



## OP: Vom Lehrbuch zur Wirklichkeit

Viele in Lehrbüchern abgebildete Schaltungen sind leicht zu berechnen, aber schlecht zu gebrauchen. Anhand der besonders populären Beispiele „Integrator“ und „Differenzierer“ sollen die Modifikationen gezeigt werden, die zu praxistauglichen Schaltungen führen.

Die rechts abgebildete Schaltung produziert unter idealen Voraussetzungen eine Ausgangsspannung von  $U_A = \frac{-1}{RC} \int_0^T U_E dt$ . Aus drei Gründen ist sie jedoch kaum praxistauglich. Der erste ist, dass schon eine kleine Offset-Spannung  $U_{offset}$  genügt, um den Integrator zu einem dauerhaften Hoch- oder Tiefpegel zu veranlassen. Denn für einen OP mit endlicher Offsetspannung wird die Ausgangsspannung

$$U_A = \frac{-1}{RC} \left( \int_0^T U_E dt + U_{offset} T \right)$$

Für große Zeiten T wird die Ausgangsspannung „beliebig“ groß, in der Realität also knapp unter der Versorgungsspannung und unabhängig von der Eingangsspannung. An der letzten Formel kann man auch schon das zweite Problem erkennen: Wenn die Eingangsspannung einen Gleichspannungsanteil enthält, kann  $U_A$  ebenfalls „beliebig“ groß werden. Der dritte Fehler der Schaltung ist eine künstliche Strom-Asymmetrie in der OP Eingangsstufe. Es kann sehr viel leichter Strom in den + Eingang fließen als in den - Eingang.

Die Stromasymmetrie kann sehr gemildert werden, indem dem + Eingang ein Widerstand mit  $R_1 \approx R$  vorgeschaltet wird. Die ersten beiden Probleme können behoben werden, indem zu dem Kondensator ein Widerstand  $R_2$  parallel geschaltet wird. Für harmonische Eingangssignale gibt dies einen Spannungsübertrag von

$$\frac{u_A}{u_E} = \frac{1}{j\omega RC + R/R_2}$$

Damit ergibt sich die Dimensionierung für  $R_2$ : klein genug um die maximale Verstärkung zu begrenzen und groß genug, um den Frequenzgang nicht zu stören. Eine Daumenregel wäre  $R_2 \approx 10 \cdot 1/(\omega_{min} C)$ , wobei  $\omega_{min}$  die kleinste Frequenz des Nutzsignals ist. Für weitere Berechnungen der Schaltung werden dann die Zusatzwiderstände schlicht ignoriert.

Das Lehrbuch-Differenzierer hat neben der Strom-Asymmetrie ein HF Problem. Dies sieht man schon an der allgemeinen Formel

$$U_A = -RC \frac{dU_E}{dt}$$

und erst recht am Spannungsübertrag:

$$\frac{u_A}{u_E} = j\omega RC$$

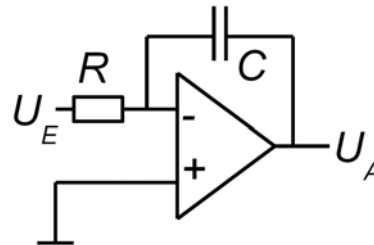
Für große Frequenzen wächst die Verstärkung grenzenlos. „HF-Müllsampler“ wäre ein angemessener Titel.

Auch hier helfen zwei Widerstände, wiederum mit  $R_1 \approx R$  und  $R_2$  groß genug um die maximale Verstärkung zu begrenzen und klein genug, um den Frequenzgang nicht zu stören, zum Beispiel

$$R_2 \approx 1/(10 \cdot \omega_{max} C)$$

$$\frac{u_A}{u_E} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega R_2 C}$$

Also: Trauen Sie keinem Lehrbuch und schon gar keinem Professor!



Fachbereich Elektrotechnik  
und Informatik  
Elektroniklabor  
Prof. Dr. Martin Poppe

