

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

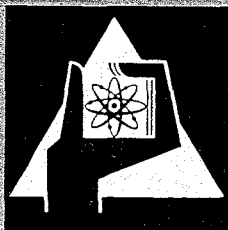
Februar 1967

KFK 509

Institut für Angewandte Kernphysik

Rauschen eines gekühlten, ladungsempfindlichen Vorverstärkers mit
parallel geschalteten Feldeffekt-Transistoren

U. Tamm



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt.

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor.

Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.

Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Februar 1967

KFK 509

Institut für Angewandte
Kernphysik

Rauschen eines gekühlten, ladungsempfindlichen Vorverstärkers
mit parallel geschalteten Feldeffekt-Transistoren

von

U. Tamm

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

1. Einführung

Die sehr gute Energieauflösung, die mit gekühlten, Lithium-gedrifteten Germanium-Detektoren erreicht wird, kann nur dann voll ausgenutzt werden, wenn der Beitrag des ladungsempfindlichen Vorverstärkers zur Auflösung gegenüber der statistischen Auflösung des Detektors vernachlässigt werden kann.

Für in einen Germanium-Detektor einfallende γ -Strahlung von z.B. 100 keV beträgt die statistische Linienbreite etwa 0,5 keV. Der Rauschbeitrag des Vorverstärkers sollte wesentlich unter diesem Wert liegen, um eine wahrnehmbare Zunahme der Linienbreite zu vermeiden.

In den Eingangsstufen der Vorverstärker wurden bisher im wesentlichen Elektronenröhren verwendet, die im Vergleich mit bipolaren Transistoren das kleinere Eingangsrauschen aufweisen. Der beste bisher für Röhrenverstärker erreichte Wert [1] ist 1,2 keV bei einer externen Kapazität von 0 pF. Seit etwa zwei Jahren werden auch Feldeffekt-Transistoren (FET) verwendet, mit denen sich das Vorverstärkerrauschen weiter verringern läßt. Mit dem im folgenden beschriebenen Verstärker wurde ein Wert von 0,46 keV erreicht. Dabei wurde der FET auf eine Temperatur von etwa 140 °K gekühlt. Der entsprechende Wert für Zimmertemperatur ist 0,65 keV.

Eine weitere Forderung, die durch die Anwendung von großvolumigen, koaxial gedrifteten Detektoren mit ihren großen Kapazitätswerten auftritt, ist die nach einer möglichst kleinen Zunahme des Rauschens in Abhängigkeit von der Detektorkapazität. Der bei Röhrenverstärkern erzielte Wert [1] beträgt 0,041 keV/pF. Bei dem FET-Vorverstärker wurde der Rauschanstieg durch vier parallel geschaltete Transistoren auf einen Wert von 0,017 keV/pF bei 140 °K verringert. Für Zimmertemperatur beträgt ihr Wert 0,034 keV/pF.

2. Beschreibung des Vorverstärkers

Das Schaltbild des ladungsempfindlichen Vorverstärkers ist in Fig. 1 dargestellt. Der Vorverstärker, der auf eine von Smith und Cline angegebene Konzeption zurückgeht [2], besteht im wesentlichen aus drei Stufen, der Kathodenstufe mit den parallel

geschalteten Feldeffekt-Transistoren, einem Stromverstärker und der Ausgangsemittlerfolgerstufe. Die Rückkopplung erfolgt über alle drei Stufen mit einer Kapazität von 0,6 pF.

Die erste Stufe wird von den folgenden getrennt und in dem Cryostaten möglichst nahe am Detektor eingebaut, um zusätzliche Zuleitungskapazitäten zu vermeiden. Über einen Temperaturteiler werden die Feldeffekt-Transistoren auf die für minimales Rauschen erforderliche Temperatur von etwa 140 °K gekühlt. Die Feldeffekttransistoren vom Typ 2N 3823 sind direkt bei Texas Instruments ausgesucht worden, um beste Rauscheigenschaften zu erreichen. Dabei zeigte sich, daß nur einer von etwa dreißig Transistoren den hohen Anforderungen entspricht. Die gemessenen Steilheiten liegen bei 300 °K im Bereich von 4,0 bis 4,5 mA/V bei einer Gitter-Kathoden-Spannung von 0 V und einer Anodenspannung von 10 V. Durch Kühlen auf 140 °K läßt sich die Steilheit um etwa 60 % vergrößern [3]. Die Gitter-Kathoden-Kapazität einschließlich Streukapazität beträgt etwa 8 pF, der Gitterstrom ist < 2 pA.

Mit diesen Daten und den im nächsten Abschnitt abgeleiteten Rauschformeln lassen sich die Rauscheigenschaften berechnen und die optimalen Integrations- und Differentiationszeitkonstanten für den Hauptverstärker angeben.

3. Bestimmung der Rauschbeiträge

Die Abhängigkeit des Rauschen von Temperatur, Detektorkapazität und Zeitkonstanten läßt sich nur an den einzelnen, zum Gesamt-rauschen beitragenden Rauschquellen feststellen. Im Detektor-Vorverstärker-System gibt es im wesentlichen sechs solcher Quellen, die im Detektor und der ersten Stufe des Vorverstärkers zu suchen sind. Die Formeln dafür werden im folgenden angegeben.

Das thermische Kanalrauschen im Feldeffekt-Transistor entspricht dem Schrotrauschen bei Röhren und wird als Rauschspannung eines äquivalenten Widerstandes parallel zur Gitter-Kathoden-Strecke

des FET dargestellt. Mit dem von van der Ziel [4] angegebenen äquivalenten Widerstand $R_{eq} = 0,7/S$ beträgt das mittlere Spannungsquadrat

$$\overline{u_k^2} = 4 kT R_{eq} \Delta f = \frac{1,4 kT}{S} \Delta \omega$$

Das thermische Gitterrauschen ist vom thermischen Kanalrauschen abhängig und entsteht durch die Gitter-Kathoden-Kapazität C_{gk} , die einen Teil des Kanalrauschens in den Eingangskreis überkop-pelt. Mit einem von Radeka [5] angegebenen äquivalenten Widerstand $R_{eq} = \frac{1}{3} \frac{0,7}{S} \left(\frac{C_{gk}}{C_G}\right)^2$ beträgt das Spannungsquadrat

$$\overline{u_T^2} = \frac{0,47 kT}{I_s S} \left(\frac{C_{gk}}{C_g}\right)^2 \Delta \omega^*$$

Das 1/f-Rauschen (Funkelrauschen) wird durch folgende Formel ausgedrückt [6]

$$\overline{u_F^2} = \frac{A}{f} \Delta f = \frac{A}{\omega} \Delta \omega$$

wobei der Wert für A experimentell ermittelt werden muß.

Das Gitterstromrauschen resultiert aus statistischen Schwankungen des Gitterstromes [6] $i_G^2 = 2 e I_g \Delta f$, die über dem resultierenden Widerstand des Eingangskreises eine Rauschspannung erzeugen. Innerhalb der Bandbreite des Verstärkersystems ist - bei großem Detektor- und Gitterwiderstand - der resultierende Widerstand im wesentlichen kapazitiv (Gesamtkapazität von Detektor und FET).

Das Rauschspannungsquadrat lautet

$$\overline{u_G^2} = \frac{2eI_g}{\omega^2 C_G^2} \Delta f = \frac{eI_g}{\pi \omega^2 C_G^2} \Delta \omega$$

Das Detektorstromrauschen erzeugt analog dem Gitterstromrauschen folgendes Rauschspannungsquadrat

$$\overline{u_D^2} = \frac{e I_D}{\pi \omega^2 C_G^2} \Delta \omega$$

* C_G ist die Gesamtkapazität am Eingang des Vorverstärkers.

Das Gitterwiderstandsrauschen wird verursacht durch den gesamten ohmschen Widerstand im Eingangskreis. Bei großen Widerstandswerten ist das Rauschstromquadrat

$$\overline{i_R^2} = \frac{4kT}{R} \Delta f$$

Das Rauschspannungsquadrat über der Eingangskapazität ist dann

$$\overline{u_R^2} = \overline{i_R^2} \frac{1}{\omega^2 C_G^2} = \frac{2kT}{\pi \omega^2 R C_G^2} \Delta \omega$$

Die gesamte Rauschspannung am Eingang des Vorverstärkers ergibt sich aus der Summe der einzelnen Ausdrücke zu

$$\overline{u_e^2} = \left[\frac{1,4 kT}{\pi S} + \frac{0,47 kT}{\pi S} \left(\frac{C_{gk}}{C_G} \right)^2 + \frac{A}{\omega} + \frac{1}{\pi \omega^2 C_G^2} (eI_g + eI_D + \frac{2kT}{R}) \right] \Delta \omega$$

Unter Berücksichtigung der Filtereigenschaften des Hauptverstärkers [7] und durch Umrechnung der Spannung in eine Energie ergibt sich für Germaniumdetektoren eine äquivalente Rauschenergie am Eingang des Vorverstärkers zu

$$\overline{E^2} = \sqrt{0,7 \cdot 10^{-4} \frac{C_G^2 T}{S \tau} + 0,24 \cdot 10^{-4} \frac{C_{gk}^2 T}{S \tau} + 0,7 \cdot 10^{-4} A C_G^2 + 5,7 \cdot 10^{-4} \tau \cdot (I_g + I_D) + 0,1 \frac{T \tau}{R}} \sqrt{\text{keV}^2}$$

mit C in pF, τ in μs , S in mA/V, I_g und I_D in μA , R in M Ω , T in $^\circ\text{K}$ und A in 10^{-14}V^2 .

Zur Bestimmung des Rauschanstieges sind nur die kapazitätsabhängigen Terme der Rauschenergie notwendig. Für $C_G \gg C_{gk}$ kann das thermische Gitterrauschen vernachlässigt werden. Der Anstieg errechnet sich dann nach folgender Formel:

$$\frac{dE}{dC} = \sqrt{0,7 \cdot 10^{-4} \frac{T}{S \tau} + 0,7 \cdot 10^{-4} A} \sqrt{\text{keV/pF}}$$

Durch n parallel geschaltete FET wird der Rauschanstieg verringert, da dann die Steilheit S mit n multipliziert werden muß.

4. Vergleich der berechneten und gemessenen Rauschwerte

Bei den Berechnungen der Rauschwerte wird angenommen, daß das $1/f$ -Rauschen vernachlässigbar klein ist. Die berechneten Werte sind mit den Formeln im vorhergehenden Abschnitt ermittelt worden. In Tabelle 1 sind die Werte angegeben jeweils für 1 und 4 FET und für $300\text{ }^{\circ}\text{K}$ und $140\text{ }^{\circ}\text{K}$.

In Tabelle 2 ist der kapazitätsbedingte Rauschanstieg angegeben. Für Zimmertemperatur stimmen gemessene und gerechnete Werte sehr gut überein. Bei $140\text{ }^{\circ}\text{K}$ sind die gemessenen Werte höher als die gerechneten, so daß der Schluß nahe liegt, daß hier das $1/f$ -Rauschen nicht mehr vernachlässigt werden kann.

Figur 2 zeigt die Rauschenergie als Funktion der externen Kapazität, die für 1 und 4 FET bei Zimmertemperatur gemessen wurde. Die Kurven für 2 und 6 FET wurden aus diesen Werten extrapoliert. Durch Kühlen der FET auf $140\text{ }^{\circ}\text{K}$ lassen sich die Rauschwerte um etwa 25 - 30 % verringern. Anhand dieser Kurven läßt sich sofort die optimale Anzahl der parallel geschalteten FET für eine bestimmte Detektorkapazität bestimmen.

Die Wahl der optimalen Zeitkonstanten für den Hauptverstärker läßt sich ebenfalls aus den einzelnen Rauschanteilen bestimmen. In Fig. 3 sind die Rauschanteile als Funktion der Zeitkonstanten aufgetragen, Parameter sind dabei die verschiedenen Transistor- und Detektordaten.

Wie aus den Kurven in Fig. 3 zu ersehen ist, kommt bei Zeitkonstanten unter $1\text{ }\mu\text{s}$, die bei hohen Zählraten zur Vermeidung von Pile-up-Effekten wünschenswert sind, der Hauptbeitrag des Rauschens vom thermischen Kanalrauschen der Feldeffekt-Transistoren. Durch Verbesserung der Transistoreigenschaften wie Steilheit und Gitter-Kathoden-Kapazität (in nächster Zeit sind Feldeffekt Transistoren mit einer Steilheit von 20 bis 30 mA/V zu erwarten) wird es möglich sein, das

Rauschen des Vorverstärkers noch um einen Faktor 2 bis 3 zu verbessern, so daß auch im Energiebereich unter 100 keV der Beitrag eines Vorverstärkers zur gesamten Energieauflösung klein wird.

Literatur

- [1] J.L. Blankenship, IEEE Trans. NS-11, No. 3 (1964) 373
- [2] K.F. Smith and J.E. Cline, IEEE Trans. NS-13, No.3 (1966) 468
- [3] T.V. Blalock, IEEE Trans. NS-13, No.3 (1966) 457
- [4] A. van der Ziel, Proc. IRE, 50 (1962) 1808
- [5] V. Radeka, IEEE Trans. NS-11, No. 3 (1964) 358
- [6] A.B. Gillespie, Signal, Noise and Resolution in Nuclear Counter Amplifiers (Pergamon Press, London, 1953)
- [7] F.S. Goulding and W.L. Hansen, Nucl. Instr. and Meth. 12 (1961) 249

Tabelle 1 Rauschenergie

Zahl der FET	T $\sqrt{\text{K}}$	E $\sqrt{\text{keV}}$			
		C _{ex} = 0 pF		C _{ex} = 68 pF	
		berechnet	gemessen	berechnet	gemessen
1	300	0,52	0,65	3,6	3,6
4	300	0,98	1,13	2,5	2,6
1	140	0,35	0,45	2,0	2,5
4	140	0,58	0,80	1,4	1,8

Tabelle 2 Rauschanstieg

Zahl der FET	T $\sqrt{\text{K}}$	$\sqrt{\text{keV/pF}}$	
		berechnet	gemessen
1	300	0,048	0,050
4	300	0,023	0,023
1	140	0,026	0,034
4	140	0,013	0,017

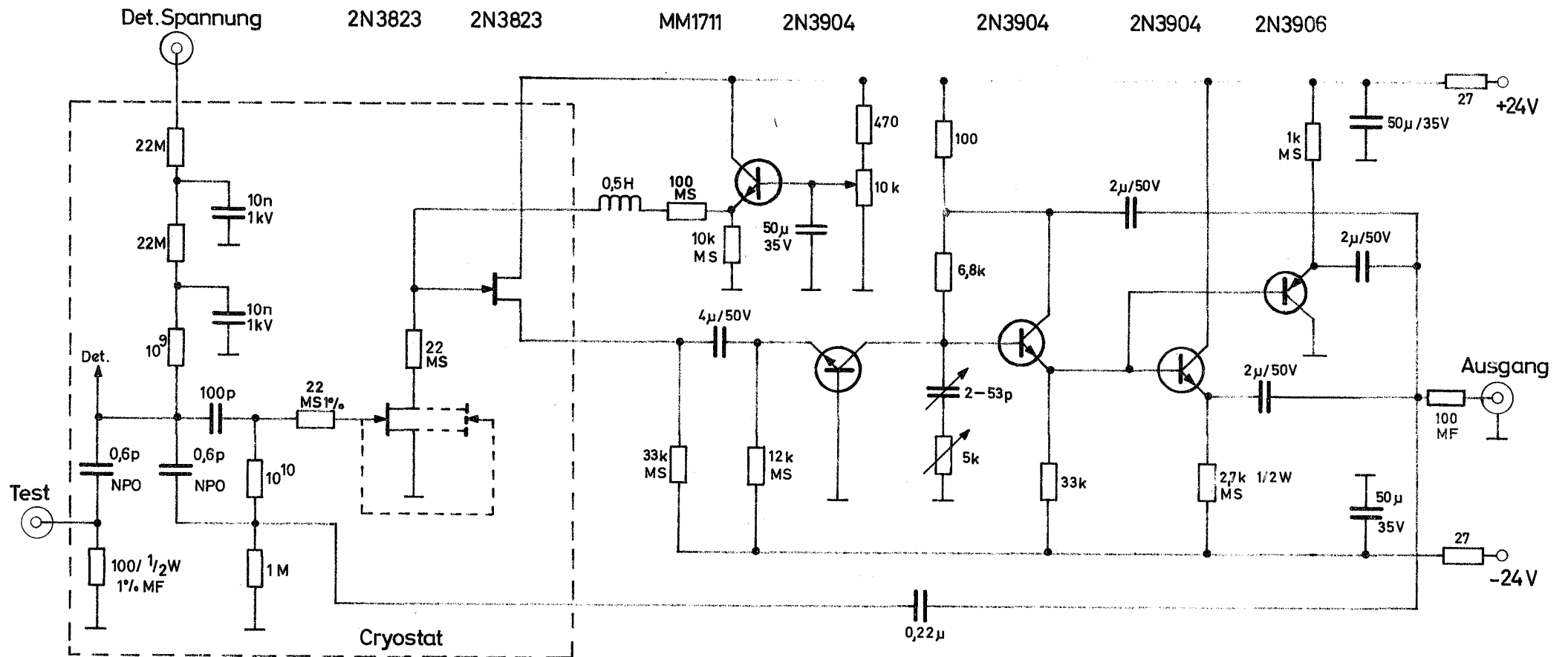


Fig.1 Ladungsempfindlicher FET-Vorverstärker

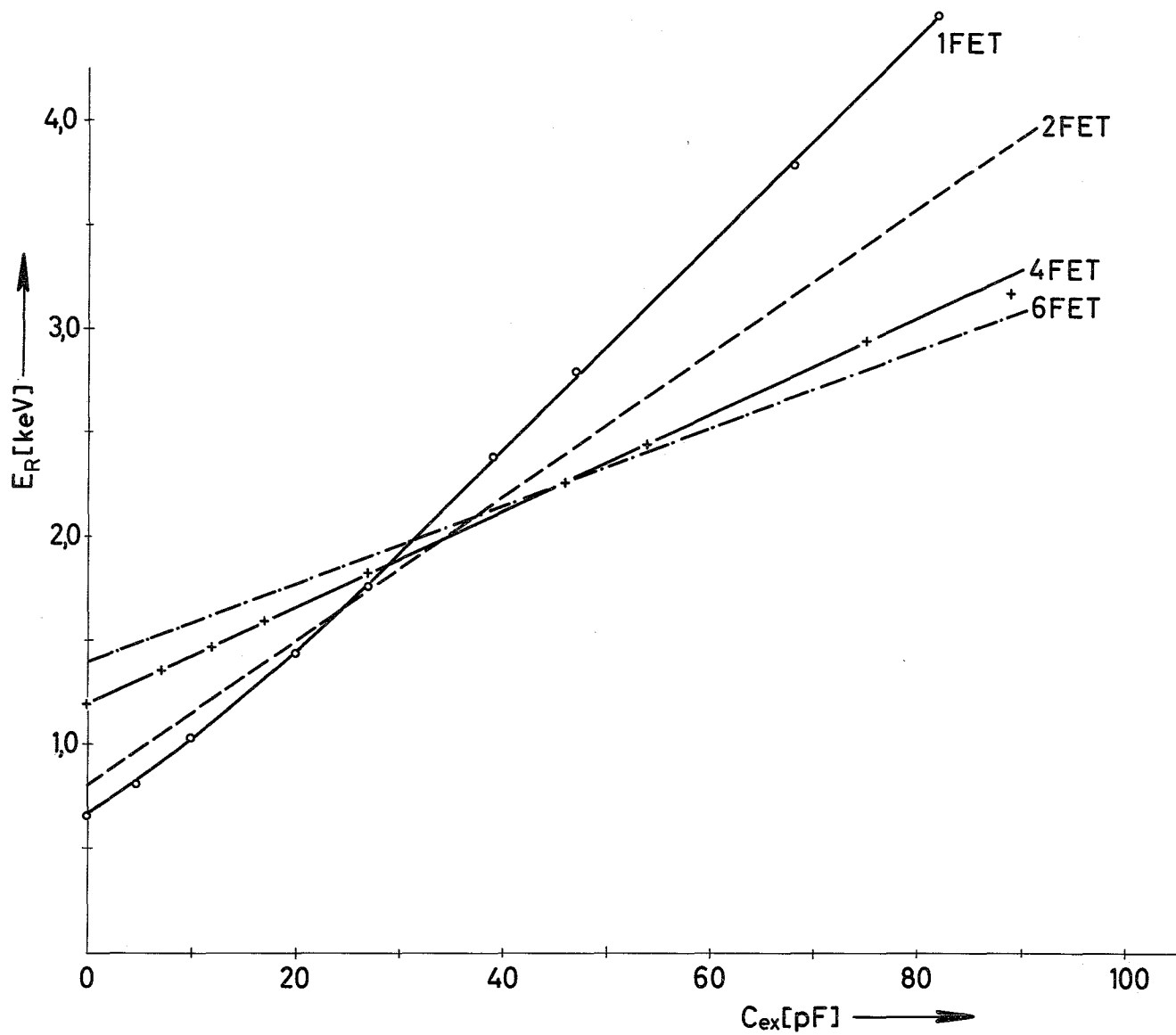


Fig. 2 Rauschenergie als Funktion der Kapazität bei 300°K

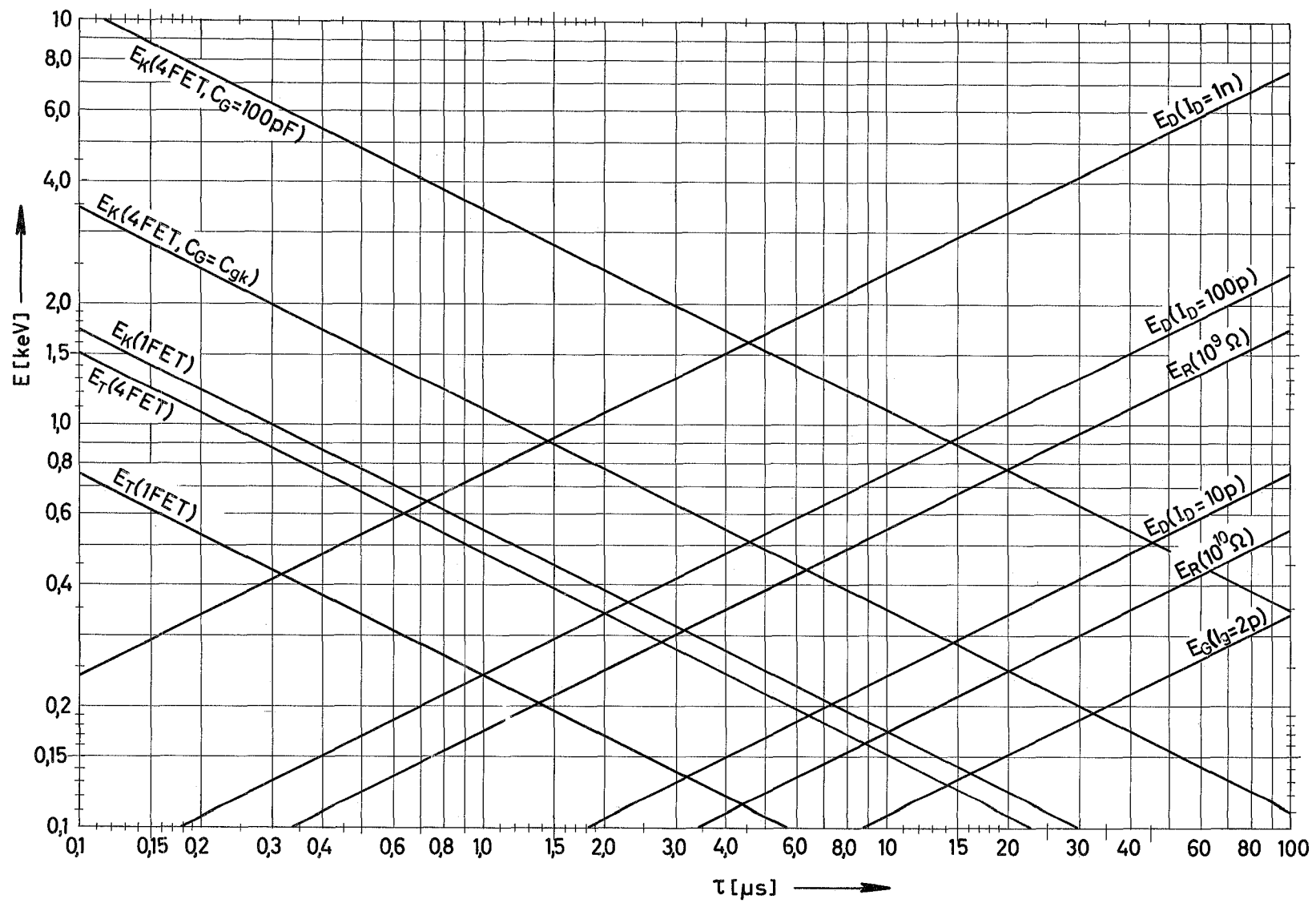


Fig.3 Rauschenergien als Funktion der Zeitkonstanten