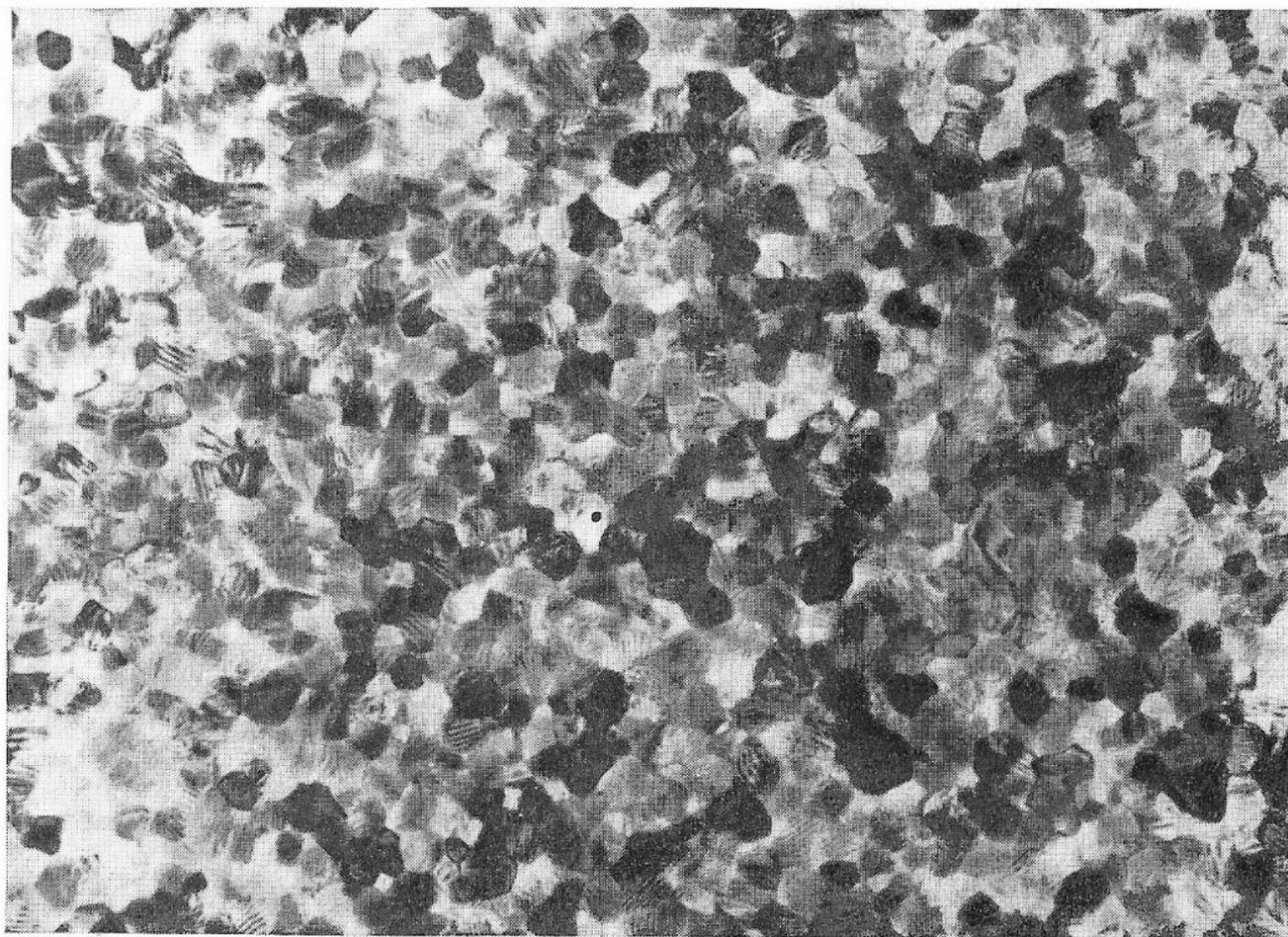


VEB KOMBINAT ELEKTRONISCHE BAUELEMENTE TELTOW
Arbeitsausschuß Kondensatoren der Kammer der Technik

BERICHTSBAND

**zur 4. Fachtagung „Kondensatoren“
mit internationaler Beteiligung**



17. bis 19. März 1987

Karl-Marx-Stadt

Herausgegeben im Auftrag
des Generaldirektors des
VEB Kombinat Elektroni-
sche Bauelemente Teltow

Doz. Dr. sc. nat. H.-D. Langer
(Herausg.)
Technische Universität
Karl-Marx-Stadt, Sektion
Physik/Elektronische Bau-
elemente

EIGENSCHAFTEN VON MOS-KONDENSATOREN MIT CVD-SCHICHTEN

A. Balasinski, M. Duszak, VR Polen
E. Erben, H.-D. Langer, TU Karl-Marx-Stadt

1. Einleitung

Dünne dielektrische Schichten auf Halbleiter-Substrat spielen eine wichtige Rolle in der Technologie integrierter Schaltkreise. An die Schichten stellt man hohe und spezifische Ansprüche. Das am häufigsten benutzte Dielektrikum-Halbleiter-System Siliziumdioxid-Silizium hat viele Vorteile; es ist jedoch nicht immer günstig, dieses zu verwenden.

Der Zweck dieser Arbeit ist ein Versuch zur Bestimmung einiger Eigenschaften, insbesondere der elektrophysikalischen Parameter der Systeme CVD- Al_2O_3 -Si und $-\text{Ta}_2\text{O}_5$ - Al_2O_3 -Si.

Man erwartet, daß Bauelemente mit diesen Schichten Anwendungen wegen ihrer hohen Dielektrizitätskonstanten und Ladungsspeichermöglichkeiten Eingang in die MOS-Technik finden können. Es sind auch Versuche unternommen und in der Literatur beschrieben worden, wonach solche Schichten in den sogenannten ionenempfindlichen Feldeffekttransistoren (ISFET) verwendbar sind /1/.

Um die Eigenschaften der Systeme kennenzulernen, wurden MOS-Kondensatoren mit diesen Schichten als Gateisolator als eine günstige Teststruktur hergestellt.

2. Experimentelle Untersuchungen

Auf n-Typ-(100)-Silizium-Scheiben (Halbleiterdotierung: 10^{15}cm^{-3}) wurden dünne Al_2O_3 - bzw. Al_2O_3 - Ta_2O_5 -Schichten mit Hilfe der CVD aufgetragen /2/. Vier Serien der Proben mit Angabe der Stapelung und der Schichtdicken (ellipsometrisch bestimmt) sind mit den Bezeichnungen I bis IV in Bild 1 schematisch dargestellt. Es handelt sich um Einfach- bzw. Doppelschichtanordnungen. Es wurden folgende Eigenschaften der Schichten anhand von Teststrukturen analysiert:

- Konstantstrom-Spannungsverläufe (I-U) und Hochfrequenz-Kapazitäts-Spannungsverläufe (HF-CU) der MOS-Kondensatoren
- ellipsometrische Messung der Schichtdicke und des Brechungsindex n der dielektrischen Schichten auf Si-Substrat.

Zur Realisierung der MOS-Kondensatoren wurden auf die Dielektrikum-Si-Struktur (großflächige Beschichtung des Si-Substrates):

- Al-Elektroden aus einer widerstandsbeheizten Dampfquelle über Wechselmasken
- bzw. Hg-Elektroden mit Hilfe der Quecksilberprobe aufgebracht.

3. Diskussion der Meßergebnisse

Zu den wichtigsten Parametern der untersuchten Proben zählen die Dielektrizitätskonstante K , die effektive Schichtdicke t_{eff} und die Grenzflächenladungsdichte Q_{eff} . Auf Basis der durchgeführten Messungen wurde der Versuch unternommen, den K -Wert auf verschiedenen Wegen zu bestimmen:

Zuerst wurde die Strom-Spannungs (I-U)-Kurven benutzt. Die gemessenen I-U-Verläufe wurden grafisch ausgewertet. Dazu wurde die grafische Darstellung mit den Koordinaten gesucht, in der die längste (auf den U-Bereich bezogen) lineare Kennlinie auftrat, die einem bestimmten Stromtransportmechanismus zuzuordnen ist /3/.

Wie aus Bild 2 ersichtlich, ließen sich die an der Politechnika Warschau gemessenen Kurven, dem Richardson-Schottky- (bzw. dem Poole-Frenkel-) Mechanismus mit der Charakteristik $\log I = f(U^{1/2})$ zuordnen. Im folgenden wird nach dem erstgenannten Modell ausgewertet.

Der Schottky-Strom I_S errechnet sich daraus wie folgt:

$$I_S = A_S \exp(-\phi_0/U_T) \exp(B_S \cdot U^{1/2}) \quad (1)$$

$$B_S = (U_T^2 / 2 K t_{\text{eff}}/q)^{-1/2} \quad (2)$$

Es bedeuten:

- A_S effektive Richardson-Dushman-Konstante,
 ϕ_0 Höhe der Potentialbarriere an der Halbleiter-Dielektrikum-Grenze /eV/,
 U_T thermokinetisches Potential /U/,
 U Spannung /U/,
 t_{eff} effektive (elektrische) Schichtdicke des Dielektrikums /cm/.

Aus Gleichung (1) ist ersichtlich, daß die Neigung der Geraden im Diagramm mit den Koordinaten $\log U/U^{1/2}$ dem Ausdruck $(Kt_{\text{eff}})^{-1/2}$ proportional ist. Zur Separation der zwei unbekannt Parameter K , t_{eff} wurde noch der Wert der Maximalkapazität C_1 benötigt, die K/t proportional ist. Auf Basis der HF-CU-Messung können C_1 und dann K und t_{eff} bestimmt werden, d. h. man hat zwei unabhängige Gleichungen für zwei Unbekannte /4/.

Die so bestimmte Schichtdicke ist eine effektive (elektrische) Dicke. Sie kann sich wesentlich von einer anderweitig bestimmten Dicke t_1 unterscheiden. Die Dicke t_1 wurde ellipsometrisch gemessen. Da der Brechungskoeffizient n (unter der Voraussetzung absorptionsfreier Schichten) $K^{1/2}$ proportional ist, kann K auch mit Hilfe optischer Messungen bestimmt werden.

Zum Vergleich wurde der K -Wert auch mit Hilfe der üblichen (für den Plattenkondensator) Niederfrequenz-Meßtechnik zur Kapazitätsbestimmung entsprechend der Beziehung $K = C_1 t_1$ ermittelt, wo für t_1 der ellipsometrisch bestimmte Wert der Schichtdicke eingesetzt wurde.

Die erhaltenen Werte der K und t_0 (t_{eff} bzw. t_1) sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Wegen der Absorptionsverluste in den Schichten, unterscheiden sich die ellipsometrisch gemessenen t_1 - und K -Werte von den anhand der elektrischen Messungen berechneten Werten.

Die Verluste sind auf Ladungsabfluß über den Isolator und auf den Einfluß von Grenzflächenzuständen zurückzuführen.

Wegen der Differenzen zwischen t_1 und t_{eff} sind die K -Werte wahrscheinlich zu niedrig für Al_2O_3 (I) und zu hoch für Al_2O_3 (III), s. auch Bild 1. Da die Al_2O_3 -Schichten sehr dünn sind (nur etwa 2 mal dicker als die natürliche SiO_2 -Schicht auf Si), können die

Phasengrenzeigenschaften wesentlich die Eigenschaften des ganzen Systems beeinflussen. Wahrscheinlich deshalb ist die elektrische Schichtdicke sogar größer als die ellipsometrische.

Um die Parameter der Grenzflächenzustände zu bestimmen, wurden die Kapazitäts-Spannungsverläufe analysiert. Typische C-U-Kurven sind in Bild 3 dargestellt. Für die untersuchten Strukturen ist charakteristisch, daß die Kapazitätswerte sowohl im Anreicherungszustand als auch bei Umpolung stabil und unabhängig von der Gatespannung sind. Gleichzeitig ist der Anstieg der gemessenen C-U-Kurven für alle Strukturen sehr groß (größer als der Anstieg, der theoretisch anhand einer Idealstruktur berechnet wurde /5/). Die Ursache dafür ist wahrscheinlich eine sehr große Grenzflächendichte. Die schnellen Grenzflächenzustände wirken als Ladungsumtauschzentren zwischen den beiden Elektroden, nicht aber zwischen Leitungs- und Valenzband im Substrat. Dadurch ist die Neigung der C-U-Kurve vergrößert und nicht vermindert, wie man das bei Strukturen mit großen Grenzflächenzustandsdichten erwartet, die die Ladung mit dem Halbleiter und nicht mit dem Gate austauschen können /6/. Man kann annehmen, daß der Stromfluß durch die Grenzflächenzustände erleichtert ist. Um einen nachweisbaren Einfluß auf die C-U-Kurven zu haben, müssen diese Zustände im verbotenen Band des Halbleiters energetisch schmal und der Bandkante eng benachbart sein.

Anhand der Flachbandspannung wurde festgestellt, daß in den Schichten und/oder auf ihren Oberflächen bzw. Grenzflächen negative Ladungen gespeichert sind. (In der Tabelle 2 sind die anhand der HF-CU-Kurven berechneten Schichtparameter eingetragen.)

Da die Grenzflächen-Ladungsdichte fast unabhängig von der Schichtdicke ist, sollte die gesamte negative Ladung nicht innerhalb der Schichten, sondern in ihren Oberflächen bzw. Grenzflächen gespeichert sein. (Bei zu geringer Isolatorstärke kann die Ladungsdichte durch Einleitung positiver Ladungen beim Aufdampfen (Al) beeinflußt werden, s. die Daten der Struktur $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{I})$ in Tabelle 2.)

4. Zusammenfassung

Die untersuchten Al_2O_3 - und Ta_2O_5 -Schichten haben Chancen, einige Anwendungen in der Mikroelektronik zu finden. Die interessantesten Eigenschaften, die zu dieser Auffassung führen, sind die hohe Dielektrizitätskonstante im Bereich von 6 bis über 20 und die Speicherung negativer Ladungen in der Größenordnung von 10^{12}cm^{-2} . Aufgrund der großen Grenzflächenzustandsdichten und teilweise zu geringer Isolationsfestigkeit sind Einfachschichten (insbesondere Ta_2O_5) nur mit Einschränkungen als Gateoxide verwendbar.

In Stapelschichten der untersuchten Oxide werden jedoch vorteilhafte Eigenschaftskombinationen erreicht; z. B. relativ hohe Isolationsfestigkeit des CVD- Al_2O_3 und hohe Dielektrizitätskonstante des Ta_2O_5 .

Technologisch kommt es auf eine Abscheidung sehr dünner und trotzdem homogener Schichten an. Die Ergebnisse an der TU Karl-Marx-Stadt, die anhand von vergleichbaren Parallelproben erhalten worden sind, weisen darauf hin, daß die Bedingungen der Probenlagerung und -vorbereitung (z. B. Kontaktierung) offenbar sehr wesentlich das Untersuchungsergebnis beeinflussen können.

So werden die Stromtransportmechanismen anhand der I-U-Kennlinien durch Raumladungsmechanismus mit linearer Trapverteilung interpretiert /7/, /8/.

Es gilt, diesen Einflußgrößen generell mehr Aufmerksamkeit zu schenken.

Danksagung: Die Autoren möchten Herrn Dipl.-Ing. K. Grigorov für die Durchführung der elektrischen Messungen vielmals danken.

5. Literaturverzeichnis

- /1/ A. Sibbald : Chemical-sensitive field effect transistors, IEE Proc., I, 130, 233 (1983);
- /2/ E. Erben : Dissertation A, TU Karl-Marx-Stadt, in Vorbereitung
- /3/ J.G.Simmons : Conduction in thin dielektric films, J. Phys. D: Appl. Phys., 4, 613 (1971);
- /4/ M. Duszak,
A. Jakubowski: Electric conduction of Al/C/SiO/Si/Al structures, Thin Solid Films, 138, 9 (1986);
- /5/ A. Jakubowski,
K. Iniewski : Technical method of determination of the interface trap density, phys. stat. sol. (a), 89, 393 (1985);
- /6/ J. Szmidt,
A. Jakubowski,
A. Balasinski: Some Properties of Metal/Insulator/Semiconductor structures with BN and carbon thin layers formed by the reactive pulse plasma method on silicon or SiO₂ substrates and annealing effects, Thin Solid Films, 142, 269 (1986)
- /7/ H. Burghardt: Eigenschaften von Al₂O₃-Dünnschichten für MOS-Kondensatoren, Berichtsband 3. Tagung Kondensatoren, Karl-Marx-Stadt (1983), S. 218
- /8/ E. Erben,
H. Cebulla,
H.-D. Langer: CVD-Ta₂O₅/Al₂O₃-Anordnungen, im vorliegenden Berichtsband der 4. Tagung Kondensatoren.

Tabelle 1: Schichtdicken und Dielektrizitätskonstanten der untersuchten Schichten

Al_2O_3

Datenquelle Meßverfahren	Parameter Schichten ¹⁾	Schichtdicke t_o / nm /		Diel.-konstante K	
		I	III	I	III
Daten nach Hersteller		24	43	x	x
Ellipsometrische Bestimmung		17	33	4,2	3,1
Bestimmung der Maximalkapazität C_i		x	x	4,5-5,1	7,7-8,8
Bestimmung anhand von I-U-Kurven und C_i		17-23	25-33	4,2-5,6	4,2-6,7

2)

Ta_2O_5

Datenquelle Meßverfahren	Parameter Schichten	Schichtdicke t_o / nm /		Diel.-konstante K	
		I	III	I	III
Daten nach Hersteller		40		x	
Maximalkapazität C_i		x		13-25	

1) Strukturnummer wie in Bild 1

2) Wegen der Doppelschichtstruktur sind die anderen Meßverfahren nicht verwendbar.

Tabelle 2: Phasengrenzparameter der untersuchten MOS-Strukturen

Struktur ¹⁾	Parameter		Flachbandspannung		Grenzflächen-
	Elektrode		UFB	/U/	zustandsdichte $N_{\text{eff}} / \text{cm}^{-2} /$
I	Al		0,3		$-3 \cdot 10^{11}$
	Hg		1,5		$-1,6 \cdot 10^{12}$
II	Al		1,6		$-1,6 \cdot 10^{12}$
	Hg		2,0		$-1,8 \cdot 10^{12}$
III	Al		3,1		$-3,5 \cdot 10^{12}$
	Hg		3,0		$-2,9 \cdot 10^{12}$
IU	Al		3,1		$-2,1 \cdot 10^{12}$
	Hg		3,1		$-2,2 \cdot 10^{12}$

1) Strukturnummer wie in Bild 1.

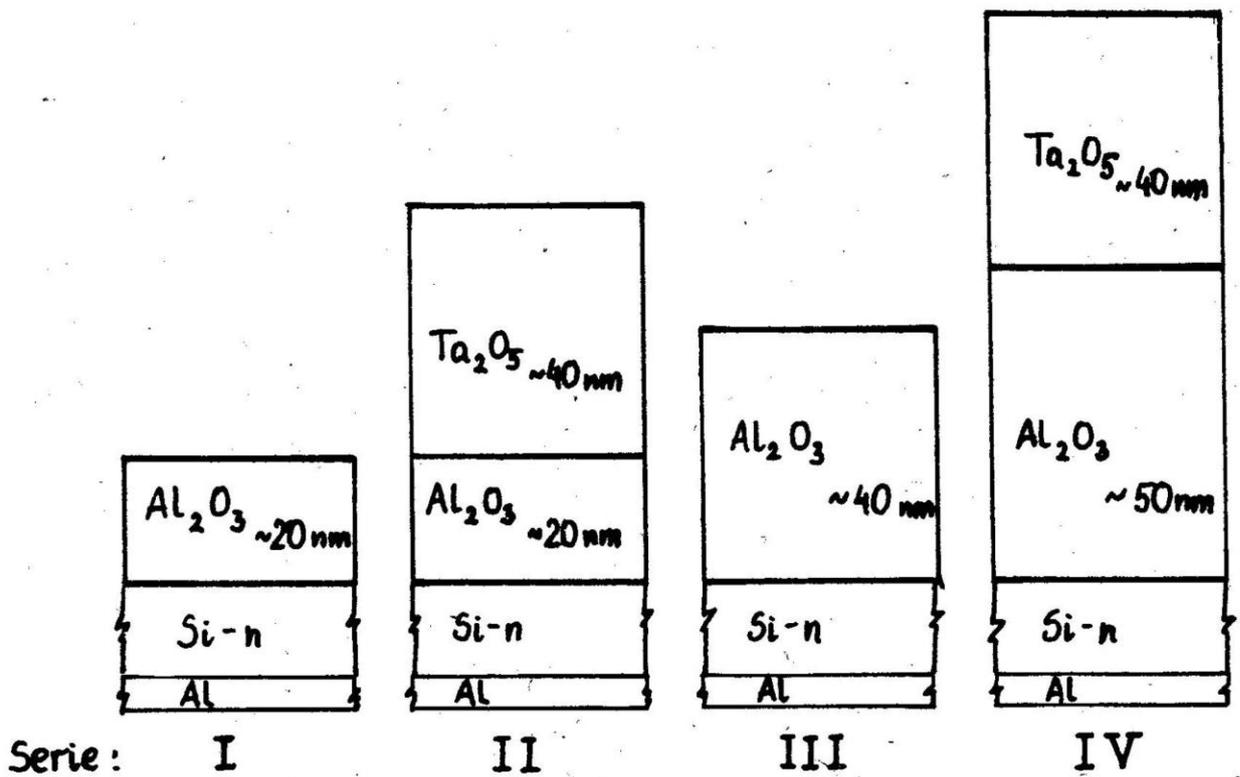


Bild 1: Schematische Darstellung der Teststrukturen

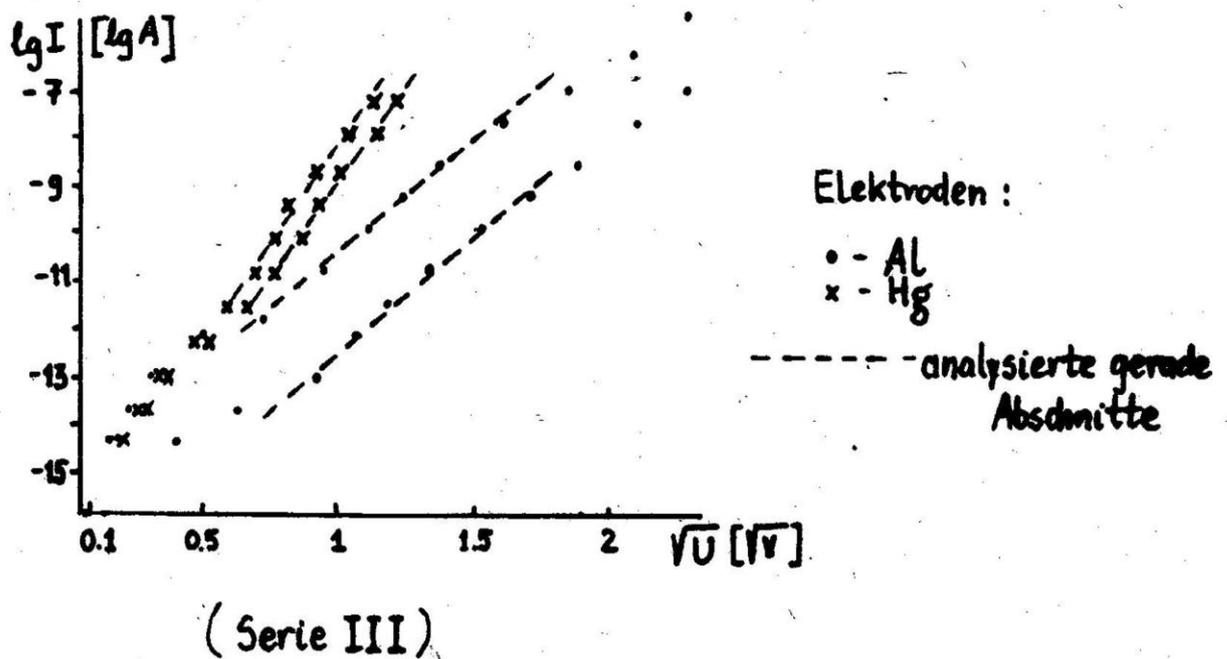


Bild 2: Typische Strom-Spannungskurven der untersuchten Proben Schottky-Darstellung (lg I über \sqrt{U})

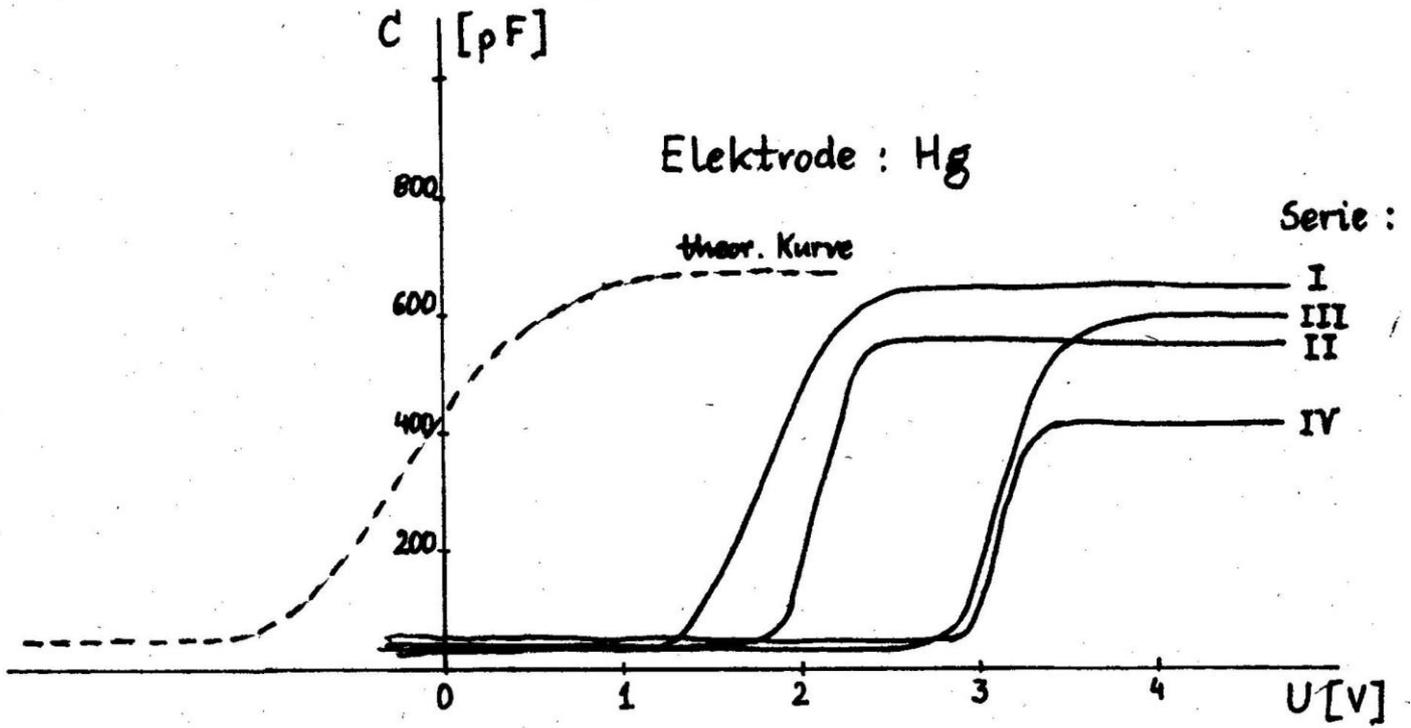


Bild 3: Typische Kapazitäts-Spannungsverläufe der untersuchten Proben (Vergleich mit einer theoretischen CU-Kurve)