U_{E1} + U_{E2} + U_{E3}$$



$$U_A = -U_E \cdot \frac{R_G}{R_E}$$

$$R = R_E$$

Herleitung:

$$0 = +I_E - I_G$$

$$I_E = I_G$$

$$0 = -U_E + I_E \cdot R_E$$

$$U_E = I_E \cdot R_E$$

$$0 = +U_A + I_G \cdot R_G$$

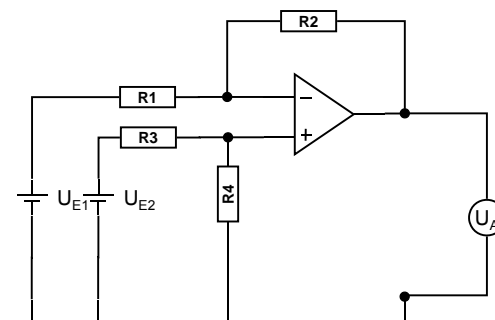
$$U_A = -I_G \cdot R_G$$

$$V_U = \frac{U_A}{U_-} = \frac{-I_G \cdot R_G}{I_- \cdot R_-} = -\frac{R_G}{R_-}$$

$$U_A = R_G$$

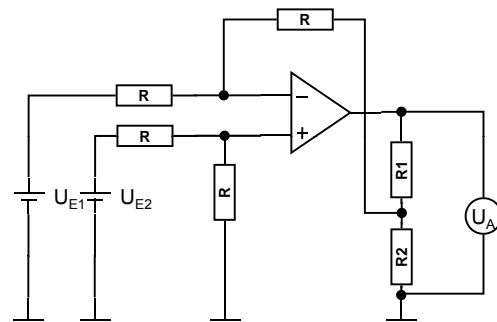
$$V_U = \frac{\lambda}{U_E} = -\frac{g}{R_E}$$

$$U_+ = -\frac{R_G}{R_G + R_L} U_-$$



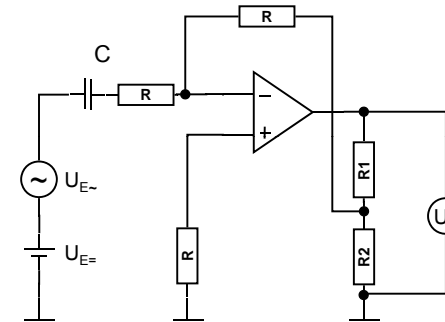
Bei $R_1=R_3$ und $R_2=R_4$

$$U_A = (U_{E2} - U_{E1}) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$



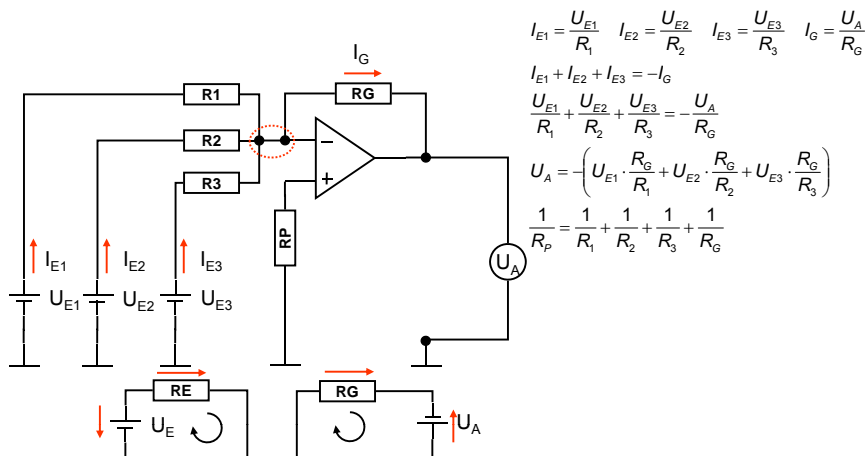
Bei $R=100k\Omega$

$$U_A = (U_{E2} - U_{E1}) \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$



$$U_A = -U_{E~} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$f_{gr} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$



$$I_{E1} = \frac{U_{E1}}{R_1} \quad I_{E2} = \frac{U_{E2}}{R_2} \quad I_{E3} = \frac{U_{E3}}{R_3} \quad I_G = \frac{U_A}{R_G}$$

$$I_{E1} + I_{E2} + I_{E3} = -I_G$$

$$\frac{U_{E1}}{R_1} + \frac{U_{E2}}{R_2} + \frac{U_{E3}}{R_3} = -\frac{U_A}{R_G}$$

$$U_A = -\left(U_{E1} \cdot \frac{R_G}{R_1} + U_{E2} \cdot \frac{R_G}{R_2} + U_{E3} \cdot \frac{R_G}{R_3} \right)$$

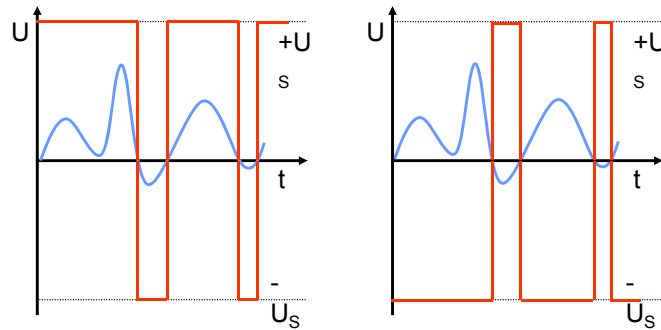
$$\frac{1}{R_P} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_G}$$

Komparatoren ohne Hysterese

- für den Nulldurchgang invertierend
- für den Nulldurchgang nichtinvertierend
- mit Referenzspannung invertierend
- mit Referenzspannung nichtinvertierend

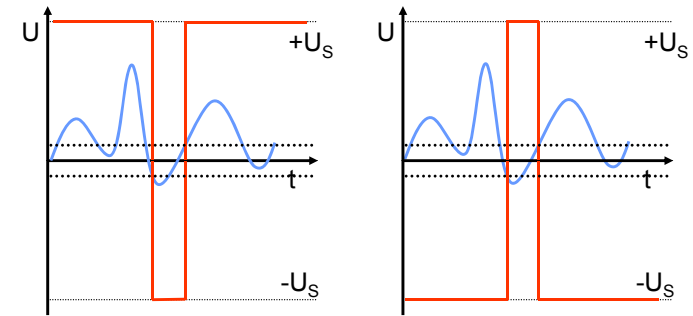
Komparatoren mit Hysterese

- für den Nulldurchgang invertierend
- für den Nulldurchgang nichtinvertierend
- mit Referenzspannung invertierend
- mit Referenzspannung nichtinvertierend



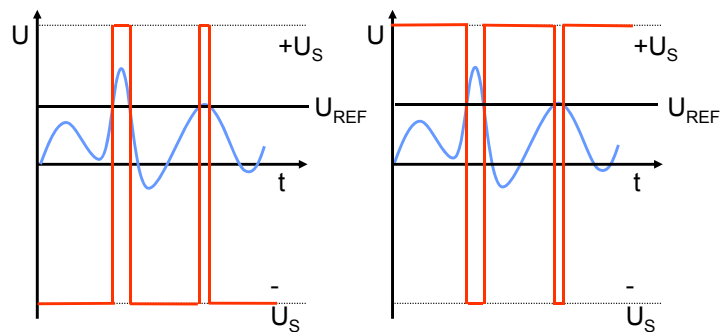
nichtinvertierend

invertierend



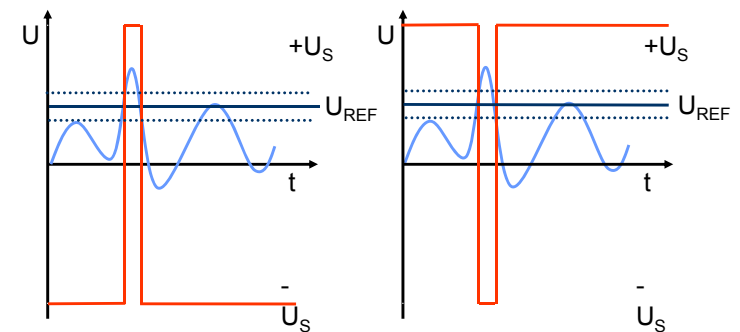
nichtinvertierend

invertierend



nichtinvertierend

invertierend



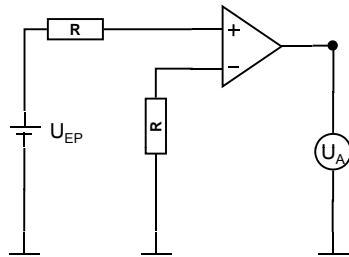
nichtinvertierend

invertierend

Operationsverstärkerschaltungen

Komparator für den Nulldurchgang ohne Hysterese

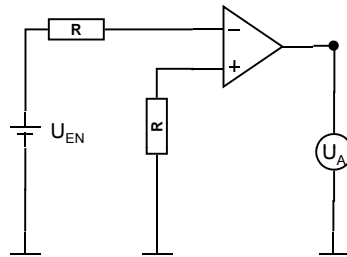
nichtinvertierend



$$U_{EP} < 0V \rightarrow U_A = -U_S$$

$$U_{EP} > 0V \rightarrow U_A = +U_S$$

invertierend



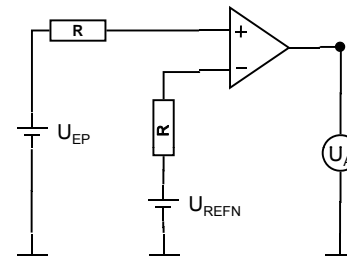
$$U_{EN} < 0V \rightarrow U_A = +U_S$$

$$U_{EN} > 0V \rightarrow U_A = -U_S$$

Operationsverstärkerschaltungen

Komparator mit Referenzspannung ohne Hysterese

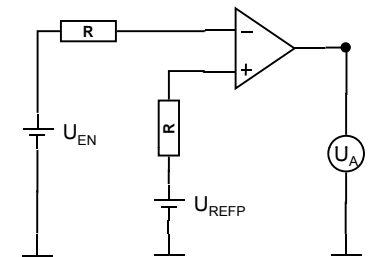
nichtinvertierend



$$U_{EP} > U_{REFN} \rightarrow U_A = +U_S$$

$$U_{EP} < U_{REFN} \rightarrow U_A = -U_S$$

invertierend



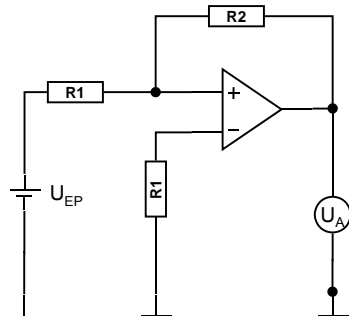
$$U_{EN} > U_{REFP} \rightarrow U_A = -U_S$$

$$U_{EN} < U_{REFP} \rightarrow U_A = +U_S$$

Operationsverstärkerschaltungen

Komparator für den Nulldurchgang mit Hysterese

nichtinvertierend

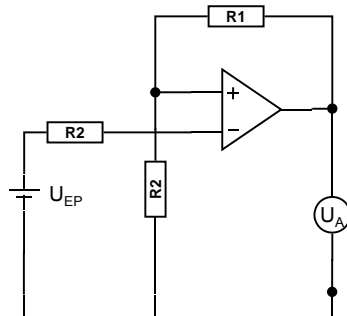


$$U_X = \frac{R_1}{R_2} \cdot U_S$$

$$U_{EP} \leq -U_X \rightarrow U_A = -U_S$$

$$U_{EP} \geq +U_X \rightarrow U_A = +U_S$$

invertierend



$$U_X = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_S$$

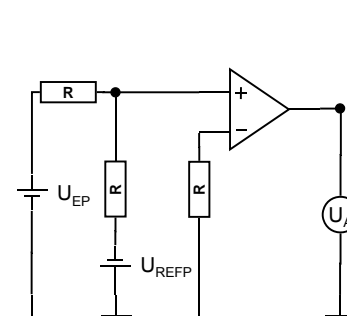
$$U_{EN} \leq -U_X \rightarrow U_A = +U_S$$

$$U_{EN} \geq +U_X \rightarrow U_A = -U_S$$

Operationsverstärkerschaltungen

Komparator mit Referenzspannung ohne Hysterese

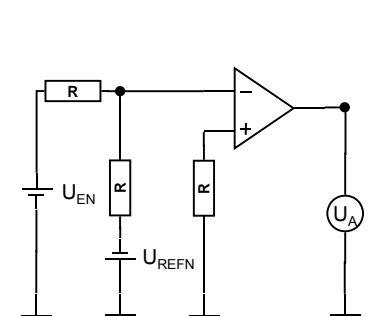
nichtinvertierend



$$U_{EP} - U_{REFP} > 0V \rightarrow U_A = +U_S$$

$$U_{EP} - U_{REFP} < 0V \rightarrow U_A = -U_S$$

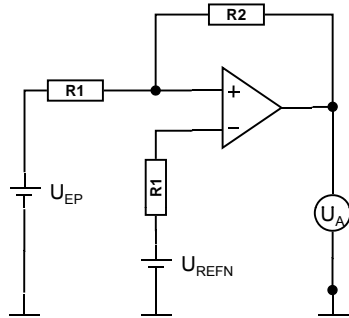
invertierend



$$U_{EN} - U_{REFN} > 0V \rightarrow U_A = -U_S$$

$$U_{EN} - U_{REFN} < 0V \rightarrow U_A = +U_S$$

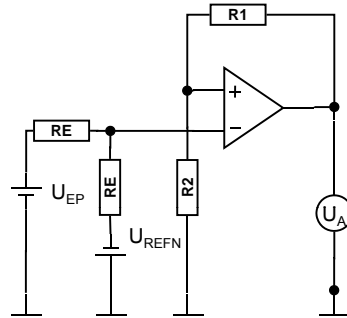
nichtinvertierend



$$U_{HH} = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + U_S \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

$$U_{HL} = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) - U_S \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

invertierend

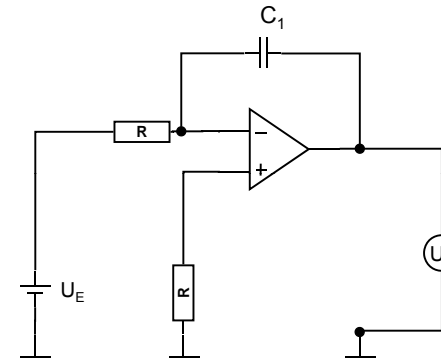


$$U_X = U_S \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

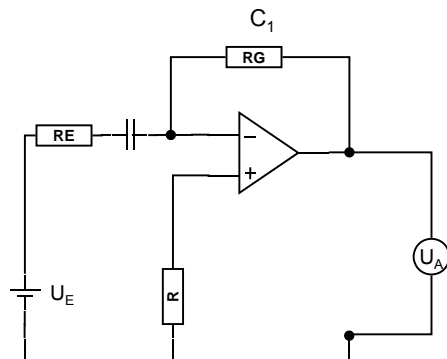
$$U_{HH} = U_{REF} + 2 \cdot U_X$$

$$U_{HL} = U_{REF} - 2 \cdot U_X$$

$$H = 4 \cdot U_X$$

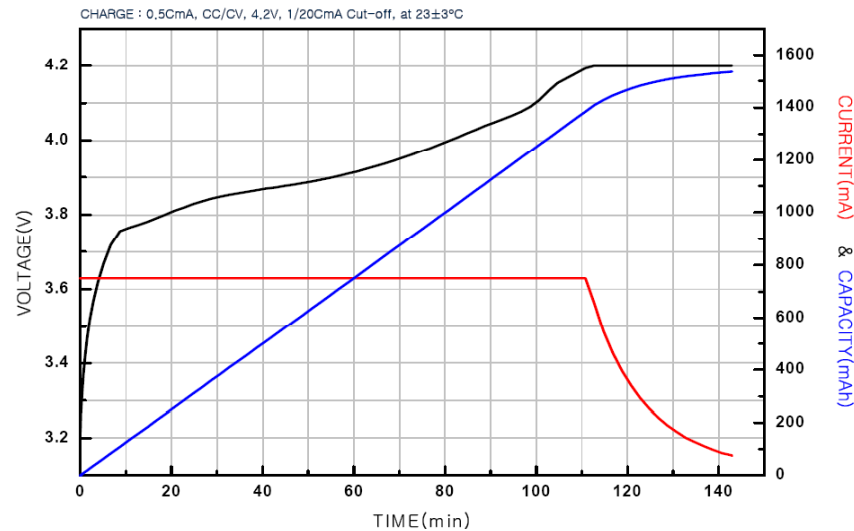
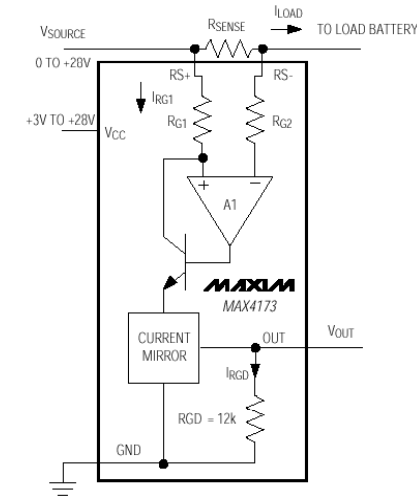
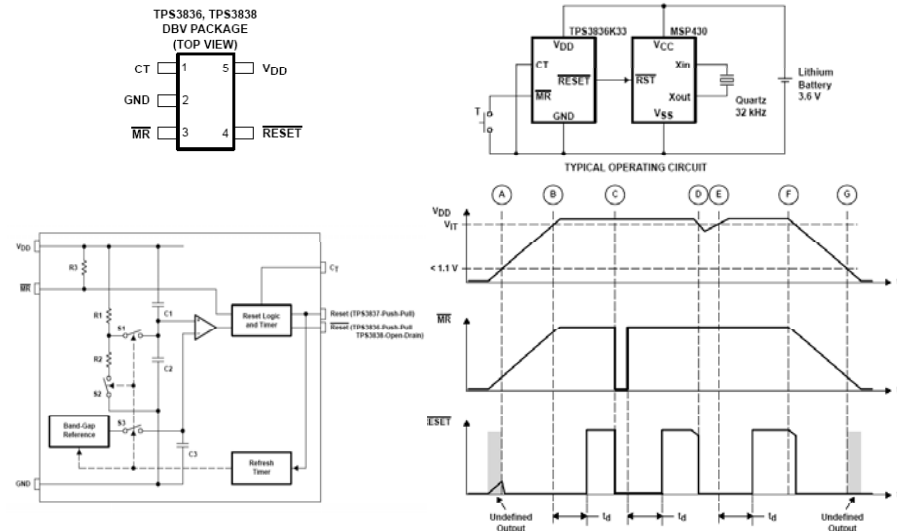


$$U_{n+1} = -\frac{U_E}{R_1 \cdot C_1} \cdot t + U_n$$

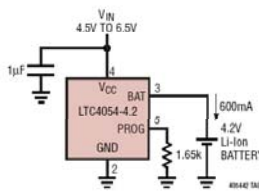


$$U_A = U_E \cdot \frac{R_G}{R_E}$$

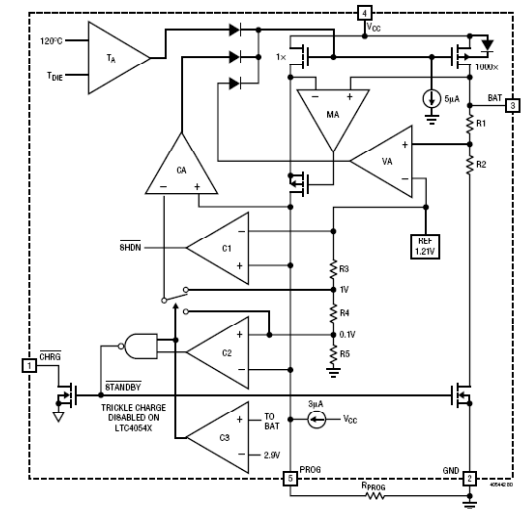
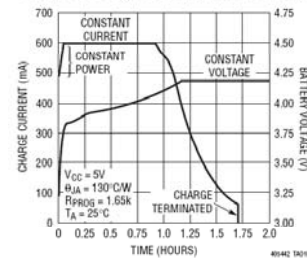
- Spannungsüberwachung
- Strommessung
- Ladezustandskontrolle
- Automatische Verstärkungssteuerung
- Digitale Verstärkungssteuerung
- Potentialtrennung
- Analoges Rechnen
- AD/DA-Wandler

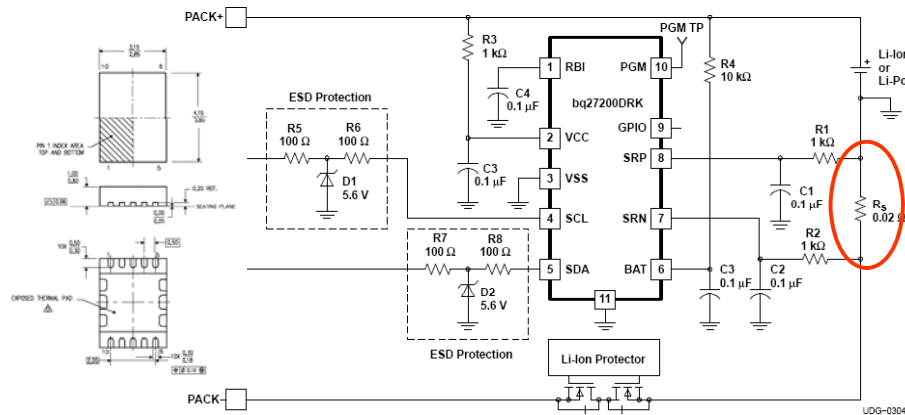
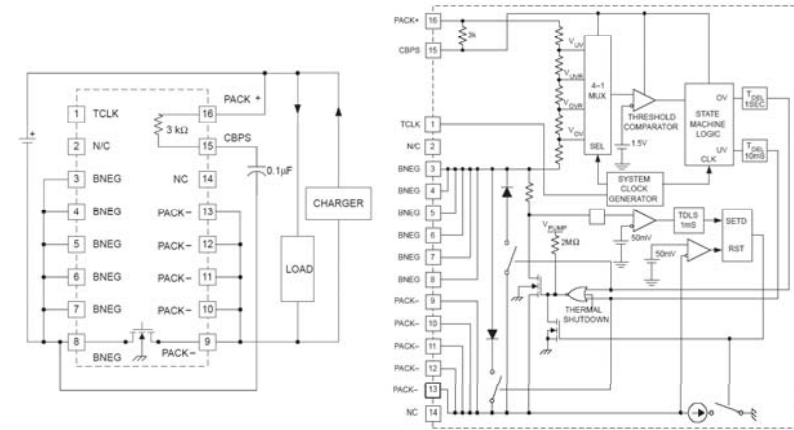
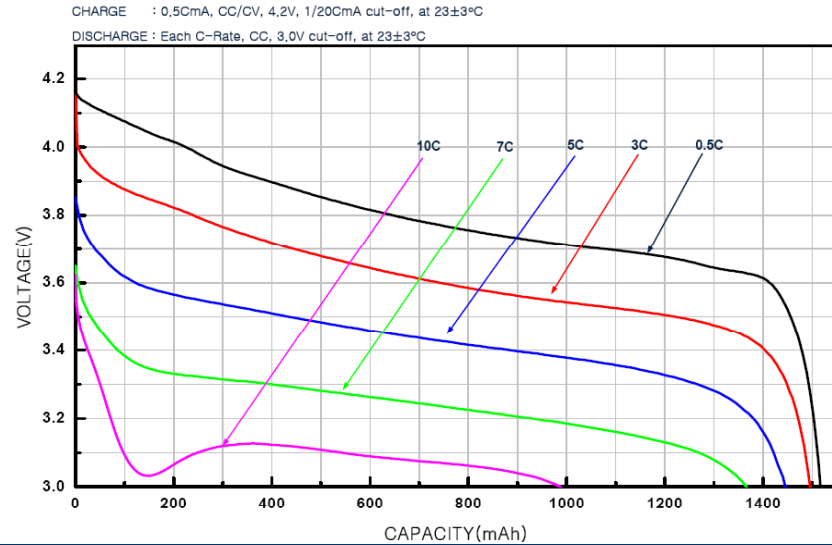


600mA Single Cell Li-Ion Charger

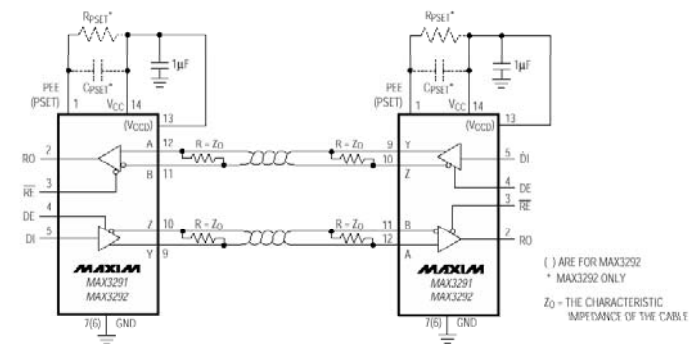
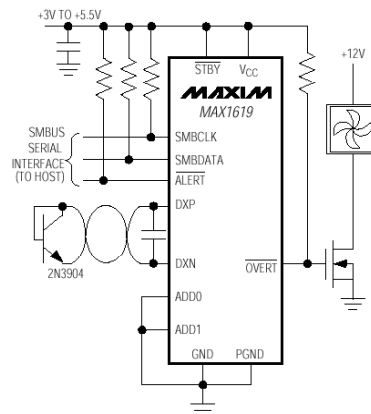
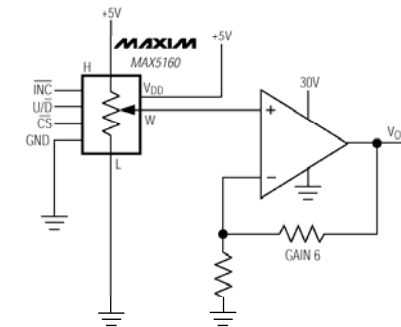
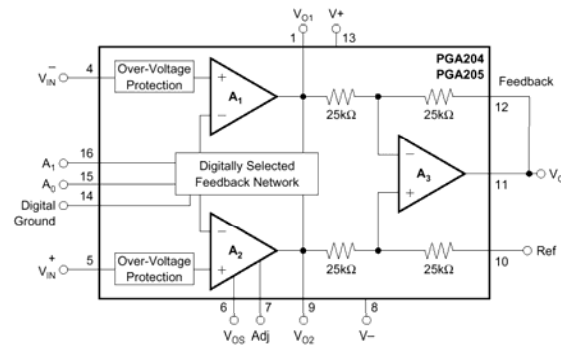


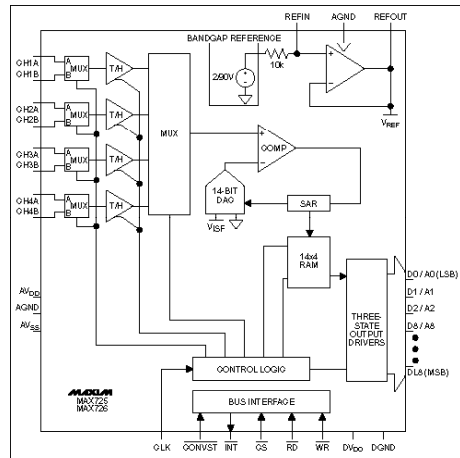
Complete Charge Cycle (750mAh Battery)





RAM Registers				
0x2C	CSOC	Compensated State-of-Charge	%	R
0x2B - 0x2A	CYCT	Cycle Count Total High - Low Byte	Cycles	R
0x29 - 0x28	CYCL	Cycle Count Since Learning Cycle High - Low Byte	Cycles	R
0x27 - 0x26	TTECP	Time-to-Empty At Constant Power High - Low Byte	Minutes	R
0x25 - 0x24	AP	Average Power High - Low Byte	29.2 μV ² (2)	R
0x23 - 0x22	SAE	Available Energy High - Low Byte	29.2 μV ² h(2)	R
0x21 - 0x20	MLTT	Max Load Time-to-Empty High - Low Byte	Minutes	R
0x1F - 0x1E	MLI	Max Load Current High - Low Byte	3.57 μV ⁽¹⁾	R
0x1D - 0x1C	STTE	Standby Time-to-Empty High - Low Byte	Minutes	R
0x1B - 0x1A	SI	Standby Current High - Low Byte	3.57 μV ⁽¹⁾	R
0x19 - 0x18	TTF	Time-to-Full High - Low Byte	Minutes	R
0x17 - 0x16	TTE	Time-to-Empty High - Low Byte	Minutes	R
0x15 - 0x14	AI	Average Current High - Low Byte	3.57 μV ⁽¹⁾	R
0x13 - 0x12	LMD	Last Measured Discharge High - Low Byte	3.57 μVh ⁽¹⁾	R
0x11 - 0x10	CACCT	Temperature Compensated CACD High - Low Byte	3.57 μVh ⁽¹⁾	R
0x0F - 0x0E	CACD	Discharge Compensated NAC High - Low Byte	3.57 μVh ⁽¹⁾	R
0x0D - 0x0C	NAC	Nominal Available Capacity High - Low Byte	3.57 μVh ⁽¹⁾	R
0x0B	RSOC	Relative State-of-Charge	%	R
0x0A	FLAGS	Status Flags		R
0x09 - 0x08	VOLT	Reported Voltage High - Low Byte	mV	R
0x07 - 0x06	TEMP	Reported Temperature High - Low Byte	0.25 °K	R
0x05 - 0x04	ARTTE	At-Rate Time-to-Empty High - Low Byte	Minutes	R
0x03 - 0x02	AR	At-Rate High - Low Byte	3.57 μV ⁽¹⁾	R/W
0x01	MODE	Device Mode Register		R/W
0x00	CTRL	Device Control Register		R/W





- Aufbau und Funktion eines Operationsverstärkers
- Ableitung der Verstärkung
- Grundsaltungen
 - Nichtinvertierender Gleichspannungsverstärker
 - Nichtinvertierender Wechselspannungsverstärker
 - Invertierender Addierer
 - Invertierender Differenzverstärker
 - Komparator
 - Nicht invertierend für den Nulldurchgang
 - Nicht invertierend für den Nulldurchgang und Hysterese
 - Nicht invertierend mit Referenzspannung
 - Nicht invertierend mit Referenzspannung und Hysterese