

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

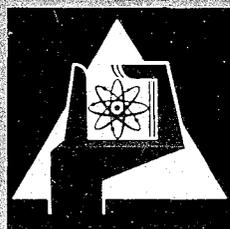
September 1967

KFK 617

Institut für Angewandte Kernphysik

Zur Leading edge-Methode mit Impulstransformatoren
Erniedrigung der Ansprechschwelle durch einen
rauscharmen schnellen Vorverstärker

W. Michaelis



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

September 1967

KFK 617

Institut für Angewandte Kernphysik

Zur Leading edge-Methode mit Impulstransformatoren.
Erniedrigung der Ansprechschwelle durch einen rausch-
armen schnellen Vorverstärker

von

W. Michaelis

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe



1. Einleitung

Eine besondere Eigenschaft der Halbleiterdetektoren ist neben ihrer hohen Energieauflösung ihre Koinzidenzfähigkeit. Die fortschreitende Entwicklung in der Halbleitertechnik ermöglicht die Herstellung von Zählern hinreichender Ansprechwahrscheinlichkeit, so daß Koinzidenzanordnungen in zunehmendem Maße Verwendung finden. Dabei werden Silizium- oder Germaniumdetektoren entweder mit einem Szintillationszähler oder auch mit einem anderen Halbleiterdetektor kombiniert. In jedem Falle stellt sich das Problem der Entnahme des Zeitsignals vom Halbleiterzähler. Ebenso erfordern Laufzeitexperimente eine entsprechende Zeitinformation. Bei vielen Aufgabenstellungen hat sich die Verwendung eines Impulstransformators zwischen Halbleiterzähler und ladungsempfindlichem Vorverstärker gut bewährt. Der vorliegende Bericht diskutiert die Eigenschaften dieses Verfahrens sowie die Möglichkeiten, mit Hilfe eines rauscharmen schnellen Spannungsvorverstärkers die Ansprechschwelle des Zeitsystems zu reduzieren.

2. Erzeugung von Zeitsignalen mit einem Impulstransformator

Das System arbeitet nach einem sehr einfachen Prinzip unter Ausnutzung der Leading edge-Methode. In der Sekundärwicklung des Transformators wird durch den Impulsstrom vom Detektor ein schnelles Signal induziert, das über einen Transistor-Breitbandverstärker auf einen Tunnelkondensatordiskriminator gelangt. Solche Systeme sind kommerziell erhältlich (z.B. ORTEC).

Der Transformator besteht im allgemeinen aus einem Ferritring mit 2 bis 6 speziell gewickelten Primär- und Sekundärwindungen. Das Prinzip besitzt gegenüber der Crossover-Methode verschiedene Vorteile. Die wichtigsten sind die günstigere Zeitverteilung sowie eine weitgehende Unabhängigkeit von Einzelheiten der Ladungsträgersammlung. Die Optimierung der Energieauflösung erfordert lange Zeitkonstanten bei der Impulsformung. Dies führt bei Crossover-Technik praktisch immer zu einer Verbreiterung der Zeitverteilung. Die parallele Verarbeitung der Impulse in getrennten Verstärkern verlangt einen merklich

größeren Aufwand. Während die Leading-edge-Methode auf den ersten Anstieg des Stromimpulses anspricht, wird beim Crossover-Verfahren die Information aus einem Zeitpunkt hergeleitet, der 50 % der Ladungsträgersammlung entspricht. Wenn sich somit der zeitliche Verlauf der Ladungsträgersammlung von Signal zu Signal ändert, so entsteht bei der Crossover-Technik eine zusätzliche Zeitunsicherheit^{1,2}. Für Zähler mit großem empfindlichen Volumen tritt dieser Fall fast immer ein.

Die Verwendung eines Impulstransformators gestattet sehr genaue Zeitmessungen. So wurden bei der Spektroskopie von Spaltprodukten nach diesem Prinzip Zeitgenauigkeiten von weniger als 1 nsec erreicht³.

Vor allem zwei Nachteile beschränken die Anwendbarkeit des Verfahrens. Im wesentlichen durch die erhöhte Eingangskapazität für den ladungsempfindlichen Vorverstärker wird das Energieauflösungsvermögen bei Spektrometern sehr hoher Auflösung messbar beeinträchtigt. Das gilt z.B. für Lithium-gedriftete Germaniumzähler mit kleiner Kapazität, insbesondere bei Verwendung von fortgeschrittenen Verstärkern mit parallel geschalteten Feldeffekt-Transistoren. Bei der Spektroskopie von α -Teilchen hingegen ($\Delta E \approx 15$ keV FWHM) kann der Einfluß bereits vernachlässigbar gering gehalten werden. Der zweite Nachteil ist die starke Abhängigkeit der Ansprechschwelle des Zeitsystems vom Detektorvolumen. Die Ursache liegt in der Abhängigkeit der Ladungsträgersammelzeit von der Dicke der empfindlichen Zone. Es gilt in guter Näherung:

$$T = \frac{W^2}{\mu U} \quad (1)$$

Dabei ist T die Sammelzeit in sec, μ die Beweglichkeit der Ladungsträger in $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{sec}^{-1}$, W die Dicke der empfindlichen Zone in cm und U die angelegte Spannung in V. Große Feldzonentiefen ergeben somit einen langsameren Impulsanstieg, es wird in der Sekundärwicklung ein kleineres Signal induziert und die Ansprechschwelle des Systems nimmt zu. Die Betriebsspannung des Detektors wird man möglichst hoch wählen. Der genaue zeitliche Verlauf der Ladungsträgersammlung für das einzelne Ereignis hängt außer von den in Gl. (1) enthaltenen Größen vom Entstehungsort der Ladungsträger ab. Bei koaxial gedrifteten Detektoren ist zusätzlich die elektrische Feldstärke von Ort zu Ort verschieden. Für großvolumige

Germaniumzähler kann die Ansprechschwelle bis zu Werten von einigen MeV ansteigen. Das bedeutet, daß bei vielen Anwendungen der wichtigste Teil des Meßbereichs verloren geht. Wegen der von Ereignis zu Ereignis unterschiedlichen Ladungsträgersammlung ist die Schwelle nicht scharf. Die Wahrscheinlichkeit für die Erzeugung eines Zeitsignals verändert sich vielmehr nur langsam mit steigender Energie. Der Übergangsbereich von 10 % bis 90 % Nachweiswahrscheinlichkeit kann für großvolumige Detektoren mehrere 100 keV betragen. Es ist daher wichtig, den Schwellwert genau zu definieren. Im folgenden wird unter der Ansprechschwelle der Energiewert verstanden, bei dem mindestens 90 % der Ereignisse zu einem Ausgangssignal der Zeiteinheit führen. In Datenblättern wird vielfach die Schwelle nicht definiert. Die Angabe des Wendepunktes ist wegen des breiten Übergangsbereiches wenig sinnvoll, da Zählwahrscheinlichkeiten $< 90\%$ im allgemeinen nicht toleriert werden können.

Über eine Erhöhung des Verstärkungsfaktors des Breitbandverstärkers ist eine Erniedrigung der Schwelle nicht zu erreichen. Die Verstärkung bzw. die Triggerschwelle des Tunneliodendiskriminators werden durch das Rauschen der Eingangsstufe im Verstärker begrenzt. Wegen der erforderlichen hohen Bandbreite des Transistor-Verstärkers liegt der Rauschpegel relativ hoch. Es entsteht die Frage, ob und inwieweit durch Verwendung eines rauscharmen Röhrenvorverstärkers zwischen Impulstransformator und Transistorverstärker eine Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses erreicht werden kann. Zum andern wäre zu prüfen, ob sich eine Eingangsstufe aus Feldeffekttransistoren mit hinreichend kurzer Anstiegszeit entwickeln läßt. Die erste Möglichkeit wird im folgenden näher diskutiert.

3. Schaltung eines schnellen rauscharmen Spannungsvorverstärkers

Für die Verstärkung von schnellen Signalen sehr kleiner Amplitude wurde ein rauscharmer Röhrenvorverstärker entwickelt, dessen Schaltung in Abb. 1 wiedergegeben ist. Der Verstärker besteht aus drei Stufen, und zwar aus zwei identischen Verstärkerstufen in Cascode-Schaltung sowie einer modifizierten White-Kathodenfolger-Ausgangsstufe. Bestückt ist der Verstärker mit der UHF-Triode E 88 C. Verschiedene Induktivitäten in den Gitter- und Anodenkreisen dienen der Verbesserung der oberen

Frequenzgrenze. Die Empfindlichkeit des Verstärkers kann mit Hilfe des Widerstandes R auf der Sekundärseite des Eingangstransformators variiert werden. Für die meisten Anwendungen empfiehlt sich $R = \infty$

Die Cascode-Schaltung besitzt günstige Rauscheigenschaften und kommt in der Verstärkung der Pentode sehr nahe. Bei gleichen Röhren gilt

$$V' = \frac{\mu R_a}{R_i + \frac{R_i + R_a}{\mu + 1}} \approx -S R_a. \quad (2)$$

Dabei ist V' der Verstärkungsfaktor, R_a der Anodenwiderstand, R_i der Innenwiderstand, μ der Leerlauf-Verstärkungsfaktor und S die Steilheit. Mit Stromgegenkopplung erhält man die Verstärkung

$$V \approx - \frac{S R_a}{1 + \frac{R_k}{R_a} (S R_a + 1)}, \quad (3)$$

wenn R_k der Kathodenwiderstand ist.

In der Ausgangsstufe wurde in den Anodenkreis der unteren Röhre ein Anodenwiderstand und in die Schaltung der oberen Röhre ein Kathodenwiderstand eingefügt⁴. Dadurch kann die Verstärkung auf Werte > 1 angehoben werden. Es gilt, wieder bei gleichen Röhren,

$$V = \frac{R_k^o}{R_k^o + Z} + \frac{R_a^u}{R_k^o + Z} \left(\frac{S R_a^o}{1 + S R_a^o} \right) \quad (4)$$

mit

$$Z = \frac{1}{S (1 + S R_a^o)}. \quad (5)$$

Dabei sind R_a^u der Widerstand im Anodenkreis der unteren Röhre sowie R_k^o und R_a^o der Kathoden- bzw. Anodenwiderstand der oberen Röhre.

Die Ausgangsimpedanz berechnet sich zu

$$Z_o = VZ \left(1 + \frac{R_k^o R_a^u}{R_k^o + R_k^u} S \right), \quad (6)$$

wobei Z wieder aus Gl. (5) folgt.

Mit (3) bis (5) erhält man für die Gesamtverstärkung unter Annahme von $S = 13.5 \text{ mA/V}$ und unter Verwendung der Daten aus Abb. 1 einen theoretischen Wert von 12.6. Messungen (mit Lastwiderstand $R_L \approx \infty$) ergaben Werte zwischen 10 und 13 in guter Übereinstimmung mit der Abschätzung. Für die Ausgangsimpedanz berechnet man nach Gl. (6) $Z_o = 38 \Omega$. Meßwerte stimmten innerhalb von 10 % mit dieser Voraussage überein.

Die Anstiegszeit des Verstärkers liegt zwischen 3 und 4 nsec. Die Schaltung ist also für schnelle Zeitsignale gut geeignet. Sofern die Impulse hinreichend kurz sind, bestehen keine Anforderungen an die Signalform. Abb. 2 zeigt Eingangs- und Ausgangsimpulsform (Verstärker ohne Impulstransformator) für ein Rechtecksignal von etwa 17 nsec Länge. Das Signal wurde erzeugt mit einem Impulsgenerator und hatte eine Anstiegszeit von 0.3 nsec. Die Anstiegszeit des Oszillographen betrug 0.6 nsec.

Für die Verstärkung von schnellen Zeitsignalen sind die Anforderungen an die Linearität gering. Wie aus Abb. 3 zu ersehen ist, ist die Linearität für Ausgangsimpulse mit einer Amplitude $U_A \leq 300 \text{ mV}$ hinreichend gut. Nur für diesen Bereich ist aber die Verwendung des Verstärkers überhaupt von Interesse.

4. Ansprechschwelle der Zeiteinheit bei Verwendung eines Vorverstärkers

Der in Abschnitt 3 beschriebene Verstärker wurde benutzt um zu prüfen, ob die Ansprechschwelle bei der Impulstransformatormethode herabgesetzt werden kann. Die Anstiegszeit der Schaltung ist hinreichend kurz so daß bei den in Frage kommenden Anwendungen keine merkliche Beeinträchtigung der Zeitinformation zu erwarten ist. Der Transistorverstärker mit Tunneliodendiskriminator und zugehöriger Kontrolleinheit sowie der ladungsempfindliche Verstärker waren kommerzielle Geräte (ORTEC). Für eine Relativmessung der Empfindlichkeit mit und ohne Vorverstärker genügte die Verwendung eines Impulsgenerators, dessen Signale über 3 pF auf die Primärwicklung des Transformators eingekoppelt wurden. Die Detektorkapazität wurde mit Kondensatoren verschiedener Größe simuliert. In beiden Messungen fand derselbe Transformator

Verwendung. Der Widerstand R auf der Sekundärseite (vgl. Abb. 1) war jeweils ∞ . Die Ausgangssignale des Vorverstärkers wurden direkt in den Transistorverstärker eingekoppelt. In Abb. 4 sind die Meßergebnisse für dieselbe Zeitentnahmeeinheit mit und ohne Vorverstärker wiedergegeben. Wie man sieht, wird die Empfindlichkeit bei Verwendung des Vorverstärkers etwa um einen Faktor 3 verbessert. Oberhalb 100 pF ist die Ansprechschwelle (zur Definition siehe Abschnitt 2) in beiden Fällen unabhängig von der Detektorkapazität. Zu sehr kleinen Kapazitäten hin nimmt die Empfindlichkeit zu. Eine äußerst saubere Spannungsversorgung erwies sich als unbedingte Voraussetzung für die Einsatzmöglichkeit des Verstärkers.

Die Absolutwerte in Abb. 4 beruhen auf einer Eichung des Impulsgenerators mit Hilfe eines Siliziumzählers ($W \approx 0.1$ mm; $U = 50$ V) und eines Am^{241} -Alphapräparates. Detektor- und Impulsgebersignale zeigten praktisch gleiche Zeitcharakteristik, so daß die Empfindlichkeit für die Detektorimpulse in etwa durch die für die künstlichen Signale wiedergegeben wird. Bei den Messungen für Abb. 4 war die Schwelle des Tunneldiodendiskriminators so eingestellt, daß auch vereinzelte große Rauschsignale keine Ausgangsimpulse ergaben. Eine etwas niedrigere Ansprechschwelle der Zeiteinheit kann erreicht werden, wenn solche Signale toleriert werden. Bei den meisten Anwendungen ist dies möglich, da zusätzlich noch andere Informationen (z.B. die Analoginformation) im Experiment verarbeitet werden. Ähnliche Probleme existieren auch bei Szintillationszählern (z.B. Bell-Stufe ⁵).

Für verschiedene Experimente dürfte die Verbesserung der Empfindlichkeit um etwa einen Faktor 3 von großem Nutzen sein. Andererseits gibt es Spektrometer, bei denen dieser Faktor bei weitem nicht ausreicht. Das gilt vor allem für großvolumige Germaniumdetektoren. Hier erscheinen andere Methoden erfolgversprechend ⁶.

Literatur

- 1) R.L. Graham, I.K. MacKenzie and G.T. Ewan, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-13 (1) (1966) 72
- 2) G.T. Ewan, R.L. Graham and I.K. MacKenzie, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-13 (3) (1966) 297
- 3) C.W. Williams, W.E. Kiker and H.W. Schmitt, Rev. Sci. Instruments 35, No. 9 (1964) 1116
- 4) A.S. Penfold, Rev. Sci. Instruments 29, No. 9 (1958) 765
- 5) R.E. Bell, R.L. Graham, H.E. Petch, Can. J. Phys. 30 (1952) 35
- 6) W. Michaelis, Nuclear Instr. and Meth. (to be published)

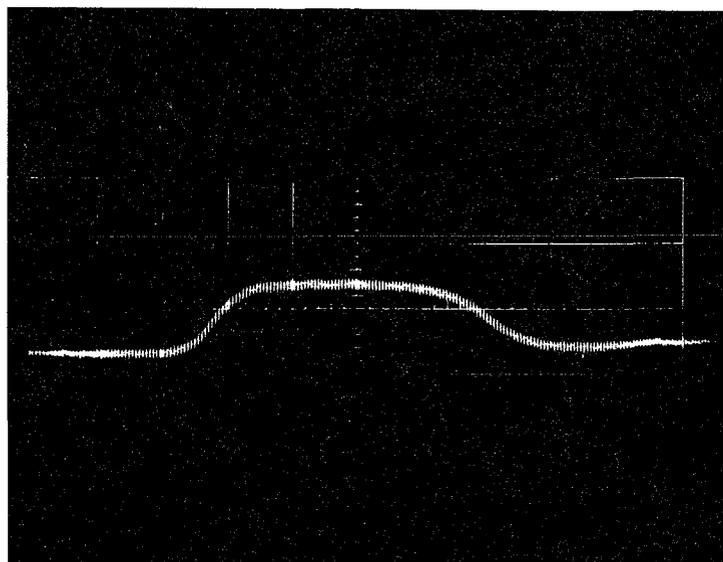
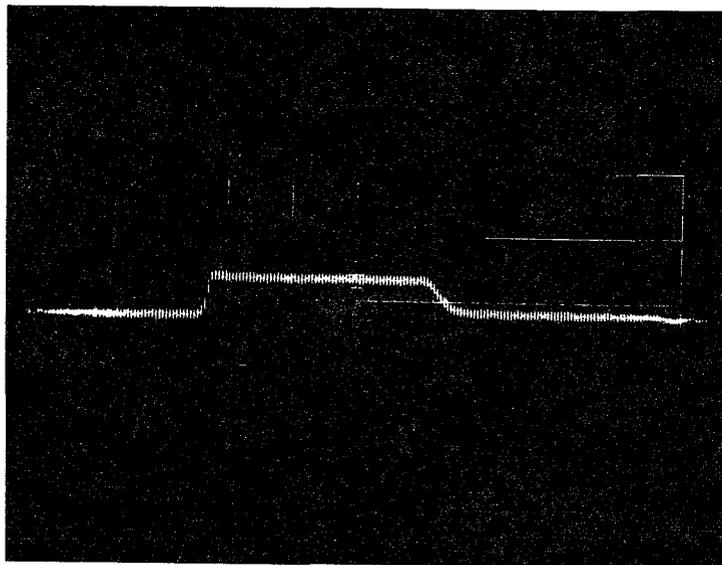


Abb. 2 Eingang- und Ausgangsimpulsform für ein Rechtecksignal. Anstiegszeit des Oszillographen 0.6 nsec

- a) Eingangsimpuls. Amplitudenskala 20 mV/cm;
Zeitablenkung 5 nsec/cm
- b) Ausgangsimpuls. Amplitudenskala 100 mV/cm;
Zeitablenkung 5 nsec/cm

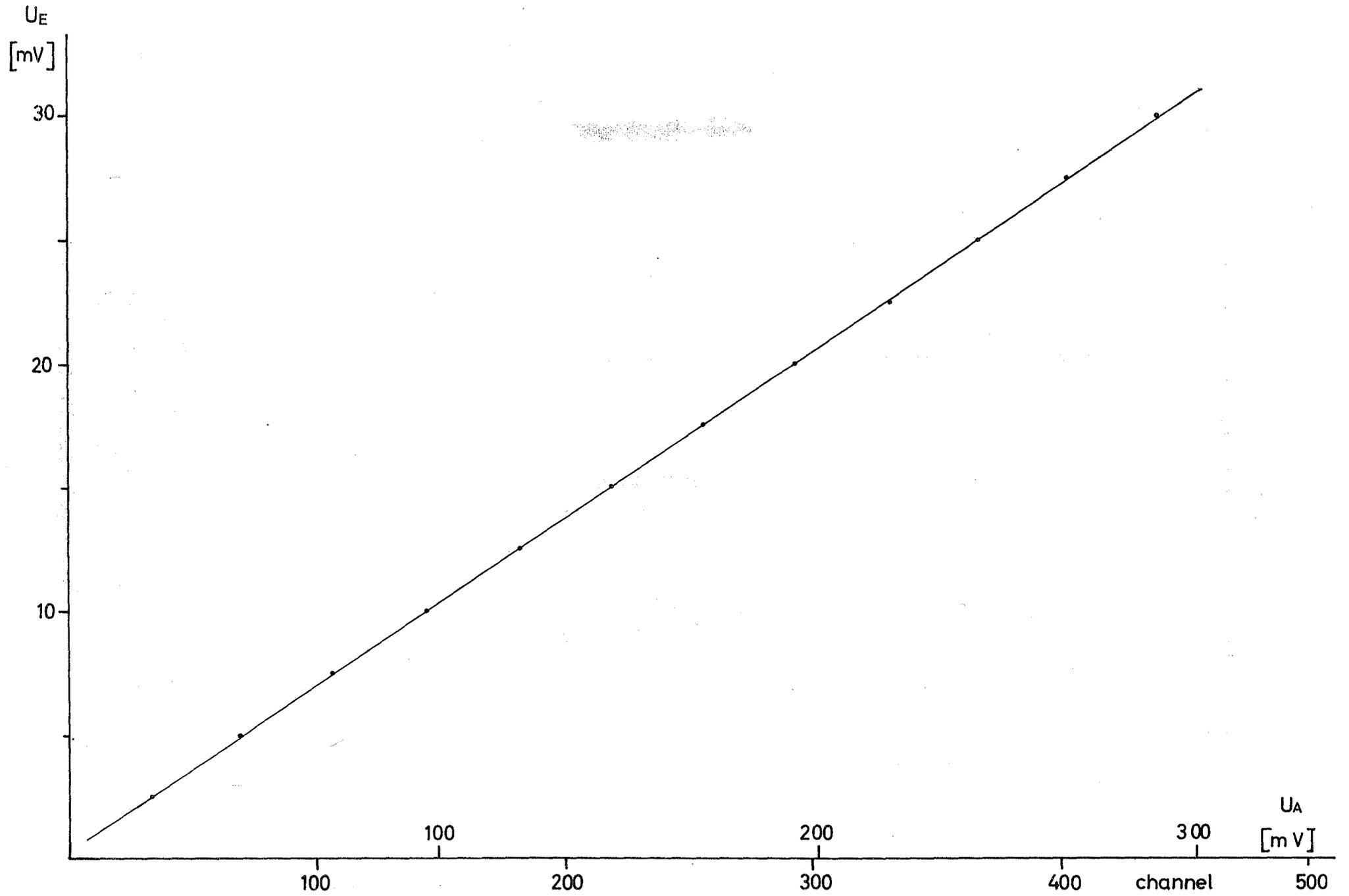


Abb. 3 Linearität des Vorverstärkers

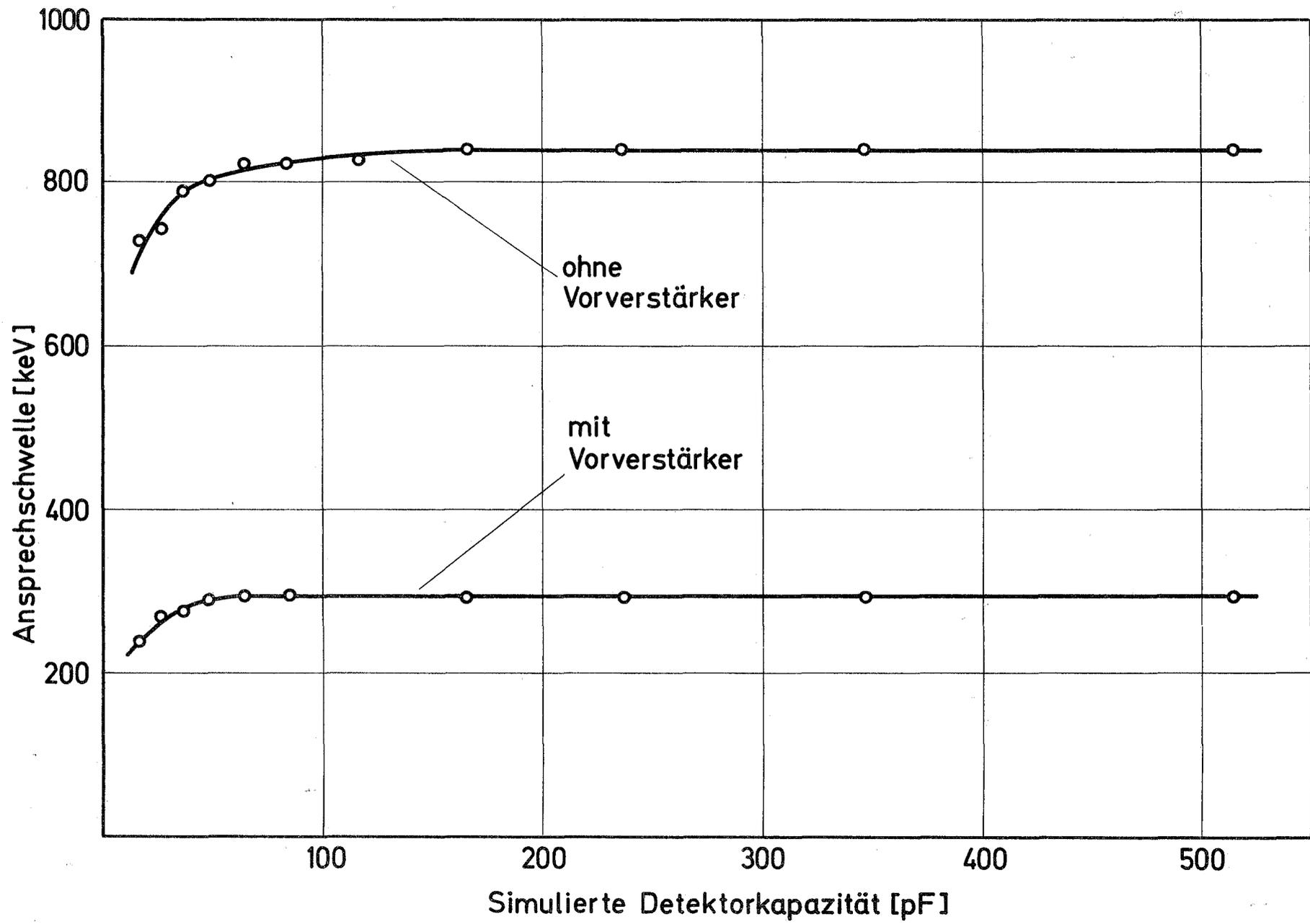


Abb. 4 Ansprechschwelle des Zeitentnahmesystems mit und ohne Vorverstärker als Funktion der Detektorkapazität