

N4
1162

Bibliothek der
Physikalischen Institute
2 Hamburg 36, Jungiusstraße 8

Aufbau eines PC-gesteuerten Meßplatzes für Detektor-Tests
Und systematische Untersuchungen an Si-Detektoren.

Diplomarbeit

vorgelegt von
Ernst-Otto Andersen

Februar 1990

1. Institut für Experimentalphysik
Universität Hamburg

Hauptgutachter: Prof. Dr. Anderson-Lindström
Zweitgutachter: Prof. Dr. Langkau

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Siliziumdetektoren für das H1-Plug-Kalorimeter	5
2.1 Oberflächenzustände und Sperrschicht	5
2.2 Metall-Halbleiter-Übergang	6
2.3 Feldstärke, Sperrschicht und Kapazität der Verarmungsschicht	9
2.4 Technologie zur Herstellung der Dioden	11
2.5 Technische Daten und Eigenschaften der Dioden	14
2.6 Modellvorstellung zum Sperrstromes I_R	16
a) Barrierenstrom I_B	16
b) Oxidstrom I_O	18
c) Volumenstrom I_V	20
3. Automatisierter Detektor-Meßplatz	22
3.1 Apparativer Aufbau des Meßplatzes	22
3.2 I/V-Meßprogramm	27
3.3 C/V-Meßprogramm	32
3.4 Programm zur Temperaturkorrektur der Ströme I_B , I_O , I_V	37
3.5 Programm zur chargenweisen Darstellung der Stromanteile	40
3.6 Programm zur Darstellung mehrerer Kennlinien	42
4. Ergebnisse der Auswertung	45
4.1 Zeitverhalten der mittleren Ströme	45
4.2 Kennlinienverhalten	49
4.3 Stromanteile in Korrelation mit Herstellungsparametern	53

5. Diskussion der Ergebnisse	63
5.1 Korrektur um Volumenstrom	63
5.2 Einfluß der Temperatur T auf $I_B(T_0)$, $I_O(T_0)$, $I_V(T_0)$	77
5.3 Einfluß einer gewählten Barrierenhöhe Φ_B^0 auf $I_B(T_0)$ und Abschätzung von $\Delta\Phi_B$	78
5.4 Einfluß eines spannungsabhängigen Barrierenstromes auf I_O u. I_V	81
6. Zusammenfassung	86
Anhang	
A.1 Die Sprache PASCAL	90
A.2 Das IEEE-System	91
A.3 Scanner	93
A.4 Flußdiagramme	93
A.5 Programm-Menus	99
A.6 Umrechnung einer 'alten' Kapazitätskennlinie	104
A.7 Lineare Regression	105
Literaturverzeichnis	106

1. Einleitung

Um z.B. den Ort und die Ankunftszeit geladener Teilchen festzulegen, werden in der Hochenergie-Physik Groß-Detektoren benutzt, die aus einer Anzahl von sogenannten Subdetektoren zusammengesetzt sind. Die Abbildung 1.1 zeigt ein Beispiel für den Aufbau eines solchen Groß-Detektors. Präzise Auswertungen der Ortskoordinaten liefern die Teilchenbahn und insbesondere durch Ablenkung in einem Magnetfeld den Impuls eines geladenen Teilchens.

Der Nachweis geladener Teilchen hängt letztlich von der Tatsache ab, daß sie (direkt oder indirekt) Energie an das durchquerte Medium abgeben. Dies geschieht über den Prozeß der Ionisation oder Anregung der Atome des durchquerten Mediums.

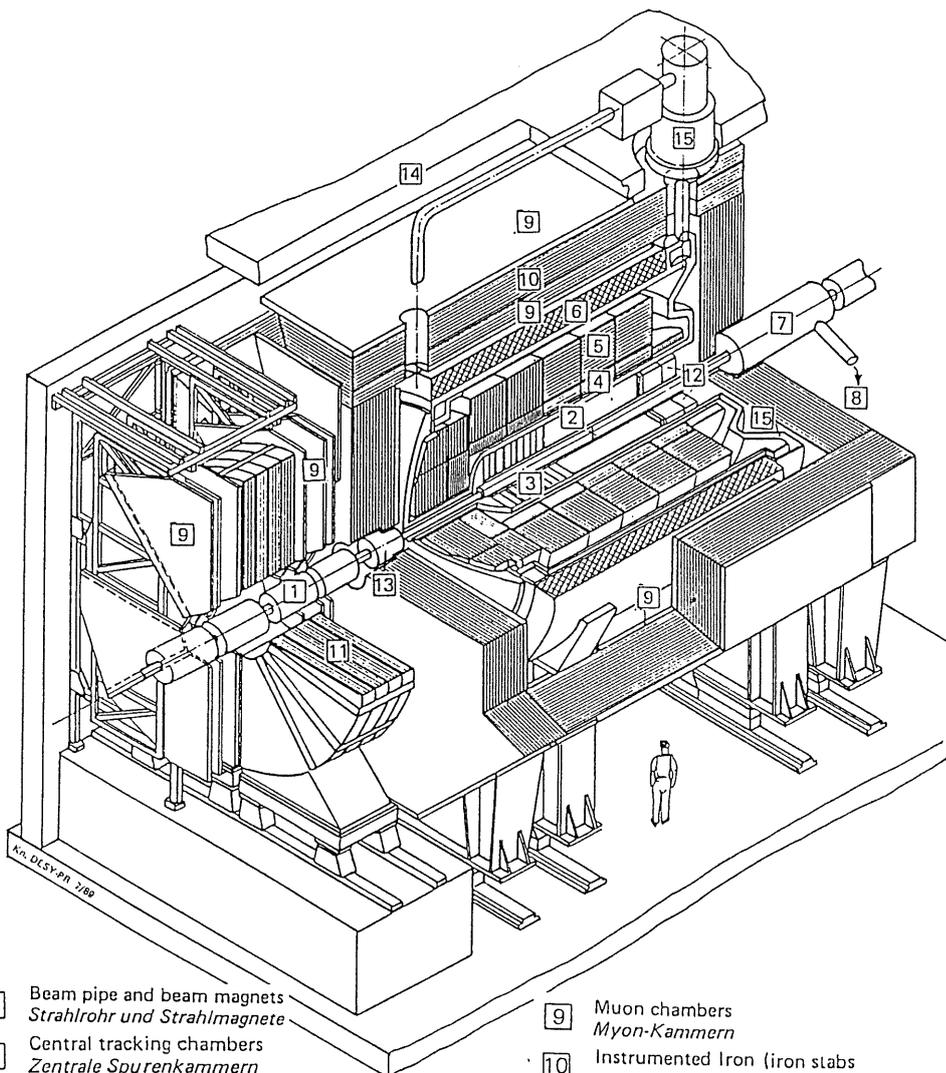
Die Gesamtzahl der in einem Medium erzeugten Ionen durch hochenergetische Teilchen hängt ab von dem Energieverlust/Längeneinheit dE/dx und der benötigten Energie, ein Ionen-Paar (positives Ion und Elektron) bzw. ein Elektronen-Loch-Paar (e-h-Paar) freizusetzen. In einem Gas variiert diese Energie für Ionen-Paare von 40 eV in Helium bis 26 eV in Argon. In einem Halbleiter wird für ein e-h-Paar dagegen nur etwa 3 eV benötigt, so daß die Zahl der e-h-Paare sehr viel größer ausfallen wird als die der Ionen-Paare. Als Maß der deponierten Energie dient die Gesamtzahl der Ionen- bzw. e-h-Paare. Festkörperzähler besitzen daher eine sehr gute Energie-Auflösung und bieten die Möglichkeit einer zweidimensionalen Ortsinformation [1]. Es handelt sich im Prinzip um Dioden, die in Sperrichtung gepolt sind. Ladungsträger, die in der Raumladungszone des Halbleiters durch Ionisation freigesetzt werden, können genau wie in einer Ionisationskammer gesammelt und nachgewiesen werden. Weitere günstige Eigenschaften der Halbleiter-Dioden sind das gute Signal-Rausch-Verhältnis, die gute Zeitauflösung, energielineare und

teilchenunabhängige Eichung, hohe Strahlenbelastbarkeit, kompakte und variable Bauform, und Einsatzmöglichkeit in Luft bzw. Vakuum sowohl bei Raumtemperatur als auch bei tiefen Temperaturen.

Die ersten Anwendungen von Silizium-Detektoren in Experimenten der Hochenergie-Physik waren motiviert durch die hohe Ortsauflösung von Mikrostreifen-Detektoren. Der Einsatz von Silizium-Dioden, die zu Detektoren mit einer großen Gesamtfläche vereinigt werden, ist seit ca. 1985 rapide angestiegen. Gegenwärtig sind verschiedene Experimente damit beschäftigt, Detektoren mit einer Gesamtfläche von bis zu 50 m² und mehr zu bauen. Die Motivation dazu liegt in der Kalorimetrie bzw. in der Trennung der Elektronen von Hadronen innerhalb eines Kalorimeters.

Innerhalb der H1-Kollaboration wird ein Plug-Kalorimeter in Vorwärtsrichtung der Protonen für den Hadronen-Elektronen-Ring-Beschleuniger (HERA) am DESY in Hamburg gebaut (Abb. 1.1). Es dient zur Minimierung des Verlustes an transversalem Impuls durch Emission von Hadronen zwischen dem instrumentierten Teil des Flüssig-Argon-Kalorimeters und dem Strahl-Rohr. Da 800 GeV Protonen mit 30 GeV Elektronen zusammenstoßen, ist dieser Winkel-Bereich besonders wichtig für den Nachweis des Impulses, der dort sonst verloren gehen würde. Wegen der sehr kompakten und damit platzsparenden Bauweise von Si-Detektoren, wird eine fast vollständige Instrumentierung um das Strahlrohr erreicht. Zusammengesetzt wird das Plug-Kalorimeter aus 8 Ebenen zu je 84 Si-Dioden, von denen die meisten eine Größe von ca. 5x5 cm² besitzen. Damit werden zur Instrumentierung 672 Dioden benötigt, die eine Gesamtfläche von 1.56 m² darstellen [2, 3].

Die Forschungsgruppe im Detektorlabor des I. Instituts für Experimentalphysik der Universität Hamburg arbeitet seit langem intensiv an der Weiterentwicklung und Untersuchung großflächiger Silizium-Oberflächensperrschicht-Detektoren. Es konnten bisher mit gutem Erfolg



- | | | | |
|---|--|----|---|
| 1 | Beam pipe and beam magnets
<i>Strahlrohr und Strahlmagnete</i> | 9 | Muon chambers
<i>Myon-Kammern</i> |
| 2 | Central tracking chambers
<i>Zentrale Spurenkammern</i> | 10 | Instrumented Iron (iron slabs
+ streamer tube detectors)
<i>Instrumentiertes Eisen (Eisenplatten +
Streamerröhren-Detektoren)</i> |
| 3 | Forward tracking chambers and Transition radiators
<i>Vorwärtspurkammern und Übergangsstrahlungsmodul</i> | 11 | Muon toroid magnet
<i>Myon-Toroid-Magnet</i> |
| 4 | Electromagnetic Calorimeter (lead)
<i>Elektromagnetisches Kalorimeter (Blei)</i> | 12 | Warm electromagnetic calorimeter
<i>warmes elektromagnetisches Kalorimeter</i> |
| 5 | Hadronic Calorimeter (stainless steel)
<i>Hadronisches Kalorimeter (Edelstahl)</i> | 13 | Plug calorimeter (Cu, Si)
<i>Vorwärts-Kalorimeter</i> |
| 6 | Superconducting coil (1.2 T)
<i>Supraleitende Spule (1,2 T)</i> | 14 | Concrete shielding
<i>Betonabschirmung</i> |
| 7 | Compensating magnet
<i>Kompensationsmagnet</i> | 15 | Liquid Argon cryostat
<i>Flüssig Argon Kryostat</i> |
| 8 | Helium cryogenics
<i>Helium Kälteanlage</i> | | |

Abb.1.1: Blick in das Innere des H1-Detektors.

Detektoren mit einer aktiven Fläche von bis zu 35 cm² hergestellt werden. Dies führte zu dem Entschluß der Gruppe, den Aufbau des Plug-Kalorimeters zu übernehmen.

Um die zügige Produktion und die anschließenden Untersuchungen der Detektoreigenschaften (d.h. die Aufnahme der Kennlinien) sicherzustellen, wurde der Einsatz von Computern unentbehrlich. Daraus ergab sich das Thema dieser Diplomarbeit. Es mußten ein Meßplatz aufgebaut und spezielle Programme zur Steuerung der verwendeten Meßapparaturen sowie zum Abspeichern/Aufrufen der Meßdaten entwickelt werden. Zur systematischen Untersuchung der Eigenschaften einer großen Anzahl von bisher gefertigten Detektoren, wurde der gemessene Strom in drei Anteile gegliedert und weitere Programme entwickelt, die das Auswerten der Daten unterstützen.

2. Siliziumdetektoren für das H1-Plug-Kalorimeter

Bei diesen Detektoren handelt es sich um Si-Dioden mit einer Fläche von ca. $5 \times 5 \text{ cm}^2$, die aus Wafern mit einem Durchmesser von 3" herausgesägt werden. Anschließend werden sie auf eine Fassung geklebt, kontaktiert und mit einem Schutzlack versiegelt.

Wegen der besonderen Bedeutung der Herstellung auf die späteren Eigenschaften und damit der Qualität eines Detektors, wird zunächst auf die Theorie der Oberflächenzustände und des Metall-Halbleiter-Kontaktes eingegangen. Im Anschluß daran wird die Herstellung eines Detektors sowie seine technischen Daten und Eigenschaften vorgestellt. Zur Untersuchung, welche Auswirkung die Herstellung auf das Stromverhalten eines Detektors hat, wird der Strom als eine Summe aus drei Anteilen betrachtet. Dieses Modell wird am Ende des Kapitels erläutert.

2.1 Oberflächenzustände und Sperrschicht

Im Innern des Si-Halbleiters ist jedes Si-Atom von 4 Valenzelektronen umgeben. Während an der Oberfläche des Halbleiters ein Elektron fehlt. Dadurch ist ein Oberflächenzustand geschaffen worden in Analogie zu einem Zustand durch eine Verunreinigung und liegt typisch irgendwo in der Mitte der Energielücke. Diese Zustände können Elektronen einfangen und damit den Betrieb von Halbleiterelementen erheblich stören. *Oberflächen* werden deshalb in der Halbleiter-Elektronik gemieden und durch (mehr oder weniger ideale) Zwischenschichten (Interface) ersetzt.

Dieses Bild der Oberflächenzustände ist zwar sehr künstlich, wird aber in fast allen Texten wegen seiner Einfachheit herangezogen. Tatsächlich existieren Oberflächenzustände in dieser einfachen Form nicht. Vielmehr versuchen die Atome der Oberfläche, Zustände niedriger Energie einzunehmen und gehen dazu Paarungen miteinander ein. In diesem Fall spricht man davon, daß die Oberfläche sich rekonstruiert und es werden Übergitter

gebildet, die eine zusätzliche Bindung der Oberflächenatome erlaubt. Existieren zusätzlich Elektronen an der Oberfläche, so können sich diese Übergitter ändern und die Elektronen sind an der Oberfläche gefangen, wie es auch schon das einfache Modell beinhaltet [4].

Oberflächenzustände können aber auch durch Oberflächenfehler und speziell durch Fremdatome auf der Oberfläche erzeugt werden [5]. Durch die Adsorption von Gasen oder Dämpfen ist eine Aufladung der Oberfläche möglich, so daß ihre Eigenschaften durch die Art der Behandlung und der umgebenden Atmosphäre stark beeinflußt werden. Die Adsorption von Sauerstoff führt zum Beispiel zu einer Besetzung der Oberflächenzustände durch Elektronen. Bei n-leitendem Material bildet sich dabei an der Oberfläche eine hochdotierte p-leitende Raumladungsschicht (Inversionsschicht). Es bildet sich wie bei einem unsymmetrischen pn-Übergang eine Sperrschicht aus [6].

Ist die Dichte der Oberflächenzustände genügend groß, so wird sich eine Doppelschicht (Sperrschicht) an der freien Oberfläche des Halbleiters ergeben. Gebildet wird sie aus einer Nettoladung an Elektronen in den Oberflächenzuständen und einer gleichgroßen positiven Raumladung, die in den Halbleiter hineinreicht [5, 7].

2.2 Metall-Halbleiter-Übergang [5, 7]

a) Ohne Oberflächenzustände (Abb. 2.1 a):

Bei Kontakt eines Metalls mit einem Halbleiter gleichen sich ihre Fermi-niveaus bei Erreichen des thermischen Gleichgewichts an. Bei einem Halbleiter, dessen Austrittsarbeit¹ kleiner ist als die des Metalls, fließen dazu Elektronen aus dem Halbleiter in das Metall. Dabei senkt sich

¹ Energie, die ein Elektron des Fermi-niveaus mindestens benötigt, um den Halbleiter bzw. das Metall verlassen zu können.

das Fermi-niveau des Halbleiters E_F^{HL} um einen Betrag ab, der gleich der Differenz der beiden Fermi-niveaus ($E_F^{HL} - E_F^M$) ist. Sie wird als Kontakt-Potential bezeichnet. Bezeichnet man mit $q\Phi_M$ die Austrittsarbeit des Metalls und mit $q(\chi + V_n)$ die des Halbleiters, so folgt für das Kontakt-Potential:

$$qV_{bi} = q\Phi_M - q(\chi + V_n) \quad (2.1)$$

Mit

χ : Elektronen-Affinität des Halbleiters (HL)

E_C^{HL} : Leitungsbandkante des HL

$$V_n = E_C^{HL} - E_F^{HL}$$

Nach Herstellen des Metall-Halbleiter-Kontaktes sammeln sich gemäß der Poisson-Gleichung Elektronen auf der Metalloberfläche. Wegen der Ladungsneutralität bildet sich an der *Oberfläche* des Halbleiters eine gleichgroße positive Ladung aus. Aufgrund der geringeren Ladungskonzentration im Halbleiter, verteilt sich diese Ladung über einen kleinen Bereich nahe der Halbleiteroberfläche. Es bildet sich an der Grenze Metall-Halbleiter eine Sperrschicht aus, die in den Halbleiter hineinreicht. Erreicht der Abstand δ nach dem Kontakt eine Größe, die vergleichbar ist mit der Gitterkonstanten, so wird die Lücke für Elektronen transparent und das Kontaktpotential fällt jetzt nur noch über der Verarmungsschicht des Halbleiters ab. Damit ergibt sich für die Barrierenhöhe $q\Phi_B$:

$$q\Phi_B = q(\Phi_M - \chi). \quad (2.2)$$

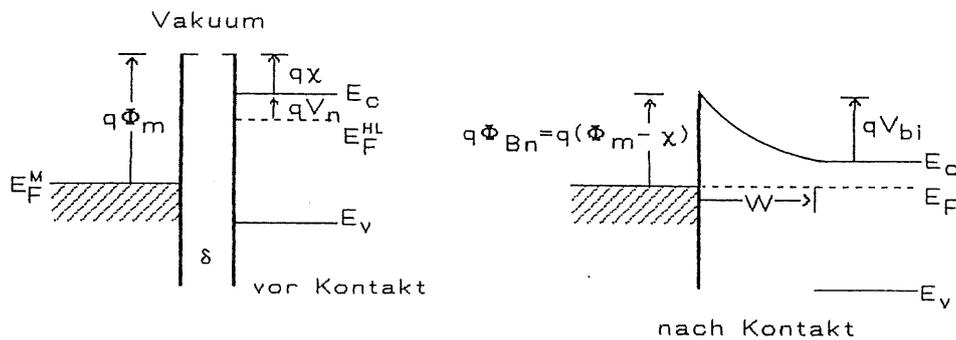
Die Barrierenhöhe sollte damit vom verwendeten Metall abhängen.

b) Mit Oberflächenzuständen (Abb. 2.1 b):

Existiert an der Oberfläche des Halbleiters eine hohe Dichte an Oberflächenzuständen, so herrscht vor Kontakt mit dem Metall Gleichgewicht zwischen diesen Zuständen und dem Inneren des Halbleiters. Es hat sich

bereits vor Kontakt eine Sperrschicht an der Oberfläche ausgebildet. Die Oberflächenzustände sind bis zu einem Niveau E_F^{HL} besetzt.

a)



b)

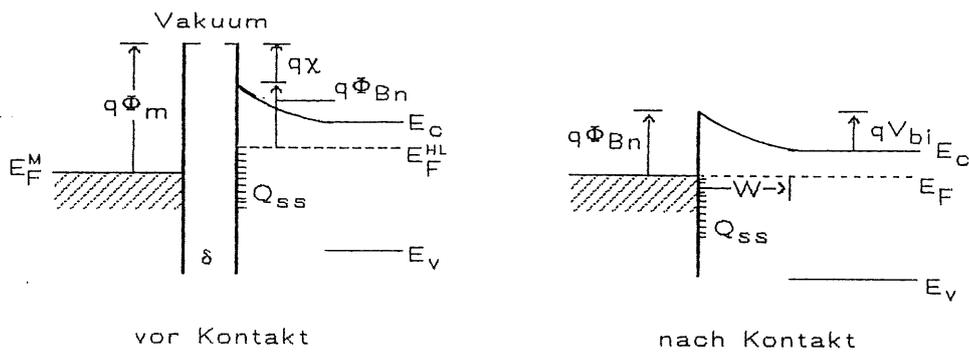


Abb. 2.1: Energieband-Diagramme eines Metall-Halbleiter-Kontaktes.

a) Ohne Oberflächenzustände Q_{SS} .

b) Mit Oberflächenzustände Q_{SS} .

Zum Erreichen des thermischen Gleichgewichts nach Kontakt mit dem Metall, wechseln jetzt Elektronen aus den Oberflächenzuständen des Halbleiters in das Metall. Bei ausreichend hoher Dichte der Oberflächenzustände werden jetzt die an der Metalloberfläche befindlichen Elektronen durch Ladungen in diesen Zuständen ausgeglichen, ohne dabei das Besetzungsniveau E_F nennenswert zu ändern. Die Raumladung im Halbleiter bleibt in diesem Fall unbeeinflusst und behält ihren Wert vor Kontakt. Der Unterschied in den Austrittsarbeiten zwischen dem Metall und dem Halbleiter wird durch die Ladungen Q_{SS} in den Oberflächenzuständen und nicht mehr durch die Raumladung, wie in dem Fall a), ausgeglichen. Damit wird die Barrierenhöhe Φ_B unabhängig von dem Metall und wird festgelegt durch die Eigenschaften des Halbleiters [5].

In der Elektronik sind Bauelemente mit einem Metall-Halbleiter-Kontakt als Schottky-Dioden bekannt (W. Schottky entwickelte 1938 die Randschichttheorie). Da der Ladungstransport praktisch nur durch Majoritätsträger erfolgt, haben derartige Dioden sehr kurze Schalt- und Speicherzeiten (≤ 100 ps). Sie finden daher besonders als schnelle Schaltdioden und HF-Gleichrichter in der Elektronik ihre Anwendung [8].

2.3 Feldstärke, Sperrschicht und Kapazität der Verarmungsschicht

Wird ein Metall in engen Kontakt mit einem Halbleiter gebracht, so steht sein Leitungs- und Valenzband in einer definierten Energie-Beziehung mit dem Fermi-niveau des Metalls. Ist diese Beziehung einmal bekannt, so dient sie als Randbedingung zur Lösung der Poisson-Gleichung im Halbleiter. Zur Lösung wird dann wie bei dem Problem des pn-Überganges fortgefahren [6,8]:

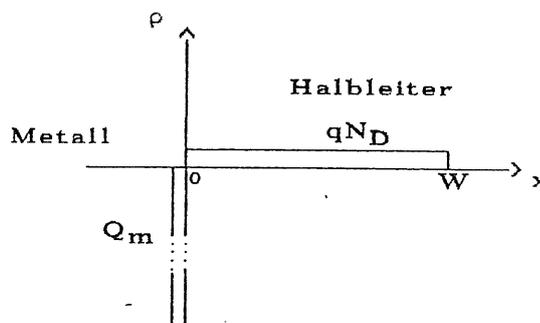


Abb.2.2: Ladungsdichten des Metall-Halbleiter-Kontaktes.

Die Annahme des abrupten pn-Übergangs (Abb. 2.1 u. Abb. 2.2):

$$\begin{aligned} \rho &\approx qN_D, \quad x < W \\ \rho &\approx 0, \quad \text{sonst} \\ d\phi/dx &\approx 0, \quad x > W \end{aligned}$$

$W \equiv$ Weite der Verarmungsschicht, $N_D \equiv$ Donatoren pro Volumeneinheit

führt für die Metall-Halbleiter-Barriere zu ähnlichen Ergebnissen, wie man sie für den unsymmetrischen p^+n -Übergang erhält (s. z.B. [9]).

Es ergibt sich:

$$\text{Feldstärke} \quad |\mathcal{E}(x)| = \frac{qN_D}{\epsilon_s} (W - x) = \mathcal{E}_m - \frac{qN_D}{\epsilon_s} x \quad (2.3)$$

$$\text{Sperrschichtweite}^1 \quad W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} \left(V_{bi} - U - \frac{kT}{q} \right)} \quad (2.4)$$

$$\text{Potential} \quad \varphi(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_s} \left(Wx - \frac{1}{2}x^2 \right) - \Phi_{Bn} \quad (2.5)$$

Mit Gl. (2.1) für V_{bi} , $\epsilon_s \equiv$ Dielektrizitätskonstante, $U \equiv$ Äußere Spannung. \mathcal{E}_m ist die maximale Feldstärke, die am Ort $x = 0$ auftritt:

$$\mathcal{E}_m = \mathcal{E}(x=0) = \frac{2 \cdot (V_{bi} - U - kT/q)}{W} \quad (2.6)$$

Die Raumladung pro Einheitsfläche Q_{sc} der Verarmungsschicht des Halbleiters ergibt sich mit Gl. (2.4) zu :

$$Q_{sc} = qN_D W = \sqrt{2q\epsilon_s N_D \left(V_{bi} - U - \frac{kT}{q} \right)} \quad [C/cm^2] \quad (2.7)$$

Mit Gl. (2.7) folgt für die dynamische Kapazität pro Flächeneinheit:

$$C = \frac{|\partial Q_{sc}|}{\partial V} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2 \cdot (V_{bi} - U - kT/q)}} = \frac{\epsilon_s}{W} \quad [F/cm^2] \quad (2.8)$$

¹ Der Term kT/q kommt daher, daß die Raumladung am Rand der Sperrschicht nicht un stetig abfällt, wie es im Kastenmodell angenommen wird. Bei Raumtemperatur beträgt sein Wert $\approx 25mV$ und wird bei Rechnungen vernachlässigt.

2.4 Technologie zur Herstellung der Dioden

Bei der Produktion der Detektoren wird die Technik der Oberflächensperrschicht verbunden mit der Planartechnologie. In diesem Zusammenhang findet eine Zusammenarbeit mit Dr. Kemmer statt, der die Planartechnologie für die Fertigstellung von Halbleiter-Detektoren entwickelte. Zur Herstellung der Sperrkontakte benutzte er die Ionenimplantation. Die Forschungsgruppe des Detektorlabors am I. Institut für Experimentalphysik benutzt hierfür erstmalig die Technik der Oberflächensperrschicht (Abb. 2.3).

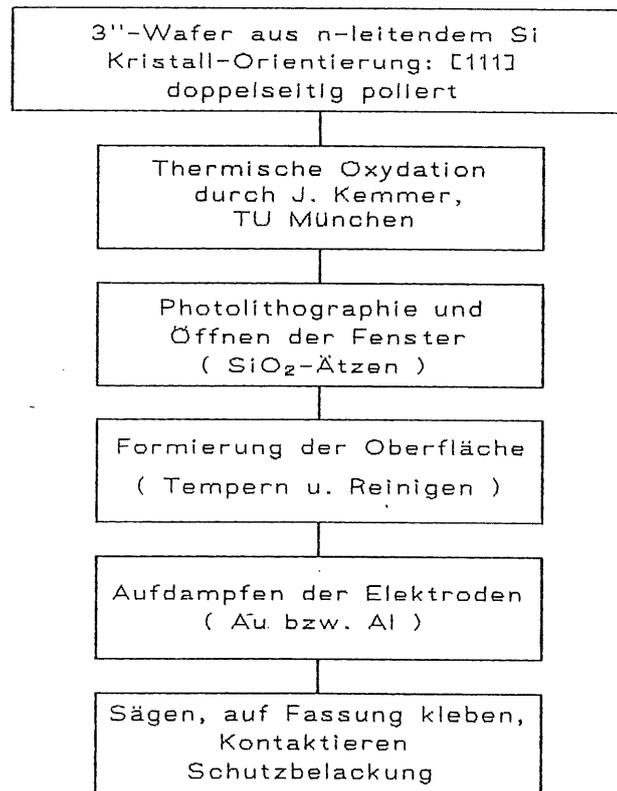


Abb. 2.3: Schematischer Herstellungs-Ablauf

Die thermische Oxydation wird von Dr. Kemmer durchgeführt. Sie dient zur Rand-Passivierung der pn-Übergänge an der Oberfläche (Oberflächenpassivierung) [10].

Bei ihr wird die Tatsache ausgenutzt, daß Silizium eine fast perfekte Zwischenschicht (Interface) mit seinem Oxyd bildet. Die Topologie der Zwischenschicht Si-SiO₂ ist bislang noch nicht genau bekannt. Es wird jedoch angenommen, daß amorphes SiO₂ an der Oberfläche des Siliziums wächst. Die restlichen freien Bindungsarme der Zwischenschicht Si-SiO₂ können z.B. durch Wasserstoff während der Oxydationsphase abgesättigt werden [4]. Dennoch wurde als umgebende Atmosphäre trockener Sauerstoff gewählt, da er ein Oxyd hoher mechanischer Dichte und elektrischer Durchbruchfeldstärke entstehen läßt [10].

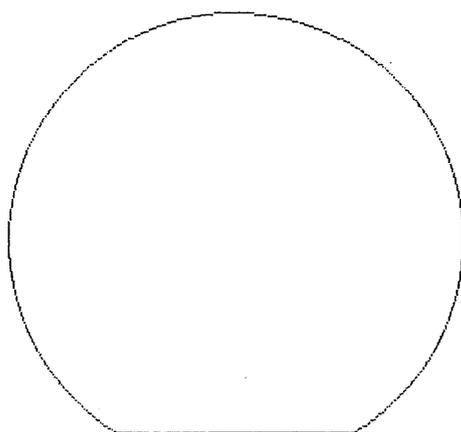
Die Flächen auf dem Wafer, die später als aktive 'Fenster' dienen sollen, werden mit der Technik der Photolithographie vom Oxyd befreit ('geöffnet'). Nach dem Öffnen liegt das reine Silizium frei und es muß dafür Sorge getragen werden, daß es nicht zu einer Verunreinigung der Oberfläche durch Fremdatome und damit zur Zerstörung des Detektors kommt.

Nach verschiedenen Oberflächenbehandlungen (Entfernen des Fotolacks, Reinigen der Oberfläche) folgt nach Formierung der Oberfläche durch Tempern die Bedampfung der Front- und Rückseite mit Gold bzw. Aluminium.

Die Frontseite des Wafers wird mit insgesamt 40 µg/cm² Gold bedampft. Die genaue Metall-Bedampfung des 'geöffneten Fensters' mit einer Überdeckung des Oxyds von ca. 0.5 mm ('Überlapp'), gewährleistet eine entsprechende Blende. Die Frontseite bildet damit den gleichrichtenden Kontakt einer Oberflächensperrschicht (Schottky-Diode).

Bei einem Metall-n-Halbleiter, bei dem die Austrittsarbeit des Metalls kleiner ist als die des Halbleiters, entsteht eine Anreicherungsschicht.

a)

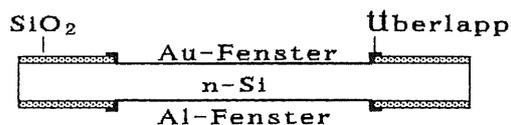


Flat

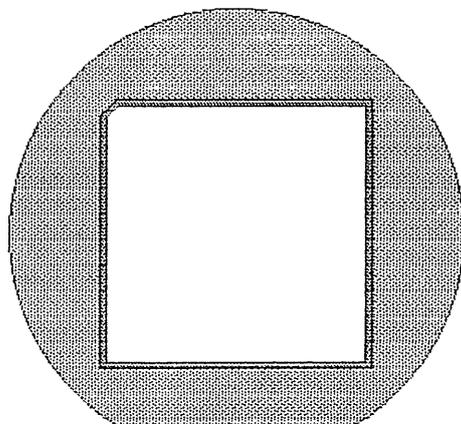
Gelieferter Wafer:

n-Silizium (P-dotiert),
 Orientierung : [111]
 Durchmesser : 76.2 mm
 ρ : 5 k Ω cm
 Dicke : 400 μ m
 Dickentoleranz: ≤ 15 μ m
 Ebenheit \checkmark : ≤ 3 μ m

b)



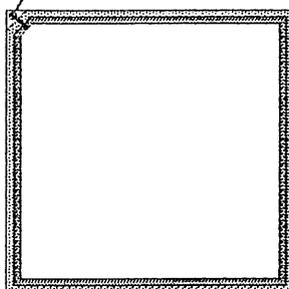
Vor Sägen und Kontaktierung



Oxiddicke : 2200 Å
 Fenster-Fl. : 23.5 cm²
 Überlapp : 0.5 mm
 Au : 40 μ g/cm²
 Al : 100 μ g/cm²

c)

Al₂O₃-Keramik mit Kontaktierung



Nach Sägen und Kontaktierung

Al₂O₃-Keramik:
 Fläche: $\approx 5 \times 5$ cm²
 Dicke : 0.63 mm
 Oxid-Rand ≈ 0.5 mm

Abb. 2.4: Entwicklung eines Wafers zur Detektor.

Diese Anreicherungsschicht ist durch einen nichtsperrenden (ohmschen) Kontakt charakterisiert [8]. Um einem solchen ohmschen Kontakt an der Rückseite des Halbleiters möglichst nahe zu kommen, wird sie mit $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ Aluminium bedampft. Analog zur Frontseite wird auch hier ein Überdeckung des Oxyds von ca. 0.5 mm realisiert (Abb. 2.4).

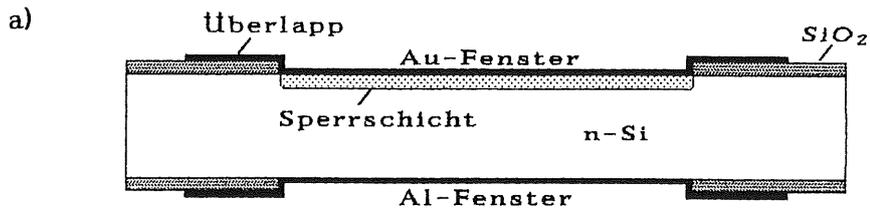
Eine ausführliche Beschreibung der Planartechnologie wird in der Diplom-Arbeit von Jürgen Nagel [10] gegeben .

Abschließend werden die Detektoren aus den runden 3"-Wafern herausgesägt, auf eine Fassung geklebt und die Front- und Rückseite kontaktiert. Sie besitzen jetzt ihre endgültige quadratische Form und werden abschließend mit einem Schutzlack versiegelt.

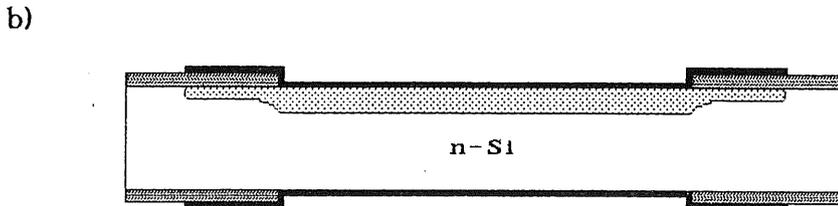
2.5 Technische Daten und Eigenschaften der Dioden

Als Grundmaterial wird hochreines mit Phosphor dotiertes Silizium der Firma Wacker-Chemitronic verwendet (n-Si). Die Daten dieses Materials können der Abb. 2.4 entnommen werden.

Das Rauschen beschränkt die Möglichkeit der Signalübertragung und der sinnvollen Signalverstärkung, wenn die Erkennbarkeit des Signals garantiert sein soll. Jede Baugruppe eines Übertragungssystem (z.B. der Vorverstärker) liefert einen Beitrag zum Rauschen und verschlechtert das Signal/Rausch-Verhältnis. Ein oberstes Ziel ist damit, das Detektor-Rauschen möglichst klein zu halten. Mit der unter 2.4 beschriebenen Technologie werden Stromdichten bei vollständiger Verarmung ($\approx 80\text{V}$) von $4\text{-}12 \text{ nA}/\text{cm}^2$ erreicht. Vergleicht man dies Ergebnis mit jenen aus konventionellen Technologien zur Herstellung von Oberflächensperrschichten, die Stromdichten von $30\text{-}60 \text{ nA}/\text{cm}^2$ liefern, fallen diese um gut eine Größenordnung höher aus. Betrieben werden können diese Detektoren bis zu dem Doppelten der Verarmungsspannung.



$|U| < |U_{FB}|$. Keine Verarmung unter das Oxid.



$|U| > |U_{FB}|$. Ausweitung der Verarmung unter das Oxid.

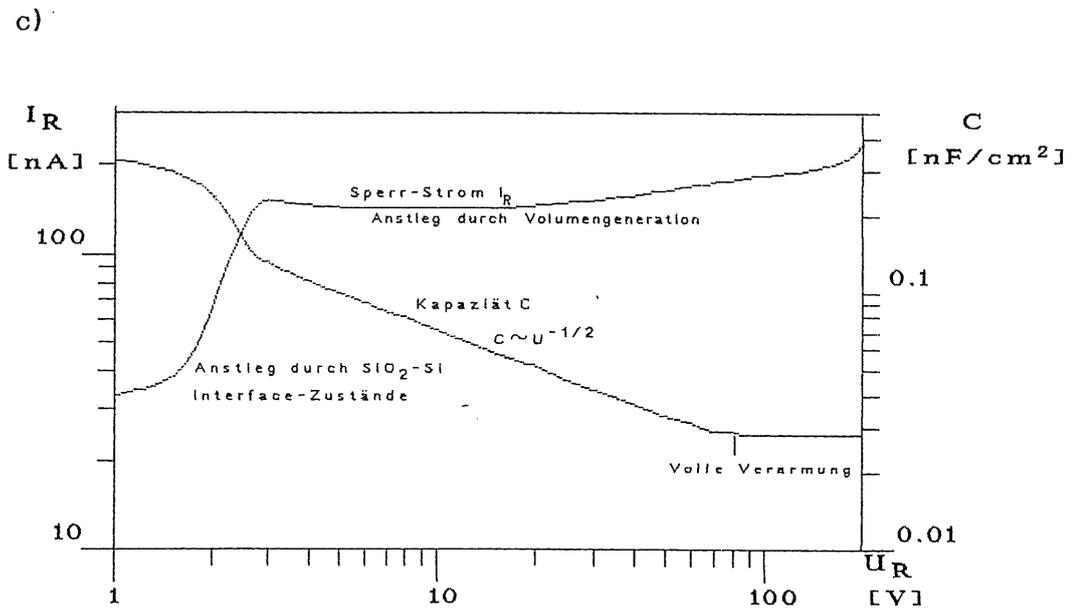


Abb. 2.5: a) Sperrschichtweite für Spannungen $U < U_{FB}$.
 b) Sperrschichtweite für $U_{FB} < U < U_{dep}$.
 c) I/V - C/V -Charakteristik eines HI-Silizium-Detektors.

Die Abb. 2.5c) zeigt eine Strom- und Kapazitäts-Spannungscharakteristik eines Detektors. Der starke Anstieg des Stromes bei einer Sperrspannung von $\approx 1.5V$ wird hervorgerufen durch Si-SiO₂ Interface-Zuständen unterhalb des Au-Überlapps. Dieser Bereich bildet eine MOS-Kapazität, die parallel zu dem pn-Übergang der Detektor-Diode liegt (s. 2.6 b). Der weitere Anstieg entsteht durch Ladungsgeneration im Volumen des Halbleiters und ist damit proportional zur Verarmungsweite [11].

2.6 Modellvorstellung zum Sperrstroms I_R

Eine Unterteilung des Sperrstromes I_R in die drei Anteile :

- a) Barrierenstrom I_B ,
- b) Oxidstrom I_O ,
- c) Volumenstrom I_V ,

wird benutzt, um Aussagen treffen zu können, ob die Qualität der produzierten Detektor-Dioden gleichbleibend ist oder sie sich zum Positiven oder Negativen bewegt. Um dabei den bei der Messung vorkommenden unterschiedlichen Temperaturen Rechnung tragen zu können, werden die verschiedenen Stromanteile auf eine Normtemperatur $T_0=295K$ umgerechnet.

a) Barrierenstrom I_B :

Der *Barrierenstrom* I_B wurde als der bei der Spannung $1V$ gemessene Strom definiert. Dieser Spannungswert wurde gewählt, weil er den momentan kleinsten zur Verfügung stehenden Wert darstellt. Der Sperrstrom einer "Schottky"-Diode wird durch die "Thermische Emissions-Diffusions-Theorie" von Crowell und Sze beschrieben. Diese Theorie bildet eine Synthese der "Thermischen Emissions-Theorie" und der "Diffusions-Theorie" Crowell und Szes [7].

Das Ergebnis für die Stromdichte J dieser Theorie lautet:

$$J = \frac{qN_c v_R}{1 + v_R/v_D} \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.9),$$

mit

N_c : effektive Zustandsdichte im Leitungsband.

v_R : effektive Rekombinationsgeschwindigkeit

$$v_R = A^* T^2 / qN_c \quad (2.10),$$

$v_R = 5.2 \cdot 10^5$ cm/s für [111] n-Si bei 300K ,

A^* : effektive Richardson-Konstante

$$A^* = 258 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2 \text{ für [111] n-Si [12].}$$

v_D : effektive Diffusionsgeschwindigkeit

$$v_D \approx \mu \mathcal{E} \quad , \quad \Delta\Phi < kT/q \quad ,$$

$$v_D \approx 0.3 \mu \mathcal{E} \quad , \quad \Delta\Phi \approx 20 kT/q \quad ,$$

$q\Delta\Phi$: Erniedrigung der Barrierenhöhe Φ_{B0} durch Schottky-Effekt,

\mathcal{E} : Feld im Halbleiter nahe der Grenze zum Metall,

$q\Phi_{Bn}$: Um Schottky-Effekt erniedrigte Barrierenhöhe,

V : angelegte Spannung.

Nach Überwinden des Potential-Maximums kann ein Teil der Elektronen durch Wechselwirkung mit optischen Phononen zurückgestreut werden. Dieser Teil liefert damit keinen Beitrag mehr zum Strom. Die Wahrscheinlichkeit für die Emission über die Barriere ist in erster Näherung gegeben durch

$$f_p = \exp(-x_m/\lambda) \quad (2.11),$$

$\lambda \equiv$ mittlere freie Weglänge der Elektronen.

Daneben existiert eine weitere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten quantenmechanischer Effekte wie Tunneln und Reflektion an der Barriere. Sie wird durch das Verhältnis f_Q , dem Gesamtstrom unter Berücksichtigung

quantenmechanischer Effekte zum Gesamtstrom ohne diese Effekte, ausgedrückt. Damit wird v_R ersetzt durch $f_P f_Q v_R$ und für die Stromdichte J erhält man:

$$J = A^{**} T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT} - 1\right)\right] \quad (2.12),$$

mit

$$A^{**} = \frac{f_P f_Q A^*}{1 + f_P f_Q v_R / v_D} \quad (2.12a).$$

Aus Gl. (2.12) folgt für die Umrechnung auf den Stromwert $I_B(T_0)$:

$$I_B(T_0) = \left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \exp(q\Phi_{Bn} [1/T - 1/T_0] / k) I_B(T) \quad (2.13).$$

$T_0 = 295K$, $T \equiv$ Temperatur bei Messung in [K],

$\Phi_{Bn} = 0.87V$ [12],

$I_B(T) \equiv$ Meßwert bei 1V.

b) Oxydstrom I_O :

Oberhalb einer Sperrspannung $U_{FB} \approx 2V$ zeigt sich ein starker Anstieg im Sperrstrom (Abb. 2.5). Seine Ursache wird durch Oberflächenzustände in der Grenzschicht Si-SiO₂ unterhalb des Gold-Überlapps erklärt. Der Bereich Metallüberlapp-Oxyd-Silizium bildet eine zum p-n-Übergang parallele MOS-Kapazität. Positive Ladungen im Oxyd führen zu einer Verbiegung der Bänder, die eine Akkumulation von Elektronen hervorruft [13]. Das Anlegen und Erhöhen einer Sperrspannung U_R ($0 \leq |U_R| \leq |U_{FB}|$) hebt diese Verbiegung der Bänder zunächst auf. Die weitere Erhöhung der Sperrspannung U_R führt zu einer neuen Verbiegung, die dann eine Verarmung an Elektronen bedeutet. Die Spannung, bei der die Bänder flach werden, wird als Flachbandspannung U_{FB} bezeichnet.

Beginnt die Sperrspannung U_R größer als die Flachbandspannung U_{FB} zu werden ($|U_R| > |U_{FB}|$), setzt eine Verarmung des Gebietes unterhalb des Au-Überlapps ein (Abb. 2.5 b). In der Grenzschicht Si-SiO₂ generierte Elektronen-Loch-Paare werden durch das elektrische Feld in der Verarmungsschicht (Sperrschicht) getrennt und liefern einen zusätzlichen Beitrag zum Sperrstrom I_R [11]. Er wird als Oxydstrom I_O bezeichnet.

Für ihn ergibt sich

$$I_O = q G_s A_{\bar{u}} \quad (2.14).$$

Mit

$A_{\bar{u}} \equiv$ Fläche des Au-Überlapps,

$G_s \equiv$ Generationsrate der Ladungsträger/Fläche; bei homogener Verteilung der Zustände über die Bandlücke:

$$G_s = \sigma \cdot V_{th} \cdot \pi \cdot k \cdot T \cdot D_s \cdot n_i \quad [9]$$

σ : effektiver Wirkungsquerschnitt für Ladungsträger-einfang durch Oberflächenzustände:

$$\sigma = 1/2 (\sigma_n \cdot \sigma_p)^{1/2} \approx 10^{-16} \text{ cm}^2$$

V_{th} : mittlere thermische Geschwindigkeit der Ladungsträger:

$$V_{th} = (3 \cdot k \cdot T / m_{eff})^{1/2} \approx 10^7 \text{ cm/sec bei } T=300\text{K.}$$

D_s : Zustandsdichte der Grenzfläche.

n_i : Intrinsische Ladungsträgerkonzentration

$$n_i^2 = 1.5 \cdot 10^{33} \cdot T^3 \cdot \exp(- 1.21 \text{ eV/kT })$$

Unter der Voraussetzung, daß σ , D_s und m_{eff} konstant bleiben, folgt für den Oxydstrom I_O bei T_0

$$I_O(T_0) = \left(\frac{T_0}{T} \right)^3 \cdot \exp\left(\frac{1.21 \text{ eV}}{2 \cdot k} \cdot [1/T - 1/T_0] \right) \cdot I_O(T) \quad (2.15).$$

Mit $I_O(T) \equiv$ Meßwert bei der Temperatur T .

Bei den Messungen wurde nach dem starken Anstieg durch den Oxydstrom ein leichter Rückgang im Strom I_R beobachtet. In der Kennlinie

zeigt sich dies Verhalten in Form eines kleinen Buckels in der Nähe der Flachbandspannung U_{FB} , der nachfolgend als 'Overshoot' bezeichnet wird. Verglichen mit anderen Kennlinien, zeigt die in der Abb. 2.5 c) dargestellte Kennlinie einen relativ leichten Overshoot. Um bei der Bestimmung des Oxydstromes $I_O(T)$ außerhalb dieses Overshoots zu bleiben, wurde als oberer Stromwert $I_{(5V,T)}$ und als unterer $I_{(1V,T)}$ gewählt. Damit wurde $I_O(T)$ zu

$$I_O(T) = I_{(5V,T)} - I_{(1V,T)} \quad (2.16),$$

festgelegt.

c) Volumenstrom I_V :

Der weitere Anstieg im Sperrstrom für Spannungen $|U_R| \geq 10V$ wird durch Generations-Rekombinations-Zentren im Volumen des verarmten Si-Materials hervorgerufen. Bei homogener Verteilung der Zentren ist dieser Anteil proportional zum Volumen der Sperrschicht. Seine Größe wird bestimmt durch [11]

$$I_V = q \cdot G \cdot W \cdot A \quad (2.17).$$

Mit

$G \equiv$ Generationsrate der Ladungsträger/Volumen,

$G = \frac{n_i}{2 \cdot \tau}$, $\tau \equiv$ Lebensdauer der Minoritätsladungen

$W \equiv$ Weite der Sperrschicht,

$A \equiv$ Detektorfläche.

Damit folgt für den Volumenstrom I_V

$$I_V(T) = \frac{q \cdot n_i(T) \cdot W \cdot A}{2 \cdot \tau_p(T)} \quad (2.18).$$

Für den Volumenstrom I_V bei T_0 ergibt sich damit

$$I_V(T_0) = \left(\frac{T_0}{T} \right)^3 \cdot \exp\left(\frac{1.21 \text{ eV}}{2 \cdot k} \cdot [1/T - 1/T_0] \right) \cdot I_V(T) \quad (2.19).$$

Zur Bestimmung von $I_V(80V, T)$ wurde der Stromwert $I(80V, T)$ bei vollständiger Verarmung (Sperrschicht erreicht den Rückkontakt) und der bei 10V gewählt.

$$I_V(80V, T) = (I(80V, T) - I(10V, T)) \cdot \frac{\sqrt{80}}{\sqrt{80} - \sqrt{10}} \quad (2.20).$$

Der Quotient in (2.24) ergibt sich durch die Umrechnung auf die volle Sperrschichtweite. Die Differenz in (2.24) repräsentiert lediglich den Teil des Volumenstroms, der in dem Volumen $A \cdot (W_{(80V)} - W_{(10V)})$ erzeugt wird. Dabei wurde die Spannung bei vollständiger Verarmung U_{dep} mit 80V angenommen. Eine Abweichung von $\approx 6V$ der tatsächlichen Spannung U_{dep}^t von U_{dep} , erzeugt einen Fehler in der Größe $\approx 2\%$ und wird vernachlässigt.

3. Automatisierter Detektor-Meßplatz

Zur zügigen und arbeitersparenden Durchführung von Kennlinienmessungen, sowie der schnellen Auswertung aufgenommener Daten wird ein PC der Firma MAWI eingesetzt. Die Kommunikation zwischen dem PC und der angeschlossenen Geräte wird mit einem IEEE-System der Firma Keithley hergestellt. Daneben garantiert diese Art der Kennlinienaufnahme einen stets gleichen Ablauf der Messungen.

In diesem Kapitel wird der Meßplatz und die zur Messung und Auswertung entwickelten Programme vorgestellt.

3.1 Apparativer Aufbau des Meßplatzes

Zur Aufnahme von Strom/Spannungs- (I/V-) als auch Kapazitäts/Spannungs- (C/V-) Kennlinien wird jeweils ein Detektor in einer lichtdichten Proberbox untergebracht (Abb. 3.1). In ihr befindet sich ein mit der Spannungs-Versorgung und einer Vakuumpumpe verbundenes Chuck. Der Detektor wird mit einer Plastik-Pinzette vorsichtig mit seiner Rückseite auf das Chuck gelegt. Mit Hilfe der Vakuumpumpe wird über Ansauglöcher in der Auflagefläche des Chucks der Detektor auf seiner Position fixiert. Der Stromkreis wird durch einen Taststift, der auf den Gold-Überlapp gesetzt wird, geschlossen. Eine federnd gelagerte Spitze des Taststiftes gewährleistet einen gleichbleibenden Druckkontakt und verhindert ein Beschädigung des Detektors.

Zur Messung einsatzbereiter Detektoren (d.h. gesägt, auf Fassung geklebt und kontaktiert), werden diese in eine Meßkammer mit entsprechenden Steckkontakten eingebracht. In ihr können maximal 10 solcher Detektoren untergebracht werden.

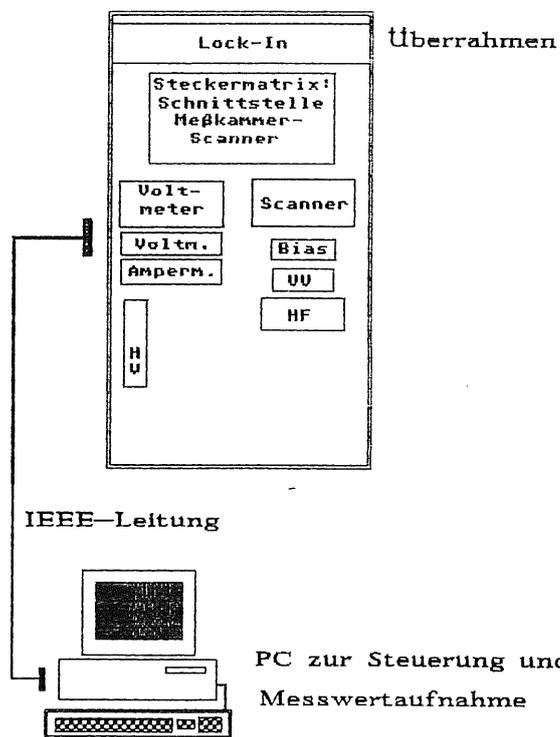
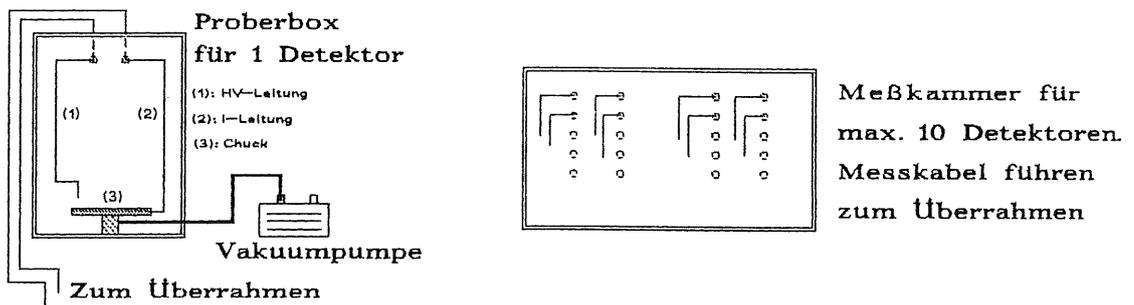


Abb.3.1: Apparativer Aufbau des Detektor-Meßplatzes

a) I/V-Messung (Abb. 3.2):

Für die Aufnahme der I/V-Kennlinie eines Detektors in der Proberbox wird ein Amperemeter und ein HV-Gerät, das eine maximale Spannung von mindestens 200V liefert, benötigt.

Bei einsatzbereiten Detektoren können maximal 10 I/V-Kennlinien nacheinander automatisch aufgenommen werden. Dafür wird neben dem Amperemeter und der Spannungs-Versorgung der Einsatz eines Scanners erforderlich. Er hat die Aufgabe, nach Aufnahme einer Kennlinie den nächste Detektor an die Spannungs-Versorgung zu legen. Sämtliche Detektoren werden mit einer Stecker-Matrix verbunden, die ihrerseits wieder mit dem Scanner verbunden ist. Sie dient, als eine Art ‚Interface‘ zwischen Scanner und Meßkammer, zur flexiblen Verbindung der beiden.

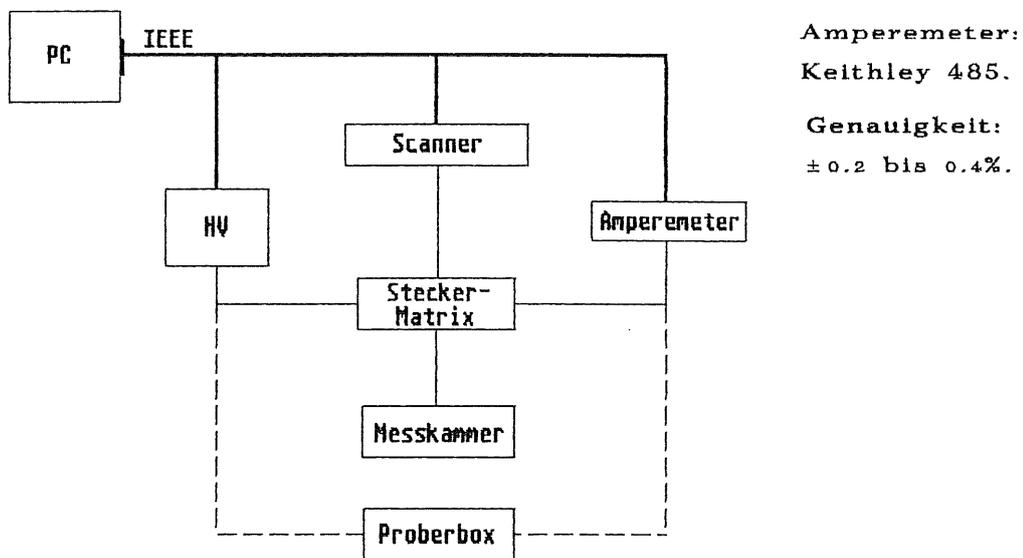


Abb. 3.2: I/V-Messung. Gestrichelter Fall beschreibt Einzelmessung.

b) CV-Messung (Abb. 3.3 a):

Bei der CV-Messung werden außer der Spannungs-Versorgung ein BIAS-Adapter, ein stromempfindlicher Vorverstärker, ein HF-Generator, ein Lock-In-Verstärker und zwei Voltmeter verwendet.

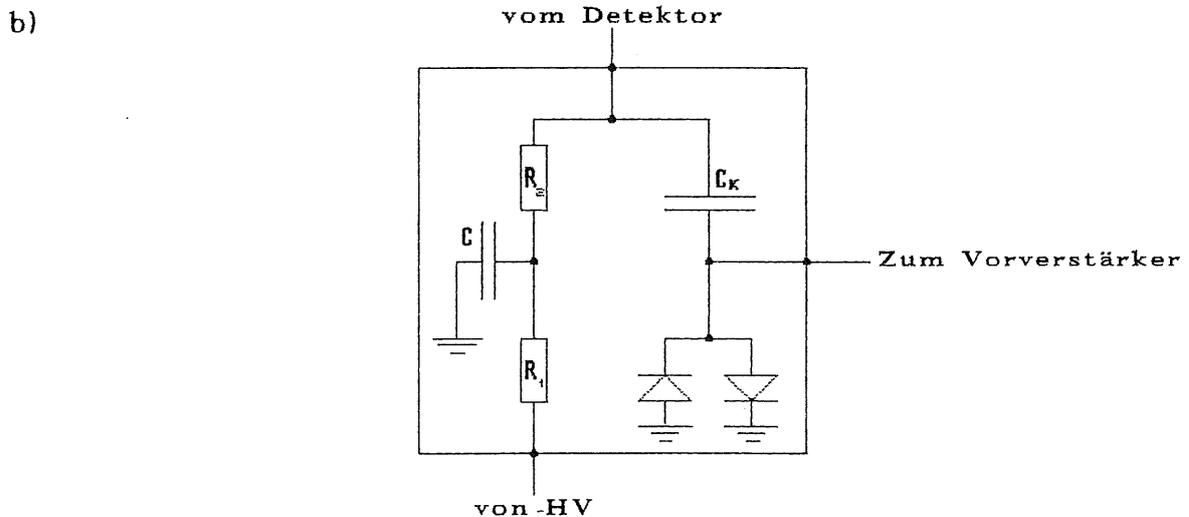
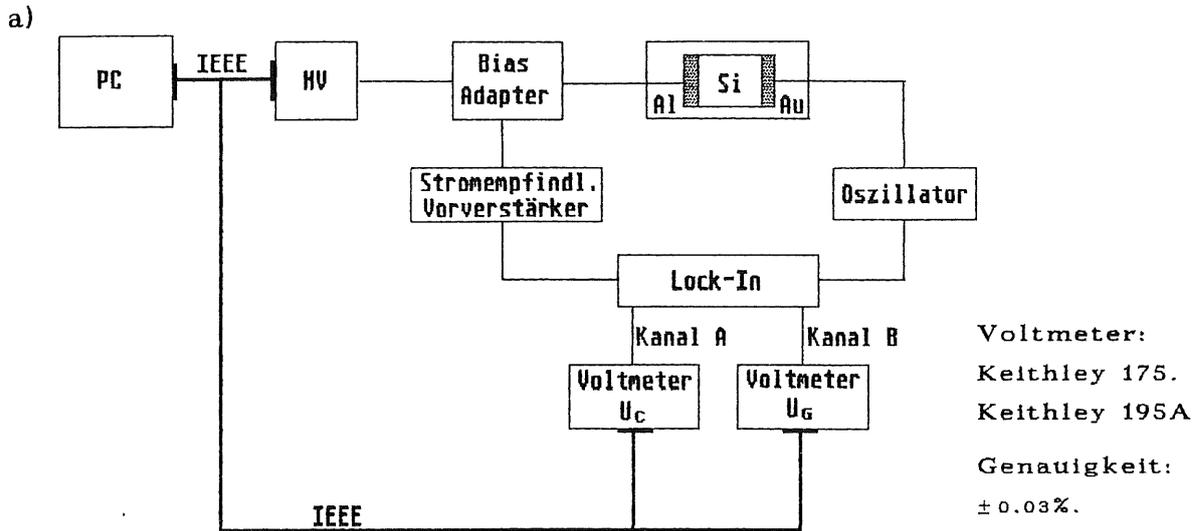


Abb. 3.3: a) C/V-Messung

b) BIAS-Adapter

Der BIAS-Adapter (Abb. 3.3 b) dient dazu, das vom Detektor kommende Wechselsignal zum einen von der Spannungs-Versorgung fernzuhalten (dieses soll ausschließlich zum Lock-In-Verstärker gelangen), zum anderen störende Wechselspannungsanteile der Spannungs-Versorgung abzutrennen. Die Koppelkapazität C_k dient zur Abtrennung der Spannungs-Versorgung von dem Vorverstärker.

Das durch die Detektorkapazität fließende Wechselstrom-Signal wird durch den Vorverstärker in ein Wechselspannungs-Signal umgewandelt und dem Lock-In-Verstärker zugeführt.

Der Wechselspannungs-Generator überlagert der am Detektor anliegenden Gleichspannung U_R ein Wechselspannungs-Signal δU , dessen Amplitude klein ist verglichen mit U_R . Gleichzeitig liefert er das Referenzsignal für den Lock-In-Verstärker. Dieser vergleicht das Referenzsignal mit dem vom Vorverstärker kommenden Signal und liefert über die festgestellte Phasenverschiebung die Spannung U_C bzw. U_G , die über den Kanal A bzw. B des Lock-In-Verstärkers von jeweils einem Voltmeter angezeigt wird. Diese Spannungen sind der Kapazität C bzw. dem Leitwert G des Detektors proportional [14].

Es wird mit dem oben beschriebenen Meßaufbau die dynamischen Kapazität (Gl. (2.8)) gemessen. Bei Änderung der Sperrspannung U_R um einen infinitesimalen Betrag dU_R , ergibt sich eine entsprechende Änderung dx in der Sperrschichtweite. Dies hat zur Folge, daß sich die Ladung auf der Metallelektrode um dQ ändert. Die Überlagerung eines hochfrequenten Wechselspannungssignals führt zu einer Fluktuation freier Ladungsträger δQ , die der Sperrschichtkapazität proportional ist. Die Amplitude des entstehenden Verschiebungsstromes bei konstanter Frequenz ν (typisch 10 kHz), ist damit ein direktes Maß für die gemessene Kapazität C_M .

Hervorgerufen durch den ohmschen Serienwiderstand R_s außerhalb der Sperrschicht des Halbleitermaterials, wird C_M von der tatsächlichen Sperrschichtkapazität C_S abweichen.

Aus der Definition der Admittanz Y als Kehrwert der Impedanz Z , folgt für eine RC-Reihenschaltung

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R_s + 1/i\omega C_S} = G + iB \quad (3.1),$$

$G \equiv$ Konduktanz , $B \equiv$ Suszeptanz.

Aus den Beziehungen $B = \omega C_M$ und Gl. (2.8) für die Kapazität C_S , ergibt sich damit für das Verhältnis

$$C_M / C_S = \frac{1}{(\omega \epsilon_s \rho (d-W) / W + 1)} \quad (3.2).$$

Mit den Werten für $\omega=10\text{kHz}$, $\rho=5\text{k}\Omega\text{cm}$, $d=400\mu\text{m}$, $W\approx 45\mu\text{m}$, $\epsilon_s \approx 12\epsilon_0$ erhält man für $C_M / C_S \approx 0.9996$. Die Abweichung liegt unter 0.1 % .

3.2 I/V-Meß-Programm

Das Programm zur Aufnahme einer einzelnen Kennlinie wird mit dem Batch-File "Strom" aufgerufen. Das zur automatischen Aufnahme von maximal zehn Kennlinien mit "Strom10". Nach Aufruf des Programms erscheint zunächst ein Hinweis auf die anzuschließenden Geräte. Dies dient dazu, den Benutzer daran zu erinnern, alle aufgeführten Geräte angeschlossen zu haben. Ein nicht angeschlossenes Gerät führt zu einem Fehler im IEEE-System, bei dem Versuch, dieses fernzusteuern.

Um die Handhabung des Programms für den Benutzer möglichst einfach zu gestalten, wurde eine Menü-Struktur gewählt (A.5). Dem Benutzer werden verschiedene Möglichkeiten angeboten, von denen er durch Tastendruck eine auswählen kann. Dadurch gelangt er entweder in ein neues Menü oder erhält den Zugriff auf einen Parameter.

a) Haupt-Menü:

Nach dem Geräte-Hinweis erscheint das Haupt-Menü. Von hier kann entweder in das Grafik- oder Meß-Menü gewechselt werden. Nur in diesem Menü kann das Programm beendet werden.

b) *Meß-Menü (Menü zur Aufnahme von I/V-Kennlinien):*

Hier erfolgt die Änderung der Meß-Parameter, der Start einer Messung und die Speicherung der Daten. Aus diesem Menü kann ebenfalls in das Grafik-Menü gewechselt werden, um eine zuvor durchgeführte Messung ausdrucken zu lassen oder eine bereits existierende zu laden. Die Abb. 3.5 zeigt das Blockbild des I/V-Programms für den Fall einer Kennlinien-Aufnahme.

Meß-Parameter

In diesem Menü kann neben dem Spannungsbereich und der oberen Stromgrenze, die schrittweise Erhöhung der Spannung, die Zeit zwischen zwei Spannungserhöhungen, die Verzögerung bis zur Strommessung als auch sogenannte Standbyzeiten vorgegeben werden.

Verzögerung der Strommessung

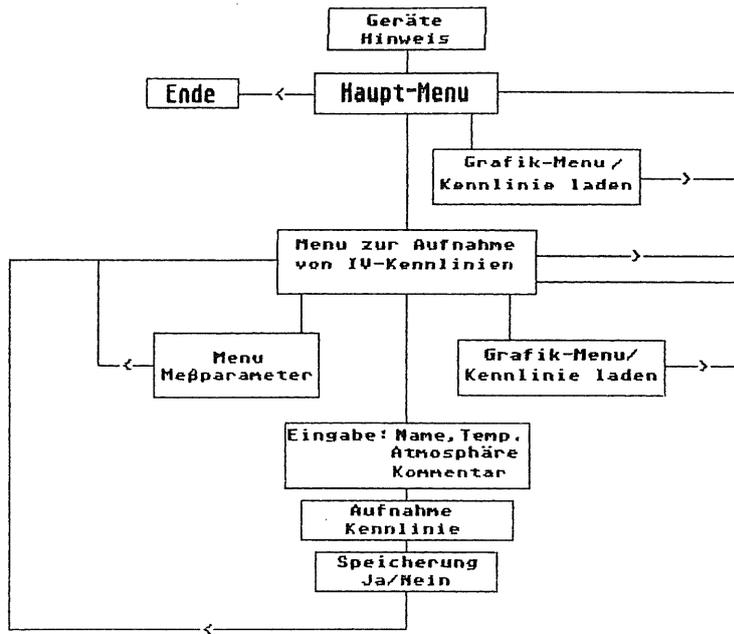
Nach einer Spannungserhöhung durch den PC braucht es eine gewisse Zeit, bis sich die Sperrschicht auf die neue Spannung eingestellt hat, und ein stabiler Sperrstrom fließt. Das Amperemeter benötigt ebenfalls Zeit, bis es den Stromwert stabil anzeigt.



Abb. 3.4: Aufteilung der Zeit zwischen zwei Spannungserhöhungen.

Diese Verzögerungen werden durch die Wartezeit bis zur Strommessung (t_1) und der bis zum Auslesen des Amperemeters (t_2) berücksichtigt. Damit folgt für die Wartezeit bis zur nächsten Spannungserhöhung (t_0), daß sie mindestens so groß sein muß wie die Summe der beiden anderen Wartezeiten (Abb. 3.4). Dies wird bei der Festlegung der Wartezeiten, die vom Benutzer in Einheiten von Sekunden gewählt werden können, berücksichtigt.

a)



b)

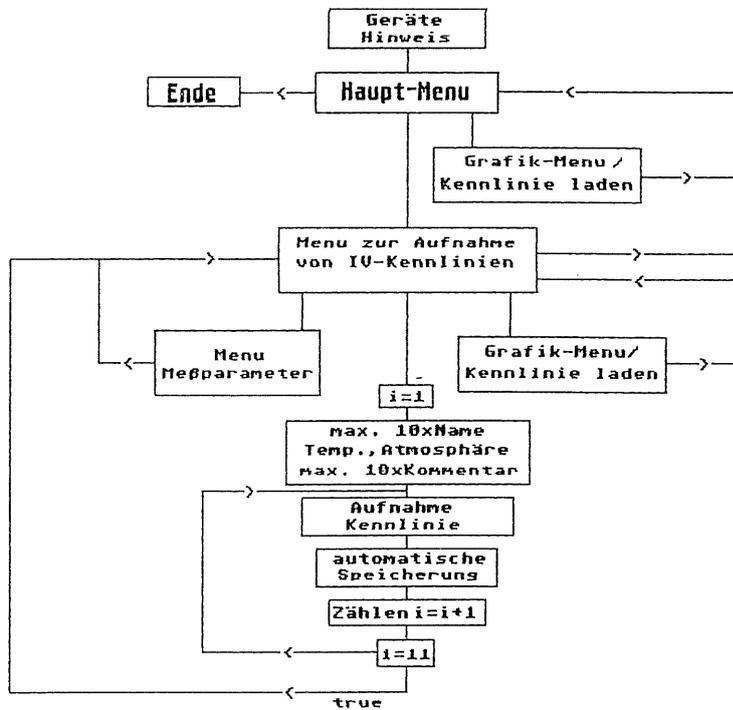


Abb. 3.5: a) Blockdarstellung des I/V-Programms.
b) Blockdarstellung des I/V-Programms für die autom. Aufnahme von 10 Detektoren

Die Standbyzeiten bei einer Hysterese-Messung

Es wurden Kennlinienmessungen durchgeführt, bei denen zunächst eine schrittweise Erhöhung der Spannung erfolgte ('Aufwärtsrichtung'). Nach einer anschließenden Wartezeit bei einem bestimmten Spannungswert, wurde dann die Spannung schrittweise erniedrigt ('Abwärtsrichtung'). Es zeigte sich bei solchen Messungen, daß die beiden so aufgenommenen Kennlinien nicht unbedingt übereinstimmen. Aus diesem Grunde wurde die Möglichkeit einer Hysterese-Messung eingeführt. Durch eine Standbyzeit kann der Benutzer die Wartezeit am Ende einer Aufwärtsmessung festlegen. Der zeitliche Abstand der Strommessungen, die während der Wartezeit erfolgen, wird ebenfalls durch eine Standbyzeit gewählt.

Wahl der Spannungs-Versorgung

Für einige Spannungen werden die gemessenen Stromwerte im Anschluß an eine Messung in eine Datenbank übertragen. Stimmen die Spannungen nicht, so werden zu den ausgewählten falsche Stromwerte übermittelt. Die mit den gemessenen Stromwerten abgespeicherten Spannungswerte sind ganzzahlige vom PC vorgegebene Werte mit der Einheit Volt. Bei Messungen mit kleinen Spannungen steht das Gerät EM50 zur Verfügung, das eine maximale Spannung von 50V liefert und Spannungsschritte von minimal 150mV zuläßt. Damit ergibt sich bei diesem Gerät das Problem, daß den Stromwerten bei der Speicherung falsche Spannungen zugewiesen werden (z.B. I bei 150mV wird mit 1V gespeichert). Um dennoch die richtigen Stromwerte in die Datenbank zu übertragen, wird bei der Wahl der Spannungs-Versorgung eine Konstante definiert, welche die entsprechenden Spannungen korrigiert (z.B. wird der Stromwert für $\approx 1V$ bei einer 'Spannung' von 7V gefunden). Es kann deshalb zwischen den Spannungsgeräten EM500 und EM50 unterschieden werden.

Start einer Messung

Wird eine Messung gestartet (mit oder ohne Hysterese), so wird nacheinander der Detektor-Name, die Atmosphäre, in der sich der Detektor bei der Messung befindet, die Temperatur und eine allgemeine Bemerkung zur Messung abgefragt. Bei dem "Strom10"-Programm können maximal zehn Namen und zusätzlich spezielle Bemerkungen zu den einzelnen Detektoren eingegeben werden. Hierbei muß nicht die numerische Reihenfolge eingehalten werden. Freie Zeilen zwischen Namen werden übersprungen. Es folgt die Steuerung der Spannungs-Versorgung, die Strommessung, das Auslesen des Amperemeters und die grafische Darstellung der Meßwerte. Gleichzeitig werden die aktuellen Spannungs- und Stromwerte angezeigt. Bei einer Hysterese-Messung wird während der Wartezeit der aktuelle Stromwert und die verstrichene Zeit angegeben. Die Messung kann jederzeit durch Tastendruck unterbrochen werden. Ob die Messung abgebrochen oder fortgeführt werden soll, kann in einem daraufhin erscheinenden Abbruch-Menü entschieden werden. Wird sie fortgesetzt, schließt sich der verbleibende Teil der Messung an den bereits erfolgten an. Bei Abbruch erfolgt eine Abfrage, ob die bis dahin aufgenommene Kennlinie gespeichert werden soll. Danach folgt die Rückkehr ins Meß-Menü. Im "Strom10"-Programm kann zusätzlich in das Meß-Menü zurückgekehrt werden, ohne dafür die Messung abrechnen zu müssen. Wird die Messung wieder gestartet, so ist der Ablauf wie beim erstmaligen Start. Es können jetzt Änderungen in den nachfolgenden Abfragen (z.B. Name, Kommentar, etc.) vorgenommen werden. Begonnen wird die Messung bei dem Detektor, der zum Zeitpunkt des Abbruchs anlag. Änderungen haben also nur für solche Detektoren Sinn, die noch nicht vollständig gemessen wurden. Sollen dagegen alle Detektoren nochmals gemessen werden, muß zunächst ins Haupt-Menü zurückgekehrt werden.

Am Ende einer Messung wird der Benutzer zum Speichern der Kennlinie aufgefordert. Bei "Strom10" erfolgt eine automatische Speicherung. Nach

der Speicherung folgt die Rückkehr in das Meß-Menü (bei "Strom10" nach dem letzten Detektor).

c) *Grafik-Menü:*

In diesem Menü können bereits aufgenommene Kennlinien geladen und dargestellt werden. Der Spannungs- und Strombereich ist frei wählbar. Sowohl die Meßwerte als auch die Kennlinie können ausgedruckt werden.

3.3 C/V-Meß-Programm

Aufgerufen wird dieses Programm über den Batch-File "Kapazneu". Sein Aufbau ist analog dem I/V-Programm. Es wird deshalb auf das I/V-Programm verwiesen und die Beschreibung beschränkt sich hier auf die Unterschiede. Die Abb. 3.6 zeigt das Blockdiagramm des C/V-Programms für den Fall einer Kennlinien-Aufnahme.

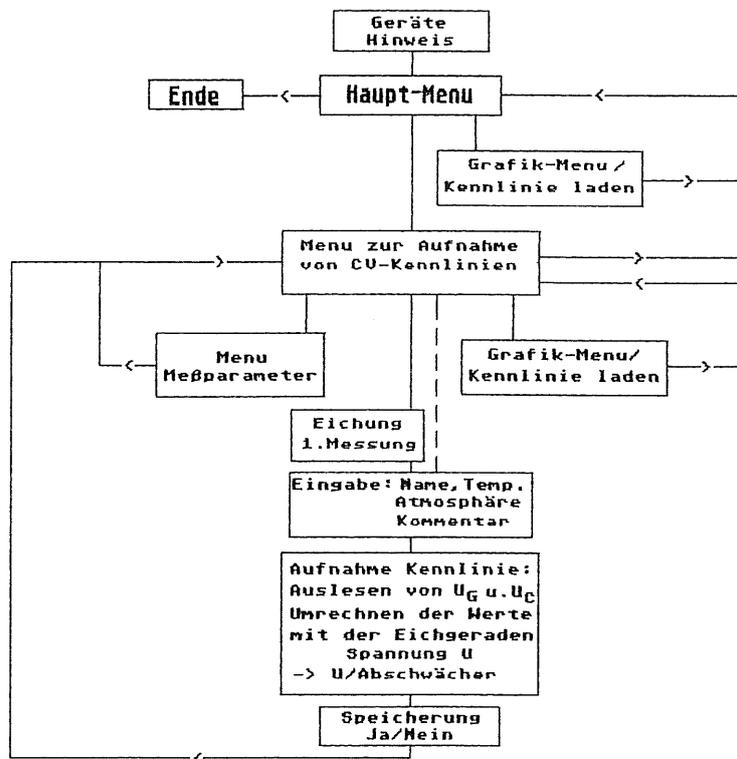


Abb. 3.6: a) Blockdiagramm des CV-Programms.

a) Meß-Menü (Menü zur Aufnahme von C/V-Kennlinien):

Eichung

Mit Hilfe des auf Seite 26 dargestellten Verfahrens werden Spannungen gemessen, die der Kapazität bzw. dem Leitwert proportional sind. Um aus ihnen Kapazitäten bzw. Leitwerte erhalten zu können, wird zuvor eine Eichung durchgeführt. Dazu werden Eich-Kapazitäten bekannter Größe statt des Detektors angeschlossen und ihnen die entsprechenden Spannungen zugeordnet. Mit den so erhaltenen Wertepaaren werden die Koeffizienten A und B der Gl. (3.4) bestimmt (A.7). Die aus einer Kennlinien-Messung erhaltenen Spannungen U_C bzw. U_G des Lock-In-Verstärkers können dann in die entsprechenden Kapazitäten bzw. Leitwerte umgerechnet:

$$C_{ges} = \frac{C_k \cdot C_s}{C_k + C_s} = A + B \cdot U_C \quad (3.4)$$

$$C_s = \frac{A + B \cdot U_C}{1 - (A + B \cdot U_C) / C_k} \quad (3.4a)$$

$$G/\omega = A + B \cdot U_G \quad (3.5)$$

Mit

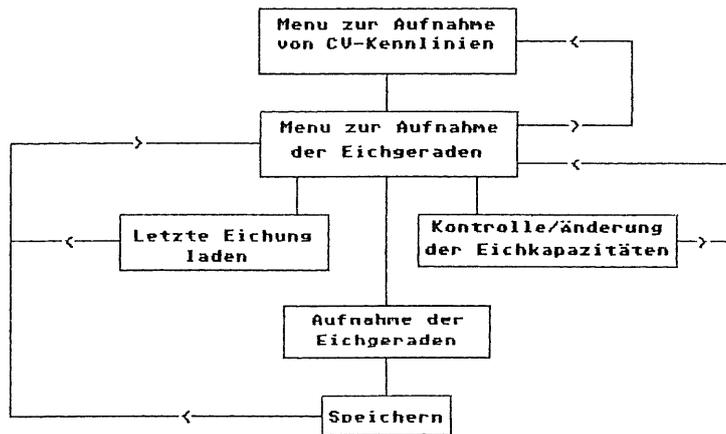
A: Konstantenterm.

B: Empirischer Regressionskoeffizient.

C_k, C_s : Koppel- bzw. Sperrschichtkapazität.

ω : Meßfrequenz.

Zur Durchführung einer Eichung gelangt man zunächst in das Eich-Menü (Abb. 3.7). Hier kann entschieden werden, ob eine Neu-Eichung erfolgt oder die letzte Eichung benutzt werden soll. Eine Kontrolle der Eichkapazitäten einschließlich der Koppelkapazität kann ebenfalls durchgeführt werden. Die Neueingabe einer oder aller Eichkapazitäten ist möglich. Dazu muß jedoch das C/V-Programm verlassen und ein neues Programm, auf das verwiesen wird, aufgerufen werden. Dies war wegen der Länge des C/V-Programms unumgänglich.



Relativer Fehler der Reproduzierbarkeit: 0.67%.

Abb. 3.7: Blockdiagramm des Eich-Programms.

Wird die letzte Eichung geladen, erfolgt eine Auflistung der verwendeten Eichkapazitäten mit den zugehörigen Eichspannungen. Zusätzlich werden die Koeffizienten der Regression A und B, der Korrelationskoeffizient R, die verwendete Frequenz und die Koppelkapazität zur Anzeige gebracht. Wird eine neue Eichung ausgeführt, kommt es zur Ausgabe der jeweils anzuschließenden Eichkapazität. Ist dies durch Drücken der <ENTER>-Taste bestätigt worden, wird nach ca. zehn Sekunden der Spannungswert ausgelesen und neben der Eichkapazität auf dem Monitor ausgegeben. Nachfolgend wird dieser Vorgang mit der nächsten Eichkapazität wiederholt. Wird statt <ENTER> eine NULL eingegeben, wird diese Eichkapazität nicht berücksichtigt und mit der nächsten fortgefahren. Nach der letzten anzuschließenden Eichkapazität kann eine Korrektur einzelner Werte erfolgen (z.B. eine durch Null-Eingabe übersprungene Eichkapazität soll nachträglich in die Eichung aufgenommen werden). Nach Eingabe der laufenden Nummer der Eichkapazität, wird der oben beschriebene Ablauf für diese Kapazität wiederholt. Bei erfolgreicher Durchführung einer Eichung, werden anschließend die Parameter A, B und R berechnet und auf dem Monitor ausgegeben. Abschließend wird die Anzahl der

verwendeten Eichkapazitäten, A, B, R, die verwendete Frequenz, die Koppelkapazität und die tatsächlich zur Eichung verwendeten Eichkapazitäten mit ihren Eichspannungen abgespeichert. Dabei wird die letzte Eichung überschrieben. Bei einer nicht erfolgreichen Ausführung, wird eine entsprechende Meldung gegeben und es erfolgt keine Speicherung. Zu einer weiteren Speicherung der Eichung kommt es bei der Kennlinien-Sicherung. Es werden zusätzlich zu den Werten einer Kennlinienmessung die Ergebnisse der Eichung in die Datei geschrieben.

Nach erfolgreicher Eichung wird im Meß-Menu der Punkt Eichung nicht mehr aufgeführt. Stattdessen wird darauf hingewiesen, daß bei einer erneuten Eichung zunächst in das Haupt-Menu zurückgekehrt werden muß.

Wahl des Abschwächers

Dieser Punkt entspricht der Wahl einer Spannungs-Versorgung im Strom-Programm. Für das Spannungsgerät EM50 entspricht eine schrittweise Erhöhung minimal 150mV und nicht dem vom PC vorgegebenen Wert von 1V (die Spannung wird bisher nicht gemessen). Damit wären die den Meßwerten zugewiesenen Spannungen bei dem Gerät EM50 um einen Faktor 6.666 zu groß. Um dennoch 'richtige' Spannungswerte zu den jeweiligen Kapazitäten bei der Speicherung und der grafischen Darstellung zu bekommen, werden die vom PC vorgegebenen 'Spannungen' vorher durch den "Abschwächer" geteilt.

Doppellogarithmische Darstellung

Gemäß Gl.(2.8) ergibt sich bei Auftragung der Kapazität gegen die Spannung U_R in dieser Darstellung eine Gerade mit der Steigung $(-1/2)$. Bei vollständiger Verarmung ist eine weitere Ausdehnung der Sperrschicht nicht mehr möglich und die Kapazität wird annähernd konstant. Die Kurvenverlauf geht über in eine Waagerechte und aus dem Abknickpunkt läßt sich die Spannung für vollständige Verarmung U_{dep} bestimmen (Abb. 2.4 c).

Der Spannungs- und Kapazitätsbereich in der grafischen Darstellung ist frei wählbar. Ein gewählter Abschwächer wird auch in dieser Darstellung berücksichtigt. Die untere Grenze der Spannung wird dabei entsprechend dem Abschwächer automatisch gesetzt (z.B. wird als Abschwächer 6.666 gewählt, beginnt die Spannungsachse bei 0.15V). Ohne Abschwächer beginnt die Spannungsachse bei dem Wert 1V. Voraussetzung dafür ist aber, daß im Augenblick des Umschaltens in diese Darstellung die Spannungsachse bei 0V beginnt. Ansonsten wird bei dem momentanen Anfangswert der Spannungsachse begonnen.

Meß-Parameter

Zusätzlich zu den bereits im I/V-Programm aufgeführten Meßparametern, ist eine Änderung des auf 23.5 cm^2 voreingestellten Wertes der Detektorfläche möglich. Die über Gl. (3.4a) berechnete Kapazität C_S und der durch Gl. (3.5) berechnete Leitwert G/ω werden auf diese Fläche bezogen.

Start einer Messung

Der anschließende Ablauf ist völlig gleich zum I/V-Programm. Nach Auslesen der beiden Spannungen U_C und U_G werden sie umgerechnet auf die entsprechenden Kapazitäten bzw. Leitwerte, auf die Detektorfläche normiert und auf dem Monitor grafisch dargestellt. Daneben werden die aktuellen normierten Kapazitäten und Leitwerte zu dem jeweiligen Spannungswert eingeblendet. Nach Abschluß der Messung wird zur Speicherung aufgefordert. Werden die Meßdaten gesichert, wird zusätzlich die benutzte Eichung in die Datei geschrieben.

b) Grafik-Menü:

Bei der grafischen Darstellung kann hier zwischen der Kapazitäts- und der Leitwertkurve gewählt werden.

Bevor die Eichung eingeführt wurde, sind statt der Kapazitäten und Leitwerte die entsprechenden Spannungen des Lock-In-Verstärkers gespeichert worden. Sollte versucht werden, eine solche Datei zu laden, erfolgt eine Meldung, die Daten dieser Datei vorher umzurechnen. Der entsprechende Menü-Punkt fordert dazu zum Verlassen des Programms auf und verweist auf das Umrechnungsprogramm (A.6).

3.4 Programm zur Temperaturkorrektur der Ströme I_B , I_O , I_V

Mit den im Abschnitt 2.6 gegebenen Gleichungen für die verschiedenen Stromanteile, konnte abgeschätzt werden, daß bereits eine Temperaturerhöhung von $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu einer Erhöhung der Ströme von ca. 10% führt. Bei Messungen in einem unklimatisierten Labor waren mehrere Detektoren zum Teil hohen Temperaturen ($\approx 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) ausgesetzt und bestätigten die Abschätzung (Abb. 3.11).

Dies Programm wurde entwickelt, um auch Messungen der genannten Ströme bei verschiedenen Temperaturen miteinander vergleichen zu können. Die Korrektur erfolgt auf die Temperatur $T_0 = 295\text{K}$. Aufgerufen wird das Programm mit "Turbo4\Bin\Auswrtnng". Auch hier wurde die Menü-Struktur gewählt. Die Abb. 3.8 zeigt die Blockdarstellung dieses Programmes.

Das Ziel bei der Entwicklung des Programmes war zum einen die Temperaturkorrektur, zum anderen die Eingabe durch den Benutzer auf ein Minimum zu beschränken. Die Zahl der Detektoren, für die eine Korrektur durchgeführt werden soll, ist durch die Eingabe der Namen des ersten und letzten Detektors bestimmt. Der Zeitraum, aus dem Daten für jeden Detektor geladen und umgerechnet werden, wird durch die Eingabe des 'Start'- und 'Ziel'-Datums festgelegt.

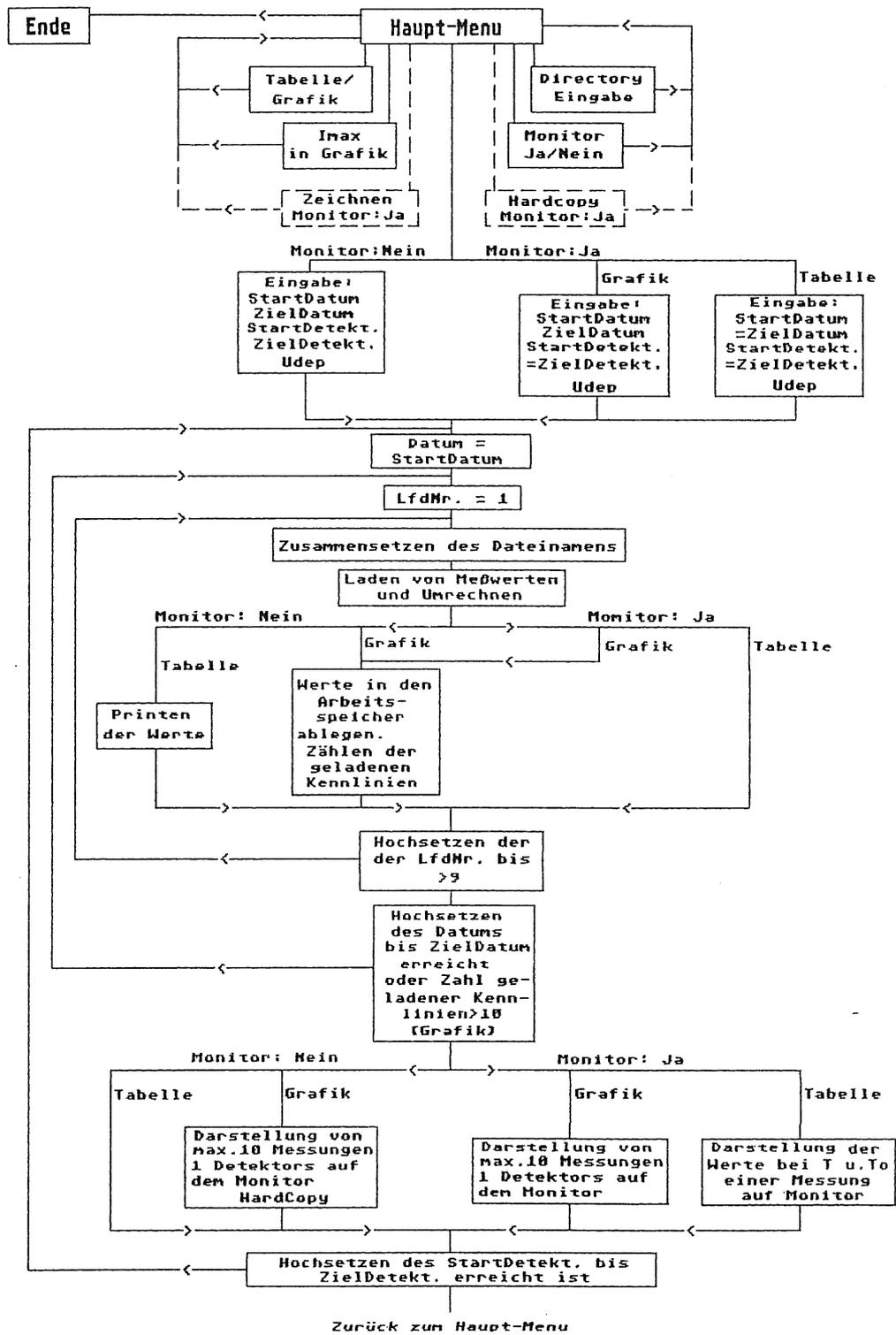


Abb. 3.8: Blockdiagramm des Programms zur Temperaturkorrektur. Tabelle bzw. Grafik bezeichnet die Art der Ausgabe. Monitor bedeutet : Keine Ausgabe an den Drucker.

Für die Berechnung des Volumenstromes $I_V(T_0)$ wird abschließend die Angabe der Spannung bei vollständiger Verarmung U_{dep} benötigt. Wird sie nicht eingegeben, so erfolgt keine Berechnung des Volumenstromes $I_V(T_0)$.

Bei diesem Programm können verschiedene Formen der Ausgabe und Darstellung der Ströme gewählt werden. Je nach Kombination der im Menü wählbaren 'Antworten', ob Tabelle oder Grafik und, ob Monitor oder nicht, werden verschiedene Ausgabeformen bestimmt. Immer wenn der Menü-Punkt Monitor mit 'Ja' gewählt wird, erscheinen zwei neue Menü-Punkte: 'Zeichne' und 'Hardcopy'. Stromwerte, die auf den Monitor ausgegeben werden, erscheinen dort in Form vertikaler Linien. Es werden nachfolgend die verschiedenen möglichen Kombinationen beschrieben.

Tabelle: 'Ja' und Monitor: 'Nein'

Dies ist die Voreinstellung, welche bei Programmaufruf existiert. Die Ausgabe der umgerechneten Daten erfolgt an den Drucker in Tabellenform. Es werden alle vorhandenen Kennlinien aus dem eingegebenen Zeitraum geladen. Von einem Detektor jedoch maximal neun Messungen an einem Tag. Existiert für einen Detektor keine Messung im angegebenen Zeitraum, so wird statt der korrigierten Daten ein entsprechender Hinweis ausgedruckt.

Tabelle: 'Nein' und Monitor: 'Nein'

Die Eingaben sind die gleichen wie bei der Ausgabe in Tabellenform. Es erfolgt eine grafische Darstellung der umgerechneten Werte von maximal zehn Messungen auf dem Monitor, von der automatisch eine Hardcopy erstellt wird. Dargestellt werden neben den drei aufgeführten Strömen, der nicht umgerechnete Meßwert des Stromes bei 100V. Die Ordinate ist logarithmisch unterteilt. Unterhalb der dargestellten Stromanteile wird das Datum der Messung ausgegeben.

Tabelle: 'Nein' und Monitor: 'Ja'

Es kann hier nur ein Name eingegeben werden. Der Ausgabeort ist wieder der Monitor. Die Darstellung ist die gleiche wie in dem Fall, daß beide Antworten 'Nein' lauten. Dargestellt werden die Stromanteile und der Meßwert bei 100V eines einzelnen Detektors.

Tabelle: 'Ja' und Monitor: 'Ja'

Es kann jetzt nur ein Name und ein Datum eingegeben werden. Die Ausgabe erfolgt auf dem Monitor. Jeweils neben dem umgerechneten Stromanteil erscheint sein nicht umgerechneter Wert. Dies dient lediglich zum optischen Vergleich, wie stark sich die Temperaturkorrektur auswirkt. Zusätzlich wird wieder der unkorrigierte Stromwert bei 100V gezeigt.

3.5 Programm zur chargenweise Darstellung der Stromanteile

Bei der Herstellung der Detektoren durchlaufen jeweils sechs Wafer gleichzeitig sämtliche Fertigungsschritte. Eine solche Horde von sechs Wafern wird als Charge bezeichnet. Verschiedene Chargen können sich jedoch in einigen Parametern unterscheiden. Diese sind z. B. der Zeitpunkt der Oxydation, der Typ des Fotolacks und zum Teil der Ort der Fotolack-Entwicklung. Die verwendete Ätze zum Entfernen des Oxyds wird nicht nur für eine Charge benutzt, so daß das "Alter" der Ätze einen weiteren Unterschied zwischen den Chargen darstellt.

Zur Untersuchung, ob diese Unterschiede einen Einfluß auf das Stromverhalten der Detektoren besitzen, wurde dieses Programm geschrieben. Es wird auf dem ATARI 1040ST mit "GrafList" aufgerufen. Die Abb. 3.9 zeigt sein Blockdiagramm.

Die vorhandenen Chargen wurden entsprechend ihrem Erscheinen in der Herstellungsfolge nummeriert. Bei Programmstart wird die Nummer der Charge eingegeben, mit der die Dateneingabe beginnen soll. Nachfolgend wird vom Programm die Nummer der Detektor angezeigt, für die der zugehörige Wert einzugeben ist (z.B. für Q89070 wird nach dem 'Wert70' gefragt). Maximal können die Werte von sechs Chargen verarbeitet werden. Die Eingabe kann nur nach Eingeben einer vollständigen Charge beendet werden. Automatisch beendet wird sie nach Eingabe der sechsten. Ein Abbruch der Eingabe kann jederzeit erfolgen. Der Dateneingabe folgt die Angabe der oberen Stromgrenze in der grafischen Darstellung und die Möglichkeit der Eingabe eines Kommentars. Abschließend wird für die eingegebenen Chargen nach der Zahl der geätzten Wafer, dem Oxyd, dem Fotolack sowie dem Ort seiner Entwicklung gefragt.

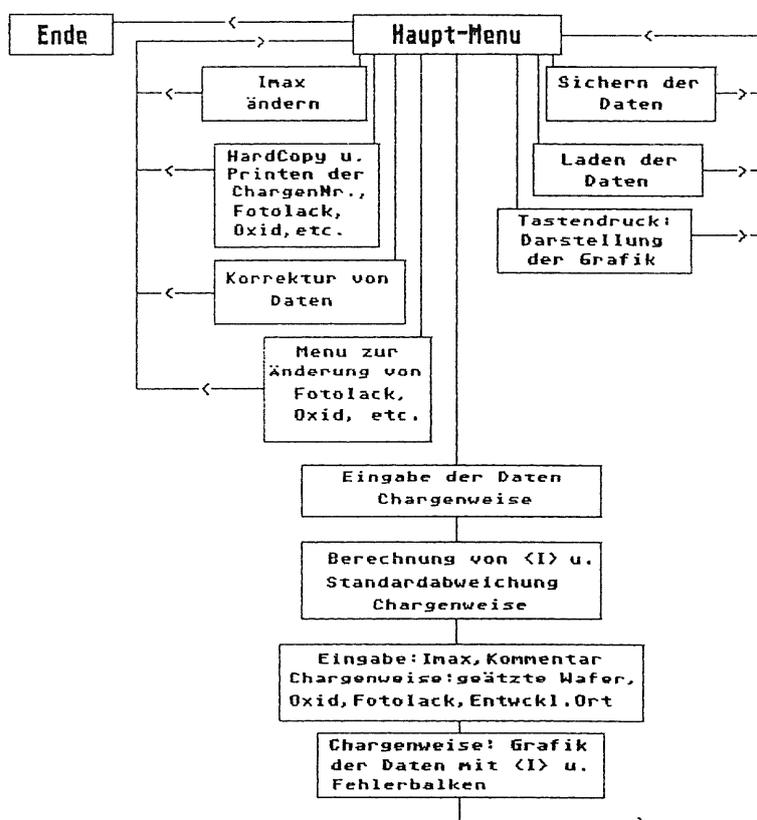


Abb. 3.9: Blockdiagramm des Programms zur chargenweise Darstellung der Stromdaten (GrafList)

In der grafischen Darstellung werden die eingegebenen Stromwerte in Form vertikaler Linien gezeichnet. An den oberen Enden dieser Linien werden die Detektornummern und unterhalb die zugehörigen Chargennummern ausgegeben. Für jede Charge wird der mittlere Stromwert zusammen mit seiner Standardabweichung eingezeichnet.

Bei einer Hardcopy des Bildes wird zunächst der Kommentar gedruckt. Wurden zu den Chargen Informationen zu ihren Unterschieden in der Herstellung (Oxyd, Fotolack etc.) angegeben, werden diese unter die entsprechenden Chargen gedruckt.

Alle Eingaben können gespeichert werden. Der Dateiname darf nicht länger als acht Zeichen sein.

3.6 Programm zur Darstellung mehrerer Kennlinien

Aufgerufen wird dieses Programm mit dem Batch-File "Grafik". Es dient dem Vergleich von Kennlinien, um ihre Entwicklung oder Unterschiede gegenüber anderen zu dokumentieren. Maximal zehn Kennlinien können so miteinander verglichen werden. Die Abb.3.9 zeigt sein Blockdiagramm.

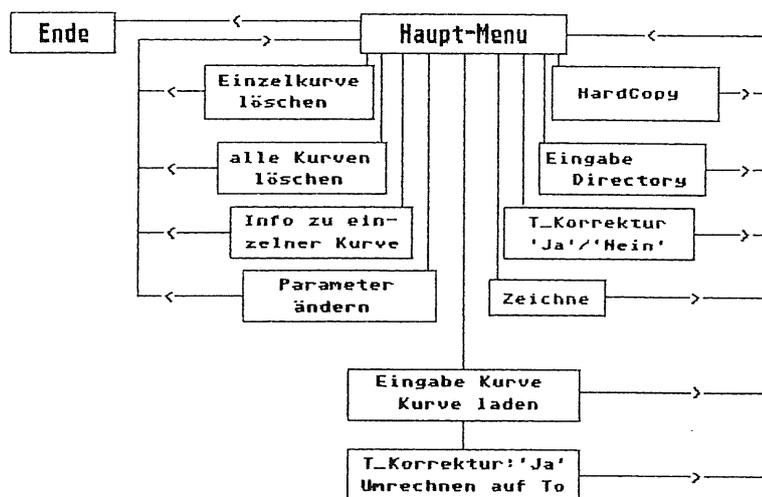


Abb.3.9: Blockdiagramm des Programms zur Darstellung mehrerer Meßkurven.

Auf dem Monitor werden die Kennlinien entsprechend ihrer Reihenfolge, in der sie geladen wurden, gezeichnet und nummeriert. Von den geladenen Kennlinien können einzelne wieder gelöscht werden. Dazu wird die Nummer der Kennlinie eingegeben, die gelöscht werden soll. Anschließend wird die Nummerierung der verbleibenden Kennlinien entsprechend korrigiert. Das heißt, alle Nummern oberhalb der gelöschten Kennlinie werden um eins erniedrigt.

Jede Kennlinie kann auch temperaturnormiert dargestellt werden (Abb. 3.11). Hierzu muß vor Laden der Kennlinie der Menu-Punkt 'T-Korrektur' von seinem voreingestellten Wert 'Nein' auf 'Ja' geschaltet werden. Sollen gemessene und korrigierte Kennlinien im Vergleich dargestellt werden, so muß jede Kennlinie zweimal geladen werden.

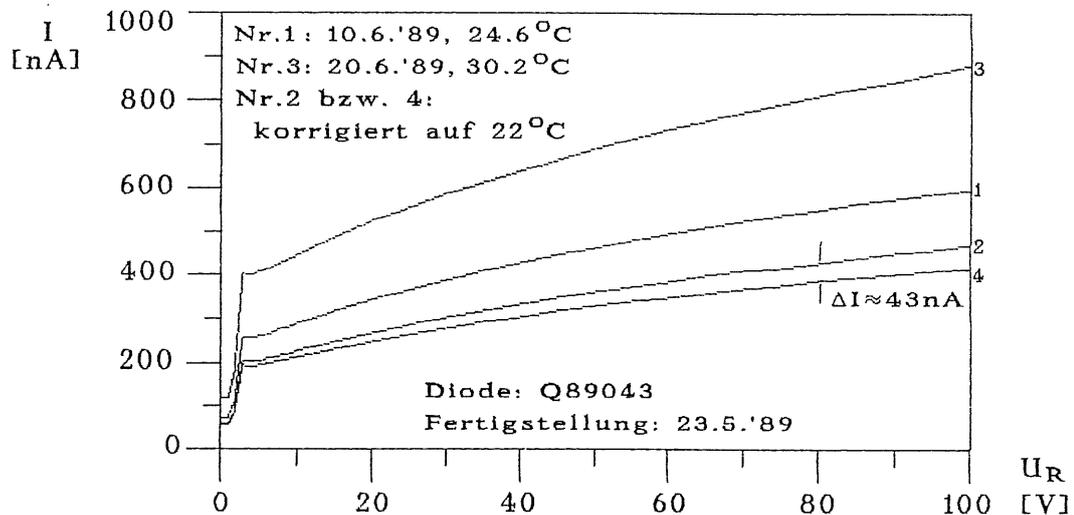


Abb.3.10 : Vergleich gemessener- mit temperaturkorrigierten Kennlinien

Wegen der gleichen Temperaturabhängigkeit von Volumenstrom I_V und Oxidstrom I_O , wird zur Umrechnung der gemessenen Stromwerte $I(T)$ auf $I(T_0)$ die Gl. (2.15) mit $I(T)$ statt $I_O(T)$ benutzt. Unter der Annahme der Näherung, daß sich der Gesamtstrom $I(T)$ aus den drei Stromanteilen

$I_B(T)$, $I_O(T)$ und $I_V(T)$ zusammensetzt (Abschnitt 2.6), entsteht bei der Umrechnung auf $I(T_0)$ eine kleine Abweichung. Sie erklärt sich durch die Temperaturabhängigkeit des Barrierenstromes I_B . Während I_O und I_V die gleiche Abhängigkeit zeigen, wird I_B von der Barrierenhöhe Φ_{Bn} beeinflusst (s. Gl. (2.13)). Eine Abschätzung der Abweichung bei $I(80V)$ ergibt für $\approx 25^\circ C$ bzw. $30^\circ C$ eine Abweichung von ca. 1 - bzw. 2 %.

Die beiden Kennlinien der Abbildung 3.11, die sich vor der Temperaturkorrektur stark voneinander unterscheiden, zeigen nach der Korrektur eine gute Übereinstimmung. Die maximale Abweichung der korrigierten Kennlinien voneinander beträgt in diesem Fall ca. 10%.

Nach einer Hardcopy werden unter das Bild die Nummern der dargestellten Kennlinien mit den zugehörigen vollständigen Dateinamen gedruckt. Zusätzlich werden die Atmosphäre und Temperatur angegeben, die bei der Kennlinienmessung vorlagen.

4. Ergebnisse der Auswertung

Für die Auswertung standen 17 Chargen zur Verfügung. Dies entspricht einer Gesamtzahl von 99 Detektoren (Charge 2 besteht nur aus 3 Detektoren). Davon waren die ersten sechs Chargen bereits gesägt und kontaktiert. Die erste Charge wurde zusätzlich einer Heizprozedur unterzogen, der die übrigen nicht unterworfen wurden. Charge eins wurde deshalb bei den Untersuchungen nicht näher betrachtet. Herangezogen wurden jeweils die letzten Messungen vor dem nächsten Prozeßschritt, um möglichst sicher zu sein, daß die Detektoren ihre zeitliche Entwicklung bereits abgeschlossen und einen stabilen Zustand erreicht hatten. Fortgelassen wurden jene Detektoren, deren Kennlinienverlauf Zweifel am einwandfreien Zustand des Detektors aufkommen ließ, wie z.B. ein starker Anstieg des Stromes vor Erreichen der Verarmungsspannung U_{dep} . Dies erklärt das Fehlen einiger Detektoren in den folgenden Abbildungen.

In den folgenden Betrachtungen ist der Einfluß des Volumenstromes auf den Barrieren- und Oxydstrom I_B bzw. I_O noch nicht berücksichtigt (s. Kapitel 5).

4.1 Zeitverhalten der mittleren Stromwerte

Die Abbildung 4.1 zeigt die zeitliche Änderung der Stromanteile dreier Chargen relativ zum Wert der letzten Messung. Dabei wurde über alle Detektoren einer Charge gemittelt. Am Beginn der Zeitachse zeigen sich starke Variationen in den Strömen. Sie lassen sich durch die zeitliche Entwicklung der Sperrschicht erklären, die für jeden Detektor sehr unterschiedlich ausfallen kann und umso kürzer sein wird, je reiner die Oberfläche des Detektors ist. Damit können gerade die unmittelbar nach der Fertigstellung gemessenen Ströme selbst innerhalb einer Charge sehr stark voneinander abweichen (Tab. 4.1). Der Strom wurde deshalb auf den Wert der letzten und nicht der ersten Messung bezogen.

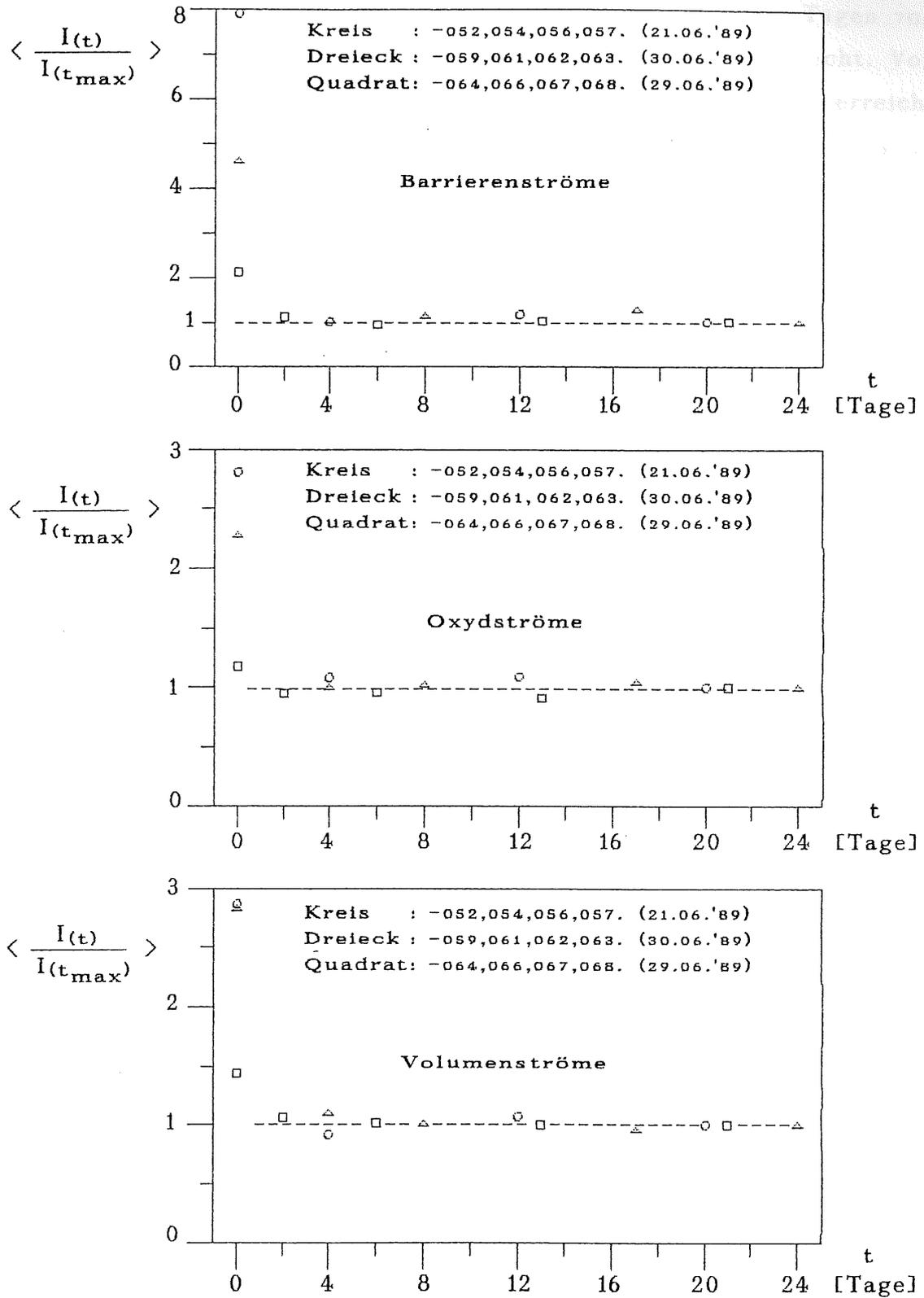


Abb.4.1: Zeitliche Entwicklung der temperaturkorrigierten Ströme.

Wie aus der Abb. 4.1 ersichtlich, werden spätestens nach vier Tagen von allen Detektoren der untersuchten Chargen stabile Ströme erreicht. Von einigen Detektoren wurde dieser Wert schon nach zwei Tagen erreicht (Q89064 bis -068). Eine der O₂-Lagerung anschließende Lagerung in trockener Luft, führte zu keiner auffälligen Änderung im Stromverhalten. Bis auf die Detektoren -059 bis -063, die vier Tage in O₂ lagerten, befanden sich die übrigen nur in Sauerstoff. Für Detektoren anderer Chargen wurden gleiche Verhaltensweisen beobachtet.

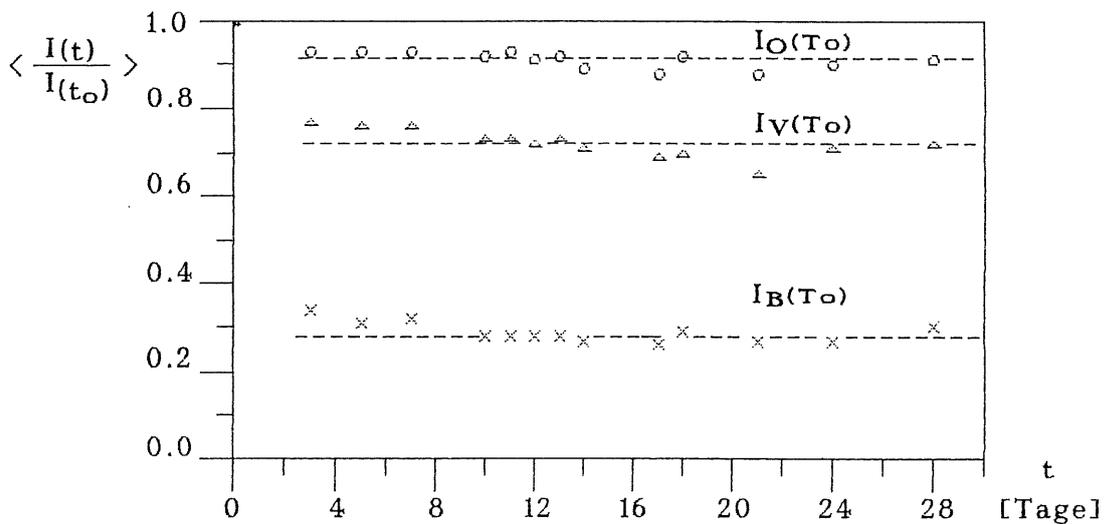
Detektor Q890	Zeit nach Fertigstellung [Std.]	I _B (T _O) [nA]	I _O (T _O) [nA]	I _V (T _O) [nA]
-76	1.15 / 2.27	154.91/89.95	306.55/121.78	1111.56/594.46
-77	1.27 / ≈25	160.78/54.74	237.93/94.72	294.89/160.34
-78	1.85 / ≈25	140.89/63.71	215.70/102.80	274.99/177.89
-79	1.97 / ≈25	64.67/63.75	102.81/95.55	252.93/247.51
-80	2.07 / ≈25	63.75/64.47	105.53/104.03	370.35/359.18
-81	2.15 / ≈25	77.53/72.38	119.65/118.21	400.76/395.96

Tabelle 4.1: Stromanteile der Charge 14 kurz nach Fertigstellung

In der Tabelle 4.1 sind die Stromwerte der ersten beiden Messungen der Charge 14 zusammengefaßt. Die Tabelle zeigt, wie stark sich die kurz nach der Fertigstellung gemessenen Stromwerte innerhalb einer Charge unterscheiden können. Der erste Detektor dieser Charge wurde ca. eine Stunde nach seiner ersten Messung nochmals gemessen. Es fällt auf, daß die Stromanteile in dieser kurzen Zeit um gut 50% gefallen sind. Der weitere Vergleich der Stromwerte zeigt, daß die nach mindestens zwei Stunden nach der Fertigstellung gemessenen Ströme wesentlich kleiner ausfallen, als jene, die zu früheren Zeiten gemessen wurden. Speziell das Verhalten des Detektors -076 läßt vermuten, daß die großen Unterschiede in den Strömen nicht aufgetreten wären, hätten alle Messungen zu einem späteren Zeitpunkt stattgefunden. Die hier nicht aufgeführten späteren Messungen weichen von denen der Tabelle 4.1 nur noch unwesentlich ab.

Die Detektoren dieser Charge erreichen bereits nach gut zwei Stunden stabile Stromwerte. Da Messungen im Stundenabstand nicht generell durchgeführt wurden, kann eine allgemeine Aussage nicht getroffen werden. Es wird aber vermutet, daß die meisten Detektoren nach relativ kurzer Zeit ihren Endzustand erreicht haben.

In diesem Zusammenhang sei kurz auf das Zeitverhalten nach dem Sägen und Kontaktieren hingewiesen. Eine systematische Untersuchung konnte aus Zeitgründen im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt werden.



Zehn untersuchte Detektoren:
Q89052, -054, -056, -057, -059,
-062, -064, -066, -067, -068.

Abb.4.2: Zeitliche Entwicklung der mittleren relativen Ströme nach dem Sägen und Kontaktieren. $t_0 = 0$ Tage.

Die Abbildung 4.2 zeigt die zeitliche Entwicklung der Stromanteile nach dem Sägen und Kontaktieren. Sie wurden hier auf den Wert der ersten Messung nach dem Kontaktieren bezogen. Gemittelt wurde über die Werte zu gleichen Zeiten von zehn Detektoren, die zum Teil aus verschiedenen

Chargen stammen. Es zeigen sich ähnliche Verhaltensweisen wie nach der Fertigstellung. Die Detektoren erreichen bereits nach spätestens zwei Tagen wieder stabile Stromwerte. Die drastische Änderung im Barrierenstrom I_B zeigt die hohe Empfindlichkeit der Detektoroberfläche gegenüber äußeren Einflüssen. Generations-Rekombinations-Zentren innerhalb des Halbleiters und die Oberflächenzustände unterhalb des Oxydes sollten gegen äußere Einflüsse unempfindlich sein. Der Volumen- bzw. Oxydstrom müßte damit unabhängig sein von den äußeren Einflüssen. Die Änderung des Volumenstromes I_V zeigt, daß die Bestimmung von $I_V(T)$ nach Gl. (2.20) nur eine erste Näherung darstellen kann. Bei der Bestimmung des Oxydstromes nach Gl. (2.16) bleibt der Einfluß des Volumenstromes bei den entsprechenden Spannungen unberücksichtigt (s. Kapitel 5). Die Änderung im Oxydstrom könnte damit auf den Einfluß des Volumenstromes zurückzuführen sein. Die Verteilung der Stromwerte $I_V(\tau_0)$ und $I_O(\tau_0)$ in der Abb. 4.2 deutet dies zumindest an.

4.2 Kennlinienverhalten

Bei Kennlinienmessungen wurden stets alle Detektoren einer Charge untersucht. Dabei wurde als erster Detektor, der mit der kleinsten Nummer und als letzter, jener mit der größten Nummer aus der Charge gemessen. Ein Vergleich der so erhaltenen Kennlinien ergab, daß in der überwiegenden Mehrheit der Fälle die ersten drei Kennlinien einer Charge einen flacheren Verlauf zeigen als die letzten, die sich zum Teil erheblich von den ersteren abheben (Abb. 4.3). Die sechste Kennlinie ist hierbei fast immer diejenige mit der größten Steigung (bzw. den höchsten Stromwerten).

Nach ihrer Fertigstellung werden die Detektoren vorerst in einer reinen O_2 -Atmosphäre bei ca. 0.4 bar gelagert. Bei einer Messung der Charge wird der Druckbehälter, in dem sich die Detektoren befinden, zunächst mit Luft geflutet.

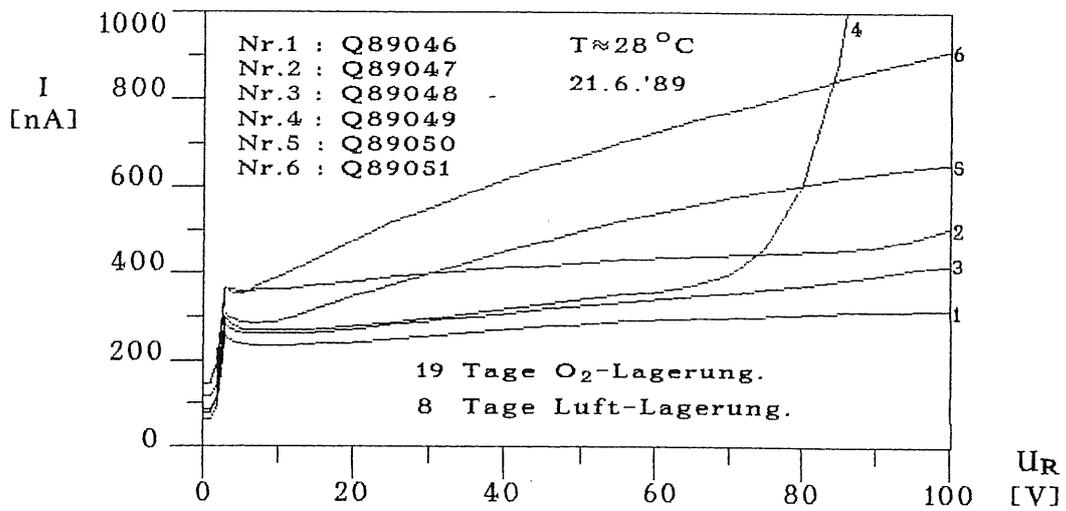
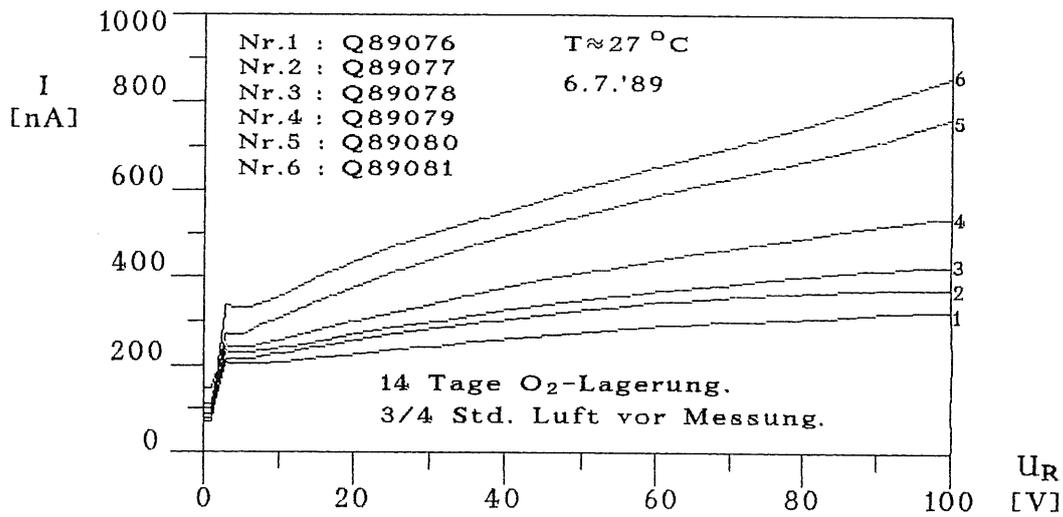
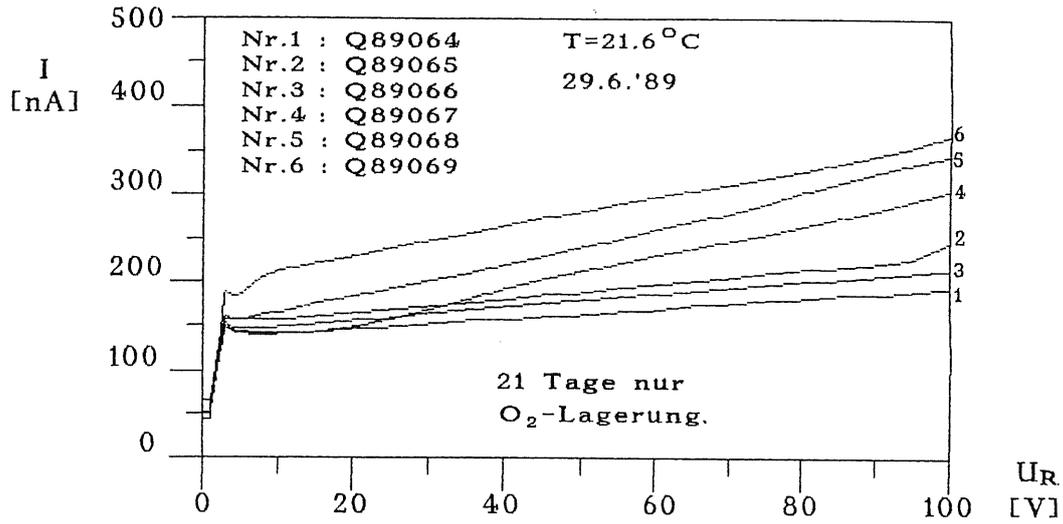


Abb. 4.3: Kennlinienverlauf innerhalb einer Charge vor dem Sägen.

Durch Einhalten der oben beschriebenen Reihenfolge wird der erste Detektor praktisch unmittelbar nach der O₂-Lagerung gemessen, während die übrigen Detektoren entsprechend länger der Luft ausgesetzt sind. Um den Einfluß der Luft auf die Detektoren zu prüfen, wurden vier Chargen vor Meßbeginn eine halbe bzw. dreiviertel Stunde an Luft belassen. Außerdem wurden zum Vergleich Kennlinien von solchen Detektoren herangezogen, die bereits mehrere Tage in trockener Luft lagerten. Die Abbildung 4.3 zeigt eine Auswahl solcher gemessenen Kennlinien. Man erkennt, daß sich stets das gleiche Kennlinienverhalten innerhalb einer Charge einstellt. Damit hat sich die Vermutung, dieses Verhalten könne am Einfluß der umgebenden Atmosphäre während einer Messung liegen, nicht bestätigt.

In verschiedenen Prozeßschritten der Herstellung erfolgte die Behandlung der Detektoren in der gleichen Reihenfolge, die auch bei den Messungen eingehalten wurde. Ob diese Verfahrensweise einen Einfluß auf das Stromverhalten der Detektoren hat, kann jedoch erst bei zukünftigen Chargen entschieden werden, deren Detektoren z.B. in umgekehrter Reihenfolge behandelt und gemessen werden.

Die Antwort auf die Frage, ob sich das Aussehen der Kennlinien im Laufe der Zeit noch entscheidend verändere, gibt die Abbildung 4.4 für die Detektoren Q89076 bis -081. Ein Vergleich mit Abbildung 4.3 zeigt, daß bis auf die Höhe des Stromes, die durch die Temperatur erklärt werden kann, sich keine grundsätzliche Änderung ergeben hat. Außerdem zeigt der Vergleich, daß die Luft-Lagerung keinen markanten Einfluß auf das spätere Kennlinienverhalten ausübt.

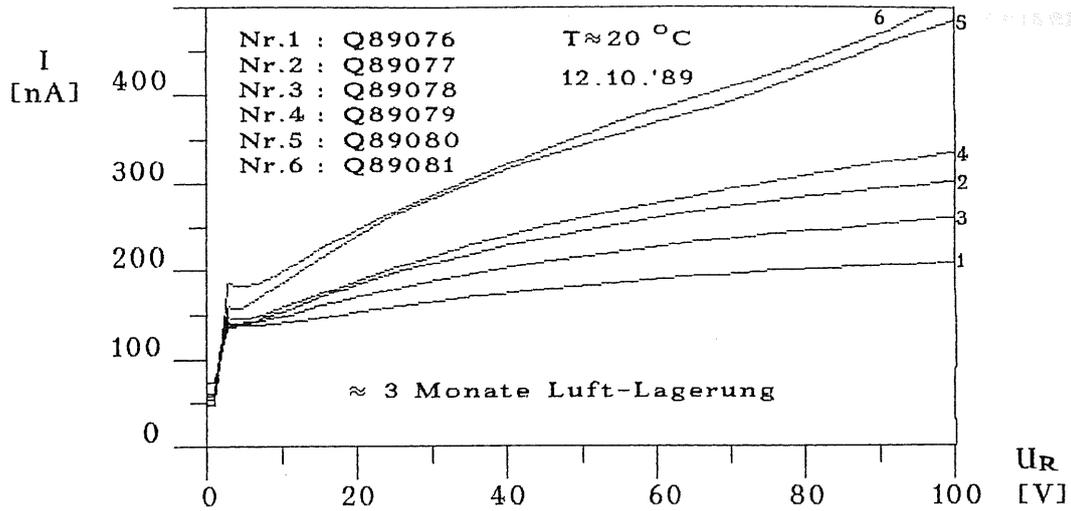


Abb. 4.4: Die Dioden Q89076 bis -081 zu einem späteren Zeitpunkt.

Es wird hier noch kurz auf das Kennlinienverhalten nach dem Sägen und Kontaktieren der Detektoren hingewiesen. Vor dem Sägen der Detektoren konnte eine Zunahme der Kennliniensteigung innerhalb einer Charge mit zunehmender Detektornummer festgestellt werden, dies ist jetzt nicht mehr möglich. Die Abbildung 4.5 zeigt die Kennlinien der Dioden Q89064 bis -067 nach dem Sägen und Kontaktieren als Beispiel für das neue Kennlinienverhalten. Ihr Verlauf vor dem Sägen kann der Abbildung 4.2 entnommen werden. Ein Vergleich der beiden Darstellungen zeigt einen deutlich flacheren Verlauf nach dem Sägen und Kontaktieren.

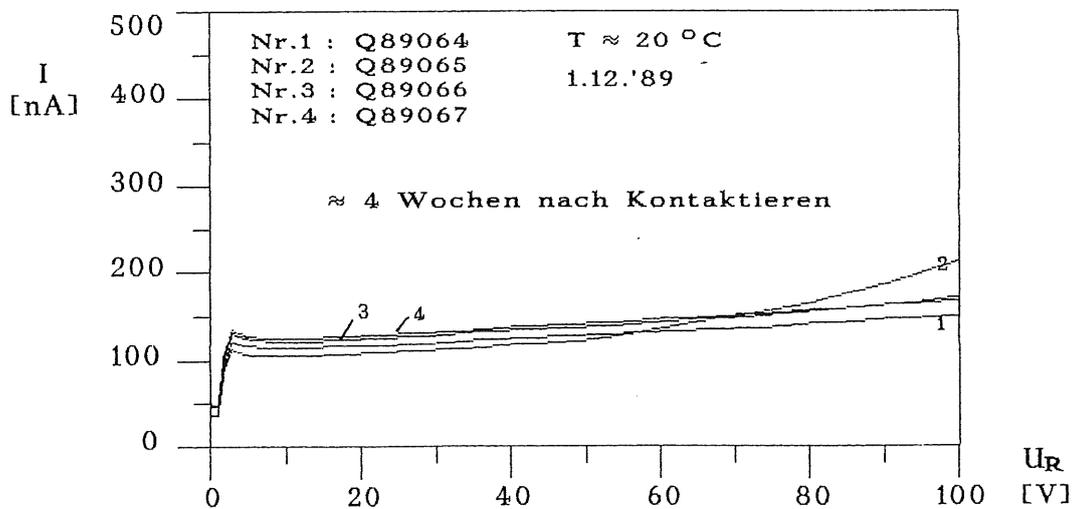


Abb. 4.5: Kennlinienverhalten nach Sägen und Kontaktieren.

Eine genaue Erklärung für diese unterschiedlichen Verhaltensweisen der Detektoren vor und nach dem Sägen kann bisher noch nicht gegeben werden.

4.3 Stromanteile in Korrelation mit Herstellungsparametern

Mit den in den Abschnitten 3.4 und 3.5 vorgestellten Programmen wurde untersucht, inwieweit erkennbare Unterschiede in den Herstellungsparametern Einfluß auf die Stromanteile haben. Es wurden Fotolacke der Firma Shipley vom Typ S1400-31 und S1813 sowie der Firma Hoechst vom Typ H1518 verwendet. Bei dem Oxyd wird nach seinem Herstellungsdatum unterschieden (z.B. Jahr 88, laufende Nr. 3a : 88/3a). Das benutzte Ätzmittel KTI-SiO₂-Ätzmittel wird für mehr als eine Charge benutzt ("Alter der Ätze"). Aber auch bei Einhalten einer stets gleichen Prozedur, stellt jeder Prozeßschritt einen individuellen Einfluß auf die Detektoren dar, der sich nicht dokumentieren läßt. Dieser Umstand erklärt die Bezeichnung 'erkennbare Unterschiede'.

a) Barrierenströme $I_B(T_0)$

In der chargenweisen Auftragung der Ströme in den Abbildungen 4.6 und 4.6a, zeigt sich der Einfluß des Fotolacks am eindrucksvollsten bei der Charge 6. Sie wurde als einzige mit dem Lack H1518 der Firma Hoechst behandelt und weist die größte Ausfallrate auf. Bei den übrigen Chargen wurden verschiedene Fotolacke verwendet und ab der Charge 8 dann ausschließlich der Lack S1813. Bei diesen Chargen lassen sich keine so eindeutigen Auswirkungen beobachten.

Der mittlere Strom $\langle I_B(T_0) \rangle$ einer Charge zeigt eine Zunahme mit der Zahl der Wafer, die mit dem Ätzmittel bereits behandelt wurden. Dieses Verhalten zeigt sich sehr deutlich bei den Chargen 10 bis 17, die alle mit

dem gleichen Fotolack behandelt wurden. Ab Charge 14 wurde ein anderes Oxyd verwendet und der Anstieg fällt wesentlich deutlicher aus. Ein ähnliches Verhalten kann bei den Chargen 3 bis 5 beobachtet werden. Auch hier ergibt eine neuen Kombination Oxyd/Fotolack eine Änderung im Anstieg des mittleren Stromes. Das Verhalten scheint eine Abhängigkeit von der Kombination Oxyd/Fotolack anzudeuten. Sollte sich eine solche Abhängigkeit durch weitere Messungen bestätigen, so sind die Kombinationen der Chargen 5 bis 9 (außer die der Charge 6 !) den anderen zu bevorzugen. Die untere Darstellung der Abbildung 4.6 zeigt die Chargen nach dem Sägen der Detektoren, aber noch bevor die Detektoren auf die Al_2O_3 -Keramik geklebt und kontaktiert wurden. Sehr deutlich tritt eine Erhöhung der Barrierenströme in den Chargen 4 bis 6 auf. Es zeigt sich zwar auch hier das schon oben beschriebene Verhalten, aber wegen der geringen Anzahl der Detektoren kann nicht gesagt werden, ob es sich hier tatsächlich um einen Effekt der Oxyd/Fotolack-Kombination und dem "Alter" der Ätze handelt.

Bei der Festlegung des Barrierenstromes I_B als Meßwert bei der Spannung 1V wird der entsprechende Volumenstrom nicht berücksichtigt. Der so definierte Barrierenstrom I_B wird vom Volumenstrom bei 1V und damit von dem Kennlinienverlauf abhängen. Die Zunahme der Kennliniensteigerung innerhalb einer Charge (Abb. 4.3) könnte damit eine Ursache sein für den Anstieg der Barrierenströme innerhalb einer Charge. Sehr deutlich tritt dies Verhalten bei den letzten vier Chargen auf, bei denen auch der Volumenstrom hohe Werte zeigt (Abb. 4.8a).

Bei der Herstellung der Detektoren wird eine Kombination der Planartechnologie mit der Technik der Oberflächensperrschicht benutzt. Es kann daher erwartet werden, daß die verschiedenen Prozeßschritte, die auf die Oberfläche eines Detektors einwirken, Einfluß haben auf die Oberflächensperrschicht und zu einem veränderten Barrierenstrom führen.

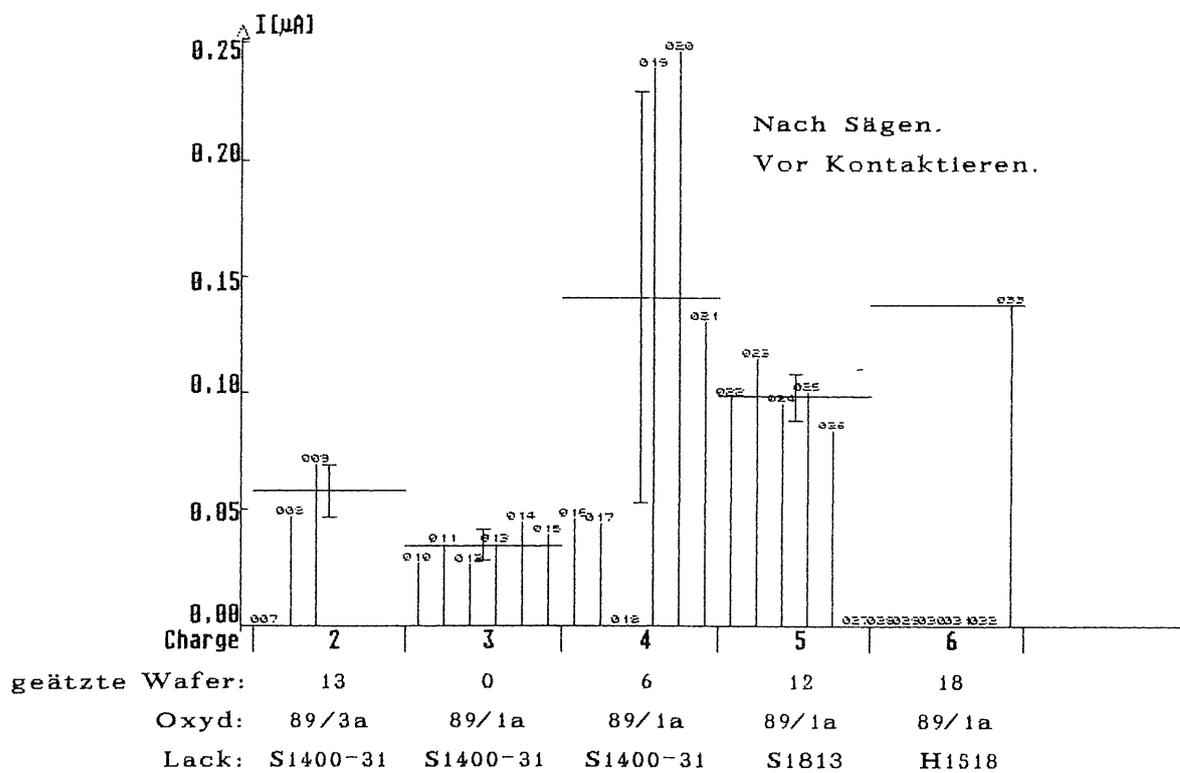
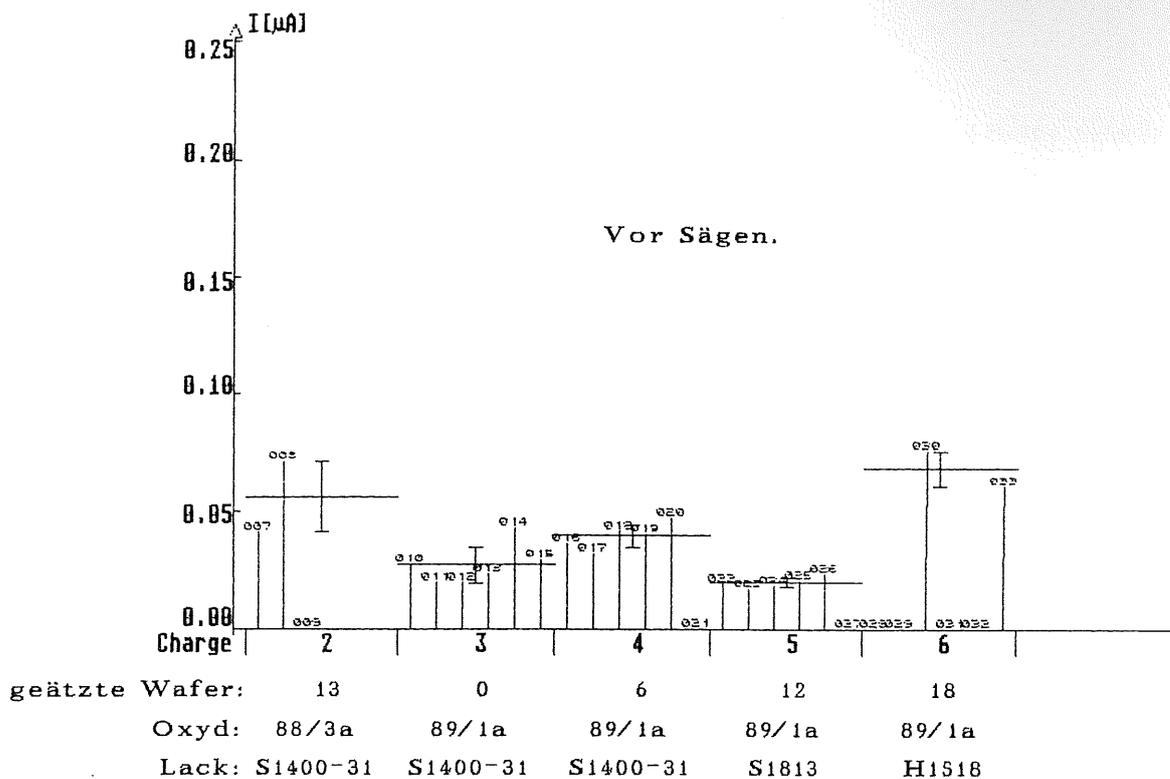


Abb.4.6: Darstellung von $I_B(T_0)$ letzter Messungen.

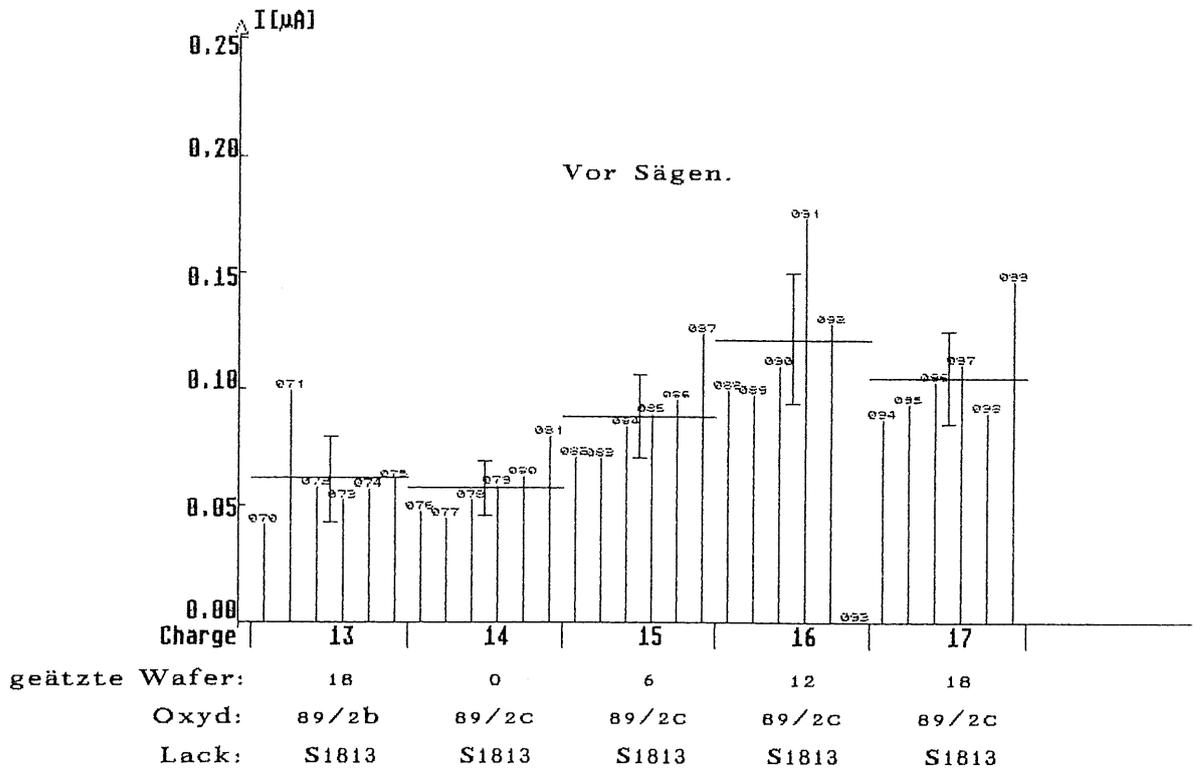
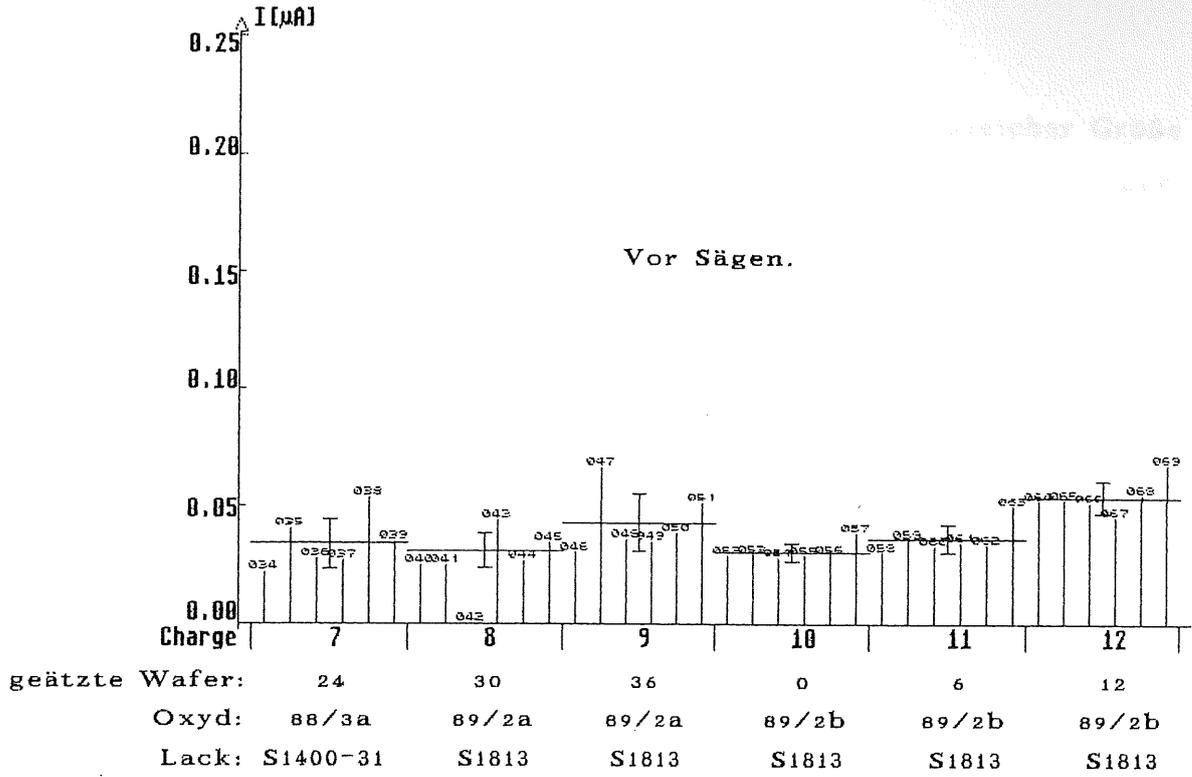


Abb.4.6a: Darstellung von $I_B(T_0)$ letzter Messungen.

b) Oxydströme $I_O(T_O)$

Die mittleren Oxydströme sind bei allen Chargen von etwa gleicher Größe und zeigen keine mögliche Abhängigkeit von dem "Alter" der Ätze und der Kombination Oxyd/Fotolack. Ein Vergleich der Chargen 2 und 7 mit den übrigen der Abbildungen 4.7 und 4.7a ergibt, daß das Oxyd 88/3a hierbei den besten Stromwert liefert.

Die für den Oxydstrom verantwortlichen Oberflächenzustände werden durch das Oxyd vor Einflüssen äußerer Behandlungen geschützt. Der Oxydstrom sollte damit unabhängig von den betrachteten Herstellungsparametern sein. Bei der Bestimmung des Oxydstromes nach Gl. (2.16) bleibt der Volumenstrom für die entsprechenden Spannungen unberücksichtigt (s. Kapitel 5). Je steiler die Kennlinie verläuft, um so größer wird der Einfluß des Volumenstromes sein und der Oxydstrom entsprechend höher ausfallen. Der steilerwerdende Kennlinienverlauf innerhalb einer Charge (Abb.4.3) kann hier in einer Zunahme der Ströme beobachtet werden.

Die Abbildung 4.7 zeigt, daß sich nach dem Sägen der Detektoren keine auffälligen Veränderungen der Verhältnisse einstellen. Auch hier wird weiterhin ein Ansteigen der Ströme innerhalb einer Charge beobachtet.

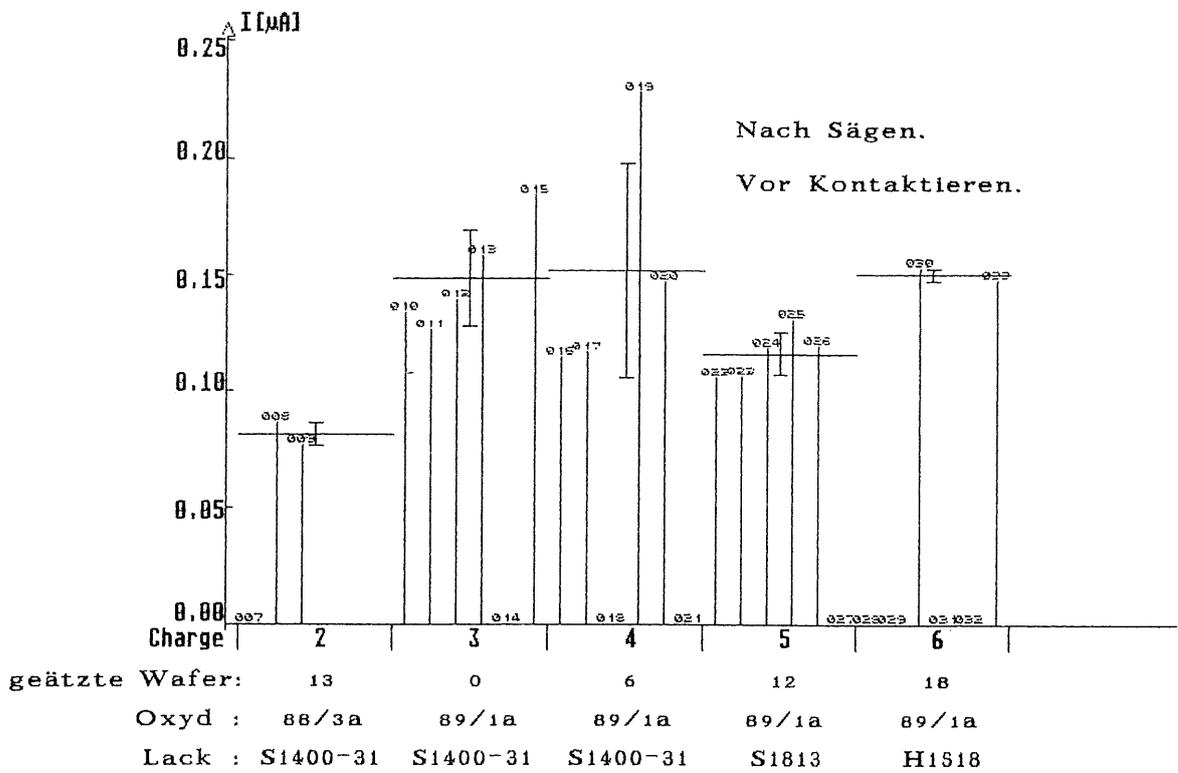
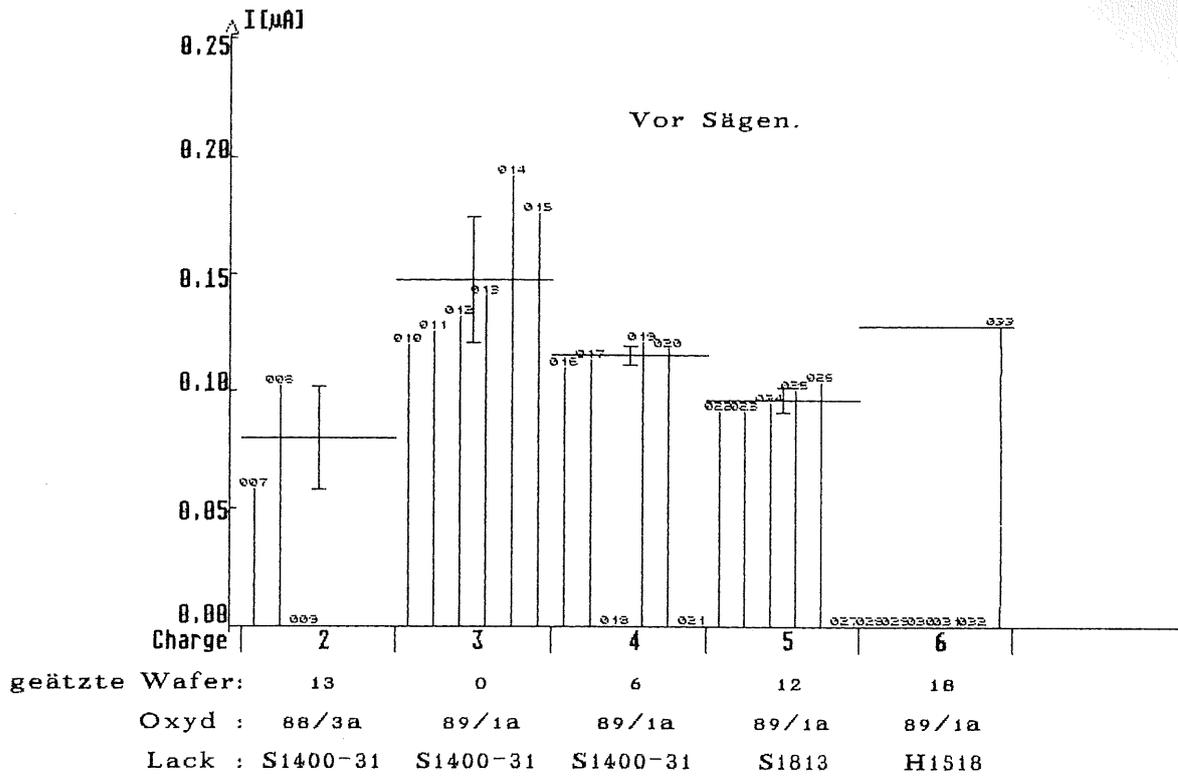


Abb.4.7: Darstellung von $I_0(T_0)$ letzter Messungen.

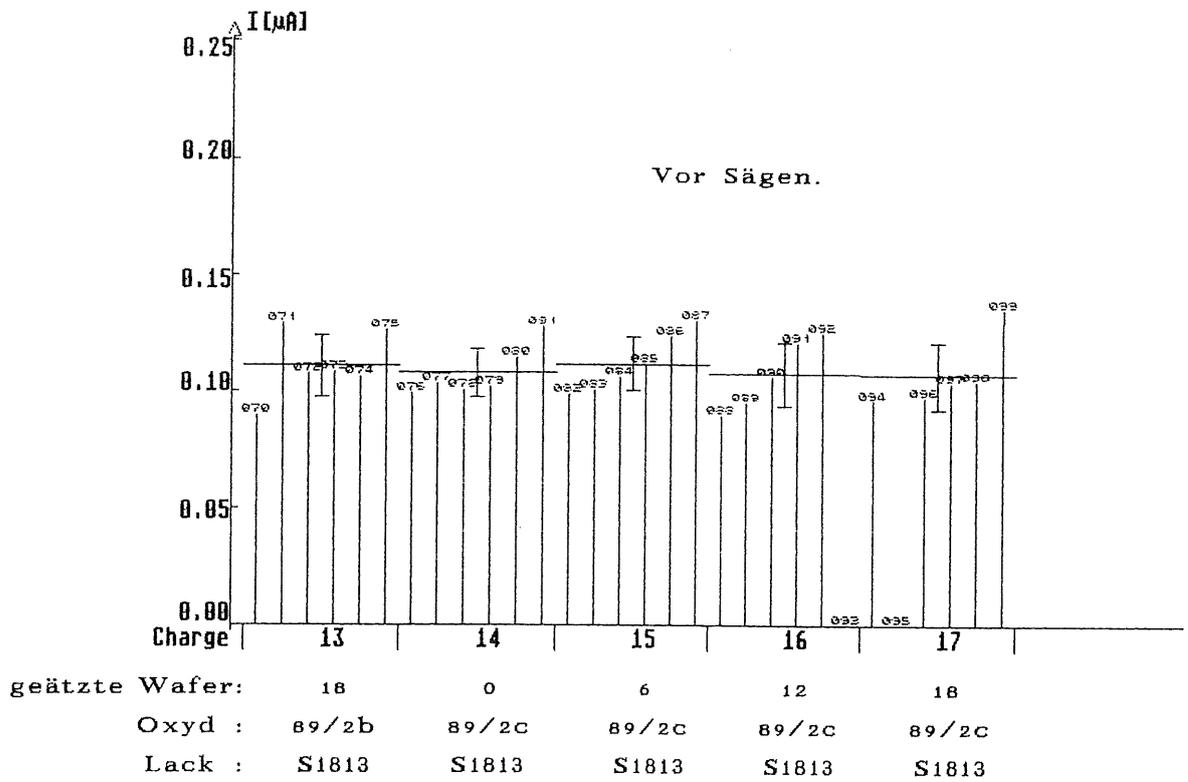
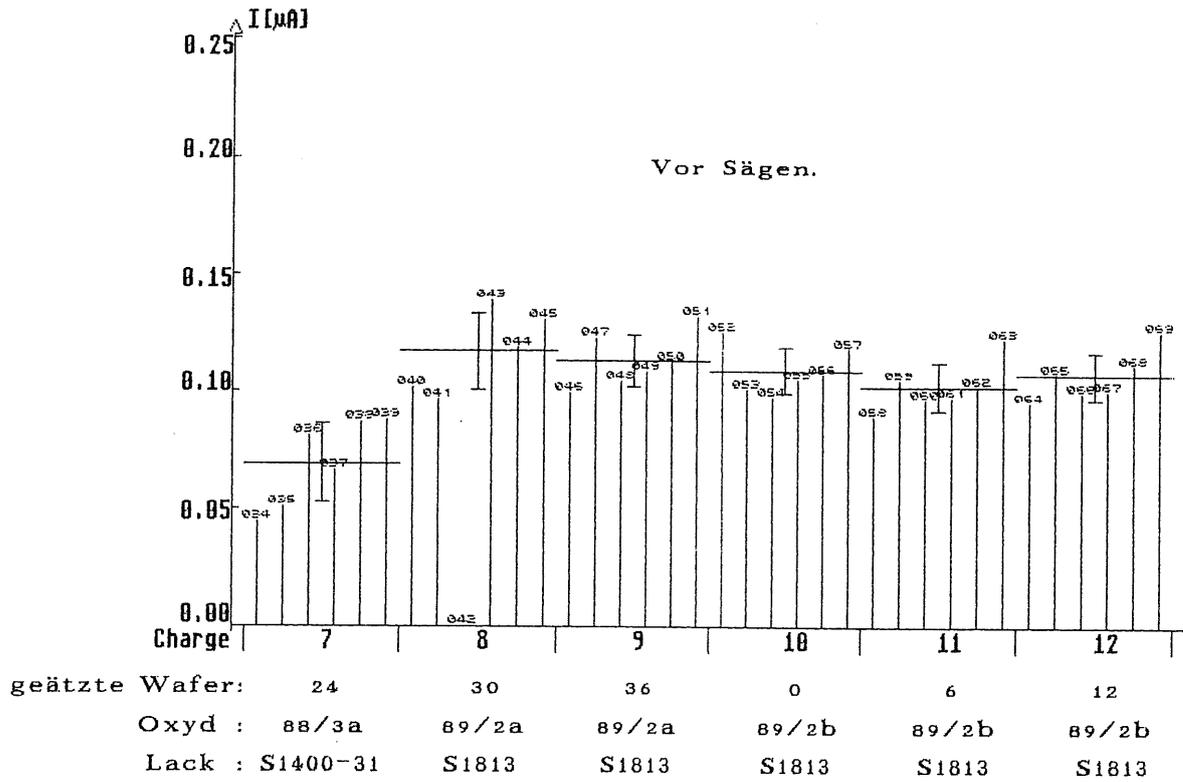


Abb.4.7a: Darstellung von $I_0(T_0)$ letzter Messungen.

c) Volumenströme $I_V(T_0)$

Bei den Volumenströmen zeigt sich in den Abbildungen 4.8 und 4.8a bis zur Charge 13 keine auffallenden Abhängigkeiten von den aufgeführten Herstellungsparametern. Bis zu dieser Charge sind die mittleren Ströme der Chargen 3 bis 5 in etwa gleich, während die der Chargen 7 bis 13 um gut das Doppelte höher ausfallen und stärker voneinander abweichen. Die letzten vier Chargen zeigen bezüglich der Herstellungsparameter ein ähnliches Verhalten wie die Barrierenströme. Ab der Charge 7 kann auch hier wieder eine Zunahme des Stromes innerhalb einer Charge erkannt werden (außer Charge 8). Da der Volumenstrom proportional ist zu den Generations-Zentren im Volumen des Halbleiters, sollte seine Höhe von den äußeren Behandlungen unbeeinflusst bleiben. Das beobachtete Verhalten läßt vermuten, daß es eventuell eine Korrelation zwischen dem Barrieren- und Volumenstrom gibt. Oder aber ein noch unbekannter Effekt zu diesem Anstieg in den mittleren als auch den einzelnen Strömen der beiden Stromanteile führt.

Der Vergleich der Darstellungen in der Abbildung 4.8 ergibt, daß sich für diese Chargen nach dem Sägen der Dioden keine wesentlichen Änderungen in ihrem Stromverhalten zeigen.

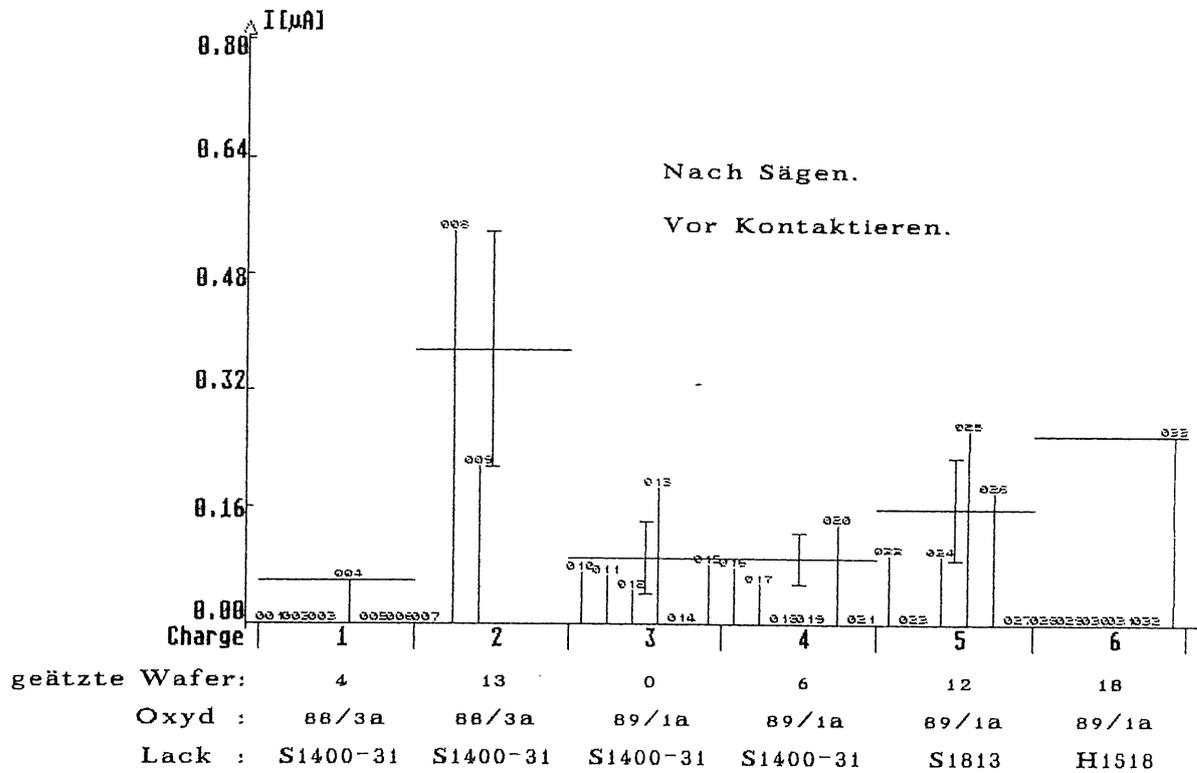
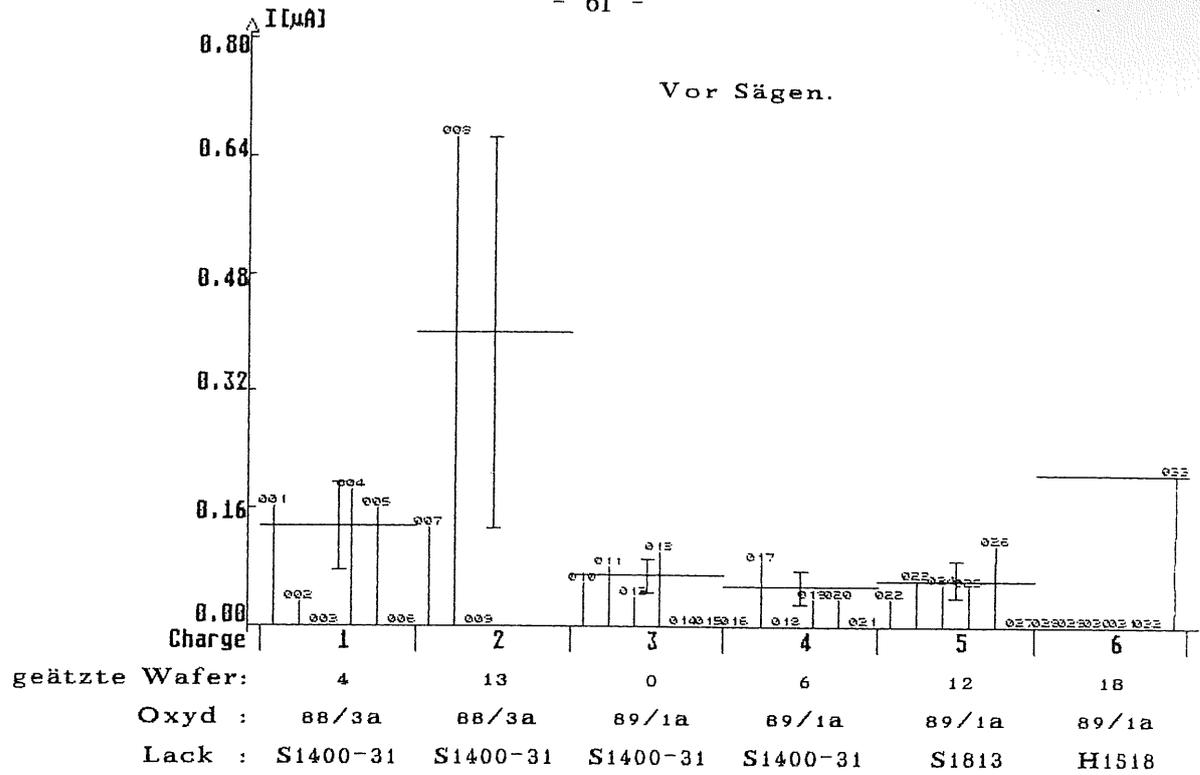


Abb.4.8: Darstellung von $I_V(T_0)$ letzter Messungen.

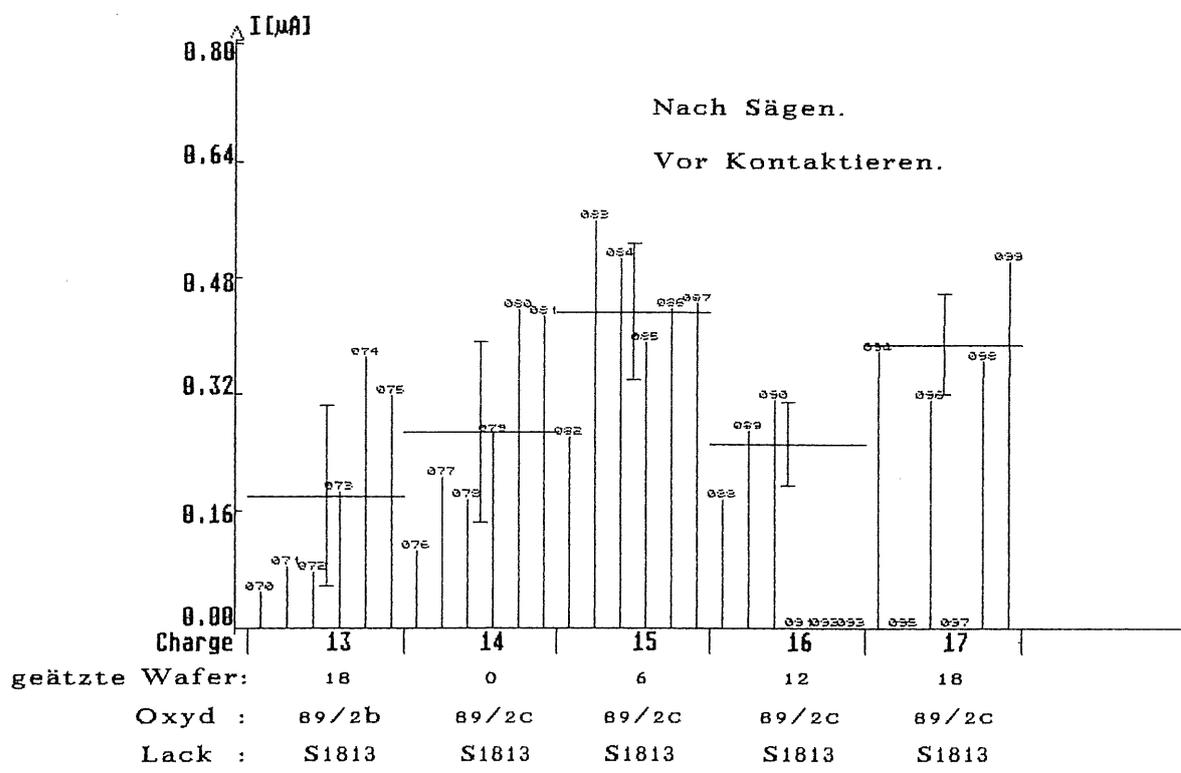
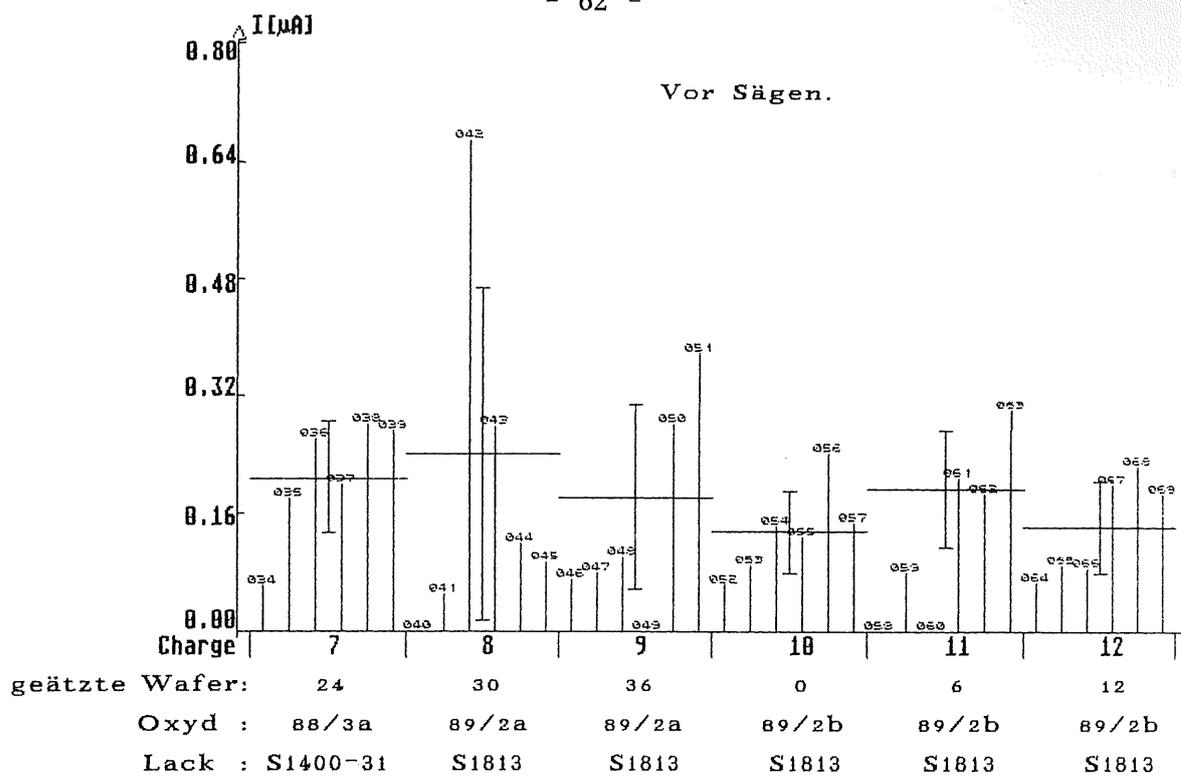


Abb.4.8a: Darstellung von $I_V(T_0)$ letzter Messungen.

5. Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die verschiedenen möglichen Abweichungen in den Ergebnissen des Abschnittes 4 diskutiert und Korrekturen angegeben.

5.1 Korrektur um den Volumenstrom

Bei der Bestimmung des Oxydstromes I_O ($I_O = I(5V) - I(1V)$) und der Festlegung des Barrierenstromes I_B als der Meßwert bei 1V $I(1V)$, blieben die bei diesen Spannungen existierenden Volumenströme unberücksichtigt. Bereits bei ein Volt angelegter Sperrspannung U_R bildet sich eine Sperrschicht aus, die ca. zehn Prozent der maximal erreichbaren darstellt ($U_d \approx 80V$). Bei fünf Volt ist sie bereits auf ein Viertel ausgedehnt.

Bevor aber die Abweichungen abgeschätzt werden, die dadurch in den Ergebnissen des Abschnitts 4 auftreten, wird geprüft, inwieweit der Volumenstrom I_V eine Spannungs-Abhängigkeit $U^{1/2}$ (s. Gl. 2.18 u. Gl. 2.4) zeigt. Wegen des ähnlichen Verhaltens der Barrieren- und Volumenströme bei den Herstellungsparametern wird zusätzlich untersucht, ob es eine Korrelation zwischen den beiden Strömen gibt (s. Abschnitt 4.3).

a) Spannungsabhängigkeit des Volumenstromes I_V :

Der Verlauf des Volumenstroms sollte in einer doppellogarithmischen Darstellung bei einer Spannungs-Abhängigkeit $U^{1/2}$ eine Gerade mit der Steigung 1/2 ergeben. In einem Spannungsbereich von 10- bis 80V ist der Anfangs- bzw. Endpunkt dieser Geraden durch den Volumenstrom bei 10V bzw. 80V gegeben (Abb. 5.1). Der Volumenstrom bei 80V ($U_{dep} \approx 80V$) wird mit Gl. (2.20) bestimmt und mit ihm der bei 10V :

$$I_V(10V) = \frac{I_V(80V)}{\sqrt{80}} \cdot \sqrt{10} \quad (5.1)$$

Die Volumenströme $I_V(U_R)$ für $10V < U_R < 80V$ werden mit den zugehörigen Meßwerten bestimmt:

$$I_V(U_R) = I_V(10V) + \underbrace{I_M(U_R) - I_M(10V)}_{\substack{\text{Volumenstrom zwischen} \\ 10V \text{ und } U_R.}} \quad (5.2)$$

I_M : Meßwert bei der Sperrspannung U_R .

In der Abb. 5.1 sind zwei Kennlinien einer Charge dargestellt, die sich in ihrem Kennlinienverlauf deutlich unterscheiden. Diese Wahl wurde getroffen, um zu klären, ob in beiden Fällen die Volumenströme eine Spannungs-Abhängigkeit $U^{1/2}$ zeigen bzw. wie stark sie davon abweichen. Die Messungen wurden ca. 4 Monate nach Fertigstellung der Detektoren durchgeführt. Zeiteffekte sollten damit ausgeschlossen sein. Die Abbildung 5.1 zeigt, daß sowohl bei der flachen als auch bei der steileren Kennlinie die Volumenströme in etwa proportional zu $U^{1/2}$ sind. Auffallend bei der Verteilung der 'Meßpunkte' um die Gerade ist die Sinusförmigkeit der einen bzw. das 'Durchhängen' der anderen. Bei einer reinen $U^{1/2}$ -Abhängigkeit wäre eine gleichmäßige Streuung der 'Meßwerte' um die Gerade erwartet worden.

Die Abb. 5.1a zeigt den Kennlinienverlauf nach dem Kontaktieren der Detektoren. Außerdem ist der Verlauf des Volumenstromes für den Detektor Q89076 dargestellt. Der Volumenstrom des Detektors Q89081 wurde wegen des frühen Anstiegs der Kennlinie (vor 80V) nicht betrachtet. Bis zu diesem Anstieg verläuft die Kennlinie aber deutlich flacher als vor dem Kontaktieren. Für den anderen Detektor zeigt sich eine Abweichung des Volumenstromes von der $U^{1/2}$ -Abhängigkeit, die mehr als doppelt so groß ist wie vor dem Kontaktieren. Dagegen sind seine Volumenströme bei 10V und 80V in etwa gleich geblieben. Auch hier tritt das schon oben erwähnte 'Durchhängen' der 'Meßpunkte' auf.

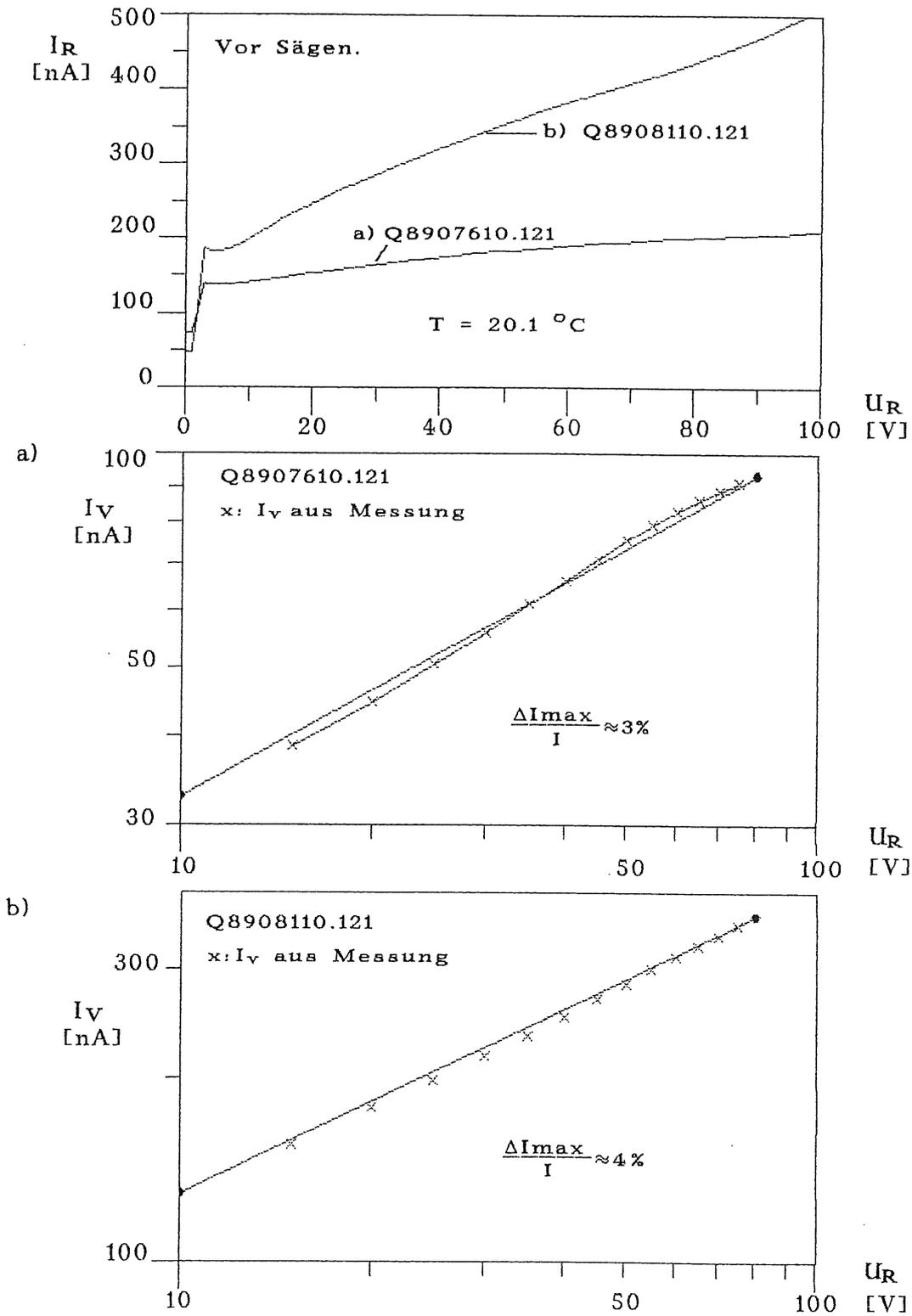


Abb.5.1: Vergleich gemessener Volumenströme mit theoretischem Verlauf des Volumenstromes $I_V \sim \sqrt{U}$. Vor dem Sägen.

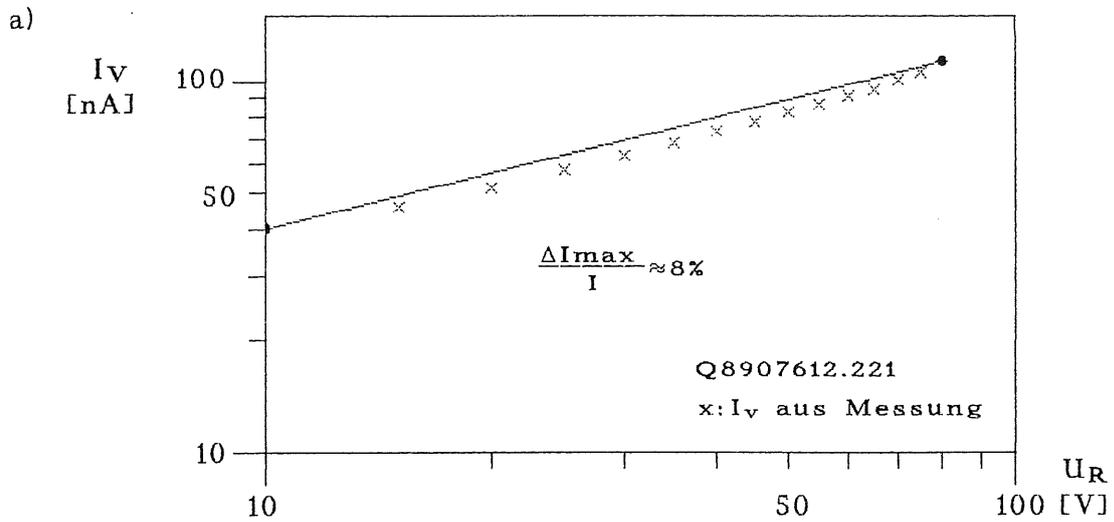
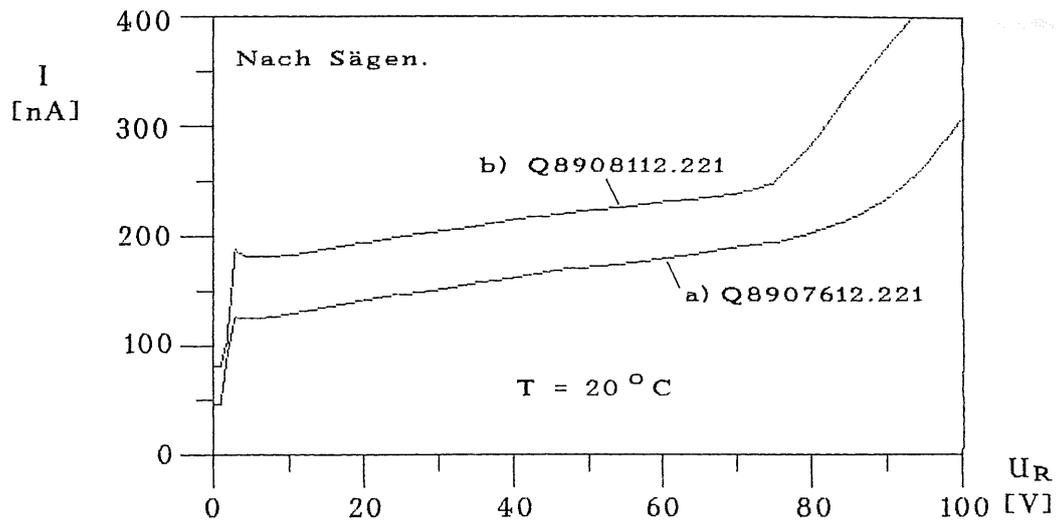


Abb.5.1a: Vergleich gemessener Volumenströme mit theoretischem Verlauf des Volumenstromes $I_V \sim \sqrt{U}$. Nach Sägen u. Kontaktieren.

Die Abbildungen 5.2 und 5.2a entsprechen den Abbildungen 5.1 und 5.1a. Hier sind jedoch zwei Detektoren gewählt worden, die vor dem Sägen sehr ähnliche, flache Kennlinien besitzen. Ihre Kennlinien nach dem Kontaktieren zeigt die Abb. 4.5. Bei diesen Detektoren zeigen sich aber schon vor dem Sägen erhebliche Abweichungen des Volumenstromes von der erwarteten $U^{1/2}$ -Abhängigkeit (Abb. 5.2). Nach dem Kontaktieren der Detektoren steigt die Abweichung für den Detektor Q89066 auf das Doppelte an, während sie für den anderen etwa gleich bleibt (Abb. 5.2a). Ein Vergleich der Detektoren zeigt, daß sie nach dem Kontaktieren einen ähnlichen Volumenstrom und fast die gleiche Abweichung des Volumenstromes von der $U^{1/2}$ -Abhängigkeit besitzen (Q89064: Vor Kontaktieren $\approx 60\text{nA}$, danach $\approx 40\text{nA}$; -066: Vor Kontakt. $\approx 80\text{nA}$, danach $\approx 50\text{nA}$; Abweichung: 17 bzw. 18%). Eine Ursache könnte damit in den niedrigen Volumenströmen bei 80V dieser Detektoren liegen. Eine Spannungsabhängigkeit des Barrieren- oder Oxydstromes würde sich dann stärker bemerkbar machen können (s. weiter unten). Die geringe Abweichung des Volumenstromes von der $U^{1/2}$ -Abhängigkeit für den Detektor Q89081 in der Abb. 5.1 würde sich dann durch seinen hohen Volumenstrom erklären lassen ($\approx 370\text{nA}$). Bei dem zweiten Detektor, dessen Volumenstrom vor dem Kontaktieren $\approx 90\text{nA}$ danach $\approx 114\text{nA}$ beträgt, könnte es sich um eine schwache Spannungsabhängigkeit des Barrieren- oder Oxydstromes handeln, die nach dem Kontaktieren zunimmt.

Eine spannungsabhängige Barrierenhöhe Φ_{Bn} , aber auch quantenmechanische Effekte an der Barriere, können zu einer Spannungsabhängigkeit im Barrierenstrom führen. Eine weitere laterale Ausdehnung der Sperrschicht unter das Oxyd mit zunehmender Spannung würde zu einem Anstieg im Oxydstrom führen (s. Abschnitt 2.6a und b). Eine Erhöhung der Spannung könnte aber auch dazu führen, daß sich Inversionsladungen unter dem Oxyd sammeln und dort Generationszentren 'neutralisieren'. Damit würde der Oxydstrom bei Erhöhung der Spannung abnehmen [10].

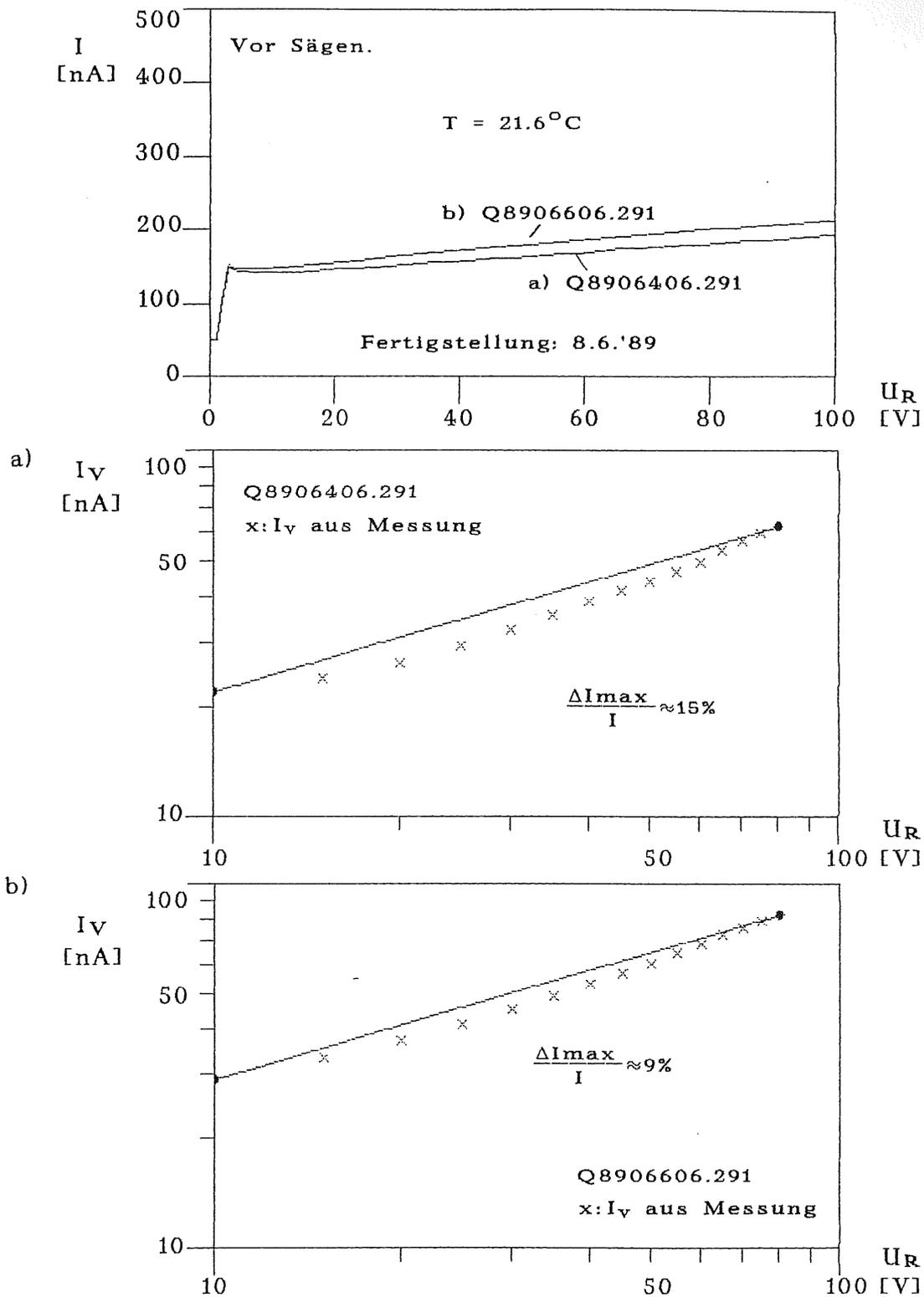


Abb.5.2: Vergleich gemessener Volumenströme mit theoretischem Verlauf des Volumenstromes $I_V \sim \sqrt{U}$. Vor Sägen.

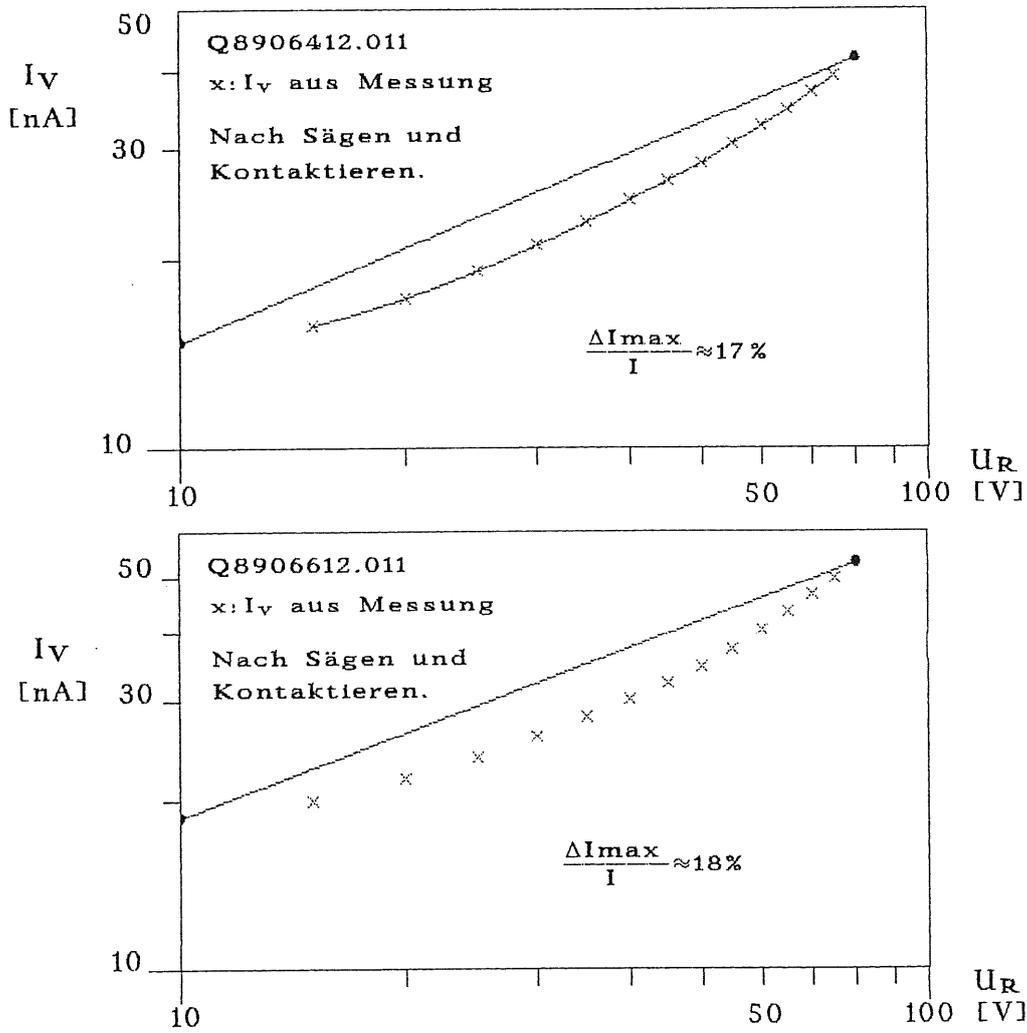


Abb. 5.2a: Vergleich gemessener Volumenströme mit theoretischem Verlauf des Volumenstromes $I_V \sim \sqrt{U}$. ≈ 4 Wochen n. Kontaktieren.

b) Korrelation zwischen Volumen- und Barrierenstrom:

Im Abschnitt 4 zeigte sich beim Vergleich der letzten 4 Chargen eine starke Ähnlichkeit im Verhalten der mittleren und einzelnen Volumen- bzw. Barrierenströme einer Charge mit den Herstellungsparametern (Abbildung 4.8a und 4.6a). Dies ließ auf eine Korrelation zwischen den beiden Strömen vermuten, die bei den letzten vier Chargen besonders stark aufgetreten sein könnte. Um dies zu untersuchen, wurden ab Charge 7 die Volumenströme gegen die zugehörigen Barrierenströme aufgetragen. Wegen des Kennlinienverhaltens innerhalb einer Charge vor dem Sägen (Abb. 4.2) werden außer der Auftragung aller Werte auch speziell ausgewählte dargestellt. Dies wurde gemacht, um zu untersuchen, ob es eine Korrelation zwischen den beiden Strömen bei solchen Detektoren gibt, die eine gleiche Position innerhalb einer Charge besitzen.

In den Darstellungen bezeichnet R den Korrelationkoeffizient .

Die in den folgenden Abbildungen benutzten Symbole bezeichnen dabei die folgenden Chargen:

Kreuz	: Charge 7
Kreis/- voll	: Charge 8 / Charge 9
Dreieck Spitze oben / - voll	: Charge 10 / Charge 11
Quadrat / - voll	: Charge 12 / Charge 13
Raute / - voll	: Charge 14 / Charge 15
Dreieck Spitze unten / - voll	: Charge 16 / Charge 17

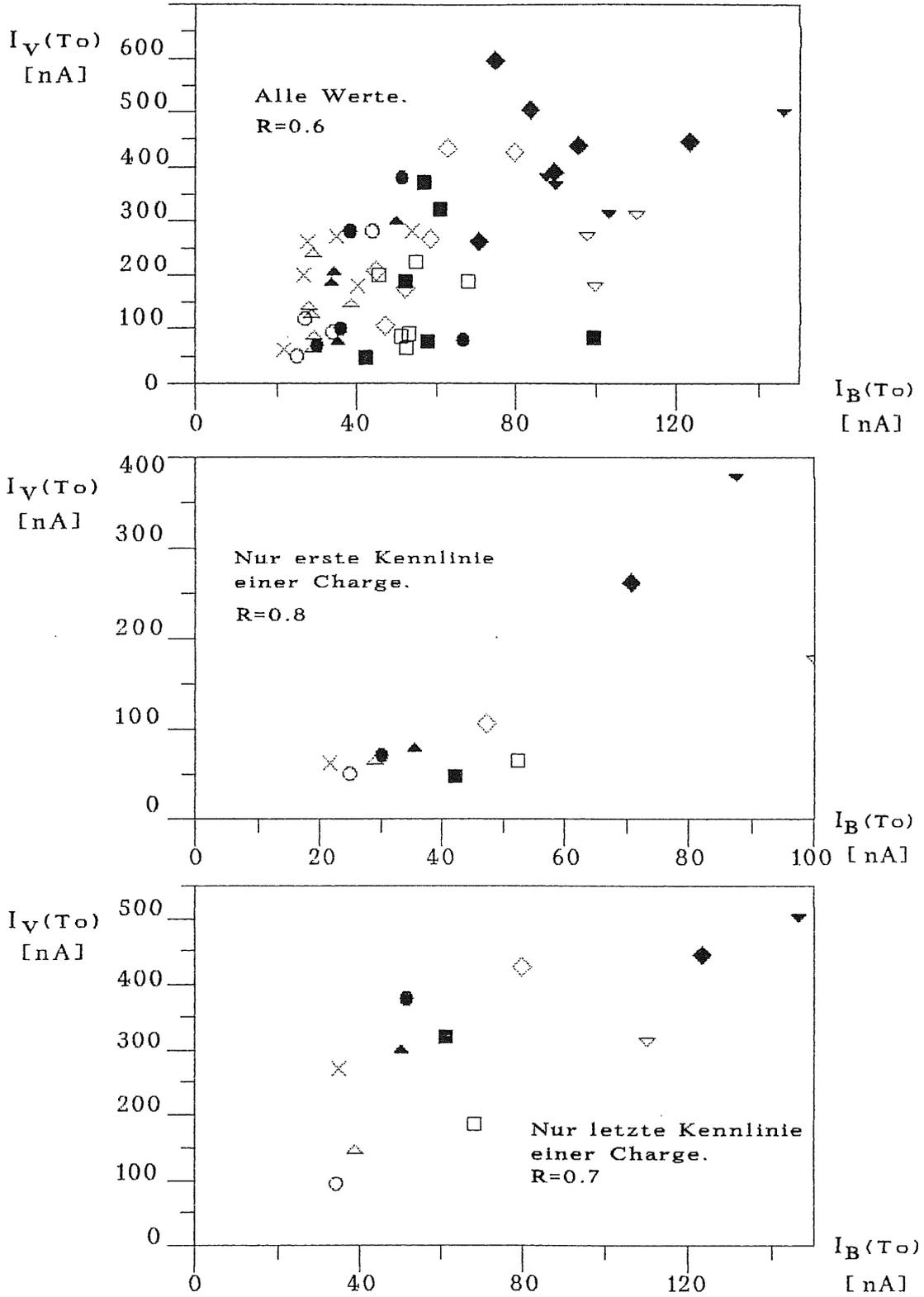


Abb.5.3: $I_V(T_0)$ gegen $I_B(T_0)$.

Den Abbildungen 5.3 kann keine eindeutige Korrelation zwischen dem Volumen- und Barrierenstrom angesehen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Barrierenströme in der Darstellung noch nicht um den Anteil des Volumenstroms korrigiert wurden. Da der Volumenstrom durch Generationszentren im Innern des Halbleiters hervorgerufen und der Barrierenstrom im wesentlichen durch die Barrierenhöhe Φ_{Bn} bestimmt wird, konnte dies Ergebnis erwartet werden (s. Abb. 5.6).

c) Korrektur von I_O und I_B durch den Volumenstrom :

Vor dem Sägen und Kontaktieren der Detektoren zeigt der Volumenstrom teilweise einen nahezu $U^{1/2}$ -Verlauf und keine erkennbare Korrelation zum Barrierenstrom. Als eine erste Näherung wird mit Gl. (2.20) ein Volumenstromanteil für den Barrieren- und Oxidstrom bestimmt. Für den korrigierten Barrierenstrom folgt :

$$I_B^k(T) = I_B(T) - \frac{I_V(80V,T)}{\sqrt{80}} \quad (5.3)$$

|
≈ Volumenstrom bei 1V

Aus Gl. (2.16) für den Oxidstrom ergibt sich:

$$I_O(T) = I_O^k(T) + (I_V(5V,T) - I_V(1V,T)) = I_O^k(T) + (\sqrt{5} - 1) \cdot I_V(1V,T)$$

$$I_O^k(T) = I_O(T) - 1.236 \cdot \frac{I_V(80V,T)}{\sqrt{80}} \quad (5.4)$$

|
Volumenstrom zwischen 1V und 5V.

Dabei wurde angenommen, daß $I_B(T)$ konstant bleibt und in Gl. (2.16) bei der Differenzbildung wegfällt.

Die mit Gl. (5.3) bzw. Gl. (5.4) korrigierten Stromanteile ergaben eine Abweichung von durchschnittlich 50% bei den Barrierenströmen bzw. 30% bei den Oxydströmen.

In der Abbildung 5.4 sind die über eine Charge gemittelten korrigierten und unkorrigierten Barrieren- bzw. Oxydströme gemeinsam dargestellt. Bei den Oxydströmen sind zusätzlich die verwendeten Oxyde angegeben.

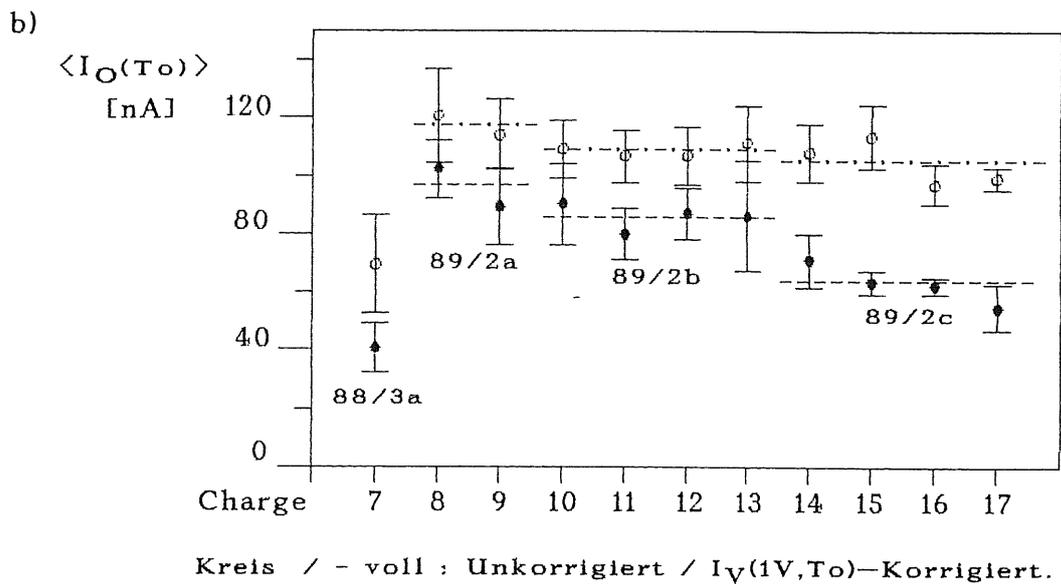
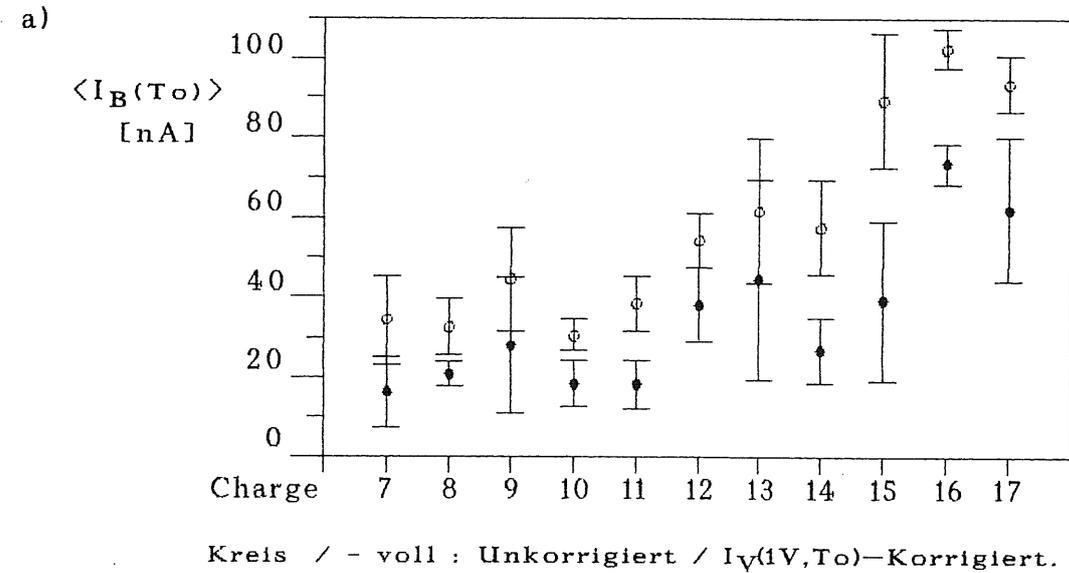


Abb.5.4: Mittelwerte der Barrierenströme $I_B(T_0)$ u. Oxydströme $I_O(T_0)$.

a) Barrierenströme .

b) Oxydströme.

Die Abbildung 5.4 zeigt für die korrigierten Barrierenströme das gleiche Verhalten, das bereits in der Abbildung 4.6a für die unkorrigierten festgestellt werden konnte. Bei den Oxydströmen dagegen können jetzt deutliche Unterschiede zwischen benutzten Oxyden festgestellt werden. Der bei den unkorrigierten Oxydströmen nur schwach ausgeprägte Trend zu abnehmenden Werten wird bei den korrigierten klar erkennbar (nach Charge 7).

Die Abhängigkeit des Barrierenstromes von den Herstellungsparametern ist verständlich, da bei der Herstellung eine Kombination der Planartechnologie mit der Oberflächensperrschichttechnik benutzt wird und jeder Prozeßschritt sich auf die sehr empfindlichen Oberflächen der Detektoren auswirkt (Abschnitt 2.1). Dagegen sind die für den Oxydstrom verantwortlichen Oberflächenzustände der Si-SiO₂-Grenzschicht durch das Oxyd gegen äußere Einflüsse gut geschützt (Abschnitt 2.6b), und der Oxydstrom sollte damit keine Abhängigkeit von den Herstellungsparametern zeigen.

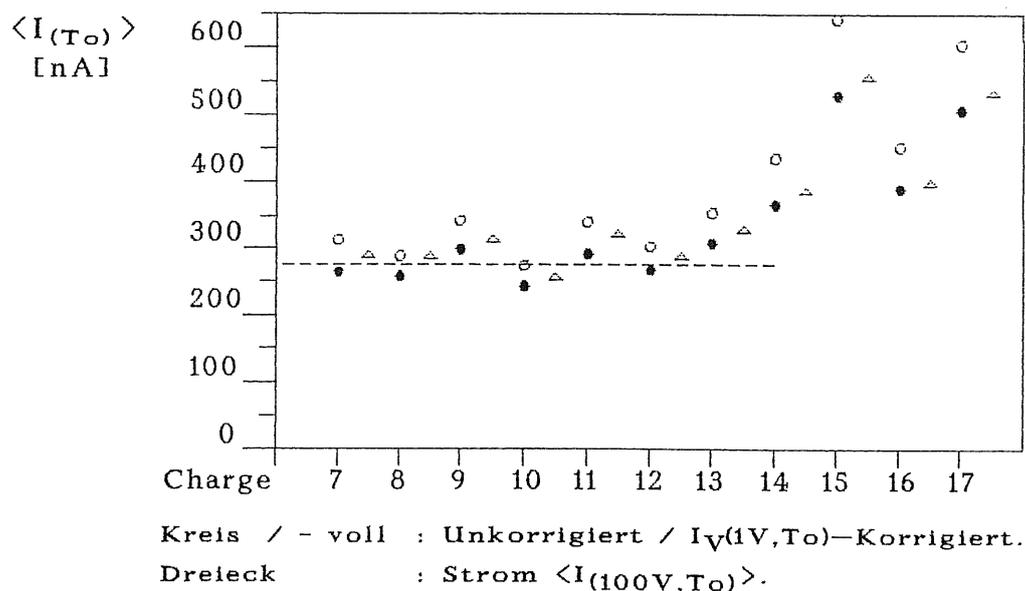


Abb.5.5: Mittelwerte der Stromanteile.

$\langle I(100V, T_0) \rangle$: Mittelwert der auf $T_0=295K$ umgerechneten Meßwerte bei 100V.

In der Abbildung 5.5 sind die Summen der korrigierten und unkorrigierten Stromanteile aufgetragen. Zum Vergleich wurden daneben jeweils die über eine Charge gemittelten Stromwerte bei 100V eingezeichnet. Man erkennt, daß alle Summen der korrigierten Stromanteile kleiner bleiben als die Werte bei 100V. Bis zur Charge 13 liegen die Summen der korrigierten Stromanteile im Durchschnitt bei 280 nA. Danach tritt eine deutliche Verschlechterung auf.

In der Abbildung 5.6 sind die gleichen Auftragungen wie in der Abbildung 5.3 dargestellt, aber jetzt mit den um den Volumenstrom korrigierten Werten. Ein Vergleich der beiden Abbildungen zeigt eine Abnahme der Korrelation zwischen den aufgetragenen Stromanteilen, die sich auch in dem angegebenen Korrelationskoeffizienten R widerspiegelt.

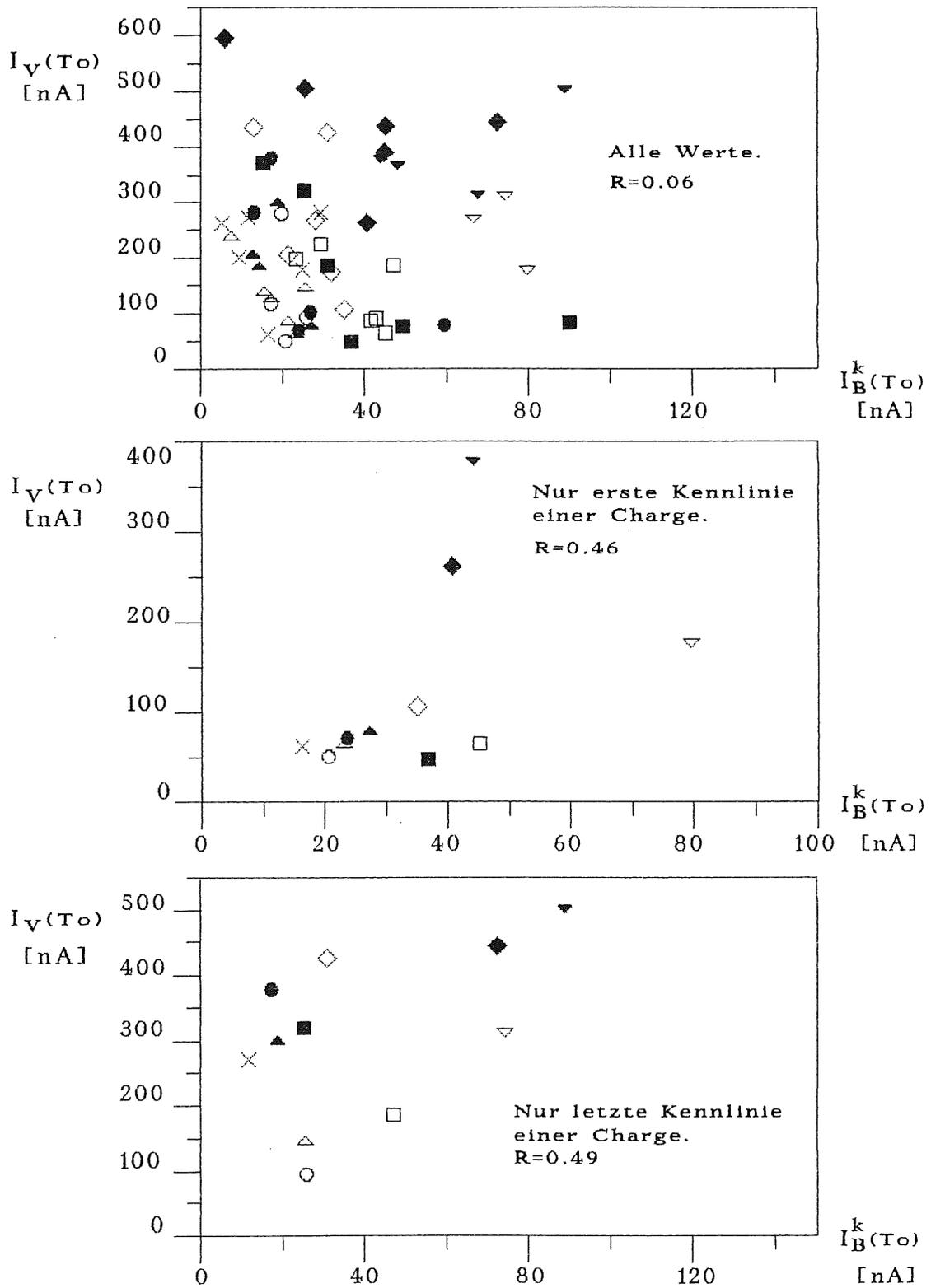


Abb.5.6: $I_V(T_0)$ gegen $I_B^k(T_0)$.

5.2 Einfluß der Temperatur T auf $I_B(T_0)$, $I_O(T_0)$, $I_V(T_0)$

Zur Temperaturmessung wurde ein Sekunden-Thermometer benutzt, dessen Genauigkeit mit ± 0.2 °C vom Hersteller angegeben wird. Es sei darauf hingewiesen, daß ein längeres Aufhalten in der Nähe des Thermometers zu einer erhöhten Anzeige in der Temperatur führt. Es wurden Unterschiede von 0.1 °C zwischen Beginn und Ende einer Messung beobachtet.

In (2.13), (2.15) und (2.19) ist damit die Temperatur T zu ersetzen durch $T = T_r + \Delta T$. Hierbei bezeichnet T_r die reale Temperatur und ΔT die Abweichung von ihr. Für den Barrierenstrom $I_B(T_0)$ ergibt sich damit:

$$I_B(T_0) = \left(\frac{T_0}{T_r} \right)^2 \cdot \left(\frac{T_r}{T_r + \Delta T} \right)^2 \cdot \exp\left(\frac{q\Phi_{Bn}}{k} \cdot \left[\frac{T_0 - T_r - \Delta T}{T_0(T_r + \Delta T)} \right] \right) \cdot I_B(T) \quad (5.5)$$

Mit der Vernachlässigung von $T_0 \cdot \Delta T \ll T_0 \cdot T_r$ führt (5.5) auf

$$\frac{I_B(T_0)}{I_B(T)} \approx \left(\frac{T_0}{T_r} \right)^2 \cdot \exp\left(\frac{q\Phi_{Bn}}{k} \cdot \left[1/T_r - 1/T_0 \right] \right) \cdot \left(\frac{T_r}{T_r + \Delta T} \right)^2 \cdot \exp\left(- \frac{q\Phi_{Bn}}{k} \cdot \frac{\Delta T}{T_0 T_r} \right) \quad (5.5a)$$

Für die beiden anderen Stromanteile gilt die gleiche Herleitung:

$$\frac{I_A(T_0)}{I_A(T)} \approx \left(\frac{T_0}{T_r} \right)^3 \cdot \exp\left(\frac{1.21 \text{ eV}}{2k} \cdot \left[1/T_r - 1/T_0 \right] \right) \cdot \left(\frac{T_r}{T_r + \Delta T} \right)^3 \cdot \exp\left(- \frac{1.21 \text{ eV}}{2k} \cdot \frac{\Delta T}{T_0 T_r} \right) \quad (5.6)$$

Mit I_A : Jeweiliger Stromanteil, I_O bzw. I_V .

Der Fehler für den Barrierenstrom $I_B(T_0)$ ergibt sich damit bei:

$$\Delta T = \pm 0.2 \text{ K} \quad \text{zu} \quad \pm 3\% \quad \text{für } T = 273 \text{ K bis } 305 \text{ K} ,$$

$$\Delta T = \pm 1.0 \text{ K} \quad \text{zu} \quad \pm 12\% \quad \text{für } T = 295 \text{ K bis } 302 \text{ K} .$$

Für den Oxydstrom $I_O(T_0)$ bzw. Volumenstrom $I_V(T_0)$ folgt ein Fehler bei:

$$\Delta T = \pm 0.2 \text{ K} \quad \text{zu} \quad \pm 2\% \quad \text{für } T = 273 \text{ K bis } 305 \text{ K} ,$$

$$\Delta T = \pm 1.0 \text{ K} \quad \text{zu} \quad \pm 9\% \quad \text{für } T = 295 \text{ K bis } 302 \text{ K} .$$

5.3 Einfluß einer gewählten Barrierenhöhe Φ_B^0 auf $I_B(T_0)$ und Abschätzung von $\Delta\Phi_B$

Zur Berechnung des Barrierenstromes $I_B(T_0)$ wurde in Gl. (2.13) für Φ_{Bn} der Wert $\Phi_B^0 = 0.87V$ aus der Staatsexamensarbeit von S. Zindel [12] angesetzt und ist hier nur eine Schätzung für Φ_{Bn} . Damit ergibt sich bei Temperatur-Korrektur eine Abweichung im Barrierenstrom, die von der Differenz ($\Phi_{Bn} - \Phi_B^0$) abhängt. Zur Bestimmung dieser Abweichung wurde angenommen, daß eine Änderung im Barrierenstrom durch eine Änderung der Barrierenhöhe Φ_{Bn} (kurz Φ_B genannt) verursacht wird. Damit kann Φ_B ausgedrückt werden durch:

$$\Phi_B = \Phi_B^0 + \Delta\Phi_B \quad (5.7)$$

Einsetzen von (5.7) für Φ_{Bn} in (2.13) führt auf:

$$I_B(T_0) = \underbrace{I_B(\Phi_B, T) \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \cdot \exp\left(\frac{q\Phi_B^0}{k} \cdot [1/T - 1/T_0]\right)}_{:= I_B(\Phi_B^0, T_0)} \cdot \underbrace{\exp\left(\frac{q\Delta\Phi_B^0}{k} [1/T - 1/T_0]\right)}_{\text{Korrektur-Term}} \quad (5.8)$$

Damit ergibt sich für das Verhältnis:

$$\frac{I_B(\Phi_B^0, T_0)}{I_B(\Phi_B, T_0)} = \exp\left(-\frac{q\Delta\Phi_B^0}{k} [1/T - 1/T_0]\right) \quad (5.8a)$$

In der Abbildung 5.6 ist das Verhältnis (5.8a) gegen $\Delta\Phi_B^0$ aufgetragen.

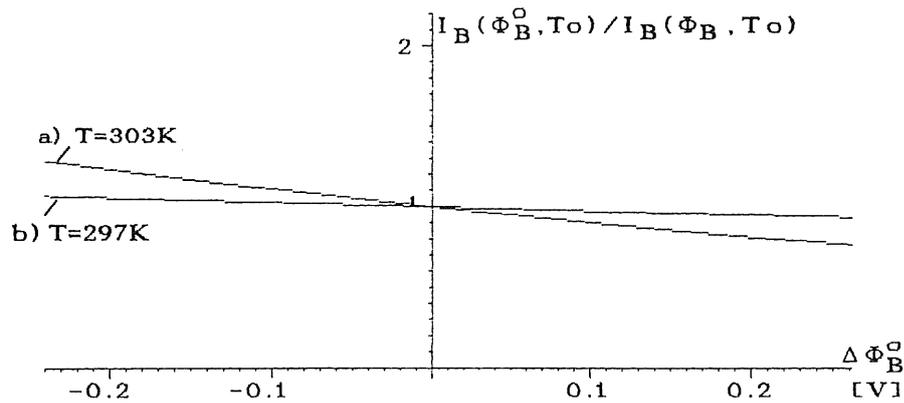


Abb.5.7: Abweichung des Barrierenstromes $I_B(T_0)$ durch ein $\Delta \Phi_B^0$.

a) Fehler bei $\Delta \Phi_B^0 = -0.2V, -0.02V$: 23% bzw. 2%.

b) Fehler bei $\Delta \Phi_B^0 = -0.2V, -0.02V$: 5% bzw. 1%.

Die obige Darstellung zeigt, daß selbst bei hohen Temperaturen (303K) und einer Abweichung der Barrierenhöhe Φ_B um $\Delta \Phi_B^0 = \pm 0.02$ V die Abweichung des Barrierenstroms $I_B(T_0)$ bei 2% liegt. Bei Temperaturen nahe T_0 liegt die Abweichung selbst bei einem $\Delta \Phi_B^0 = \pm 0.2$ V bei nur einigen Prozent. (Eine Änderung der Barriere Φ_B um ± 0.02 V würde eine 50 bzw. 100 %-ige Änderung des Barrierenstromes zur Folge haben.) Da nur selten bei hohen Temperaturen gemessen wurde und Literaturwerte für Φ_B (z.B. [15]) von ähnlicher Größe sind wie das gewählte Φ_B^0 , sollten die normierten Werte durch eine Abweichung $\Delta \Phi_B^0$ im wesentlichen unberührt bleiben. Ein Vergleich der normierten Werte aus zwei Messungen der Detektoren Q89076 bis -081, die bei den Temperaturen 20.3 bzw. 26.4 °C durchgeführt wurden, ergab für die Werte eine mittlere Abweichung von $\approx 14\%$. Da die Oberfläche extrem empfindlich gegen äußere Einflüsse ist, können weitere Prozeßschritte , oder auch Messungen, die Oberfläche verunreinigen. Dadurch kommt es zu einer Änderung der Barrierenhöhe Φ_B und damit des Barrierenstromes, so daß die Abweichung von $\approx 14\%$ wahrscheinlich kleiner ist.

Damit ergibt sich die Möglichkeit, mit Hilfe der normierten Barrierenströme $I_B(T_0)$ die Änderung $\Delta\Phi_B$ in der Barrierenhöhe Φ_B zwischen zwei Messungen abzuschätzen. Mit Gl. (2.12) folgt:

$$I_B(\Phi_{B1}, T_0) = I_B(\Phi_{B2}, T_0) \cdot \exp\left(-\frac{q\Delta\Phi_B}{kT_0}\right) \quad (5.9).$$

Mit dem allgemeineren Ausdruck für (5.7):

$$\Phi_{B1} = \Phi_{B2} + \Delta\Phi_B \quad (5.10).$$

Für $\Delta\Phi_B$ erhält man damit:

$$\Delta\Phi_B = \frac{kT_0}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_B(\Phi_{B2}, T_0)}{I_B(\Phi_{B1}, T_0)}\right) \quad (5.9a)$$

Die Stromwerte $I_B(T_0)$ besitzen wegen der Vernachlässigung von $\Delta\Phi_B^0$ in Gl. (2.13) die in der Abb. 5.1 angegebenen Fehler. Damit kann (5.9a) lediglich die Größenordnung von $\Delta\Phi_B$ liefern. Für die Detektoren Q89038 bis -040 wurde $\Delta\Phi_B$ aus den ersten fünf Messungen nach der Herstellung bestimmt. Für die ersten beiden Messungen (1. Messung ≈ 4 Tage bzw. 1 Tag -, 2. Messung ≈ 9 bzw. 4 Tage nach Herstellung) der Detektoren Q89039 und Q89040 ergab sich ein Wert für $\Delta\Phi_B$ von -16 bzw. -19 mV. Für den Detektor Q89038 ergab sich aus den beiden ersten Messungen (Zeitabstände der Messungen wie bei Detektor Q89039) annähernd keine Änderung der Barriere. Bei späteren Messungen lagen die Werte für $\Delta\Phi_B$ bei den betrachteten Detektoren in der Größe plus/minus einige mV.

Die hohen negativen Werte für $\Delta\Phi_B$ aus den beiden ersten Messungen der Detektoren Q89039 und -040 und der damit verbundenen Ausbildung der Barrierenhöhe Φ_B , zeigen die Entwicklung ihrer Oberflächensperrschicht. Die beiden Detektoren Q89038 und -039 gehören derselben Charge an und sind in gleichen Zeitabständen gemessen worden. Ihre unterschiedlichen

Werte für $\Delta\Phi_B$ zeigen, daß die zeitliche Entwicklung der Barriere für den ersten Detektor kürzer ausfiel als für den zweiten. Dies könnte auf eine Verunreinigung der Oberfläche des zweiten Detektors zurückgeführt werden. Ist die zeitliche Entwicklung der Barriere bzw. Oberflächensperrschicht abgeschlossen, bleibt sie im wesentlichen konstant (kleine $\Delta\Phi_B \approx$ einige mV). Die kleinen Schwankungen in der Barrierenhöhe können durch äußere Einflüsse wie z.B. eine Messung oder Änderungen in der umgebenden Atmosphäre bewirkt werden und zeigen die Empfindlichkeit der Oberfläche für äußere Einflüsse.

5.4 Einfluß eines spannungsabhängigen Barrierenstromes auf I_Q und I_V

Eine Abschätzung des Barrierenstromes $I_B(T_0)$ nach Gl. (2.12) und den dort angegebenen Werten für A^{**} und Φ_{Bn} liefert einen Wert, der um einen Faktor zehn größer ausfällt als die typischerweise gemessenen Werte. Diese Diskrepanz allein mit der Barriere Φ_B erklären zu wollen, führt auf einen unrealistisch hohen Wert für die Barriere. Dies führt auf eine nähere Betrachtung der Größe A^{**} .

Um eine Abschätzung des Barrierenstromes $I_B(T_0)$ mit (2.12) geben zu können, wurde zunächst A^{**} mit (2.12a) abgeschätzt und folgende Beziehungen benutzt:

$$f \equiv f_D \cdot f_Q ,$$

Gl. (2.10) für v_R und seinem Wert bei 300K:

$$v_R \approx 5.2 \cdot 10^5 \cdot (T/300)^2, \quad T \text{ in Kelvin.}$$

$$v_D \approx \mu \mathcal{E}_m, \quad \text{mit Gl. (2.6) für } \mathcal{E}_m \text{ und } w \approx d \cdot \frac{\sqrt{U_R + U_k}}{\sqrt{U_d + U_k}},$$

$d =$ maximale Sperrschichtweite $\approx 0.04 \text{ cm}$,

$U_R, U_k:$ Sperr- bzw. Kontakt-Spannung in Volt,

$U_d:$ Spannung bei vollständiger Verarmung in Volt ≈ 80

$\mu = 1.3 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, Elektronen-Beweglichkeit [16].

Einsetzen der Werte für $A^* = 258 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^2$, $T = 295\text{K}$, $U_R = 1\text{V}$, $U_k = 0.45\text{V}$, $f = 0.5$ in (5.13) ergibt:

$$A^{**} \approx 100 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^2 \quad (5.11).$$

Die Werte für A^* und U_k sind hier der Arbeit von S. Zindel [12] entnommen worden .

Mit (5.11), 23.5 cm^2 als Fensterfläche und einer Barriere $\Phi_B^0 = 0.87\text{V}$ ergibt sich aus Gl. (2.12) ein Barrierenstrom bei T_0 :

$$I_B(T_0) \approx 282 \text{ nA} \quad (5.12).$$

Damit weicht (5.12) von den beobachteten Strömen, die in der Größe ≈ 20 bis 40 nA liegen (Abb. 5.4), erheblich ab. Eine Barriere Φ_B , die Ströme der beobachteten Größe liefert, müßte mit (5.11) einen Wert von $\approx 0.94\text{V}$ besitzen. Die in der Literatur gegebenen Werte für die Barriere Φ_B liegen alle unter 0.87V . Von Crowell und Sze [15] wird eine kapazitiv gemessene Si-Au-Barriere $\Phi_B \approx 0.85 \text{ V}$ angegeben.

Die Größe von A^{**} , und damit der Barrierenstrom I_B , hängt nach Gl. (2.12a) zusätzlich von den beiden Parametern f_p und f_Q ab. Zu diesen Parametern werden von Crowell and Sze [15] für eine Temperatur $T = 300\text{K}$ und einem Feldstärkenbereich von 10^3 bis 10^4 V/cm Änderungen für f_p von $\approx 0.78 - 0.93$ und für f_Q von $\approx 0.7 - 0.58$ angegeben. Mit diesen Werten ergibt sich das Produkt f der beiden zu einem mittleren Wert von ≈ 0.5 in dem angegebenen Feldstärkenbereich. Es kann aber zu einer Abnahme von f_Q , und damit in A^{**} , bis zu einer Größenordnung kommen, wenn in der Bandlücke des Siliziums am Metall-Silizium-Interface eine hohe Dichte an Oberflächenzuständen existiert ($\approx 10^{13} \text{ Zustände/cm}^2 \cdot \text{eV}$) und die Interface-Dicke $\lambda_i \approx 45 \text{ \AA}$ beträgt [15].

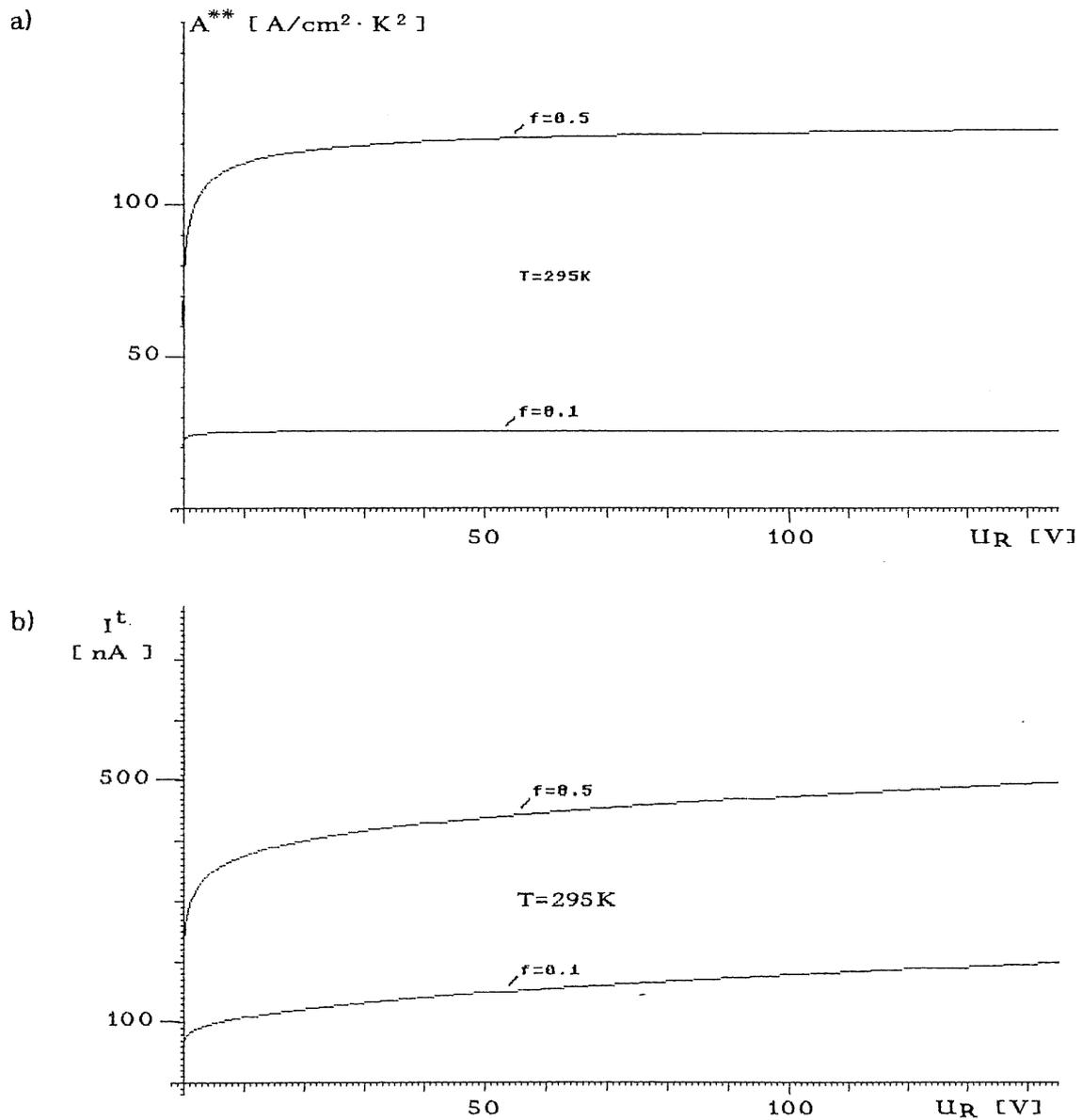


Abb.5.8: a) Darstellung von A^{**} als Funktion von U_R mit $f=f_Q \cdot f_P$ als Parameter.

b) Stromverlauf $I^t = I_B^t + I_V^t$ mit den Werten A^{**} aus a) für I_B^t . Für I_V^t wurde $I_V^t = (10 \cdot \sqrt{U_R + U_k}) \cdot nA$ angenommen. Der Oxydstrom I_O ist hier nicht berücksichtigt.

Für eine einfache Abschätzung des Stromverlaufes mit einem spannungsabhängigen A^{**} (und damit einem spannungsabhängigen Barrierenstrom), wird für den Volumenstrom nach Gl. (2.18) angenommen, daß die Sperrschichtweite W nach Gl. (2.4) die einzige Größe darstellt, die mit der Spannung variiert. Für I_V^t wird vereinfacht angesetzt :

$$I_V^t(U_R) = \text{const} \cdot \sqrt{U_R + U_k} \quad (5.13).$$

U_R, U_k : in Volt, s. oben.

Die Konstante in Gl. (5.13) wird angenommen als der Wert des Volumenstromes bei 1V (s. Gl. 5.3). Bei gemessenen Volumenströmen $I_V(80V) \approx 90\text{nA}$ erhält man für $I_V(1V) \approx 10\text{nA}$. Dieser Wert wird für die Konstante des Volumenstromes I_V^t gewählt. Der Oxydstrom I_O^t wird als konstant angenommen und in der Darstellung nicht berücksichtigt. Der Strom I^t setzt sich aus dem Barrierenstrom nach Gl. (2.12) und dem Volumenstrom I_V^t nach Gl. (5.13) zusammen. Für den Strom I^t ergibt sich :

$$I^t = I_B^t + I_V^t \quad (5.14).$$

In der Abbildung 5.8 ist der Verlauf für A^{**} mit der Spannung und der sich daraus ergebende Stromverlauf I^t dargestellt. Für ein $f_1 = 0.1$ wird A^{**} bereits nach $\approx 2V$ konstant, bei $f_2 = 0.5$ tritt dies erst bei $\approx 50V$ ein. Aus der einfachen Modellannahme, daß A^{**} spannungsunabhängig sei, kommt es zu einer Abweichung im Oxyd- und Volumenstrom I_O bzw. I_V , da bei deren Bestimmung von der Konstanz des Barrierenstromes I_B ausgegangen worden war.

I_O^t wird mit $\approx 100 \text{ nA}$ (s. Abb. 5.4) gewählt und auf die Stromwerte I^t addiert. I_O bzw. I_V werden nach Gl. (2.16) bzw. Gl. (2.20) aus den Stromwerten I^t bestimmt. Die so erhaltenen Werte werden mit dem berechneten $I_V^t(80V)$ bzw. dem gewählten I_O^t verglichen.

Für ein $f_2 = 0.5$ ergibt sich eine Abweichung von:

$$I_V^t / I_V \approx 0.68 \quad , \quad I_O^t / I_O \approx 0.5 .$$

Und für $f_2 = 0.1$:

$$I_V^t / I_V \approx 0.98 \quad , \quad I_O^t / I_O \approx 0.95 .$$

Um eine Abschätzung für A^{**} aus den Messungen zu bekommen, wurde dazu (2.12) umgestellt ($\exp(\dots)$ -Term fällt bei $-1V$ weg):

$$A^{**} = \exp(q\Phi_B/kT) \cdot I_B^k(T) / (F^2 \cdot T) \quad (5.15) .$$

Mit

$F \equiv$ Fläche des Fensters = 23.5 cm^2 ,

$I_B^k \equiv$ korrigierter Barrierenstrom.

Es ergeben sich bei einer Barrierenhöhe Φ_B^0 Werte für A^{**} , die zwischen 4 und $16 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^2$ liegen. Diese Werte ergeben sich für ein f , das kleiner als 0.1 ist, und die oben angegebenen Verhältnisse sollten damit näher an eins liegen als angegeben. Dies kann jedoch eine sehr grobe Schätzung sein und nur eine photoelektrische Messung der Barrierenhöhe Φ_{Bn} kann genauere Aussagen liefern.

6. Zusammenfassung

Um die Strom-Spannungs- und Kapazitäts-Spannungs-Messungen möglichst einfach und damit kurz zu gestalten, wurde in dem Aufbau des Meßplatzes ein PC eingeführt. Für die entwickelten Programme zur Aufnahme von I/V- und C/V-Kennlinien wurde eine Menü-Struktur gewählt. Sie unterstützt durch ihre übersichtliche und einfache Handhabung die Arbeit des Benutzers, so daß auch Personen, die weder mit dem Meßverfahren noch mit einem PC sonderlich vertraut sind, Kennlinienmessungen durchführen können. Der Meßplatz schafft damit die Voraussetzungen für routinemäßige Messungen einer großen Anzahl von Detektoren.

Zur Untersuchung der Detektoreigenschaften zeigten sich die in dieser Arbeit entwickelten Programme als eine arbeitserleichternde und zeitsparende Hilfe. Insbesondere das Programm zur Temperaturnormierung der Stromanteile ermöglicht es, aus einer großen Anzahl von bei unterschiedlichsten Betriebsbedingungen gemessenen Kennlinien in relativ kurzer Zeit Aussagen über das Verhalten der Detektoren zu erhalten, die einen umfassenden Vergleich gestatten. Eine Temperaturnormierung ist notwendig geworden, weil in einem unklimatisierten Raum Messungen zu unterschiedlichsten Temperaturen durchgeführt wurden und eine Temperaturerhöhung von 1 °C bereits eine Erhöhung von ca. 12% im Barrierenstrom und 9% im Volumen- und Oxydstrom bewirkt.

Ein Vergleich normierter Werte, die aus Messungen bei einer hohen und niedrigen Temperatur resultierten, zeigte eine gute Überstimmung. Die Abweichungen bei der Temperaturnormierung durch die Temperaturfehler liegen bei 2 bis 3%. Weiter Abweichungen durch eine geschätzte Barrierenhöhe Φ_B^0 oder einem spannungsabhängigen Barrierenstrom sind vernachlässigbar. Der weitaus größte Fehler im Barrieren- und Oxydstrom wird durch den Volumenstrom hervorgerufen. Er liegt bei durchschnittlich $\approx 30\%$ für den Oxyd- bzw. bei $\approx 50\%$ für den Barrierenstrom.

Nach der Fertigstellung wurden die Detektoren zunächst in einer Sauerstoffatmosphäre bei 0.4 bar gelagert. Vor einer Messung wurde der Drucktopf mit Luft geflutet und anschließend der erste Detektor gemessen. Die sechs Detektoren einer Charge wurden immer in der gleichen Reihenfolge gemessen. Dabei zeigte sich in dem Kennlinienverlauf der Detektoren einer Charge, daß fast immer die ersten drei Kennlinien flacher verlaufen als die letzten. Die Vermutung, daß der Kennlinienanstieg daran liegen könnte, daß die übrigen Detektoren länger der Luft ausgesetzt sind, bevor sie gemessen werden, konnte nicht bestätigt werden. Auch bei Detektoren, die in trockener Luft lagerten, zeigte sich kein Einfluß der Luft auf das beschriebene Kennlinienverhalten. Dies Kennlinienverhalten ist bisher ungeklärt.

Bei der Betrachtung der Stromanteile in Korrelation mit Herstellungsparametern, konnte eine Erhöhung der mittleren Ströme im Barrieren- und Volumenstrom mit dem "Alter" der verwendeten Ätze, die zum Öffnen der "Fenster" im Siliziumdioxid dient, festgestellt werden. Hierbei zeigte sich eine mögliche Abhängigkeit der benutzten Kombination Fotolack/Oxyd. Bei der Herstellung der Detektoren wird eine Kombination des Planarprozesses mit der Technik der Oberflächensperrschicht angewandt und es ist verständlich, daß Prozeßschritte, die sich entweder auf die für die Sperrschicht verantwortliche Si-Oberfläche ("Fenster") oder das Verhalten der SiO₂-Randzone (Passivierung) auswirken, von besonderer Bedeutung sind.

Bei allen Stromanteilen konnte ein Stromanstieg innerhalb einer Charge beobachtet werden. Dieser kann bei dem Oxydstrom daher kommen, daß zu seiner Bestimmung die Differenz der Ströme $I_{(5V)} - I_{(1V)}$ gebildet wird. Damit wird seine Größe abhängig von der Kennlinienform, die innerhalb einer Charge steiler wird (s. oben). Das gilt auch für den Barrierenstrom, der als der Meßwert bei einem 1V festgelegt wurde. Beide Ströme sind dabei um den Volumenstromanteil bei den entsprechenden Spannungen

noch nicht korrigiert worden (s. oben).

Das zeitliche Verhalten der Detektoren vor ihrem Kontaktieren wurde an drei Chargen mit insgesamt 12 Detektoren untersucht. Zur Untersuchung wurden die temperaturnormierten Stromanteile benutzt. Es zeigte sich eine starke Änderung im Barrieren-, Oxyd- und Volumenstrom kurz nach Fertigstellung der Detektoren. Dabei war die Änderung im Barrierenstrom am stärksten und die vom Oxyd- und Volumenstrom in etwa gleich. Nach spätestens vier Tagen hatten alle Stromanteile stabile Werte erreicht. Einige der Detektoren hatten bereits nach zwei Tagen stabile Stromwerte.

Das zeitliche Verhalten derselben Detektoren zeigte kurz nach ihrem Kontaktieren wieder ein starke Änderung in den Stromanteilen. Dabei zeigte der Barrierenstrom erneut die stärkste Änderung. Der Oxydstrom zeigte hier die kleinste Änderung. Nach spätestens vier Tagen stellten sich auch hier stabile Stromwerte ein.

Die starke Änderung im Barrierenstrom kurz nach der Fertigstellung kann durch die sich an der Oberfläche aufbauende Sperrschicht verstanden. Die starke Änderung kurz nach dem Kontaktieren kann auf den Einfluß dieses Prozeßschrittes auf die Oberfläche des Detektors zurückgeführt werden. Da die Si-Oberfläche für die Ausbildung der Sperrschicht verantwortlich ist, ist sie gegenüber äußerem Einfluß sehr empfindlich und es kann erwartet werden, daß der Prozeßschritt eine Änderung in der Sperrschicht bewirkt.

Dagegen sind die Änderungen im Volumen- und Oxydstrom unverstanden. Der Volumenstrom wird durch Generations-Rekombinations-Zentren im Innern des Halbleiters erzeugt. Diese Zentren, und damit der Volumenstrom, sollten von äußeren Einwirkungen unabhängig sein. Ebenso sollten die für den Oxydstrom verantwortlichen Oberflächenzustände in der Si-SiO₂-Zwischenschicht durch das Oxyd vor äußeren Einwirkungen geschützt sein. Der Oxydstrom sollte damit ebenfalls unempfindlich für äußere Einwirkungen sein.

Ein anderes Kennlinienverhalten konnte bisher auch nicht geklärt werden. Detektoren, die vor dem Kontaktieren das oben beschriebene Kennlinienverhalten zeigten, besaßen nach dem Kontaktieren flache Kennlinien. In diesem Zusammenhang wurde untersucht inwieweit der Volumenstrom eine Spannungsabhängigkeit $U^{1/2}$ für flache und steile Kennlinien besitzt bzw. wie stark er von ihr abweicht. Bei den betrachteten 4 Detektoren war die Abweichung bei den einen sowohl bei einer steilen als auch flachen Kennlinienform vor dem Kontaktieren gering. Nach dem Kontaktieren stieg die Abweichung an. Bei den anderen beiden, deren Kennlinien flach verliefen, waren die Abweichungen bereits vor dem Kontaktieren groß. Nach dem Kontaktieren stieg die Abweichung des einen stark an während der andere seine Abweichung beibehielt.

Anhang

A.1 Die Sprache PASCAL

Pascal ist eine blockorientierte Sprache. Der Sinn solcher Blöcke ist es, die Daten vor einem versehentlichen Zugriff zu schützen. In der Abbildung A1.1 sind mehrere Blöcke dargestellt, von denen der Pascal-Block den größten ausmacht gefolgt von dem Haupt-Programm. Alle von einem Block umfaßten Blöcke haben Zugriff auf die Daten des umschließenden Blocks. In dem Beispiel der Abbildung A1.1 haben alle Blöcke Zugriff auf den Pascal-Block, der das 'Fundament' eines Programms darstellt.

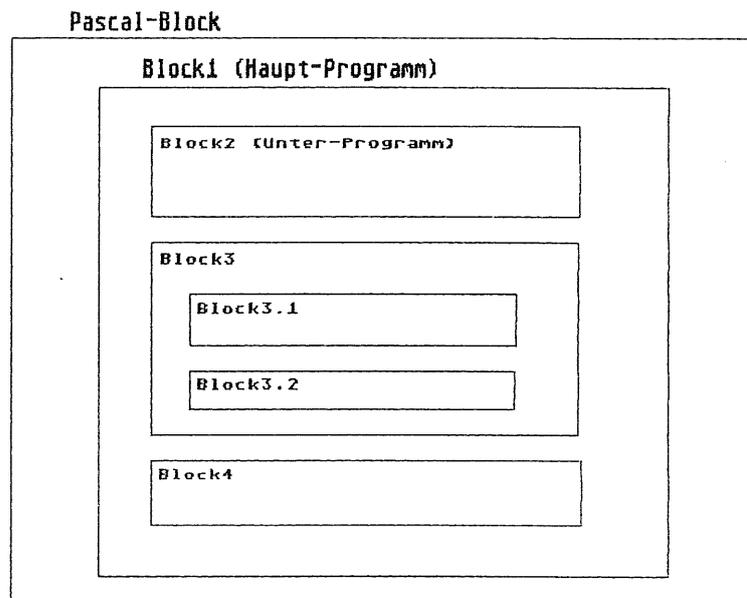


Abb.A1.1: Blockstruktur der Sprache PASCAL.

Die im Haupt-Programm (Block 1) definierten globalen Variablen können durch sämtliche Unterprogramme (alle anderen Blöcke außer dem Pascal-Block natürlich) beeinflußt werden. Die Blöcke 2, 3 und 4 haben dagegen keine gegenseitigen Zugriffsmöglichkeiten. Das gleich Prinzip gilt für den Block 3 und die in ihm aufgeführten Blöcke.

Der Kopf eines Blocks beginnt dabei immer mit einem Schlüsselwort, das ihn zu einem Programm, Unterprogramm oder Funktion erklärt. Unterprogramme werden in Pascal als Procedure bezeichnet, die bei Aufruf ihres Namens ausgeführt werden.

```
PROGRAM      name ;
CONST       Konstanten = . . . . ;
TYP         Typen = . . . . ;
VAR         name : typ ; . . . . ;
PROCEDURE   name ; Begin . . . End ;
FUNCTION    name ; Begin . . . End ;
BEGIN
    Aufrufe;...;
END.
```

Abb.A1.2 Gliederung eines Pascal-Programms (-Procedure,-Function)

Eine Procedure oder Function, die durch eine Procedure aufgerufen wird, muß noch vor der aufrufenden im Programm definiert worden sein, d.h. sie sind in einem Programm oberhalb der aufrufenden zu finden.

Die Abbildung A1.2 zeigt die Gliederung eines Programms. Dieselbe Form besitzen auch die Procedures bzw. Functions [17].

A.2 Das IEEE-System

Der IEEE-488-Bus ist ein Kommunikationssystem für bis zu 15 Geräten, die sowohl untereinander als auch mit einem Steuergerät (Controller) über ein 24-poliges Kabel verbunden werden. Acht der Leitungen dienen der BYTE-orientierten, parallelen Datenübertragung. Die übrigen sechzehn Leitungen führen Signale zur Kommunikationssteuerung sowie die entsprechenden Rückleitungen (GND). Jedes an den Bus angeschlossene Gerät wird durch seine Adresse erkannt.

Als TALKER bzw. LISTENER werden solche Geräte bezeichnet, die gerätespezifische Daten an den Bus übertragen bzw. entgegennehmen können. Zusätzlich gibt es Geräte, die beide Eigenschaften erfüllen. Ein Gerät, das in der Lage ist, Interface-Nachrichten zu senden, heißt CONTROLLER.

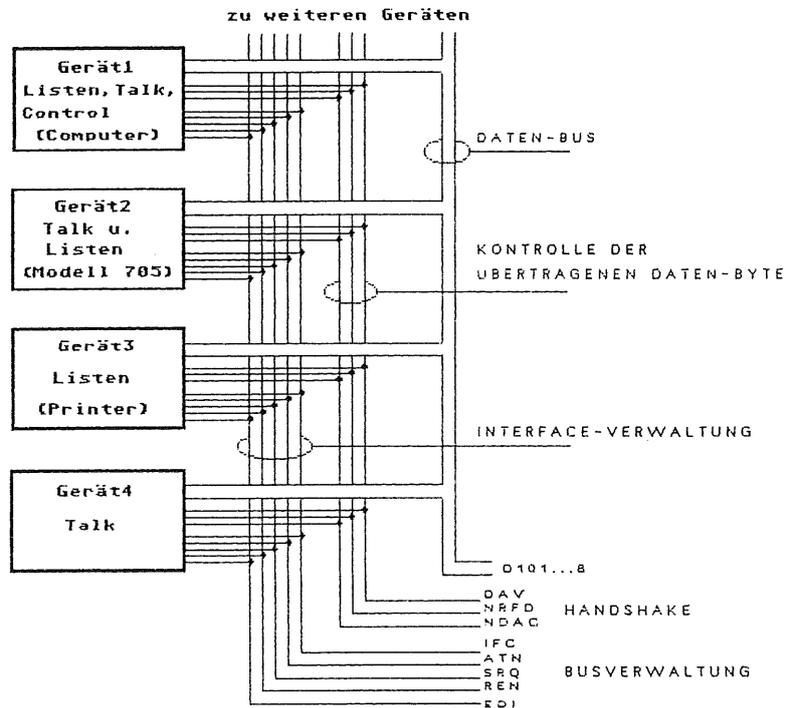


Abb.A2.1: IEEE-Bus Struktur.

Eine Kommunikationssequenz beginnt mit dem Senden einer Talker- und Listener-Adresse durch den Controller. Danach wird die ATN-Leitung 'falsch' gesetzt, und der adressierte Talker beginnt mit dem Datentransfer. Nach dem Transfer muß der Controller ATN wieder 'wahr' setzen und die nächste Sequenz einleiten. Mit dem Status der ATN-Leitung wird entschieden, ob es sich bei den Informationen auf dem Daten-Bus um Befehle oder Daten handelt.

Das gesamte Interfacesystem wird mit der Funktion INIT initialisiert. Im Falle eines Fehlers wird automatisch das Help-Modul aktiviert. Es stellt

Informationen über Interface-Status, Kommandosyntax und Fehler zur Verfügung, die auf dem Bildschirm ausgegeben werden. Bei Fehlern > 1500 handelt es sich um Syntaxfehler im Kommandostring. Fehler < 1500 sind solche, die während der Ausführung von Funktionen aufgetreten sind [18].

A.3 Scanner

Bei diesem Gerät handelt es sich um das IEEE-kompatible Modell 705 der Firma Keithley. Es kann maximal zwei Einsteck-Karten aufnehmen. In diesem Fall eine Strom- und Spannungskarte mit jeweils zehn Kanälen. Die Strom- bzw. Spannungskarte befindet sich in dem Kartenschlitz 1 bzw. 2 des Scanners.

Bei der Initialisierung des Scanners wird der "Step Scan Mode" gewählt [19]. Während einer Messung wird am Scanner der momentan geschlossene Kanal der Stromkarte zur Anzeige gebracht. Nach Durchschalten sämtlicher Kanäle wird zum ersten Kanal zurückgekehrt.

A.4 Flußdiagramme

In den folgenden Abbildungen werden die Flußdiagramme des Strom-Programmes, für den Fall einer Kennlinien-Aufnahme, vorgestellt. Auf die Darstellung jener für das C/V- bzw. "Strom10"-Programm wird verzichtet, da es im wesentlichen eine Wiederholung der bereits aufgeführten wäre.

Das "Strom10"-Programm unterscheidet sich von dem Strom-Programm lediglich durch die Eingabemöglichkeit von zehn Namen statt eines und

durch eine Zählschleife in <StartMessung> zur automatischen Abarbeitung der angegebenen Namen (Abb. 3.4).

Die Unterschiede im C/V-Programm liegen in der Möglichkeit einer Eichaufnahme in <ExecuteMessung> und dem Auslesen zweier Meßwerte in <GetMessWerte> statt eines in den Strom-Programmen, sowie die Umrechnung auf die Kapazitäts- bzw. Leitwerte in <NextMessPunkt>.

```
PROGRAM MAIN;  
  
USES CRT,DOS,PRINTER,GRAPH,IE40; _____ Compilierte Prozeduren.  
{ $IC: \ TURBO4 \ STROM \ GLOBAL.INC } _____ Globale Var.-Vereinbarung.  
{ $IC: \ TURBO4 \ STROM \ GRAFIK.INC }  
{ $IC: \ TURBO4 \ STROM \ MENU.INC }  
{ $IC: \ TURBO4 \ STROM \ GERAETE.PAS } _____ Geräte-Adressen  
{ $IC: \ TURBO4 \ STROM \ IEEEHAND.INC } _____ Ansprechen der Geräte  
_____ über IEEE-System.  
{ $IC: \ TURBO4 \ STROM \ FILEHAND.PAS } _____ Sichern/Laden der Daten.  
{ $IC: \ TURBO4 \ STROM \ VIEWGRAF.PAS } _____ Darstellung der Kennlinie.  
{ $IC: \ TURBO4 \ STROM \ PROLOG.PAS } _____ Vorbelegung von Variablen.  
{ $IC: \ TURBO4 \ STROM \ EPILOG.PAS } _____ Verabschiedung.  
{ $IC: \ TURBO4 \ STROM \ EXECMESS.PAS } _____ Starten einer Messung.  
  
BEGIN  
  AUFRUFE { ... }  
END.
```

Abb. A4.1: Haupt-Programm für die Strommessung.

Die Abbildung A4.1 zeigt das Aussehen der Hauptprogramme am Beispiel des Strom-Programmes. Es enthält entsprechende Compiler-Anweisungen zur Anbindung der Dateien, die die benötigten Unterprogramme (Procedures) bzw. globale Variablen enthalten.

a) Strom-Programm:

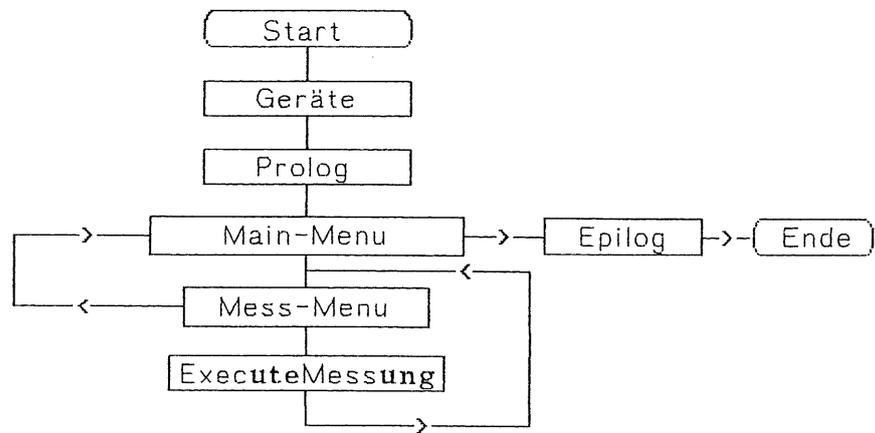


Abb.A4.2a: Flußdiagramm des Strom-Programm zur Kennlinienaufnahme.

Die Procedure <ExecuteMessung> sowie jene, die für den Ablauf einer Messung wesentlich sind, werden in den folgenden Abbildungen b) bis e) dargestellt.

b) ExecuteMessung:

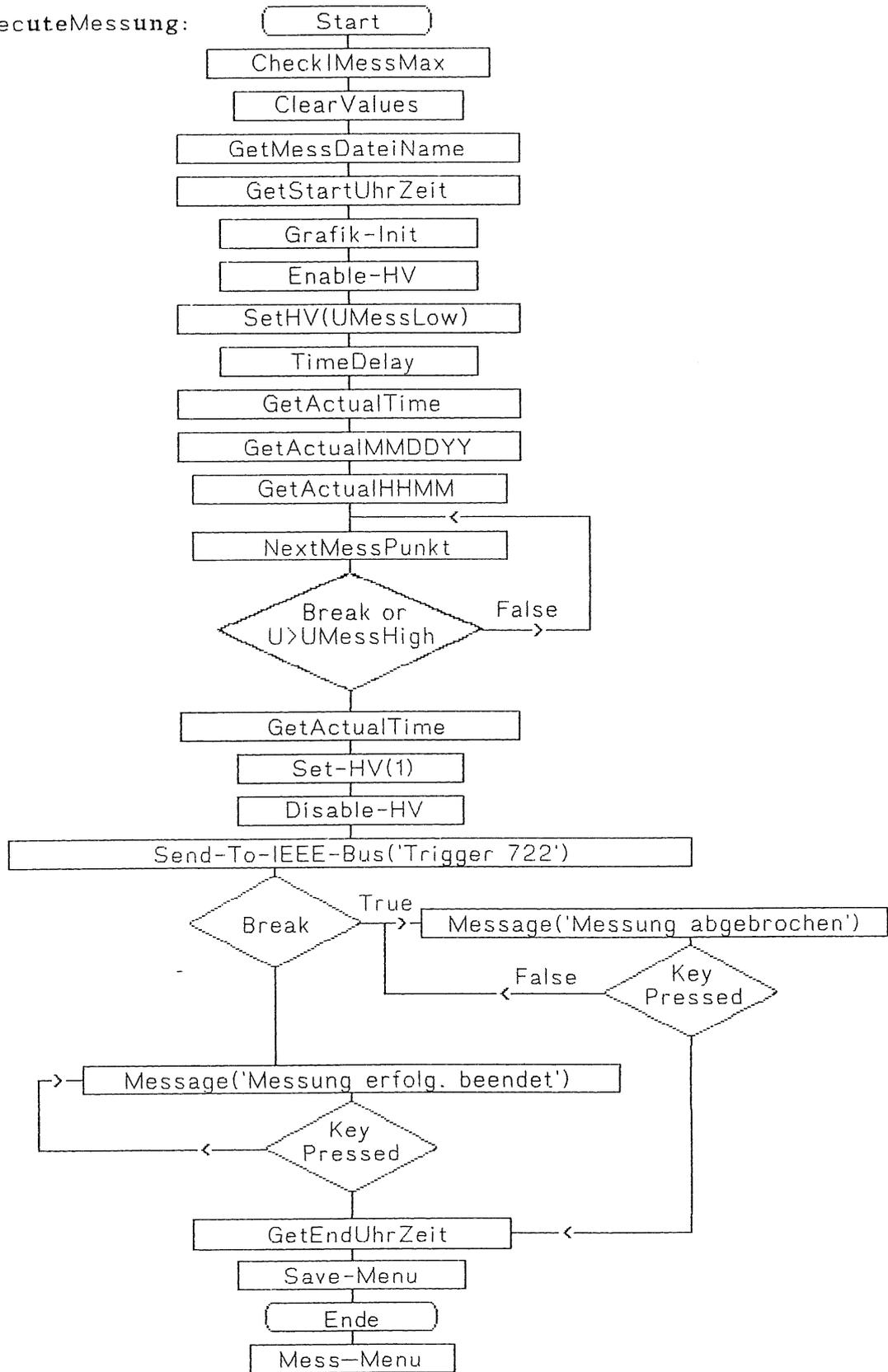


Abb.A4.2b: Flußdiagramm der Procedure <ExecuteMessung>.

c) TimeDelay:

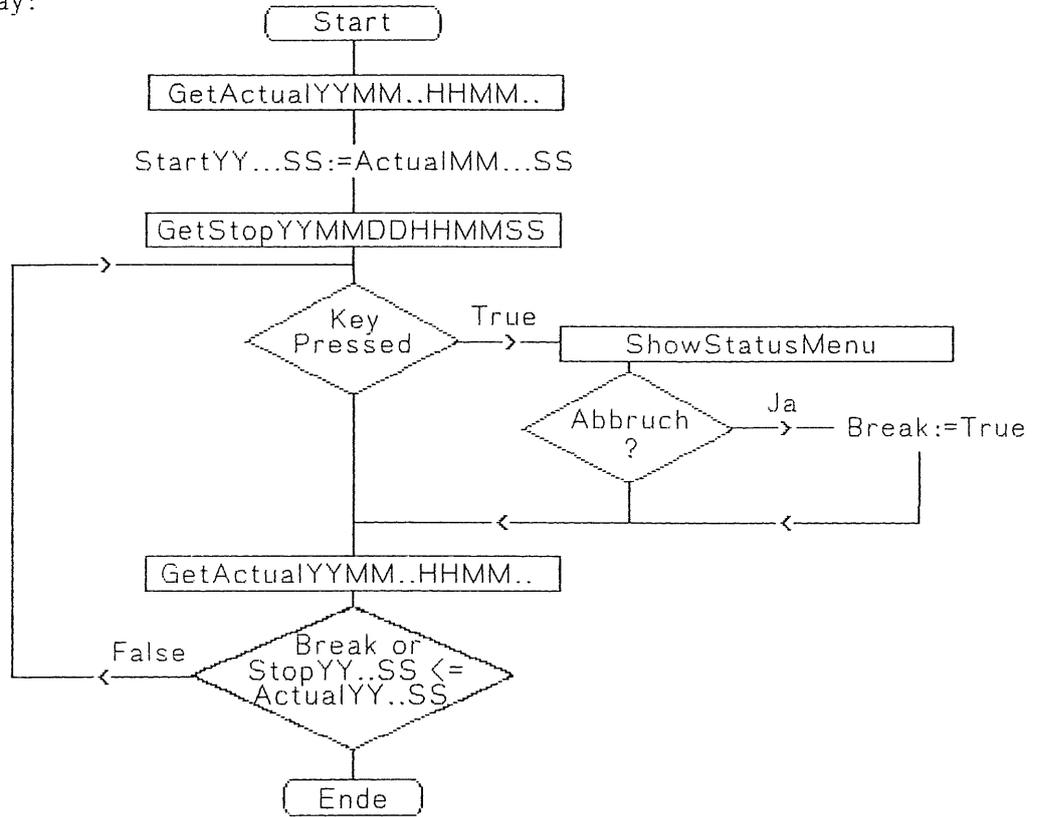


Abb.A4.2c: Flußdiagramm der Procedure <TimeDelay>.

d) NextMessPunkt:

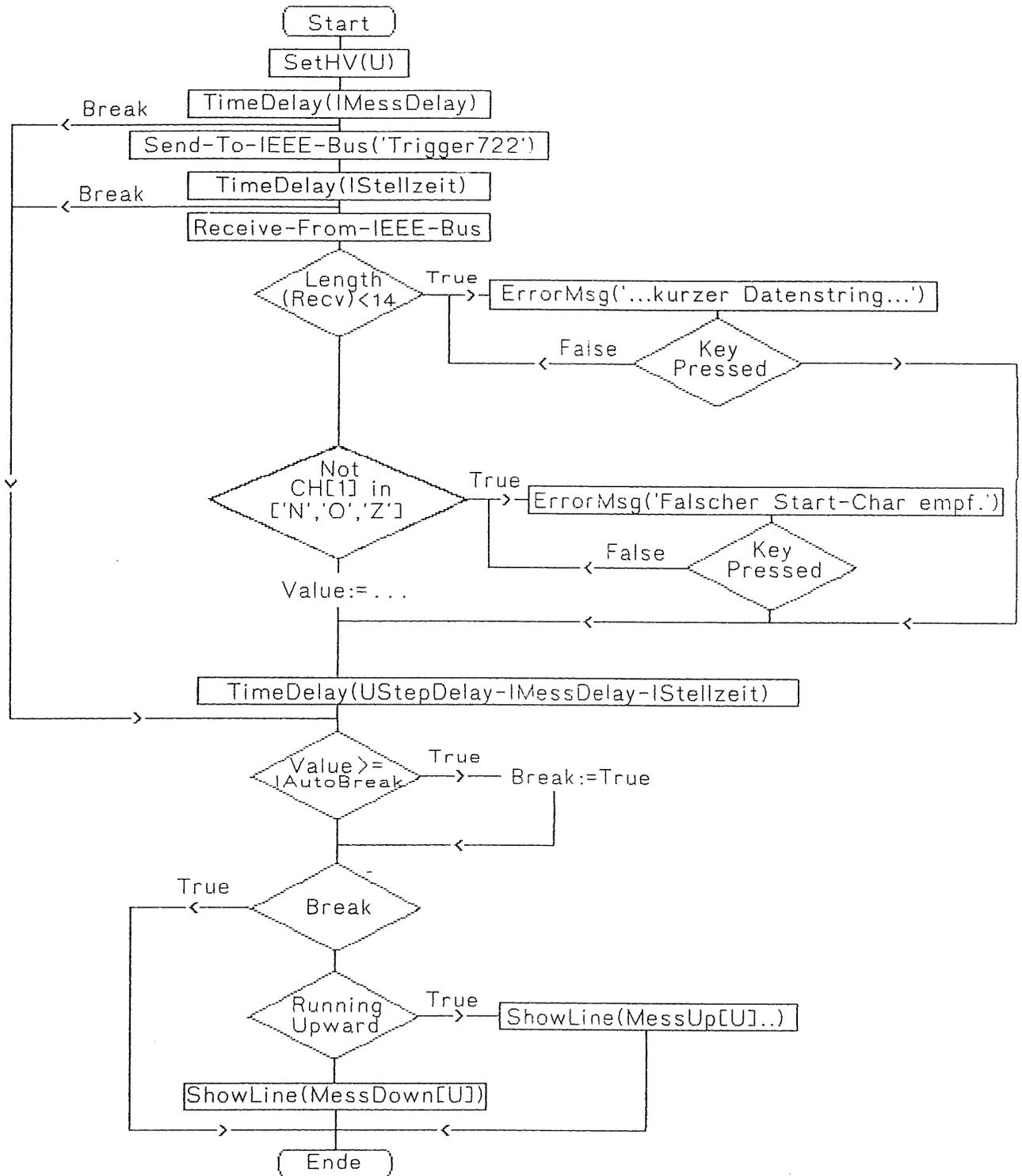


Abb.A4.2d: Flußdiagramm der Procedure <NextMessPunkt>.

e) Save-Menu:

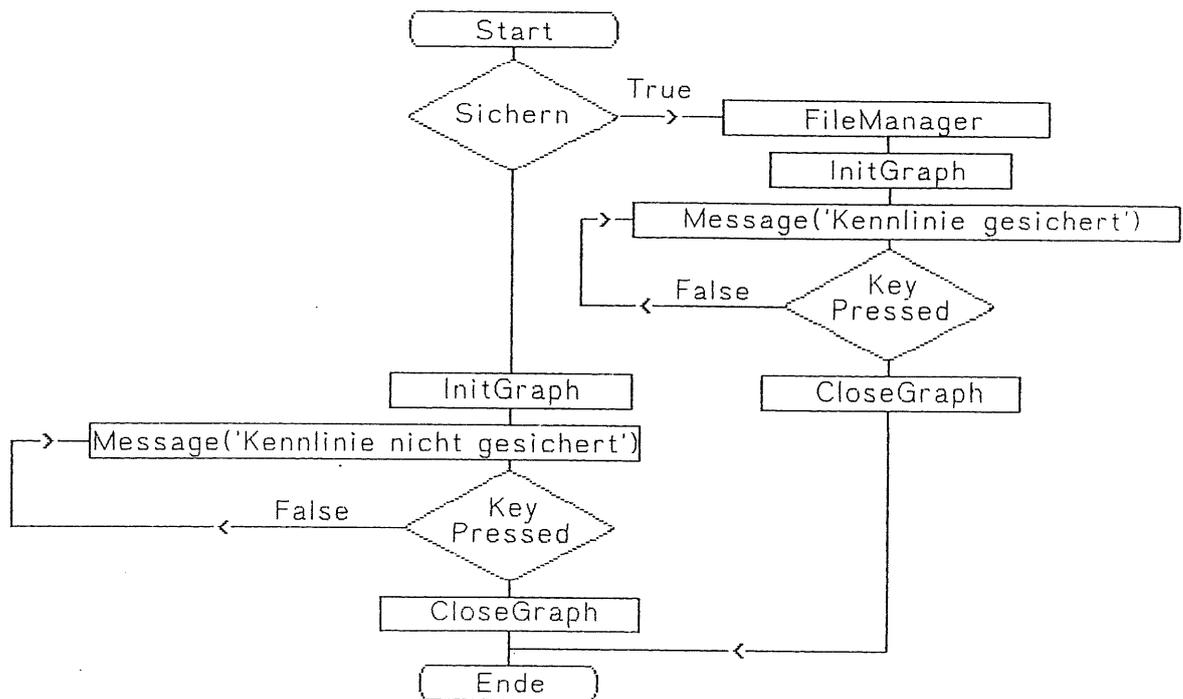


Abb. A4.2e: Flußdiagramm der Procedure <Save-Menu>.

A.5 Programm-Menus

Auf den folgenden Seiten werden die Verschiedenen Menus der verwendeten Programme vorgestellt. Auf die Darstellung der Menus zur Änderung von Meßparametern der Meßprogramme wird hierbei verzichtet.

Geräte Hinweis beim "Strom10"-Programm:

Für die Messung müssen folgende Geräte angeschlossen sein:

Geräte:	Adresse:	Dip-Schalter:
Keithley Picoammeter(MaWi)	722	011010
Emetron 500V (MaWi)	701	10000000
Keithley Scanner	717	Front Panel Prg.3

Weiter durch Drücken einer Taste

. . . beim C/V-Programm:

Für die Messung müssen folgende Geräte angeschlossen sein:

Geräte:	Adresse:	Dip-Schalter:
Keithley 195A	716	Front Panel Prg.3
Keithley 175	724	000110
Emetron 500V	701	10000000

Weiter durch Drücken einer Taste

Haupt-Menu des I/V bzw. C/V-Programm:

Bitte wählen Sie die gewünschte Rechner-Funktion durch Drücken einer der in eckigen Klammern angegebenen Tasten !

[M] : Durchführung einer Kennlinien-Messung

[G] : * Laden und Graphische Darstellung von Kennlinien
* Druckprotokoll der Meßwerte

[E] : Rückkehr ins Betriebssystem (MS-DOS)

Abb.A5.1a): Geräte-Hinweise und Haupt-Menu.

Menu zur Aufnahme von Strom-Spannungs-Kennlinien

Bitte wählen Sie die gewünschte Rechner-Funktion durch
Drücken einer der in eckigen Klammern angegebenen Tasten !

- [A] : EM 50 ein-/ausschalten [HV: Momentanes Gerät EM 500 V]
- [1] : Aufnahme einer Kennlinie ohne Hysterese-Messung
- [2] : Aufnahme einer Kennlinie mit Hysterese-Messung

- [3] : Änderung von Meß-Parametern

- [G] : * Laden von Kennlinien
* Sprung in das Graphik-/Druckprotokoll-Menu

- [E] : Rückkehr in das Haupt-Menu

Menu zur Aufnahme von Kapazitäts-Kennlinien

Bitte wählen Sie die gewünschte Rechner-Funktion durch
Drücken einer der in eckigen Klammern angegebenen Tasten !

- [A] : Aufnahme der EICHUNG
- [B] : Tastendruck erhöht Abschwächer: [1:1] EM 500 V
- [1] : Aufnahme einer Kennlinie ohne Hysterese-Messung
- [2] : Aufnahme einer Kennlinie mit Hysterese-Messung
- [3] : Doppellogarithmische Darstellung Ein/Aus : momentan [Aus]
- [4] : Änderung von Meß-Parametern
- [G] : * Laden von Kennlinien
* Sprung in das Graphik-/Druckprotokoll-Menu

- [E] : Rückkehr in das Haupt-Menu

Abb.A5.1b): Menus zur Kennlinien-Aufnahme.

Menu zur graphischen Darstellung von Kennlinien

Bitte wählen Sie die gewünschte Rechner-Funktion durch Drücken einer der in eckigen Klammern angegebenen Tasten !

- [1] : Darstellung der Kennlinie
- [2] : Druckprotokoll der Meßwert-Aufnahme
- [3] : Änderung der Parameter in der Darstellung
- [F] : FORM FEED
- [H] : HardCopy
- [L] : Laden einer Kennlinie
- [E] : Rückkehr in das Ausgangs-Menu

Strom-Messungen

Menu zur graphischen Darstellung von Kennlinien

Bitte wählen Sie die gewünschte Rechner-Funktion durch Drücken einer der in eckigen Klammern angegebenen Tasten !

- [J] : Umschreiben einer Datei : UC \rightarrow Cdet
- [1] : Darstellung der ersten Kennlinie [$C_{det}/A = f(UD)$]
- [2] : Darstellung der zweiten Kennlinie [$G/\omega * A = f(UD)$]
- [3] : Druckprotokoll der Meßwert-Aufnahme
- [4] : Änderung der Parameter in der Darstellung
- [5] : Doppellogarithmische Darstellung Ein/Aus : momentan [Aus]
- [F] : FORM FEED
- [H] : HardCopy
- [L] : Laden einer Kennlinie
- [E] : Rückkehr in das Ausgangs-Menu

Kapazitäts-Messungen

Abb.A5.2: Menus zur grafischen Darstellung.

Menu zur Darstellung mehrerer Meßkurven

Bitte wählen Sie die gewünschte Rechner-Funktion durch Drücken einer der in eckigen Klammern angegebenen Tasten !

- [1] : einzelne Meßkurve hinzuladen
- [Z] : Zeichne Kurve
- [2] : einzelne Meßkurve löschen
- [3] : alle Meßkurven löschen
- [H] : HardCopy
- [I] : Informationen zu einzelner Meßkurve [keine Kurven gespeichert]
- [P] : Parameter in der Darstellung ändern
- [D] : Directory-Wechsel [C:\Strom]
- [K] : T_Korrektur [Nein; $T_0 = 295\text{K}$]
- [E] : Programm beenden

Grafik-Darstellung

Haupt-Menu zu den einzelnen Aufgaben

Bitte wählen Sie die gewünschte Rechner-Funktion durch Drücken einer der in eckigen Klammern angegebenen Tasten !

- [K] : Korrektur der Daten in Tabellenform [Ja]
Oder: Graphische Darstellung der korrigierten Ströme [Nein]
** Max. 10 Messungen !
- [S] : Starte
- [D] : Directory [C:\Strom]
- [M] : Nur Monitor. Keine automat. Hardcopy [Nein]
- [P] : Änderung von I_{max} in der graphischen Darstellung [$1.0 \mu\text{A}$]

- [Q] : Rückkehr ins Betriebssystem (MS-DOS)

Abb.A5.3: Menu zur Darstellung mehrerer Kennlinien bzw. zur Umrechnung auf die Normtemperatur T_0 .

A.6 Umrechnung einer 'alten' Kapazitätskennlinie

Mit Hilfe des Umrechnungsprogramms werden solche Kennlinien-Dateien umgeschrieben, die noch mit den entsprechenden Spannungen des Lock-Ins abgespeichert wurden. Neben den 'alten' Meßwerten werden auch die zugehörigen Spannungen U_R umgeschrieben (Eingabe des verwendeten Abschwächers). Die Abb. A6.1 zeigt das Blockdiagramm dieses Programms.

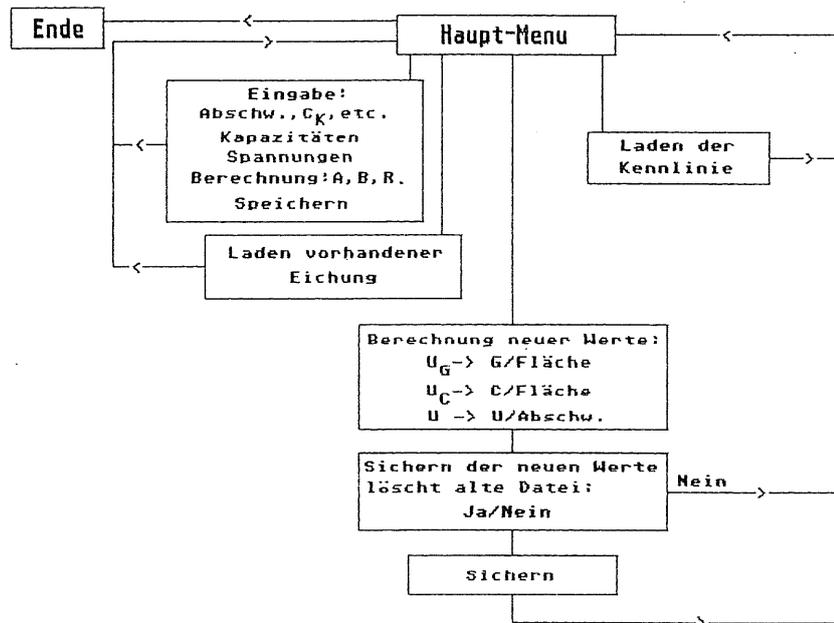


Abb. A6.1: Blockdiagramm des Programms zur Umrechnung alter Kapazitätskennlinien.

Beim Laden einer Datei wird geprüft, ob es sich um eine 'alte' handelt. Hierzu wird die Datei nach dem String 'Cdet' abgesucht und bei Auffinden eine Meldung ausgegeben. Sollte bei einer Änderung des Datei-Formats dieser String geändert werden, so wird eine Datei nicht mehr als eine umzuschreibende erkannt und das Ergebnis wären falsche Daten.

Ist eine Datei umgeschrieben worden, kann sie nach Bestätigen gespeichert werden. Ein Sichern der neuen Werte überschreibt die 'alte' Datei, und der 'neuen' wird zusätzlich die Eichung angehängt.

A.7 Lineare Regression [20]

Zur Bestimmung der Eichgeraden wird die Lineare Regression benutzt und von den folgende Beziehungen ausgegangen:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i, \text{ analog } \bar{y} \quad (\text{A7.1})$$

empirische Varianz: $s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2, \text{ analog } s_y^2 \quad (\text{A7.2})$

empirische Kovarianz: $m_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) \quad (\text{A7.3})$

empirischer Regressionskoeff.: $B = \frac{m_{xy}}{s_x^2} \quad (\text{A7.4})$

empirischer Korrelationskoeff.: $R = \frac{m_{xy}}{s_x \cdot s_y} \quad (\text{A7.5})$

Dabei laufen alle Summen von $i=1$ bis n . Für die empirische Regressionsgerade erhält man:

$$y = \bar{y} + B \cdot (x - \bar{x}) = A + B \cdot x \quad (\text{A7.6})$$

Mit dem Konstantenterm

$$A = \bar{y} - B \cdot \bar{x} \quad (\text{A7.6a}).$$

Nach einigen Umformungen ergibt sich :

$$B = \frac{\sum y_i \cdot \sum x_i - n \cdot \sum x_i \cdot y_i}{\sum x_i \cdot \sum x_i - n \cdot \sum x_i^2} \quad (\text{A7.7})$$

$$A = \frac{\sum x_i \cdot \sum x_i \cdot y_i - \sum y_i \cdot \sum x_i^2}{\sum x_i \cdot \sum x_i - n \cdot \sum x_i^2} \quad (\text{A7.8})$$

$$R = \frac{(n \cdot \sum x_i \cdot y_i - \sum y_i \cdot \sum x_i)}{\sqrt{(n \cdot \sum x_i^2 - \sum x_i \cdot \sum x_i) \cdot (n \cdot \sum y_i^2 - \sum x_i \cdot \sum y_i)}} \quad (\text{A7.9})$$

Literaturverzeichnis

1. D. H. Perkins, 'Introduction to High Energy Physics', 2nd Edition, 1982, The Benjamin/Cummings Company.
2. Silicon Detectors for H1 at HERA , HEXAM 89 at Bechyne Castle, CSSR, June 89
3. Technical-Proposal for H1 Detector, H1 Collaboration, 87.
4. K. Hess, 'Advanced Theory of Semiconductor Devices', 1988, Prentice Hall.
5. J. Bardeen, 'Surface States and Rectification at a Metal Semiconductor Contact', Phys. Rev. 71, 717, 1947.
6. H. Neuert, 'Kernphysikalische Meßverfahren', 1966, G. Braun, Karlsruhe.
7. S. M. Sze, 'Physics of Semiconductor Devices', 2nd Edition, 1981, John Wiley & Sons, New York.
8. A. Rost, 'Grundlagen der Elektronik', 1983, Akademie-Verlag Berlin.
9. R. Wunstorff, 'Untersuchungen zur Diodencharakteristik von Silizium-Oberflächensperrschichtdetektoren, Staatsexamensarbeit, Hamburg 1986.
10. J. Nagel, 'Untersuchungen an oxidpassivierten Oberflächensperrschicht-Detektoren mit Mosaik-Konfiguration, Diplomarbeit, Hamburg 1985.

11. A. S. Grove and D. J. Fitzgerald, 'Surface Effects on p-n Junctions: Characteristics of Surface Space-Charge Regions under Non-Equilibrium Conditions', *Solid State Electronics*, 9, 783-806, 1966, Mos2-Ordner.
12. S. Zindel, 'Diodeneigenschaften von Oberflächensperrschicht-Detektoren mit Guard-Ring-Struktur. Messungen und Modellrechnung', Staatsexamensarbeit, Hamburg 1987.
13. R. S. Cobbold, 'Theory and Application of Field-Effect Transistors', Wiley-Interscience, Mos1-Ordner.
14. E. H. Nicollian, J. R. Brews, 'MOS (Metal Oxid Semiconductor) Physics and Technology, John-Wiley, 1982.
15. C. R. Crowell and S. M. Sze, 'Current Transport in Metal-Semiconductor Barriers', *Solid State Electronics*, 8, 1035, 1966.
16. C. Kittel, 'Einführung in die Festkörperphysik', 6. Auflage, 1983, R. Oldenbourg Verlag, München Wien.
17. P. Wollschläger, 'ST Pascal', 1987, Markt & Technik Verlag.
18. INES, IEEE 488 Handbuch.
19. Model 705 Instruction Manual, Juni 1986, Keithley Instruments, Inc., Cleveland, Ohio, U.S.A.
20. Bronstein-Semendjajew, 'Taschenbuch der Mathematik', 21. Auflage, 1981, Teubner-Verlagsgesellschaft.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Anderson-Lindström für die Aufgabenstellung. Herrn Dr. Fretwurst danke ich für die Anregungen und hilfreichen Diskussionen, die zum Zustandekommen dieser Arbeit beitrugen. Allen Mitgliedern der Gruppe gilt mein Dank für die freundliche Aufnahme.

Ich versichere, daß ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfaßt und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.