

# Modelluntersuchungen an der integrierten Teilschaltungsanordnung IA 616 D

P. Baumann, KDT, Frankfurt (Oder); J. Berkner, Dresden

Mitteilung aus dem VEB Halbleiterwerk Frankfurt (Oder)

**Deskriptoren:** Mikroelektronik, Festkörperbauelemente, Bipolartransistor, Ersatzschaltung, Eigenschaft, Meßwert, nicht-lineares Modell, Grenzfrequenz

## 1. Aufgabenstellung

Die integrierte Teilschaltungsanordnung IA 616 D ist ein Bestandteil integrierter Schaltungsanordnungen des VEB Halbleiterwerk Frankfurt (Oder) (HFO-ISA-System).

Um Kundenwunschsaltkreise mit Netzwerkanalyseprogrammen durchrechnen zu können, ist es erforderlich, die integrierten Teilschaltungsanordnungen zu untersuchen. Dazu zählt insbesondere die Bestimmung der Elemente der verschiedenartigen integrierten Transistoren auf der Basis aussagekräftiger und handhabbarer elektrischer Ersatzmodelle.

In diesem Beitrag werden meßtechnisch ermittelte Werte der Modellparameter zum npn-Transistorarray IA 616 D mitgeteilt. Dabei handelt es sich sowohl um die Elemente eines statischen Transportmodells als auch eines HF-Modells für einen klein- bzw. großflächigen npn-Transistor dieses Arrays.

## 2. Statisches Transportmodell

Der Aufbau des integrierten npn-Transistors bedingt das Zusammenwirken des eigentlichen npn-Transistors mit einem parasitären pnp-Transistor (Bild 1).

Das Transportmodell nach Bild 2 bringt die gleichstrommäßige Verkopplung dieser beiden Teiltransistoren zum Ausdruck und wird durch lediglich 5 Parameter beschrieben: durch den Transfer-Sättigungsstrom  $I_{Snpn}$ , durch die 3 (stromabhängigen) Stromverstärkungen  $B_N, B_I, B_P$  sowie durch das Stromverhältnis  $K$  [1] [2]. Mit den anliegenden äußeren Gleichspannungen sind die Transferströme für den Normal- bzw. Inversbetrieb  $I_N$  bzw.  $I_I$  über ein und denselben Sättigungsstrom  $I_{Snpn}$  miteinander verknüpft, während der Faktor  $K$  die Aufteilung der aus der Basis-Kollektor-Diode in das Emittter- bzw. in das Substratgebiet injizierten Ladungsträger angibt. Dabei bestehen die Zusammenhänge

$$I_N = I_{Snpn} \left[ \exp\left(\frac{U_{BE}}{m_N \cdot U_T}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

$$I_I = I_{Snpn} \left[ \exp\left(\frac{U_{BC}}{m_I \cdot U_T}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

$$I_P = K \cdot I_{Snpn} \left[ \exp\left(\frac{U_{SC}}{m_S \cdot U_T}\right) - 1 \right]. \quad (3)$$

$U_T$  ist die Temperaturspannung und  $m$  der Anstiegswert. Aus den obigen Gleichungen und den nachfolgenden Gleichungen für die Klemmenströme

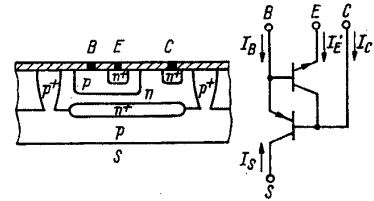
$$I_E = I_I - I_N \left(1 + \frac{1}{B_N}\right), \quad I_B = \frac{I_N}{B_N} + I_I \left(\frac{1}{B_I} + K\right) - I_P, \quad (4)$$

$$I_C = I_N - I_I \left(1 + \frac{1}{B_I}\right) - \frac{I_P}{B_P}, \quad I_S = -K \cdot I_I + I_P \left(1 + \frac{1}{B_P}\right) \quad (5)$$

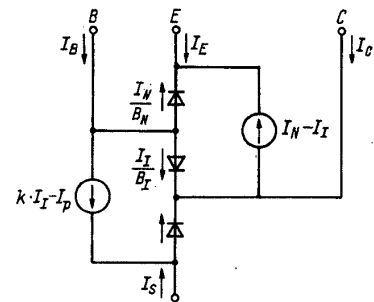
geht hervor, daß zur Bestimmung der Modellparameter zwei pn-Übergänge kurz zu schließen und die Ströme in Abhängigkeit von der jeweiligen Durchlaßspannung aufzunehmen sind. So erhält man:

$$B_N = \frac{I_C}{I_B}, \quad I_N = I_C \quad \text{für } U_{BC} = U_{SC} = 0, \quad (6)$$

**Bild 1**  
Aufbau und Ersatzschaltung eines integrierten npn-Transistors unter Berücksichtigung des parasitären pnp-Transistors



**Bild 2**  
Statisches Transportmodell eines integrierten npn-Transistors



$$B_P = \frac{I_B}{I_C}, \quad I_P = -I_B \quad \text{für } U_{BC} = U_{BE} = 0. \quad (7)$$

$$B_I = \frac{I_E}{I_B + I_S}, \quad I_I = I_E; \quad K = -\frac{I_S}{I_E} \quad \text{für } U_{BE} = U_{SC} = 0. \quad (8)$$

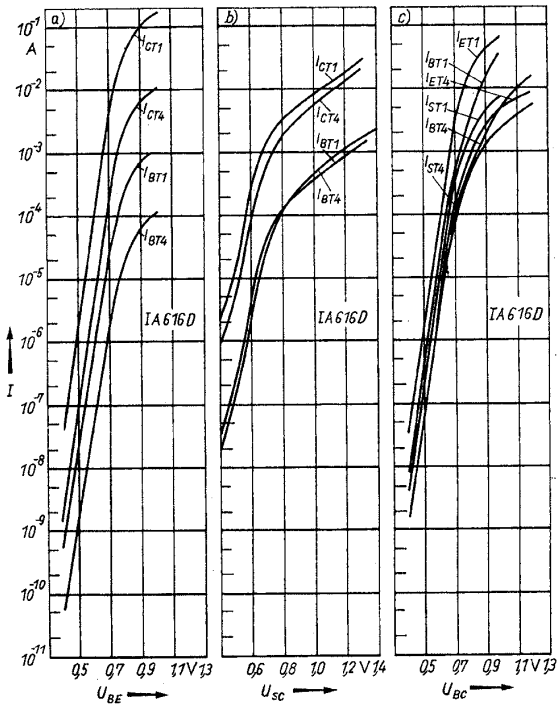
Die Bilder 3a) bis c) zeigen die gemessenen Transfer- und Eingangskennlinien der im Bauelement IA 616 D enthaltenen Transistoren. Mit den Ergebnissen wird zum einen bestätigt, daß die Transfer-Sättigungsströme für die normale und inverse Betriebsweise im Rahmen der Meßgenauigkeit gleich groß sind, und zum anderen geht aus den Messungen hervor, daß die Steigungsfaktoren  $m_N$  bzw.  $m_I$  der Gln. (1) bzw. (2) für den geradlinigen Kennlinienteil einen nahe bei 1 liegenden Wert haben [3]. Die Bilder 4 und 5 zeigen die errechnete Stromabhängigkeit der Stromverstärkungen  $B_N, B_I, B_P$  bzw. des Faktors  $K$ . Einige charakteristische Angaben zu den Parametern des statischen Transportmodells sind in der Tafel 1 zusammengestellt.

**Tafel 1**

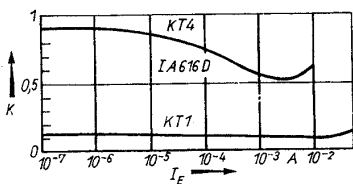
|                        | $I_{Snpn}$<br>in A   | $B_N$ max | $B_I$ max | $B_P$ max       | $I_N$<br>in mA<br>bei<br>$B_N$ max | $I_I$<br>in mA<br>bei<br>$B_I$ max | $I_P$<br>in mA<br>bei<br>$B_P$ max |
|------------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| kleiner npn-Transistor | $2,7 \cdot 10^{-16}$ | 123       | 0,8       | 0,084           | 2,4                                | 1,4                                | 1,1                                |
| großer npn-Transistor  | $7,0 \cdot 10^{-15}$ | 158       | 4,4       | $\approx 0,051$ | 25                                 | 8,3                                | $\approx 1,4$                      |

## 3. Erweitertes nichtlineares Transistormodell

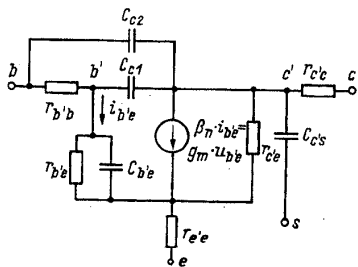
Erweitert man das im Bild 2 dargestellte Transportmodell um die Diffusionskapazitäten  $C_{de}, C_{de}, C_{de}$  sowie um die Sperrschichtkapazitäten  $C_{sc}, C_{se}, C_{ss}$ , dann erhält man ein nicht-lineares Transportmodell, das auch das dynamische Verhalten beschreibt.



**Bild 3.** a) Gemessene Abhängigkeit des Kollektor- und Basisstroms von der Basis-Emitter-Spannung bei  $U_{BE} = U_{SC} = 0$   
 b) Gemessene Abhängigkeit des Kollektor- und Basisstroms von der Substrat-Kollektor-Spannung bei  $U_{BC} = U_{BE} = 0$   
 c) Gemessene Abhängigkeit des Emitter-, Basis- und Substratstroms von der Basis-Kollektor-Spannung bei  $U_{BE} = U_{SC} = 0$   
 T1 großer npn-Transistor; T4 kleiner npn-Transistor



**Bild 5** Abhängigkeit des Faktors  $K$  vom Emitterstrom T1 großer npn-Transistor; T4 kleiner npn-Transistor



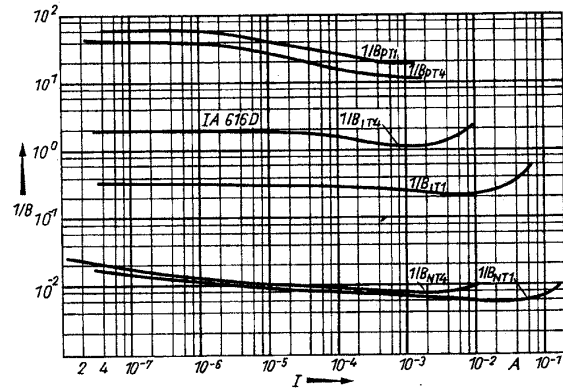
**Bild 7** Kleinsignal-HF-Ersatzschaltbild des integrierten npn-Transistors

Die Kapazitäten können wie folgt berechnet werden:

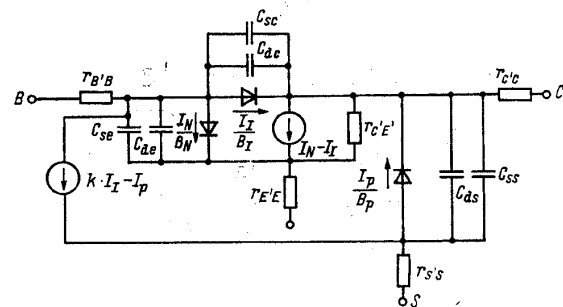
$$C_{de} = \frac{\tau_N}{U_T} (I_N + I_{S \text{ npn}}), \quad C_{se} = C_{se0} \left( \frac{-U_{BE}}{U_{DE}} + 1 \right)^{-1/n_e}, \quad (9)$$

$$C_{dc} = \frac{\tau_I}{U_T} (I_I + I_{S \text{ npn}}), \quad C_{sc} = C_{sc0} \left( \frac{-U_{BC}}{U_{DC}} + 1 \right)^{-1/n_c}, \quad (10)$$

$$C_{ds} = \frac{\tau_P}{U_T} (I_P + K \cdot I_{S \text{ npn}}), \quad C_{ss} = C_{ss0} \left( \frac{-U_{SC}}{U_{DS}} + 1 \right)^{-1/n_s}. \quad (11)$$



**Bild 4.** Stromabhängigkeit der reziproken Stromverstärkung T1 großer npn-Transistor; T4 kleiner npn-Transistor



**Bild 6.** Erweitertes nichtlineares Transportmodell eines integrierten npn-Transistors

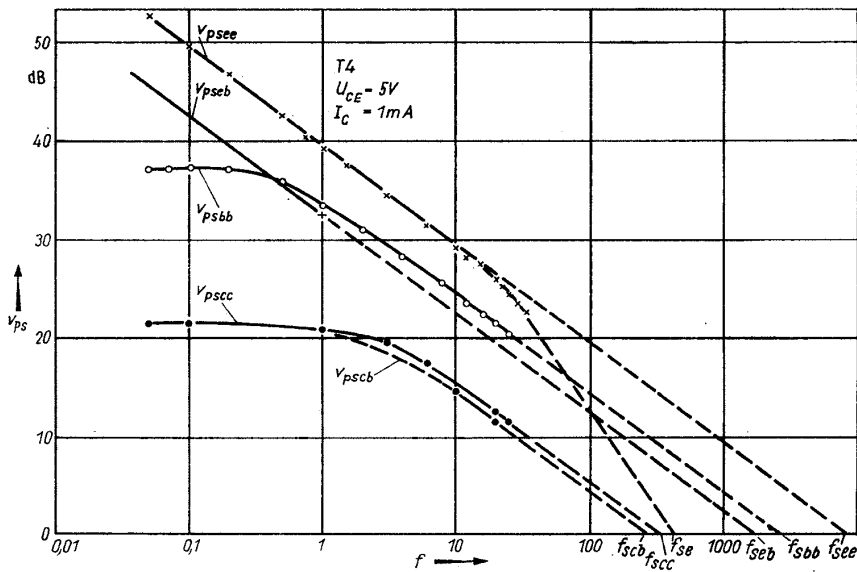
Dabei sind  $\tau_N, \tau_I, \tau_P$  Ladungszeitkonstanten für den Normal-, bzw. Invers- bzw. Parasitärbetrieb und  $U_{DE}, U_{DC}, U_{DS}$  die Diffusionsspannungen des jeweiligen Übergangs.

Bei dem in Bild 6 dargestellten Transportmodell wurden weiterhin die Bahnwiderstände  $r_{b'b}, r_{c'e}, r_{e'e}$  sowie ein den Early-Effekt modellierender Ausgangswiderstand  $r_{c'e'}$  als statische Modellparameter berücksichtigt. Für die Gln. (9) und (10) sind dann die Spannungen  $U_{BE'}, U_{BC'}, U_{SC'}$  anzusetzen. Für den als Verstärker betriebenen Transistor können die parasitären und inversen Stromquellen vernachlässigt werden. Die Beschreibung der verbleibenden, in Normalrichtung arbeitenden Stromquelle erfolgt über die komplexe Kleinsignal-Kurzschlußstromverstärkung in Emitterschaltung  $\beta_a$ . Weiterhin ist der Übergang von den statischen zu den dynamischen Bahnwiderständen zu vollziehen. Bei der Kleinsignal-Nachbildung der Diodenwirkungen können die Diffusionswiderstände des zu sperrenden Basis-Kollektor- und Kollektor-Substrat-Übergangs in erster Näherung entfallen. Die entsprechenden Diffusionskapazitäten kommen weniger auf Grund der in den Gln. (10) bzw. (11) angegebenen Beziehungen als vielmehr auf Grund des Early-Effekts zustande.

Bild 7 zeigt eine Variante der HF-Ersatzschaltung, bei der eine Aufteilung der Kollektorsperrschichtkapazität in die beiden Anteile  $C_{c1}$  und  $C_{c2}$  vorgenommen wurde. Die HF-Ersatzelemente lassen sich über eine Auswertung von NF-Werten und Grenzfrequenzen der maximalen stabilen Leistungsverstärkung  $V_{ps}$  nach dem in [2] beschriebenen Verfahren bestimmen. Als Beispiel zeigt Bild 8 die gemessene Frequenzabhängigkeit dieser Leistungsverstärkung in den 3 Grundschaltungen bei unterschiedlicher Substratbeschaltung für den kleinflächigen npn-Transistor der integrierten Teilschaltungsanordnung IA 616D. Die Auswertung der NF-Werte liefert zunächst:

$$\beta_0 = h_{21e0} = V_{pscc0} - 1, \quad g_m = \frac{I_C}{U_T}, \quad r_{b'e} = \frac{\beta_0}{g_m}, \quad (12)$$

$$\mu = \frac{U_T}{I_C} \cdot \frac{y_{21e0}}{V_{psbb0}}, \quad r_{c'e} = \frac{1}{\mu \cdot g_m}. \quad (13)$$

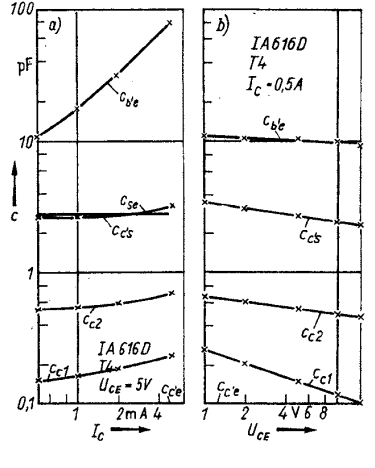
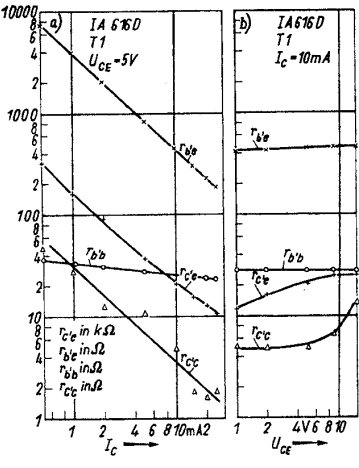
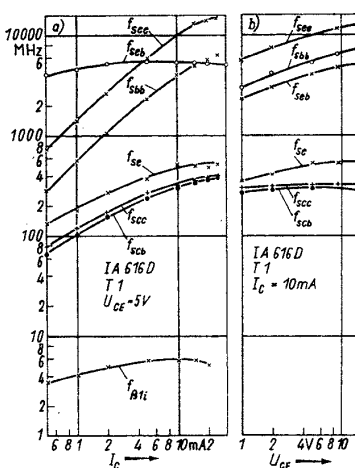
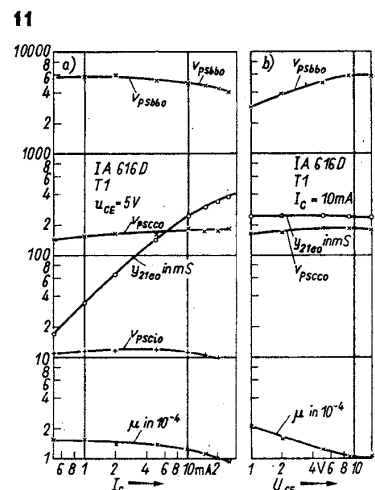
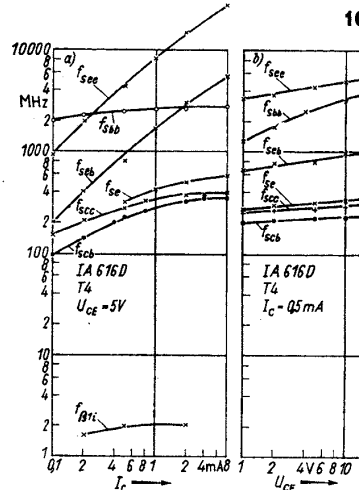
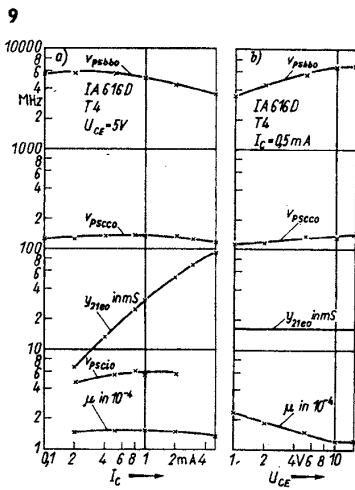


**Bild 8.** Gemessene Frequenzabhängigkeit der maximalen stabilen Leistungsverstärkung  
T1 großer npn-Transistor;  
T4 kleiner npn-Transistor

**Bild 9.** T4 kleiner npn-Transistor  
a) gemessene Stromabhängigkeit von NF-Kenngrößen sowie des Early-Faktors  $\mu$   
b) gemessene Spannungsabhängigkeit von NF-Kenngrößen sowie des Early-Faktors  $\mu$

**Bild 10.** T4 kleiner npn-Transistor  
a) gemessene Stromabhängigkeit von Grenzfrequenzen  
b) gemessene Spannungsabhängigkeit von Grenzfrequenzen

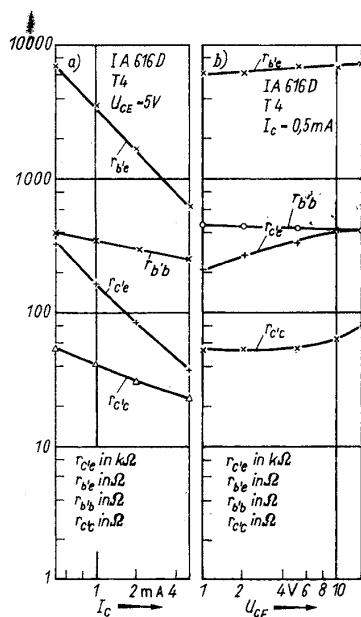
**Bild 11.** T1 großer npn-Transistor  
a) gemessene Stromabhängigkeit von NF-Kenngrößen sowie des Early-Faktors  $\mu$   
b) gemessene Spannungsabhängigkeit von NF-Kenngrößen sowie des Early-Faktors  $\mu$



**Bild 12.** T1 großer npn-Transistor  
a) gemessene Stromabhängigkeit von Grenzfrequenzen  
b) gemessene Spannungsabhängigkeit von Grenzfrequenzen

**Bild 14.** T4 kleiner npn-Transistor  
a) Stromabhängigkeit von HF-Ersatzelementen  
b) Spannungsabhängigkeit von HF-Ersatzelementen

**Bild 15.** T1 großer npn-Transistor  
a) Stromabhängigkeit von HF-Ersatzelementen  
b) Spannungsabhängigkeit von HF-Ersatzelementen



**Bild 13**  
T4 kleiner npn-Transistor  
a) Stromabhängigkeit von HF-Ersatzelementen  
b) Spannungsabhängigkeit von HF-Ersatzelementen

Bei niedrigen Kollektorgleichströmen, für die die Ungleichung  $r_{b'e}/r_{b'e} \ll 1$  erfüllt ist, erhält man:

$$C_{c1} + C_{c2} = \frac{g_m}{\omega_{se}}, \quad C_{c's} = g_m \left( \frac{1}{\omega_{seb}} - \frac{1}{\omega_{see}} \right), \quad (14)$$

$$r_{c'e} = \frac{1}{C_{c's}} \left( \frac{1}{\omega_{seb}} - \frac{1}{\omega_{see}} \right),$$

$$\omega_{\beta 1} = 2\pi f_{\beta 1} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_{see}} - r_{c'e}(C_{c1} + C_{c2})}, \quad (15)$$

$$C_{b'e} = \frac{g_m}{\omega_{\beta 1}} = C_{se} + C_{de} = C_{se} + g_m \cdot \tau_N. \quad (16)$$

Weiterhin ist

$$\frac{C_{c2}}{C_{c1}} = \frac{\omega_{sb} \cdot \omega_{\beta 1}}{(\omega_{se})^2} \quad (17)$$

und somit schließlich

$$r_{b'b} = \frac{1}{\omega_{sb} \cdot C_{c1}}, \quad r_{e'e} = \frac{1}{Y_{21e0}} - \frac{U_T}{I_C} - \frac{r_{b'h}}{V_{psc0}}. \quad (18)$$

Die Bilder 9 bis 12 zeigen die Arbeitspunktabhängigkeit der meistechnisch ermittelten NF-Werte und Grenzfrequenzen des kleinen bzw. großen npn-Transistors. Die Zwischenergebnisse zur ermittelten Strom- und Spannungsabhängigkeit des Early-Faktors sind in den Bildern 9 bis 11 enthalten. Die Auswertung der Stromabhängigkeit der  $f_{\beta 1}$ -Grenzfrequenz ermöglicht die Bestimmung der Ladungszeitkonstanten  $\tau_N$  sowie der Emittersperrschichtkapazität  $C_{se}$  und damit die Aufteilung von  $C_{b'e}$  in  $C_{de}$  und  $C_{se}$ . In Tafel 2 sind einige HF-Kennwerte zusammengestellt.

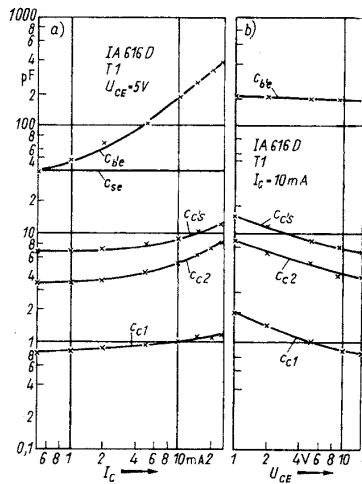
Die Bilder 13 bis 16 zeigen die über die  $V_{ps}$ -Auswertungen mit den Gln. (12) bis (18) ermittelte Arbeitspunktabhängigkeit der HF-Ersatzelemente.

Die zur Bestimmung von  $\tau_I$ , der Ladungszeitkonstante für den Inversbetrieb herangezogene Grenzfrequenz  $f_{\beta 1i}$  wurde dabei wie folgt aus den Meßwerten berechnet:

$$f_{\beta 1i} = (V_{psc0i} - 1) f \left( \frac{|V_{psc0i}|^2 - 1}{(|V_{psc0i}|^2 - |V_{psc0i}|^2)} \right)^2. \quad (19)$$

Eingegangen am 1. Februar 1982

NaA 8841



**Bild 16**  
T1 großer npn-Transistor  
a) Stromabhängigkeit von HF-Ersatzelementen  
b) Spannungsabhängigkeit von HF-Ersatzelementen

**Tafel 2**

|                        | $\beta_0 \max$ | $\beta_0 i \max$ | $I_C$ in mA bei $\beta_0 \max$ | $I_C$ in mA bei $\beta_0 i \max$ | $\tau_N$ in us | $\tau_I$ in us | $C_{se}$ in pF |
|------------------------|----------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| kleiner npn-Transistor | 137            | 5                | 0,9                            | 0,8                              | 0,38           | 70             | 2,75           |
| großer npn-Transistor  | 181            | 11               | 25                             | 5                                | 0,35           | 26             | 38,24          |

### Literatur

- [1] Schmalwasser, W.; Möller, W.: Untersuchungen zum Transportmodell integrierter Transistoren. Nachrichtentech., Elektron., 28 (1978) 7, S. 291 - 295
- [2] Baumann, P.: Halbleiter-Praxis. Reihe Informationselektronik. Berlin: VEB Verlag Technik 1978
- [3] Berkner, J.: Messungen zum Transportmodell integrierter npn-Transistoren. Praktikumsbeleg. IH Dresden 1982

Dr.-Ing. Peter Baumann, Dipl.-Ing. Jörg Berkner. VEB Halbleiterwerk Frankfurt (Oder)