

# Automatische Offsetkorrektur bei logarithmischen Strom-Spannungs-Wandlern

C. Kühnel, KDT, Dresden

**Deskriptoren:** Elektrische Grundschaltungen und Schaltungsprinzipien; Strom-Spannungs-Wandler, logarithmisch; Offsetkorrektur, automatisch

Logarithmische Strom-Spannungs-Wandler, dienen neben der eigentlichen Wandlung der Kompression des Dynamikbereichs der als Strom vorliegenden Eingangsgröße. Bei der Verarbeitung von Strömen im Bereich weniger Picoampere, die am unteren Ende des Objektivleuchtdichtebereichs von Lichtmeßeinrichtungen moderner Kameras auftreten können, bewirken die Offsetspannungen der in den Eingangsstufen der Verstärker zum Einsatz kommenden Feldeffekttransistoren beträchtliche Abweichungen vom geforderten statischen Übertragungsverhalten. Da die Offsetgrößen abhängig von Temperatur, (Lang-) Zeit und Betriebsspannung sind, stellt ein einmaliger Abgleichvorgang keine befriedigende Lösung für die Offsetkorrektur dar. Der Einfluß der Betriebsspannung auf die Offsetgrößen läßt sich durch die Stabilisierung der Betriebsspannungen hinreichend unterdrücken. Temperatur- und zeitliche Drift der Offsetgrößen bleiben als Fehlergrößen wirksam. Eine u.U. mögliche Thermostatierung zur Minimierung der thermischen Drift soll aus Gründen der ungünstigsten Energiebilanz für batteriebetriebene Geräte nicht betrachtet werden.

## 1. Einfluß der Offsetspannung auf das Übertragungsverhalten des Strom-Spannungs-Wandlers

Betrachtet wird eine Strom-Spannungs-Wandlerschaltung nach Bild 1. Mit Bild 1 a) wird der lineare, mit Bild 1 b) der logarithmische Strom-Spannungs-Wandler beschrieben. Die Signalquelle

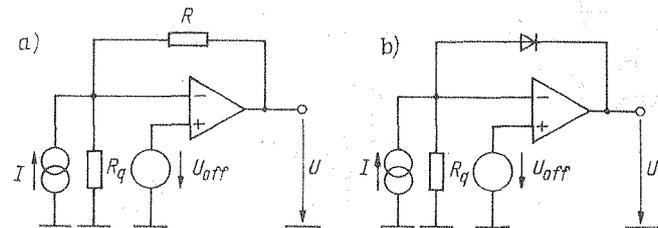
wird durch die Stromquelle  $I$  und den Quellwiderstand  $R_q$  charakterisiert. Das statische Verhalten des Verstärkerelements (Operationsverstärker mit FET-Eingang) soll als ideal angenommen werden, da die Offsetspannung als hier maßgebliche Offsetgröße durch die Spannungsquelle  $U_{off}$  berücksichtigt wird.

Als Rückführung des logarithmischen Strom-Spannungs-Wandlers dient formal eine Diode. Der für die Ableitung des Übertragungsverhaltens benutzte Zusammenhang  $I_D = I_S \exp \frac{U_D}{U_T}$  wird nur bei Verwendung von Transistoren für die Logarithmierung in einem großen Dynamikbereich des Eingangsstromes gesichert.

Bild 1. Schaltungsprinzip des Strom-Spannungs-Wandlers  
a) linearer Wandler, b) logarithmischer Wandler

$$-U = R \left\{ I - U_{off} \left( 1 + \frac{R}{R_q} \right)^{-1} \right\} \quad (1)$$

$$-U = U_T \ln \frac{I - U_{off} R_q}{I_S} - U_{off} \quad (2)$$



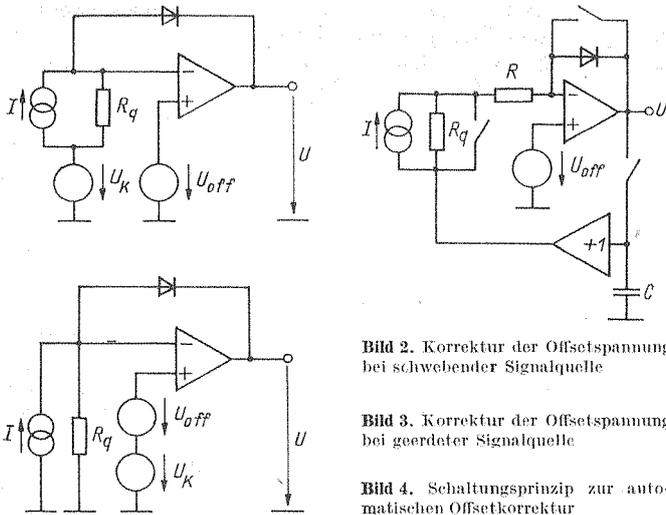


Bild 2. Korrektur der Offsetspannung bei schwebender Signalquelle

Bild 3. Korrektur der Offsetspannung bei geerdeter Signalquelle

Bild 4. Schaltungsprinzip zur automatischen Offsetkorrektur

Durch die Gln. (1) und (2) (Bild 1) kann unter diesen Voraussetzungen das Übertragungsverhalten beider Wandler beschrieben werden. Für den linearen Wandler ergeben sich einfache, in der Technik integrierter MOS-Verstärker auch praktisch eingeführte Möglichkeiten für eine Kompensation der Offsetspannung an einer theoretisch beliebigen Stelle einschließlich der Folgeschaltung [1] [2]. Da beim logarithmischen Wandler als Sonderfall einer nichtlinearen Schaltung das Superpositionsprinzip keine Gültigkeit hat, muß von den bei linearen Schaltungen üblichen Korrekturmöglichkeiten abgegangen werden.

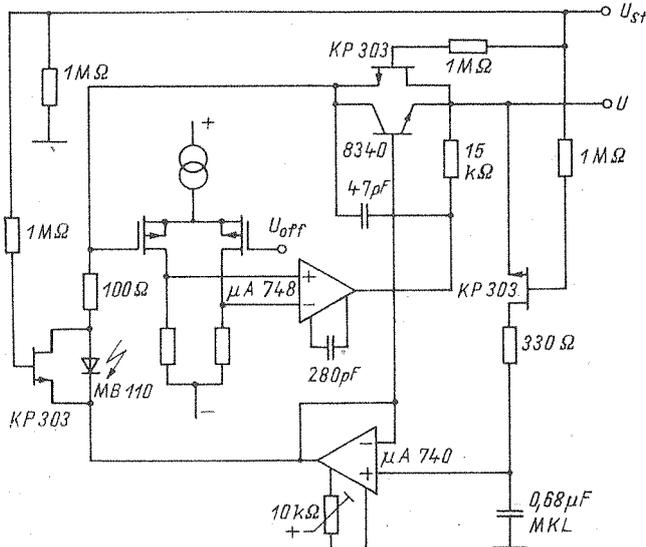
## 2. Korrektur der Offsetspannung beim logarithmischen Strom-Spannungs-Wandler

Ausgehend von Bild 1 b und Gl. (2) wird deutlich, daß eine wirksame Offsetkorrektur nur am Ort des Auftretens der Offsetspannung und damit direkt am Verstärkereingang, vor der Logarithmierung vorgenommen werden kann. Ziel muß es zwangsläufig sein, die verbleibende Fehlspannung über dem Quellwiderstand zu minimieren. Zur Kompensation der Offsetspannung bieten sich zwei Punkte der im Bild 1 b) gezeigten Schaltung an. Wird, wie im Bild 2 gezeigt, mit einer schwebenden Signalquelle gearbeitet, erhält man für die Ausgangsspannung die Gleichung

$$-U = U_T \ln \frac{I + \frac{U_K - U_{off}}{R_q}}{I_s} - U_{off} \quad (3)$$

$U_T$  bezeichnet die Temperaturspannung ( $U_T = kT/e$ ) und  $I_s$  den Sättigungsstrom des Transistors.

Bild 5. Erprobte Schaltung



Für den Abgleichfall  $U_K - U_{off} = 0$  gilt mit Gl. (3)

$$-U = U_T \ln \frac{I}{I_s} - U_{off} \quad (4)$$

Die Offsetspannung  $U_{off}$  ist im Ausgangssignal nur noch als additive Komponente enthalten und kann durch die üblichen Maßnahmen ausgeglichen werden.

Wird als Kompensationspunkt der nichtinvertierende Eingang des Operationsverstärkers gewählt, ergeben sich die im Bild 3 dargestellten Verhältnisse.

Für die Ausgangsspannung erhält man hier

$$-U = U_T \ln \frac{I - \frac{U_{off} + U_K}{R_q}}{I_s} - (U_{off} + U_K) \quad (5)$$

Für den Abgleichfall  $U_{off} + U_K = 0$  gilt mit Gl. (5)

$$-U = U_T \ln \frac{I}{I_s}$$

Mit der im Bild 3 angegebenen Kompensationsart wird die Offsetspannung vollständig aus dem Ausgangssignal eliminiert. Unabhängig vom zu wählenden Kompensationspunkt ist der erste für die Korrektur erforderliche Schritt die Messung der momentanen Offsetspannung (sample-phase). Der gemessene Offsetspannungswert wird danach gespeichert und entsprechend der Bilder 2 oder 3 aufgeschaltet (hold-phase). Eine Reihe von Schaltern sorgt für die Umschaltung der Betriebsarten der Schaltung. Bild 4 zeigt das Schaltungsprinzip, wobei mit schwebender Signalquelle nach Bild 2 gearbeitet wird [3]. Sind die Schalter geschlossen, nimmt die Ausgangsspannung  $U$  und damit die Spannung über der Kapazität  $C$  den Wert der Offsetspannung  $U_{off}$  an. Der Strom  $I$  der Signalquelle wird kurzgeschlossen und ist damit unwirksam. Nach dem Öffnen der Schalter ist die Speicherkapazität  $C$  vom Ausgang des Operationsverstärkers getrennt. Der Spannungsfollower garantiert eine vernachlässigbare Belastung der Speicherkapazität  $C$  und sichert damit eine große Speicherzeitkonstante. Die Logarithmierdiode übernimmt die Rückführungsfunktion. Unter der Bedingung  $R \ll R_q$  ist mit dieser Maßnahme der Einfluß der Offsetspannung im Zusammenwirken mit dem Quellwiderstand eliminiert.

Die Offsetgrößen des als Spannungsfollower geschalteten Operationsverstärkers bewirken zusätzliche Fehler, wobei aber durch geeignete Auswahl des Operationsverstärkertyps — MOS-Eingangsstufen sind an dieser Stelle nicht erforderlich — der verbleibende Fehler klein gehalten werden kann.

## 3. Praktische Ergebnisse

Zum praktischen Nachweis der Funktionstüchtigkeit der geschilderten Offsetkorrektur wurde eine Schaltung nach Bild 5 untersucht. Als Analogschalter dienen hier der Einfachheit halber Sperrschicht-Feldeffekttransistoren. Die von idealen Analogschaltern in sehr starkem Maße abweichenden Kennwerte der verwendeten SFET KP 303 schränken den Bereich des Eingangstromes  $I$  zu niedrigen Pegeln hin ein, lassen aber dennoch den prinzipiellen Nachweis zur Funktionstüchtigkeit zu. Um eine möglichst lange hold-phase zu erreichen, wurde als Spannungsfollower ein Operationsverstärker des Typs  $\mu A 740$  sowie ein großer Kapazitätswert für den Speicherkondensator ( $C = 680 \text{ nF}$ ) eingesetzt. Durch diese Maßnahmen ergaben sich (für die Erprobung günstige) Haltezeiten  $> 10 \text{ s}$ .

Zum Vergleich der erreichten Ergebnisse ist im Bild 6 die Transferringlinie eines logarithmischen Strom-Spannungs-Wandlers ohne Maßnahmen zur Offsetkorrektur angegeben. Als Stromquelle diente ein Optokoppler MB 110, weshalb der Quellwiderstand  $R_q$  von der wirksam werdenden Offsetspannung abhängig ist. Auf Grund der im Bild 7 gezeigten Diodenkennlinie wird der wesentlich stärkere Einfluß positiver Offsetspannungen im Bild 6 deutlich. Die Kennlinienscherung, die auch bei kompensierter Offsetspannung ( $U_{off} = 0$ ) vorhanden ist, ist auf Leckströme zurückzuführen. Werden nun die bereits beschriebenen Mittel der Offsetkorrektur verwendet, erhält man das im Bild 8 angegebene Transferringverhalten. Abgesehen von den höheren, durch die SFET bedingten Leckströme zeigt sich bei  $U_{off} = 0$  ein Bild 6 entsprechendes Verhalten. Die Offsetspannung bewirkt keine zusätzliche Kennlinienscherung mehr, ist aber, wie

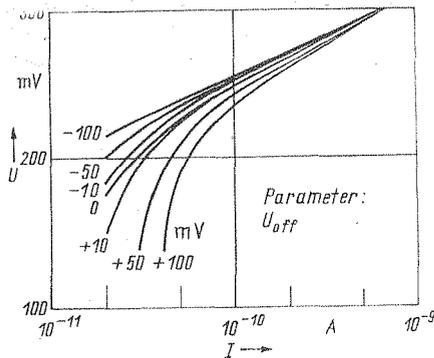


Bild 6. Transferverhalten des Strom-Spannungs-Wandlers ohne Offsetkorrektur

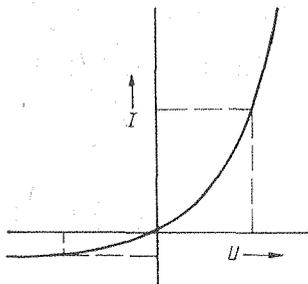


Bild 7. Diodencharakteristik

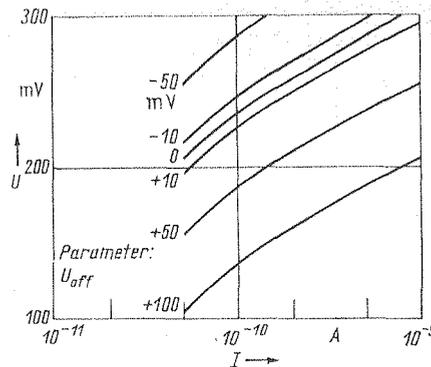


Bild 8. Transferverhalten des Strom-Spannungs-Wandlers mit Offsetkorrektur

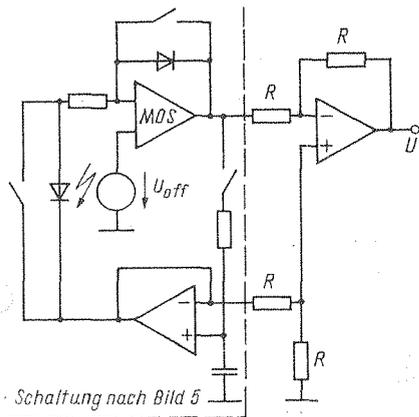


Bild 9  
Schaltung zur vollständigen Korrektur der Offsetspannung

mit Gl. (4) bereits angegeben, noch als additive Komponente in der Ausgangsspannung wirksam. Für große Offsetspannungen macht sich deshalb ein weiterer Korrekturschritt erforderlich, der z. B. nach Bild 9 vorgenommen werden kann. Für die im Bild 3 gezeigte Korrekturmaßnahme ergeben sich prinzipiell

keine von dem behandelten Beispiel abweichenden Ergebnisse, sondern nur eine Aufwandsverlagerung, weshalb dieses Prinzip nicht weiter betrachtet werden soll.

#### 4. Zusammenfassung

Ausgehend vom Einfluß der Offsetspannung eines mit Feldeffekttransistoren in der Eingangsstufe aufgebauten Operationsverstärkers auf das Übertragungsverhalten des Strom-Spannungs-Wandlers werden Maßnahmen zur automatischen Offsetkorrektur angegeben. Die erforderlichen Unterschiede gegenüber linearen Schaltungen werden betrachtet. Praktische Ergebnisse belegen die Funktionstüchtigkeit der vorgeschlagenen Korrekturmaßnahmen und deuten auch die Realisierungsprobleme an.

Eingegangen am 15. März 1982

NaA 8891

#### Literatur

- [1] Hodges, D. A.; Gray, P. R.; Broderson, R. W.: Potential of MOS technologies for analog integrated Circuits. IEEE J. SC-13 (1978) 3, S. 285 - 294
- [2] Poujois, R.; Borel, J.: A low drift fully integrated MOSFET operational amplifier. IEEE J. SC-13 (1978) 4, S. 499 - 503
- [3] Patentanmeldungen WP 228 795, WP 235 796, WP 235 797 (Aktenz.)

Dipl.-Ing. Claus Kühnel, Zentralinstitut des Sportmedizinischen Dienstes, 8216 Kreische, August-Bebel-Str. 12