

TEXAS INSTRUMENTS

EB 90223

-----  
EUROPEAN APPLICATIONS GROUP

AKTIVE VIERPOLSCHALTUNGEN MIT OPERATIONSVERSTÄRKERN  
UND FET

Mit Operationsverstärkern, die im Gegenkopplungsweg frequenz-, spannungs- oder stromabhängige Elemente besitzen, lassen sich Vierpole mit den verschiedensten Übertragungscharakteristiken darstellen. Eine interessante Möglichkeit von praktischer Bedeutung besteht darin, einen Feldeffekt-Transistor als steuerbaren Widerstand in den Gegenkopplungszweig oder in die Eingangsschaltung eines Operationsverstärkers zu legen, wozu hier rechnerische, praktische und meßtechnische Unterlagen geliefert werden.

1. Grundsaltungen

Nach Bild 1 und 2 lassen sich FET in Serie zum Eingang oder auch direkt in den Gegenkopplungsweg von Operationsverstärkern legen. Für die rechnerische Behandlung wurde die FET-Ausgangskennlinie  $I_{DS} = f(U_{DS})$  durch die Gleichung

$$I_{DS} = I_{DS0} (1 - e^{-U_{DS}/U_0}) \quad (1)$$

angenähert. Hierin bedeuten:

$I_{DS}$	Drain-Source-Strom
$I_{DS0}$	Drain-Source-Sättigungsstrom
$U_{DS}$	Drain-Source-Spannung
$U_0$	Konstante für $U_{GS} = \text{const.}$
$U_{GS}$	Gate-Source-Spannung

- 2 -

Die Konstante  $U_0$  kann man aus den Kennlinien des Transistors praktisch sehr leicht ermitteln. Unter Zugrundelegung eines idealen Operationsverstärkers gelten für die Schaltung in Bild 1 folgende Gleichungen:

$$I_1 + I_2 = 0 \quad (2)$$

$$\frac{U_1}{R_1} + I_{DSo} (1 - e^{-U_2/U_0}) = 0 \quad \text{oder} \quad (3)$$

$$-U_1 = R_1 \cdot I_{DSo} (1 - e^{-U_2/U_0}) \quad (4)$$

Eine kurze Diskussion der Gleichung (4) gewährt einen Einblick in den prinzipiellen Verlauf dieser Funktion.

Für  $-U_1 = 0$  ist auch  $U_2 = 0$  und für

$$\lim_{U_2 \rightarrow \infty} (-U_1) = I_{DSo} R_1 \quad (5)$$

Die Ausgangsspannung  $U_2$  kann somit beliebig anwachsen, wogegen die Eingangsspannung  $U_1$  nach dem Grenzwert  $I_{DSo} R_1$  zustrebt. In Bild 3 ist der Verlauf dieser Funktion wieder gegeben. Entsprechend erhält man für die Schaltung in Bild 2 die Gleichung

$$\frac{-U_2}{R_2} = I_{DSo} (1 - e^{-U_1/U_0}) \quad (6)$$

deren Verlauf mit  $U_{GS}$  als Parameter aus Bild 4 ersichtlich ist.

## 2. Aufnahme der statischen Übertragungscharakteristiken

Für die experimentelle Durchführung der Aufgabe sind als aktive Elemente der Operationsverstärker Typ SN72709L und der FET Typ BF245 von Texas Instruments verwendet worden. Die Kennlinien wurden mit Hilfe eines XY-Schreibers aufgenommen. Der hier verwendete n-Kanal-FET muß mit einer positiven Spannung betrieben werden und da nach Bild 1 und 2 der invertierende Eingang des

- 3 -

Operationsverstärkers benutzt wird, bedingt dies eine negative Eingangs- bzw. Ausgangsspannung. Diese wurde mit Hilfe eines zweiten Operationsverstärkers wieder umgekehrt und anschließend dem XY-Schreiber zugeführt. Die auf diese Weise gemessenen Übertragungscharakteristiken sind in Bild 3 und 4 gezeigt. Hier erkennt man in den verschiedenen Varianten die Ausgangskennlinie des FET wieder, wobei lediglich der Strom  $I_{DS}$  multipliziert mit  $R_1$  bzw.  $R_2$  transformiert wird. Die Bilder 5 und 6 zeigen den Verlauf der Verstärkung  $|V| = U_2/U_1$  mit  $U_{GS}$  als Parameter.

### 3. Dynamisches Verhalten

Anhand der angenäherten Gleichung (1) der Ausgangskennlinie kann man den Absolutwert der Wechselstromverstärkung berechnen:

$$V = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_{dyn}} \quad (7)$$

wobei  $R_{dyn} = \left( \frac{U_{DS}}{I_{DS}} \right)$  für  $U_{GS} = \text{const.}$  (8)

Nach implizierter Differentiation der Funktion  $I_{DS} = f(U_{DS})$  erhält man:

$$\frac{1}{R_{dyn}} = \frac{I_{DS}}{U_{DS}} = I_{DS0} \cdot e^{-U_{DS}/U_0} \quad (9)$$

Somit wird

$$V = I_{DS0} \cdot R_2 \cdot \frac{1}{U_0} \quad (10)$$

Diese Formel gilt allerdings nur für kleine Wechselstromaussteuerungen, bei denen der Wert des dynamischen Widerstandes  $R_{dyn}$  annähernd konstant bleibt.

Bild 7 zeigt die Übertragungscharakteristiken eines nach nebenstehendem Schaltbild betriebenen Vierpols. Der Gleichspannung, die zur Einstellung des Arbeitspunktes dient, wurde ein Wechselstromsignal überlagert. Die Grenzfrequenz

dieser Anordnung wird hauptsächlich durch das Frequenzverhalten der aktiven Elemente bestimmt.

#### 4. Praktisches Beispiel und Anwendungen

Anhand eines Beispiels soll nach Bild 7 die Wechselstromverstärkung  $V$  im Arbeitspunkt berechnet werden. Der Arbeitspunkt A ist durch  $U_1 = 3 \text{ V}$ ,  $-U_2 = 8,34 \text{ V}$  und  $U_{GS} = 0 \text{ V}$  gegeben. Er kann z.B. durch Ändern der Eingangsgleichspannung  $U_1$  entlang der Kennlinie auf einen beliebigen Punkt wie zum Beispiel C geschoben werden. Bei konstanter Eingangsspannung  $U_e$  bzw.  $U_1$  kann man das Kennlinienfeld auch parallel verschieben, zum Beispiel durch Variieren der Vorspannung des FET (Punkt B). Die Konstante  $U_0$  läßt sich zu  $1,25 \text{ V}$  ermitteln und somit ist nach Gleichung (10)

$$V = I_{DSS} \cdot R_2 \cdot e^{-U_1/U_0} \cdot \frac{1}{U_0} = 9,11 \cdot e^{-3/1,25}$$

$$\frac{1}{1,25} = 0,65$$

Bei Aussteuerungen bis zu  $50 \text{ mV}$  weicht dieser Wert von dem gemessenen um  $1,6 \%$  ab.

Wie gut die Annäherung im oberen Bereich der Kennlinie ist, kann man auch am Arbeitspunkt B zeigen. Nach Gleichung (6) ist:

$$\begin{aligned} -U_2 &= I_{DSS} \cdot R_2 (1 - e^{-U_1/U_0}) = 4,4 (1 - e^{-3/1,25}) \\ &= 4,0 \text{ V} \end{aligned}$$

Dieser Wert ist mit dem gemessenen und im Bild 7 aufzeichneten Wert identisch.

Die durchgeführten Messungen weisen von den theoretischen, nach den Gleichungen berechneten Werten eine mittlere Abweichung von  $\pm 2,5\%$  auf. In der Schaltung nach Bild 7 als Kleinsignalverstärker läßt sich der Verstärkungsgrad sowohl über die Eingangsspannung der Schaltung als auch über die Gate-Spannung des FET einstellen.

- 5 -

Damit ergibt sich eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten wie z.B. ein Verstärkungsregler, bei dem durch eine programmierte Vorgabe von verschiedenen Gate-Source-Spannungen die unterschiedlichen Regelbereiche gewählt werden. Die einzelnen Verstärkungsbereiche können auch durch Variieren der (statischen) Eingangsspannung überstrichen werden. Dies gilt hauptsächlich für die Schaltungsanordnung, bei der der FET als regelbarer Serienwiderstand im Eingang liegt (Bild 2). Ferner sind noch Anwendungen als logarithmische Verstärker möglich.

Friedrich D. Lange  
Josef H. Schürmann

**Die vorgeschlagenen Schaltungen, Baugruppen oder Verfahren wurden von Texas Instruments Deutschland (TID) erprobt; darin liegt jedoch keine Gewähr für deren Funktionsfähigkeit.**

**TID kann auch keine Gewähr dafür übernehmen, daß diese Schaltungen usw. frei von Schutzrechten Dritter sind.**

**Alle Rechte an diesem Werk sind TID vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung von TID ist es auch nicht gestattet, das Werk oder Teile daraus in irgendeiner Form durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren zu vervielfältigen oder zu verbreiten. Dasselbe gilt für das Recht der öffentlichen Wiedergabe.**

EB 90223

FET IM GEGENKOPPLUNGSZWEIG DES OPERATIONSVERSTÄRKERS

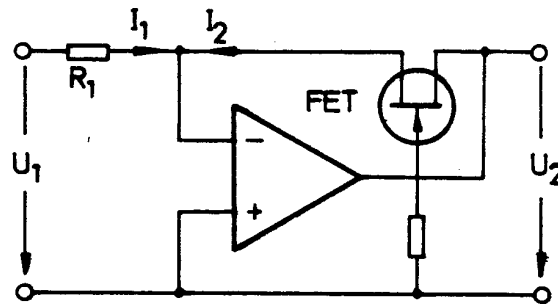


BILD 1

FET IM SPEISEZWEIG DES OPERATIONSVERSTÄRKERS

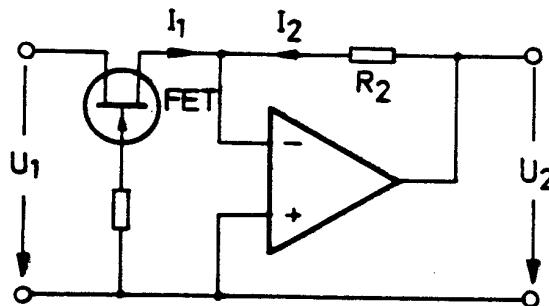


BILD 2

EB 90223

VERLAUF DER ÜBERTRAGUNGSCONTOURCHARAKTERISTIKEN NACH BILD 1

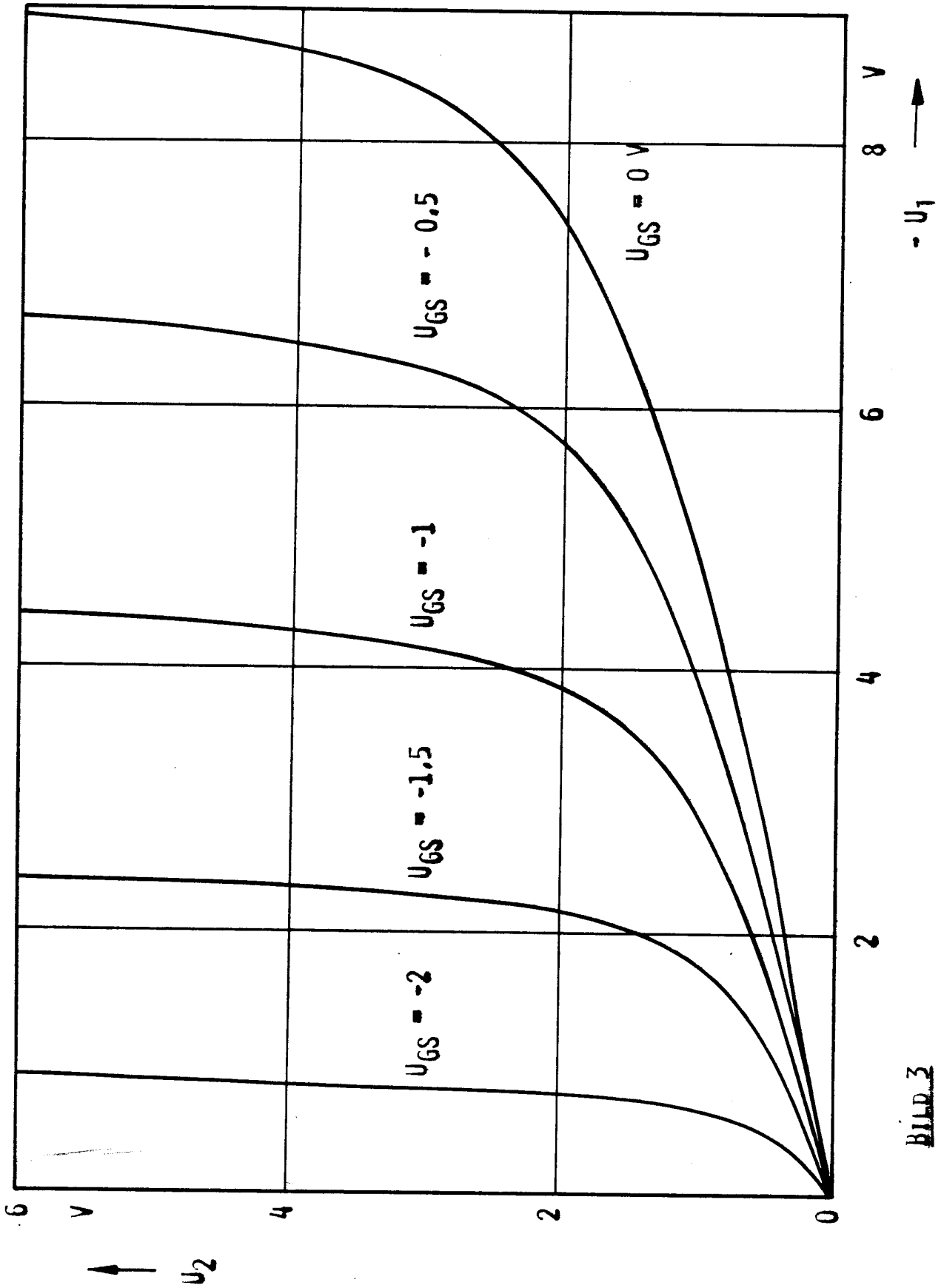


BILD 3

EB 90223

VERLAUF DER ÜBERTRAGUNGSSCHARAKTERISTIKEN NACH BILD 2

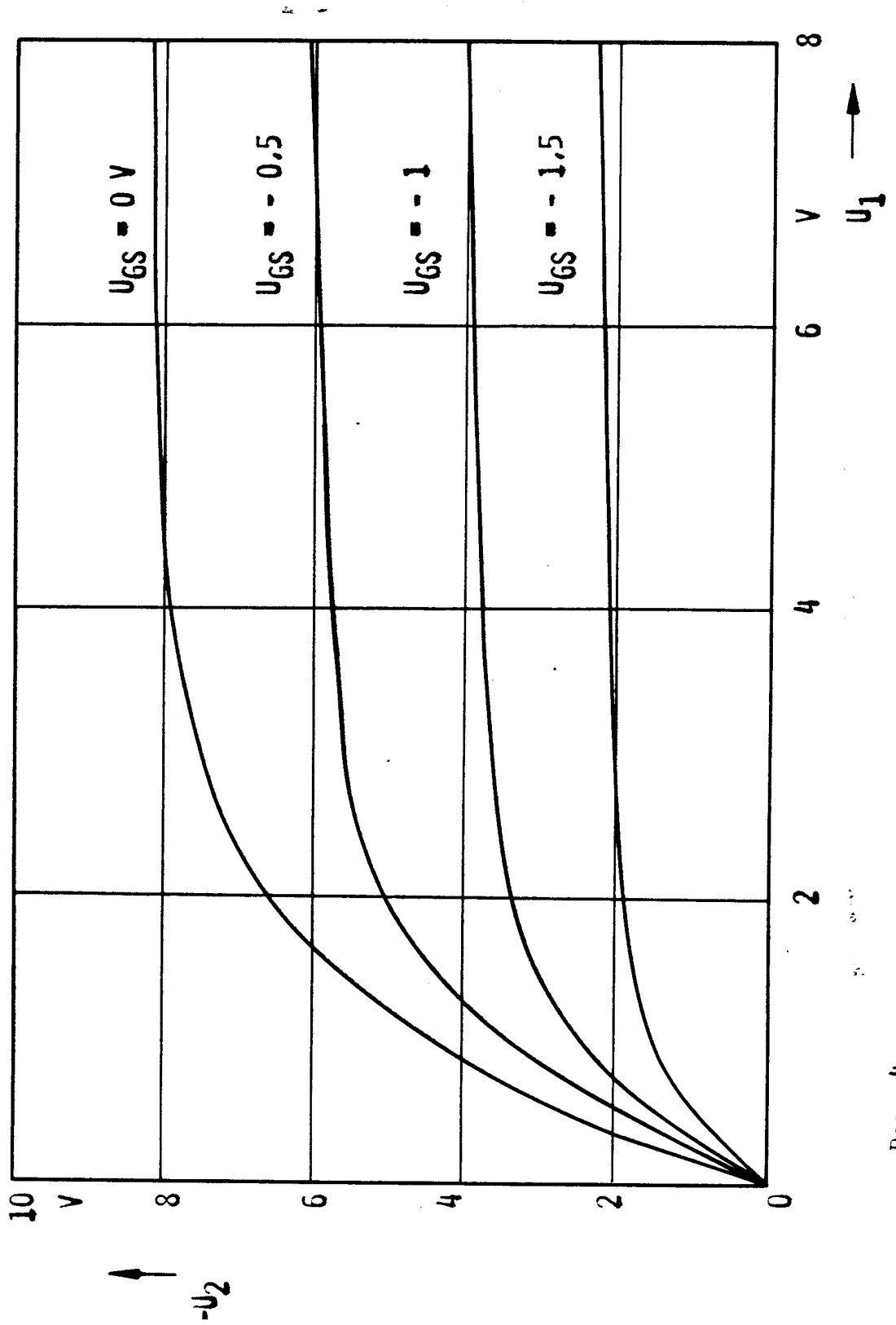
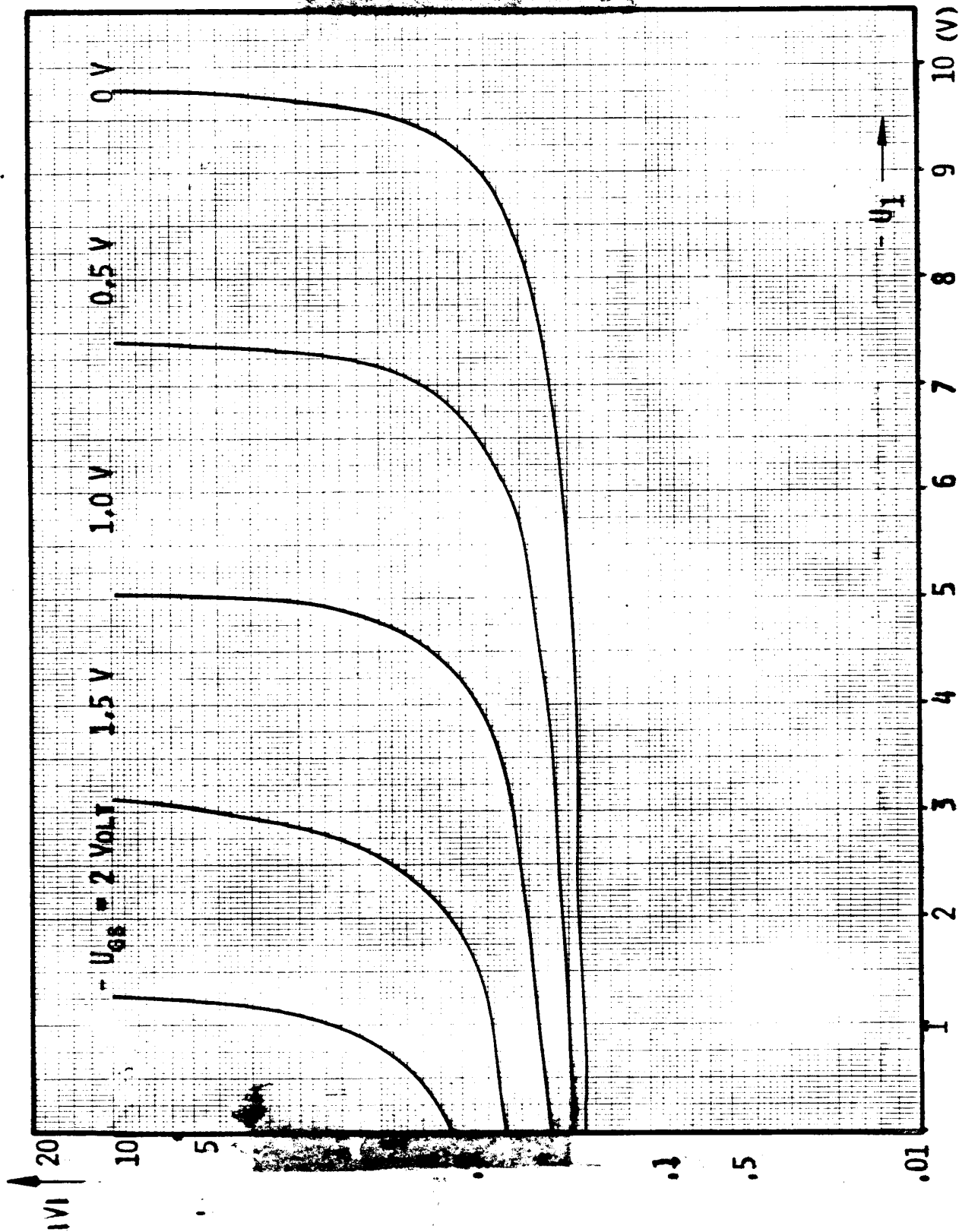


BILD 4



EB90223

UEBERTRAGUNGSCONCHARAKTERISTIK DER VIERPOLSCHALTUNG NACH BILD 1

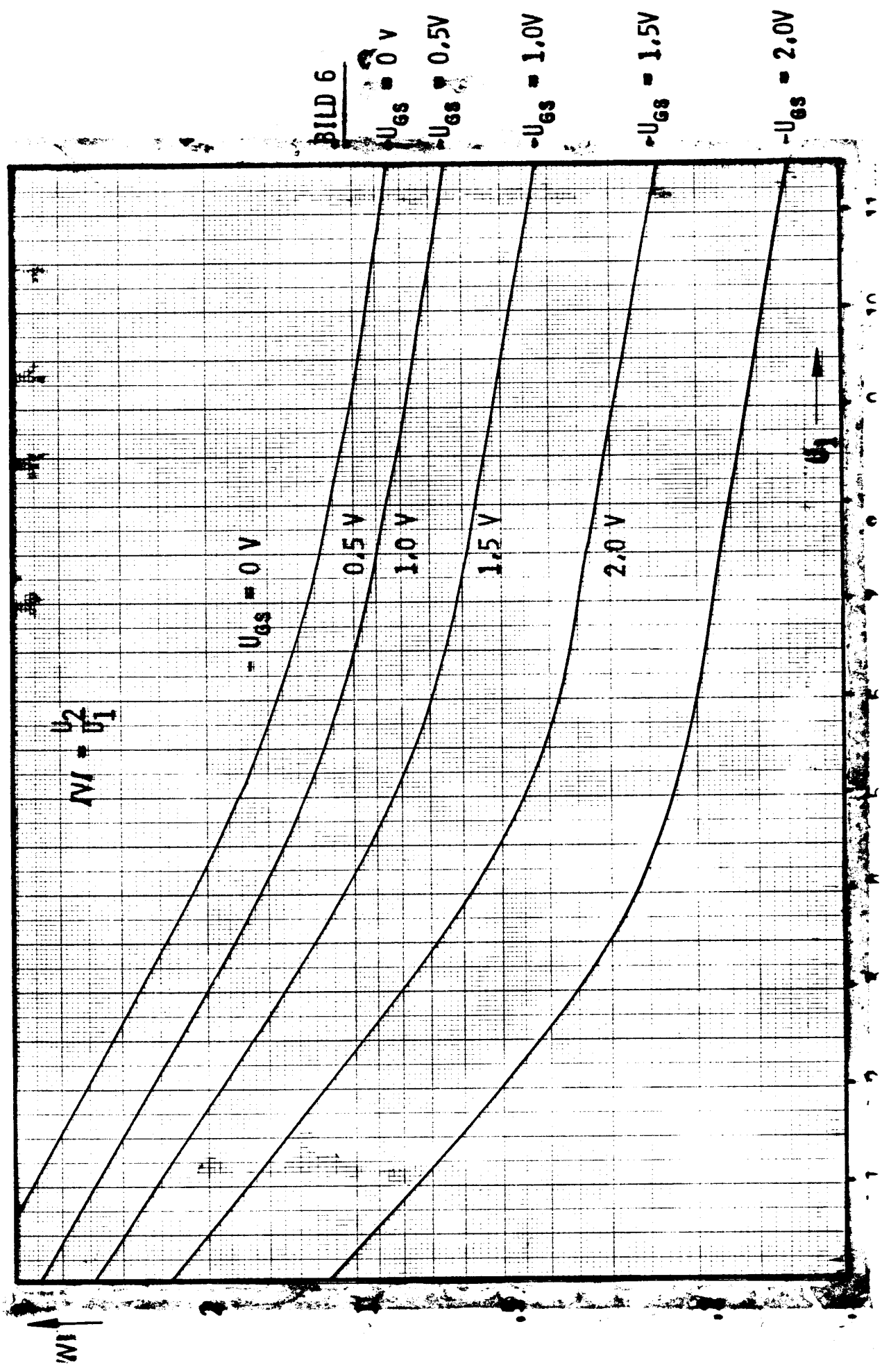


$|V_I| = \frac{U_2}{U_1}$

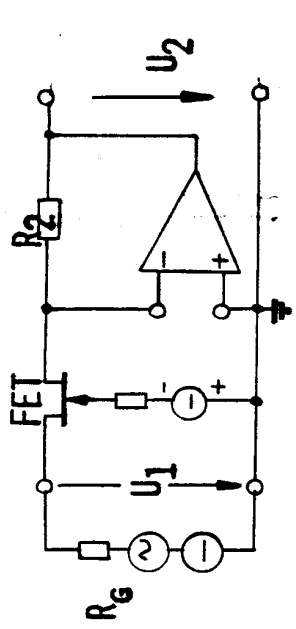
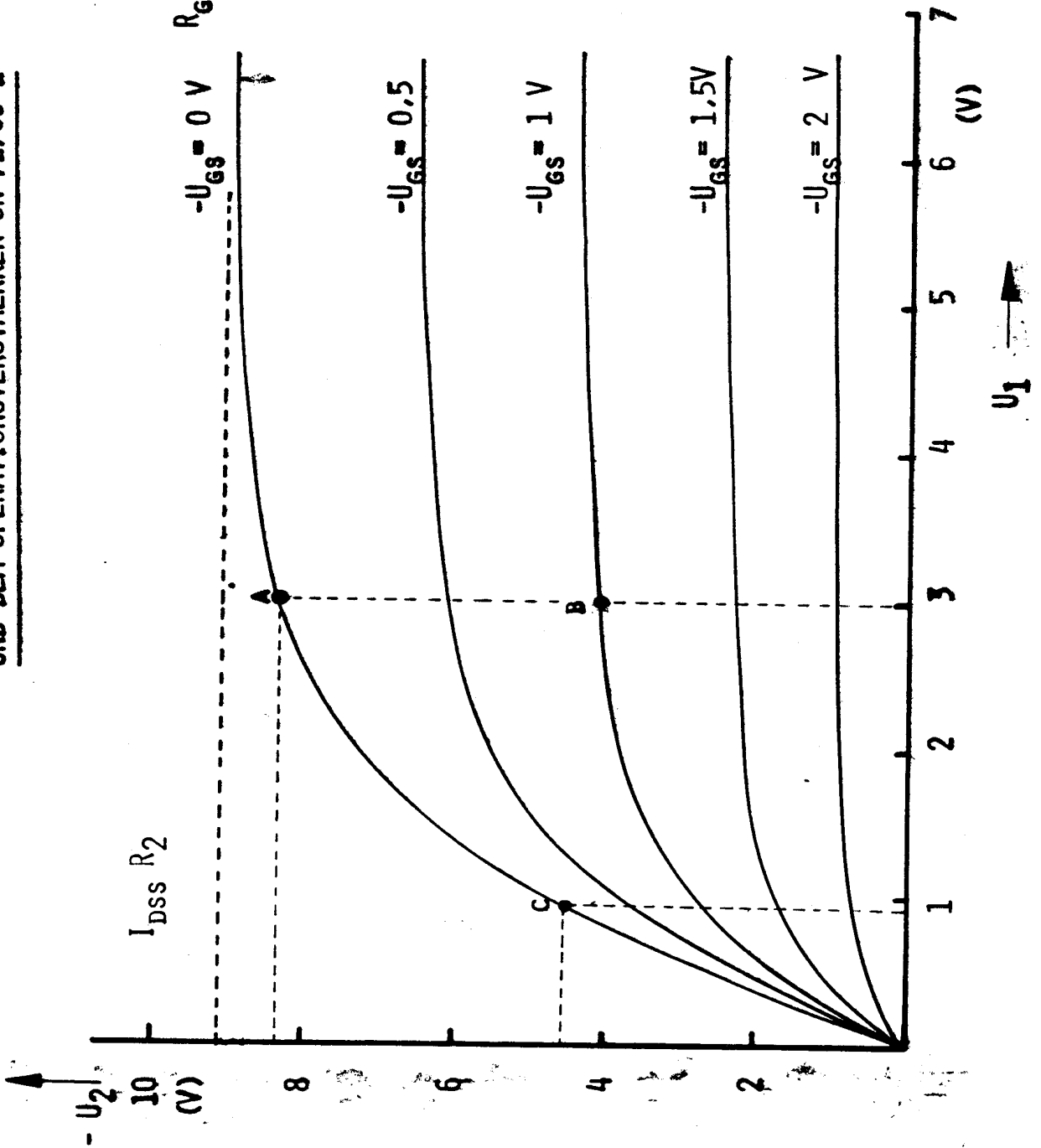
BILD 5

EB 90223

UEBERTRAGUNGSCONCHARAKTERISTIK DER VIERPOLSCALTUNG NACH BILD 2



UEBERTRAGUNGSCONCHARAKTERISTIK DER VIERPOLSCONHALTUNG NACH BILD 2 MIT FET BF245  
 UND DEM OPERATIONSVERSTAECKER SN 72709 L



$$J_{DS} = J_{DSS} (1 - U_{DS}/U_0)$$

$$R_{DYN} = \left\{ \frac{\partial U_{DS}}{\partial J_{DS}} \right\} U_{GS}$$

$$VA = J_{DSS} R_2 \cdot \frac{-U_1/U_0 \cdot \frac{1}{U_0}}$$

BILD 7