

Von Franken in die ganze Welt – Wie auf Schloss Pretzfeld die Siliziumrevolution begann

Th. Richter, J. Friedrich

Fraunhofer IISB, Schottkystr. 10, 91058 Erlangen

Kirschen, Edelbrände, Apfelmost, Bier und gutes Essen – Pretzfeld, die Marktgemeinde im Herzen der Fränkischen Schweiz, ist bekannt für vielerlei kulinarische Genüsse und für ihre reizvolle landschaftliche Lage. Weit weniger bekannt sein dürfte hingegen die abenteuerliche Geschichte vom Siemens-Labor auf Schloss Pretzfeld und von den kreativen Wissenschaftlern und Technikern, die hier bahnbrechende Entwicklungsarbeit für die heutige und auch künftige Elektronik geleistet haben. Heute erinnert in Pretzfeld nicht mehr viel an die damit unmittelbar verbundene „Halbleiterei“ in dem mittelalterlichen Schloss und mitten im Schlossgarten. Deshalb wird es sicher nicht nur alteingesessene Franken überraschen, welchen technologischen Stellenwert einige der Erfindungen und Entwicklungen aus Pretzfeld bis dato immer noch besitzen.



Abbildung 1: Im Schloss in Pretzfeld, das 1145 erstmals urkundlich erwähnt wurde, wurde in den 1950iger Jahren bahnbrechende Entwicklungsarbeit für die heutige und künftige Elektronik geleistet. Quelle: Karlheinz Loch, privat

Der Anfang nach dem Ende

Berlin 1944. Der renommierte Industriephysiker Prof. Walter Schottky, unter anderem Entdecker des nach ihm benannten Schottky-Effektes, flieht mit seiner Familie aus der Bombenhölle, sein Labor bei Siemens & Halske liegt in Schutt und Asche. Zuflucht findet Schottky in der Fränkischen Schweiz in Pretzfeld und er bekommt von Siemens ein eigenes Dienstzimmer auf dem alten Pretzfelder Schloss (siehe Abbildung 1) zugewiesen. In Berlin sorgt sich unterdessen Siemens-Direktor Günther Scharowski um neue Standorte für die Werke von Siemens-Halske und Siemens-Schuckert. In Nürnberg gibt es mit den Siemens-Schuckert-Werken bereits einen großen Siemens-Standort. Leider sieht es im zerstörten Nürnberg ähnlich traurig aus wie in Berlin, die Nürnberger Schuckert-Werke sind ebenfalls schwer getroffen.

Gleich nebenan hatte Erlangen riesiges Glück im Unglück. „Erlangen woll’n wir schonen, nach dem Krieg drin’ wohnen!“, so ein Erlanger Reim, und tatsächlich, während der alliierten Luftangriffe fällt hier nur eine einzige Bombe vom Himmel, versehentlich verloren und obendrein ein Blindgänger. Als Standort des großen Reinigerwerks, kriegsbedingt seit 1943 sogar Hauptzentrale der Siemens-Reinigerwerke, ist Erlangen bei Siemens durchaus keine unbekannte Größe. So betreibt Günter Scharowski schließlich die Verlagerung der gesamten Siemens-Konzernzentrale von Berlin nach Erlangen. Damit werden aber auch die Weichen gestellt, dass neben Walter Schottky noch weitere namhafte Siemens-Forscher und Physiker nach Franken kommen, eine historisch einmalig günstige Konstellation.

Eine der Koryphäen, die auf diese Weise den Weg in die Fränkische Schweiz zu Walter Schottky finden, ist der Halbleiterforscher Dr. Eberhard Spenke. Spenke war schon vor dem Krieg Siemens-Mitarbeiter bei Schottky und beschäftigte sich unter anderem intensiv mit sogenannten Leistungsgleichrichtern, also elektronischen Bauelementen, die Wechselspannung in Gleichspannung umwandeln. Zu dieser Zeit gab es auch bereits erste Halbleiterbauelemente. Dies waren die sogenannten Trocken-Gleichrichter aus Materialien wie Kupferoxydul und Selen, die unauffällig und mehr oder weniger zuverlässig ihren Dienst in elektrischen Antrieben, Stromversorgungen oder Messgeräten verrichteten. In den letzten Kriegsjahren zeigte sich, dass die von den alliierten Flugzeugen eingesetzten Radarwellen nicht mehr detektiert werden konnten. Deshalb wurde damals bereits begonnen, an neuen Halbleitermaterialien und -bauelementen aus Germanium und Silizium zu forschen. Dies zeigte, wohin die Reise technologisch einmal gehen wird.

Der Einzug ins Schloss

Nach dem Krieg beschäftigen sich weltweit einige Forschergruppen und Firmen mit Halbleitermaterialien und Halbleiterbauelementen, um die genauen Wirkmechanismen, also die Physik hinter den Bauelementen, zu verstehen und exakte theoretische Modelle für die Halbleitereffekte aufzustellen. Ganz zu schweigen von den Halbleitermaterialien selbst, deren Herstellung entwickelt werden musste. Vor diesem Hintergrund hatte sich Eberhard Spenke bei Günter Scharowski für die Gründung eines gesonderten Halbleiterlabors stark gemacht.

Für so ein Halbleiterlabor benötigt man aber einen geeigneten Platz, intakte Gebäude und Räume sind indes absolute Mangelware. Auch im unzerstörten Erlangen reicht es hinten und vorne nicht, die Siemens-Zentrale platzt aus allen Nähten. Man verweist Spenke kurzerhand auf Pretzfeld, wo ja bereits Walter Schottky auf dem Schloss untergekommen ist. Dieser mahnt nun seinerseits zur Eile, denn es sind Millionen Flüchtlinge und Vertriebene unterwegs und auch in Pretzfeld muss jederzeit mit dem Eintreffen von Neuankömmlingen gerechnet werden.

Wie abenteuerlich die ganze Situation war, beschreibt Spenkes Kollege und Stellvertreter Dr. Arnulf Hoffmann sehr treffend am 23.8.1946 in einem Brief an seine Frau: „Seit Mittwoch

(21.8.) haben wir nun auch in Pretzfeld im Schloss oben ein Quartier eingerichtet, in dem wir einfach zwei Feldbetten mit Strohsäcken dort aufstellten. Leihweise haben wir auch die ersten Büromöbel bekommen, sodass wir hier auch sitzen und arbeiten können. Wir wohnen also auf einem „Schloss“. Doch ist es etwas ganz anderes als in Märchen. Der Wind pfeift durch die gesprungenen Scheiben. Und auch, wenn diese alle heil sein werden, wird es nicht weniger pfeifen. Nun ja, die Tatsache, dass wir letzthin einen alten Pferdestall zum Wohnen dem Schloss vorziehen, sagt genug.“

Mit viel persönlichem Einsatz und Improvisationstalent richten sich die Wissenschaftler schließlich in den historischen Räumen des 1145 erstmals urkundlich erwähnten Pretzfelder Schlosses ein. Als Ziel wird ihnen zunächst mit auf den Weg gegeben, den oben bereits erwähnten Selengleichrichter zu perfektionieren, damit in Berlin die Produktion wieder ins Rollen kommt. Das gelingt mit Bravour und die Forscher lernen auch endlich, den Funktionsmechanismus hinter dem Gleichrichtereffekt zu verstehen.

Für die wichtigen Siemens-Geschäftsfelder in der Erzeugung, Verteilung und Nutzung von elektrischer Energie soll das Pretzfelder Labor aber auch möglichst rasch neue Produkte entwickeln. Ob Kraftwerke, Netztechnik, Züge, Straßenbahnen, überall werden dringend neue elektronische Bauelemente für hohe elektrische Leistungen, sprich für die Leistungselektronik, benötigt, die es so noch gar nicht gibt.

Die Suche nach dem Stein der Weisen

Ein Tag vor Weihnachten 1947 platzt in Murray Hill, New Jersey, die Bombe. Die Amerikaner John Bardeen, Walter Brattain und William Shockley präsentieren in den berühmten „Bell Laboratories“ ihren ersten funktionsfähigen Transistor aus Germanium. Auch wenn sie selbst noch gar nicht richtig verstehen, wie dieser Transistor funktioniert, ist es doch der Beginn einer ganz neuen Ära. Transistoren stellen heute den Grundbaustein moderner Mikrochips dar. Für ihre Erfindung erhalten Bardeen, Brattain und Shockley 1956 den Nobelpreis für Physik. Germanium ist plötzlich weltweit angesagt und verschiedenste Forschergruppen beschäftigen sich mit diesem Halbleiter. Sogar der erste Mikrochip, der aus mehreren solcher Transistoren besteht und den der Amerikaner Jack Kilby ein Jahrzehnt später im Herbst 1958 präsentierte, war noch mit Germanium aufgebaut. Auch Jack Kilby wird für seine Leistung mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

Umso erstaunlicher erscheint vor diesem Hintergrund der Weg, den die Pretzfelder Forscher gingen. Wie fast überall unternehmen auch die Pretzfelder zunächst Experimente mit Germanium. Eberhard Spenke ist aber schon damals der Meinung, dass Germanium zwar eine schnelle Lösung wäre, um rasch Produkte in den Markt zu bringen, aber langfristig gesehen kein Potential hat. So scheidet für Spenke dieser Halbleiter als ungeeignet für die Leistungselektronik aus und er setzt ab 1952 komplett auf das Halbleitermaterial Silizium.

Die Arbeit mit Silizium gilt in Pretzfeld zunächst als technologisch „hoch riskant“. Aufgrund seiner viel höheren Schmelztemperatur ist Silizium sehr viel schwieriger zu verarbeiten als das beliebte Germanium. Und es gibt Silizium nicht in der notwendigen Reinheit und Perfektion. Aber das Material hat handfeste Vorteile. Silizium ist im Gegensatz zu Germanium gut verfügbar. Silizium gibt es sprichwörtlich wie Sand (SiO_2) am Meer. Es besitzt auch bessere elektrische Eigenschaften, und Siliziumbauelemente können bei höheren Temperaturen arbeiten als vergleichbare aus Germanium. Spenke setzt also goldrichtig auf Silizium, eine mutige Entscheidung mit weitreichenden Folgen.

Nicht nur sauber, sondern reinst und perfekt!

Doch die Sache mit dem Silizium hat einen Haken. Halbleiter-Elektronik funktioniert nur, wenn das Silizium extrem rein ist. Erst dann kann der elektrische Widerstand durch Zugabe von Fremdatomen gezielt eingestellt werden. Heute wird Silizium mit einer Reinheit von 99,9999999 % verlangt. Umgerechnet entspricht diese Reinheit, wenn es auf der Erde unter 8 Milliarden Männern gerade mal 8 Frauen geben würde oder umgekehrt.

Hohe Reinheit alleine reicht aber noch nicht aus, denn damit ein Halbleiter elektrisch funktioniert, muss er außerdem über eine perfekte Anordnung seiner Atome verfügen, er muss ein „Einkristall“ sein. In einem perfekten Einkristall kann der elektrische Strom dann so gut wie ungestört fließen.

Vor diesem Hintergrund waren die Forscher in Pretzfeld sicher alles andere als begeistert, sich in einem alten, zugigen Schloss einzurichten (siehe Abbildung 2) und dort ihre empfindlichen Apparaturen aufzustellen. Doch die Halbleiterpioniere lassen sich nicht so leicht aus der Fassung bringen.

Vom Obstbrand zum Reinstsilizium

Wenn die Reinheit des Siliziums das Geheimnis ist, so liegt der Schlüssel in der Reinigung. Die Pretzfelder Forscher wählten ein in der Chemie und insbesondere in der Gegend um Pretzfeld bestens bekanntes Verfahren, um das Silizium von den hartnäckigen Verunreinigungen zu trennen, die Reinigung durch Destillation. Bloß wie soll man metallisches Silizium destillieren? Anders als der Alkohol im Schnaps, der schon bei knapp 80°C verdampft, fängt Silizium bei schlappen 1410°C gerade einmal an, zu schmelzen. Die Lösung ist so einfach wie genial. Zunächst erfolgt die Umwandlung des Rohsiliziums, was man durch eine Reaktion zwischen Koks und Quarz (SiO_2) gewinnt, in eine bei Raumtemperatur flüssige Siliziumverbindung, das Trichlorsilan (ein Silizium-Atom mit drei Chloratomen und einem Wasserstoffatom). Anschließend findet dann die Reinigung des Trichlorsilans durch Destillation bei 32°C statt, nicht viel anders als bei den berühmten Pretzfelder Obstbränden. Mit einem speziellen thermischen Verfahren wird das gereinigte Trichlorsilan schließlich wieder in festes, jetzt aber hochreines Silizium zurückgewandelt.

Das Siemens-Verfahren erregte damals weltweit großes Aufsehen und in der Folge schlossen eine Vielzahl namhafter Hersteller von Halbleitergrundmaterial dazu Lizenzvereinbarungen mit Siemens. Heute heißt diese Art der Herstellung von Reinstsilizium immer noch schlicht und einfach „Siemens-Prozess“ und es werden weltweit ungefähr 450 000 Tonnen Reinstsilizium mit dem in Pretzfeld entwickelten Verfahren hergestellt.

Vom Reinstsilizium zum perfekten Kristall

Der Siemens-Prozess liefert zwar Reinstsilizium. Jedoch besteht es aus vielen kleinen Kristallen. Für elektronische Anwendungen muss dieses sogenannte „polykristalline“ Silizium noch zu großen, perfekten Einkristallen weiterverarbeitet werden. Die Pretzfelder erfanden dazu ein berührungsloses Verfahren, das sogenannte tiegelfreie Zonenziehen. Ein senkrecht an beiden Enden eingespannter Kristallstab wird in einem schmalen Bereich durch eine Induktionsspule erwärmt, bis sich eine schmale Schmelzzone bildet. Die Spule bewegt sich dabei langsam entlang des Kristallstabes und mit ihr die Schmelzzone. Bei der Abkühlung und Erstarrung der Schmelzzone „rekristallisiert“ der Siliziumstab schließlich Stück für Stück zu einem perfekten Einkristall (siehe Abbildung 3). Die Pretzfelder waren allerdings nicht die einzigen, die am Zonenziehen arbeiteten. Fast zeitgleich wurde es in den USA entwickelt.

Bis in die 1980er Jahre war das tiegelfreie Zonenziehen das dominierende Herstellungsverfahren für Siliziumkristalle. Heute spielt das Pretzfelder Verfahren allerdings nur noch für Kristalle für spezielle Leistungsbaulemente eine Rolle, die etwa 5 % des Weltmarktes entsprechen. Man hatte nämlich in den 80er Jahren festgestellt, dass spezielle Verunreinigungen förderlich sind für die Bauelemente und diese mit einem anderen Kristallherstellungsverfahren einfacher in den Siliziumkristall eingebaut werden können.



Halbleiterfertigung in den historischen Räumen!



Halbleiterfertigung heute im Reinraum des Fraunhofer IISB

Abbildung 2: oben) Halbleiterfertigung in den historischen Räumen des Pretzfelder Schlosses. Quelle: Karlheinz Loch, privat; unten) Halbleitfertigung heute im Reinraum des Fraunhofer IISB. Quelle: Kurt Fuchs, Fraunhofer IISB

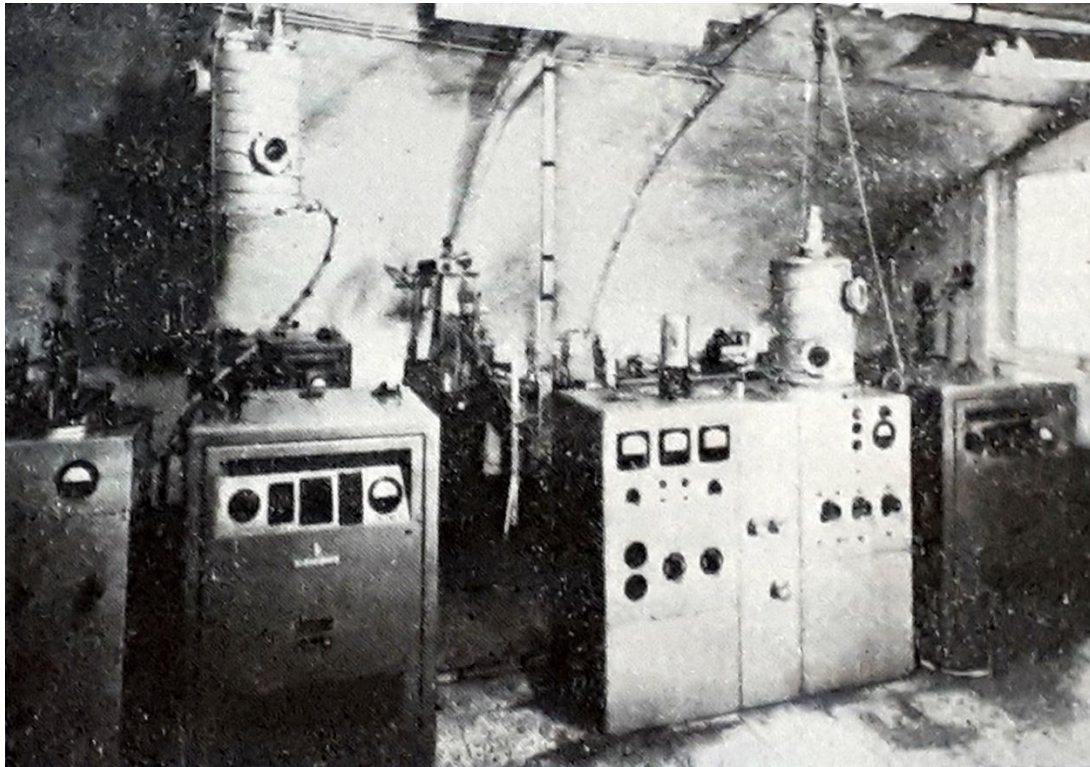


Abbildung 3: oben) Foto der Kristallzieherei in Pretzfeld um 1955 mit Anlagen zur Einkristall-Herstellung durch des tiegelfreie Zonenziehen. Quelle: Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Eberhard Spenke, 1965. unten) Foto einer heutigen Anlage für das tiegelfreie Zonenziehen. Quelle: PVA Crystal Growing Systems GmbH.

Das Wiesenttal, das erste „Silicon Valley“?!

Die Verfügbarkeit der Technologien zur Herstellung von Reinstsilizium und zur Herstellung von Einkristallen brachte den technologischen Durchbruch. In der Halbleiterszene ist Pretzfeld plötzlich weltweit bekannt. Schon 1954 statten die Erfinder des Germanium-Transistors und späteren Nobelpreisträger Bardeen und Brattain dem Team um Schottky und Spenke im „famous Pretzfeld“ einen persönlichen Besuch ab.

In der nächsten Dekade setzen die Pretzfelder Pioniere eine Reihe von Meilensteinen und Rekorden. So gelingt in den Jahren 1954 bis 1956 die Entwicklung des ersten Silizium-Leistungsgleichrichters und des ersten Silizium-Leistungstransistors. 1965 wird der erste Silizium-Thyristor in Scheibenbauform, ein Stromventil für sehr hohe Leistungen, vorgestellt und ist die Sensation auf der Hannovermesse. In der Folge werden immer höhere Spannungen und Ströme erreicht. Die Entscheidung der Pretzfelder, auf Silizium zu setzen, erweist sich als richtungsweisend für die gesamte Elektronik.

Made in Pretzfeld

Viele Anlagen und Kraftwerke auf der ganzen Welt enthalten Silizium-Leistungsbaulemente aus Pretzfeld, beispielsweise in Brasilien, Kanada, China, Deutschland, Indonesien, Libyen, Österreich, Saudi Arabien oder den USA. Ein technischer Meilenstein war dabei das Wasserkraftwerk in Cabora Bassa, Mosambik, das 1975 mit damals modernster Technik für die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) in Betrieb ging. Für diese HGÜ-Technik kamen die Scheibenththyristoren aus Pretzfeld zum Einsatz. Die für die Kontaktierung der Scheibenththyristoren verwendeten Federkontakte wurden ebenfalls in Pretzfeld erfunden. Damit konnten Zuverlässigkeitsprobleme, die beim sonst üblichen Löten auftraten, beseitigt werden. Heute sind Federkontakte immer noch ein weltweiter Standard bei der Kontaktierung von Leistungsbaulementen und kompakten Leistungsmodulen.

Das Halbleiterlabor auf Schloss Pretzfeld konnte noch relativ lange seine Unabhängigkeit wahren und dabei munter weiterwachsen. 1969 sollte allerdings ein Großteil der Pretzfelder Silizium-Entwicklung mit mehr als 100 Mitarbeitern nach München gehen. Doch in München gibt es anscheinend technologische Probleme. Die Pretzfelder dagegen fertigen weiter Silizium-Leistungsbaulemente mit so guten Ergebnissen, dass die Fertigung in Pretzfeld ab 1970 wieder ausgebaut wird. So entstehen hinter dem Schloss und mitten im Schlossgarten neue Fabrikhallen. 1990 beschließen Siemens und die AEG, ihre Aktivitäten im Bereich der Silizium-Leistungsbaulemente unter dem Namen eupec zu vereinen. Ab sofort firmierten auch das Labor und die Fertigung im Pretzfelder Schloss als eupec. 1997 kommt eine weitere Innovation aus Pretzfeld, ein lichtgezündeter Thyristor. 1998 erhält Siemens Aufträge für HGÜ-Anlagen in China, Thailand und Malaysia und lässt noch einmal eine neue, größere Fertigungshalle in Pretzfeld bauen. Aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen fällt aber 2002 die Entscheidung, den Halbleiter-Standort in Pretzfeld aufzugeben und zu schließen.

Halbleiterforschung und Leistungselektronik in Franken heute

Das Ende der Halbleiterproduktion in Pretzfeld ist aber nicht das Ende der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Halbleitertechnologie und Leistungselektronik in Franken. So forschen seit über 40 Jahren Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg an neuen Materialien, Verfahren und Bauelementen für die Mikro- und Leistungselektronik. Und gleich daneben gibt es seit fast 35 Jahren mit dem Fraunhofer IISB in der Schottkystraße in Erlangen sogar ein eigenes Institut, dass sich ganz den

Halbleitermaterialien und der Leistungselektronik verschrieben hat. Aktuell entwickeln die Ingenieure des Fraunhofer IISB technische Lösungen für die Mobilität der Zukunft sowie für nachhaltige Energieerzeugung, -verteilung und -speicherung, angefangen von neuen Halbleitermaterialien, über neue Bauelemente bis hin zum kompletten Systemen. Ein Schwerpunkt dabei bilden leistungselektronische Lösungen auf Basis sogenannter Verbindungshalbleiter, d.h. chemische Verbindungen, die z.B. aus zwei Elementen der 4. Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente bestehen, wie Siliziumkarbid, oder aus Elementen der 3. und 5. Hauptgruppe, wie Aluminiumnitrid. Diese Verbindungshalbleiter wurden im Übrigen ebenfalls in den Labors der Siemens-Schuckertwerke in Franken Anfang der 1950iger Jahre von Heinrich Welker erfunden.

Das strategische Dach für diese Forschungsaktivitäten ist das Leistungszentrum Elektroniksysteme, kurz LZE. Das LZE ist eine gemeinsame Initiative der beiden Fraunhofer-Institute IIS und IISB sowie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), zusammen assoziierten Partnern aus der Industrie. In der Region um Erlangen und Nürnberg findet sich eine europaweit einmalige Konzentration an Forschungskompetenz und Industrielandschaft zu Elektronik und Elektroniksystemen. Ergänzt wird dies durch das European Center for Power Electronics, ECPE), das europäische Industrienetzwerk im Bereich Leistungselektronik mit Sitz in Nürnberg ist. Das ECPE bündelt seinerseits die industriellen Aktivitäten der Unternehmen im Bereich der Leistungselektronik in der Metropolregion. Alleine im Bereich der Leistungselektronik sind hier ungefähr 40 000 Beschäftigte in rund 200 Firmen tätig.

Weißt Du, wieviel Sternlein stehen?

Wie sähe das moderne Leben ohne Elektronik aus? Sicher sehr viel weniger modern, als den meisten Menschen lieb wäre. Elektronik ist heute allgegenwärtig und in vielen Bereichen sogar unverzichtbar. Ob Internet, Informationsverarbeitung, Energieversorgung, Telekommunikation, Massenmedien, Medizintechnik, Verkehrswesen und vieles mehr; es ist bald einfacher, die Lebensbereiche zu nennen, in denen die Halbleiterelektronik noch nicht Einzug gehalten hat. Die Leistungsfähigkeit aktueller Computer wäre ebenso undenkbar wie die Verbreitung mobiler, batteriebetriebener Elektronikgeräte. Den meisten Menschen ist vielleicht gar nicht bewusst, wie sehr sich das Leben durch die Elektronik verändert hat und wie schnell es sich immer weiter verändert. Die Mikroelektronik auf Siliziumbasis hat die dritte industrielle Revolution ins Rollen gebracht und mit dem Siegeszug der Digitaltechnik vollzieht sich gerade die vierte. Die Basis ist, wie oben erwähnt, der Silizium-Transistor. Ein heutiger Chip enthält etwa 10 Milliarden solcher winzigen Transistoren. Bis heute wurden weltweit insgesamt etwa 10 Trilliarden Transistoren (10^{22}) hergestellt und damit genauso viel, wie es vermutlich Sonnen im gesamten Universum gibt. Und es kommen täglich unzählige Mikrochips mit Milliarden von Transistoren dazu. All dies wäre nicht möglich ohne die Pretzfelder Errungenschaften. Inmitten der fränkischen Schweiz in Pretzfeld, in einem Nachkriegsprovisorium auf einem alten Schloss, schrieben einige Halbleiterforscher diese Elektronikgeschichte. So lebt in jedem dieser Transistoren das Erbe der Halbleiterpioniere von Pretzfeld weiter.

Wer hätte das gedacht?