

1. Einführung

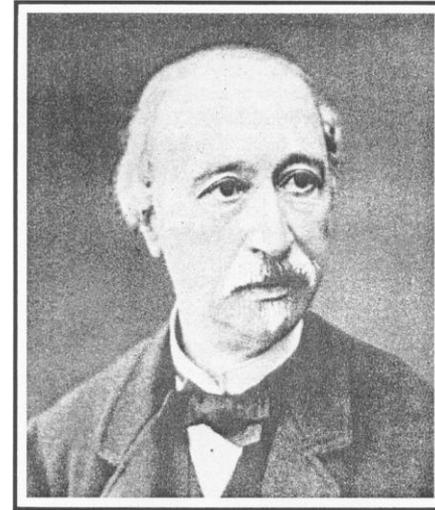
1.1 Historie der Photovoltaik

- Beobachtete bereits **1839** in einer wässrigen Elektrolytlösung unter der Einwirkung von Licht eine photochemische Reaktion (Academy of Science)
- Erste praktische Anwendung der Photoelektrochemie: lichtempfindliche Schicht in der Fotografie

EDMOND BECQUEREL

(1820 - 1891)

The Discoverer of Photovoltaics



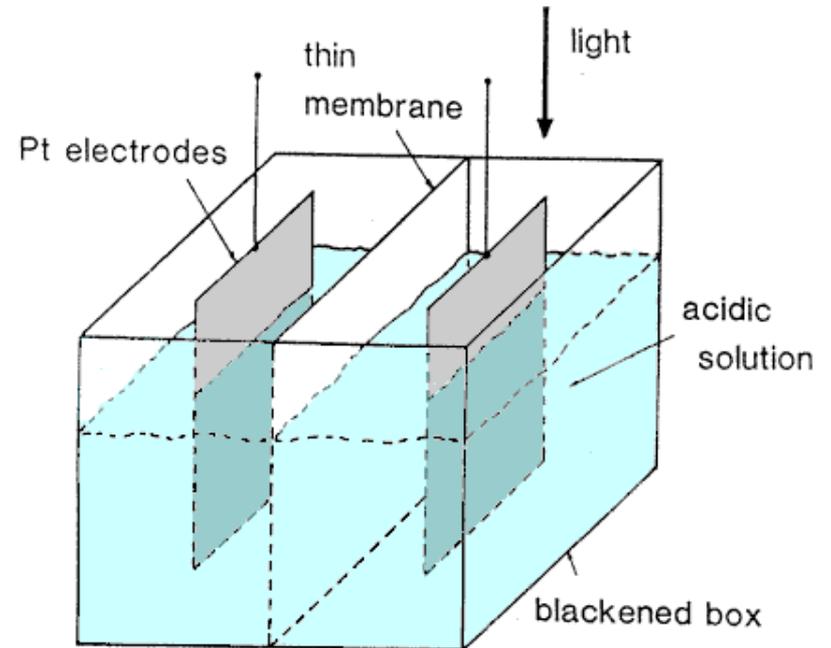
Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires; par M. EDMOND BECQUEREL.

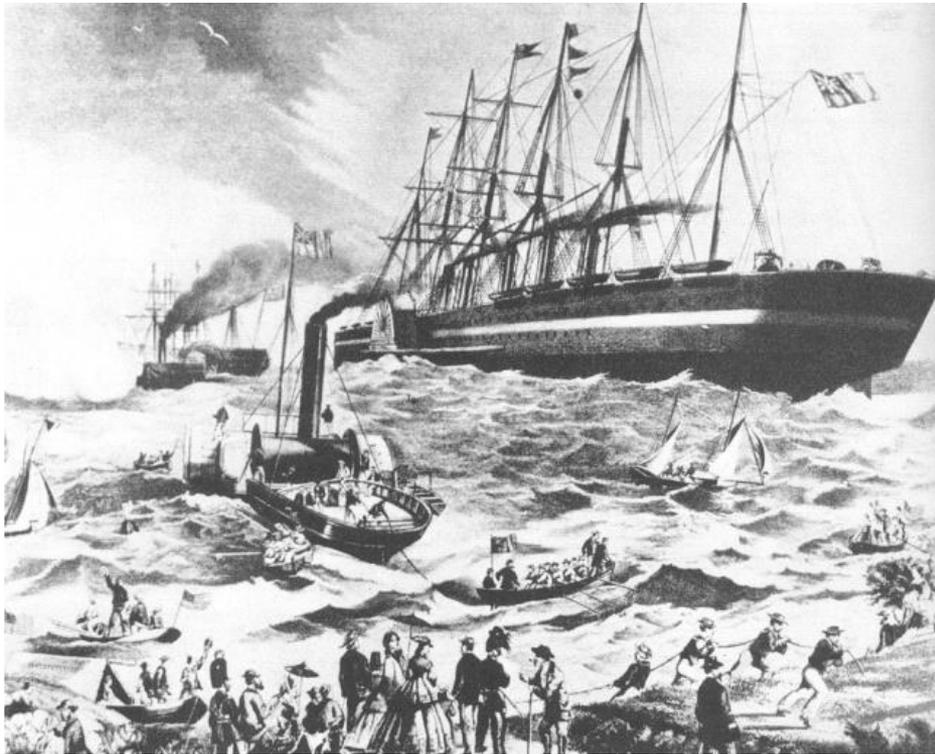
§ 1^{er}. Action de la radiation sur les lames métalliques.

« Dans le dernier Mémoire que j'ai eu l'honneur de présenter à l'Académie, dans sa séance du lundi 29 juillet 1839, je me suis attaché à mettre en évidence, à l'aide des courants électriques, les réactions chimiques qui ont lieu au contact de deux liquides, sous l'influence de la lumière solaire. »

C. R. Acad. Sci. Paris, 9, 561, 1839 - (Transcription).

- Edmond Becquerel demonstrierte mit 19 Jahren als Erster den photovoltaischen Effekt.
- Er generierte einen elektrischen Strom, indem er eine Elektrode mit verschiedenen Lichtquellen einschließlich der Sonne beleuchtete.
- Die besten Ergebnisse erhielt er bei der Beleuchtung mit blauem und ultravioletem Licht und wenn die Elektroden aus AgCl und AgBr bestanden. Er beobachtete auch mit Ag-Elektroden einen Photostrom.
- Anschließend nutzte er den photovoltaischen Effekt indem er einen "Actinograph" entwickelte, der dazu benutzt wurde die Temperatur von erhitzten Körpern aufzuzeichnen indem man die emittierte Lichtintensität maß.





Mit der ersten ständigen transatlantischen Kabelverbindung – als Kabelleger diente die berühmte »Great Eastern«, der größte je gebaute Raddampfer – begann 1866 eine neue Ära im internationalen Nachrichtenverkehr. Drei vorangegangene Versuche, ein solches Kabel auszulegen, waren gescheitert.

Quelle: Die Technik, Prof. Dr. U. Troitzsch, Prof. Dr. W. Weber, Westermann Verlag, 1982

- Geschichte der Photovoltaik beginnt **1866** (zufällig) durch W. SMITH bei der Prüfung von Seekabeln mit einer Testeinrichtung, in der Messwiderstände aus Selen verwendet wurden.



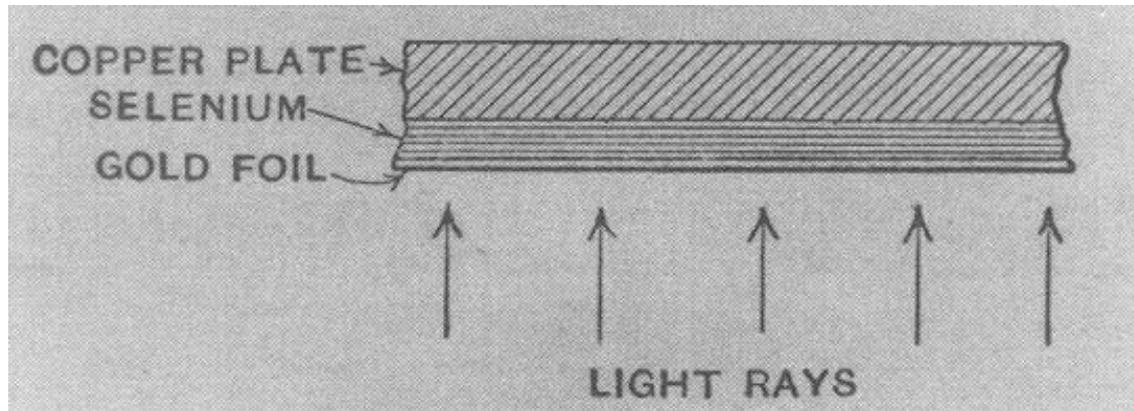
- **1873** wurde von Smith veröffentlicht, dass Licht den Widerstand von Selen verändert. Smith arbeitete mit Dewar, Adams, Day und Sabine.

Licht löst in Se einen Stromfluss aus → “elektromotorische Kraft”. Den Strom nannten man „photoelektrisch“.

- **1874** baute Fritts in New York die erste photoelektrische Zelle mit Festkörpermaterialeien der Welt.



William Grylls Adams

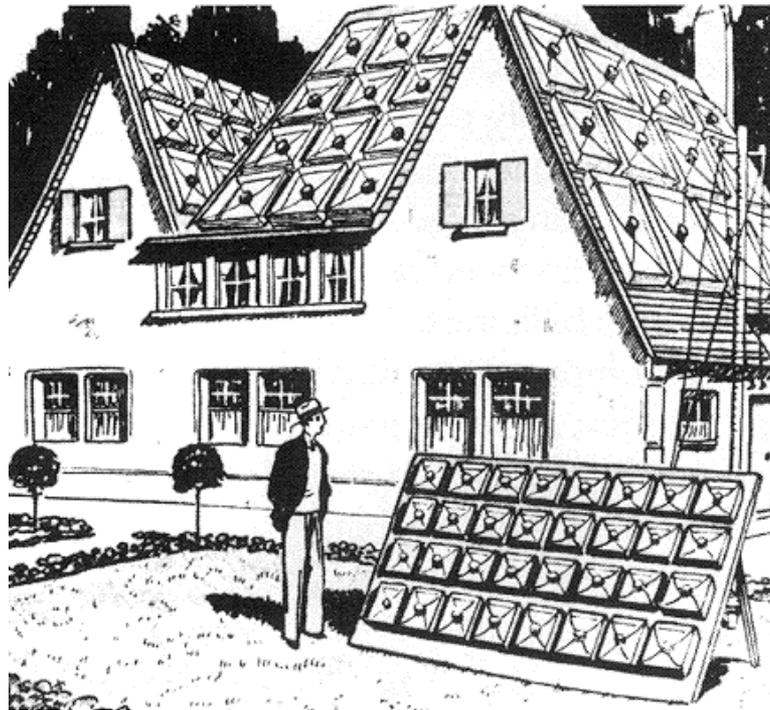


Erste Solarzelle der Welt – eine Selenzelle
(1874 von C. FRITTS, New York)

Quelle: J. Perlin, “From Space to Earth”, aatec Publications, 1999

- **1874/1875** Fritts/New York und Werner von Siemens entdeckten an diesen Bauelementen den photovoltaischen Effekt und beschrieben diesen richtig.
- W. v. Siemens entdeckte als Erster das große Potenzial in einem Vortrag bei der Academy of Science in Berlin 1875.
- **1885** kündigte FRITTS den Wettbewerb seiner Solarmodule mit kohlebefeuernden elektrischen Kraftanlagen an, deren erste EDISON 1882 gebaut hatte.
- Viele sahen die Beschäftigung als unseriös an, da man keine wissenschaftliche Erklärung hatte. Einige Voraussetzungen zum Verständnis waren noch nicht geschaffen:
 - Untersuchungen des äußeren Photoeffektes von Hallwachs (1887)
 - Entdeckung des Elektrons (1897)
 - Planck'sche Strahlungsformel (1900)
 - Einstein'sche Postulat (1905) der wirkenden Lichtquanten (Photonen)
 - Atomphysik (mikroskopischen Aufbau der Atome)

- ca. **1920** wurde Wirkungsmechanismus des Lichtes zutreffend beschrieben
--> Begriff Photovoltaik
- erste praktische Anwendung zeigt eine Skizze von **1929**



Vision von 1929: Solarmodule auf Dächern und in Vorgärten

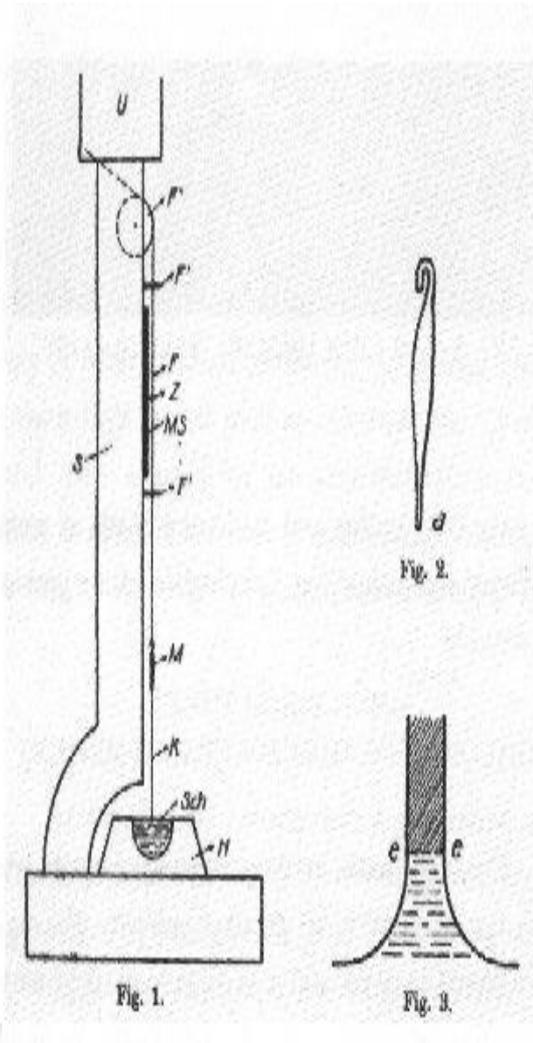
Quelle: J. Perlin, "From Space to Earth", aatec Publications, 1999

- **1931** B. Lange (Lichtmessgeräte, Berlin) baute die Anordnung von FRITTS nach: Se-Solarzellen (< 1 %) Prognose: Sonnenlicht in Elektrizität umwandeln und Konkurrenzfähigkeit mit elektro-mechanischen Generatoren
- bis in die **1970er** Jahre photoelektrischer Empfänger auf der Basis von Selenzellen in der Lichtmesstechnik als Belichtungsmesser, Luxmeter und Sensoren
- erst die Halbleiterforschung und die darauf aufbauende Elektronik in den **1950er** Jahren gaben die entscheidenden Impulse für eine gezielte Entwicklung von Solarzellen:
 - 1916: Methode zur Herstellung von monokristallinem Si (Czochalski)
 - 1941: Erste Si Solarzelle
- Bedarf an Energieversorgung mit der **Raumfahrt**
Bedarf an mobiler Energieversorgung des **Militärs**



Der vierte Satellit "Vanguard I" startete im März 1958 als solar-betriebener Minisatellit (scherzhaft auch Grapefruit). Nur 1,5kg schwer mit einem Durchmesser von 16cm Vanguard I war 6 Jahre in Betrieb und kommunizierte auf der Frequenz von 108 MHz. Die verwendeten 6 Module bestanden aus je 1 Zelle mit einem Wirkungsgrad von 10,4 %. Die Module versorgten eine Quecksilberbatterie. Er war der zweite erfolgreich in den Orbit gebrachte Satellit der USA nach Explorer 1 und der erste Satellit, der mit Solarzellen ausgestattet wurde.

- **1916 Kristallziehverfahren**

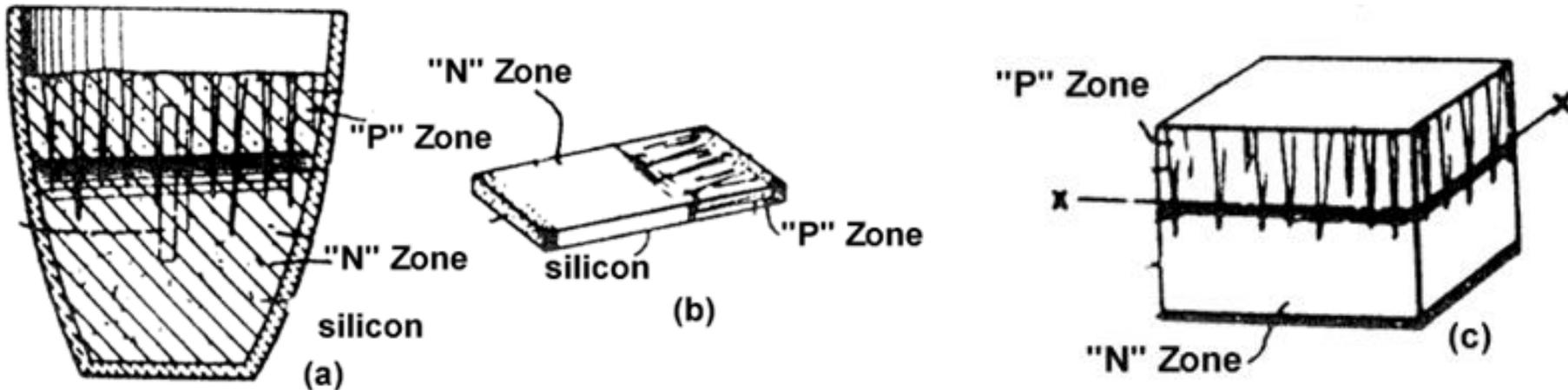


1916 entwickelt Jan Czochralski (1885 – 1953) ein Verfahren um einkristallines Silizium zu züchten

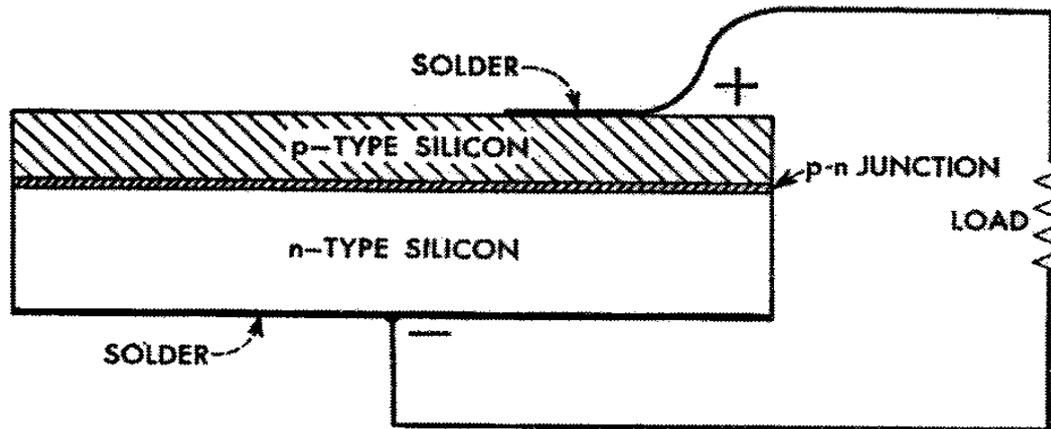
[Polish Society for Crystal Growth]

- **1941:**

- Dotierung von Si war nicht verstanden
- Si Dioden wurden aus "natürlich" gewachsenem Material hergestellt (Ohl).
- Die Schmelze wurde aus geätztem metallurgischem Si hergestellt:
→ von oben gekühlt (Segregation der Verunreinigungen)
- Natürlich gewachsener Kontakt einer Si Schmelze (a)
- Zellen wurden aus der Schmelze herausgeschnitten (b)
- Strukturen können auch parallel zum p-n Kontakt geschnitten werden (c).



- **1954** “Bell Solar Battery”/USA erstmals aus **Silizium-Solarzellen** mit **diffundiertem p/n Übergang** (Chapin, Fuller, Pearson, 6% efficient p/n junction Si cell)



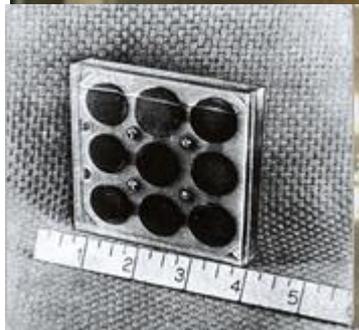
Cross-section of a Bell Laboratories “power photocell.” The depth of the p-type silicon has been enlarged for ease of viewing.

Erste Silizium-Solarzellen und terrestrische Anwendungen

Quelle: J. Perlin, “From Space to Earth”, aatec Publications, 1999

L. Beitz + H. Hesselbach, “Fotzellen und ihre Anwendungen” Radio-Praktiker

Bell Labs 1954: Erstes Originalmodul, 1954

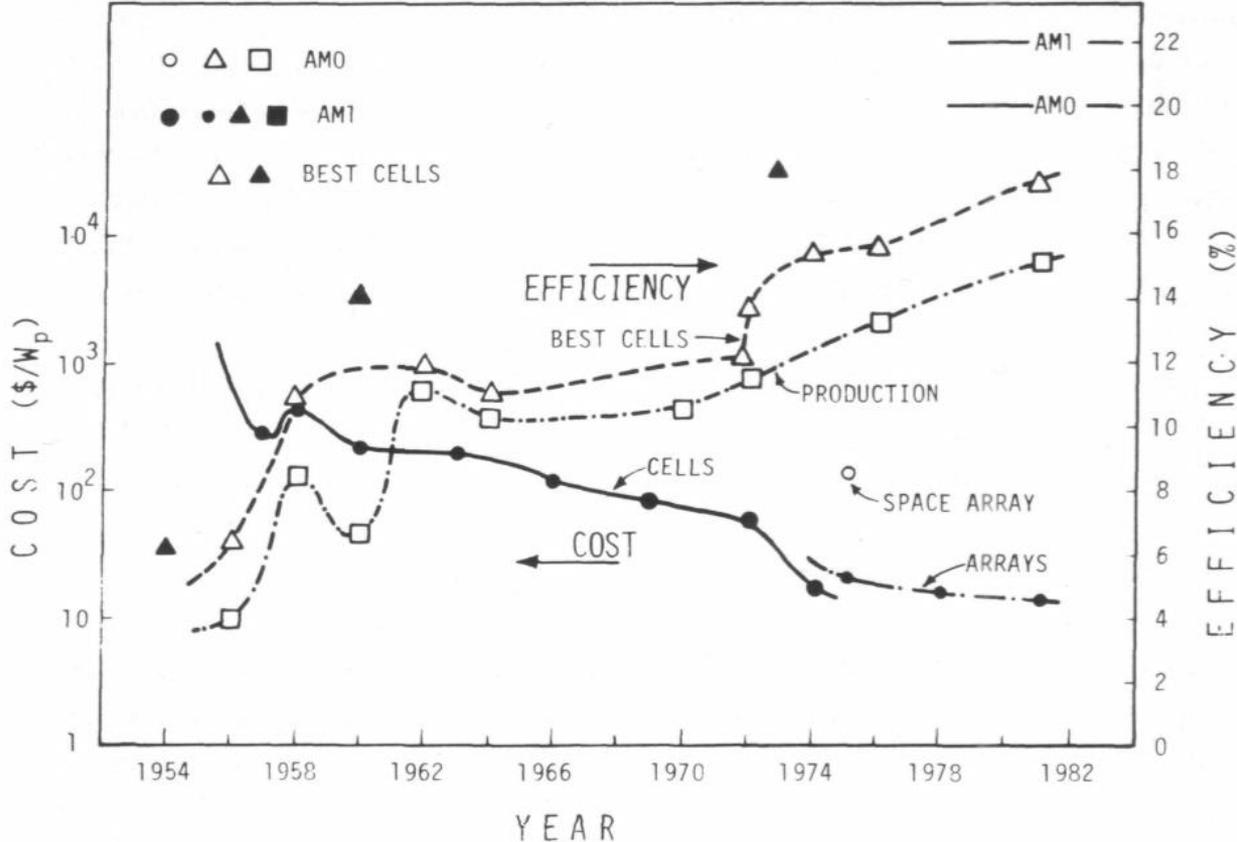


Teilmodul bestehend aus 9 Si Solarzellen als „Sonnenbatterie“ bezeichnet im Schutzgehäuse mit Ölfüllung (Bell Telephone Lab.)

Erste Si-Solarzelle der Welt: „Solar Battery“ der Bell Labs (1954: Original ca. 6% Wirkungsgrad, 2000: nachgemessen 1,5% (NREL) unverkapselt!)

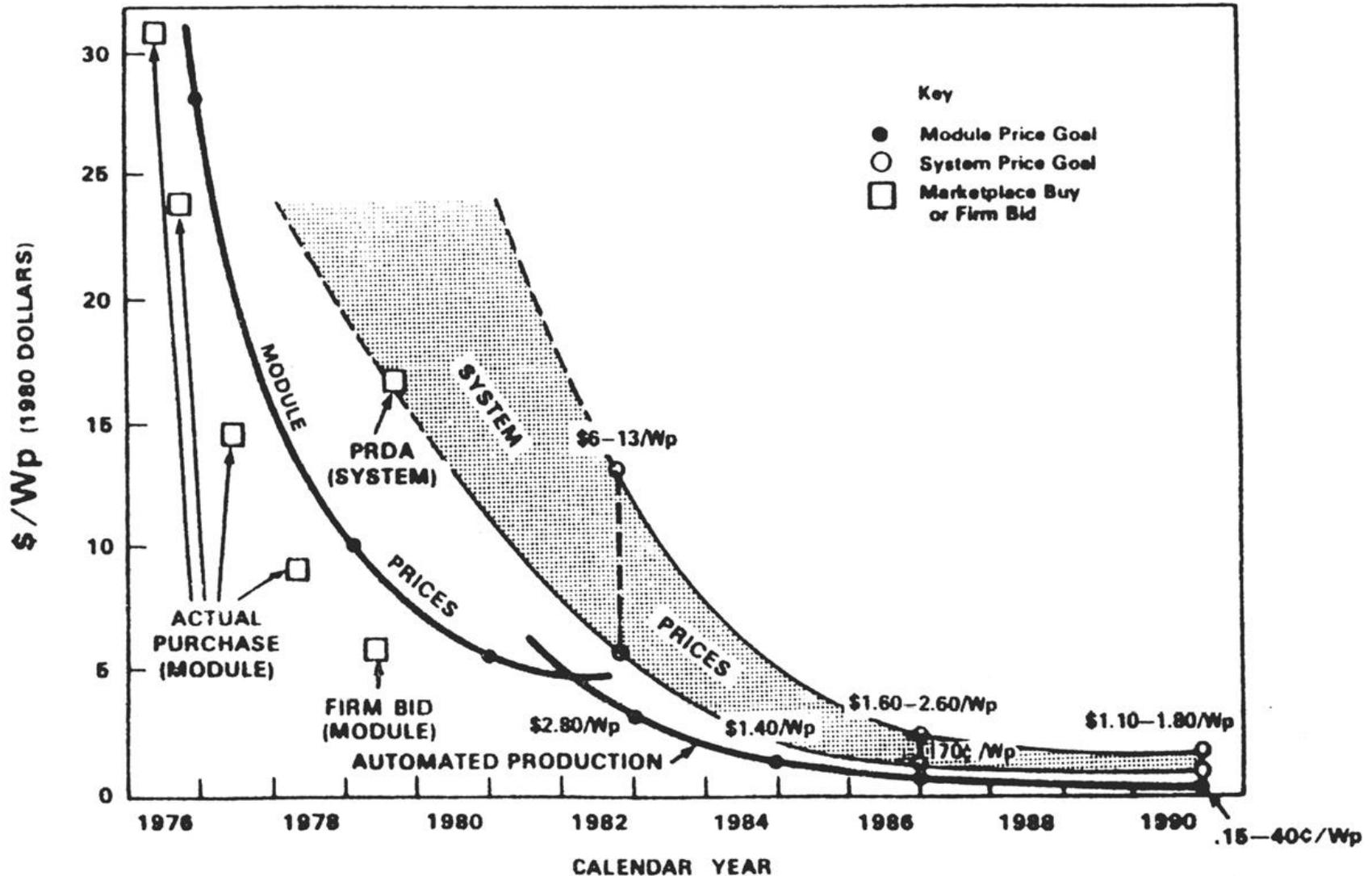
Kosten: Nur Militär u. Raumfahrt konnten die neue Technik nutzen

- 1954 CdS cell (Reynolds, Clevite Research Center)
- 1955 Start der kommerziellen Produktion von Solarzellen
- 1958 startete Vanguard I, 8 Jahre im Orbit (erster Satellit)
- 1963 erste PV Module. CdTe (Cusano)
- 1970 Start der terrestrischen PV, CuxS/CdS (Bloss)
- 1975 CuInSe₂ cell (Shay, Wagner, Kasper)
- 1976 a-Si (Carlson, Wronski)



z.B. 1956 \$350/W_p

Nach den Erwartungen von 1980 hätte man 1990 schon bei einem Systempreis von ca. 1,1 \$/Wp sein müssen!!



From P.D. Maycock and L. Magid, 14th IEEE PVSC, 1980