

Vorwort

Stephan Hloucal, Erfurt

Diese etwas umfangreichere Ausgabe widmet sich der jüngeren Industriegeschichte Thüringens, und zwar der Halbleitertechnik. Der VEB Funkwerk/Mikroelektronik Erfurt hatte sich seit Mitte der 1970er Jahre zum bedeutendsten Mikroelektronikproduzenten in der ehemaligen DDR entwickelt. Doch die Halbleiterära begann in Erfurt schon 1960, was bislang in Fachkreisen unbekannt war. Die spektakuläre Entwicklung von Germanium-Leistungstransistoren präsentieren wir mit einmaligen Bild-Dokumenten aus dem Thüringer Industriearchiv, die bisher noch nie veröffentlicht wurden. Kürzlich im Thüringer Industriearchiv entdeckte Forschungsberichte der Technischen Hochschule Ilmenau (THI) veranlassten uns, gemeinsam mit Zeitzeugen, die Entwicklung von DMOS-Transistoren zu beschreiben. Dabei ging es um eine Forschungs Kooperation zwischen der THI und dem VEB Mikroelektronik Erfurt. Bemerkenswert ist, dass daran auch Dagmar Schipanski mitwirkte, die später Professorin für Festkörperelektronik und Rektorin der Technischen Universität Ilmenau, Vorsitzende des Wissenschaftsrats der Bundesrepublik Deutschland, Thüringer Ministerin für Wissenschaft, Forschung und Kunst sowie Präsidentin des Thüringer Landtags war. Nach 1945 haben sich in Ostdeutschland Matthias Falter (1960 Direktor des Instituts für Halbleitertechnik Teltow) und in Westdeutschland Heinz Beneking (1961 Direktor des Instituts für Transistortechnik an der RWTH Aachen) in besonderer Weise um die Halbleiterforschung verdient gemacht. Aus dem wissenschaftlichen Nachlass von Prof. Dr. rer. nat. Heinz Beneking befinden sich einige interessante Artefakte in unserer Sammlung Halbleitertechnik. Er wäre in diesem Jahr 100 Jahre alt geworden.



Der Erfurter Transistor OC 846 A

Inhalt

- Vorwort
- Würdigung
- Aus aktuellem Anlass
- Historisches
- Autorenverzeichnis, Quellen, Copyrights, Impressum

„ON.LINE“

Englische Fachbegriffe sind dem Elektrotechniker/Elektroniker hierzulande durchaus geläufig. Online steht übersetzt für gekoppelt, verbunden, abrufbereit, angeschlossen. Mit „to go on line“ / „online gehen“ gehen wir ans Netz oder gehen neudeutsch online.

Wir haben mit der ON.LINE 1.2017 den modernen on.line-Weg eingeschlagen, wollen uns mit der nunmehr 14. Ausgabe ON.LINE weiter zusammenschalten, bieten eine (Leitung) Verbindung zum fachlichen Austausch an, informieren und wünschen uns Ihren Anschluss.

Wir freuen uns über Ihre Rückkopplung.

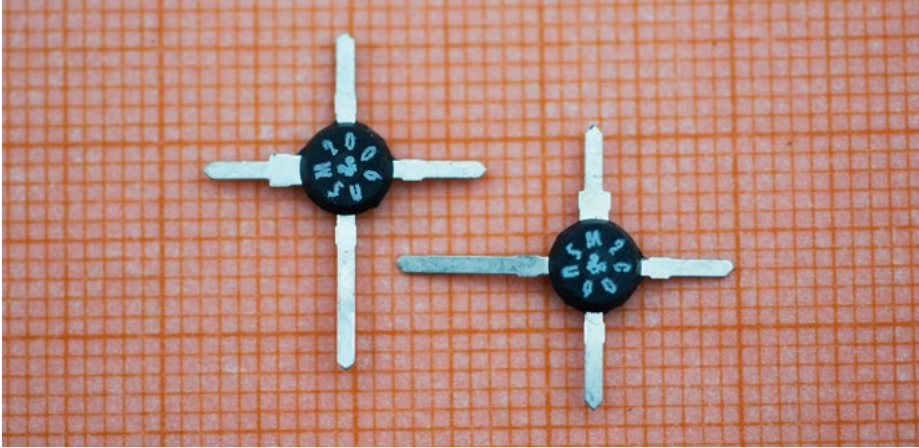
Folgen Sie uns



Das ON.LINE 15.2024 wurde erstellt mit freundlicher Unterstützung der TEAG Thüringer Energie AG, Erfurt, und der Sparkassenstiftung Erfurt.

1959 wurde in Sonneberg das Transistorradio „Sternchen“ entwickelt. Doch wie es mit der Herstellung transistorisierter Rundfunkempfänger aus Thüringen weiterging, darüber wollen wir informieren. Erinnert werden soll auch daran, dass vor 40 Jahren der erste DDR-Heimcomputer aus Mühlhausen auf der Leipziger Frühjahrsmesse vorgestellt wurde, der noch heute eine rege Fangemeinde hat.

Nun wünschen wir Ihnen eine erholsame Urlaubszeit und hoffen, dass wir Ihr Interesse an Thüringer Industriekultur wecken konnten. Bleiben Sie uns gewogen!



Dual-Gate-DMOS-Transistor SM 200, Sammlung Halbleitertechnik (Bildquelle: Stephan Hloucal)

In eigener Sache

Wir arbeiten ehrenamtlich. Jedoch sind unsere Bemühungen um die Bewahrung und Erforschung Thüringer Industriegeschichte nicht kostenfrei. Für die Unterbringung der Sammlungen und des Thüringer Industriearchivs fallen Miet- und Betriebskosten an, die allein aus Mitgliedsbeiträgen und den bisherigen Spenden nicht gedeckt werden können. Sie können unsere Arbeit mit einer finanziellen Zuwendung unterstützen, für die wir Ihnen gern eine Spendenbescheinigung ausstellen.

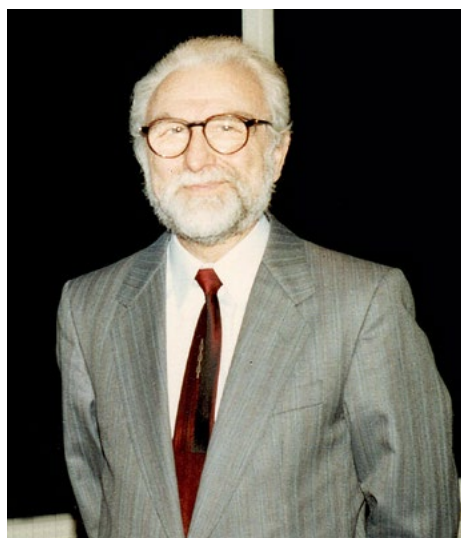
Unsere Bankverbindung: Thüringer Museum für Elektrotechnik, IBAN DE87820510000130084298 BIC HELADEF1WEM, Kontakt: <https://www.elektromuseum.de/impressum.html>. Ihnen und unseren bisherigen Spendern ein herzlicher Dank für Ihre Hilfe.

WÜRDIGUNG

Zum 100. Geburtstag von Prof. Dr. rer. nat. Heinz Beneking

Stephan Hloucal, Erfurt

Einer der Pioniere der Halbleitertechnik in Deutschland war der 1924 in Frankfurt am Main geborene Heinz Beneking. 1945 begann er ein Physikstudium an der Universität in Hamburg. 1951 promovierte er



zum Dr. rer. nat. mit dem Thema „Betrachtungen und Versuche zum dynamischen Sekundärelektronenvervielfacher“ in Frankfurt am Main. Die in den USA rasant verlaufende Entwicklung der Transistortechnik verfolgte Heinz Beneking sehr aufmerksam und stand in intensivem fachlichem Austausch mit internationalen Fachkollegen. An der RWTH Aachen habilitierte er 1956 über „Transistorschaltungen“ und wurde dort 1961 auf den ersten Lehrstuhl für Transistor- und Halbleitertechnik in Deutschland berufen. Damit gehörte er zu den ersten Professoren in Deutschland, die sich in Lehre und Forschung mit der neuen Transistortechnik befassten. Sein wissenschaftliches Interesse galt besonders den Halbleiterverbindungen für Anwendungen in Mikrowellentechnik und Optoelektronik. Er verfasste zahlreiche Veröffentlichungen und war Inhaber von 148 nationalen und internationalen Patenten. Sein Institut baute er zu einem weltweit angesehenen Forschungszentrum aus. Er war Dekan der Fakultät für Elektrotechnik an der RWTH Aachen und wurde 1989 emeritiert. Für seine wissenschaftlichen Verdienste erhielt er 1984 die Carl-Friedrich-Gauss-Medaille und 1985 die Heinrich-Welker-Medaille. 1996 verstarb Heinz Beneking in Aachen. Am 28. März dieses Jahres wäre er 100 Jahre alt geworden.

https://de.wikipedia.org/wiki/Heinz_Beneking

Heinz Beneking, 1984, Privatarchiv Claus Beneking

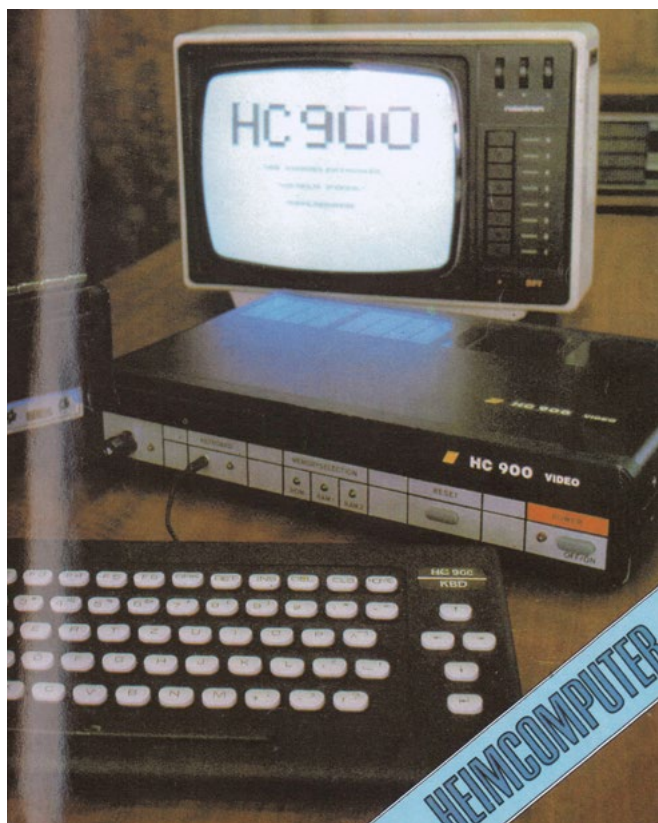
AUS AKTUELLEM ANLASS

40 Jahre Heimcomputer HC 900 aus Mühlhausen

Ulrich Liebold, Erfurt

Nachdem in den 1970er Jahren das Phänomen „Computer“ einer breiten Öffentlichkeit immer bekannter und vertrauter geworden war, nahm spätestens zu Beginn der 1980er Jahre die Nachfrage nach dem Besitz und Umgang mit Computern im privaten Bereich rapide zu. Für die DDR stellte das hinsichtlich der Versorgungszufriedenheit der Bevölkerung ein besonderes Problem dar, da die im Westen schon zahlreich verfügbaren Heimcomputermodelle internationaler Anbieter unter den bekannten wirtschaftlichen und Valutabedingungen der DDR nicht im ausreichenden Maße beschafft werden konnten.

Eigene Entwicklungen und Produktionslinien zu starten, war also das Gebot der Stunde. Im Zuge der „Konsumgüter-Produktion“ wurde dem VEB Mikroelektronik „Wilhelm Pieck“ in Mühlhausen/Thüringen, einem Betrieb, der bis dahin Elektronenröhren und Taschenrechner produziert hatte, der Auftrag erteilt, einen DDR-eigenen Home-Computer zu entwickeln und herzustellen. Die Entwicklung, für die Fachleute aus dem eigenen Haus aus ihren bisherigen Arbeitsgebieten abgezogen wurden, aber auch ein Wissenschaftler von der Technischen Universität Dresden als Abteilungsleiter für die Geräteentwicklung verpflichtet wurde, begann im Frühjahr 1983. Ein Jugendforscherkollektiv wurde gebildet, denn die Neuentwicklung sollte vor allem in Schulen und Bildungseinrichtungen eingesetzt werden, um Schülern Computerkenntnisse zu vermitteln, aber auch um den Enthusiasmus der



Die Produktbeschreibung lautet wie folgt:

"Heimcomputer HC 900: vorn die Tastatur, dahinter das Grundgerät, dann das Datensichtgerät (Fernsehergerät) und links ein Kassettentonbandgerät als externer Speicher."

HC 900 verfügt über Anschlußmöglichkeiten für zwei Erweiterungsmodule und einen Erweiterungsaufsatz. Die Module können den Anwendungsbereich des Computers wesentlich vergrößern. Dazu zählen Speichererweiterungen (16-kByte- und 64-kByte-RAM, 8-kByte-ROM). BASIC-Interpreter im Festwertspeicher, V.24-Schnittstelle zum Anschluß von anderen Geräten (z.B. Drucker, Terminals, MODEM zur Datenfernübertragung), Spielhebel, Lichtstift, Digital-Ein-Ausgabe u. v. m. Weiter vorgesehene Aufsatzgeräte sind vier Modulschächte und eine EPROM-Programmier- und Löschleinheit sowie perspektivisch Floppy-Disk und Drucker. In der Perspektive ist an Module gedacht wie 16-kByte-ROM, Strichcodeleser, Analog-Ein-Ausgabe und Sprachausgabe. Weitere technische Daten: Masse: 3 kg, Betriebsspannung: 220 V; Leistungsverbrauch etwa 25 W; CPU: U 880 D; Arbeitsspeicher: 32 kByte (davon etwa 20 kByte für Anwender verfügbar); Festwertspeicher: 4 kByte; durch externe Zusatzspeicher ist der RAM bis zu 4 MByte erweiterbar."

Jugendlichen für die neue Technik und die Welt der Videospiele zu binden. Bereits zur Frühjahrsmesse 1984 wurde der HC 900 der Fachwelt und den potenziellen Kunden vorgestellt, und die Serienproduktion begann noch im Herbst des gleichen Jahres. In diesem Jahr begehen wir also den 40. Jahrestag dieser Entwicklung.

Wie viele DDR-typische Mikroprozessor-Anwendungen nutzte auch der HC 900 eine U880-CPU. Er verfügte über 64-kB-RAM-Arbeitsspeicher und hatte eine einfache Text- und Grafikausgabe, wie sie für diese Zeit bei Heimcomputern allgemein üblich war. Diskettenlaufwerke waren in der DDR damals noch nicht gebräuchlich. Die Daten wurden auf Kassetten gespeichert. Die Anwendungsbreite war natürlich limitiert, einerseits von den technischen Möglichkeiten her, andererseits auch durch die politischen Vorgaben der

Auftraggeber. Man konnte mit dem HC 900 Texte schreiben, mit dem BASIC-Interpreter und U880-Assembler programmieren und auch spielen. In dem Maße, wie sich das System im Land verbreitete, versuchten Hobbyentwickler Spielsituationen nach westlichem Vorbild zu gestalten, was teilweise auch gelang. Offiziell erfuhr der HC 900 bereits 1985 eine Weiterentwicklung mit den Produkten KC 85/2, dem noch der KC 85/3 und KC 85/4 folgten.

Mit dem Mauerfall eröffnete sich auch für die DDR-Konsumenten der westliche Computermarkt und die Eigenentwicklungen verloren an Bedeutung. Dennoch bleiben sie in Erinnerung als ein Stück Technikgeschichte aus den Anfängen des Computerzeitalters.

Quelle:

Radke, Harry: „Könner aus Mühlhausen“, Jugend und Technik, Bd. 5, 1984, S. 329

HISTORISCHES

Was kam nach dem „Sternchen“?

Transistorradios aus Thüringen

Gerhard Roleder, Erfurt

Mit dem Taschenradio „Sternchen“ hatte Thüringen im Jahr 1959 die Nase vorn beim Produktionsbeginn von Transistorradios. Etwa ein Jahr später kam alles anders. Ab 1960 spezialisierte sich der VEB Stern-Radio Berlin auf transportable Empfänger, während der VEB Stern-Radio Sonneberg weiterhin die auch als „Heimempfänger“ bezeichneten Standgeräte herstellte. Bis 1967 liefen in Sonneberg überwiegend röhrenbestückte Radios für Netzbetrieb vom Band. 1962/63 wurden dort in kleineren Stückzahlen auch mit Transistoren bestückte Standgeräte für Batteriebetrieb hergestellt. Diese Geräte konnten Langwelle, Mittelwelle und mehrere Kurzwellenbänder empfangen und waren für den Export bestimmt. Die Kombination Standgerät mit Batteriebetrieb konnte sich international nicht durchsetzen, da batteriegepeiste Kofferradios in der Empfangsleistung ebenbürtig waren.

1967/68 begann in Sonneberg endgültig die Transistor-Ära. Bis 1989 war der VEB Stern-Radio Sonneberg in der DDR der führende Hersteller von Heimempfängern bezüglich Stückzahlen und Modellvielfalt. Im Spannungsfeld zwischen Stand der Technik und Bauteile-Verfügbarkeit, guten Gebrauchseigenschaften und erschwinglichen Preisen entstanden

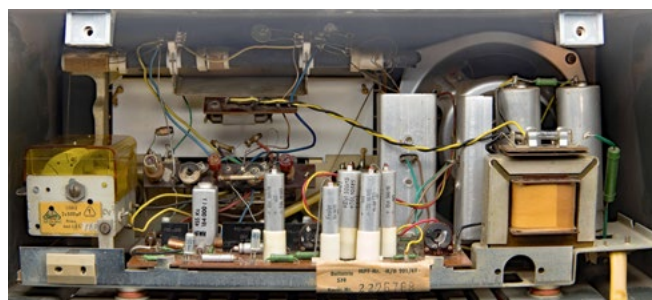
Erzeugnisse, die es wert sind, anhand von Beispielen erneut betrachtet zu werden. Dabei gibt es einige interessante technische Details wiederzuentdecken.

Einfaches Transistorradio für Mittel- und Kurzwelle

Der erste transistorisierte Heimempfänger „Bellatrix 579“ ist mit sieben Germanium-Transistoren des VEB Halbleiterwerk Frankfurt/Oder bestückt. Das Radio kann die Bereiche Mittelwelle und Kurzwelle empfangen. Es funktioniert nach dem Prinzip des Überlagerungsempfängers (Superhet). Alle weiteren in diesem Beitrag erwähnten Rundfunkempfänger sind nach dem gleichen Prinzip konstruiert. Außer den Transistoren enthält das Gerät als Neuerung Dünnschicht-Widerstandskombinationen, welche die Einzelbestückung von einem Teil der Widerstände überflüssig machen. Diese als KME-Bausteine bezeichneten passiven Schaltkreise setzten sich in Rundfunkempfängern nicht in großem Umfang durch. Eine weitere Neuerung stellt die Verwendung von piezokeramischen Filtern dar. Die piezoelektrischen Resonatoren ermöglichen eine schmalbandige Filterung des in der Mischstufe erzeugten Signals. Gegenüber vergleichbaren Spulenfiltern sind sie eine preisgünstige Alternative. Piezokeramische Filter besitzen eine hohe Flankensteilheit und eine geringe Welligkeit im Durchlassbereich. Außer der guten Trennschärfe beim Empfang ergibt sich für die Hersteller von Rundfunkgeräten der Vorteil, dass sich der Abgleichaufwand der Zwischenfrequenz-Stufe verringert.



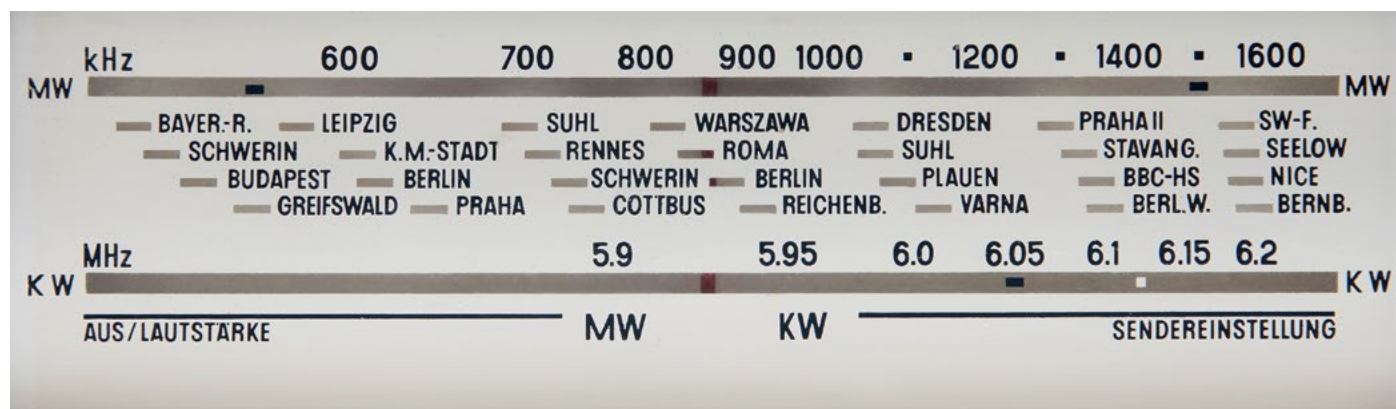
„Bellatrix 579“; Baujahr 1967; erster netzbetriebener Transistor-Heimempfänger aus Sonneberg



Innenansicht „Bellatrix 579“; links der Drehkondensator, in der Mitte die Hauptplatine mit ZF/NF-Teil einschließlich des Oszillator- und Mischertransistors; auf dem Lötösenstreifen rechts neben dem Drehkondensator sind die Oszillator-Bauteile montiert

In der Bedienungsanleitung wird das Radio „Bellatrix 579“ als „ideales Zweitgerät für Küche, Jugendzimmer, Studio oder Büro“ bezeichnet. Der damit verbundene Verzicht auf UKW war einerseits ein Nachteil. Andererseits war das Rundfunkhören auf Mittelwelle Ende der 1960er Jahre noch weit verbreitet, was auch daran lag, dass nicht alle Programme flächendeckend auf UKW zu empfangen waren. Die mit Namen von Senderstandorten und Programmen beschriftete Skala widerspiegelt einen Teil der damaligen europaweit dicht ausgebauten und bis an die Belastungsgrenze dimensionierten Senderlandschaft auf Mittelwelle. Nach welchen Kriterien die Hersteller Skalen beschriftet haben, wird wahrscheinlich ein ewiges Geheimnis bleiben. Beim „Bellatrix 579“ fällt eine Art von Inkonsistenz auf. Während die Beschriftung mit Namen von Senderstandorten überwiegt, sind auch einige Namen von Programmen angegeben. Der Standort „Suhl“ ist auf der Skala zweimal zu finden.

Tatsächlich ist damit die Sendestelle Wachenbrunn gemeint, die auf 692 kHz mit 250 kW Sendeleistung das Programm des Deutschlandsenders (ab 1971 Stimme der DDR) und auf 1052 kHz mit 5 kW das Programm des Berliner Rundfunks übertrug. Die Bezeichnungen „Dresden“ und „Schwerin“ stehen für die Sendestellen Wilsdruff und Wöbbelin in denen wie in Wachenbrunn leistungsstarke 250-kW-Sender installiert waren. Neben weiteren leistungsstarken Sendestellen, wie Leipzig, Prag und Stavanger, sind auf der Skala auch Senderorte zu finden, die aufgrund ihrer geringeren Sendeleistung als Lückenfüller regional begrenzte Gebiete abdeckten. Dazu gehörten neben Wachenbrunn 1052 kHz die Sender Greifswald 557 kHz, Plauen 1079 kHz und Seelow 1546 kHz. Wenig sinnvoll ist die Erwähnung des vergleichsweise leistungsschwachen BBC Home Service (ab 1967 BBC Radio 4), während eine der leistungsstarken Frequenzen des BBC World Service unerwähnt bleibt.



Skala des Heimempfängers „Bellatrix 579“

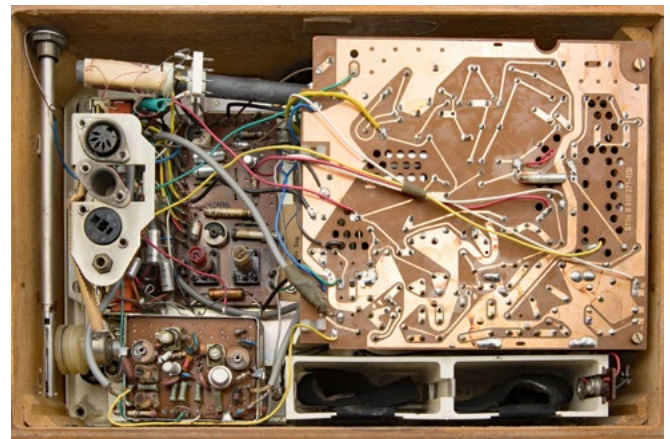
In Anbetracht des störungsanfälligen Rundfunkempfangs auf Kurzwelle war es eine gute Entscheidung, den Empfangsbereich des „Bellatrix 579“ auf das 49-m-Band zu beschränken, wodurch sich die Sender auf der gespreizten Skala einfacher abstimmen ließen. Der Preis von 187,- Mark betrug etwa die Hälfte von dem, was kurze Zeit später ein Transistor-Gerät mit UKW kostete. Im Jahr 1967 dürfte es zunächst darum gegangen sein, mit geringem materiellem Aufwand den Einstieg in die Transistorisierung von Standgeräten zu schaffen. In einer Mitteilung des Herstellers heißt es: „Für dieses billige AM-Heimgerät gibt es praktisch keinen Vorläufertyp, so konnte auch nicht auf vorhandene Teile zurückgegriffen werden.“ [1]

Kofferradio mit UKW

Eine Ausnahme von der Festlegung auf Heimempfänger ließ nicht lange auf sich warten. Noch im Jahr 1967 präsentierte der VEB Stern-Radio Sonneberg auf der Leipziger Herbstmesse ein Kofferradio. Das für den Empfang von UKW, Mittel- und Kurzwelle geeignete Gerät „Sonneberg 6000“ bot mit einer Vertikalskala und vertikal angeordneten Tasten für die Bereichsumschaltung eine für damalige Verhältnisse unkonventionelle Gestaltung. Die ursprüngliche Bestückung enthielt elf Transistoren aus DDR-Fertigung. In vielen Geräten wurden später einer oder beide Transistoren der UKW-Baugruppe durch sowjetische Typen ersetzt. Die Bauform als Kofferradio bedeutete keinen Verzicht auf eine vollständige technische Funktionalität als Überlagerungsempfänger. Die UKW-Baugruppe, bestehend aus HF-Vorstufe und einem selbstschwingenden Mischer einschließlich eines zweikreisigen ZF-Bandfilters, setzt das frequenzmodulierte Signal auf die allgemein übliche Zwischenfrequenz (ZF) 10,7 MHz um. Der ZF-Verstärker, dreistufig für UKW und zweistufig für Mittel- und Kurzwelle, gewährleistet mit zwei zweikreisigen Spulen-Bandfiltern die erforderliche Trennschärfe. Für die Demodulation des UKW-Signals wird ein Verhältnisgleichrichter verwendet. Die NF-Baugruppe, bestehend aus Vorstufe, Treiber und Leistungsstufe, ist unter Berücksichtigung der Batteriekapazität für maximal 800 mW Ausgangsleistung ausgelegt. Eine schaltungstechnische Neuerung bei RFT-Geräten war die eisenlose Endstufe, in welcher der Ausgangstransformator dadurch entfällt, dass als Lastwiderstand die Impedanz der Lautsprecherschwingspule dient. Für ein Kofferradio nicht selbstverständlich war die Anschlussmöglichkeit für eine auf UKW und Kurzwelle wirksame Autoantenne. Weitere Buchsen an der Rückseite ermöglichen den Anschluss von Tonabnehmer/Tonband, externem Lautsprecher und Ohrhörer.



Kofferradio „Sonneberg 6000“, produziert ab 1967



Innenansicht des Kofferradios „Sonneberg 6000“; links unten die UKW-Baugruppe, darüber die HF-Platine, rechts die Leiterseite der ZF/NF-Platine



Die UKW-Baugruppe hat eine Grundfläche von 6 cm x 5 cm; als Vorstufen-Transistor wird bei diesem Gerät der sowjetische Typ GT 322 verwendet (Pfeil)

In der Bedienungsanleitung heißt es: „Hier präsentiert sich ein zeitgerechtes Transistorgerät, dessen empfangstechnische Ausstattung mit der eines Heimgerätes wetteifert.“ Dieser werbetechnisch formulierte Satz war bezüglich der Schaltungstechnik zutreffend. Weniger zutreffend war eine Aussage in einer Gerätebeschreibung des Herstellers. „Der AM/FM-Koffersuper ‚Sonneberg 6000‘ wurde speziell auf Grund von Kundenwünschen nach einem preiswerten Koffersuper mit UKW-Teil entwickelt.“ [2] Der Koffersuper kostete 475,- Mark. Im Jahr 1968 betrug das Durchschnittseinkommen von vollbeschäftigten Arbeitern und Angestellten 700,- Mark [3], so dass sich das Prädikat „preiswert“ relativiert. Neben dem transportablen Modell „Sonneberg 6000“ gab es eine Variante „Mascot“ mit pultförmigem Gehäuse und eingebautem Netzteil, die als Tisch- und Wandgerät geeignet war.

Bez.	Typ	Material/ Dotierung	Funktion
T 1	GF 132	Ge/PNP	FM-Vorstufe
T 2	GF 131	Ge/PNP	FM-Oszillator/Mischer
T 301	GF 130	Ge/PNP	AM-Oszillator/Mischer 1. FM-ZF-Stufe
T 401	GF 130	Ge/PNP	1. AM-ZF-Stufe 2. FM-ZF-Stufe
T 402	GF 130	Ge/PNP	2. AM-ZF-Stufe 3. FM-ZF-Stufe
T 403	GC 117	Ge/PNP	NF-Impedanzwandler
T 404	GC 117	Ge/PNP	NF-Vorstufe
T 405	GC 117	Ge/PNP	NF-Treiber
T 406	GC 117	Ge/PNP	Stabilisierung Ruhestrom
T 407	2 GC 301	Ge/PNP	Endstufe
T 408	2 GC 301	Ge/PNP	Endstufe

*Transistorbestückung des Kofferradios „Sonneberg 6000“;
Bezeichnungen laut Schaltplan; FM = Frequenzmodulation (UKW),
AM = Amplitudenmodulation (Mittel- und Kurzwelle)*

Erste Heimempfänger mit UKW

1968/69 beginnt in Sonneberg endlich die Zeit der Transistor-Heimempfänger mit UKW. Konstruktiv sind die Standgeräte der mittleren Größe so ausgeführt, dass UKW-Baugruppe, Drehkondensator, Platinen und Tastensatz auf dem Chassis befestigt sind. In manchen Geräten bildet auch das Netzteil eine komplette Einheit mit dem Chassis.

Die Modellreihen „Transmira 6100“ und „Transmiranda 6200“ lassen schon an der Nummerierung erkennen, dass eine Verbindung zum „Sonneberg 6000“ besteht. Tatsächlich weisen Transistor-Bestückungen, Schwingkreis-Anzahl und die damit verbundenen Schaltungen weitgehende Gemeinsamkeiten auf. Beispielsweise sieht die Schaltung ohne Dimensionierungsangaben der UKW-Baugruppen von „Sonneberg 6000“ und „Transmira 6100“ bezüglich der verwendeten Bauelemente gleich aus. In den Heimempfängern wird jedoch als Oszillator/Mischtransistor der Typ GF 181 verwendet, welcher eine etwas höhere Mischleistungsverstärkung als der Typ GF 131 hat. Die UKW-Baugruppe der „Transmiranda“-Modelle hat als Neuerung eine zuschaltbare automatische Frequenzregelung (AFC). In den ZF-Stufen und in der NF-Baugruppe sind bis zum Treiber die gleichen Transistoren mit jeweils den gleichen Schaltungsprinzipien zu finden. Auch die ZF-Bandfilter sind unverändert geblieben. Aufgrund der Netzspannungsversorgung konnten die Endstufen mit Leistungstransistoren bestückt werden, so dass sich die Ausgangsleistung von 800 mW beim „Sonneberg 6000“ auf 1 W beim „Transmira“ und 1,5 W beim „Transmiranda“ erhöhte. Anstelle einer Klangtaste, bei deren Betätigung hohe Tonlagen beschnitten werden, hat die „Transmiranda“-Modellreihe eine Klangregelung. Die damit frei gewordene Taste des fünfteiligen Tastensatzes konnte mit der AFC-Funktion zur Empfangsstabilisierung belegt werden.

Die beiden Reihen 6100 und 6200 haben den Nachteil, dass bei den meisten Modellen kein Empfang auf Langwelle möglich ist. „Transmiranda 6290“ bietet Langwelle, jedoch keine Kurzwelle. In einer Zeit ohne Internet war der Hörfunk das Fenster zur Welt. Der Verzicht auf einen Empfangsbereich war zu jener Zeit immer mit Einschränkungen von Empfangsmöglichkeiten verbunden. Unter anderem waren die deutsch-deutschen Antipoden Deutschlandfunk und Deutschlandsender störungsarm auf Langwelle zu empfangen. Andere Langwellen-Klassiker waren BBC, Danmarks Radio, France Inter und Radio Mayak. Außer den zusätzlichen Bauteilen für HF-Stufe und Oszillator wäre für einen vierten Frequenzbereich eine andere Konstruktion des Tastensatzes erforderlich gewesen. Die Gehäuse der Standgeräte hätten für eine Erweiterung ausreichend Platz geboten. Im Unterschied zu heutigen Geräten waren Anschlüsse für externe Antennen bei Heimempfängern allgemein üblich, so dass der Empfang auf allen Frequenzen optimiert werden konnte. Die Modelle „Transmira“ kosteten 364,- Mark, die „Transmiranda“-Radios kosteten je nach Ausführung 431,- bis 461,- Mark.

Import von Transistoren

Anfang der 1970er Jahre wird die 6000er-Reihe mit den Modellen „Primat“, „Elegant“ und „Apart“ fortgesetzt. Wie auch bei anderen Modellen haben die

Inlands-Ausführungen einen UKW-Bereich von 87,5 bis 100 MHz, während die (West-)Export-Ausführungen einen Bereich von 88 bis 108 MHz empfangen können. Der an der Vorderfront für die Skala zur Verfügung stehende Platz wurde optimal genutzt. Die Radios dieser Modellreihe haben eine gut erkennbare Skala mit einer europaweiten Auswahl von Sendestellen. Zufall oder wirtschaftliches Kalkül: Mit Göteborg 980 kHz, Hörby 1178 kHz und Falun 1223 kHz sind gleich drei leistungsstarke schwedische Sender vertreten. In der Service-Anleitung der Reihe 6300 heißt es: „Die Geräte ‚Primat‘, ‚Elegant‘ und ‚Apart‘ sind in ihrer elektrischen Konzeption der Geräteserie ‚Transmiranda‘ gleichzusetzen.“ Außer einer leicht geänderten Gehäusegestaltung wurde der Langwellen-Empfangsbereich hinzugefügt. Möglich wurde dies durch eine geänderte Funktionalität des in seiner Bauform beibehaltenen Tastensatzes. Was in der Service-Anleitung verbal nicht erwähnt wird, offenbart ein Blick in die Stückliste: Mit Ausnahme der Endstufentransistoren sind zu den Germanium-Transistoren des VEB Halbleiterwerk Frankfurt/Oder alternative sowjetische Typen angegeben. In den Schaltplänen sind ausschließlich die sowjetischen Typen erwähnt. Die Heimempfänger der Reihe 6300 kosteten 445,- bis 465,- Mark. Der hohe Importanteil von Transistoren, hauptsächlich aus der Sowjetunion, ist in den 1970er Jahren auch in anderen Radiogeräten des RFT-Verbandes zu finden.



Heimempfänger „Transmiranda 6230“; ab 1968; erstes Sonneberger Modell mit AFC



Heimempfänger „Elegant 6360“; ab 1971; Empfang von UKW, Lang-, Mittel- und Kurzwelle



Informativ gestaltete Skala des „Elegant 6360“

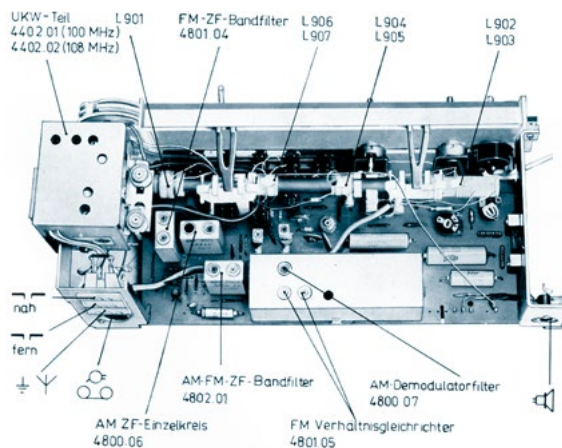
Erfolgreiche „Prominent“-Reihe

1972 beginnt in Sonneberg die Produktion der Modellreihe „Prominent“, die mit ihrer Variantenvielfalt zu einem Verkaufserfolg in Ost und West wird. Nach dem Kofferradio „Stern Dynamic“ des VEB Stern-Radio Berlin wird kurze Zeit später in Sonneberg mit dem Modell „Prominent 200“ das zweite Gerät eines einheitlichen Systems für Heimempfänger und transportable Empfänger angeboten. Dabei ging es darum, Schaltungstechnik, Konstruktionsprinzipien und Fertigungstechnologie weitgehend zu vereinheitlichen. Generell neu war dieses Vorgehen nicht, weder im internationalen Maßstab noch innerhalb der RFT-Betriebe.

UKW-Baugruppe und HF/ZF-Teil der „Prominent“-Radios unterscheiden sich nicht wesentlich von der Reihe 6300. Es können alle vier Frequenzbereiche empfangen werden. Eine Neuerung stellt der gesamte NF-Teil dar. Für Vorstufe und Treiber kommen erstmalig bei Sonneberger Radios Silizium-Transistoren zur Anwendung. Die Komplementär-Endstufe besteht aus je einem Germanium-PNP- und einem Germanium-NPN-Transistor, die aufeinander abgestimmt sind. Mit dem neuen NF-Teil wird eine Reduzierung des als Klirrfaktor bezeichneten prozentualen Gehaltes von Verzerrungen erreicht. Außerdem wird von den Lautsprechern ein größerer Frequenzumfang wiedergegeben. Neu ist weiterhin ein platzsparender Tastensatz „System Petrick“ (BRD). Die amplitudenmodulierten Frequenzbereiche können über eine eingebaute Ferritantenne oder über eine Außenantenne empfangen werden. Als dritte Möglichkeit kann die eingebaute UKW-Hilfsantenne auch für die AM-Bereiche genutzt werden, was dadurch ermöglicht wird, dass die UKW-Antennenbuchse über eine auf niedrigen Frequenzen als Verlängerungsspule wirkende Drossel mit der AM-Antennenbuchse verbunden ist.



Die 1972 hergestellten Heimempfänger der Serie „Prominent 200“ haben eine häufig verwendete Schaltungstechnik; die Gestaltung der Stationsnamen auf der Skala ist bei diesem Modell wenig aussagefähig



Innenaufbau des „Prominent 200“ ohne Netzteil; Foto aus der Service-Anleitung

Als misslungen kann man die in den meisten Inlandsgeräten zu findende schwarze Plastskala bezeichnen. Im Unterschied zur Reihe 6300 sind ausschließlich „Ostsender“ in geringer Anzahl aufgeführt. Radio Wolga, ein russischsprachiges Programm für die sowjetischen Streitkräfte in der DDR, das auf Langwelle 263 kHz übertragen wurde, ist auf der Skala an falscher Stelle markiert, so dass nicht einmal klar ist, welche Stationsnamen zu welchen Frequenzbereichen gehören. Das Erscheinungsbild dieser Skala wirkt wie lustlos hingeschludert. Umgekehrt enthält die Skala der Export-Version bis auf eine Ausnahme ausschließlich „Westsender“. Eine derartige Ost-West-Abschottung ist auf Radioskalen anderer europäischer Hersteller nicht zu finden.



Das für die Quelle AG hergestellte Radio „Universum W4655“ basiert auf dem ab 1973 erhältlichen Modell „Prominent de Luxe 210“



Teil der Rückwand des „Universum W4655“; der Sonneberger Hersteller wird nicht erwähnt

Bez.	Typ	Hersteller	Material/ Dotierung	Funktion
T 102	GT 313	Sowjetunion	Ge/PNP	FM-Vorstufe
T 102	GT 322	Sowjetunion	Ge/PNP	FM-Oszillator/Mischer
T 1	GT 322	Sowjetunion	Ge/PNP	AM-Oszillator/Mischer 1. FM-ZF-Stufe
T 201	GT 322	Sowjetunion	Ge/PNP	1. AM-ZF-Stufe 2. FM-ZF-Stufe
T 202	GT 322	Sowjetunion	Ge/PNP	2. AM-ZF-Stufe 3. FM-ZF-Stufe
T 401	SC 207	HLW Frankfurt/O.	Si/NPN	NF-Vorstufe
T 402	SC 206	HLW Frankfurt/O.	Si/NPN	NF-Treiber
T 403	AC 188	Tungsram/Ungarn	Ge/PNP	Komplementär-Gegentakt-Endstufe
T 404	AC 187	Tungsram/Ungarn	Ge/NPN	Komplementär-Gegentakt-Endstufe

Transistorbestückung der „Prominent“-Reihe; Bezeichnungen laut Schaltplan

Die „Prominent“-Reihe gab es auch in den Varianten „de Luxe“ mit zwei Lautsprechern und „Duo“ mit Kassettenteil. Bis Ende der 1970er Jahre lief die Produktion von Radios der „Prominent“-Reihe in Sonneberg. In den 1970er Jahren übernahmen auch andere Hersteller einzelne „Prominent“-Typen als zusätzliche Konsumgüterproduktion.

Radios für Stereoempfang

Neben der Produktion von relativ einfach aufgebauten Radios der Kategorie „Mittelsuper“ begann in den 1970er Jahren in Sonneberg die Herstellung von deutlich aufwändiger konstruierten Radios für Stereoempfang. Darüber berichten wir in der nächsten Ausgabe des ON.LINE.

Literatur:

- [1] K. Urbigkeit, W. Schiller: Transistorheimgerät für Netzbetrieb Bellatrix, radio und fernsehen, 16/1967
- [2] Kurt Hausdörfer: AM/FM-Koffersuper „Sonneberg 6000“ und Heimempfänger „Mascot“, radio fernsehen elektronik, 21/1968
- [3] Statistisches Jahrbuch 1969, Staatsverlag der DDR 1969

Der Erfurter Transistor OC 846 A

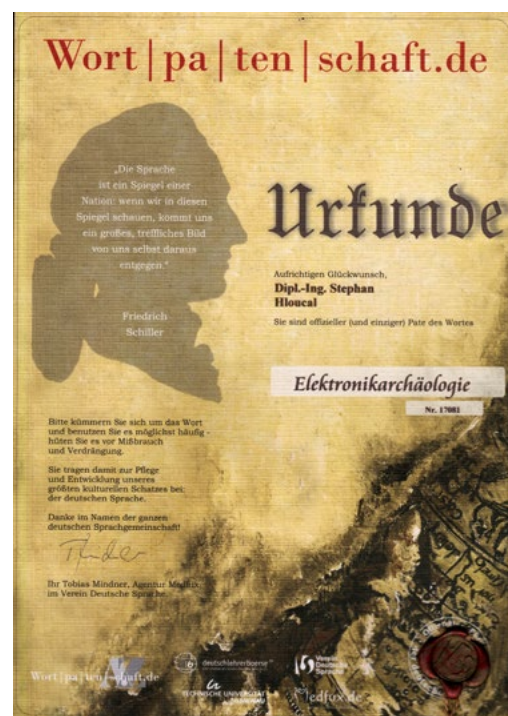
Ein Beitrag zur Geschichte der Halbleiterentwicklung in Thüringen

Stephan Hloucal, Erfurt

Elektronikarchäologie

Gelegentlich erhalten wir Kartons voller elektronischer Bauelemente, die eigentlich im Schrottcontainer eines Wertstoffhofes landen sollten. Funkamateure und Elektronikbastler verfügten früher, als manche elektronischen Geräte und Schaltungen für den Privatgebrauch noch selber zusammengelötet werden mussten, über einen gut sortierten Vorrat an aktiven

und passiven elektronischen Bauelementen. Was nun nicht mehr gebraucht und entsorgt werden soll, ist für uns eine wahre Fundgrube. Aus diesem Grund hat der Autor das Wort „Elektronikarchäologie“ kreiert und dafür die Wortpatenschaft übernommen, eine Aktion, die 2006 vom Verein Deutsche Sprache e.V. initiiert worden war. Aus einer solchen „Wunderkiste“ konnten wir kürzlich Transistoren vom Typ OC 830 und OC 831 bergen, die eine besondere industriehistorische Bedeutung haben. Der OC 831 trägt das Herstellerkennzeichen WBN, was für VEB Werk für Bauelemente der Nachrichtentechnik (WBN) Teltow steht. Das Herstellerkennzeichen HWF des OC 830 verweist auf den VEB Halbleiterwerk Frankfurt/Oder (VEB = Volkseigener Betrieb). Tiefer gehende Recherchen führten in die Halbleitergeschichte der 1950er und frühen 1960er Jahre und auch in den VEB Funkwerk Erfurt (FWE).



Urkunde über die Wortpatenschaft „Elektronikarchäologie“



Blick in eine Entsorgungskiste mit elektronischen Bauelementen, Sammlung Halbleitertechnik

Zur Vorgeschichte

Zu Beginn der 1950er Jahre begannen im VEB Werk für Bauelemente der Nachrichtentechnik (WBN) Teltow Forschungsarbeiten zu Halbleiterbauelementen. In der WBN-Forschungsabteilung, die von Dr. Matthias Falter geleitet wurde, konnten 1953 erste Spitzentransistoren hergestellt werden. Zwar gelten die US-Amerikaner Shockley, Bardeen und Brattain (1947/48) als Erfinder des Transistoreffekts, doch daran gibt es Zweifel. Vermutlich konnten sie ihre Erfindung auf grundlegenden deutschen Forschungsleistungen aufbauen. Im Zuge der raschen Entwicklung der Rundfunk- und Nachrichtentechnik waren in den 1930er Jahren halbleitende Bauelemente als Gleichrichter, auch Richtleiter genannt, auf der Basis von Kupferoxydul, Selen, Pyrit oder Bleiglanz, im Einsatz. Der deutsche Physiker Walter Schottky hatte die physikalischen Eigenschaften von Halbleitern und die an Grenzflächen zwischen Metallen und Halbleitern erforscht. Die von Schottky entwickelten Theorien und Modellvorstellungen sind die wichtigsten wissenschaftlichen Grundlagen der Halbleiterphysik und der Transistortechnik. Seit den 1930er Jahren wurde intensiv an Funkmessverfahren und den dafür notwendigen elektronischen Bauelementen geforscht. Vor allem für das im II. Weltkrieg beim deutschen und englischen Militär angewendete Radar im cm-Wellenbereich, welches zur frühzeitigen Erkennung und Ortung von Schiffen und Flugobjekten eingesetzt wurde, waren senderseitig leistungsfähige Hohlraum-

magnetrons und empfängerseitig hochempfindliche und rauscharme Detektoren, auch Richtleiter genannt, zu entwickeln gewesen. In diesem Zusammenhang spielten die deutschen Wissenschaftler Dr. Herbert Mataré und Dr. Heinrich Welker eine besondere Rolle. Herbert Mataré war bei Telefunken maßgeblich an der Entwicklung der Detektorserie ED 700 bis ED 705 beteiligt, die ab 1944 in Serie produziert und im „Berlin“-Gerät, FuG224, einem Rundstrahl-Radargerät der Deutschen Wehrmacht, zum Einsatz kamen. [18] Den gleichrichtenden Kontakt bildete eine Ringschleife aus Molybdän-Draht, die auf ein mit einer dünnen Siliziumschicht versehenes Graphit-Stäbchen gedrückt und nach Einstellung fest verschraubt war. Damit war eine Gleichrichtung von ultrahohen Frequenzen bis etwa 3 GHz möglich.



Konvolut Detektoren ED 705. Im Bild unten sind die silizierte Kohle und die Ringschleife gut erkennbar, Sammlung Halbleitertechnik

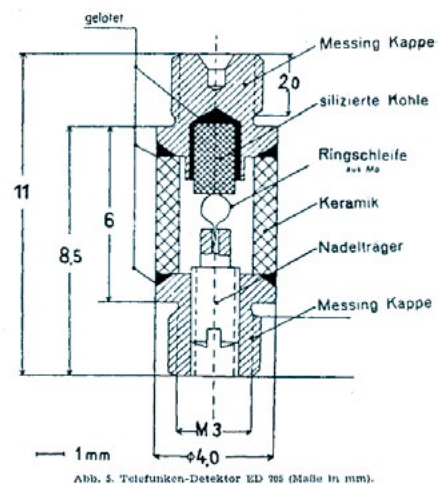


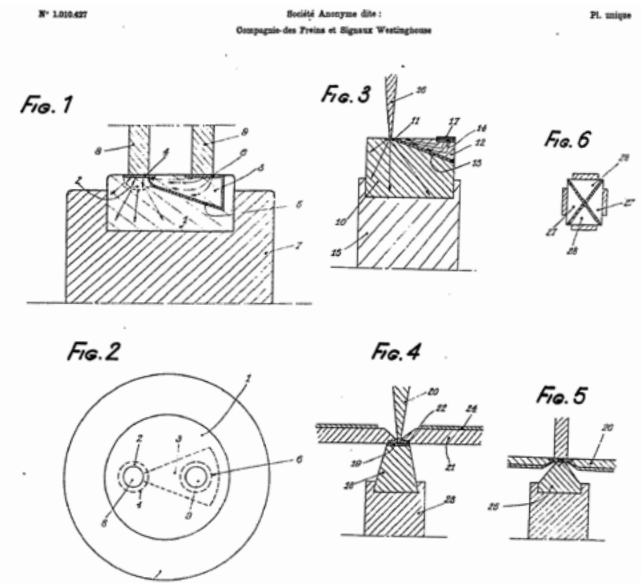
Abb. 5. Telefunken-Detektor ED 705 (Maße in mm).



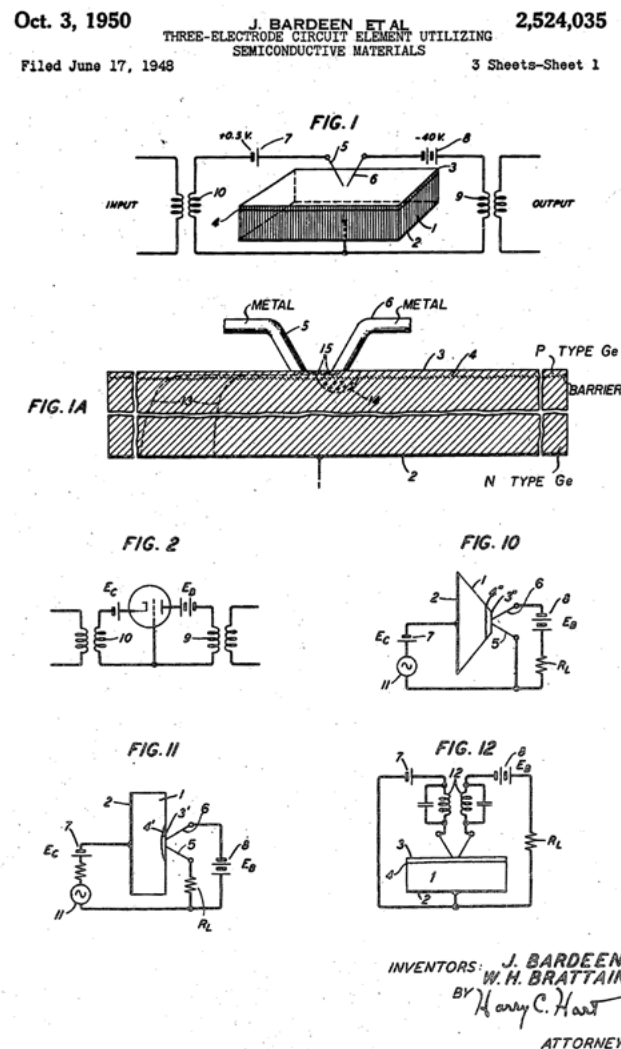
Maßstäblicher Nachbau des ersten (amerikanischen) Transistors, Peter Wächtler, 2010, Sammlung Halbleitertechnik

Bei seinen Versuchen zur Rauschkompensation experimentierte Mataré außerdem mit zwei Metallspitzen auf einem Silizium-Kristall als Anoden und dem Kristall als Kathode, wobei er versuchte, mit der Schottky-Sperrschicht der einen Spitze die der anderen Spitze zu steuern, was ihm auch gelang. Das waren die ersten Versuche einer Drei-Elektroden-Verstärker-Anordnung, die man als Duo-Diode oder im weitesten Sinn einen Spitzen-Transistor nennen konnte, obgleich es letzteren Begriff damals noch nicht gab. Zumindest bildeten diese Beobachtungen die wesentlichen Grundlagen für den Verstärkungseffekt, den Mataré seinerzeit „Interferenz“ nannte, der bei den späteren Punktkontakt- bzw. Spitzentransistoren zu beobachten und erwünscht war. 1944, in den letzten Kriegswochen, wurde das Telefunken-Labor von Mataré, von Leubus in Niederschlesien nach Böhlen bei Großbreitenbach in Thüringen verlegt, wo jedoch bis zum Kriegsende verwertbare Ergebnisse zu „Interferenzen“ an den Kristallduodioden nicht mehr zustande kamen. Amerikanische Truppen schlossen das Labor im Frühjahr 1945. [3] Es ist anzunehmen, dass auf diese Weise wichtige wissenschaftliche Unterlagen der Telefunken-Halbleiterforschung nach Amerika gelangten, auf deren Grundlage Shockley, Bardeen und Brattain 1947 den Spitzentransistor entwickelten, so die noch unbelegte Vermutung.

Auch Heinrich Welker entwickelte bei Siemens Richtleiter, allerdings auf Germanium-Basis, die in großen Stückzahlen als Hochfrequenz-Gleichrichter in Funk- und Radarempfangsgeräten eingesetzt wurden. Die Wege beider Wissenschaftler kreuzten sich, als Welker 1947 ein Angebot der CFS Westinghouse in Alnaysous-Bois bei Paris annahm, wo Mataré seit 1945 seine Forschungen an den Interferenz-Effekten der Duo-Dioden weiterführte. Auf der Grundlage von sehr reinem Germanium, welches Welker herstellen konnte, gelang Anfang 1948 der Nachweis des Transistor-Verstärkereffekts und damit des ersten funktionsfähigen französischen Transistors, „Le Transistron“ genannt. Beide Wissenschaftler meldeten ihn am 13. August 1948 zum Patent an.

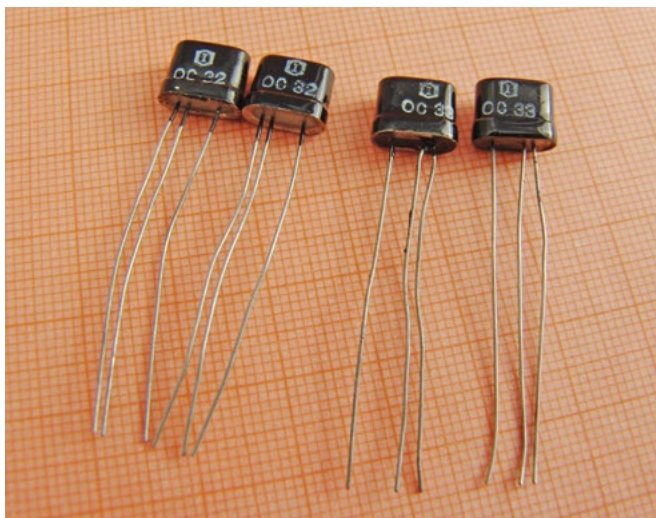


Aus der Patentschrift „Le Transistron“



Aus der Patentschrift des amerikanischen Transistors

Die Patentanmeldung des amerikanischen Transistors erfolgte wenige Wochen früher, am 27. Juni 1948. 1951 gründete Herbert Mataré in Düsseldorf die Firma Intermetall, die weltweit erste Firma, die großserienmäßig Dioden und Transistoren herstellen konnte.



Legierungstransistoren OC 32 und OC 33, Intermetall, 1954, aus dem wissenschaftlichen Nachlass von Prof. Dr. rer. nat. Heinz Beneking, Sammlung Halbleitertechnik

1954 wurde Intermetall an die US-amerikanische Clevite Corporation verkauft. [4] Punktkontakttransistoren, auch Spitzentransistoren genannt, wurden ab 1951 in den USA von der Western Electric Corporation serienmäßig hergestellt. [5] Die Bell Laboratories, die Forschungseinrichtung der AT&T, hatten 1950 den Germanium-Legierungstransistor, auch Flächentransistor genannt, entwickelt, der sich als wesentlich zuverlässiger erwies und den Spitzentransistor rasch ablöste. Im April 1952 fand in den USA das berühmte Transistor-Technologie-Symposium der Western Electric, einer Tochtergesellschaft der AT&T, statt. Gegen Zahlung einer Patentgebühr von 25.000 US\$ stellten die Wissenschaftler der Bell-Laboratories die neuesten Erkenntnisse zur Transistortheorie, zu den Herstellungsverfahren und erste Schaltungsanwendungen vor. Außerdem wurden Einblicke in eine hochmoderne Transistor-Fabrik der Western Electric in Allentown, PA, gewährt. Mehr als 150 Wissenschaftler und Ingenieure aus renommierten internationalen Elektronikunternehmen waren dazu eingeladen. Auch von der deutschen Siemens & Halske AG konnten vier Wissenschaftler, darunter Prof. Dr.-Ing. Heinrich Welker, an der neuntägigen Veranstaltung teilnehmen. Alle Teilnehmer, ausschließlich aus westlichen Ländern, wurden zur Geheimhaltung verpflichtet. Die USA wollte den Transfer zukunftssträchtiger Hochtechnologie in den Ostblock verhindern, daher waren auch Teilnehmer von dort nicht zugelassen. [6] [7]

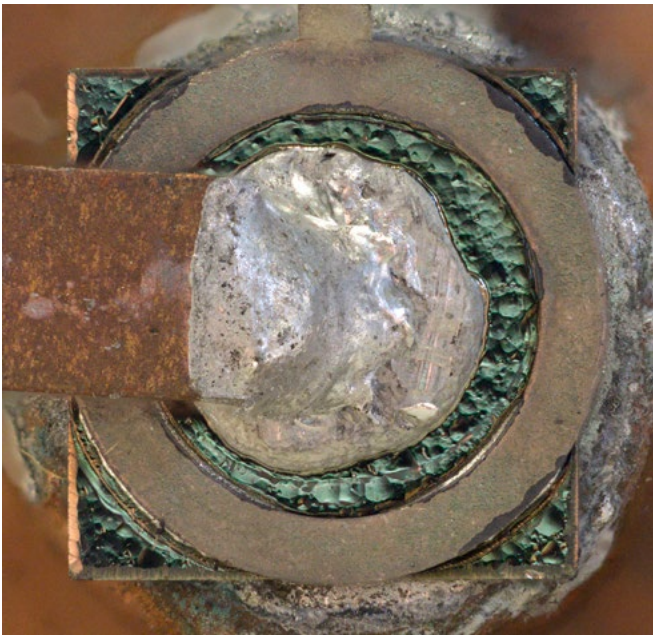
Herstellung von hochreinem Germanium

Halbleiter sind Elemente und chemische Verbindungen, die sich hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften zwischen den metallischen Leitern und den Nichtleitern (Isolatoren) einordnen. Die Basis der frühen Halbleitertechnik war zunächst Germanium. Gegenüber Silizium hat es den Vorteil eines geringeren Schmelzpunkts von etwa 936 °C. Silizium dagegen schmilzt bei 1.420 °C. Dadurch lässt es sich leichter mit hoher Reinheit herstellen. Hierfür wird hochreines Germaniumdioxid GeO_2 benötigt, welches auf chemischem Wege aus Erzen, z.B. Germanit und durch chemische Anreicherung über Germaniumtetrachlorid GeCl_4 , gewonnen wird. In einer Wasserstoffatmosphäre wird das GeO_2 bei 650 °C–800 °C zu Germanium reduziert und anschließend in einem Hochvakuumerschmelzprozess bei etwa 1.000 °C zu polykristallinem Germanium erschmolzen. Da dessen Reinheitsgrad noch nicht ausreicht, muss dieser über ein physikalisches Verfahren erhöht werden. Physikalische Reinigungsmethoden nutzen den Effekt des Verteilungskoeffizienten der Fremdatome aus, um in Hochtemperatur-Kristallzüchtungsverfahren eine Reinheit zu erzielen, der die Fremdatom-Konzentration von anfänglich eins-zu- 10^6 Ge-Atome, auf etwa eins-zu-fünf $\times 10^9$ Ge-Atome vermindert. Die in langen Stangen gezogenen Germanium-Einkristalle werden in Scheiben geschnitten, deren Oberfläche durch planparalleles Läppen und chemisches Polieren für die Herstellung der Ge-Plättchen vorbereitet wird. Aus den Scheiben werden rechteckige oder quadratische Plättchen geschnitten, deren Größe von der Transistorverlustleistung abhängig ist. [1] [8]

Durch gezielte Verunreinigung (Dotierung) des hochreinen Germaniums, z.B. durch Diffusion, können die für den Verstärkungseffekt erforderlichen elektrischen Eigenschaften eingestellt werden. Als Dotierungsmaterial sind Indium, Antimon, Bor, Phosphor, Galliumarsenid bzw. andere Elemente der Gruppe III und IV des Periodensystems geeignet. Grundsätzlich beruht die Wirkungsweise von Dioden und Transistoren auf dem Verhalten der Grenzschichten zwischen p- und n-Gebieten eines Halbleiters. Auf die Darstellung der quantenmechanischen Vorgänge in Halbleitern und mathematischer Formeln soll jedoch in den weiteren Ausführungen verzichtet werden. Es wird auf einschlägige Fachliteratur verwiesen.

Oberflächenbehandlung von Germanium für Transistoren

Für die Transistorenfertigung werden Ge-Plättchen mit sehr hoher Oberflächengüte benötigt. Die Oberflächen werden zunächst durch Läppen mechanisch geschliffen und poliert, wodurch planparallele Flächen mit der gewünschten Dicke hergestellt werden. Die für die Qualität des Diffusionsprozesses benötigte Oberflächengüte lässt sich jedoch nur mit anschließenden chemischen Ätzverfahren erzielen. Mit einer Wasserstoffsuperoxyd-Ätzlösung, bestehend aus einem Teil Wasserstoffsuperoxyd (30 %), einem Teil Flusssäure (48 %) und vier Teilen destilliertem Wasser, werden optimale Ergebnisse erzielt. Das H_2O_2 wirkt dabei als oxydierende und H_2F_2 als oxydlösende Komponente. Es entsteht bei mikroskopischer Betrachtung die typische dachziegel- oder schuppenförmige, drei- oder sechseckige Oberflächenstruktur, was auch auf dem Bild unten gut zu erkennen ist. Eine andere Möglichkeit ist das chemische Polieren mit CP-4-Ätzlösung, die bei der FWE-Entwicklung jedoch noch keine Rolle gespielt haben dürfte. [12], [19]



Poliergeätzte Oberflächenstruktur des OC 846 A (grüne Struktur),
Foto: Richard Kaußler (FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)

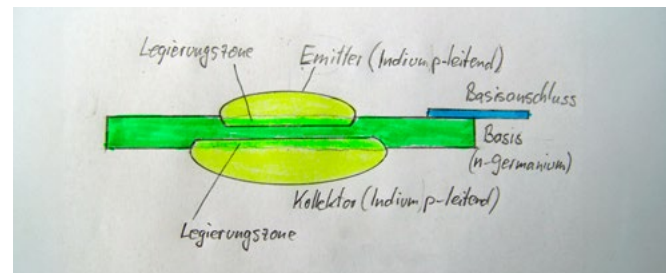
Aufbau und Legierung der pn-Übergänge eines Flächentransistors

Wird auf die so bearbeitete Oberfläche des n-leitenden Germanium-Plättchens eine kleine Perle Indium aufgebracht und beides auf die Legierungstemperatur zwischen 500 °C bis 700 °C erhitzt, so dringt flüssiges Indium in das Germanium ein und löst dieses etwas auf. Bei der Abkühlung bildet sich eine Rekristallisationsschicht, bei der Indiumatome in das Germaniumkristallgitter eingebaut werden und eine stark p-leitende Schicht bilden. Das ist der gewünschte pn-Übergang. Dieser Prozess läuft zweckmäßigerweise in einer Schutzgasatmosphäre oder unter Vakuum ab.

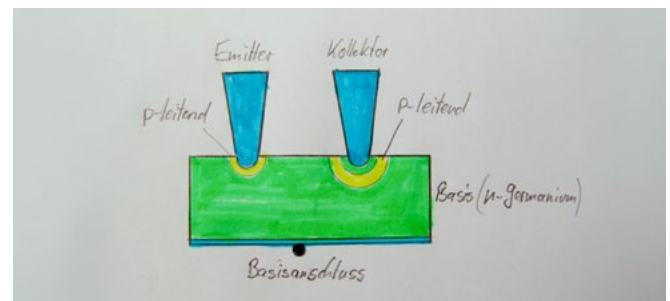
Für einen pnp-Transistor sind auf gleicher Weise zwei pn-Übergänge herzustellen, was in einem oder zwei Arbeitsgängen auf beiden Seiten des Ge-Plättchens realisiert wird. Zwischen den beiden p-Gebieten bildet sich eine sehr dünne n-leitende Zone, die den Basisanschluss darstellt. Die p-leitenden Indiumperlen dienen dann im weiteren Prozess der Herstellung des Kollektor- und Emitterschlusses im Transistor.

Aufbau und pn-Übergänge eines Spitzentransistors

Die früheste Transistorform, ist die des Spitzentransistors. Sie unterscheidet sich vom Flächentransistor geometrisch dadurch, dass auf die n-leitende Kristalloberfläche durch das Aufsetzen einer Emitterspitze sich ein pn-Übergang bildet und die pn-Übergangsbildung zwischen der Basis und der Kollektorspitze mittels eines kurzen Stromstoßes formiert wird, wodurch Metallatome aus dem Kollektormaterial in den Kristall diffundieren. Diese Transistorform hat viele Ähnlichkeiten mit den oben erwähnten Richtleitern und Kristalldetektoren.



pn-Übergang eines Legierungstransistors

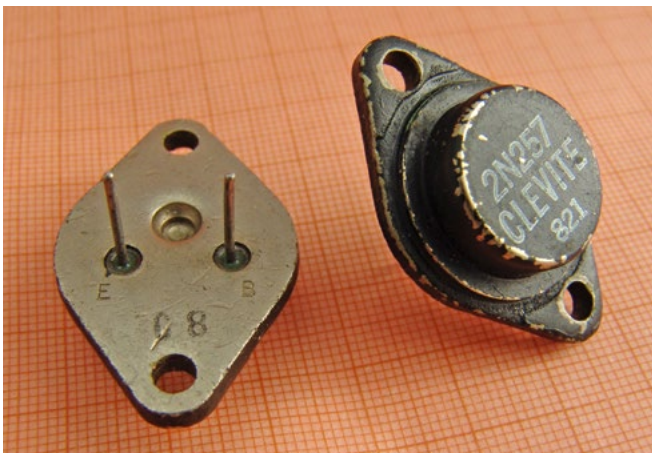


pn-Übergang eines Spitzentransistors

Entwicklung des Flächentransistors OC 846 A

Als 1959 im VEB Funkwerk Erfurt (FWE) die Produktion von Senderöhren eingestellt und in den VEB Werk für Fernsehelektronik (WF) Berlin verlagert wurde, waren hochqualifizierte Ingenieure für neue Aufgaben frei. Man entschloss sich daher im Zentrallaboratorium für Empfängeröhren (ZLE) die Entwicklung von Germanium-Transistoren aufzunehmen. Die Arbeiten begannen 1960 und endeten nach zwei Jahren, wobei ein 12-W-Typ und ein 25-W-Typ parallel entwickelt wurden. Die Entwicklungskosten waren mit 670.000 DM für die 12 W Transistoren und 615.000 DM für den

25-W-Typ veranschlagt. Im FWE waren seit 1938 Empfängerröhren und ab 1948 Oszillographen-, Radar-, Polarkoordinaten-, Sende- und Sichtspeicherröhren sowie elektronische Messgeräte entwickelt und teilweise bis 1991 produziert worden. Das ZLE war die ingenieurtechnische Ideenschmiede und Entwicklungsstelle für Elektronen- und Kathodenstrahlröhren sowie den dazu erforderlichen Technologien und Produktionsausrüstungen. Elektronenröhrenspezialisten des ZLE, die keine Erfahrungen auf dem Gebiet der Halbleitertechnik besaßen, begannen nun Leistungstransistoren zu entwickeln. Ein ehrgeiziges Vorhaben, galt es doch einen Entwicklungsvorsprung von mehr als drei Jahren einzuholen, denn die US-amerikanische Clevite Corporation hatte mit dem 2N527 schon 1957 einen pnp-Ge-Leistungstransistor mit 25 W Verlustleistung im TO-3 Gehäuse auf den Markt gebracht. [1] [2]

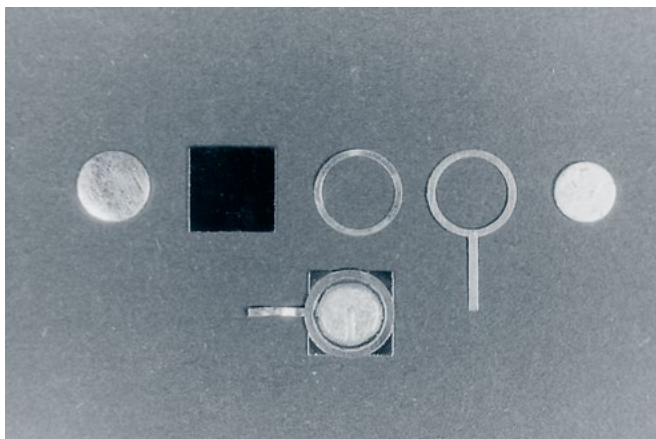


Germanium-Leistungstransistor 2N527, Clevite Corporation, aus dem wissenschaftlichen Nachlass von Prof. Dr. rer. nat. Heinz Beneking, Sammlung Halbleitertechnik

Mit den Arbeiten wurde im ersten Quartal 1960 begonnen. Ziel der Entwicklung waren fertigungsreife Konstruktionsunterlagen und der Nachweis der Freigabe für die Produktion. Neben westlichen Fachzeitschriften, wie Funkschau, Funktechnik, Electronics und einschlägigen internationalen Patentschriften, stand eine Dokumentation aus der Sowjetunion zur Verfügung, in der der technologische Prozess zur Herstellung von Legierungstransistoren prinzipiell beschrieben war. Darin waren die Abmessungen der Germanium-Plättchen 6 x 6 mm für den 25 W-Typ bzw. 4 x 4 mm für den 12-W-Typ angegeben. Auch

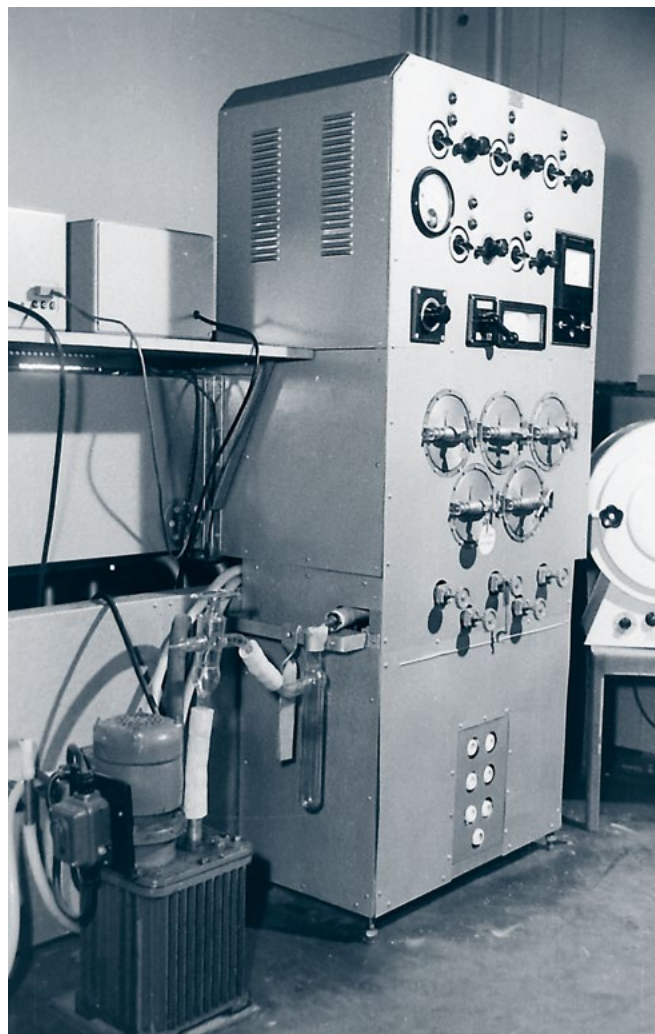
die Chemikalien, die zur Ätzung der Oberfläche und die zur Grabenätzung erforderlich sind, die Gestalt und die Abmessung der Legierungsformen sowie die technologischen Bearbeitungsschritte waren dargestellt. Die wichtigste Voraussetzung für die Herstellung von Legierungs-Transistoren, das „Temperatur-Zeitprogramm“, bei dem die Legierung erfolgreich durchgeführt werden konnte, fehlte jedoch. Dieses musste durch aufwändige Versuche ermittelt werden. Die Voraussetzung für eine Versuchsfertigung mit allen notwendigen technologischen Einrichtungen und Werkzeugen musste völlig neu geschaffen werden, denn die sowjetische Dokumentation gab darüber keine Auskunft. Daher orientierten sich die Entwicklungsingenieure an den neuesten internationalen Erkenntnissen der Transistortechnologie.

Noch vor dem Bau der Berliner Mauer, am 13. August 1961, und der damit verbundenen endgültigen Abschottung der DDR, bot sich Gelegenheit zu einem internationalen wissenschaftlichen Austausch. Mehr als 900 Experten internationaler Halbleiterunternehmen und Wissenschaftler nahmen an dem internationalen Halbleitersymposium teil, welches vom 20. bis 25. Februar 1961 in Paris stattfand. In etwa 140 Vorträgen wurden die neuesten Erkenntnisse der Halbleitertechnologie, spezielle Aspekte der Halbleiterphysik, vorgestellt und diskutiert, darunter auch solche über Ausrüstungen für die Halbleiterproduktion, über technologische Probleme und Halbleitermesstechnik. [9] [11] Das hochreine Germanium für die Transistoren brauchte nicht importiert zu werden, denn der VEB Spurenmetalle Freiberg, ein 1957 gegründeter Wissenschaftlicher Industriebetrieb (WIB) zur Gewinnung von Reinstmetallen, konnte den Bedarf an elementar reinem Germanium, Indium, Arsen, Phosphor und Gallium, welches in der noch jungen Halbleiterindustrie der DDR benötigt wurde, decken. Dafür wurde 1960 eine Großversuchsproduktionsanlage für Germanium-Einkristalle und -Scheiben in Betrieb genommen. Die Germanium- und später auch Siliziumscheiben wurden an die Betriebe geliefert und dort dann weiterverarbeitet. [14] Für die FWE-Transistorentwicklung wurden die bereits geläpften Germanium-Plättchen in den entsprechenden Abmessungen vom VEB Werk für Bauelemente der Nachrichtentechnik (WBN) Teltow bezogen. Ebenso die für die Dotierung notwendigen Materialien wie Indium und Indium-Gallium.



Einzelteile des OC 846 A, 1961 (FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)

Die chemische Bearbeitung der Germanium-Plättchen und der Aufbau der Transistoren musste in einer hochreinen Umgebung erfolgen, sodass dafür spezielle hermetische Arbeitskabinen konstruiert wurden. Diese standen unter einem geringen Innendruck, wobei unter einer Stickstoffatmosphäre gearbeitet wurde. Über PVC-Handschuhe, die in die Arbeitskabinen hineinreichten, konnten von außen die notwendigen Arbeiten durchgeführt sowie Werkzeuge und Montagevorrichtungen bedient werden. Über Schleusen konnten die Transistorteile, Hilfsmittel und Werkzeuge in die Kabinen bzw. zum nächsten Arbeitsgang transportiert werden, ohne die innere Atmosphäre zu verändern. Am Beginn und am Ende der Fertigungsstraße waren Vakuumtrockenöfen angeordnet, mit deren Hilfe alle in die Kabinenstraße einzubringenden Bauteile einer intensiven Trocknung unterzogen werden konnten.

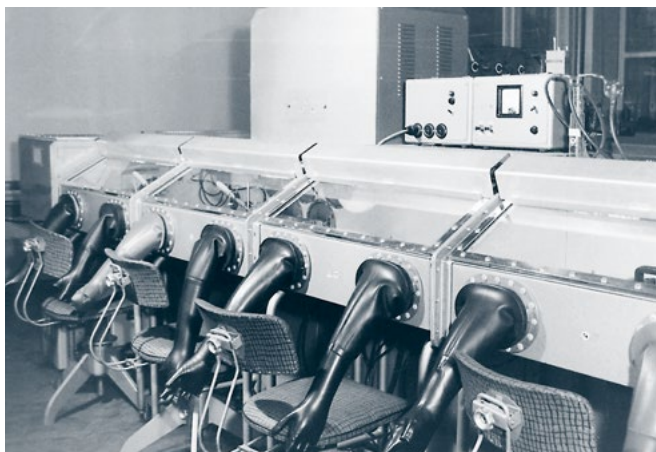


Legierofen für die Transistorversuchsfertigung, 1961 (FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)

Trockenöfen freizuhalten, wurden die abgegebenen Gase und Dämpfe nach außen abgesaugt. In und an den einzelnen Kabinen waren weitere Spezialeinrichtungen vorgesehen, die sowohl das Waschen und Spülen als auch das Auflöten der Halbleiter auf die Transistorgrundplatte, das Anlöten der Anschlüsse, das Vormessen und das Verkappen ermöglichten.

Der Bau der Fertigungsstraße und die Entwicklung und Herstellung der Werkzeuge und Hilfsvorrichtungen wurden vom werkseigenen Werkzeugbau realisiert, wobei es immer wieder zu zeitlichen Verzögerungen kam. Immerhin mussten für die Versuchsstraße auch umfangreiche räumliche Umbaumaßnahmen realisiert werden. Auch mangelhafte Qualität der vom HFO gelieferten Ge-Plättchen (Kratzer durch Läppfehler) führte zu Reklamationen und Mehrarbeit.

Mit den Legierversuchen im Vakuum konnte erst Ende 1961 begonnen werden. Es stellten sich aber Probleme bei der Benetzung des Indiums am Germanium, beim Legieren und an den Heizern des Legierofens ein, sodass der Ofen umgebaut werden musste. Nach dem Umbau war der Legierraum so eingerichtet, dass er wahlweise mit Vakuum oder Wasserstoff



Arbeitskabinen für die Transistorversuchsfertigung, 1961 (FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)

Die zur Fertigungsversuchsstraße gehörenden Legieröfen waren sowohl gegen die Kabinen als auch gegen die Raumatmosphäre hermetisch abgeschlossen und konnten entweder evakuiert oder mit einer Schutzgasatmosphäre betrieben werden. Der erste Legierofen wurde 1961 in Betrieb genommen und ein zweiter sollte 1962 für einen Parallelbetrieb hinzukommen. Um die Arbeitsräume von Öldämpfen der Vakuumpumpen der Legier- und

beliebig gewählten Druckes betrieben werden konnte. Nach vielen Versuchen hatte sich dann das Legieren unter Reinstwasserstoff mit Überdruck von 0,1 bar als die geeignetste Technologie herausgestellt. Nachdem der zweite Legierofen im September 1962 in Betrieb ging, konnte erstmals eine nennenswerte Anzahl von Transistoren hergestellt werden. Einige grundsätzliche Fehler in der sowjetischen Dokumentation führten zu langen Entwicklungsverzögerungen. Dies betraf z.B. den Legierofen, die Legierungsformen und auch die Technologie der Oberflächenbehandlung der Ge-Plättchen. Die fehlerhaften Legierungsformen hatten einen wesentlichen Einfluss auf den Abstand zwischen Emitter und Basis. Auch führten fehlerhafte Angaben zur Dotierung des Emitters aus der sowjetischen Dokumentation zu Ausfällen, sodass eine erhöhte Stromergiebigkeit erst nach Dotierungs-

versuchen des Emitters mit Aluminium, anstatt mit Gallium, zu erzielen war. Es ist nicht überliefert, ob die FWE-Entwicklungsingenieure anlässlich dieser massiven Probleme an die vom 3. Kongress der „Deutsch Sowjetischen Freundschaft“ (DSF) 1951 herausgegebene Losung: „Von der Sowjetunion lernen, heißt siegen lernen!“, denken mussten.

Die Legierung in den Graphitformen erfolgte in zwei Arbeitsgängen, Emitter und Kollektor getrennt, wobei die Formen nach dem ersten Arbeitsgang um 180° gedreht wurden. Der Legierungsprozess war Ende 1962 so weit ausgereift, dass ein hoher Arbeitswirkungsgrad erzielt werden konnte. Mit einer einfachen Widerstandsmessung nach dem Legierungsvorgang wurden sogenannte Durchlegierungen überprüft, also Kurzschlüsse zwischen Emitter und Kollektor, und aussortiert.



Vorbereitung der Einzelteile, 1961
(FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)



Chemische Oberflächenbearbeitung der Germaniumplättchen, 1961
(FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)



Mechanische Kontrolle der Einzelteile, 1961
(FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)



Bestückung der Legierungsformen, 1961
(FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)



Kurzschlussmessung der Transistorrohlinge, 1961
(Foto: Josef Lorenz, FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)



Montage der Transistorrohlinge, 1961
(FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)



Auflöten der Kollektorseite auf die Grundplatte, 1961
(FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)



Anlöten der Basis- und Emitteranschlüsse an die Glasdurchführungen, 1961 (FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)



Verkappung der Transistoren, 1961
(FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)

Wesentlich schwieriger war es jedoch, andere Legierungsungleichmäßigkeiten, z.B. nicht parallele Legierungsfronten, zu erkennen. Mit einem Oszillographen konnte man allerdings die Sperrkennlinie des pn-Übergangs aufnehmen. Im Idealfall sollte die Legierung einen parallelen pn-Übergang zwischen Emitter und Basis ergeben. Sehr anschaulich wird diese Methode, einschließlich erklärender Schliffbilder von 12-W-Transistoren, in [12] gezeigt, die jedoch nur

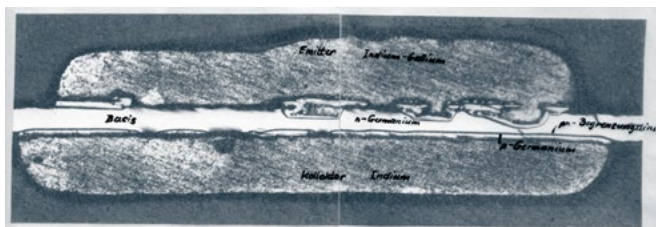
zur labormäßigen Prüfung von Einzelfällen dienen konnte. Die Transistorrohlinge wurden danach mit einem niedrigschmelzenden Lot mit der Kollektorseite auf die Grundplatte des Transistorgehäuses aufgelötet. Der Basisring und der Emitteranschluss wurden sodann mit den Stiften der Glasdurchführungen verlötet. Abschließend wurde mittels einer Presse die Kappe unter Zuhilfenahme eines passenden Kupferrings aufgepresst.

Nach der Verkappung konnten die endgültigen Kenndaten des Transistors messtechnisch ermittelt werden. Vor der Auslieferung von Erprobungsmustern an Industriebetriebe wurden die Transistoren, deren Kupfergehäuse nicht weiter äußerlich veredelt wurde, mit dem Funkwerk-Logo, der Typenbezeichnung (OC 846 A, GTR 12 w) und einer Seriennummer gekennzeichnet.

Bereits 1958 war im Gerätewerk des FWE ein Transistorenmessgerät, Typ 1014, entwickelt worden. Damit stand, sowohl für die eigene Transistorenversuchsfertigung als auch für die Halbleiterindustrie, für Wissenschaftseinrichtungen und den Service, ein für die Bestimmung der wichtigen Kenn- und Arbeitsdaten von Halbleiterbauelementen geeignetes Messmittel zur Verfügung. Da seinerzeit in der DDR noch kein Betrieb ein Transistorgehäuse nach der internationalen TO-3-Norm herstellte, wurden Grundplatte, Kappe und der Verschlussring, allesamt aus Kupfer, vom eigenen Werkzeugbau hergestellt. Die Glas-

durchführungen vom Typ 3,9D1 die aus dem VEB Elektrogas Ilmenau (EGI) bezogen wurden, mussten von Hand in die Grundplatte eingelötet werden. Dies war auch aus Gründen der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Kupfer und Glas notwendig. Transistorgrundplatten mit direkt eingeglasten Durchführungen befanden sich im EGI erst in der Entwicklung und wurden später im TO-66-Gehäuse für das HFO in Großserie, allerdings dann in Stahlausführung, hergestellt. [15]

Die Verkappungstechnik, die ebenso neu zu entwickeln war, konnte zum Entwicklungsabschluss als beherrscht betrachtet werden. Bis Ende 1962 waren 526 Transistoren des 12-W-Typs und 228 Transistoren des 25-W-Typs an verschiedene Betriebe in der DDR zur Erprobung ausgeliefert worden. Die Ausbeute lag bei 3,9 % bei dem 12-W-Typ und bei 3,0 % bei dem 25-W-Typ, was für eine derart kurze Entwicklungszeit als normal betrachtet werden kann. Nach dem Entwicklungsabschluss erfolgte die Überleitung der Leistungstransistoren zum VEB Halbleiterwerk Frankfurt/Oder (HFO). [9] [10] In unserer Sammlung „Halbleitertechnik“ befinden sich einige überlieferte Exemplare dieser interessanten Transistorentwicklung. Zwei Transistoren sind mit dem Aufdruck OC 846 A und E-Serie sowie dem Herstellerlogo, der sogenannten „Funkwerk-Eule“, bedruckt. Ein Exemplar ist mit GTR 12 W gekennzeichnet, was darauf hinweist, dass es sich um eines der 12-W-Typen handeln müsste.



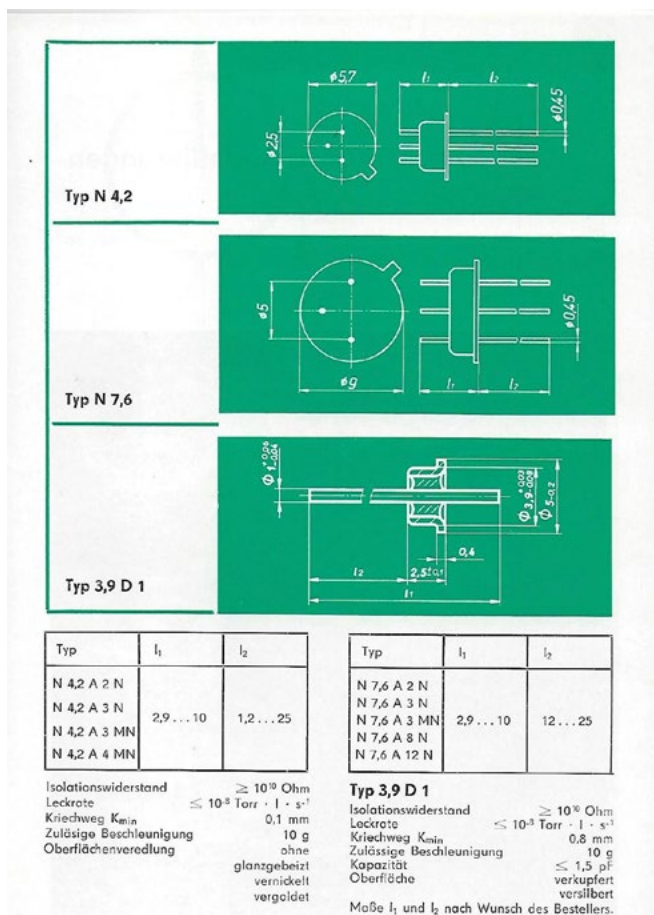
Schliffbild des Legierungsbereichs eines 12-Watt-Leistungstransistors, aus [12], Thüringer Industriearchiv



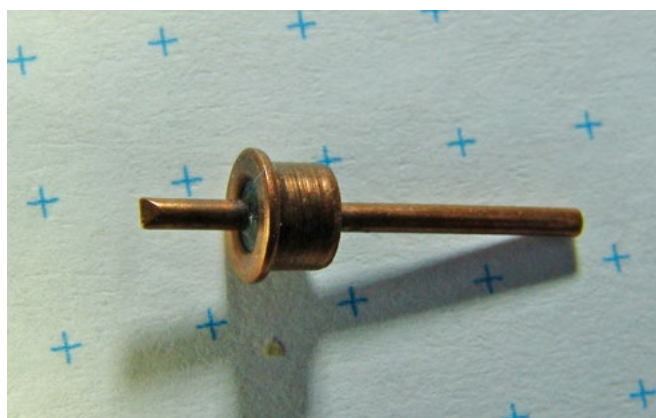
Einzelteile eines OC 846 A, 1962 (FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)



Transistorprüfgerät, Typ 1014, VEB Funkwerk Erfurt (FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)



Glasdurchführungen, Katalog VEB Elektroglas Ilmenau



Glasdurchführung Typ 3,9D1, VEB Elektroglas Ilmenau, 1960, Sammlung Halbleitertechnik



Germanium-Leistungstransistoren OC 846 A und GTR 12 w, 1962, Sammlung Halbleitertechnik

Nach über sechs Jahrzehnten wurden einige der OC 846 A mit moderner Messtechnik untersucht. Der dabei verwendete Kennlinienschreiber Tektronix 576 Curve Tracer, der selbst schon ein historisches Messgerät aus unserer Sammlung ist, liefert eindrucksvolle Ergebnisse. Zu sehen ist ein typisches Kennlinienfeld des Transistors in der Emitterschaltung, wobei der Basisstrom als Parameter dargestellt ist.

Einen defekten 25-Watt-Transistor haben wir einem Mikroelektronikspezialisten zur Analyse überlassen. Dabei sind beeindruckende mikroskopische Bilder entstanden, die über den Link unter [16] zu sehen sind. Auch der Grund des Defekts konnte dabei ermittelt werden. Ein sogenannter Whisker hatte für einen Kurzschluss zwischen Kollektor und Basis gesorgt. Diese Transistoren und zwei weitere im TO-66-Format wurden in den 1970er Jahren aus einer Schrottbox auf dem FWE-Werksgelände geborgen und sind somit als einzigartige Artefakte der Thüringer Industriegeschichte erhalten geblieben. Bei den überlieferten offenen Transistoren im TO-66-Gehäuse handelt es sich offensichtlich um frühe Anschauungsexemplare des OC 830, die aus dem WBN den Funkwerkentwicklern zur Verfügung gestellt wurden. Am 1. Januar 1964 wurden in der DDR neue Typenbezeichnungen für Halbleiterbauelemente nach TGL 19442 eingeführt. Der erste Buchstabe kennzeichnet das Halbleitermaterial, wobei ein G für Germanium und S für Silizium steht. Der zweite Buchstabe kenn-



Kennlinie des OC 846 A auf dem Curve Tracer Typ 576, Tektronix



Geöffneter OC 846 A

(Foto: Richard Kaußler FWE-Bildarchiv im Thüringer Industriearchiv)

zeichnet die Art des Bauelements. Ein D steht für NF-Leistungsanwendung. Aus dem OC 830 wurde dann ein GD 100. Die eingangs erwähnten Transistoren für NF-Verstärkeranwendungen, OC 830 und OC 831, sind jeweils 1-Watt-Typen, die vom WBN und HWF hergestellt, später in GD 100 bzw. GD 110 umbenannt und auch im VEB Röhrenwerk Neuhaus am Rennweg (RWN) produziert wurden.

Bei dem HWF-Typen OC 831 handelt es sich um eine sehr frühe Variante mit einem TO-66-Kupfergehäuse, bei dem die Kappe aufgelötet und danach das Gehäuse komplett galvanisch vernickelt wurde. Auch der OC 830 hat ein Kupfergehäuse, allerdings ist hier die Kappe aufgedrückt und die Bodenplatte hat ein vom TO-66-Gehäuse abweichendes Format. Offenbar hatte man im HFO damals noch etwas mit den Gehäusevarianten experimentiert. Später wurden die Leistungstransistoren in preiswerteren Stahlgehäusen untergebracht. Leistungsstärkere Ge-Transistoren waren die Typen GD 240 bis GD 244, mit einer Verlustleistung von 10 Watt.



Germanium-Leistungstransistoren OC 830 und OC 831, Sammlung Halbleitertechnik



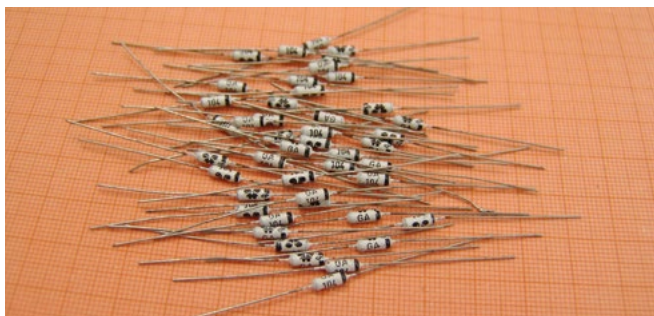
Germanium-Leistungstransistor GD 244, Sammlung Halbleitertechnik

Eine Produktion von pnp-Ge-Leistungstransistoren von mehr als 12 Watt erfolgte in der DDR jedoch nie. Um den Bedarf der Industrie an Ge-Leistungstransistoren zu decken, wurde z.B. der 20-Watt-Typ, ASZ 1015, von Tungstam aus der Volksrepublik Ungarn importiert.

Beginn der Mikroelektronik in Erfurt

Die Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Halbleitertechnik wurden im Erfurter Funkwerk nach nur zwei Jahren zum Ende 1962 eingestellt. Man konzentrierte sich weiterhin auf die Hochvakuumelektronik und Messgeräte. Doch vier Jahre später wurden erneut Halbleiter produziert, und zwar Germaniumspitzendioden, GA 104, GAZ 17, im Glasgehäuse, die im VEB Werk für Bauelemente der Nachrichtentechnik (WBN) entwickelt worden waren, erkennbar an dem FWE-Logo.

Für die sich rasch entwickelnde digitale Rechentechnik in der DDR wurden Dioden in zunehmend größeren Stückzahlen nachgefragt. Ab 1968 wurden im FWE Silizium-Planardioden hergestellt. Ab 1969 wurden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf den Komplex Halbleiterbauelemente der MOS-Technologie konzentriert. 1971 begann die Fertigung von MOS-Transistoren und Festkörperschaltkreisen der Hochvoltserie U101D bis U109D. Mit der Entwicklung des Taschenrechnerschaltkreises U820D wurde 1972 die Ära der VLSI-Technologie eingeläutet, der Schlüsseltechnologie zur Herstellung hoch integrierter Mikroprozessoren und Speicherschaltkreisen. Die Serienproduktion des U820D wurde 1976 aufgenommen und im selben Jahr begannen die Entwicklungsarbeiten für den Mikroprozessor U808D. Darüber wird jedoch später zu berichten sein. [17]



Germanium-Dioden GA 104, VEB Funkwerk Erfurt, 1966, Sammlung Halbleitertechnik

Quellen:

- [1] Dioden- und Transistortechnik, Matthias Falter, Verlag Technik Berlin, 1958
- [2] History of Intermetall Semiconductors, Mark Burgess, Neuseeland, 2015 https://www.radiomuseum.org/forum/history_of_intermetall_semiconductors.html
- [3] Anfänge der Halbleiterforschung und -entwicklung, Dissertation Dipl.-Phys. Kai Handel, Aachen 1999
- [4] <https://de.wikipedia.org/wiki/Intermetall>
- [5] <https://de.wikipedia.org/wiki/Spitzentransistor>
- [6] <https://www.computerhistory.org/siliconengine/bell-labs-licenses-transistor-technology/>
- [7] Vom Wernerwerk zum Campeon, Jörs Berkner, Infineon Technologies AG, München 2013
- [8] Der Transistor, Telefunken-Fachbuch, Franzis Verlag München, 4. Auflage, 1964
- [9] Jahresbericht des Zentrallaboratoriums für Empfängerröhren, 1961, Thüringer Industriearchiv
- [10] Jahresbericht des Zentrallaboratoriums für Empfängerröhren, 1962, Thüringer Industriearchiv
- [11] International Semiconductor Symposium, Wireless World, April 1961, Seite 191
- [12] Untersuchung der Sperrkennlinie von NF-Leistungstransistoren mit Hilfe eines Oszillographen aus Fehler in den flächenhaften pn-Übergängen, Josef Lorenz, Ingenieurabschlussarbeit an der Ingenieurschule für Elektrotechnik Mittweida, 1962, Thüringer Industriearchiv
- [13] Vorschlag zur elektrischen Ausrüstung eines Legierungsofens für die Transistor-Fertigung, Josef Lorenz, Techniker-Abschlussarbeit, Fachschule für Elektrotechnik, 1960, Thüringer Industriearchiv
- [14] Vom Silber zum Silizium- 50 Jahre Elektronikwerkstoffe aus Freiberg, Festschrift der Stadt Freiberg/Sachsen, 2007
- [15] Katalog Glasdurchführungen, VEB Elektrogas Ilmenau, 1970
- [16] <https://www.richis-lab.de/BipolarA48.htm>
- [17] Unser Werk, Broschüre anlässlich des 30. Jahrestags der DDR, VEB Funkwerk Erfurt, 1979
- [18] <https://www.cdvandt.org/FuG%20224%20instruction.pdf>
- [19] Der Transistor – Ein neues Verstärkerelement, Joachim Dosse, R. Oldenbourg, München, 1957

Bildrechte:

Wenn nicht anders angegeben, liegen die Bildrechte beim Autor.

Die Entwicklung von DMOS-Transistoren für Hochfrequenz- und Hochspannungsanwendungen im Funkwerk Erfurt in Zusammenarbeit mit der Technischen Hochschule Ilmenau

Zeitzeugen erinnern sich.

Ein Beitrag zur Geschichte der Mikroelektronik in Thüringen

Ulrich Liebold, Erfurt

Der Autor entdeckte kürzlich im Thüringer Industriearchiv des Thüringer Museums für Elektrotechnik Forschungsberichte der ehemaligen Technischen Hochschule Ilmenau (THI), jetzt Technische Universität, Sektion Physik und Technik Elektronischer Bauelemente (PHYTEB), aus den 1970er und 1980er Jahren.

Diese Papiere tragen teilweise die Vermerke „Vertrauliche Dienstsache“ oder „Nur für den Dienstgebrauch“. Das weist darauf hin, dass die in ihnen dargestellten Berichte, Studien, Entwürfe, Messungen, deren Ergebnisse und Auswertungen zum Zeitpunkt ihrer Entstehung als relevant und bedeutsam für einen Technologieschub in der mikroelektronischen Entwicklung und Produktion des Funkwerks Erfurt (FWE) galten, das als Hauptauftraggeber der o.g. Forschungsberichte auftrat. Nur wenige Berichte nennen andere Auftraggeber, z.B. das Institut für Physik der Werkstoffbearbeitung (IPW), dem späteren Institut für Halbleiterphysik (IHP) der Akademie der Wissenschaften der DDR, das Halbleiterwerk (HFO) Frankfurt (Oder), das Zentrum für Forschung und Technologie Mikroelektronik (ZFTM) Dresden oder das Kombinat Elektronische Bauelemente (KEBT) Teltow. Man kann also mit Fug und Recht sagen, dass hierbei die damals maßgebliche technische Forschungs- und Lehrereinrichtung Thüringens auf elektrotechnischem und elektronischem Gebiet direkt dem Stammbetrieb des Kombinats Mikroelektronik (ab 1978) zuarbeitete, mit dem Ziel, technisch originäre Produkte zu schaffen.

Ein sehr gutes Beispiel für diesen Prozess ist die Entwicklung von DMOS-Transistoren, die gegenüber Standard-MOS-Transistoren entweder über höhere Signalverarbeitungsgeschwindigkeiten für Hochfrequenzanwendungen oder über eine erhöhte Hochspannungsfestigkeit für Hochspannungsanwendungen verfügen. Der Autor suchte nun das Gespräch mit Physikern und Elektroingenieuren der Entwicklergeneration der DMOS-Transistoren. Dabei kristallisierte sich im Erinnerungsprozess die Erkenntnis heraus, dass speziell diese Entwicklung für alle Beteiligten ein

entscheidender Schritt in ihrer fachlichen Entwicklung war und es daher wertvoll sein könnte, sie aus heutiger Sicht noch einmal nachzuvollziehen und im ON.LINE des Elektromuseums zu publizieren. Die Erinnerungen spiegeln den Zeitraum von 1977 bis 1991 wider.

Früher bestehende Kontakte zu Kommilitonen, Kollegen und ehemaligen Leitern wurden im Gespräch benannt und deren Beiträge zur DMOS-Entwicklung aus der Erinnerung umrissen. Anschließend wurde versucht, diese Kontakte, die sich in der Nachwendzeit oft verloren hatten, mit Fokus auf DMOS-Entwicklungsschritte wieder zu beleben und entsprechende Gespräche zu führen. Das gelang nicht immer, aber öfter als erwartet, weil sich auch hierbei zeigte, dass den Entwicklern selbst diese Erinnerungsarbeit interessant und für ihre eigene berufliche Bilanz wichtig war. Oft ergaben sich in den persönlichen Unterhaltungen neue Hinweise. Immer wurde versucht, beide im Thema dieses Artikels genannten Bereiche, nämlich das Funkwerk Erfurt und die damalige Technische Hochschule Ilmenau, im Blick zu behalten. Für den Bereich THI, aus dem ja die ausgewerteten Forschungsberichte ursprünglich stammten, ergaben sich über das Gespräch hinausgehende Recherchemöglichkeiten: Die Suche nach wissenschaftlichen Arbeiten im Katalog der Universitätsbibliothek Ilmenau sowie im Archiv. Eine Recherche nach Patenten im Register des Deutschen Patent- und Markenamts schloss sich an.

Hierbei seien besonders erwähnt die Doktorarbeit von Diplomingenieur Wilfried Krüger, der von 1977 bis 1981 an der THI Forschungsstudent war und später im Funkwerk als Gruppen- und Abteilungsleiter arbeitete, und die Dissertation und Patentschriften von Diplomphysiker Gerhard Cattus, der von 1977 bis 1991 Themenleiter im FWE war. Auch Diplomphysiker Wolfram Männel, ehemals Abteilungsleiter im Funkwerk, unterstützte durch Gespräche und kurze Aufzeichnungen die Erinnerungsarbeit.

Die für diese Erinnerungsrecherche wertvollsten Beiträge kamen von Dr. rer. nat. Konrad Bach (Diplomphysiker), von 1977 bis 1991 als Verfahrensentwickler im FWE tätig, und von PD Dr.-Ing. habil. Reinhard Herzer, Diplomingenieur und Habilitand an der THI von 1984 bis 1991. Die autark entstandenen Beiträge der beiden Wissenschaftler und Entwickler, die sich teilweise an Fragen aus einem Fragenkatalog für Zeitzeugeninterviews orientieren, schließen sich diesem Artikel an.

Es wäre erfreulich, wenn die Veröffentlichung weitere Erinnerungen potenzieller Leser initiieren würde, sodass wir diese dokumentieren und so für die interessierte Nachwelt erhalten könnten.

Die Etablierung der Halbleitertechnik im Funkwerk Erfurt

In einem kurzen Artikel, erschienen in der Ausgabe 3.2018 des ON.LINE des Elektromuseums, berichtet Wolfram Männel, der 1965 als Diplomphysiker frisch von der Hochschule als Entwicklungsingenieur in den VEB Funkwerk Erfurt kam, dass damals eine hohe Kompetenz hinsichtlich der Produktion von Elektronenröhren in dem Werk bestand, dass aber Kenntnisse in der Halbleitertechnik nahezu nicht vorhanden waren, genauso wie bei ihm, der in Quantentheorie diplomiert hatte. [1]

Nachdem aber in Folge der westlichen Embargo-Politik und allgemeiner wirtschaftlicher Schwächen in der DDR schon wertvolle Entwicklungszeit bei den Halbleitern verstrichen war, musste spätestens ab Mitte der 1960er Jahre die DDR gleich mehrere Schritte zulegen, wollte sie halbwegs weltmarktfähig sein oder werden. Und so fand sich Wolfram Männel schnell in einem Hörsaal und an den Praktikumsplätzen der damaligen Technischen Hochschule Ilmenau wieder und lernte zusammen mit den älteren Kollegen aus der Röhrenproduktion die Grundlagen der Halbleitertechnologie. [1]

Wie kürzlich im Thüringer Industriearchiv entdeckte und analysierte Materialien zu Germanium-Leistungstransistoren beweisen, wurden Halbleiterbauelemente in einer Forschungsversuchsfertigung allerdings bereits fünf Jahre zuvor im Funkwerk Erfurt hergestellt. [2] (Siehe auch den Beitrag zum Transistor OC 846 A in dieser Ausgabe des ON.LINE)

Wolfram Männel fasst aus seiner heutigen Erinnerung die folgenden Meilensteine der Entwicklung der Halbleitertechnik in Erfurt zusammen: [3]

- 1965 Beginn der Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Halbleitertechnik im Zentrallabor für Empfängerröhren (ZLE), der späteren Entwicklungsstelle im Werkteil E des Funkwerks
- Entwicklung der Schaltodiode SAY13 in Silizium-Planartechnik, zunächst in einer Kühlkörper-Ausführung; Überführung in die Produktion als Plastvarianten SAY 30/32 bzw. 40/42; in den folgenden Jahren 1967/68 Entwicklung der SAM Si-Mehrfach-Dioden
- etwa 1967 Eröffnung des ersten Cleanrooms für das Entwicklungslabor
- ab 1968/1969 Übernahme der MOS-Technologie vom Halbleiterwerk Frankfurt (Oder) für die nMOS-Transistoren SM103/104
- auch 1969 Beginn der Entwicklungsarbeiten für die MOS-Logikbaureihen U101D ff (pMOS-Gatter-IC) und des U352D (64-bit-pMOS-Schieberegister)
- Anfang 1970 Entwicklung des ersten 8-bit- Mikroprozessors U808D in p-Kanal-Metall-Gate-Technologie (als Staatsplanthema)

- 1972 Entwicklungsbeginn des Taschenrechner-schaltkreises U820D für den Minirex aus dem Kombinatbetrieb Röhrenwerk Mühlhausen

Erste Entwicklungsschritte zum DMOS

In einem Gespräch der o.g. Entwickler zu den Voraussetzungen für die DMOS-Entwicklung im FWE wurde festgestellt, dass um die Mitte der 1970er Jahre zwei grundsätzliche MOS-Technologien existierten. Generell verfügbar sowohl im Entwicklungslabor als auch in der Fertigung war die 10-µm-Metall-Gate-Technologie (MGT). An der Einführung der 10-µm-Silizium-Gate-Technologie (SGT) für die Fertigung, die für hochintegrierte Prozessor-Schaltkreise benötigt wird, wurde gearbeitet. Damals betrug auf Grund der eingesetzten fotolithografischen Ausrüstung für beide erwähnte Gate-Technologien die minimal erreichbare Strukturgröße etwa 10 µm, d.h. MOS-Transistoren waren nur mit einer minimalen Kanallänge von 10 µm herstellbar. Das heißt auch, dass die maximale Schaltfrequenz und die minimale Verlustleistung pro Schaltvorgang begrenzt waren.

Ab Mitte der 1970er Jahre setzten daher Forschungsaktivitäten ein, um innerhalb dieses Technologie-Niveaus (10 µm) Erkenntnisse zu gewinnen über Möglichkeiten der Verkürzung der Kanallänge, um damit die Transistoren schneller und verlustärmer zu machen. Die Aktivitäten konzentrierten sich auf den Entwurf und die technologische Machbarkeit eines DMOS-Transistors (doppeldiffundierter MOS-Transistor).

Die hier folgende Tabelle (erstellt nach den im Thüringer Industriearchiv sächlich vorhandenen Forschungsberichten der THI) spiegelt die thematischen Schwerpunkte der Forschungsbemühungen wider.

Datum	Thema	Auftraggeber	Bearbeiter
20.11.78	Entwicklung einer nSGT-DMOS-Technologie in Kooperation mit dem VEB Funkwerk Erfurt	FWE/MME Erfurt	Schipanski, D. Sperling, R.
20.11.78	Realisierung des Prototyps eines DMOS-Inverters	FWE/MME Erfurt	Schipanski, D. Krüger, W.
20.11.78	Ableitung der Entwurfsregeln für integrierte DMOS-Schaltkreise	FWE/MME Erfurt	Schipanski, D. Sperling, R. Krüger, W.
20.11.78	Klärung von prozeßbedingten Instabilitäten	FWE/MME Erfurt	Schipanski, D. Fisch, G. Friedrich, H. Krüger, W.
26.09.79	Technologisch bedingte Dimensionierung von integrierten DMOS-Schaltkreisen	FWE/MME Erfurt	Krüger, W.
26.09.79	Weiterentwicklung der nSGT-DMOS-Technologie (Variante I) in Kooperation mit dem VEB FWE und DMOS-Prototyp	FWE/MME Erfurt	Schipanski, D. Dehn, J. Fisch, G. Krüger, W.

(Fortführung auf der nächsten Seite)

10.10.80	Modellierung des HF-Verhaltens von DMOS-Transistoren als Beitrag zur Entwicklung von DMOS-Bauelementen	FWE/MME Erfurt	Stöhr, H.
10.05.84	Integrierbarer DMOS-Hochspannungstransistor	HFO Frankfurt (Oder)	Schipanski, D. Djermanow, I. Fisch, G. Schmidt, M.
12.11.85	Integrierbarer DMOS-Hochspannungstransistor	HFO Frankfurt (Oder)	Schmidt, J. Djermanow, I. Glaser, D.
12.1985	Integrierbarer DMOS-Hochspannungstransistor	HFO Frankfurt (Oder)	Herzer, R. Schmidt, J. Djermanow, I.

Die DMOS-Forschungsberichte im Konvolut des Thüringer Industriearchivs

Konrad Bach erklärt in seinen Erinnerungen sehr anschaulich das Prinzip des DMOS. Deshalb sei hier nur kurz auf den Aufbau eines DMOS-Transistors hingewiesen unter Heranziehung einer entsprechenden Illustration. Mit Hilfe zusätzlicher Implantations- bzw. Diffusionsschritte wird ein leitfähiger Kurzkanal von etwa $1\ \mu\text{m}$ erzeugt, ohne den sonst beim MOS-Transistor üblichen Technologieablauf zu verändern. Geht man von einer ursprünglichen Kanallänge ($L=10\ \mu\text{m}$) eines Transistors aus, erhöht sich die maximale Grenzfrequenz für einen Transistor mit der Kanallänge ($L=1\ \mu\text{m}$) um den Faktor 10 (reziproke Proportionalität $1/L$). Dadurch schaltet der Transistor um diesen Faktor schneller. In Bild 1 ist der Querschnitt einer doppeldiffundierten n-Kanal DMOS-Struktur mit den dazugehörigen Störstellenkonzentrationen (Dotierungsverläufe) dargestellt.

Im Bild 1 ist erkennbar, wie sich im ursprünglichen Kanalgebiet des Transistors zwischen Source und Drain ein Kurzkanal der Länge L_{eff} mit einer höheren Dotierung und eine Driftregion mit einer niedrigeren Dotierung herausbilden. In der Driftregion mit der niedrigen Dotierung verringert sich die Feldstärke, was einer Erhöhung der Durchbruchspannung gleichkommt. Daher eignen sich DMOS-Transistoren im Vergleich zu herkömmlichen MOS-Transistoren gut für Anwendungen in der Leistungselektronik, die hohe Spannungen und Ströme erfordern.

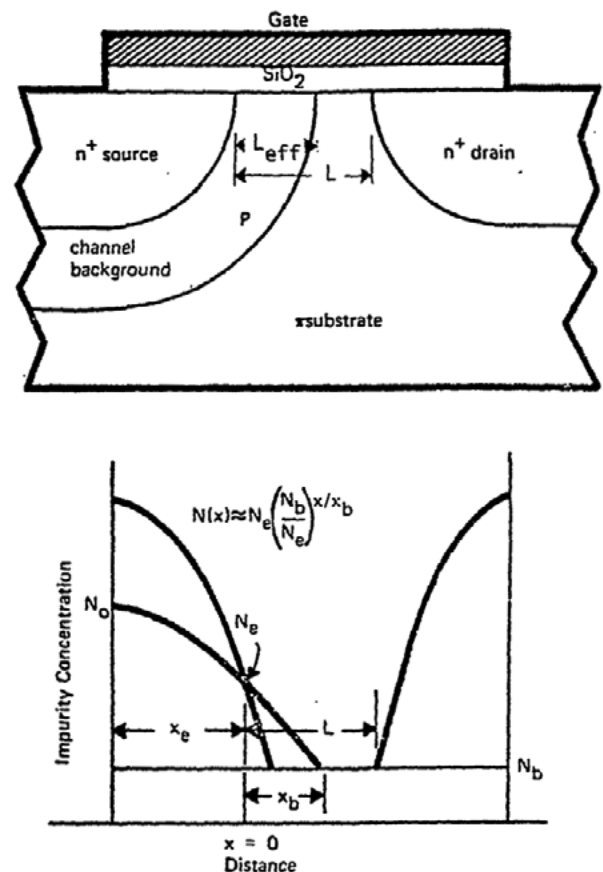


Bild 1: DMOS-Struktur mit Dotierungsverläufen, aus [4]

Es ergeben sich für den DMOS-Transistor grundsätzlich drei Anwendungsfälle: als schneller Logiktransistor für die Verwendung in hochintegrierten Schaltungen, als Hochfrequenztransistor für Anwendungen im Hochfrequenzbereich und als Leistungstransistor für Anwendungen in der Leistungselektronik. Die Entwicklung dieser Anwendungsmöglichkeiten umfasste auf dem Gebiet der damaligen DDR in etwa die Jahre von 1977 bis 1990.

In den hier folgenden persönlichen Erinnerungen spiegeln sich die Entwicklungsetappen chronologisch in der Abfolge der Beiträge wider.

Quellen:

- [1] Männel, Wolfram. „Elektromuseum | Newsletter“. Wie es mit der Halbleitertechnik im Funkwerk Erfurt begann, 2018. https://www.elektromuseum.de/publication/newsletter/elektromuseum_newsletter_032018.pdf.
- [2] Hloucal, Stephan. Medienmitteilung – Elektronenröhrenexperten entwickelten Transistoren. Thüringer Museum für Elektrotechnik, 8. Januar 2024.
- [3] Männel, Wolfram. Persönliche Erinnerungen. 2024.
- [4] Lin, H.C. and Halsor J.L. Experimental investigation of a double-diffused MOS structure. NASA-CR-2620, 1. Mai 1976, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19760017374>.

Dipl.-Ing. Ulrich Liebold erinnert sich

Von 1976 bis 1981 war ich Student für Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Ilmenau und schloss mein Studium an der Sektion Physik und Technik Elektronischer Bauelemente (PHYTEB) mit dem Diplom ab. Das Industriepraktikum absolvierte ich vom September 1979 bis zum Januar 1980 im Funkwerk Erfurt und arbeitete dort an einem numerischen Verfahren zur Kennlinienberechnung unter Berücksichtigung eines inhomogenen Diffusionsprofils am DMOS-Forschungsthema mit. Die Arbeit wurde betreut von Diplomphysiker Reinhard Jurisch vom FWE und dem damaligen Diplomingenieur Wilfried Krüger, der als Forschungsstudent in Vorbereitung seiner Dissertation auch mit den DMOS-Themen beschäftigt war.

Meine Aufgabe bestand darin, mit dem numerischen Transistormodell Strom-Spannungskennlinien für ausgewählte DMOS-Transistoren zu berechnen und die Simulationsergebnisse mit Messungen von realen Transistoren zu vergleichen. Die Bearbeitung des Praktikums-themas sollte dazu beitragen, Voraussetzungen zu schaffen für ein technologienahes Transistormodell in Ergänzung zu schon bestehenden analytischen Modellen, die die technologischen Bezüge zuvor nur näherungsweise berücksichtigt hatten. Das erarbeitete Modell basierte auf der Lösung von Differentialgleichungen, die den Halbleiter als „Ganzes“ beschreiben. Man könnte hier von einem Ansatz für Programme zur Bauelementesimulation sprechen, die später in den 1990er Jahren zuerst an Hochschulen und danach auch kommerziell als TCAD (Technology Computer Aided Design)-Systeme entwickelt wurden.

Diese Arbeiten folgten unmittelbar dem Abschluss des ersten Teils des Forschungsvorhabens zur Weiterentwicklung der nSGT-DMOS-Technologie und des DMOS-Prototyps. [A1] Dieses Vorhaben hatte 1977 begonnen und wurde in der Arbeitsgruppe MIS-Elektronik des Wissenschaftsbereichs Elektronische Bauelemente der Sektion PHYTEB unter der Leitung von Prof. Helmut Reimer und Frau Dr. Dagmar Schipanski bearbeitet. Ziel war die Entwicklung von integrierbaren lateralen DMOS-Transistoren für schnelle logische und Speicherschaltkreise für die n-Kanal-Silizium-Gate-Technologie (schnelle Logiktransistoren).

Typischerweise erfolgt bei einer Neuentwicklung zunächst ein Entwurf. Daran schließt sich die Fertigung von Mustern an. Wesentlich ist dann, diese Muster hinsichtlich der vorher gewünschten und prognostizierten Eigenschaften zu vermessen. Diese Herangehensweise wurde auch hier gewählt mit den Schwerpunkten Entwurf eines DMOS-Prototyps auf einer dafür speziell entwickelten Teststruktur, es folgten die Präparation der Strukturen entsprechend dem technologischen Durchlauf und der sich anschließende Nachweis der Funktionalität der DMOS-Bauelemente durch Messungen.

Zu Beginn des Entwurfs stand die theoretische Analyse der grundlegenden elektrischen und physikalischen Abhängigkeiten und die Dimensionierung der Strukturen. Dazu diente ein „einfaches“ analytisches Zweitransistormodell, das die beiden DMOS-Transistorgebiete separat beschreibt; nämlich das Kanalgebiet (TE Enhancement-Anreicherungstyp) und das Driftgebiet (TD Depletion-Verarmungstyp). Hiermit erfolgte dann die Berechnung von Strom- und Spannungsbeziehungen mit ausgewählten Parametern, die den Einfluss verschiedener Halbleitergrößen wie z.B. Ladungsträgerbeweglichkeiten und Dotierungen der einzelnen Transistorgebiete, aber auch der geometrischen Größen des Transistors widerspiegeln. Das grundlegende Verhalten mit einfachen MOS-Gleichungen konnte recht gut beschrieben werden, es zeigte aber auch eine Reihe von Schwächen hinsichtlich der exakten Beschreibung der feldstärkeabhängigen Beweglichkeiten der Ladungsträger, was eine Fortführung der Forschungsanstrengungen nötig machte.

Die im Entwurfsprozess entstandene Teststruktur DM 1/2 enthielt eine große Anzahl von DMOS- und NMOS-Transistoren verschiedener Geometrien und eine Reihe anderer wichtiger Strukturen mit verschiedenen Aufgaben. So wurden verschiedene Ringoszillatoren zur Bestimmung dynamischer Parameter, Aluminium-Poly-Silizium-Strukturen für die Bestimmung der Kontaktwiderstände, Mäanderstrukturen, um Diffusionsinhomogenitäten zu ermitteln, Diodenstrukturen, die als Vergleichsobjekte dienten und Testkondensatoren für die unterschiedlichen Gate- und Feldoxide entworfen. Bei Messungen, für die Messplätze auch angepasst worden waren, wurden die üblichen Transistorkennlinien mit den

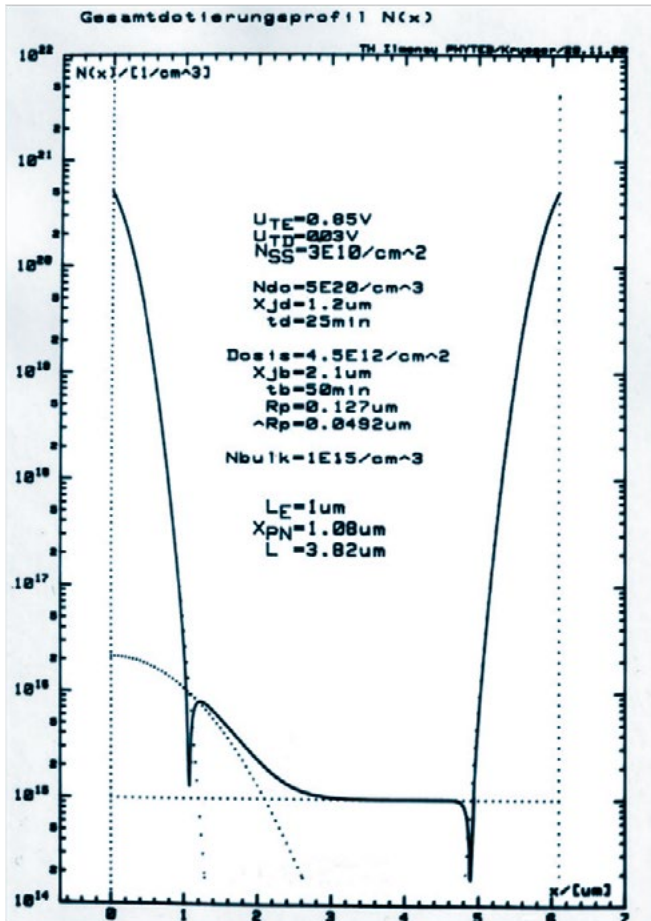


Bild A1: Berechnetes Gesamtdotierungsprofil mit Technologiedaten, aus [A2]

typischen Parametern ermittelt. Mit speziellen Untersuchungen für MOS-Kondensatoren, Widerstandsmessungen und Eindringtiefen wurden dann auch technologische Parameter überprüft.

Im Zeitraum von 1979 bis 1980 wurden diese Arbeiten fortgesetzt und fanden mit dem Abschlussbericht „Weiterentwicklung der Technologie anhand einer konzipierten DMOS-Teststruktur im Hinblick auf die Ausschöpfung der Grenzen des DMOS-Prinzips unter Anwendung der vorhandenen n-SGT“ vom Dezember 1980 ihr Ende, als der Bericht als Dissertationsschrift von Diplomingenieur Wilfried Krüger zu Beginn des Jahres 1981 eingereicht wurde. [A2] Schwerpunkt all dieser Tätigkeiten an der THI waren Arbeiten zur Verbesserung der Theorie des DMOS-Transistors, um die Eigenschaften dieses Bauelementes in Abhängig-

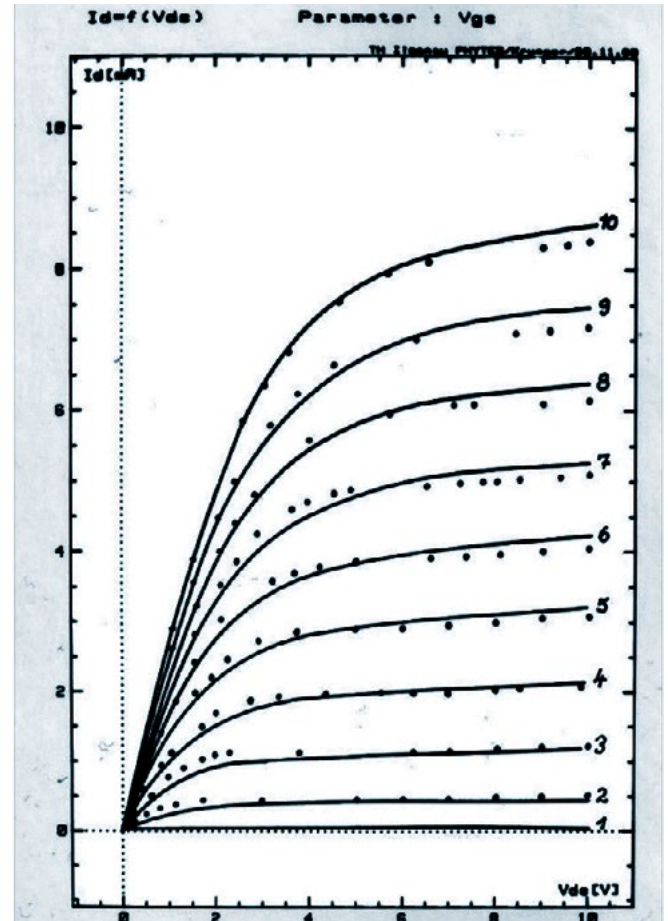


Bild A2: Ausgangskennlinienfeld, Vergleich von gemessenen und berechneten Daten (punktiert), aus [A2]

keit von gegebenen technologischen Parametern berechnen zu können. Dabei war es notwendig, den Ladungsträgertransport im Kanal des DMOS auf physikalischer Ebene zu beschreiben und in die bestehenden Transistormodelle zu integrieren. Das führte dann zu einer Vervollständigung des Zweittransistormodells, mit dem nun erweiterte Berechnungen an DMOS-Transistoren möglich waren.

Neu waren die Arbeiten zur Modellierung eines DMOS-Inverters, der die eigentliche „Schaltzelle“ darstellt. Grundlage dafür war die Erweiterung des Zweittransistormodells mit einem zusätzlichen Lasttransistor, was in der Konsequenz zum Dreitransistormodell führte. Mit diesem war es nun möglich, neben statischen Transferkennlinien auch dynamische Kenngrößen zu berechnen.

Unter Verwendung der Entwurfsregeln der nSGT wurde die Teststruktur DM 11 entworfen. Die Teststruktur enthält eine große Anzahl DMOS-Transistoren zum Nachweis der Stromergiebigkeit und zum Einfluss der Länge des Driftgebietes, außerdem auch NMOS-Transistoren zum Vergleich der Schwellspannungsunterschiede und Depletionstransistoren zur Ermittlung der Lastkennlinien und Substratabhängigkeiten. Logische Grundstrukturen, wie Inverter und Ringoszillatoren, ermöglichten die Bestimmung der dynamischen Eigenschaften. [A2]

Außerdem wurde der symmetrische DMOS-Transistor mit einem source- und einem drainseitigen diffundierten Kanal untersucht. Er erlaubt eine weitgehende Reduzierung des technologischen Aufwandes durch Einsparen eines fotolithografischen Schrittes und ist leichter in eine bestehende nSGT-Strecke zu integrieren als der unsymmetrische DMOS-Transistor.

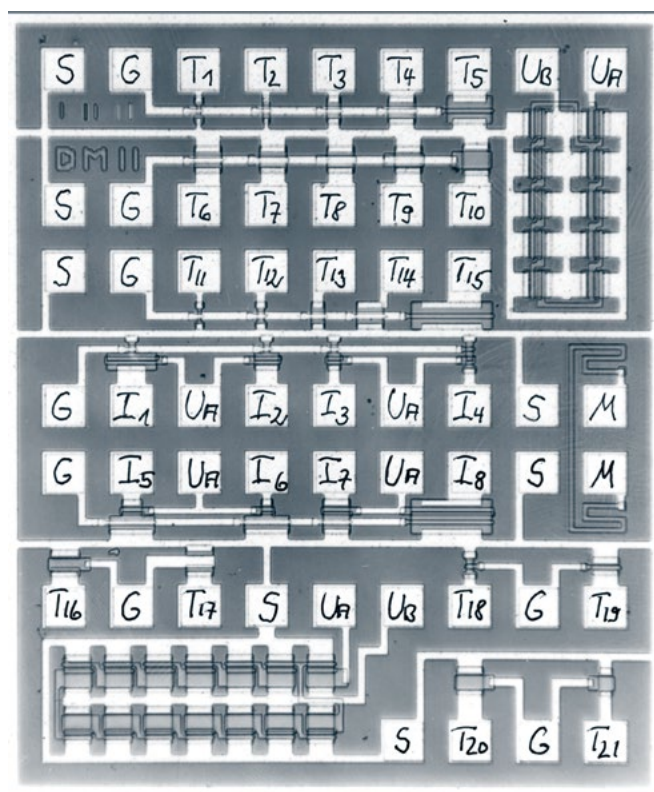


Bild A3: Foto der Teststruktur DM 11, aus [A2]

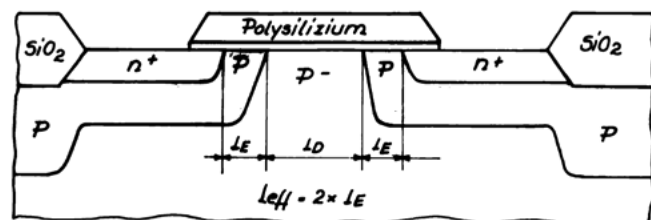


Bild A4: Aufbau eines symmetrischen DMOS-Transistors, aus [A2]

Bei der Analyse des Übertragungs- und Schaltverhaltens des DMOS-Inverters arbeitete ich im Rahmen meiner Diplomarbeit mit. Ich empfand dieses Thema damals als sehr interessant.

Quellen:

- [A1] Krüger, Wilfried. Abschlussbericht: Weiterentwicklung der nSGT-DMOS-Technologie (Variante I) in Kooperation mit dem VEB FWE und DMOS-Prototyp. Technische Hochschule Ilmenau, 26. September 1976.
- [A2] Krüger, Wilfried. Dissertation und Thesen: Weiterentwicklung der Technologie anhand einer konzipierten DMOS-Teststruktur im Hinblick auf die Ausschöpfung der Grenzen des DMOS-Prinzips unter Anwendung der vorhandenen n-SGT. Technische Hochschule Ilmenau, 9. März 1981.

Dr. rer. nat. Konrad Bach erinnert sich

In der zweiten Hälfte der siebziger Jahre trafen zwei wichtige Etappen der DDR-Wirtschafts- und Sozialpolitik zusammen, die entscheidend für mein gesamtes Leben wurden. Walter Ulbricht hatte in den Sechzigern vor allem den industriellen Aufbau im Fokus gehabt. In der Honecker-Ära rückten aber die Sozialpolitik und damit ein gewaltiges Wohnungsbauprogramm in den Vordergrund. In vielen Städten entstanden große, moderne, attraktive Wohngebiete – so auch in Erfurt. Bald wurde aber klar, dass die Wirtschaft im weltweiten Wettbewerb ins Hintertreffen geriet. Insbesondere verloren die technisch sehr guten optischen und mechanischen Geräte und Maschinen, die in der DDR produziert wurden, an Attraktivität auf dem Weltmarkt, weil ihnen die moderne elektronische Steuerung fehlte. So beschloss das Zentralkomitee der SED 1977 die „Beschleunigung der Entwicklung, Produktion und Anwendung der Mikroelektronik in der DDR“. Die verschiedenen Betriebe, die auf diesem Gebiet tätig waren, bekamen staatliche Unterstützung: sie durften neue Arbeitskräfte einstellen. Wenn diese neu Eingestellten noch dazu „Spezialisten“ waren, wurden sie sogar mit Wohnungen und Kindergartenplätzen versorgt. Auch das Funkwerk Erfurt begann damals eine Werbekampagne um gut ausgebildete Fachkräfte, auch an der Friedrich-Schiller-Universität in Jena.

Dort hatte ich 1969 mein Physikstudium begonnen, das nach dem Diplom nahtlos in eine Aspirantur mündete, die bis August 1977 befristet war. In meiner wissenschaftlichen Forschungsarbeit, die bereits im zweiten Studienjahr mit einem Fachpraktikum begann, beschäftigte ich mich durchgehend mit dem Halbleitermaterial Silizium. Ich entwickelte unter anderem spezielle Diagnoseverfahren an einem Rasterelektronenmikroskop und wendete diese auf Effekte an, die bei der Halbleiterdotierung mittels Ionenimplantation auftreten. In dieser Zeit besuchte

ich mehrmals das Funkwerk Erfurt, um technische Details zu diskutieren und war von diesem Werk begeistert: Schon auf dem Vorplatz hielt eine zarte Frauenhand (etwa 10 m hoch und aus Beton) eine Siliziumscheibe in die Höhe, um die auf verschiedenen Bahnen Elektronen kreisten. Im Foyer des Besuchereingangs war eine ganze Wand mit einem Kupferrelief dekoriert, das nicht nur kunsthandwerklich beeindruckend war. Dort standen genau die mathematischen Formeln, die zum Kernstück meiner Diplomarbeit gehörten. Hier später mal arbeiten zu dürfen musste doch traumhaft sein.

So mag es nicht verwundern, dass ich den Werbungen gegenüber offen war und am 1. September 1977 meine Tätigkeit im VEB Funkwerk Erfurt aufnahm. Die versprochene Neubauwohnung war zwar erst im November bezugsbereit und der Kindergarten noch einige Monate später nutzbar, trotzdem war diese Veränderung wie ein Fünfer im Lotto. Die Abteilung, in der ich begann, hieß „Physikalische Sonderverfahren“ und gehörte zur Technologieentwicklung. Schnell war klar, dass mit dem Sonderverfahren die Ionenimplantation gemeint war, was man aber nicht sagen durfte, da Ionenimplantationsanlagen ganz oben auf der COCOM-Embargoliste standen. Hier war ich wirklich Spezialist und wurde sehr bald mit anspruchsvollen technischen und technologischen Aufgaben betraut. Die technischen Aufgaben bestanden oft darin, fehlende Ersatzteile durch geschickte Hilfskonstruktionen zu ersetzen. Auch die Umrüstung des Ionenimplanters von 2- auf 3-Zoll-Scheibendurchmesser wurde mir anvertraut.

Im Rahmen der ostdeutschen Arbeitsteilung war die Erfurter Fabrik der Standort für die Produktion digitaler „Unipolarer Schaltkreise“. Im Halbleiterwerk Frankfurt/Oder wurden dagegen bipolare Schaltkreise gefertigt, unter anderem die beliebten Operationsverstärker. Transistoren und andere Bauelemente für die Leistungselektronik kamen aus Stahnsdorf bei Berlin. Die Entwicklung von Schaltkreisen und vor allem der dazu benötigten Herstellungstechnologien erfolgte im Dresdner Zentrum für Mikroelektronik mit seinem exzellenten Entwicklerteam. Auch die MOS-Technologien für die unipolaren Schaltkreise wurden von Dresden nach Erfurt überführt. Die Erfurter Ingenieure hatten die Aufgabe, für eine stabile Fertigung zu sorgen, was keineswegs trivial war: Neue Techno-

logien sind oft mit neuen Wirkprinzipien und Maschinen verbunden. Es müssen Kinderkrankheiten erkannt und ausgeräumt werden. Wenn diese „Pflicht“ erfüllt war, gab es genügend Freiraum für eigene Weiterentwicklungen. Gerade das Vorhandensein einer Ionenimplantationsanlage erlaubt es, sich neue Lösungen für vorhandene integrierte Transistortypen oder sogar ganz neue Wirkprinzipien auszudenken. Fast jedes Mitglied in unserer Abteilung hatte neben seinen „Pflichten“ ein interessantes „Kür“-Entwicklungsprojekt. Ziel war es, ohne weitere Investitionen kleinere bzw. schnellere Transistoren oder Schaltungen mit geringerem Leistungsbedarf zu ermöglichen. Als ich 1977 begann, wurde gerade der erste Schaltkreis U113F für eine Quarz-Armbanduhr gefeiert. Integrierte Schaltkreise, die mit einer kleinen Batterie auskommen, dürfen nur extrem wenig Energie verbrauchen. Das gelingt nur mit der CMOS-Technik. Um aber auf einem Chip p-MOS- und n-MOS-Transistoren zu integrieren, braucht man unbedingt die Ionenimplantation als Dotierverfahren. Nur damit kann man kleinste Dotiermengen exakt genug einbringen, um alle Transistorparameter stabil im Zielgebiet zu halten.

Zu dieser Zeit kam auch die Idee auf, durch das DMOS-Prinzip Transistoren mit kleineren Kanallängen zu bauen. Je kleiner die Kanallänge, desto schneller kann ein MOSFET schalten.

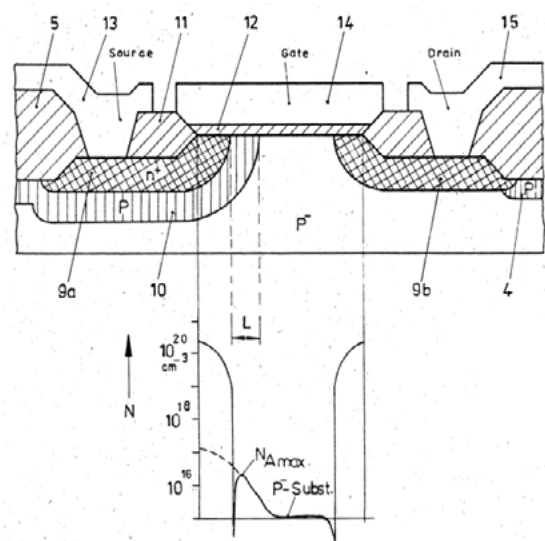


Bild B1: Vertikaler DMOS Hochvolttransistor im Querschnitt, aus [B2]

Bild B1 zeigt einen solchen Transistor im Querschnitt. Mit „Source“ ist der Metallanschluss (13) eines stark n-dotierten Siliziumbereiches (9a, n⁺) bezeichnet. Dieses Stück n-Silizium ist die „Quelle“ eines MOS-FETs. Das zweite, mit Metall angeschlossene (15), stark n-dotierte Stück Silizium (9b) ist das „Drain“, also die Senke, an die eine positive Spannung angeschlossen wird. Zwischen beiden n⁺-Gebieten ist das Silizium p-leitend. Der Übergang vom Drain n⁺-Gebiet ist in Sperrrichtung gepolt, es kann kein Strom fließen. Wird an die Gate-Elektrode (14) eine positive Spannung angelegt, dann entsteht über der MOS-Anordnung 14 (Metall), 12 (Oxid) und dem darunter liegenden Silizium ein elektrisches Feld. Wenn dieses groß genug ist, kann der „Feldeffekt“ dazu führen, dass die p-leitenden Gebiete direkt an der Grenzfläche zum Oxid invertiert werden. Es entsteht ein n-leitfähiger Kanal, der den Elektronenstrom vom Source zum Drain ermöglicht, der Metall-Oxid-Silizium-Feld-Effekt-Transistor (=MOSFET) wird geöffnet. Das p-Gebiet wird auch die „Schwelle“ genannt. Die Spannung, die man am Gate benötigt um die Schwelle zu beseitigen, ist die Schwellenspannung. Diese ist für das mit p-bezeichnete Stück Silizium sehr klein (etwa 0 V). Um aber das mit 10 markierte stärker dotierte p-Silizium-Gebiet zu invertieren, benötigt man etwa 1 V. Dieses Stück ist der maßgebliche Teil der Schwelle. Es gilt, ihn so kurz wie möglich zu machen, um schnell schalten zu können. Konventionell macht man das, indem man den Abstand zwischen 9a und 9b, der durch die Breite der Gateelektrode 14 bestimmt wird, verkleinert. Auch damals ging der weltweite Trend zu immer kleineren Strukturen. Dem direkt zu folgen, hätte aber bedeutet, neue Maschinen anzuschaffen, die in der Lage gewesen wären, kleinere Strukturen abzubilden und herzustellen. Mit dem DMOS-Prinzip nun wird die wirksame Kanallänge nicht mittels Fotolithografie und Schichtstrukturierung definiert, sondern man nutzt die Tatsache, dass verschiedene Dotierstoffe ein unterschiedliches Diffusionsverhalten haben. Wenn man die Dotiermenge genau einstellen kann und die Temperatur und Zeit während des Diffusionsvorgangs gut kontrolliert, kann man Kanallängen unter einem Mikrometer erzeugen und das in einer Fabrik, in der die beherrschten Strukturgrößen im Bereich 10 µm liegen.

Aus unserem Entwicklerkollektiv beschäftigten sich zwei Kollegen mit diesem Prinzip: Gerhard Cattus untersuchte wissenschaftlich tiefgründig das oben erwähnte unterschiedliche Diffusionsverhalten. Dazu arbeitete er mit Forschern der technischen Hochschule Ilmenau eng zusammen. Die Ergebnisse konnte er als Dissertation zusammenfassen und bekam im Jahre 1985 dafür den Dokortitel [B1]. Seine Aktivitäten beschränkten sich aber nicht auf die reine Forschung. Er konnte auch zahlreiche technische Lösungen als Patent einreichen (z. B. [B2]). Wettbewerber auf diesem Gebiet nutzten als Kante für die Doppeldiffusion das Gate des MOSFETs selbst. Das funk-

niert aber nur, wenn das Gate-Material die Diffusionstemperaturen aushält, also zum Beispiel aus polykristallinem Silizium besteht. In unserem Entwicklungslabor wurden aber die Gates aus Aluminium gefertigt und damit erst nach der Diffusion aufgebracht. Mit sehr speziellen Schichtanordnungen gelang es Gerhard Cattus trotzdem, den Selbst-Justage-Effekt auszunutzen und keine Nachteile bezüglich der parasitären Kapazitäten zu haben (Bild B1). Seine Arbeiten fanden Eingang in die Entwicklung einer integrierten MOSFET-Anordnung für den VHF-Bereich. Unter der Typbezeichnung SM200 wurden einige Hunderttausend dieser (bei Radiobastlern sehr beliebten) Kaskode produziert.

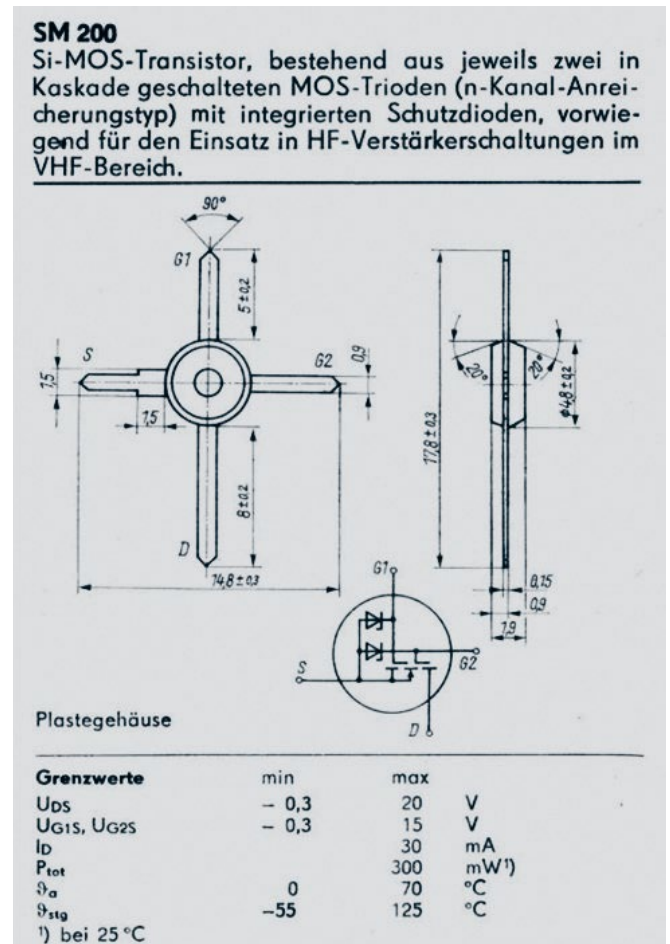


Bild B2: DMOS-Transistor SM200 Datenblatt, <https://de.web-bcs.com>

Der erwähnte Trick, kleinere Strukturen herzustellen, funktioniert aber nur für die Länge des MOSFET-Kanals. Alle anderen Elemente bleiben gleich groß oder benötigen sogar etwas mehr Platz. Das Prinzip half also nicht, mehr Schalttransistoren pro Fläche unterzubringen. Außerdem ist eine solche Kaskoden-Schaltung eher ein diskretes analoges Bauelement und kein hochintegrierter digitaler Schaltkreis. Der SM200 gehörte damit nicht zu den Produkten, für die Erfurt als Produktionsstätte vorgesehen war. Nachdem alle während der Entwicklungszeit hergestellten Erzeugnisse verkauft waren, wurde diese Entwicklungslinie wieder eingestellt.

Die zweite Person, die sich in unserem Team mit DMOS beschäftigte, war ich. In meiner Anfangszeit im Funkwerk begann im weltweiten Wettbewerb der Trend, Leistungstransistoren nicht mehr ausschließlich in Bipolar-Technik, sondern auch in MOS-Technik zu entwickeln. Zur Steuerung großer Ströme und Spannungen braucht man bei Bipolartransistoren signifikante Leistungen. Ein MOS-Transistor kann aber quasi leistungslos angesteuert werden. Auch für solche Bauelemente kann das DMOS-Prinzip vorteilhaft eingesetzt werden. Die Kanäle, die den Strom steuern, sind kurz und liegen an der Oberfläche direkt neben dem Source und werden, wie im normalen MOSFET, vom Gate kontrolliert. Der Strom fließt zum Drain, das sich aber an der Rückseite der Siliziumscheibe befindet.

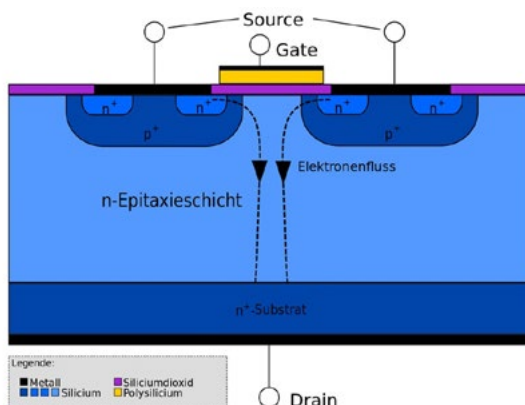


Bild B3: Querschnitt eines Leistungs-MOSFETs, aus [4]

Damit fällt die Spannung vertikal ab. Je nach Dicke dieser Schicht kann die Spannung einige Hundert bis 1000 V betragen. In einem Leistungstransistor werden sehr viele solche doppeldiffundierten n^+/p^+ -Inseln parallel geschaltet. Die Größe der Oberfläche bestimmt den von den ebenfalls parallel geschalteten Gates kontrollierten Strom zum Drain, der im Bereich mA bis 100 A liegen kann. Manchmal ist die gesamte Si-Scheibe ein einziges Bauelement. Ein typisches Bauelement dieser Zeit ist der SIPMOS (Siemens Power MOSFET) [B3]. Solche diskreten Leistungsbaulemente haben sich bewährt und werden auch heute noch gefertigt.

Meine Aufgabe war es aber, integrierbare Transistoren zum Schalten höherer Spannungen zu entwickeln, also mehrere Hochvolttransistoren in einem Chip unterzubringen. Das bedeutet, auch das Drain muss

von der Oberfläche her zugänglich und isoliert sein. Das Potenzial muss lateral abfallen, ohne dass Feldstärkespitzen auftreten. Die Zielwerte der zu schaltenden Spannungen lagen im Bereich 100 bis 200 V. Potenzielle Anwendungsfälle waren damals zum Beispiel die Ansteuerung von Glimmentladungsröhren für digitale Anzeigen. Ein solcher MOSFET war auf der Source- und Kanalseite genauso aufgebaut wie der Hochfrequenz-DMOS von Gerhard Cattus (Bild B1). Um aber die hohe Spannung zu beherrschen, wurde drain-seitig (Bild B1, Gebiet 9b) viel untersucht, variiert und optimiert. Heutzutage existieren Rechenprogramme, mit denen die Potenzialverhältnisse zwei oder sogar dreidimensional modelliert werden, um dann das Optimum auswählen zu können. Diese „Prozess- und Bauelemente-Simulation“ steckte damals noch in den Kinderschuhen. Aber die oben erwähnten (in Kupfer getriebenen) Formeln halfen mir auch hier. Sie waren zwar nur eindimensional, durch eine Transformation in Polarkoordinaten konnte ich aber zweidimensionale Abschätzungen machen und mit einer Handvoll von Layoutvarianten (Bild B4, T1 bis T8) und zwei technologischen Durchläufen gelang es, in nur einem halben Jahr Mitte 1980 die Zielwerte zu erreichen.

Leider wurden diese Ergebnisse damals nicht vermarktet. Erstens hat sich die Displaytechnik rasant weiterentwickelt – die angedachte Anwendung gab es nicht mehr. Außerdem war der Fokus im Funkwerk

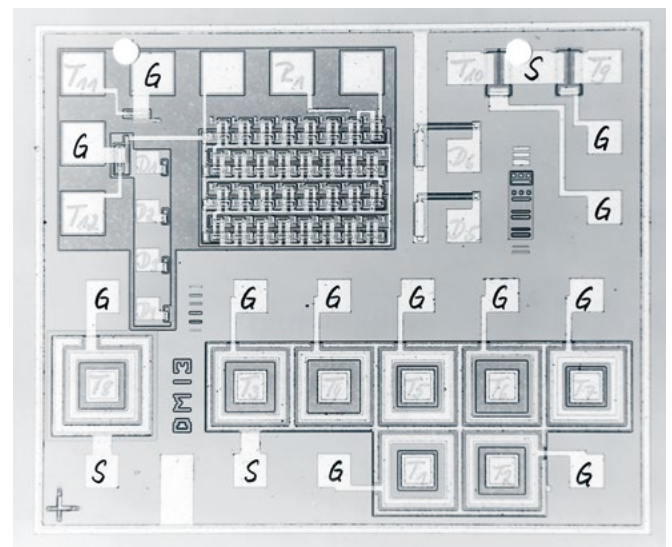


Bild B4: Testfeld DM 13 zur Untersuchung von Hochvolt-MOSFETs, Funkwerk Erfurt, 1979

auf deutlich höherintegrierte digitale Schaltungen ausgerichtet. Leistungstransistoren wurden im Halbleiterwerk Frankfurt/Oder bzw. im Zweigbetrieb Gleichrichterwerk Stahnsdorf entwickelt. Mit diesen Firmen hatte die THI in den frühen Achtzigern Kooperationsbeziehungen und man arbeitete an einer ähnlichen Konstruktion wie ich. Das Ganze habe ich aber erst viel später erfahren. Damals waren diese Aktivitäten streng vertraulich. Besonders schizophoren war, dass wegen der fehlenden MOS-Erfahrungen in Frankfurt/Oder die Experimente der Ilmenauer im Funkwerk-Erfurt durchgeführt wurden, ohne dass die Erfurter Entwickler davon wussten.

Erst zur Wendezeit habe ich in einer Vorlesung von Reinhard Herzer die Ilmenauer Ergebnisse kennengelernt. Er hat auch auf die bahnbrechenden Arbeiten der Firma Philips aus dem Jahre 1979 hingewiesen [B4]. Seit dieser Zeit wird der technische Ansatz „RESURF“ genannt, was für „reduced surface field“ steht und genau das beschreibt, was ich etwa zur selben Zeit erreicht hatte. Reinhard Herzer hat seine Ergebnisse in seiner Habilitationsschrift zusammengefasst [B5]. Aus dieser stammt auch Bild B5, die die beiden möglichen Grundkonfigurationen des lateralen DMOS zeigt: Bei einem liegt der „Steuerteil“ (n^+ -Source, p^+ -Kanal mit darüberliegender Gatelektrode) im p -Substrat. Dieser wird „low-side-switch“ genannt. Im zweiten greift die Hochvolt- n -Wanne um diesen Steuerteil herum und isoliert diesen. Das Source-Potential kann „angehoben“ werden. Man kann diesen Schalter sowohl als low-side-, wie auch als high-side-switch betreiben.

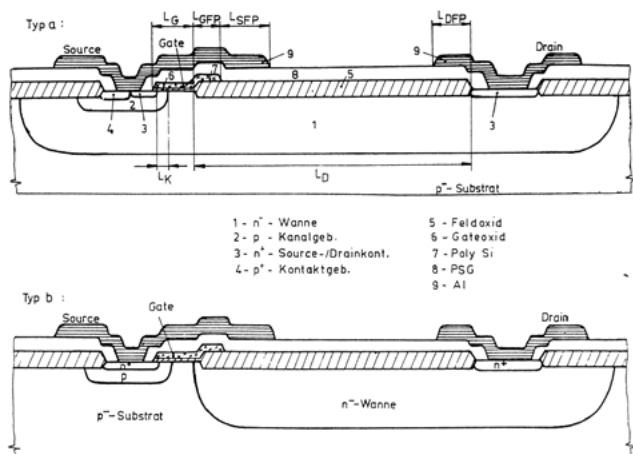


Bild B5: Lateraler DMOS-Hochvolttransistor im Querschnitt; a) für High- und Low-Side-Schalter, b) nur für Low-Side-Schalter, aus [B5]

Auch wenn meine damaligen Entwicklungsarbeiten nicht zu großen Produktionszahlen führten, so waren die gewonnenen Erfahrungen keinesfalls vergeblich. Zehn Jahre später, nachdem sich die Mikroelektronik in Erfurt neu hatte orientieren müssen, wurden integrierbare Transistoren für höhere Spannungen ein wichtiges Element im Angebotsportfolio der Nachfolgefirma in Erfurt.

Wie überall in der Industrie der DDR hatte die politische Wende auch in der Erfurter Mikroelektronikindustrie zu gewaltigen Veränderungen geführt. Die Öffnung der Grenzen war nicht nur für den Reiseverkehr wichtig. Auch für die Industrie fielen Grenzen weg: Sie konnte und musste an der weltweiten Arbeitsteilung teilnehmen. Nur wenige Produktionsstätten waren ausreichend wettbewerbsfähig, um in dieser freien Marktwirtschaft zu überleben.

In Erfurt gab es 1989 drei alte Fertigungslinien in der Innenstadt sowie zwei laufende, relativ neue Clean-Rooms im Erfurter Südosten (ESO1 und ESO2). Der Dritte (ESO3) stand kurz vor der Inbetriebnahme und für einen Vierten war der Rohbau fertiggestellt. Die Linien in der Innenstadt wurden komplett abgewickelt und abgerissen. Der älteste Clean-Room im Erfurter Südosten (ESO1) bekam eine völlig andere Nutzung: Unter dem Namen ERSOL versuchte man mit der aufkeimenden Photovoltaik sein Glück. Als Chipfertigungslinien überlebten die Clean-Room-Komplexe ESO2 und ESO3, allerdings unter verschiedenen Eigentümern und mit etwas unterschiedlichen Geschäftsmodellen.

Beide Erfurter Chiphersteller orientierten sich auf anwendungsspezifische Mixed-Signal-Schaltkreise. Neben dicht-gepackten logischen Schaltungen sollten auch analoge Bausteine integriert werden. Ein sehr interessanter Markt auf diesem Gebiet ist die Automobilelektronik. Damit wird auch die Beherrschung höherer Spannungen wieder wichtig. Bekanntlich hat eine Autobatterie eine Spannung von 12 V. Verschiedene Sicherheits- und Zuverlässigkeitsbestimmungen verlangen aber, dass Chip-Ein- und -Ausgänge auch bei 42 V nicht kaputt gehen. Man muss also für solche Schaltkreise Logiktransistoren mit 5 V Betriebsspannung neben „Hochvolttransistoren“ mit Durchbruchspannungen im Bereich 50 bis 60 V integrieren. Nun konnte ich endlich wieder auf meine vor zwölf Jahren gemachten Erfahrungen zurückgreifen und für die Firma Thesys, die den Clean-Room ESO3 betrieb, die benötigten Transistoren entwickeln, nach denen unsere Schaltkreisentwickler dringend suchten.

Auch im Clean-Room ESO2, den die Firma X-FAB betrieb, spielten solche Transistoren eine wichtige Rolle. Diese Firma entwickelte selbst keine Schaltkreise, sondern fertigte für Kunden bzw. Partner. Von denen kamen auch die Zielwerte und zum Teil das technologische Know-how. Neben den erwähnten integrierten Transistoren für erhöhte Spannungen wurden hier auch diskrete Leistungs-MOSFETs nach Bild B3 für verschiedene Kunden gefertigt. Es wurde sogar erfolgreich ein solch vertikaler DMOS für die Integration zusammen mit CMOS-Logik entwickelt, der heute noch im Angebot ist [B6]. Dazu verwendete man eine ganz spezielle Scheibenkonstruktion: die SOI-Scheibe (Silicon On Insulator). Die aktive Siliziumschicht ist durch eine SiO_2 -Schicht von der Träger-

scheibe isoliert. Auch senkrecht wird die aktive Schicht durch isolierende „Wände“ separiert. In diesen „Räumen“ kann man entweder konventionelle CMOS-Schaltungen oder quasi-vertikale Leistungstransistoren errichten (Bild B6). Am Boden dieses „Raumes“ wird der Strom im Drain aufgefangen und entlang der isolierenden Wände durch eine stark n-dotierte Schicht zur Oberfläche geführt. Die Dicke der aktiven Schicht bestimmt wieder die elektrische Spannung und mittlerweile werden mit diesem Ansatz Bauelemente hergestellt, die 650 Volt aushalten und es erlauben, die drei Phasen des elektrischen Wechselstromnetzes zu kontrollieren.

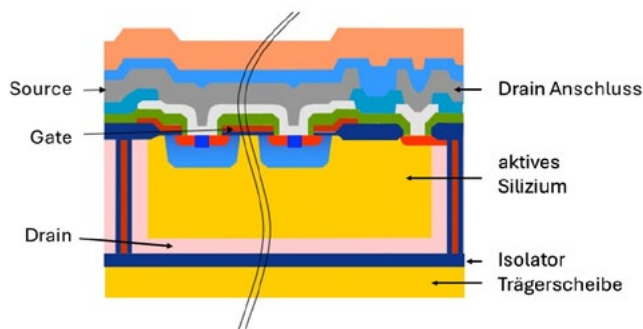
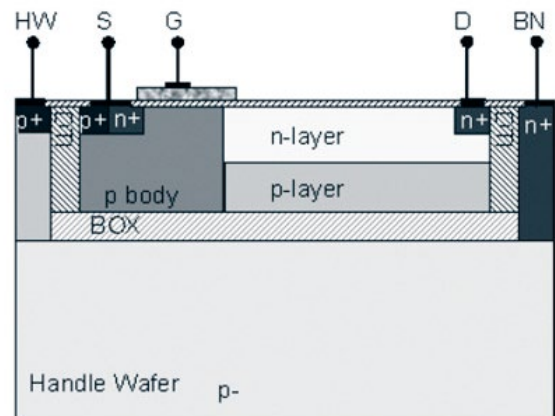


Bild B6: Integrierbarer quasi-vertikaler DMOS, aus [B6]

Anfangs gab es zwischen den beiden Erfurter Firmen zunächst keine Zusammenarbeit, da diese auf dem Markt im Wettbewerb standen. Erst mit der Jahrtausendwende und der Vereinigung dieser beiden Firmen zur heutigen X-FAB Semiconductor Foundry wurde diese Entwicklung mit vereinten Kräften weitergeführt. Die neue X-FAB Foundry hat sich vollständig auf die Halbleiterfertigung beschränkt, die Schaltungsentwicklung erfolgt bei ihren Kunden. Die meisten Fertigungsprozesse sind nicht mehr produkt- bzw. kundenspezifisch, sondern sind modular aufgebaut und stehen den Schaltungsentwicklern der ganzen Welt offen. Mit diesen Prozessen müssen natürlich wettbewerbsfähige elektronische Schaltungen machbar, also leistungsfähige Transistoren integrierbar, sein. Dazu gehören unbedingt auch solche, die höhere Spannungen vertragen und hier steht wieder der DMOS im Mittelpunkt.

Auch wenn mittlerweile die Kanallängen kleiner als $1\ \mu\text{m}$ ohne den Doppeldiffusionstrick hergestellt werden (das „D“ im Namen hat eigentlich keine Grundlage mehr), nennt man die MOS-Transistoren für höhere Drain-Spannungen, bei denen das schwach dotierte Drain-Erweiterungsgebiet um den Steuerteil herumgreift (Typ a, Bild B5), immer noch DMOS. Der Typ b aus Bild B5 wird oft nur Hochvolt- oder Drain-Extension-Transistor genannt. Für die Spannungsfestigkeit des MOSFETs im ausgeschalteten Zustand und die Leitfähigkeit im geöffneten Zustand ist dieses Drain-Erweiterungsgebiet besonders wichtig. An dieser Stelle fand und findet die weitere Entwicklung statt. Neben der Verkleinerung der digitalen Transistoren auf mittlerweile Kanallängen von $0,1\ \mu\text{m}$ wird ständig die Spannungsfestigkeit und vor allem die Leitfähigkeit sowie die Robustheit verbessert.



HW: Anschluss der Trägerscheibe;
S: Source; G: Drain; D: Drain; BN: vergrabene n/p-Diode
BOX: vergrabenes Siliziumdioxid

Bild B7: Lateraler Super-Junction DMOS in SOI, aus [B7]

Bild B7 zeigt ein Querschnittsbild aus einer DMOS-Veröffentlichung der X-FAB von 2010 [B7]. Der Transistor ist allseitig dielektrisch isoliert und das Drain-Erweiterungsgebiet hat neben der n-Schicht eine p-dotierte Schicht, die eine höhere Dotierung der n-Schicht ermöglicht und trotzdem zur kompletten Verarmung im Sperrfall führt. Gefährliche Feldstärke-

spitzen werden vermieden und somit ein besserer Kompromiss zwischen Spannungsfestigkeit im ausgeschalteten und Leitfähigkeit im eingeschalteten Zustand erreicht. Mit dieser Schichtanordnung kann die gewünschte Spannungsfestigkeit im Bereich 20 bis 200 V allein durch die Variation der Geometrie eingestellt werden. An den technologischen Parametern muss nichts geändert werden, um im optimalen Bereich zu bleiben.

Das DMOS-Prinzip wurde einst als Notlösung zur Herstellung kurzer Kanäle für schnelle Transistoren erfunden. Durch die heutigen Möglichkeiten, wesentlich kleinere Strukturen zu erzeugen, ist diese Anwendung längst überholt. Aber der zweite Vorteil, mit diesem Prinzip hohe Spannungen und Ströme zu steuern, ist nach wie vor aktuell und wird in der ganzen Welt weiter verfolgt. Auch wenn ich schon fast zehn Jahre nicht mehr aktiv am Geschehen mitarbeite, so bin ich doch stolz, dass in der X-FAB ein internationales Team mit etwa 20 Mitarbeitern an fünf Standorten auf drei Kontinenten dieses Prinzip, das wir vor mehr als 45 Jahren erstmalig untersucht haben, weiterhin anwendet und vervollkommnet.

Quellen:

- [B1] Cattus, Gerhard. Untersuchung der Simultandiffusion von Bor und Arsen zur Herstellung von DMOS-Transistoren und Optimierung der Kennlinienform mittels Driftgebietsdotierung. Dissertation an der Technischen Hochschule Ilmenau, 1984.
- [B2] Cattus, Gerhard. Verfahren zur Herstellung von MOS-Transistoren mit diffundiertem Kanalgebiet. Patentschrift DD 222731A, 1984.
- [B3] Wikipedia; Leistungs-MOSFETs
- [B4] Appels, J.A. and Vaes, H.M.J. HV Thin Layer Devices (RESURF Devices). IEDM 1979.
- [B5] Herzer, Reinhard. Modellierung, Entwurf, technologische Realisierung und Optimierung von MOS-gesteuerten Hochspannungsbaulementen für Smart Power- Schaltkreise. Habilitationsschrift an der Technischen Hochschule Ilmenau, 1991.
- [B6] Lerner, R.; Eckoldt, U.; Knopke, J. HighVoltage Smart Power Technology with Dielectric Insulation. Conference on Integrated Power Systems 2002.
- [B7] Hoelke, Alexander u.a. A 200 V Partial SOI 0.18 μm CMOS technology. ISPSD 2010.

PD Dr.-Ing. habil. Reinhard Herzer erinnert sich

1975 legte ich das Abitur in meiner Heimatstadt Ilmenau ab und begann im gleichen Jahr ein Studium der Elektrotechnik und Mikroelektronik an der Sektion PHYTEB der dortigen Technischen Hochschule (später Universität). Ich beendete das Studium 1979 und trat danach sofort in die Promotionsphase ein, die ich 1983 mit der Dissertation A abschloss. Nach einer anderthalbjährigen Unterbrechung durch den Armeedienst setzte ich meine Qualifikationsphase an der TH/TU Ilmenau mit der Habilitation fort, die 1991

beendet war. Von 1991 bis 1994 war ich an der gleichen TU als Wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig und führte dann meine berufliche Tätigkeit bei Semikron Elektronik GmbH Nürnberg sowie als Privatdozent an der TU Ilmenau fort. Ich kann also sagen, dass ich dieser wissenschaftlichen Einrichtung seit Beginn meiner Ausbildung bis zum heutigen Tag besonders verbunden war.

Die Entwicklung des DMOS-Transistors als schnellem Logiktransistor fand Ende der 70er Jahre bis ca. 1981 im FWE statt. Die Arbeiten wurden durch Kooperationsverträge des FWE mit der TH Ilmenau (PHYTEB, siehe Dissertation Wilfried Krüger und Forschungsberichte der Arbeitsgruppe von Dagmar Schipanski) unterstützt. An den Forschungsarbeiten zur Entwicklung des DMOS-Transistors als schnellem Logiktransistor habe ich selber nur am Rande teilgenommen. Diese Entwicklungsarbeiten, d.h. einen Kurzkanaltransistor mit einer Kanallänge von ca. 1 μm in einer 5 bzw. 10 μm CMOS- bzw. nSGT-Technologie herzustellen, hatten sich zu Beginn der achtziger Jahre auch sehr schnell erledigt, da die Fotolithografie in den Bereich von 1 μm vordrang, wodurch der DMOS-Transistor als schneller Logiktransistor überflüssig wurde. Anfang der achtziger Jahre begann international die Erfolgsgeschichte des DMOS-Transistors als Hochspannungs- und Leistungstransistor, die bis in die Gegenwart andauert.

An den DMOS-Entwicklungen zum Hochspannungs- und Leistungstransistor habe ich unmittelbar und federführend teilgenommen. Als klar war, dass durch das schnelle Voranschreiten der Fotolithografie der DMOS-Transistor als schneller Logiktransistor nicht benötigt werden würde, konzentrierten sich die F&E-Aktivitäten der THI ab ca. 1982/83 auf seine Anwendungen als Hochspannungs- und Leistungstransistor. (International fand das bereits ab ca. 1979 statt.) Meine Mitstreiter waren in der Arbeitsgruppe von Frau Dr. Dagmar Schipanski an der TH Ilmenau damals insbesondere die Promoventen Jürgen Schmidt und Ivo Djermanov. Erste Grundstrukturen von lateralen DMOS-Hochspannungstransistoren wurden 1983/84 an der Technischen Hochschule Ilmenau simuliert, entworfen (Design) und entsprechende Testfeld-Wafer im Funkwerk Erfurt (FWE) auf einer nSGT (N-Kanal-Silizium-Gate-Technologie) hergestellt (Entwicklungskooperation THI/FWE). In mehreren Testfeldern wurden integrierfähige laterale DMOS-Transistoren bis zu Sperrspannungen von 400 V mit Feldplatten und Floating-Feldplatten über der lateralen Driftzone entwickelt und realisiert.

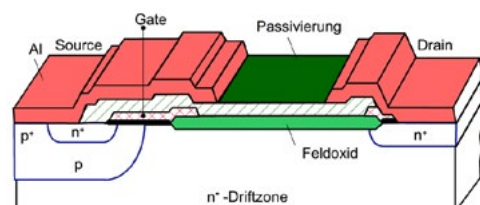


Bild C1: Querschnitt eines lateralen DMOS-Transistors mit Feldplatten, aus [C1]

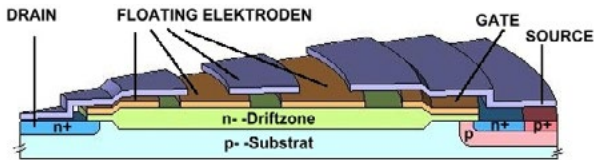


Bild C2: Querschnitt eines lateralen RESURF-DMOS-Transistors mit Feldplatten und Floating-Elektroden in kreisförmiger Anordnung für hohe Sperrspannungen, aus [C1]

Ab 1985 erfolgte im Kombinat Mikroelektronik eine Aufteilung der Forschungsaktivitäten. Das FWE sollte sich stärker mikroelektronischen Schwerpunkten widmen (Logik, Mikroprozessoren, Speicher etc.), das Halbleiterwerk Frankfurt/Oder (HFO) bipolaren Bauelementen und Mixed-Signal-Schaltkreisen und das Gleichrichterwerk Stahnsdorf diskreten vertikalen Leistungsbaulementen. Da das HFO bis dahin noch nicht über eine CMOS-Halbleiterlinie (mit Gateoxid und Poly-Si-Gate) verfügte, wurde diese Halbleitertechnologie vom ZFTM Dresden nach Frankfurt/Oder überführt. Bis zur Freigabe einer modernen BCDMOS-Technologie im HFO (ca. 1985/86) wurden THI/HFO-Testfelder noch im FWE gefertigt. Die Entwicklungsaktivitäten der THI waren ab 1985 an das HFO über Kooperationsverträge gebunden. In dieser Forschungszusammenarbeit mit dem HFO entstanden bis 1990 integrierte laterale DMOS-Hochspannungstransistoren, laterale IGBT sowie bidirektionale laterale MOS-gesteuerte Thyristoren (TRIMOS), die als integrierte Halbleiterrelais eingesetzt wurden. Die Bauelemente wurden an der THI entwickelt (2D-Simulationen zu Bauelementestrukturen, Design der Bauelemente), im HFO auf der BCDMOS-Technologie gefertigt und schließlich vom HFO in SLIC-Fernmeldeschaltkreisen (subscriber line interface circuits) eingesetzt. Da laterale IGBT und erst recht laterale MOS-gesteuerte Thyristoren für Spannungen bis 400 V im Substrat dielektrisch isoliert werden müssen, wurden parallel in einer Forschungs Kooperation zwischen dem HFO und dem Institut für Halbleiterphysik Frankfurt/Oder (IHP) dielektrisch isolierte Wafersubstrate (SOI-Wafer) auf Basis der Hilfsträger-Technologie entwickelt. Mit dieser Technologie wurde es möglich, verschiedene integrierte Hochspannungstransistoren bis 400 V zusammen mit digitaler und analoger Elektronik für die verschiedensten Anwendungsgebiete zu integrieren.

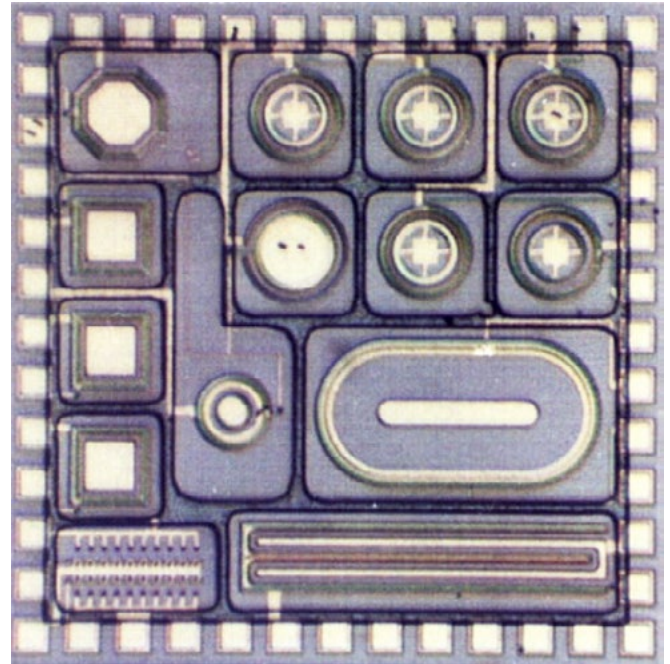


Bild C3: DMOS-Hochspannungstransistoren (bis 400 V) in SOI-Substratinseln (Testfeld), aus [C2]

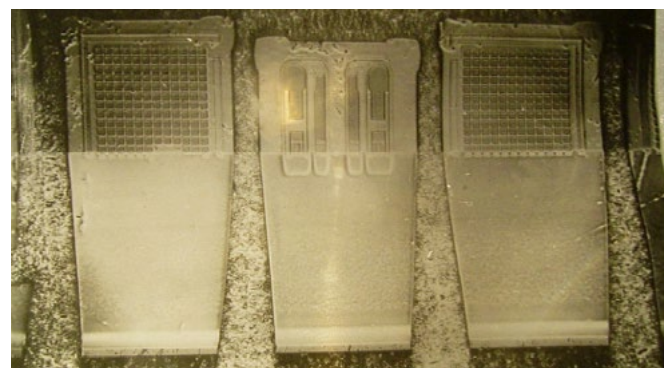
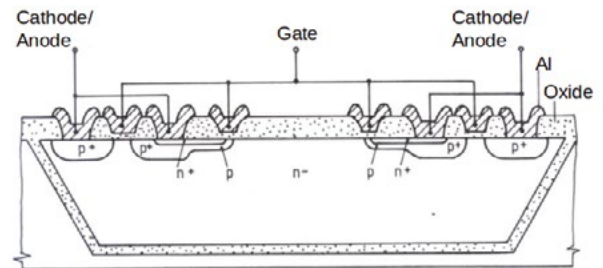


Bild C4: Querschnitt und rasterelektronische Aufnahme eines lateralen TRIMOS (MOS-gesteuerter TRIAC-Halbleiterrelais) in SOI-Substrat, aus [C3]

Ab 1988 bis 1990 bestand noch eine weitere Forschungskooperation zwischen der TH Ilmenau und dem Gleichrichterwerk Stahnsdorf (GWS). In dieser Forschungskooperation wurden die ersten diskreten vertikalen DMOS-Transistoren der sozialistischen Staatengemeinschaft entwickelt. Die THI war dabei für die Simulation und das Design dieser diskreten vertikalen DMOS-Transistoren bis 400-V-Sperrspannung verantwortlich. Die Technologie dafür wurde von der THI gemeinsam mit den Teilschritttechnologien des HFO erarbeitet und die Wafer bis 1990 auch im HFO gefertigt, da das Gleichrichterwerk Stahnsdorf über keine moderne MOS-Technologie verfügte.

Die Zusammenarbeit der Kollegen (Diplomanden, Promoventen) der THI mit den Kollegen des FWE, aber auch den Kollegen des HFO und GWS war immer gekennzeichnet durch Hilfsbereitschaft, Kooperation, Engagement und Zielorientiertheit. Teilweise entwickelten sich sogar freundschaftliche Kontakte, die bis in die Gegenwart Bestand haben. Technische Probleme wurden offen diskutiert und analysiert und schließlich Verbesserungsmaßnahmen gemeinsam beschlossen und umgesetzt. Als besonders bemerkenswert ist von meiner Seite hervorzuheben, dass mir von der Leitung des Kombinats Mikroelektronik der Zugang zu den Entwurfs- und Technologiebereichen und den Technologiemitarbeitern gewährt wurde, so dass eine erfolgreiche Zusammenarbeit bei der Forschung und Entwicklung tatsächlich möglich wurde. Alle beteiligten Kollegen, egal ob an der THI oder in den Firmen, hatten eine ausgezeichnete Ausbildung sowie eine hohe Motivation und Leistungsfähigkeit. Insbesondere wenn sie an modernen Halbleiterentwicklungen mit modernen Tools (Hard- und Software) sowie mit modernen

Halbleitertechnologien arbeiten konnten, wie das bei der Entwicklung und Integration von DMOS-Transistoren, IGBTs und MOS-gesteuerten Thyristoren in SOI-Wafersubstraten der Fall war, entwickelte sich eine hohe Dynamik und Zielstrebigkeit im Team. Auf dieser Basis ließen sich auch internationale Spitzen-ergebnisse erreichen.

Bei der Entwicklung der lateralen und vertikalen DMOS-Transistoren standen internationale Fachliteratur und auch offen zugängliche Forschungsberichte von Siemens-Halbleiter (heute Infineon) zur Verfügung, an denen man sich orientieren konnte. Muster von diskreten Bauelementen waren verfügbar und wurden genutzt. Beim Einsatz von BCD-MOS-Technologien auf SOI-Substraten und der Realisierung von lateralen IGBT und TRIMOS-Schaltern wurde auch internationales Neuland betreten. Hier gab es nur wenige internationale Entwicklungsgruppen. Ein Besuch von Konferenzen war jedoch bis 1989 nicht möglich.

Mit der Wende und der Einführung der D-Mark in Ostdeutschland erlebten das Kombinat Mikroelektronik und seine Halbleiterstandorte einen raschen Niedergang. Nur durch die schnelle Übernahme einzelner Teilstandorte durch engagierte Investoren konnten die modernsten Teile erhalten werden. Viele Mitarbeiter und Promoventen der TH Ilmenau konnten ab 1990 ihre technologischen und Bauelemente-Erfahrungen bei der Entwicklung von integrierten und diskreten DMOS-Leistungsbau-elementen in zahlreichen Entwicklungsprojekten mit Halbleiterherstellern, wie z. B. XFAB Erfurt, Siemens-Halbleiter München (heute Infineon), Semikron Nürnberg, ABB Schweiz und NXP Niederlande einbringen.

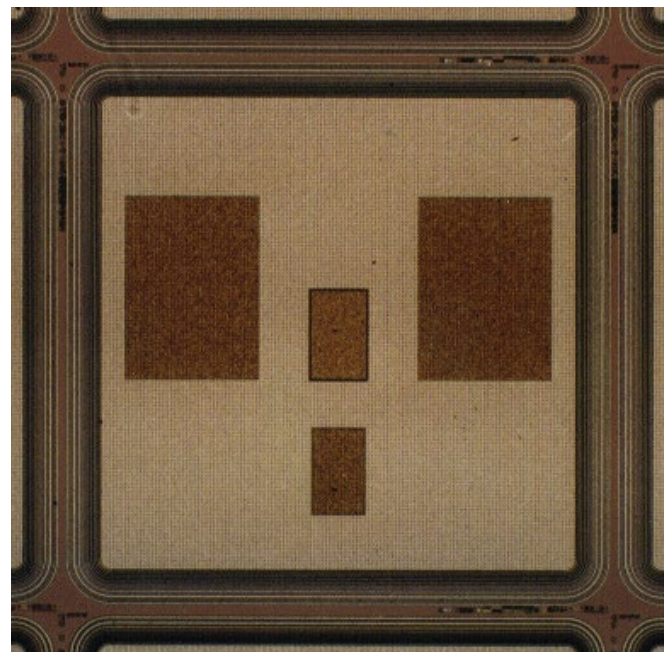
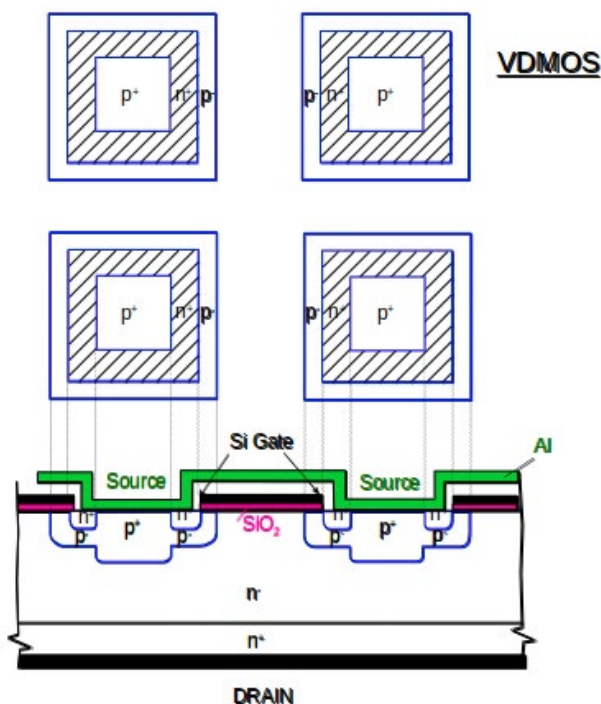


Bild C5: Layout, Querschnitt und Chipfoto eines vertikalen 400-V-DMOS-Transistors (VDMOS), aus [C4]

Die DMOS-Transistor-Grundstruktur, d.h. die doppelt diffundierte bzw. doppelt implantierte Kanalstruktur vom Sourcegebiet aus, ist bis in die Gegenwart der Halbleiterfertigung aktuell. Sie hat aber zahlreiche Weiterentwicklungen und Modifikationen erlebt. Die Implementierung des lateralen DMOS-Transistors sowie von bipolaren Bauelementen in die CMOS-Logik-Technologie hat zur sogenannten BCDMOS-Technologie (Bipolar-CMOS-DMOS) geführt, die heute bei jedem Mixed-Signal-Halbleiterhersteller in der Welt verfügbar ist (z.B. XFAB, Infineon, NXP, ST Microelectronics, Texas Instruments, Mitsubishi, Fuji usw.). Durch ein sich ständig verringeres Lithografie-Niveau, die Einführung der Trench-Gate-Technologie, die Implementierung von Super-Junction-Strukturen sowie immer neuer digitaler und analoger Bauelemente läuft die BCDMOS-Technologie international in der mehr als zehnten Generation.

Parallel wurde bereits Anfang der achtziger Jahre die DMOS-Grundstruktur für diskrete vertikale DMOS-Transistoren (VDMOST) und seit Mitte der achtziger Jahre für diskrete IGBT (Insulated Gate Bipolar-Transistor) verwendet. Beide sind bis heute die wichtigsten Hochspannungs- bzw. Leistungstransistoren auf dem Markt und haben eine extrem hohe Verbreitung, der VDMOST im Spannungsbereich von 30 V bis 600 V und der IGBT im Spannungsbereich von 600 V bis einige kV. Große Hersteller dieser Bauelemente in nachfolgenden Generationen sind z.B. Infineon, NXP, ST Microelectronics, Mitsubishi, Fuji usw. Die Bauelemente werden als diskrete Bauelemente oder in Modulen (hergestellt von Firmen wie Infineon, Semikron, Mitsubishi, Fuji) für elektrische Antriebe jeglicher Art in Maschinen und Anlagen, Solar- und Windkraftumrichtern, Stromversorgungssystemen und nicht zuletzt in elektrischen Fahrzeugen eingesetzt.

Fazit: Es lebe der DMOST in allen Varianten und Modifikationen!

Quellen:

[C1] Schipanski, D.; Schmidt, J.; Djermanov, D.; Glaser, D.; Herzer, R. Integrierbarer DMOS-Hochspannungstransistor; THI, A4-Bericht, 1985.

[C2] HFO, IHP, THI Entwicklungsprojekt für integrierte Hochspannungsschalter, 1987.

[C3] HFO, IHP, THI Entwicklungsprojekt für integrierte Hochspannungsschalter, 1989.

[C4] THI, GWS Entwicklungsprojekt für diskrete VDMOS-Transistoren (1989) bzw. Herzer, Reinhard: Modellierung, Entwurf, technologische Realisierung und Optimierung von MOS-gesteuerten Hochspannungsbaulementen für Smart-Power-Schaltkreise, (Habilitation THI), 1991.

Abkürzungen:

BCDMOS	Bipolar-CMOS-DMOS-Technologie
CMOS	komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter, Kombination von p-Kanal- und n-Kanal-Feldeffekttransistoren
DMOS, DMOST	doppeldiffundierter MOS-Transistor
IGBT	Insulated Gate Bipolar-Transistor
MGT	Metall-Gate-Technologie
MIS, MISFET	Metall-Isolator-Halbleiter-Feldeffekttransistor
MOS, MOST, MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
NMOS, nMOS	n-Kanal MOS-Transistor
PMOS, pMOS	p-Kanal MOS-Transistor
Poly-Si	Polykristallines Silizium
RESURF	Reduced Surface Field
SGT, nSGT	Silizium-Gate-Technologie, n-Kanal Silizium-Gate-Technologie
SIPMOS	Siemens Power MOSFET
SLIC	Subscriber Line Interface Circuits, SLIC-Fernmelde-schaltkreise
SOI	Silicon On Insulator
TRIMOS	MOS-gesteuerter TRIAC - Halbleiterrelais, bidirektionale laterale MOS-gesteuerte Thyristoren
VMOS, VDMOST	V-grooved MOS field-effect transistor, V-förmiger Graben für den Gatebereich zur Reduktion der Kanallänge

AUTORENVERZEICHNIS

Dipl.-Ing. Stephan Hloucal

(Regierungsdirektor a. D.)

studierte von 1972 bis 1976 Informationstechnik und Theoretische Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Ilmenau. Von 1976 bis 1990 war er im VEB Funkwerk Erfurt (FWE) tätig. Er beschäftigte sich mit elektronischer Messtechnik im Halbleiterbauelemente-Prüffeld und im Messgerätewerk. Von 1987 bis 1991 lehrte er nebenberuflich als Dozent an der Ingenieurschule Eisleben Mess- und Prüftechnologie. Von 1990 bis 2006 war er Beamter in der Thüringer Staatskanzlei und dem Thüringer Kultusministerium. Ab 2006 berufliche Selbstständigkeit im Bereich Erneuerbarer Energien und Speichertechnologien. Seit 1990 ist er Vorsitzender des Thüringer Museums für Elektrotechnik e.V.

Dipl.-Ing. Ulrich Liebold

studierte von 1976 bis 1981 Physik und Technik Elektronischer Bauelemente an der Technischen Hochschule Ilmenau. Von 1981 bis 1991 war er als Entwicklungsingenieur in den Mikroelektronik-Betrieben Mühlhausen und Erfurt tätig. Daran schloss sich eine

Tätigkeit in der UTG Umwelttechnik und Gerätebau GmbH Erfurt an. Von 1997 bis 1999 arbeitete er für die IHK Erfurt im Bereich der Umwelt- und Innovationsberatung. Danach war er wissenschaftlicher Mitarbeiter in den Fachgebieten Festkörperelektronik und Nanotechnologie der TU Ilmenau und zuletzt am IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH in Erfurt. Er ist Mitglied im Thüringer Museum für Elektrotechnik Erfurt e.V.

Dipl.-Ing. Gerhard Roleder

studierte von 1975 bis 1979 Physik und Elektronische Bauelemente an der Technischen Hochschule Ilmenau. Von 1979 bis 1989 war er Technologe und Entwicklungsingenieur im VEB Elektrogas Ilmenau bzw. im VEB Mikroelektronik „Karl Marx“ Erfurt. Von 1990 bis 1995 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Hygieneinstitut, danach Vertriebsingenieur bei Electronicon Gera und seit 2003 Account Manager für Produkte der Glasfaser- und Netzwerkkübertragung bei GE / UTC Fire & Security. Mitglied im Thüringer Museum für Elektrotechnik e.V., Funkamateure seit 1971.

IMPRESSUM

Herausgeber:

Thüringer Museum für Elektrotechnik e.V.
(Der Newsletter erscheint zweimal jährlich ausschließlich in elektronischer Form.)

V. i. S. d. P.:

Stephan Hloucal

Redaktion:

Matthias Wenzel, Stephan Hloucal

Anschrift: Thüringer Museum für Elektrotechnik e.V.,
Hohe Str. 24, D-99094 Erfurt

www.elektromuseum.de

Mail: info@elektromuseum.de

Facebook: Thüringer Museum für Elektrotechnik

Twitter: ElektromuseumEF

Instagram: elektromuseum

Fon: 01 76 44 44 58 22

Bank: IBAN DE87820510000130084298

BIC HELADEF1WEM

Finanzamt Erfurt 151/141/18963

Amtsgericht Erfurt VR160490

Haftungsausschluss:

Herausgeber und Redaktion übernehmen keine Forderungen, die aus Rechten Dritter zu einzelnen Beiträgen entstehen.

Für unverlangt eingesandte Texte, Fotos und Materialien wird keine Haftung übernommen.

Das ON.LINE-Magazin und alle in ihm enthaltende Beiträge, Fotos und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechts

ist ohne Zustimmung der Autoren oder der Rechteinhaber bzw. der Redaktion unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen jeder Art, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronische Systeme.

© Thüringer Museum für Elektrotechnik e.V., bei den Autoren und Fotografen 2024. Falls nicht anders vermerkt, liegen die Nutzungsrechte an den Fotos beim Thüringer Museum für Elektrotechnik e.V.

Datenschutzerklärung - personenbezogene Daten:

Im Zuge der neuen EU-Datenschutz-Grundverordnung gelten strengere Regeln für die digitale Kommunikation. Ohne Ihre Zustimmung können wir Ihnen die nächsten ON.LINE-Ausgaben nicht mehr zusenden. Wir legen großen Wert auf den verantwortungsvollen Umgang mit Ihren Daten. Personenbezogene Daten wie z.B. Name und E-Mail-Adresse werden nicht erfasst, es sei denn, Sie geben uns diese Informationen freiwillig, z.B. zur Bearbeitung von Anfragen, bei Kommentaren, bei der Newsletter-Anmeldung. Die freiwillig gegebenen Daten werden ausschließlich für den Zweck verwendet, für den sie überlassen wurden und werden nicht an Dritte weitergegeben. Wenn Sie unser ON.LINE nicht mehr empfangen möchten, informieren Sie uns bitte per E-Mail. Ihnen steht das Recht zu, Ihre Einwilligung jederzeit mit Wirkung für die Zukunft gegenüber uns zu widerrufen. Dieser Widerruf kann formlos per E-Mail erfolgen.

Falls Ihnen die ersten Ausgaben von ON.LINE abhandengekommen sind, so finden Sie diese zum Herunterladen unter:

<https://www.elektromuseum.de/newsletter.html>.

Wir freuen uns, wenn Sie ON.LINE auch an interessierte Freunde, Bekannte und Kolleginnen und Kollegen weitergeben. Aktuelles von uns finden Sie auf Facebook, Twitter und Instagram!