

## 7. Filter

## Aufgabe von Filtern

### Amplitude

- Sperren einer Frequenz oder eines Frequenzbereichs
- Durchlassen einer Frequenz oder eines Frequenzbereichs
- möglichst kleine Phasenänderung

### Phase

- Phasenverschiebung für eine Frequenz: Oszillator
- Phasengangkorrektur
- möglichst kleine Amplitudenänderung

### Einsatz als

Hochpass, Tiefpass, Bandpass, Resonanzkreis, Sperrkreis

## Realisierung von Filtern

Frequenzabhängige Impedanzen bilden Spannungsteiler

- 1) RC oder RL ?  
Bis 1 MHz RC, darüber RL: Baugröße, Gewicht  
Aber: RLC-Frequenzweichen in Boxen
- 2) Ausgleichen der Dämpfung: Aktive Filter mit Operationsverstärker, Integrierte Filterbausteine,
- 3) Spezielle Anwendungen: Quarzfilter, Oberflächenwellen

## Filter in der Messelektronik

Trennung von Gleichstrompegeln

Eliminierung von Störsignalen

Driftreduktion

50 Hz-Notchfilter

Taktfrequenz aus digitalen Schaltungsteilen

HF-Einstreuung über Kabel

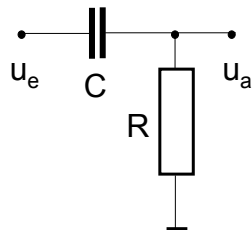
Unterdrückung von Trägerfrequenzen

Antialiasing-Filter

Vor Digitalisierung anzuwenden, um

neue Frequenzkomponenten zu verhindern

## Passiver Hochpass



### Messtechnisches Ziel

Abtrennung von Gleichspannungen  
Reduktion von Drift

$$f_g = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{Grenzfrequenz(-3dB)}$$

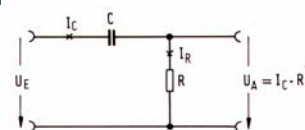
### R klein:

niedriges Eigenrauschen  
kleine Eingangsimpedanz

### R groß:

hohes Eigenrauschen  
hohe Ausgangsimpedanz

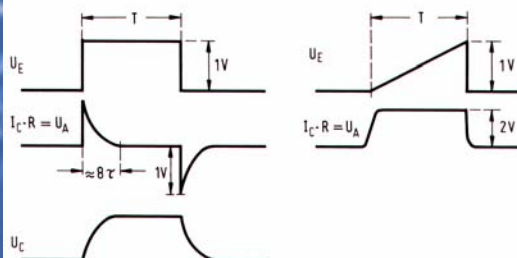
## RC-Hochpass als Differenzierer



$$i_c = \frac{\partial Q}{\partial t} = C \frac{\partial u_c}{\partial t}$$

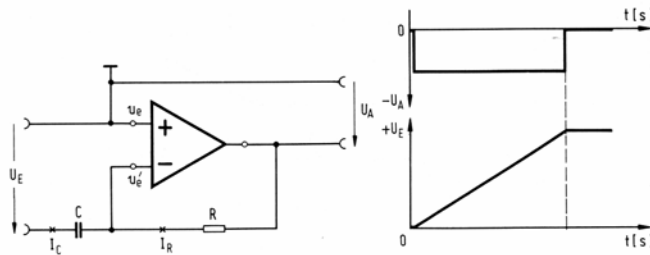
$$u_A = u_R = R I_c = RC \frac{\partial u_c}{\partial t}$$

$$u_A \approx RC \frac{\partial u_E}{\partial t}$$



$u_c = u_E$  für Frequenzen  
von  $u_E$  einen Faktor 10  
unter der Grenzfrequenz,  
im Sperrbereich des HP!

## Differenzierer mit OPV



Ladestrom für C:

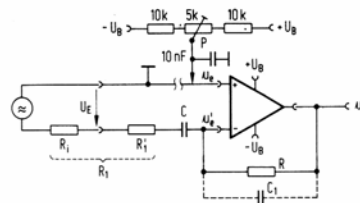
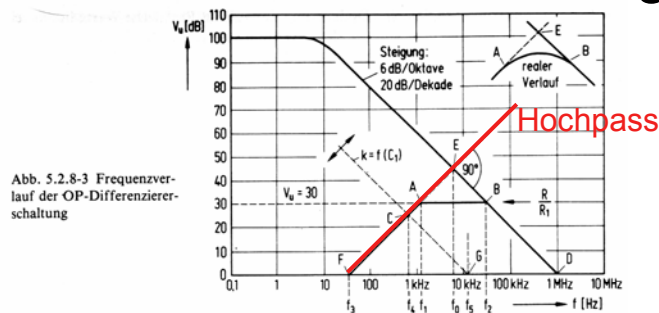
$$I_C = C \frac{\Delta U_E}{\Delta t}$$

$$u_A = I_C R$$

Rampe an Eingang erzeugt (invertiertes) Rechteck am Ausgang

$$f_{in} \ll \frac{1}{RC}$$

## Differenziererschaltung



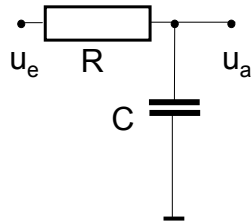
$R_1$  unterdrückt Schwingneigung:  
Verstärkung  $R/R_1$   
 $C_1$  gegen Rauschen, Tiefpass !

$$R_1 + R_1 = 1 \text{ k}\Omega, RC \Rightarrow f_3, R_1 C \Rightarrow f_1$$

$$f_0 = \pi f_1, f_2 = \pi f_0, R_1 C_1 \Rightarrow f_5$$

7

## Passiver Tiefpass



### messtechnisches Ziel

Abtrennung von Hochfrequenz-Störungen

$$f_g = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{Grenzfrequenz(-3dB)}$$

#### R klein:

niedriges Eigenrauschen  
kleine Eingangsimpedanz

#### R groß:

hohes Eigenrauschen  
hohe Ausgangsimpedanz

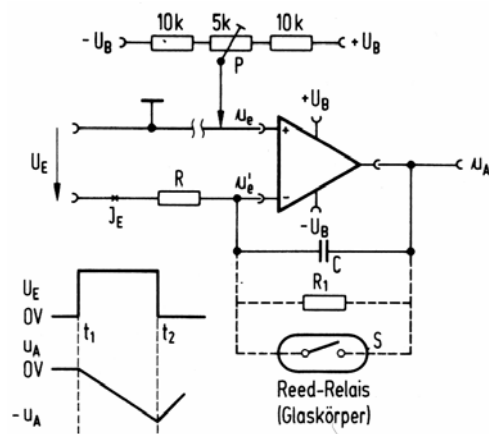
emg  
MEL

7

## RC-Tiefpass als Integrator

emg  
MEL

## Integrator



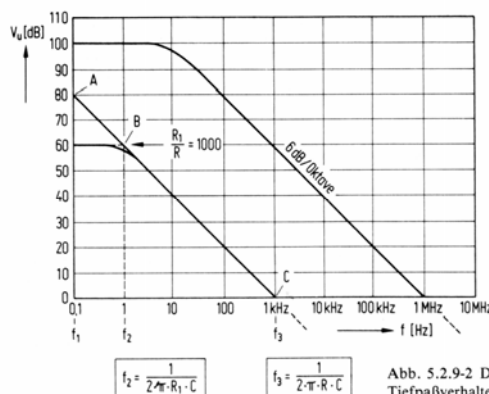
$$u_A = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} u_E dt$$

für Frequenzen  $f_{\text{sig}}$  von  $u_E$  oberhalb der zehnfachen Grenzfrequenz, d.h.  $\tau = RC > 10 T_{\text{sig}}$

Nur wenn Eingangsströme des OPV zu vernachlässigen sind ! (FET)

REED-Relais: Reset

## Dimensionierung



$R_1$  bestimmt  $f_2$   
 $R$  bestimmt  $f_3$

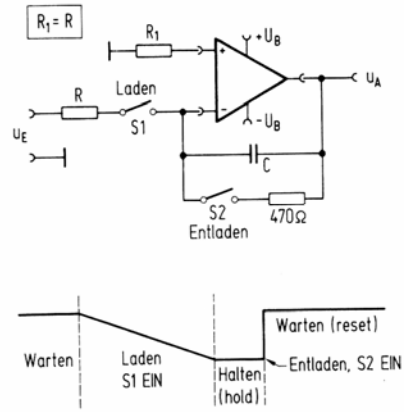
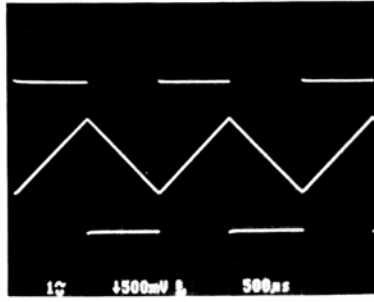
$R_1/R$  bestimmt  
Verstärkung

Werte um typ.  $1 \text{ M}\Omega$

Abb. 5.2.9-2 Das Bode-Diagramm  
Tiefpaßverhalten des Integrierte

7

# Integrator-Schaltung



emg  
MEL

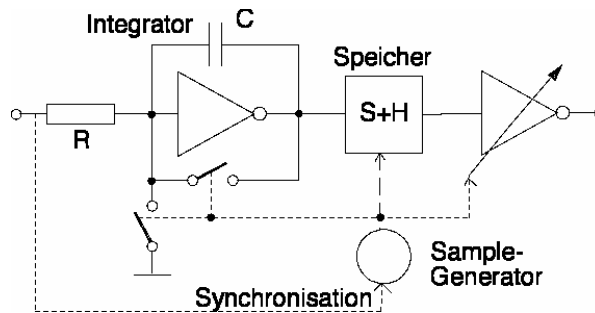
7

Mittelwerte

emg  
MEL

7

## Mittelwertbildung



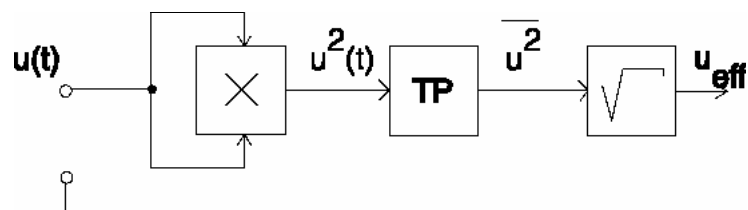
Integration, integrierten Wert halten und mit einstellbarem Verstärker proportional zu  $1/T$  ausgeben  $\Rightarrow$  Mittelwert

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

emg  
MEL

7

## Effektivwertmessung



Effektivwertmessung ist schwierig (Nadelpulse)  
Quadrieren - Mittelwert bilden - Wurzel ziehen

Wurzelziehen: Quadrierer in Rückkoppelleitung eines OPV

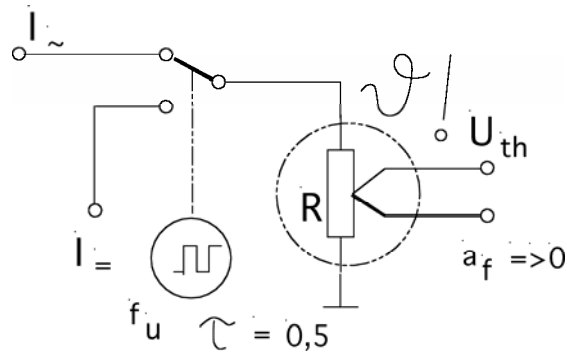
Fehler nicht unter 0,1 %

emg  
MEL



7

## Wärmevergleich

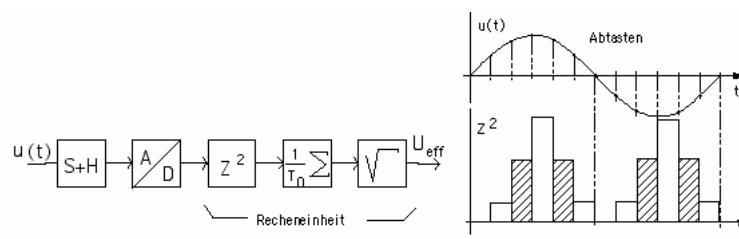


Beide Ströme gleiche Erwärmung:  $I=$  hat Effektivwert erreicht

emg  
MEL

7

## Digitale Effektivwertmessung



A/D-Umsetzer: Digitale Mittelwertberechnung

emg  
MEL

# Filter

## Filterdämpfung

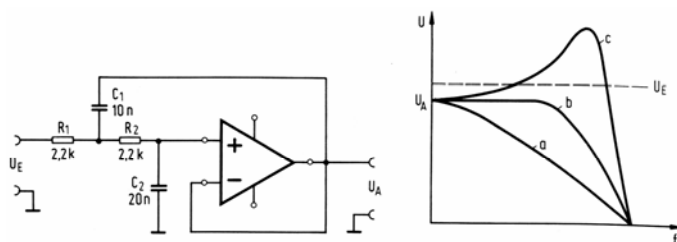


Abb. 8.3.3-1 Tiefpaß 2. O. Prinzip mit verschiedenen Dämpfungswerten

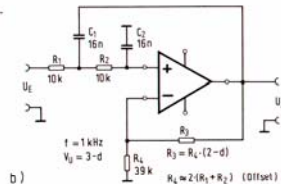
a stark gedämpft  $d$  groß; ( $C_1 < C_2$ )  
 b kritisch gedämpft  $d \approx \sqrt{2}$ ; ( $C_1 \approx C_2$ )  
 c unterkritisch  $d < 1$ ; ( $C_1 > C_2$ )

- Dämpfung  $d$  aus DGI bestimmt den Frequenzgang  
 -> Regelungstechnik
- Bessel-Filter:  $d \geq \sqrt{3}$
- Butterworth-Filter  $d = \sqrt{2}$
- Tschebyscheff-Filter  $d = 1$

## Aktiver Tiefpass 2. Ordnung

Abb. 8.3.5-1b Tiefpaß 2. O. mit gleichen Bauelementen  $f = 1 \text{ kHz}$

Sallen-Key-Filter



Verstärkungsfaktor bestimmt Gesamt-Dämpfung und damit den Filtertyp

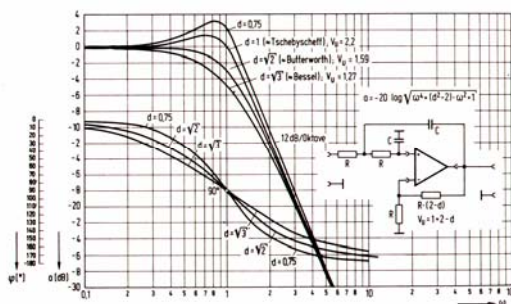


Abb. 8.3.5-2 Amplituden- und Phasenverlauf beim Tiefpaß 2. O. mit unterschiedlicher Dämpfung

$$R_1 = R_2 = R$$

$$C_1 = C_2 = C$$

$$f_g = 1/2\pi RC$$

$$V = 1 + R_3/R_4$$

Verstärkung 3:  
Oszillation

## Filter höherer Ordnung

Bessel

- Nicht so steil wie Butterworth
- Kein Überschwingen bei Rechteck
- Konstante Gruppenlaufzeit bis Grenzfrequenz

Butterworth

- Kompromiss aus Steilheit und Welligkeit im Durchlassbereich

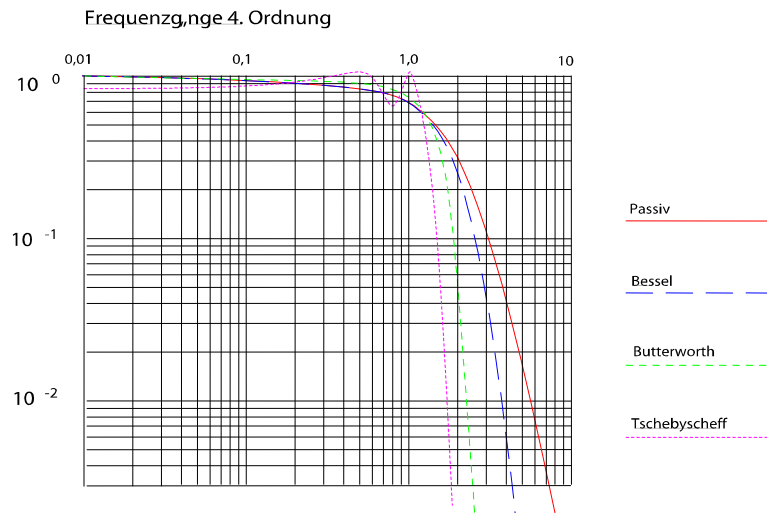
Tschelbyscheff

- Sehr steile Charakteristik, aber starke Welligkeit im Durchlassbereich

Achtung: Erst Vorverstärken, dann Filtern (Rauschen)

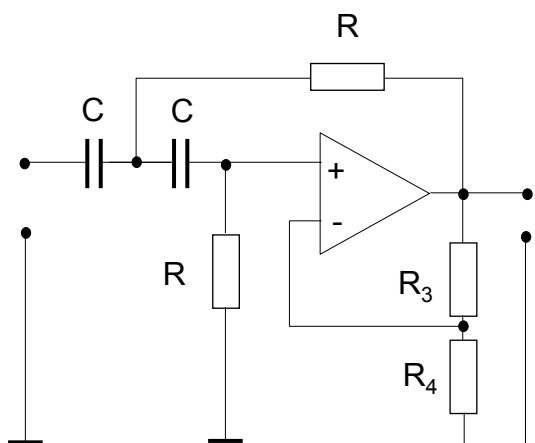
7

## Filtercharakteristiken

emg  
MEL

7

## Aktiver Hochpass 2. Ordnung



Verstärkungsfaktor  
bestimmt Gesamt-  
Dämpfung und damit  
den Filtertyp

$$f_g = 1/2\pi RC$$

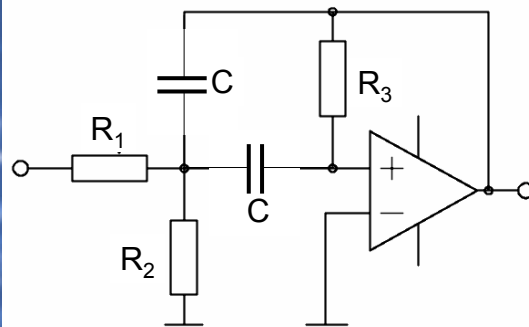
$$V = 1 + R_3/R_4$$

Verstärkung 3:  
Oszillation

emg  
MEL

7

## Aktive Bandpass-Filter



Delyiannis-Friend-  
Grundschiung für  
Bandpass-Filter 2.Ord.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi C \sqrt{(R_1 \parallel R_2) R_3}}$$

$$H_0 = \frac{R_3}{2R_1} \text{ Verstärkung im Band}$$

$$B = \frac{1}{\pi R_3 C} \text{ Bandbreite}$$

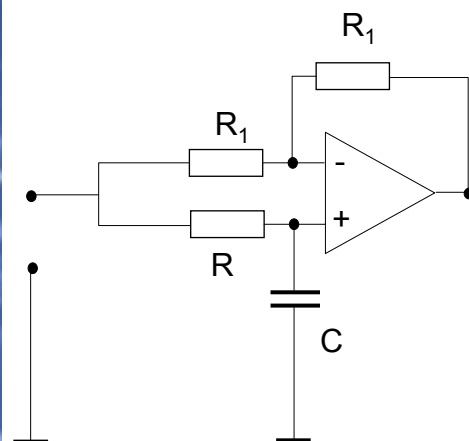
$$Q = \frac{f_0}{B} \text{ Güte}$$

$$R_3 = \frac{Q}{\pi f_0 C} \quad R_1 = \frac{R_3}{2H_0} \quad R_2 = \frac{R_3}{4Q^2 - 2H_0}$$

emg  
MEL

7

## Phasenschieber (= Allpass)



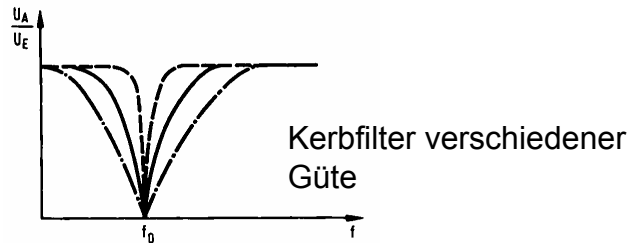
- DC:  $R_1$  stromlos, Eingänge gleich, Ausgang folgt Eingang Nichtinvertierender Verstärker mit  $V = 1$

- Hohe Frequenz: Invertierender Verstärker mit  $V = -1$

- Dazwischen schiebt Phase mit  $\Delta\varphi = -2 \arctan(\omega RC)$

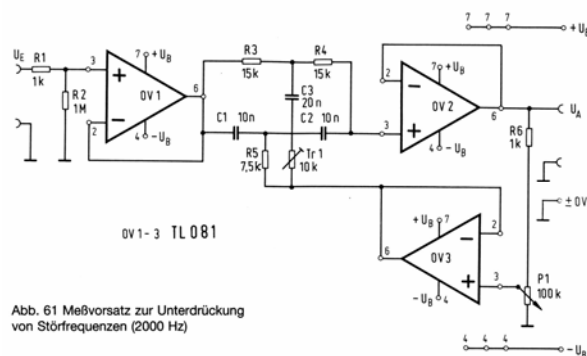
emg  
MEL

## Notch Filter



„Kerb“filter, der sehr schmalbandig die Frequenzanteile um eine Sperrfrequenz herum unterdrückt.

## Notch Filter

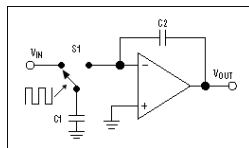


Aktives Doppel-T-Filter: Impedanzwandler verbinden einen Tiefpass (R3,C3,R4) und einen Hochpass (C1,R5,C2). Die Gegenkopplung über den OV3 stellt die Güte ein. Einstellbare Güte mit P1.

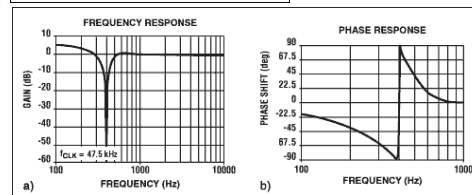
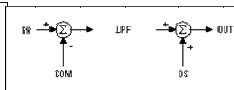
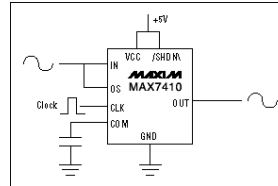
## Integrierte Notch Filter

Sperrkreis durch Addition von Tiefpass und Hochpass.

Geschaltete Kapazität wirkt wie Widerstand, wobei die Genauigkeit von Kapazitätsverhältnis und Schaltfrequenz bestimmt wird:



$$\omega_0 = \frac{1}{RC_2} = \frac{C_1 f_C}{C_2} \quad R = \frac{V_{IN}}{I} = \frac{1}{C_1 f_C} \quad I = Qf_C = C_1 V_{IN} \cdot f_C$$



## Zusammenfassung

- Hochpass - Differenzierer
- Tiefpass - Integrator
- Mittelwertmessung
- Effektivwertmessung
- Filter

Aktive Filter  
Filter höherer Ordnung  
Phasenschieber (Allpass)  
Notchfilter

Nächste Vorlesung: Störsignale