

Reduzierung der Eingangsoffsetspannung und deren Drift bei Operationsverstärkern mit Eingangsstufen aus MOS-Feldeffekttransistoren

C. Kühnel, KDT, Dresden

Das statische Übertragungsverhalten einer Operationsverstärkerschaltung wird bei kleinen Eingangssignalen wesentlich durch die Eingangsparameter des Operationsverstärkers, wie Eingangsstrom und Eingangsoffsetspannung, bestimmt. Eine diesbezügliche Analyse des Strom-Spannungs-Wandlers wurde in [1] vorgenommen.

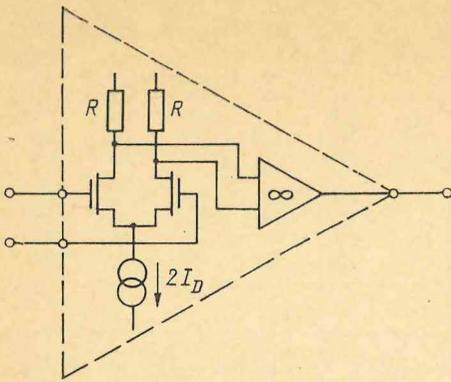
Zur Realisierung sehr hoher Eingangswiderstände bzw. zur Verarbeitung sehr kleiner Ströme oder Ladungen werden in der Eingangsstufe solcher Operationsverstärker Feldeffekttransistoren eingesetzt. Da der Sperrschicht-Feldeffekttransistor einen kleinen (funktionsbedingten) Eingangsstrom (Gatesperrstrom) hat, kann in vielen Fällen nur ein MOS-Feldeffekttransistor, dessen Gateleckstrom im allgemeinen einige Größenordnungen kleiner als der Gatesperrstrom des Sperrschicht-Feldeffekttransistor ist, eingesetzt werden. Für die folgenden Betrachtungen kann aus diesem Grunde die Wirkung des Eingangsstromes vernachlässigt werden.

1. Bestimmung der Eingangsoffsetspannung

Unter den oben angeführten Bedingungen kann das im Bild 1 angegebene Operationsverstärker-Modell verwendet werden. Die Eingangsstufe des Operationsverstärkers sei durch einen Differenzverstärker mit MOS-Feldeffekttransistoren, einer Source-Stromquelle sowie einer symmetrischen Widerstandslast gebildet. Abgeschlossen wird dieser Differenzverstärker durch einen idealen, die Verstärkungsforderungen erfüllenden Operationsverstärker.

Bei der Untersuchung des Einflusses der Parameter der MOS-Feldeffekttransistoren auf die Eingangsoffsetspannung des gesamten Operationsverstärkers können die übrigen Schaltungsteile als ideal vorausgesetzt werden, weshalb auch nicht auf die Probleme der Lastausbildung für den Differenzverstärker eingegangen wird. Hierzu sei auf [2] verwiesen.

Bild 1. Operationsverstärker-Modell



Wird nunmehr von der Strom-Spannungs-Beziehung des MOS-Feldeffekttransistors ausgegangen, gilt im Einschnürbereich [3]

$$I_D = K \mu (U_{GS} - U_p)^n \quad K, n = \text{const.} \quad (1)$$

μ bezeichnet die Beweglichkeit, während die anderen Parameter, wie Dicke des Gateisolators, Dielektrizitätskonstante und das Verhältnis b/L in der Konstanten K ihre Berücksichtigung finden. Die Schwellspannung des MOS-Feldeffekttransistors ist mit U_p bezeichnet. Während für den Enhancementstransistor eine Schwellspannung plausibel ist, trägt sie für den Depletionstransistor mehr formalen Charakter, wobei ihre Anwendung für die Praxis recht sinnvoll ist [3].

Die Steilheit im Einschnürbereich erhält man mit $g_m = \frac{dI_D}{dU_{GS}}$ aus Gl. (1) mit

$$g_m = n K \mu (U_{GS} - U_p)^{n-1}. \quad (2)$$

Bildet man aus den Gln. (1) und (2) nun den Quotienten, gilt

$$\frac{I_D}{g_m} = \frac{1}{n} (U_{GS} - U_p). \quad (3)$$

Die Eingangsoffsetspannung des im Bild 1 gezeigten Modells wird unter den genannten Voraussetzungen durch die Differenz der Gate-Source-Spannungen der den Differenzverstärker bildenden MOS-Feldeffekttransistoren bestimmt:

$$U_{\text{off}} = U_{GS1} - U_{GS2}. \quad (4)$$

Damit gilt mit Gl. (4)

$$U_{\text{off}} = n \left(\frac{I_{D1}}{g_{m1}} - \frac{I_{D2}}{g_{m2}} \right) + (U_{p1} - U_{p2}). \quad (5)$$

Die Eingangsoffsetspannung eines MOSFET-Differenzverstärkers wird durch unterschiedliche Schwellspannungen und Steilheiten der beiden MOS-Feldeffekttransistoren und unsymmetrische Drainströme hervorgerufen. Die Differenz der Schwellspannungen ist von den technologiebedingten Möglichkeiten der Schwellspannungseinstellung abhängig und kann durch schaltungstechnische Maßnahmen am Bauelement nicht mehr beeinflusst werden. Ein Ansatzpunkt zur Minimierung der Eingangsoffsetspannung ist deshalb im ersten Term von Gl. (5) zu suchen. Nehmen die Quotienten I_D/g_m gleiche oder kleine Werte an, wird deren Differenz unter der Voraussetzung eines konstanten relativen Fehlers der Einzelgrößen ebenfalls einen kleinen Wert annehmen. Nach Gl. (3) wird für gegen die Schwell-

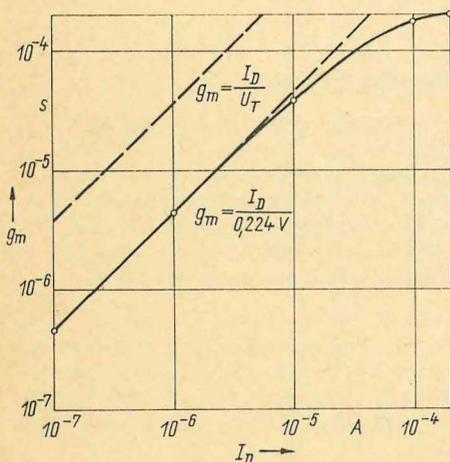


Bild 2. Abhängigkeit der Steilheit vom Drainstrom

spannung U_p sinkende Steuerspannungen U_{GS} eine Abnahme des Quotienten I_D/g_m eintreten. Für die Auswertung ist es günstig, sich auf den Drainstrom I_D zu konzentrieren.

Unter dieser Voraussetzung erhält man mit den Gln. (1) und (2)

$$g_m = n (K \mu)^n I_D^{\frac{n-1}{n}}. \quad (6)$$

Die Konstante n liegt bei Werten um 2. Eine Vereinfachung läßt sich mit $n = 2$ aus Gl. (6) ableiten

$$g_m = 2 \sqrt{K \mu I_D}. \quad (7)$$

Für p-Kanal- und n-Kanal-Enhancementstransistoren wurde das mit Gl. (6) beschriebene Verhalten der Steilheit nachgewiesen [4]. Im Gebiet um und unterhalb der Schwellspannung (Subthreshold-Bereich) traten mit dem Bipolartransistor vergleichbare Werte der Steilheit auf, die wiederum kleine Quotienten I_D/g_m bewirken.

Experimentelle Untersuchungen wurden im Rahmen dieser Arbeit mit einem verfügbaren p-Kanal-Doppel-MOSFET vom Depletionstyp vorgenommen. Im Bild 2 ist die Abhängigkeit der Steilheit vom Drainstrom angegeben. Im oberen Bereich der Kennlinie ist ein Verhalten entsprechend den mit Gl. (6) bzw. (7) angegebenen Zusammenhängen ablesbar, während im unteren Bereich lineares Verhalten vorherrscht.

Berücksichtigt man die für den Subthreshold-Bereich geltende Kennliniengleichung [3]

$$I_D = I_0 \exp \frac{U_{GS} - U_p}{N U_T} \left(1 - \exp \frac{U_{DS}}{U_T} \right), \quad (8)$$

erhält man für die Steilheit

$$g_m = \frac{I_D}{N U_T} \left(U_T = \frac{k T}{e} \right). \quad (9)$$

Im Subthreshold-Bereich wird demzufolge die Steilheit zum Drainstrom proportional und bei einem Wert des Koeffizienten N von etwa 1 mit der Steilheit des Bipolartransistors vergleichbar. Das im Bild 2 angegebene Verhalten der Steilheit entspricht sehr gut dem in Gl. (9) abgeleiteten für den Subthreshold-Bereich. Mit den ermittel-

ten Werten für die Steilheit kann nunmehr der Term $\left(\frac{I_{D1}}{g_{m1}} - \frac{I_{D2}}{g_{m2}} \right)$

für den Doppel-MOSFET berechnet werden. Im Bild 3 ist der typische Verlauf dieses Terms in Abhängigkeit vom Drainstrom angegeben. Ausgehend von den erreichten Ergebnissen ist die Schlußfolgerung auf eine mit sinkendem Drainstrom sinkende Offsetspannung naheliegend. Durch eine direkte Messung der Offsetspannung am Doppel-MOSFET wurde versucht, dieses Verhalten experimentell nachzuweisen. Bild 4 zeigt das Prinzip der Meßschaltung für die Offsetspannung. Die Meßgenauigkeit der gesamten Anordnung ist durch einen äußerst sorgfältigen Abgleich sowie die Gewährleistung konstanter äußerer Bedingungen im Labor auf die erforderliche Größenordnung festzulegen. An Hand von acht Doppel-MOSFET wurde die Abhängigkeit der Offsetspannung vom Drainstrom untersucht. Im Bild 5 sind für die untersuchten Bauelemente die Abhängigkeiten der Offsetspannung vom entsprechenden Arbeitspunkt dargestellt. Die Tendenz des Verhaltens ist ersichtlich und wird auch in der im Bild 6 angegebenen Mittelwertkurve nochmals deutlich. Für Drainströme unterhalb $1 \mu\text{A}$ ergeben sich keine wesentlichen Veränderungen der Offsetspannung, was dem dominierenden Anteil der Schwellspannungsdifferenz an der Offsetspannung zuzuschreiben ist. Oberhalb $1 \mu\text{A}$ nimmt, wie schon im Bild 3 ersichtlich war, der Einfluß des Terms $\left(\frac{I_{D1}}{g_{m1}} - \frac{I_{D2}}{g_{m2}} \right)$ stark zu und bestimmt im wesentlichen den Wert der Offsetspannung.

2. Thermische Drift der Eingangsoffsetspannung

Die thermische Drift der Eingangsoffsetspannung des MOS-Feldeffekttransistors wird durch die Temperaturabhängigkeit solcher Größen wie Beweglichkeit und Schwellspannung sowie Ionenwanderung am Gateisolator bei höheren Temperaturen hervorgerufen. Der Einfluß der Ionenwanderung im Gateisolator bei höheren Temperaturen kann durch Vervollkommnung der Technologie reduziert werden [5] und soll nicht weiter betrachtet werden. Der Temperaturkoeffizient des Drainstromes wird durch partielle Ableitung aus Gl. (1) gewonnen:

$$T K_{I_D} = \frac{dI_D}{dT} = K (U_{GS} - U_p)^n \frac{d\mu}{dT} + K \mu n (U_{GS} - U_p)^{n-1} \left(\frac{dU_{GS}}{dT} - \frac{dU_p}{dT} \right). \quad (10)$$

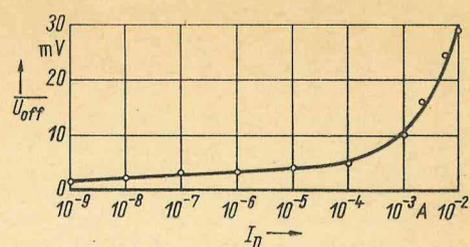
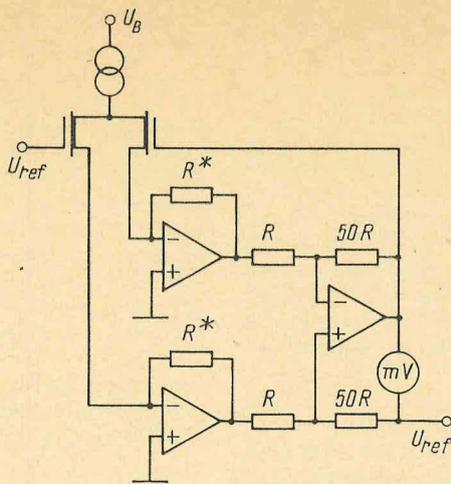
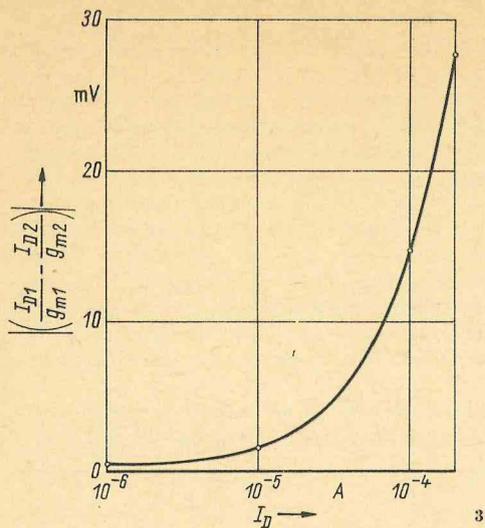


Bild 6. Abhängigkeit der mittleren Offsetspannung vom Drainstrom

Bild 4. Prinzipschaltung zur Messung der Offsetspannung

Bild 3. Abhängigkeit des Terms $\left(\frac{I_{D1}}{g_{m1}} - \frac{I_{D2}}{g_{m2}}\right)$ vom Drainstrom

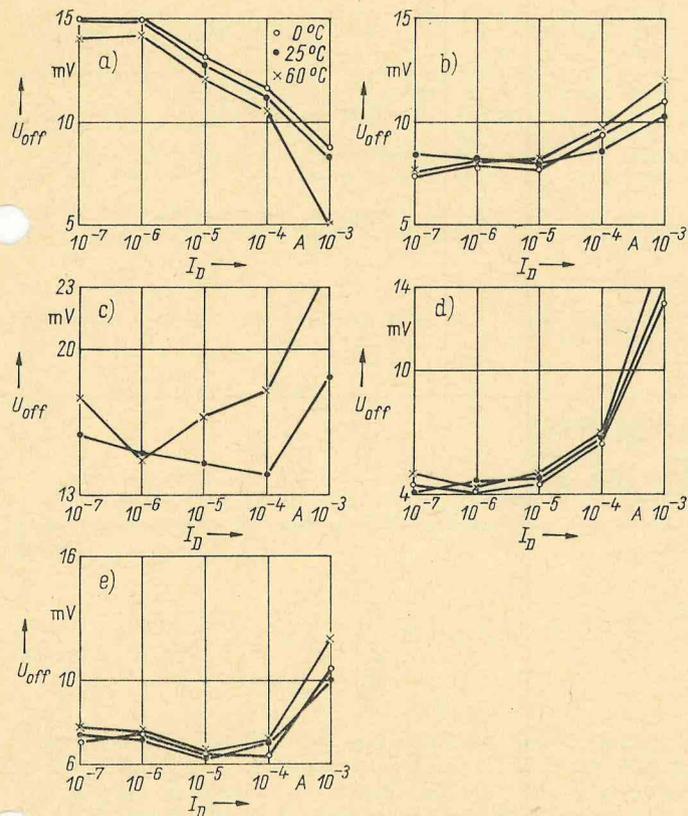


Bild 7. a) bis e). Abhängigkeit von Offsetspannung und deren thermischer Drift vom Drainstrom

Für konstanten Drainstrom gilt $\frac{d I_D}{d T} = 0$. Die Umformung von Gl. (10) liefert:

$$\frac{d U_{GS}}{d T} = \frac{d U_p}{d T} - \frac{(U_{GS} - U_p)}{\mu n} \frac{d \mu}{d T} \quad (11)$$

Den Temperaturkoeffizienten der Offsetspannung erhält man aus Gl. (4) mit

$$\frac{d U_{off}}{d T} = \frac{d U_{GS1}}{d T} - \frac{d U_{GS2}}{d T} \quad (12)$$

Aus den Gln. (11) und (12) wird der Temperaturkoeffizient der Eingangsoffsetspannung zusammengesetzt:

$$\frac{d U_{off}}{d T} = \frac{d(U_{p1} - U_{p2})}{d T} - \frac{(U_{GS1} - U_{p1})}{\mu_1 n_1} \frac{d \mu_1}{d T} + \frac{(U_{GS2} - U_{p2})}{\mu_2 n_2} \frac{d \mu_2}{d T} \quad (13)$$

Die Temperaturabhängigkeit der Beweglichkeit μ läßt sich näherungsweise mit der Gleichung

$$\frac{1}{\mu} \frac{d \mu}{d T} = -\frac{a}{T} \quad (14)$$

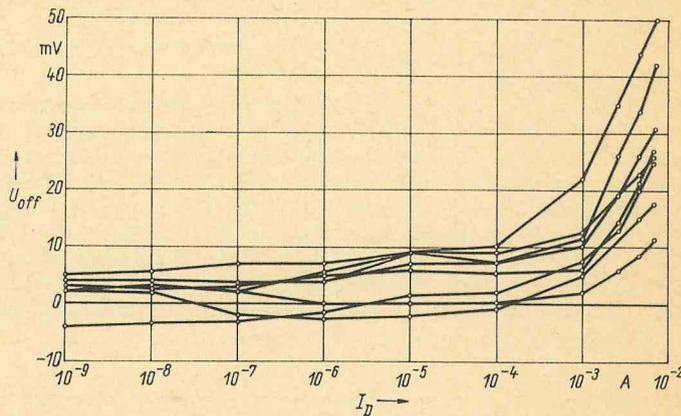
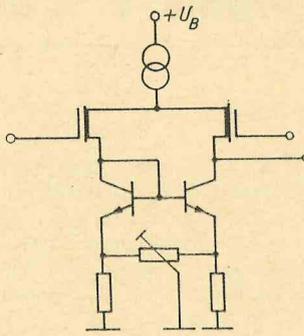
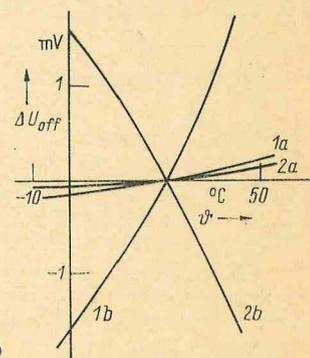


Bild 5. Abhängigkeit der Offsetspannung vom Drainstrom



8

Bild 8. Schaltung zur Offsetkorrektur



9

Bild 9. Einfluß der Korrekturmaßnahme auf die thermische Drift
 $\Delta U_{off} = U_{off}(\theta) - U_{off}(25^\circ\text{C})$; $U_{off1a}(25^\circ\text{C}) = -21 \text{ mV}$;
 $U_{off2a}(25^\circ\text{C}) = +20 \text{ mV}$;
 Index a: $I_{D1} = I_{D2} = 25 \mu\text{A}$;
 Index b: $U_{off1b}(25^\circ\text{C}) = U_{off2b}(25^\circ\text{C}) = 0 > I_{D1} \neq I_{D2}$

beschreiben. Setzt man voraus, daß sich die Beweglichkeiten und deren Temperaturverhalten der Einzeltransistoren eines Doppeltransistors nicht wesentlich unterscheiden, kann mit Gl. (14) die Gl. (13) stark vereinfacht werden:

$$\frac{d U_{off}}{d T} = \frac{d(U_{p1} - U_{p2})}{d T} + \frac{a}{T} \left(\frac{U_{GS1} - U_{p1}}{n_1} - \frac{U_{GS2} - U_{p2}}{n_2} \right) \quad (15)$$

Nach [6] gilt $\frac{d(U_{p1} - U_{p2})}{d T} = 0$ und mit Gl. (3) gilt weiter

$$\frac{d U_{off}}{d T} = \frac{a}{T} \left(\frac{I_{D1}}{g_{m1}} - \frac{I_{D2}}{g_{m2}} \right) \quad (16)$$

Nach Gl. (16) ist auf einen mit sinkendem Drainstrom abnehmenden Temperaturkoeffizienten zu schließen.

Die Gültigkeit des mit Gl. (16) abgeleiteten Zusammenhangs wurde wiederum experimentell untersucht. In den Bildern 7a bis 7e sind

einige Untersuchungsergebnisse an unterschiedlichen Doppel-MOS-FET eines Typs wiedergegeben, wobei die Kennlinien mehrfach bei guter Reproduzierbarkeit aufgenommen wurden. Die Reproduzierbarkeit der Offsetspannung lag dabei unterhalb von $1 \mu\text{A}$ Drainstrom bei einigen zehntel Millivolt. Betrachtet man die Untersuchungsergebnisse insgesamt, dann bestätigen eine Mehrzahl von Bauelementen den durch Gl. (16) gegebenen Zusammenhang. In die dargestellten Ergebnisse wurden darüber hinaus einige „Ausreißer“ aufgenommen, bei denen nur bedingt von einer Driftreduzierung durch den Betrieb im Subthreshold-Bereich gesprochen werden kann. Generell kann dennoch davon ausgegangen werden, daß sich eine Driftreduzierung beim Betreiben der untersuchten Doppel-MOSFET bei einem gegenüber den „normalen“ Drainströmen von mehreren hundert Mikroampere reduzierten Drainstrom auf etwa $1 \mu\text{A}$ feststellen läßt.

3. Aussagen zur Korrektur der Eingangsoffsetspannung

In der integrierten Schaltungstechnik sind häufig Korrekturmaßnahmen zu finden, die nach Bild 8 in die Gesamtschaltung eingearbeitet sind. Ziel einer solchen Korrekturmaßnahme ist es, eine solche Drainstromsymmetrie einzustellen, daß die durch Gl. (5) bestimmte Offsetspannung Null wird. Zwangsläufig wird sich der

Wert des Terms $\left(\frac{I_{D1}}{g_{m1}} - \frac{I_{D2}}{g_{m2}}\right)$ gegenüber dem bei gleichen Drainströmen vergrößern.

Betrachtet man nun den mit Gl. (16) gegebenen Zusammenhang für den Temperaturkoeffizienten der Eingangsoffsetspannung, ist es gerade dieser Term, der den zahlenmäßigen Wert dieses Temperaturkoeffizienten bestimmt. Eine solche Korrekturmaßnahme ist deshalb unbedingt abzulehnen. Bild 9 zeigt die Driftverschlechterung, die durch Verstellung der Drainstromsymmetrie zum Zweck der Offsetspannungskorrektur eintreten kann. Bei der Korrektur der Eingangsoffsetspannung sollte auf die aus der Operationsverstärker-Schaltungstechnik bekannten Maßnahmen zur externen Offsetkorrektur (Störgrößenaufschaltung) zurückgegriffen werden.

4. Zusammenfassung

Die Eingangsoffsetspannung einer mit MOS-Feldeffekttransistoren aufgebauten Operationsverstärkereingangsstufe wird unter der Voraussetzung einer idealen Folgeschaltung durch die Schwellspannungsdifferenzen sowie Steilheitsunterschiede der Einzeltransistoren und die Unterschiede der Drainströme bestimmt. Eine Reduzierung der Eingangsoffsetspannung tritt im Subthreshold-Bereich, d. h. bei kleinen Drainströmen ein. Mit dieser Arbeitspunktverschiebung wird gleichzeitig der die thermische Drift der Eingangsoffsetspannung hervorrufende Anteil reduziert. Für die untersuchten Doppel-MOSFET wurde bei Drainströmen um etwa $1 \mu\text{A}$ eine deutliche Verbesserung der genannten Kennwerte festgestellt. Die Korrektur der verbleibenden Eingangsoffsetspannung hat zur Gewährleistung der verbesserten Driftwerte bei strikter Wahrung der Drainstromsymmetrie zu erfolgen.

Abschließend möchte ich *K. Zuleger* für den sorgfältigen Aufbau der Meßeinrichtung und die Durchführung der Meßaufgaben danken.

Eingegangen am 25. Mai 1982

NaA 8928

Literatur

- [1] Kühnel, C.: Einfluß realer Operationsverstärker-Eingangsparameter auf die statische Kennlinie von Strom-Spannungs-Wandlern. Nachrichtentech., Elektron. 29 (1979) 12, S. 494 – 495
- [2] Zapf, H. L.: DC Transfer Characteristics, Offset Voltage Sensitivities, and CMRR of FET Differential Stages. IEEE J. SC-13 (1978) 2, S. 262 – 265
- [3] Möschwitzer, A.; Jorke, G.: Mikroelektronische Schaltkreise. 1. Aufl. Berlin: VEB Verlag Technik 1979
- [4] Schade, O. H.: BiMOS Micropower IC's. IEEE J. SC-13 (1978), 6, S. 791 – 798
- [5] Möschwitzer, A.; Lunze, K.: Halbleiterelektronik. Lehrbuch. Berlin: VEB Verlag Technik, 1973
- [6] Barker, R. W.: Offset Voltage Temperatur-Coeffizient in Dual M. O. S. F. E. Source Followers. Electronic Letters 7 (1971) 5/6, S. 123 – 125