

ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR FORSCHUNG
DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN

NATUR-, INGENIEUR- UND GESELLSCHAFTSWISSENSCHAFTEN

GEMEINSAME SITZUNG
DER ABTEILUNG FÜR NATUR-, INGENIEUR- UND
GESELLSCHAFTSWISSENSCHAFTEN UND
DER ABTEILUNG FÜR GEISTESWISSENSCHAFTEN
AM 19. SEPTEMBER 1962
IN DÜSSELDORF

ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR FORSCHUNG
DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN

NATUR-, INGENIEUR- UND GESELLSCHAFTSWISSENSCHAFTEN

HEFT 122

KARL STEIMEL

Der Standort der Industrieforschung
in Forschung und Technik

FRITZ MACHLUP

Die Produktivität der naturwissenschaftlichen
und technischen Forschung und Entwicklung

HERAUSGEGEBEN

IM AUFTRAGE DES MINISTERPRÄSIDENTEN Dr. FRANZ MEYERS
VON STAATSSSEKRETÄR PROFESSOR Dr. h. c. Dr. E. h. LEO BRANDT

KARL STEIMEL

Der Standort der Industrieforschung
in Forschung und Technik

FRITZ MACHLUP

Die Produktivität der naturwissenschaftlichen
und technischen Forschung und Entwicklung



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

ISBN 978-3-322-98071-7 ISBN 978-3-322-98710-5 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-98710-5

© 1963 Springer Fachmedien Wiesbaden

Ursprünglich erschienen bei Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen 1963.

INHALT

Karl Steimel, Frankfurt/Main

Der Standort der Industrieforschung in Forschung und Technik 7

Fritz Machlup, Princeton (USA)

Die Produktivität der naturwissenschaftlichen und technischen
Forschung und Entwicklung 37

Diskussionsbeiträge

Professor Dr. phil., Dr. rer. nat. E. h., Dr. rer. nat. h. c., Dr. rer. nat.
h. c. *Karl Ziegler*, Professor Dr. rer. pol., Dr. h. c. *Fritz Machlup*, Dr.
phil., Dr.-Ing. E. h. *Karl Steimel*, Staatssekretär Professor Dr. h. c.,
Dr.-Ing. E. h. *Leo Brandt*, Minister für Wirtschaft, Mittelstand und
Verkehr Dipl.-Ing. *Gerhard Kienbaum*, Professor Dr. phil. *Heinrich
Kaiser*, Professor Dr.-Ing., Dr. h. c. *Herwart Opitz*, Ministerialdirigent
Dipl.-Ing. *Walther Hinsch*, Dr. phil., Dr.-Ing. E. h. *Hermann Rathert*,
Professor Dr.-Ing. *Volker Aschoff* 65

Der Standort der Industrieforschung in Forschung und Technik

Von *Karl Steimel*, Frankfurt/Main

Gliederung

1. Einleitung
2. Diskussion landläufiger Auffassungen
3. Versuch einer Konkretisierung der Aufgaben der Industrieforschung
4. Einordnung der Forschung in Organisation und Arbeitsablauf eines Industrieunternehmens
5. Zweck- und Grundlagenforschung im Wechselspiel
6. Freiheit im Forschen
7. Methodik der Projektbearbeitung
8. Organisation und Stabsfunktionen
9. Gedanken zur Ausbildung
10. Schlußbemerkung

1. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten nehmen die Untersuchungen und Diskussionen um Fragen der Forschungsführung, der Planung und der optimalen Durchführung von Forschungsprojekten, das „research on research“, einen immer größeren Raum ein. Begründet ist dieses wachsende Interesse durch das Zunehmen der Forschung im allgemeinen und durch die Errichtung großer und größter Forschungsanstalten. Nachrichten- und Radartechnik – allgemeiner gesagt die Informationsverarbeitung –, Raketen-, Kern- und Weltraumforschung nahmen vorher ungeahnte Dimensionen an. Die Sorge um den Wirkungsgrad dieser Forschungsarbeit schiebt die oben genannten Fragenkomplexe in das Blickfeld des allgemeinen Interesses. Spezialorganisationen und Untergruppen führender technisch-wissenschaftlicher Verbände haben sich die Bearbeitung der Aufgabenstellung zum Hauptziel gesetzt. Zwei markante Ereignisse der letzten Jahre haben uns in Westeuropa besonders eng an die Fragen herangeführt: das Gutachten des Wissenschaftsausschusses der NATO über „Wege zum Ausbau von Naturwissenschaft und Technik in der westlichen Welt“ und das zweite europäische Regionalseminar der OEEC

über „Leitung, Planung, Verwaltung der Forschung“ in Strobl. Es hat den Anschein, als ob hier eine neue wissenschaftliche Disziplin heranwüchse, die man als „Betriebswissenschaft der Forschung“ bezeichnen könnte.

Im Rahmen der oben skizzierten Bestrebungen nimmt die Stellung der Industrieforschung innerhalb der Forschung im allgemeinen und in den Industrieunternehmen selbst eine wesentliche Rolle ein. Von den 3 Arbeitsgruppen in Strobl beschäftigte sich die Gruppe II überwiegend mit der Industrieforschung. Die Industrieforschung spielt nicht nur einen wesentlichen Faktor im naturwissenschaftlichen Beitrag zur Entwicklung der Wirtschaft, sie stellt auch einen wesentlichen Anteil der naturwissenschaftlichen Forschungskapazität. Sie sichert auf der einen Seite die finanzielle Basis der Hochschul- und der sonstigen von der öffentlichen Hand getragenen Forschung und liefert wesentliche Beiträge zur modernen naturwissenschaftlichen Forschung wie beispielsweise zur Halbleiterphysik.

Bei diesem Sachverhalt ist es bedauerlich, daß die Vorstellungen über die Industrieforschung ziemlich unklar und divergent sind. Die Zersplitterung der Meinungen über Aufgaben und Tätigkeit der Industrieforschung dürfte eine der Wurzeln des ungenügenden Forschungsbewußtseins auch in der Industrie sein. Eng damit gekoppelt ist die Frage der sozialen Einordnung des Forschers; eine Frage, welche in letzter Zeit erhebliche Sorgen in der deutschen Physikerschaft und ihrer Fachorganisation bereitete. Dabei stellen die Physiker heute schon einen wesentlichen und bei der Struktur der vorherrschenden Probleme einen immer noch wachsenden Anteil des industriellen Forschungspersonals.

2. Diskussion landläufiger Auffassungen

Am Anfang dürfte sich eine Übersicht der landläufigen Ansichten über die Industrieforschung und deren Einordnung lohnen, wenn sich dabei auch vielleicht eine etwas negative Abgrenzung des Themas ergeben sollte. Eine Abstempelung der Industrieforschung als angewandte Forschung gegenüber einer Grundlagenforschung an Hochschulen und sonstigen von der öffentlichen Hand getragenen Forschungsanstalten ist zu oberflächlich. Diese Frage bedarf aber einer eingehenderen Beleuchtung. Auf der anderen Seite wird die Tätigkeit des Forschers in der Industrie oft ähnlich angesehen wie die eines Mitarbeiters eines öffentlichen Forschungsinstitutes; in Deutschland nimmt man als Prototyp dafür gern ein Max-Planck-Institut. Als beson-

deres Kriterium gilt, daß man mehr oder weniger frei forschen kann, ohne gleichzeitig zur Lehre verpflichtet zu sein. Hier erhebt sich sogleich die Frage, ob eine solche Arbeitsauffassung einen sinnvollen Grund für ein industrielles Forschungsinstitut abgibt. Ein weiteres Institut mit ähnlicher Zielsetzung neben bestehende zu setzen, hat nur dann einen Sinn, wenn es notwendig wird, die forschersische Initiative durch den Wettbewerb mehrerer Institute zu stimulieren. Gegen die Vervielfachung von Forschungsinstituten sprechen aber wesentliche Gründe. Der notwendige Aufwand als sinnvoller Mindesteinsatz zur Lösung moderner Probleme ist heute schon sehr hoch und immer noch im Steigen. Dazu kommt ein Mangel an hochqualifizierten Führungskräften. Nur gut organisierte Forschungsarbeit hat heute noch Erfolgchancen. Dies alles zwingt zur Konzentration. Für eine Industriefirma wäre es wahrscheinlich klüger, die Mittel, die sie für zusätzliche Forschungsaufgaben bereitstellen will, dem Stiferverband für die Deutsche Wissenschaft zu übertragen, wenn sie selbst keine besonderen firmeneigenen Interessen an der Forschung hat.

Leichter ist eine weitere Ansicht zu behandeln. Vielfach wird der Besitz einer eigenen Forschungsanstalt als eine Prestigefrage angesehen. „Die Forschung ist der goldene Rand der Visitenkarte eines Unternehmens“ ist eine häufige Formulierung. Die Tatsache, daß in den Geschäftsberichten der Großfirmen heute der Bericht über die Forschungstätigkeit meist ganz vorne steht, deutet in diese Richtung, besagt aber noch nichts über den Nutzen der Forschung für das Unternehmen. Am treffendsten glossierte Professor Viegeweg in seinem Referat „Die naturwissenschaftliche und technische Forschung in der Bundesrepublik Deutschland“ auf dem Strobl-Seminar diese Auffassung durch den Satz: „Sich mit Forschung zu befassen, ist heute nicht nur ein ernstes Anliegen der öffentlichen Hand, der Wirtschaft und vieler Verbände und Vereinigungen, sondern sich mit Forschung zu schmücken, sie als ein Attribut der Organisation zu haben, ist beinahe zur Mode geworden.“ Den Industrieforscher selbst befriedigt die Prestigeformulierung sehr wenig. Man muß sogar befürchten, daß im Ernst die Frage offen ist, welche Einstellung ein solches Unternehmen zur Forschung hat und welche Aufgaben und Stellung es ihr im Gesamtrahmen zuteilt.

Die Formulierung einiger Großfirmen, Forschung auf breitester und freierster Basis zu betreiben und demnach den Forschern die Möglichkeit geben zu können, Themen nach eigenem Belieben zu bearbeiten, wird oft als verlockend empfunden, kommt sie doch den Vorstellungen von „akademischer Würde und Freiheit“ am meisten entgegen. Vom Firmenstandpunkt

aus gesehen mag die Grundauffassung Berechtigung haben, wenn die Geschäftspolitik in bezug auf die Arbeitsgebiete expansiv ist. Das Prinzip der freien Themenwahl läßt sich aber gar nicht durchführen, wenn größere Problemkomplexe bearbeitet werden sollen. Größere Problemkomplexe zwingen zu einer straffen Zusammenfassung der Forschungstätigkeit. Darüber hinaus ergibt sich die Frage, ob nicht die Integration der Forschungstätigkeit in das Arbeitsgebiet des Unternehmens doch vorzuziehen ist.

Neben den bisher besprochenen Auffassungen über die Stellung der Industrieforschung gibt es noch firmeninterne Auffassungen, die man auch noch unter den Abgrenzungen behandeln soll. Der mit der Zeit ganz unproportional steigende Aufwand für umfangreiche Apparaturen, die infolge ihrer Kompliziertheit und vor allem wegen des erforderlichen hohen wissenschaftlichen Könnens bei der Resultatauswertung einen ständigen wissenschaftlichen Mitarbeiterstab erfordern, wie Elektronenmikroskop, Feinfokus-Röntgenapparatur, optische und Massen-Spektrometer, Apparaturen der Radiochemie usw., zwingt zwecks rationeller Ausnutzung zu einer Konzentration. Da ein Forschungsinstitut diese Mittel am meisten braucht, liegt es nahe, sie in ihm zu konzentrieren. Sehr verfehlt wäre es aber, die Hauptaufgabe eines industriellen Forschungsinstitutes in der Pflege solcher Apparaturen und der Durchführung der übertragenden Messungen zu sehen. In den Forschern nur „Stallknechte der weißen Elefanten“ zu sehen, wäre ein Absurdum. Selbst dem Mitarbeiterstab an den Apparaturen muß man noch Gelegenheit zur eigenen wissenschaftlichen Arbeit geben, damit ihre Leistungsfähigkeit durch ständige Weiterbildung erhalten bleibt.

Ebenso unzureichend wäre es, ein Forschungsinstitut nur mit im laufenden Betrieb anfallenden Aufgaben zu füllen. Sonderaufgaben können sehr wertvolle wissenschaftliche Probleme enthalten, oft unterliegen aber die Auftraggeber der Versuchung, sich durch Abgabe nicht besonders vordringlicher, aber aufwendiger Teilaufgaben finanziell zu entlasten. Ebenso wenig angemessen wäre es, in der Heranbildung des technischen Nachwuchses für das Unternehmen eine wesentliche Aufgabe eines industriellen Forschungsinstitutes zu sehen. Die anderen betrieblichen Organisationen, die Projekt-Abteilungen, Fabriken und Vertriebe haben eine so differente Struktur und Arbeitsmethodik, daß ein Forschungsinstitut nicht unbedingt die beste Vorschule ist. Wohl liegt es nahe, dem Absolventen der Hochschule zuerst die Möglichkeit zu geben, im Forschungsinstitut zu beginnen, damit er sich in einem noch hochschulnahen Betriebsteil akklimatisieren und seine eigene spezifische Begabung und Neigung überprüfen kann.

3. Versuch einer Konkretisierung der Aufgaben der Industrieforschung

Aus der abgrenzenden Diskussion heraus ergaben sich bereits einige Gesichtspunkte zur Konkretisierung der Aufgabenstellung. Die Industrieforschung soll eine Aufgabenstellung haben, die sich nicht in einer bloß allgemeinen Ausrichtung auf das Interessengebiet des Unternehmens erschöpft, sondern die den Forscher mit dem Geschick des Unternehmens koppelt. Auch der Forscher will mit vollem Verantwortungsbewußtsein und hohem Verantwortungsgefühl für das Interesse des Unternehmens arbeiten. Das wird am sichersten erreicht, wenn die Forschung organisatorisch und in ihrer Aufgabenstellung voll in das Gefüge des Unternehmens integriert ist. Es bleibt dabei eine selbstverständliche Voraussetzung, daß die Unternehmensführung Verständnis für einige Sonderprobleme der Forschung hat und für ein gutes Arbeitsklima sorgt, in welchem schöpferische und zukunftssträchtige Arbeit gedeihen kann. Die volle Integration bedeutet aber keineswegs – wie später noch näher gezeigt wird – Verzicht auf Grundlagenforschung.

Unter dem bisher gewonnenen Aspekt dürfte folgende Formel für die Aufgabenstellung der Industrieforschung eine brauchbare Basis abgeben:

Die Industrieforschung soll die für das Unternehmen notwendigen wissenschaftlichen Unterlagen – vor allem auf neuartigen Arbeitsgebieten – in hinreichendem Umfange erarbeiten und bereithalten.

In den Worten „für das Unternehmen notwendig“ und „in hinreichendem Umfange“ steckt die Integration in das Unternehmensgefüge. Der Begriff „wissenschaftliche Unterlagen“ nimmt eine Entscheidung über Zweck- und Grundlagenforschung noch keineswegs vorweg. Die vornehmliche Ausrichtung auf neuartige Arbeitsgebiete bringt meist automatisch einen erhöhten Anteil an Grundlagenbearbeitung.

Die Forderung nach „Unterlagen in hinreichendem Umfange“ führt zu einer organisatorischen Konsequenz, die für die moderne Industrieforschung charakteristisch ist. Daß eine Unterlage hinreichend ist, bedarf eines Beweises, der im Forschungsinstitut selbst erbracht werden soll. Die Unsicherheit, ob Unterlagen hinreichend sind, hängt meist damit zusammen, daß bei der Anwendung eine sehr große Anzahl von Voraussetzungen eingeht; auch von solchen, die man leicht für trivial hält. Man kann die Vollständigkeit von Unterlagen nur dadurch prüfen, daß man ein Produkt, für dessen Herstellung die Unterlagen bestimmt sind, in Mustern, die zwar noch nicht nach dem Marktbedürfnis ausgerichtet zu sein brauchen, in geeigneten Stück-

zahlen herstellt. So kommt man zwangsläufig zu einer Verbindung von Forschung und Vorentwicklung, die sich heute in fast allen Industriefirmen der Welt vollzieht.

4. Einordnung der Forschung in Organisation und Arbeitsablauf eines Industrieunternehmens

Die Formulierung über die Aufgabenstellung der Industrieforschung wird am zweckmäßigsten unterbaut und von einigen Unsicherheiten, die immer leicht am Rande auftreten können, befreit, wenn man die Einordnung der Forschung in die allgemeine Arbeit des Industrieunternehmens näher betrachtet. Die Vorstellung, daß die industrielle Forschung nur in den Forschungsinstituten der Industrie betrieben wird, ist nicht immer haltbar. Verschiedene Gesichtspunkte, die vor allen Dingen in der Elektrotechnik und anderen auf Großprodukte ausgerichteten Industriezweigen von Bedeutung sind, lassen eine Streuung der Forschungsarbeit über weite Betriebszweige zweckmäßig erscheinen. Sind zur Durchführung der Arbeit Großanlagen – wie beispielsweise große Versuchsstände oder Prüffelder – erforderlich, so ergibt sich meist nur dann ein rationelles Arbeiten, wenn diese Anlagen auch für Entwicklung und Fertigungsüberwachung ausgenutzt werden. In solchen Fällen empfiehlt sich auch eine organisatorische Übertragung der Forschungsarbeit an den ständigen Mitarbeiterkreis bei diesen Großanlagen. Die Übertragung von Forschungsaufgaben an einen solchen Mitarbeiterkreis hat – wie bereits oben einmal angeklungen ist – noch den Vorteil, daß das Personal mit der wissenschaftlichen Sphäre besser in Kontakt bleibt.

Ein weiterer, vielleicht besonders wichtiger Gesichtspunkt führt auch oft zu einer Streuung der Forschung über eine möglichst große Breite im Unternehmen. Der wirtschaftliche Erfolg moderner Großunternehmen ist heute aufs engste mit der Geschlossenheit und Schlagkraft ihrer speziellen Arbeitsgebiete verknüpft. Die Geschlossenheit fordert zumindest die Zusammenfassung von Entwicklung, Vertrieb und Fertigung und läßt oft auch den engsten Kontakt mit der Forschung wünschenswert erscheinen.

Aus dem eben aufgezeigten Gesichtskreis der Einordnung von Forschungsaufgaben in ein Unternehmen ergibt sich für die Forschungsinstitute in den Unternehmungen meist die Aufgabe, Arbeitskomplexe zu untersuchen, bei denen die Eingliederung in das bestehende organisatorische Gefüge des Unternehmens noch nicht von vornherein erkennbar ist, weil möglicherweise

ein Einsatz an verschiedenen Stellen in Frage kommt oder der Einsatz noch so unbestimmt ist, daß mit großen Verschiebungen in bezug auf das Einsatzgebiet gerechnet werden muß. Ebenso wird man einem Forschungsinstitut die Klärung von Fragen übertragen, die bei positivem Ausgang für das Unternehmen von großer Bedeutung werden können, bei denen aber der Ausgang der Arbeit noch sehr ungewiß ist.

In Verfolg der Generaltendenz, Forschungsarbeiten innerhalb der Industrie jeweils dort unterzubringen, wo die besten apparativen und personellen Voraussetzungen sind, kann es auch zweckmäßig sein, Forschungsarbeiten, die eindeutig für einen bestimmten Unternehmensteil bestimmt sind, doch einem Forschungsinstitut zu überweisen, wenn in dem gegebenen Unternehmensteil die Voraussetzungen zu einer sachgemäßen Bearbeitung fehlen.

5. Zweck- und Grundlagenforschung im Wechselspiel

An einigen Beispielen, die in den letzten Jahren in verschiedenen Großfirmen bearbeitet wurden, soll einerseits der Ablauf bei der Bearbeitung größerer Forschungskomplexe in Industrieunternehmen illustriert, andererseits das Zusammen- und Wechselspiel von Grundlagen- und Zweckforschung aufgezeigt werden. Zuerst ein paar Beispiele aus Halbleiterphysik und -technik:

Die Halbleiterphysik hat in den letzten Jahren einen entscheidenden Einfluß auf die Elektroindustrie gehabt. Nachdem die ersten positiven Auswirkungen der Halbleiterphysik in den Transistoren der Nachrichtentechnik zugute gekommen waren, gewann die Frage der Einsatzmöglichkeit von Halbleiterprodukten auf dem Gebiet der Starkstromtechnik – und zwar sowohl bei Gleichrichtern, als auch bei leistungsstarken steuerbaren Elementen – immer mehr an Interesse. Im Vergleich zur Nachrichtentechnik rückten die Fragen des Wirkungsgrades und der Leistungsdichte viel stärker in den Vordergrund. Erfahrungsgemäß stellt das besonders harte Anforderungen an Technologen und Physiker.

Der Zeitabschnitt der Betrachtung beginne mit der intensiven Bearbeitung des Halbleiterwerkstoffes Silizium und der Schaffung von Siliziumprodukten. In den meisten Forschungsstellen der Elektroindustrie standen gut eingespielte Mannschaften zur Verfügung. Eine analoge Arbeit war mit Germanium vorausgegangen. Physik und Technik der Germaniumleistungsgleichrichter und Großtransistoren waren geklärt. Neben den auf indu-

strielle Aufgabenbearbeitung abgestimmten Halbleiterphysikern standen eine starke chemische Gruppe, eine gut eingespielte Strukturforschung und eine elektrotechnische Gruppe bereit. Letztere war speziell in der Lage, alle meßtechnischen Aufgaben durchzuführen einschließlich der Behandlung der Kurzzeitphänomene, die beim Übergang zwischen dem leitenden und dem sperrenden Zustand auftreten.

Sinngemäß hätte die Forschungsgruppe eines elektrotechnischen Unternehmens – und der Laie wird das auch annehmen – sich in der Werkstofffrage auf ausgiebige Unterlagen aus der Grundlagenforschung und auf Zulieferungen aus der chemischen Industrie abstützen sollen. Beides war nicht möglich. Zu jenem Zeitpunkt war das von der chemischen Industrie angebotene Material noch völlig unzureichend, und es war weder bekannt, bis zu welchem Grade man die Reinheit des Siliziums treiben könne, noch welche Einkristallgüten erreichbar sind. Es war auch nicht bekannt – und darin liegt eine gewisse Tragik der industriellen Forschungsarbeit –, welche Materialqualität erforderlich ist. Trotz reichen Materials aus der Grundlagenforschung der Halbleiterphysik waren die Voraussetzungen nach allen Richtungen so lückenhaft, daß sich ein *circulus vitiosus* aufzutun schien. Ein wirklich systematischer und rationeller Beginn war nicht möglich, es mußte von verschiedenen Seiten gleichzeitig an den Problemkomplex herangegangen werden, um erst einmal Boden zu gewinnen.

Die Chemiker schufen neue analytische und präparative Methoden und kamen bis zu der früher kaum vorstellbaren Sauberkeit von etwa nur einem Störatom in einer Milliarde Siliziumatome. Da diese Sauberkeit noch keineswegs ausreichend war, trieben die Physiker sie mit ihren Methoden, dem Zonenschmelzen und Kristallziehen noch weiter bis eins in einer Billion. Die Strukturforscher untersuchten die Güte der Kristalle und forschten nach den Ursachen der Kristallbaufehler. Interessant ist an dieser Forschungskette, daß ganz zum Schluß, als die Produktentwicklung schon abgeschlossen war und die Fertigung schon lief, eine Methode entwickelt werden konnte, die vollen Aufschluß über die quantitative Aufteilung der Kristallbaufehler in verunreinigungs- und in wärmspannungsbedingte gab. Damit kam ein wichtiges Problem der Grundlagenforschung zum Abschluß, dessen Lösung hätte am Anfang stehen sollen, über welches es aber nur viele sich widersprechende Angaben in der Literatur gab. Der Industrierahmen erwies sich für die Lösung dieses Grundlagenproblems deshalb besonders geeignet, weil ein sehr umfangreiches Versuchsmaterial erforderlich war, dessen Erstellung an anderen Orten kaum möglich gewesen wäre. Das für die Praxis

Erreichte zeigen einige Bilder. Bild 1 zeigt links einen polykristallinen Silizium-Rohling höchster chemischer Reinheit, rechts einen Einkristall höchster physikalischer Reinheit mit hochwertiger Kristallstruktur. Aus dem am häufigsten an der Erdoberfläche vorkommenden Material wurde ein Veredlungsprodukt geschaffen, das heute dreimal so hoch im Preis steht wie Gold. Bild 2 zeigt eine Kristallziehapparatur zum tiegelfreien Zonenschmelzen und Kristallziehen. Es kann als ein besonders schöner Erfolg der Physiker verbucht werden, daß es ihnen in sehr kurzer Zeit möglich war, Verfahren und Apparaturen ähnlich Bild 2 zu entwickeln, die sich als überaus zuverlässig erwiesen und die die schwierigen Arbeitsprozesse fast ausschlußfrei durchführbar machten.

Der Halbleiterphysik im engeren Sinne fiel zuerst die Aufgabe zu, die notwendigen Gütebedingungen für das Material aufzustellen. Aus der Grundlagenforschung waren nur die Eigenschaften – wie spezifischer Widerstand und Trägerlebensdauer – bekannt, die man als Bewertungsmaßstäbe für das Material benutzen kann. Es fehlte aber jede Zahlenangabe, sogar eine Abschätzung der erforderlichen Größenordnung. Man war deshalb zu dem von der Zweckforschung oft beschrifteten sehr unsystematisch wirt-

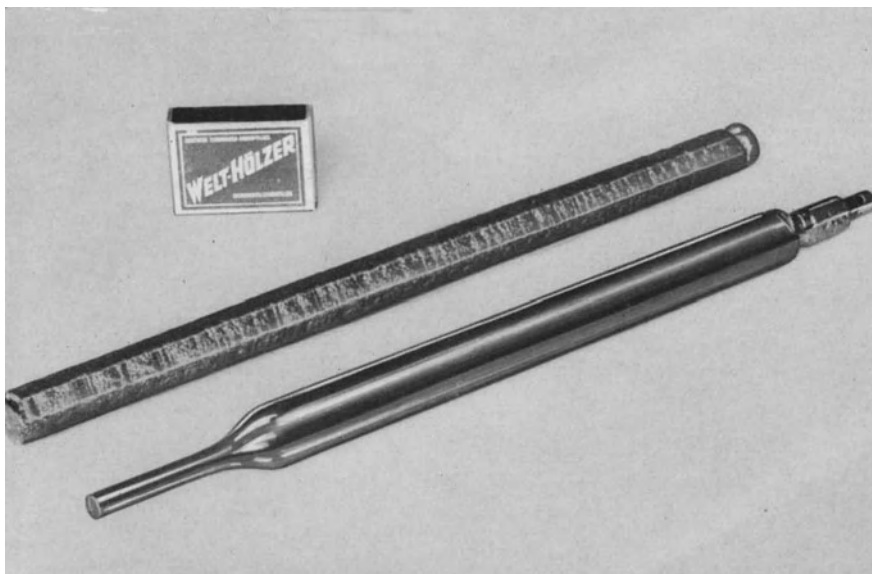


Abb. 1: Höchstreine Silizium-Produkte. Rohling und Einkristall

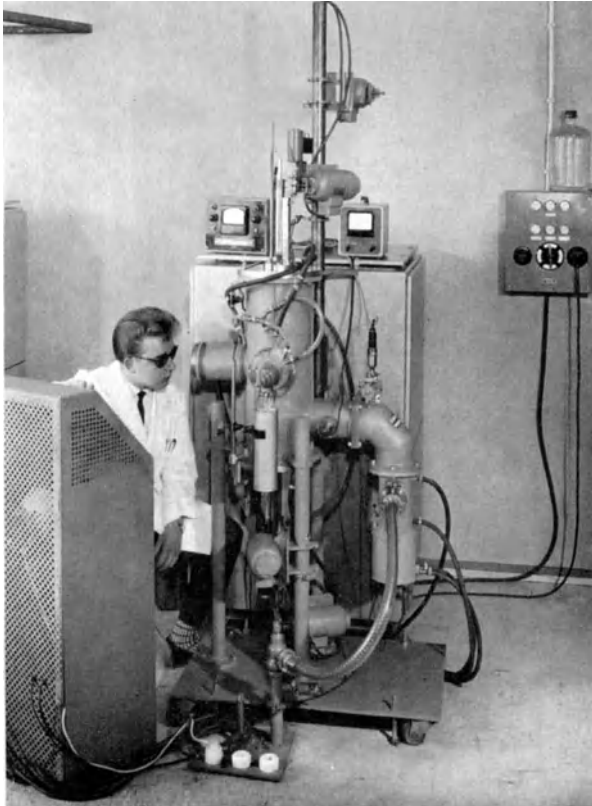


Abb. 2: Apparatur zum tiegelfreien Zonenschmelzen und Kristallziehen für Silizium

den Weg gezwungen, sich auf großer Breite gleichzeitig vorzutasten. Die Materialqualität wurde laufend verbessert, die Meßmethoden für die Materialgüte wurden verfeinert und verbessert, und mit fortlaufend verbesserten Verfahren wurden Elemente gebaut, bis die Arbeit bei einem hohen Qualitätsmaß konvergierte und bis gleichzeitig bekannt war, welche Einflußfaktoren diese hohe Qualität verursachten und sicherstellten.

Von den vielen für eine Elementherstellung zu lösenden Fragen sei nur ein Teilkomplex kurz beleuchtet. Ein Element besteht aus einer Folge von Schichten, die teils durch Legieren, teils durch Verlötung entstanden bzw. zusammengebracht sind. Dabei müssen die Materialien so ausgewählt und die Ar-

beitsgänge so geführt werden, daß keine gefährlichen Materialspannungen entstehen. Als Gütetest steht nur eine sehr harte Temperaturschockprüfung zur Verfügung. Bild 3 zeigt eine für umfangreiche Messungen – insbesondere Temperaturschockteste – gebaute Prüfapparatur. Bild 4 zeigt, wie schnell – nach wenigen Jahren der Forschung und Entwicklung – Siliziumprodukte unter härtesten Bedingungen eingesetzt wurden. Der Gleichrichter für einen Bahnmotor auf einer 2-Frequenzlokomotive löst den Streit zwischen den beiden Bahnstromversorgungssystemen auf seine Weise:

Die Lokomotive ist für $16\frac{2}{3}$ und 50 Hertz einsatzfähig.

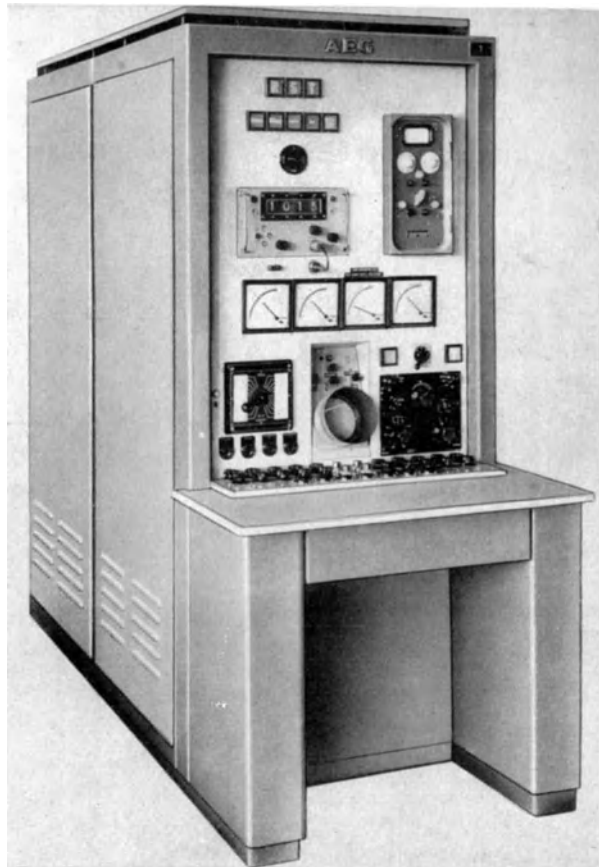


Abb. 3: Prüfapparatur für Silizium-Bauelemente

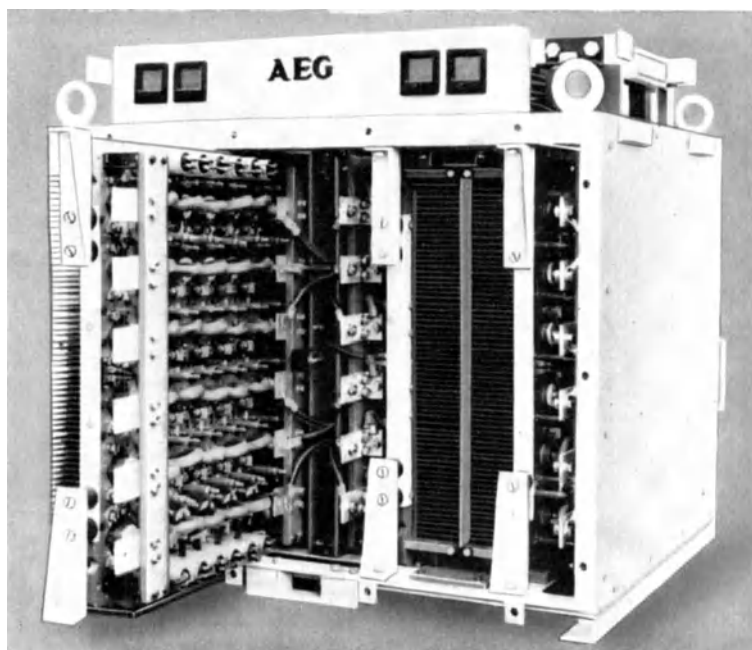


Abb. 4: Silizium-Gleichrichter einer Zweifrequenz-Lokomotive

Die Arbeiten für einen steuerbaren Siliziumgleichrichter brachten viele neue Probleme. Während für den Gleichrichter der höchste spezifische Widerstand der beste ist, ergab sich beim steuerbaren Gleichrichter ein Optimierungsproblem mit engen Grenzen. Die Oberflächenprobleme gingen, verglichen zum ungestörten Gleichrichter, in verschärfter Form ein, weil Leckströme den inneren Verstärkungsmechanismus beeinflussen.

Von besonderer Bedeutung, und sehr reizvoll zu verfolgen, war die Wechselwirkung zwischen Physik und Elektrotechnik. Es wurde bald klar, daß nicht nur äußerliche betriebstechnische Vorteile wie Kleinheit, Robustheit und Fehlen einer besonderen Heizung die Silizium-Elemente gegenüber dem schaltungstechnischen Vorläufer, dem Thyatron, wertvoller machten. Die allen Halbleiterelementen eigene Tatsache des schnelleren Ablaufs aller Umschaltvorgänge wurden für die elektrotechnische Anwendung von entscheidender Bedeutung. Elemente vom Thyatroncharakter sind nur durch Nullwerden der angelegten Spannung löscherbar, was bei Wechselspannungsbetrieb von selbst periodisch erfolgt. Durch bekannte Löscherhaltungen kann man aber auch bei Gleichstrombetrieb eine Unterbrechung des Stromes erzielen.

Der technische Aufwand für diese Löschsaltungen ist der sogenannten Freiwerdezeit, einer physikalisch bedingten Zeitkonstante der Elemente proportional. Bei Thyratrons ist die Freiwerdezeit so lang, daß die Mittel für die Löschsaltungen untragbar teuer werden. Die 1 bis 2 Zehnerpotenzen kürzeren Freiwerdezeiten bei Siliziumgleichrichtern machten viele der früher schon durchdachten und erprobten, aber am Schaltmittelaufwand gescheiterten Schaltungen nun wirtschaftlich realisierbar. Für den Halbleiterphysiker ergab sich die Anregung, die physikalischen Vorgänge, die die Freiwerdezeit

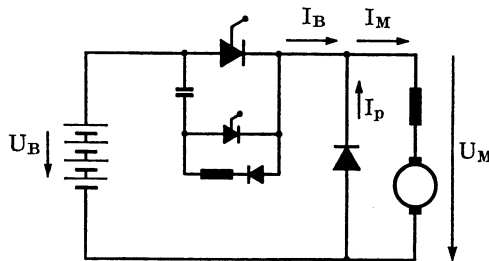


Abb. 5: Prinzipschaltplan einer Impulssteuerung

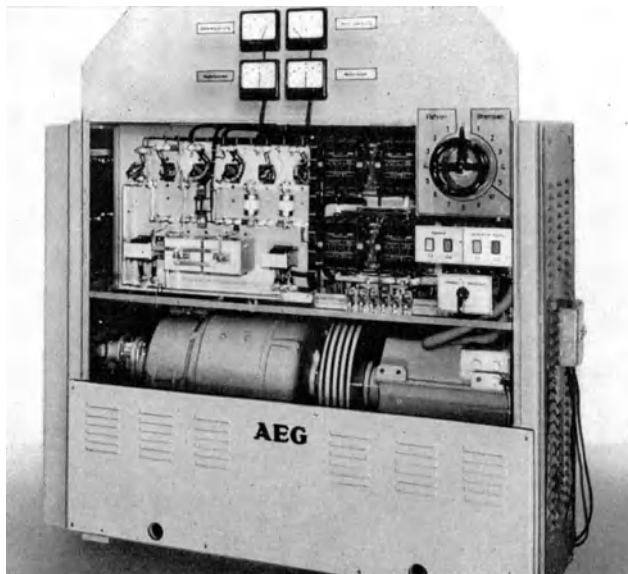


Abb. 6: Modell der Impulssteuerung eines Grubenbahnmotors

beeinflussen, zu erforschen und zu beherrschen. Die Elektrotechnik ihrerseits wurde um wertvolle neue Möglichkeiten bereichert. Eine Impulsschaltung, die einen elektronischen Schalter in Verbindung mit einer Induktivität und einem Gleichrichter benutzt, erlaubt eine verlustarme Spannungstransformation von Gleichstrom. Eine solche Schaltung ist für kleinste Leistungen in jedem Fernsehgerät zur Speisung der Bildröhre enthalten. Diese Schaltung wird nun auch in der Starkstromtechnik für sehr große Leistungen möglich. Bild 5 zeigt das Prinzip dieser Schaltung und Bild 6 eine technische Ausführungsform für 20 kW-Leistung zum verlustlosen Regeln eines Grubenbahnmotors.

Die elektrotechnischen Untersuchungen zeigten weiter noch, daß auch die Einschaltzeiten, obwohl nur nach Bruchteilen von Mikrosekunden zählend, von entscheidender Bedeutung werden können. Auch das stellt dem Physiker wertvolle Aufgaben. Bei allen diesen Fragen zeigt sich nicht nur die Bedeutung einer engen Zusammenarbeit zwischen den Forschern auf den Gebieten der Halbleiterphysik und der Elektrotechnik, es zeigt sich hier auch wieder die oft beobachtete Tatsache, daß die Anwendung zu Rückfragen und Problemstellungen an die Grundlagenforschung führt, die vorher nicht geahnt wurden, wie hier die Fragen nach dem zeitlichen Ablauf von Zustandsänderungen im Stromtransport in Halbleitern. Besondere Erwähnung verdient aber auch die Tatsache, daß die schnelle und ausgiebige Bereicherung der Technik durch diese zum Teil sehr grundsätzlichen Fragestellungen geeignet ist, den Ruf und das Ansehen der Forschung in der Technik zu stärken und zu festigen.

Ein weiteres Beispiel aus der Halbleitertechnik sei kurz gestreift, weil es zeigt, wie eng die Verknüpfung von Zweck- und Grundlagenforschung sein kann und welche große wirtschaftliche Bedeutung noch offene Fragen der Grundlagenforschung haben können. Vor anderthalb Jahrzehnten wurde bekannt, daß mit Halbleiterwerkstoffen wesentlich größere Seebeck- und Peltiereffekte erreicht werden können als mit Metallen. Eine sehr intensive Forschungstätigkeit setzte in der ganzen Welt auf diesem Gebiet ein, weil man die wirtschaftlichen Möglichkeiten einer direkten Umwandlung von Wärme in elektrischen Strom und einer Kälteerzeugung unmittelbar durch elektrischen Strom sah.

In der Zwischenzeit sind die technische Forschung auf dem Gebiet der Halbleiterwerkstoffe für thermoelektrische Zwecke und die Entwicklung von Elementen zu einer guten Reife gelangt. Bild 7 zeigt ein solches Element, das vornehmlich für Kühlzwecke entwickelt wurde. Die Ergebnisse brachten

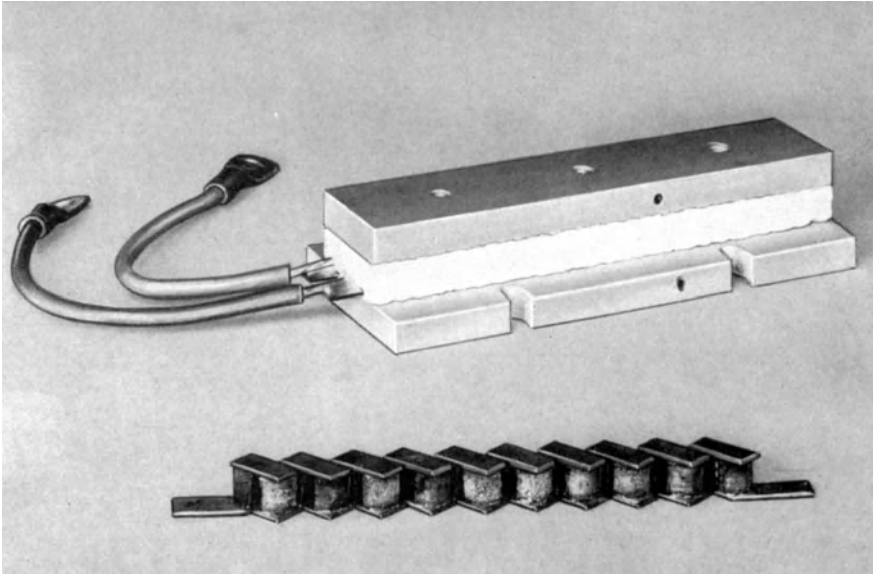


Abb. 7: Peltierzelle, Riegel und Zusammenbau

kräftige Enttäuschungen. An einen großtechnischen Einsatz ist nicht zu denken, z. Z. sind nur wirtschaftlich nicht sehr bedeutsame Anwendungen zu sehen. Die Hintergründe lassen sich leicht aufzeigen. Aus der 1910 entstandenen Altenkirchschen Theorie der Thermoelektrizität ergibt sich als Güteziffer zur Bewertung thermoelektrischer Anordnungen die thermoelektrische Effektivität

$$Z = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\kappa} \quad (1)$$

mit α als Thermospannungskoeffizient und σ als elektrischer und κ als Wärmeleitfähigkeit. Man sah Werte von 10^{-2} pro Grad C bei Zimmertemperatur als erreichbar an. Bei $5 \dots 6 \cdot 10^{-3}$ wäre ein großer Durchbruch in die Technik wahrscheinlich gewesen. Erreicht wurden $3 \cdot 10^{-3}$.

Der Vergleich der bei verschiedenen Stoffen erreichten Z-Werte zeigte, daß der erreichbare Z-Wert stark von der Temperatur abhängig ist. Bild 8 gibt eine gute Übersicht. Auffällig ist eine aus dem Bilde ablesbare Gesetzmäßigkeit. Das Produkt aus Z und absoluter Temperatur T liegt immer nahe bei 1:

$$Z \cdot T \approx 1 \quad (2)$$