

# Integrierter Verstärker mit hochohmigem FET-Eingang

Ing. Dieter Müller

Die sowjetische integrierte Schaltung *K 140 UD 8* ist ein Operationsverstärker mit Sperrschicht-FETs als Eingangstransistoren. Bild 1 zeigt ein stark vereinfachtes Prinzipschaltbild [1]. Die ausführliche Innenschaltung wird in [2] wiedergegeben. Die besonderen Eigenschaften dieser IS sind ein sehr großer Eingangswiderstand bis zu mehreren Megaohm, geringes Eigenrauschen und eine hohe Spannungsverstärkung  $v_u$ . Diese beträgt für den *K 140 UD 8 A*  $v_u \geq 50000$  und für den *K 140 UD 8 B*  $v_u \geq 20000$ . Durch eine innere Frequenzkompensation wird keine äußere Beschaltung wie beim *A 109* benötigt, der Schaltkreis arbeitet auch ohne diese bei verschiedenen Gegenkopplungsgraden stabil. Bild 2 zeigt das Schaltsymbol mit Angabe der Bedeutung der Anschlüsse, und Bild 3 gibt die Anschlußbelegung des 8poligen IS-Gehäuses wieder.

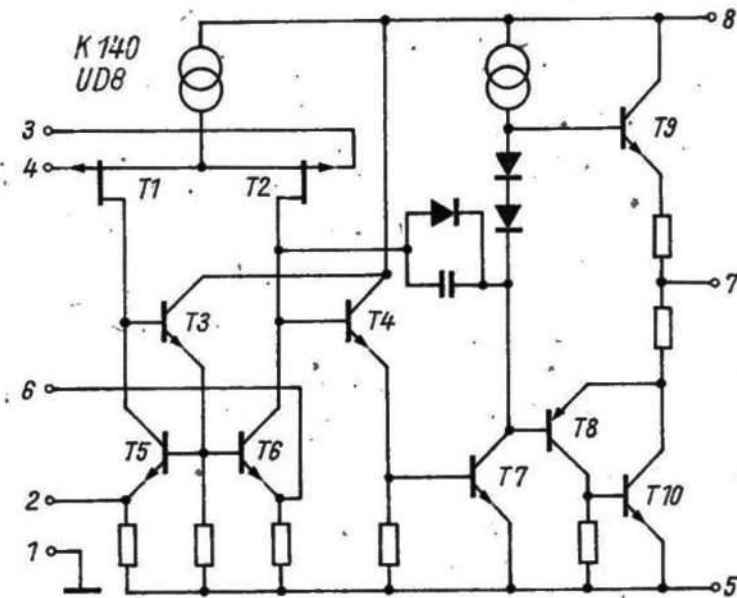


Bild 1 Vereinfachte Ersatzschaltung des *K 140 UD 8*

Die günstigste Schaltungsvariante eines Verstärkers mit hochohmigem Eingang mit dem *K 140 UD 8* zeigt Bild 4. Die Schaltungsart – nicht-invertierender Verstärker – erlaubt es, den hohen Eingangswiderstand der IS auch wirklich zu nutzen. Der Verstärkungsgrad bei Gegenkopplung  $v_u'$  ergibt sich aus

$$v_u' = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = \frac{R_f}{R_1} + 1.$$

Für den invertierenden Verstärker errechnet sich die Verstärkung zu

$$v_u' = \frac{R_f}{R_1} \quad [3]$$

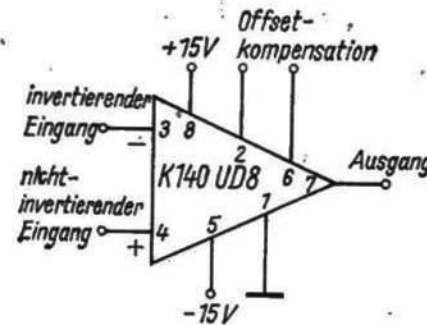


Bild 2 Anschlußschema des *K 140 UD 8*

Bild 3 Ansicht auf die Anschlüsse des *K 140 UD 8*

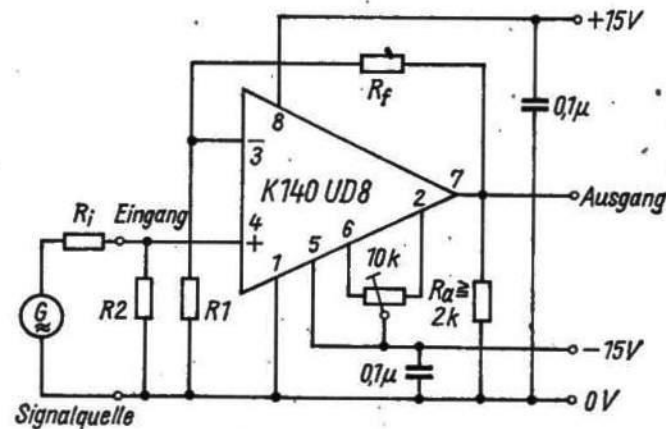


Bild 4 Schaltung eines nichtinvertierenden Verstärkers mit dem *K 140 UD 8*;  
a)  $R_1 = 200 \Omega$ ,  $v_u' = 5001$ ,  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ , b)  $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$ ,  $v_u' = 51$ ,  
 $R_2 = 0,5 \dots 1 \text{ M}\Omega$

Der Verstärkungsgrad beider Grundschaltungen unterscheidet sich nur um die Größe «+1». Anders liegen die Verhältnisse beim Eingangswiderstand. Der Eingangswiderstand des invertierenden Verstärkers wird wesentlich durch  $R_1$  gebildet.  $R_1$  kann aber nicht beliebig groß gewählt werden, da von ihm und  $R_f$  die Größe der Verstärkung abhängt, und zwar in beiden Schaltungsarten. Nimmt man für  $R_f$  einen maximal üblichen Wert von  $1\text{ M}\Omega$  an, so wird  $R_1$  bei einer Verstärkung von 100fach etwa  $10\text{ k}\Omega$  groß. Am invertierenden Eingang (Anschluß 3) hat der Eingangswiderstand folglich den Wert  $10\text{ k}\Omega$ . Verwendet man dagegen den nichtinvertierenden Eingang (Anschluß 4), so ist der (innere) Eingangswiderstand der IS, bedingt durch den Sperrschicht-FET, sehr groß. Da er um Größenordnungen über  $1\text{ M}\Omega$  liegt, kann ihm der Elektronikamateur für seine Anwendungsfälle vernachlässigen. Gegenüber einer Signalquelle  $G$  wirkt wesentlich  $R_2$  als Eingangswiderstand, wobei sich  $R_2$  in weiten Grenzen frei wählen läßt.

Während beim *A 109* z. B.  $R_2$  etwa der Parallelschaltung von  $R_1$  und  $R_f$  entsprechen soll [3], um eine möglichst geringe Offset-Drift, d. h. eine möglichst kleine und zeitlich konstante Abweichung der Ausgangsspannung von «0» bei fehlendem Eingangssignal zu erreichen, braucht das beim *K 140 UD8* nur wenig oder gar nicht berücksichtigt zu werden. Dieser IS hat an den Anschlüssen 2 und 6 (Bild 1 und Bild 2) zwei besondere Eingänge zur Offsetkompensation. Ein Einstellregler von  $10\text{ k}\Omega$  wird, wie Bild 4 zeigt, mit beiden Enden an die Emitter der als Konstantstromquellen arbeitenden Transistoren T5 und T6 der IS angeschlossen und der Schleifer mit  $-15\text{ V}$  verbunden. Eine Unsymmetrie bzw. eine Nullpunktabweichung der Ausgangsspannung (Anschluß 7) bei fehlendem Eingangssignal, die durch den Gegenkopplungszweig und einen relativ großen Widerstandswert von  $R_2$  hervorgerufen wird, läßt sich damit vollständig ausgleichen.  $R_2$  kann dadurch sehr große Werte annehmen ( $\geq 1\text{ M}\Omega$ ) oder bei kleinen Verstärkungsgraden unter Umständen völlig entfallen. Bei relativ kleinen Werten von  $R_2$  ( $R_2 \leq 10 \times R_1$ ) kann die Offsetkompensation und damit der  $10\text{-k}\Omega$ -Einstellregler dann entfallen, wenn der Schaltkreis nur zur Verstärkung von Wechselspannungssignalen benutzt werden soll, wobei die Ausgangsgleichspannung bei fehlendem Signal nicht unbedingt gleich «0» sein muß.

Den vielen guten Eigenschaften des *K 140 UD8* steht der Nachteil einer relativ niedrigen Grenzfrequenz gegenüber. Sie ist mit  $1\text{ MHz}$  angegeben. Das bedeutet, daß die Spannungsverstärkung bei  $1\text{ MHz}$  auf den Wert «1» abgefallen ist (Mindestwert). Andere Ausführungen von Operationsverstärkern, wie der *A 109*, weisen eine weit höhere Grenzfrequenz auf, haben dafür aber keine innere Frequenzkompensation. Um ein stabiles Arbeiten zu gewährleisten, müssen diese je nach Gegenkopplungsgrad mit unterschiedlichen äußeren Frequenzkompensationsgliedern beschaltet werden [4]. Durch diese wird erreicht, daß die Verstärkung ohne

Gegenkopplung im Arbeitsbereich um  $20\text{ dB/Dekade}$  abfällt. Die gegengekoppelte Verstärkung dagegen bleibt bis zu einer durch die Kompensation bestimmten oberen Grenzfrequenz [4] konstant. Bei solchen integrierten Operationsverstärkern, die keine äußere Frequenzkompensation benötigen, wird ein Abfall der offenen (nicht gegengekoppelten) Verstärkung um etwa  $20\text{ dB/Dekade}$  durch innere Schaltungsmaßnahmen erreicht.

Bild 5 zeigt den nach den Kenndaten des *K 140 UD8* konstruierten theoretischen Frequenzgang unter Berücksichtigung einer Grenzfrequenz von  $1\text{ MHz}$  und einem Verstärkungsabfall von  $20\text{ dB/Dekade}$  im Bereich von  $100\text{ Hz}$  bis  $1\text{ MHz}$ . In diesem Bereich verläuft der Frequenzgang

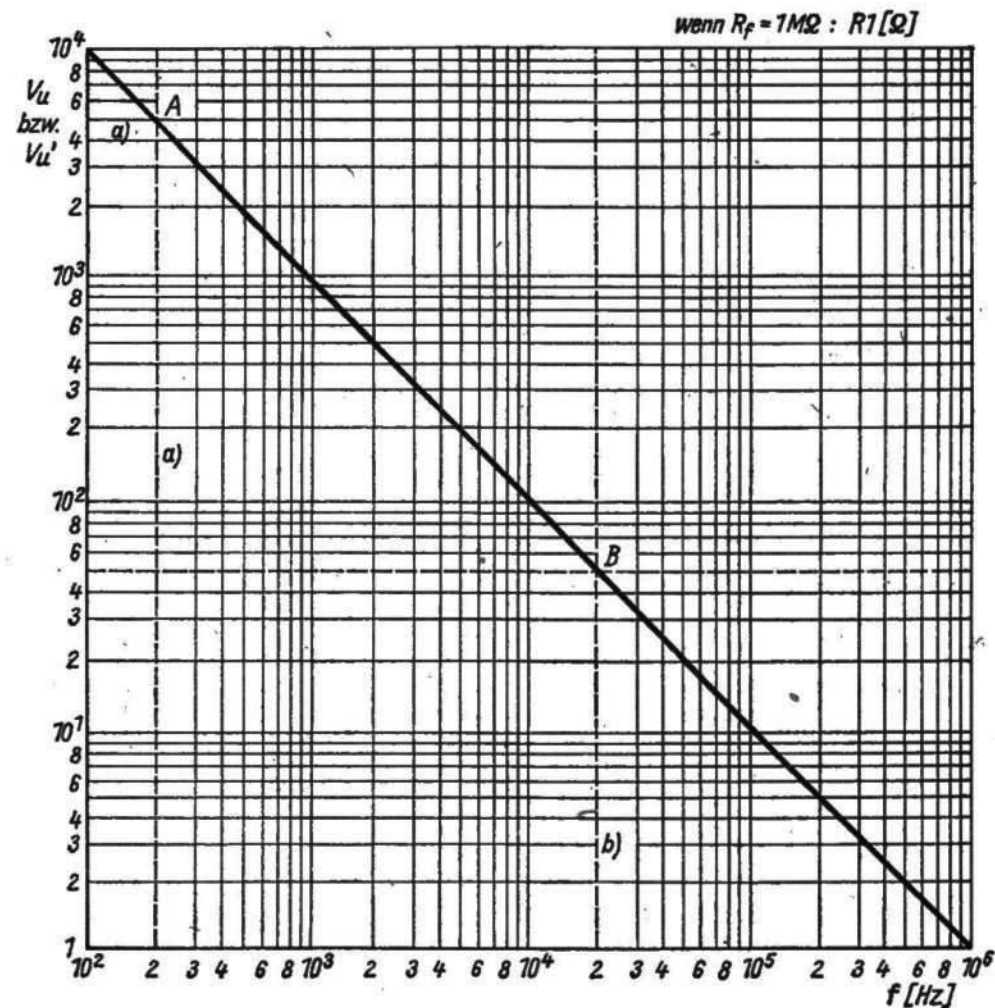
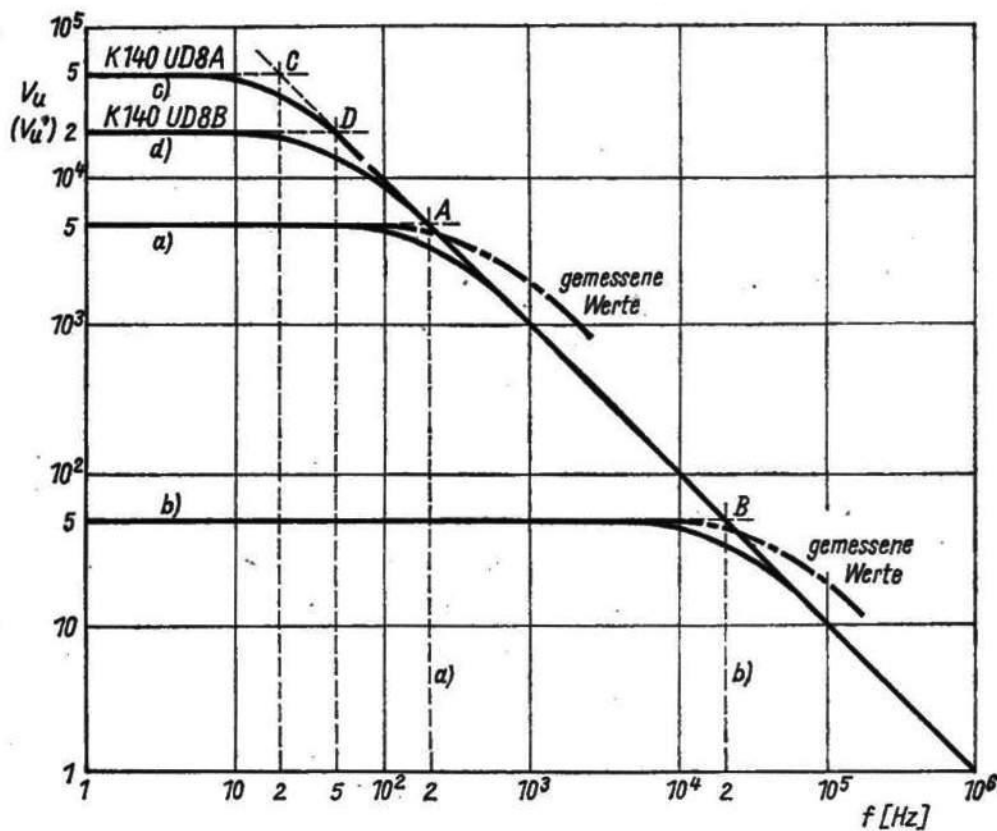


Bild 5 Verstärkung eines *K 140 UD8* in Abhängigkeit von der Frequenz für  $f \geq 100\text{ Hz}$ ; eingezeichnet die Eckfrequenzen A für Beispiel a) ( $v_u' = 5001$ ), B für Beispiel b) ( $v_u' = 51$ )



**Bild 6** Frequenzgang der offenen bzw. gegengekoppelten Verstärkung des K 140 UD 8 im Bereich 1 Hz bis 1 MHz; a)  $v_u' = 5001$ , b)  $v_u' = 51$ , c)  $v_u'$  (offene Verstärkung) K 140 UD 8 A, d)  $v_u$  (offene Verstärkung) K 140 UD 8 B

in der doppeltlogarithmischen Darstellung annähernd nach einer Geraden mit einer Neigung von  $45^\circ$ . Bei einer Frequenz von 100 Hz beträgt die Verstärkung bereits 10000. Da für den K 140 UD 8 B eine Mindestverstärkung von 20000 angegeben ist, muß damit gerechnet werden, daß sich bei noch niedrigeren Frequenzen kein gleichbleibender Anstieg mehr erreichen läßt. Sie geht vielmehr, wie im Bild 6 dargestellt, in eine Waagerechte über.

Operationsverstärker werden überwiegend mit einer durch Gegenkopplung verringerten, definierten Verstärkung  $v_u'$  betrieben. Dabei wird das Verhältnis der offenen Verstärkung  $v_u$  zur gegengekoppelten Verstärkung  $v_u'$  meistens zu

$$\frac{v_u'}{v_u} \geq \frac{1}{10}$$

gewählt. Für den K 140 UD 8 A käme dafür ein Maximalwert von  $v_u' \approx 5000$  in Frage. Eine entsprechende Versuchsschaltung nach Bild 4 wurde mit

folgenden Werten aufgebaut:  $R_f = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_1 = 200 \Omega$  und  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ . Die Verstärkung bei Gegenkopplung  $v_u'$  ergibt sich aus

$$v_u' = \frac{R_f}{R_1} + 1 = 5000 + 1 = 5001.$$

In Bild 5 ist bei  $v_u \approx 5000$  eine Waagerechte (a) eingezeichnet, die die Kennlinie des Versuchsverstärkers darstellt. Diese schneidet die Kennlinie der offenen Verstärkung bei der Frequenz 200 Hz (Punkt A). Das bedeutet, daß sich eine Verstärkung von 5000 nur bis zu einer Frequenz von 200 Hz erreichen läßt. Bei höheren Frequenzen fällt die Verstärkung nach der  $45^\circ$ -Kurve ab.

In der Praxis tritt ein so scharfer Knick nicht auf, sondern es erfolgt bereits bei tieferen Frequenzen ein allmählicher Abfall, der dann bei Erreichen der Eckfrequenz (in diesem Fall 200 Hz) etwa 3 dB beträgt. In Bild 6 ist das dargestellt. Es zeigt den theoretischen Frequenzgang (Kurve a, ausgezogene Linie) und den tatsächlich gemessenen (strichpunktiierte Linie). Die Unterschiede resultieren daraus, daß die Kennlinien in Bild 5 und in Bild 6 auf Grund des angegebenen Minimalwerts für die Grenzfrequenz von 1 MHz konstruiert worden ist. Bei den meisten Exemplaren der IS wird dieser Wert etwas höher liegen, was auch beim Muster der Fall ist, so daß der Verstärkungsabfall bei 200 Hz noch keine Bedeutung hat.

Ein Verstärker mit einer Grenzfrequenz von 200 Hz kann in der Gleichstrom- bzw. Spannungsmeßtechnik eingesetzt werden, z. B. als Gleichspannungs-Millivoltmeter. Für Anwendungen in der NF-Technik wird ein Frequenzbereich bis etwa 20 kHz benötigt. Aus Bild 5 ergibt sich für eine Grenzfrequenz von 20 kHz (b) ein Verstärkungsgrad von 50fach. Unter Beibehaltung eines Wertes von  $1 \text{ M}\Omega$  für  $R_f$  ergibt sich für  $R_1$  eine Größe von 20 k $\Omega$ .  $R_2$  wird zu 500 k $\Omega$  bis 1 M $\Omega$  gewählt. Ein solcher Verstärker eignet sich als Eingangsstufe für hochohmige NF-Signalquellen wie Kristalltonabnehmer oder -mikrofone. Bild 6 stellt den theoretischen Frequenzgang als ausgezogene Linie (b), den tatsächlich gemessenen Frequenzgang als strichpunktiierte Linie dar, der wie im vorigen Beispiel wieder «besser» ist als der theoretische. Bild 6 zeigt den theoretischen Frequenzgang der beschriebenen Operationsverstärker bis zur Frequenz von 1 Hz. Es sind die Eckfrequenzen Punkt C und Punkt D zu erkennen, bei denen die Verstärkung in den 20 dB/Dekade-Ablauf übergeht. Für den K 140 UD 8 A geschieht das bei etwa 20 Hz und für den K 140 UD 8 B bei etwa 50 Hz.

Es kann festgestellt werden, daß der K 140 UD 8 ein relativ unkompliziert zu handhabendes Bauelement ist. Mit der Kennlinie (Bild 5) ist es leicht möglich, für einen gewünschten Frequenzbereich die maximal mögliche Verstärkung zu ermitteln und die Gegenkopplungsglieder festzulegen. Sofern für den Gegenkopplungswiderstand  $R_f$  ein Wert von

1 M $\Omega$  festgelegt wird, entspricht der Widerstand  $R_1$  dem Zahlenwert der Grenzfrequenz. Bild 5 weist am oberen Rand eine Ohm-Skale für  $R_1$  auf, an der seine Größe für eine bestimmte Verstärkung direkt abgelesen werden kann.

Die angegebenen Beispiele stellen etwa die Grenzen dar, in denen sich dieser Schaltkreis vom Elektronikamateur vorteilhaft einsetzen läßt. Das Beispiel (a) liegt an der oberen Grenze der Verstärkung, wobei nur sehr niedrige Frequenzen verarbeitet werden können. Das Beispiel (b) befindet sich an der oberen Grenze des (NF-) Frequenzbereichs. Die Verstärkung ist mit  $v_u' \approx 50$  schon recht klein. In Verbindung mit den guten Rauscheigenschaften und dem großen Eingangswiderstand eignet sich die Schaltung sehr gut zur Verarbeitung kleiner NF-Signale hochohmiger Quellen. Bei der Auslegung von Schaltungen kann man den 3-dB-Abfall bei der Eckfrequenz berücksichtigen und gleich eine etwas kleinere Verstärkung wählen oder wie beim Mustergerät darauf vertrauen, daß die meisten Bauelemente ohnehin eine etwas höhere Grenzfrequenz haben als angegeben.

### Literatur

- [1] Datenblatt des sowjetischen Operationsverstärkers K 140 UD 8
- [2] Böttger, K.-D./Göhler, K.-P.: Integrierte Schaltungen, radio-fernsehen-elektronik 25 (1976) Heft 19/20, Seite 662
- [3] Schubert, K.-H.: Der Operationsverstärker und seine Anwendung, Elektronisches Jahrbuch 1974, Seite 129 bis 153, Militärverlag der DDR, Berlin 1973
- [4] Knopke, K. E.: Frequenzkompensation des Operationsverstärkers A 109 C, radio-fernsehen-elektronik 23 (1974) Heft 10, Seite 595 bis 598