

1 Einleitung

Was im Verborgenen wirkt, wird leicht übersehen. Dieses Schicksal teilten Halbleitermaterialien und ihre Hersteller, die eine Schlüsselstellung bei der Etablierung der Halbleitertechnologie einnahmen und das materiale Fundament der Informationsgesellschaft in ihrer heutigen Ausprägung bereitstellten.¹ Ohne den wissenschaftlich fundierten Zugang zu geeigneten Proben blieben theoretische Hypothesen und experimentelle Forschungsstrategien „substanzlos“.

Während Dinge visuell unmittelbar erfassbar sind, entzieht sich die Funktion der Materialität dem Auge.² Diese Unsichtbarkeit war für die physikalisch geprägte Forschung normal. Während in der Chemie Stoffe und Substanzen einen zentralen Platz einnahmen,³ konzentrierten sich Physiker darauf, „die Theorie der Methode und die Instrumente [zu] liefern“.⁴ Als Grund für die „Materialfreiheit“ der Physik führte Bernadette Bensaude-Vincent die historisch gewachsene Aufspaltung der Naturforschung an. Damit mathematische Eindeutigkeit genutzt werden konnte, wurde die Materialkompetenz an die Chemie ausgelagert: „It thus seems that natural science had to give up the study of materials (or leave it to the chemists!) in order to become a rational and mathematical science“.⁵

Im Zuge der Halbleiterforschung stieß diese Arbeitsteilung an ihre Grenzen, da im chemischen Kontext Parameter wie Form, Struktur, Größe und Reinheit der Materialien eine untergeordnete Rolle spielten, während sie für die Festkörperforschung ausschlaggebend waren: „As long as an object can be placed in an experimental context, chemists do not care about the size, form, physical parts, spatial coordinates or the number of its physical parts.“⁶ Um die fachlichen Barrieren zu überwinden, formierten sich überdisziplinäre Forschungsstrukturen aus Physik, Chemie, Metallurgie und dem Ingenieurwesen, in denen Materialien und ihre Hersteller integriert waren.

Die Frage nach dem Wie leitete das Erkenntnisinteresse der vorliegenden Untersuchung. Welche Auswirkungen hatte die neue Rolle der Materialien auf den Wissenschaftsstil und seine

¹ Vgl. Spinner (2001): 319 zur Definition der Informationsgesellschaft und eine Abgrenzung zum erweiterten Begriff der Wissensgesellschaft sowie Steinbicker (2001): 13f für eine umfassende Betrachtung aller Faktoren, die zur Ausbildung der Informationsgesellschaft führten.

² Vgl. Hahn und Soentgen (2011) zur Definition von Substanzen und Dingen.

³ Klein und Spary (2010): 1; siehe auch Hahn und Soentgen (2011): 19; Martin und Mody (2020b): 1.

⁴ Reinhardt (2011): 130.

⁵ Bensaude-Vincent (2011): 103.

⁶ Schummer (1997): 308.

Protagonisten? Gab es regionale Unterschiede? Das Narrativ folgt chronologisch den anwendungstechnischen Errungenschaften, wobei in der Analyse der Ereignisse konsequent die Materialperspektive eingenommen wurde. Der Zeitrahmen reicht von der Entdeckung der Halbleiterphänomene als physikalische Anomalien im 19. Jahrhundert bis zur technologischen Vorherrschaft der Mikroelektronik über einhundert Jahre und wurde in drei Phasen unterteilt. Die Auswertung dieser prägnanten Intervalle erfolgte in zweifacher Hinsicht.

Einerseits wurden die essentiellen Herstellmethoden der Materialproben thematisiert, um den Entwicklungspfad von den basalen Verfahrenstechniken bis zur Erfindung der sogenannten Molekularstrahlepitaxie [engl. *Molecular Beam Epitaxy*; MBE] nachzuzeichnen. Dieses Verfahren markierte Ende der 1960er Jahre einen materialwissenschaftlichen Höhepunkt, da erstmals theoretisch antizipierte, künstliche Halbleiterschichtstrukturen mit atomarer Präzision zugänglich wurden und die Tür zur Nanotechnologie aufstieß.⁷ Zusätzlich verfeinerte die vergleichende Betrachtung von regionalen Unterschieden und Gemeinsamkeiten in den USA und Deutschland das Gesamtbild.

Andererseits stand die Einbindung der Materialforschung als epistemische Entität in das Wissenschaftsgefüge im Mittelpunkt. Um den Wandel der internen und externen Anbindung abzubilden, wurden Materialien als eigenständige Wissenschaftskategorie postuliert und mit den drei Kategorien Theorie, Experiment, Instrument zum sogenannten epistemisch-technischen Quartett ausgebaut. Mithilfe der dualen Vorgehensweise traten die kritischen Erfolgsfaktoren der Halbleiterentwicklung deutlich hervor, die sich kurz in der These „Material macht integral“ zusammenfassen lassen.

1.1 Methodische Quellen und Literatur

Die Kombination der unterschiedlichen methodischen Ansätze bildete sich in der Gewichtung der herangezogenen Quellen und Literatur ab.

Für die chronologische Gliederung der Halbleitergeschichte wurden in erster Linie die fachspezifischen Veröffentlichungen der Meilensteine in wissenschaftlichen Fachzeitschriften sowie die entsprechenden Patente herangezogen. Da die Wiedergabe von generellen Wirkungszusammenhängen und nicht die Herausstellung von Einzelleistungen das Erkenntnisinteresse

⁷ McCray (2007); Orton und Foxon (2015); Foxon (2019); Tyrrell (2020).

bestimmte, wurde die entsprechende Sekundärliteratur genutzt, um die weitreichenden Auswirkungen dieser Errungenschaften abzubilden. Wie und ob darin der Zugang zu Materialproben und deren Spezifikation beschrieben wurde, bestimmte die Blickrichtung der Auswertung.

Als primäre Quelle für wissenschaftliche Informationen wurden Erstpublikationen in Fachzeitschriften, Patente, Monographien⁸ sowie zahlreiche Review-Artikel⁹ genutzt. Die Einbeziehung der „weichen Faktoren“ aus gedruckten Hintergrundinformationen sowie persönliche Erinnerungen der Akteure,¹⁰ Schriften zu Jubiläen und Nachrufe rundeten das Bild ab.¹¹

Zur Wissenschaftstheorie

Die wichtigen Modelle des späten 20. Jahrhunderts bildeten die Grundlage der wissenschaftstheoretischen Betrachtung.¹² Während der Diskurs der Moderne den Dualismus von Theorie und Experiment propagierte,¹³ hatte sich das Spektrum an relevanten Akteuren bereits Ende des 20. Jahrhunderts maßgeblich vergrößert. Ausgehend von dem Experiment als kleinste Einheit wissenschaftlicher Tätigkeit,¹⁴ über die Komplexität von interdisziplinären Kooperationen in der Großforschung¹⁵ bis zu Mikrostudien, die die soziologische Dimension im Laboralltag transparent gemacht haben,¹⁶ reichte nun die Palette der historiographisch-philosophischen Rezeption. Dem Instrumentarium wurde erstmals eine quasi-autonome Rolle bei der Wissensproduktion zugeschrieben, worunter Materialien als Subkategorie fielen.¹⁷

Durch diese Subsummierung gerieten jedoch materialspezifische Faktoren aus dem Blickfeld, so dass für eine umfassende Interpretation der Genese und Funktion von Halbleiterproben im wissenschaftlichen Experiment die Unterscheidung von Instrumenten und Materialien angezeigt war. Während Ian Hacking, Peter Galison und andere Wissenschaftshistoriker mit drei Kategorien arbeiteten, wurde die makroskopische Periodisierung der gesamten Entwicklungslinie auf vier Stränge erweitert. Zusätzlich erlaubte die Einführung des epistemisch-technischen

⁸ Trendelenburg (1975); Queisser (1987); Seitz und Einspruch (1998a); Lojek (2007).

⁹ Pearson und Brattain (1955); vgl. Scheel (2000); Holonyak (2005; 2007); Hillmer (2008); van Dormael (2012); Kroemer (2013); Uecker (2014).

¹⁰ Shockley (1976); Teal (1976a); Welker (1976; 1979); Kroemer (1981); Madelung (1999; 1983); Mullin (2008).

¹¹ Holonyak et al. (1978); Jung (2007).

¹² Hacking (1983); Galison (1988); Rheinberger (2001).

¹³ Popper (1934 [(1971)]; Kuhn [(1962)] (1981); Carnap (1966).

¹⁴ Shapin und Schaffer (1985); Gooding et al. (1989); Hentschel (1997).

¹⁵ Price (1986); Galison (1997); Brocke (2019).

¹⁶ Knorr-Cetina (1984); Latour und Woolgar (1986); Latour (1987).

¹⁷ Hacking (1983); Galison (1997); Hentschel (1997); Rheinberger (2001); Rheinberger (2007); vgl. das Fallbeispiel der Chromatographie von Gerontas (2017).

Quartetts eine repräsentative, wissenschaftstheoretische Momentaufnahme des zeittypischen *Status quo*. Charakteristische Abhängigkeiten zwischen den vier Kategorien wurden mithilfe graphischer Elemente leicht nachvollziehbar und zeichneten sich als interdisziplinäre Kooperationsmuster deutlich ab.¹⁸

Diese übergeordneten Strukturen übertrugen sich auch auf die Wissenschaftsorganisation. Nach der empirisch und explorativ geprägten Entdeckungsphase, die durch Innovatoren geprägt war, entwickelte sich die Materialherstellung nach und nach zu einem Forschungsgebiet auf wissenschaftlicher Augenhöhe. Die Akteure genossen in ihrem fachlichen Umfeld die unbestrittene Wertschätzung der Kollegen, während sie in der öffentlichen Wahrnehmung und historiographischen Reflektion nahezu unsichtbar blieben. Bis zum Einsetzen der neueren Geschichtsschreibung Ende des 20. Jahrhunderts hatten auch Laborassistenten¹⁹ und Instrumentenbauer²⁰ das Schicksal als geschichts- und gesichtslose Randfiguren geteilt.

Eine dezidierte Herausstellung der Leistungen von Instrumentenentwicklern verfolgte der Wissenschaftssoziologe Terry Shinn mit seinem Konzept der sogenannten Forschungstechnologen, das sich als Referenz für die Einordnung der Materialhersteller anbot. Im späten 19. Jahrhundert kristallisierte sich demnach ein Erfindertypus bei der Entwicklung von Mess- und Prüfinstrumenten heraus, der den Fokus auf die Gestaltung der generischen Grundlagen von Instrumenten legte und diesem Ziel die gesamte Karriereplanung unterordnete.²¹ Die Schlüsselmerkmale dieser Wissenschaftler wurden mit dem Wirken der Materialhersteller verglichen, wobei sich Unterschiede und Gemeinsamkeiten abbildeten, die die Akteure als „zweieiige Zwillinge“ auswiesen.

Daher wurde der Begriff der Forschungstechnologen im Kontext dieser Arbeit als Klammerbegriff genutzt, der sowohl die spezifischen Merkmale der Instrumentenerfinder sowie deren materialwissenschaftliches Pendant als gleichwertige Untergruppen umfasst. Zur besseren Nachvollziehbarkeit der prägnanten Unterschiede von instrumentell und materiell arbeitenden Forschungstechnologen wurden die letzteren als „Materialtechnologen“ bezeichnet. Während sich instrumentell ausgerichtete Forschungstechnologen ausschließlich auf die Umsetzung generischer Funktionsprinzipien konzentrieren und hierfür den Wechsel von Arbeitgebern und Institutionen in Kauf nehmen, wirken die Materialtechnologen in einem konstanten Umfeld,

¹⁸ Vgl. zur Verwendung von Mustern als wiederkehrende Merkmale des Zusammenspiels der Wissenschaftskategorien Hentschel (1997): S53f.

¹⁹ Shapin (1989); Hentschel (2008b).

²⁰ Joerges und Shinn (2001b); Hentschel (2012): 113-139.

²¹ Shinn (1993); Joerges und Shinn (2001b); Shinn (2012).

das die notwendigen Voraussetzungen bietet, um zielgerichtet die möglichst passgenauen Proben zur Verfügung zu stellen.

Für die methodische Umsetzung standen zunächst generische, metallurgische Verfahren wie das kontrollierte Schmelzen und Abkühlen oder Aufdampfen zur Verfügung.²² Die Anforderungen an die Steuerung dieser Vorgänge wuchsen mit der Verfeinerung der theoretischen Hypothesen und Materialspezifikationen stetig. In gleichem Maße stieg die Kommunikation zwischen Produzenten und Verwendern sowie die Zahl der beteiligten Akteure. Nach den Erfindern der Frühphase formierten sich überdisziplinäre Teams aus dialogfähigen Experten, die die gesamte Kette von der Grundlagenforschung bis zum Transfer in die industrielle Fertigung abdeckten:

This is not to say that the backgrounds of the personnel involved in formulating the required processes and materials are neatly aligned along strict disciplinary lines. One finds the physicist performing processing work to achieve the properties he desires in a material or structure and the electrical engineer specifying processes to achieve specific objectives in his devices. However, these laboratory expedients may be quite inefficient and the reduction of processes and devices to production scale manufacture must be a cooperative effort involving a broad range of disciplines.²³

Die Integralität der Halbleiterforschung kennzeichnete somit Individuen und Teams gleichermaßen. Um die Verschmelzung der Kompetenzen zu gewährleisten, war eine passgenaue Wissenschaftsorganisation die Voraussetzung, die in erster Linie von den Industrielaboratorien großer Kommunikationskonzerne geleistet werden konnte. Wie entscheidend sich dieser strukturelle Einfluss auf die Durchschlagskraft der wissenschaftlichen Resultate auswirkte, führte der regionale Vergleich der Halbleiterforschung in den USA und in Deutschland vor Augen.

Auf amerikanischer Seite behaupteten die *Bell Telephone Laboratories* [Bell Labs] des amerikanischen Kommunikationskonzerns *AT&T* über Jahrzehnte ihre Position als weltweit führende Forschungseinrichtung.²⁴ Zu den wirkungsmächtigen Entdeckungen der Bell Labs zählen insbesondere der Transistoreffekt Ende der 1940er Jahre sowie im Kontext der vorliegenden Arbeit, die Erfindung der MBE. Als deutsches Pendant zur nationalen Vorreiterrolle

²² Scaff (1970); vgl. Grubel (1967) für eine übersichtliche Darstellung der metallurgischen Prozessschritte in der Halbleiterherstellung sowie Martin und Mody (2020a).

²³ Grubel (1967): 13.

²⁴ Vgl. zur Bedeutung der Organisationsform sowie der Managementstrategie und staatlicher Förderung bei der Industrialisierung der Wissenschaft durch die Mikroelektronik in Halfmann (1984): 60-135; 80; eine technikgeschichtliche Interpretation der Genese der Mikroelektronik in Kirpal (1994).

wurden die Aktivitäten der heutigen *Siemens AG*²⁵ herangezogen. Während bis Mitte des 20. Jahrhunderts substantielle Beiträge zur Halbleitertechnologie durch inkrementelle Innovationen gelangen, die sich auch im wirtschaftlichen Erfolg niederschlugen,²⁶ verpasste das Unternehmen wie die europäische Halbleiterindustrie insgesamt in der Folgezeit den Anschluss an die technologische Entwicklung bei der Genese der Mikroelektronik.²⁷

Als innovative Keimzellen agierten in diesem Umfeld zwei Ausnahmewissenschaftler, die nach dem Zweiten Weltkrieg integral vernetzte Forschungsstätten in ihrem Wirkungsbereich schufen. Der theoretische Physiker Eberhard Spenke (1905–1992)²⁸ baute im oberfränkischen Pretzfeld das Laboratorium der *Siemens-Schuckertwerke* [SSW] auf. Die Bandbreite der maßgeblichen Beiträge reichte von einem Verfahren zur Herstellung von Reinstsilizium bis zu marktbeherrschenden Siliziumleistungsgleichrichtern, die *Siemens* in diesem Anwendungsfeld an die Weltspitze führte.²⁹

Zu den herausragenden Leistungen im Hause *Siemens* gehörten auch die ersten menschen-erdachten Halbleiter,³⁰ deren anwendungstechnisches Potential umgehend zur Einstufung als „Material der Zukunft“ führte³¹ und *Siemens* von der Übermacht der amerikanischen Konkurrenz unabhängig machen sollte.³² Der deutsche theoretische Physiker Heinrich Welker (1912–1981)³³ hatte die Idee der sogenannten III-V-Verbindungshalbleiter bereits Anfang der 1950er Jahre entwickelt.³⁴ Diese künstlichen Halbleiter versprachen den Zugang zu maßgeschneiderten, elektronischen Eigenschaften, die die Anforderungen an Hochfrequenztransistoren erfüllten. Allerdings realisierte sich das Potential der neuen Verbindungsklasse erst in der Folgezeit als Festkörpermateriale für neuartige optoelektronische Bauelemente wie Halbleiterlaser und Leuchtdioden in allen Farben des Lichtspektrums. Mit Spenke und Welker agierten somit zwei

²⁵ Siemens AG (2020).

²⁶ Malerba (1985): 65-68.

²⁷ Vgl. zur Ausgangslage und Situation der europäischen Halbleiterindustrie Tilton (1971): 133 sowie Braun und MacDonald (1978): 148-164. Die Unternehmensstrategien von *Siemens* und *Philips* nach dem Zweiten Weltkrieg behandelte umfänglich Eckert und Osietzki (1989) sowie Erker (1993): 138-160; eine ausgezeichnete Studie zur Adaption der Transistortechnologie und die Auswirkung der Organisation bei Philips in Davids und Verbong (2006): 665-675.

²⁸ Patalong und Weyrich (1993).

²⁹ Spenke (1958b).

³⁰ Vgl. Mody, Cyrus C. M. (2020): 242; 245 zum Wandel der Materialbasis im späten 20. Jahrhundert von der Verwendung von präparierten, bekannten Substanzen oder Synthese unbekannter Materialien hin zu neuen „engineered“ Spezies, deren Eigenschaften vorab antizipiert werden. Modys Fallbeispiel der Fullerene datiert Ende des 20. Jahrhunderts, während Welkers Arbeiten Anfang der 1950er Jahre die von Mody aufgeführten Kriterien der Hypothese und Antizipation der Eigenschaften bereits erfüllen sowie Vorbilder in der Natur als Maßstab nahmen, aber entgegen Modys Fallbeispiel nicht auf einem Zufallsbefund beruhten. Der Sammelband von Joseph Martin und Cyrus Mody erschien nach meiner Dissertation.

³¹ Brodsky (1990): 68; Queisser und Haller (1998): 946; Bassett (2002): 70; Spinardi (2012): 97ff.

³² Eckert und Osietzki (1989): 153-156; Erker (1993): 272f.

³³ Deutsche Biographie. Deutsche Biographie: Welker, Heinrich.

³⁴ Welker (1952); Welker (1953) sowie Eckert und Schubert (1986); Handel (1999).

international anerkannte Forscher, die sich als Referenz zum Abgleich mit dem Rollenmodell der instrumentell ausgerichteten Forschungstechnologen anboten, um die „feinen“ Unterschiede zwischen beiden Typen herauszuarbeiten.

Molekularstrahlepitaxie

Die theoretisch prognostizierten Materialeigenschaften der neuen Verbindungsklasse überstiegen die realisierte Performanz bei weitem. Die Übertragung der Herstellverfahren und Spezifikationen der klassischen Elementhalbleiter reichten nicht aus, um die III-V Verbindungshalbleiter als materiale Alternative zu etablieren. Zudem steigerten sich die Anforderungen an die Materialqualität, da theoretische Arbeiten die Konzeption von komplexen Schichtstrukturen in atomarer Dimension anregten, die das Tor zur Nanotechnologie aufstießen. Zur Umsetzung dieser vorab festgelegten Baupläne musste das Zufallsprinzip bei der Materialherstellung entscheidend reduziert werden. Die größte Herausforderung stellten die sogenannten Übergitter dar, in denen aufgrund der Schichtung von unterschiedlichen Materialzusammensetzungen quantenmechanische Tunneleffekte auftraten.³⁵ Um diesen Aufbau verlässlich herzustellen, war eine unmittelbare Überwachung und Steuerung des Kristallwachstums notwendig.

Dieses Ziel erreichte im Jahr 1968 der in China geborene amerikanische Elektroingenieur Arthur Y. Cho (*1937)³⁶ bei den Bell Labs.³⁷ In Zusammenarbeit mit der Instrumentenindustrie kreierte er die erste Molekularstrahlepitaxie-Anlage als hausgemachten Prototyp. Mit diesem Verfahren war es möglich geworden, den Schichtaufbau während des Wachstums von unten nach oben mit atomarer Präzision durchzuführen. Bei der Realisierung der High-Tech Anlage profitierte Cho von dem kumulativ angehäuften Fundus an Wissen, Apparaten und erfahrenen Mitarbeitern, die bei den Bell Labs zur Verfügung standen.³⁸ Übergitter wurden zur Benchmark der Leistungsfähigkeit der MBE und motivierten die Wissenschaftsgemeinde, sich mit der aufwändigen Technologie zu beschäftigen.

So auch in Deutschland. Im Gegensatz zu Cho verfügten die nationalen MBE-Pioniere nicht über den Anschluss an ein integral aufgestelltes und auf innovative Verfahren ausgerichtetes Unternehmen. Ökonomisch tragfähige und Inhouse-Technologien dominierten die Unternehmenspolitik. Zum Ausdruck der „Wasch mir den Pelz, aber mach mich nicht nass“ Attitüde stieg *Siemens* zwar in die neuen Technologien ein, platzierte sie aber in den konkurrierenden

³⁵ Esaki und Tsu (1970); Tsu und Esaki (1973) sowie Alferov (1998): 5.

³⁶ Bell (1994): 71.

³⁷ Arthur (1968); Cho (1969); Cho (1971); vgl. McCray (2007); Tyrrell (2020).

³⁸ Vgl. Holbrook (1997): 75f.

Abteilungen der etablierten Cashcow-Produkte, wodurch deren Durchschlagskraft entscheidend geschwächt wurde.³⁹ Somit fehlte bei der Einführung der MBE ein vergleichbarer, großindustrieller Spiritus Rector. Zusätzlich behinderten wissenschaftspolitische und regionale Interessen eine zügige und konsequente Umsetzung.

Die Unstimmigkeiten äußerten sich bereits in der langwierigen Gründungsgeschichte des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung [MPI FKF], das schließlich im Jahr 1969 in Stuttgart-Büsnau angesiedelt wurde.⁴⁰ Das Institut war als einer von drei MBE-Standorten auserkoren und auf die Grundlagenforschung mit III-V Verbindungshalbleitern ausgerichtet. Bei *AEG Telefunken* wurde die siliziumbasierte MBE verfolgt, während sich das *Fernmeldetechnische Zentralamt* [FTZ] in Darmstadt als Forschungseinrichtung der *Deutschen Bundespost* stärker auf die anwendungstechnischen Aspekte konzentrierte. Trotz zahlreicher Projekttreffen und beachteter Erfolge der einzelnen Gruppen fehlte eine produktive, gemeinsame Plattform. Die Folgen der Zergliederung wurden in der Publikationspraxis sichtbar.

Für eine ausführliche Analyse der Aktivitäten in Deutschland bot sich die Projektgruppe „Molekularstrahlepitaxie“ am MPI FKF an, die von dem deutschen Chemiker Klaus Ploog (*1941)⁴¹ ab 1969 aufgebaut und äußerst erfolgreich geleitet wurde.⁴² Ploogs Rolle bei der Entstehung einer weltumspannenden MBE-Community verdeutlichte den Einfluss einer übergeordneten und überdisziplinären Langfriststrategie bei der Evolution der Halbleitertechnologie.

Oral History

Das wesentliche, methodische Element bei der Verwendung von subjektiven Reflektionen waren jedoch Oral History Interviews mit Zeitzeugen. Entweder wurde auf archivierte Interviews zurückgegriffen, oder ein Gespräch selbst durchgeführt. Bereits bei der Klärung der Transistorgenese im Jahr 1949 und somit ein Jahr nach der ersten Publikation⁴³ wurde dieses Mittel der Dokumentation genutzt. Aber auch weniger prominente Ereignisse wurden berücksichtigt, wodurch eine umfangreiche und differenzierte Interpretation erfolgte. Diese Vielfalt gekoppelt mit der „objektiven“ Darstellung in wissenschaftlichen Berichten wirkten der Ungenauigkeit von vage geworden und sortierten Erinnerungen entgegen:

³⁹ Vgl. Erker (1993): 274 zur Positionierung von Röhren- und Transistortechnologie in einer Abteilung sowie Diblitz: Interview am 21.08.2014 mit Fischer, Albrecht: 16 zur Vergemeinschaftung von Flüssigphasenepitaxie und MBE.

⁴⁰ Eckert und Osietzki (1989): 181-199; vgl. Wengenmayr (2012); Schröder und Wengenmayr (2019a): 15-53.

⁴¹ Jung (2007): 19.

⁴² Jung (2007); Schröder und Wengenmayr (2019b): 98f.

⁴³ Bardeen und Brattain (1948).

The interviews showed that memory was beginning to get hazy in a few respects but discussion and time cleared it up. To counterbalance any such effect it is thought that the account has benefited from the better perspective due to the passage of time. Taking everything into account, including the fact that all of the pertinent documents were at hand for study, I think we may reasonably regard this account of the genesis of the transistor as definitive.⁴⁴

Dass dieses komplementäre Duo einen differenzierten Blick auf die Geschichte erlaubt, fand in der Geschichtsschreibung großen Widerhall, so dass der Ausschließlichkeitsanspruch von geschriebenen Quellen zunehmend von Historikern angezweifelt wurde.⁴⁵ Dennoch ist beim Einsatz von Experteninterviews in der zeitgenössischen Geschichtsschreibung das Bewusstsein für die inhärente Problematik dieser Methode unumgänglich: „Memory is not history, but it is certainly not the *opposite* of history.“⁴⁶

Neben der nivellierenden Funktion der Erinnerung der Akteure und dem unterschiedlich ausgeprägten Maß an Selbstdarstellung, kommt dem Erziehungshintergrund des Gesprächsführenden eine besondere Bedeutung zu, da „der Historiker [...] an der Entstehung seiner Quellen aktiv beteiligt ist und diese auf verschiedenste Art und Weise direkt beeinflusst.“⁴⁷ Ein enger fachlicher Bezug zum Thema kann zu einem Dilemma führen, wie die amerikanische Physikerin und Wissenschaftshistorikerin Lillian Hoddeson (*1940)⁴⁸ verdeutlichte, die eine führende Rolle in der historiographischen Aufarbeitung der Festkörperphysik und den damit verbundenen Institutionen wie den Bell Labs einnahm.⁴⁹ Den Konflikt einer zu engen, fachlichen Nähe zur eigenen Forschung und ihren Einfluß auf den Gesprächsverlauf thematisierte Hoddeson am Beispiel des renommierten theoretischen Physikers, Wissenschaftsphilosophen und Historikers Thomas S. Kuhn (1922-1996):⁵⁰ „they could not put aside their own programs and focus on what their interviewees were in the best position to tell them.“⁵¹

Andererseits war es gerade Kuhns interdisziplinäre Expertise, die ihn zur Galionsfigur des 1960 initiierten Projekts der *History of Quantum Physics* machte. Für die Dauer des Vorhabens

⁴⁴ Gorton (1998): 52.

⁴⁵ Weiner (1988): 548f; vgl. zur Vorgehensweise im Interview von Physikern in DeVorkin (1990); Doel (2003): 350.

⁴⁶ Doel (2003): 350; siehe auch Hoddeson (2006); Liebold und Trinczek (2009); Meuser und Nagel (2009).

⁴⁷ Geppert (1994): 310.

⁴⁸ Hoddeson (1992): 670f.

⁴⁹ Hoddeson (2001).

⁵⁰ The Editors of Encyclopaedia Britannica (2019c); siehe auch eine Kurzbiographie in Hoyningen-Huene (1997): 235-242.

⁵¹ Hoddeson (2006): 199.

von drei Jahren wurde er zum Direktor berufen, um „alle verfügbaren Quellen zu der Entwicklung und den Anfängen der Quantenphysik zu sammeln“.⁵² Methodisch wegweisend wurde die Sammlung von 175 Interviews mit 95 Akteuren, die zwischen Februar 1962 und Mai 1964 entstanden.⁵³ Das Ziel war, die Schilderungen der Zeitzeugen zu dokumentieren, um Wirkungszusammenhänge bei der Entstehung wissenschaftlicher Fakten zu erschließen und als originäre Quellen für die künftige Geschichtsschreibung zur Verfügung zu stellen.⁵⁴

Eine weitere Gefahr, die durch die fachliche Prägung der Historiker in der Interpretation historischer Geschehnisse bestand, war die Nichtbeachtung von weichen Faktoren wie die interne Weichenstellung der Forschung oder der ungenügenden Würdigung von Ingenieuren und weiteren „Hilfsdisziplinen“:

What did they have to say then about how we people who built "things" come across, in the process of building, fundamental effects that then elucidate some of these areas which they then claim are nice, esoteric, pure physics? See, Lillian [Hoddeson] has a habit of writing a lot of stuff like that. [...] See, in other words, they're writing partly for themselves, and they are partly flying the flag to justify their existence. [...] A lot of the history that "physikers" are claiming as their history is not their history. It comes from engineers and IEEE people and sources like that⁵⁵

Diese Lücke wurde im Hinblick auf die ingenieurtechnischen Leistungen durch die amerikanische Dachorganisation *Institute of Electrical and Electronics Engineers* [IEEE] geschlossen. Das *Center for the History of Electrical Engineering*,⁵⁶ das in das *Engineering and Technology History Wiki* eingegliedert wurde, legt den Fokus auf die verschiedenen Ingenieurdisziplinen. Die mündlich erzählten Geschichten von Physikern werden von dem amerikanischen Fachverband *American Institute of Physics* [AIP] in der *Niels Bohr Library & Archives* gepflegt und zur historiographischen Verwertung als Audioaufnahme und Transkript bereitgestellt.⁵⁷ In der Kuhn'schen Sektion *History of Quantum Physics oral history collection* sind vornehmlich die Erinnerungen von Physikern dokumentiert. Während der Großteil der Interviews mit amerikanischen Wissenschaftlern geführt wurden, befinden sich Aussagen deutscher Theoretiker darunter und unterstreichen ihre Vorherrschaft auf diesem Gebiet vor dem Zweiten Weltkrieg.⁵⁸

⁵² te Heesen (2018): 8.

⁵³ Kuhn et al. (1967): 3; Wheeler (1967): viii; Kuhn steuerte allein über 100 Interviews bei siehe Doel (2003): 357.

⁵⁴ te Heesen (2018): 9.

⁵⁵ Nebeker: Interview am 22.06.1993 mit Holonyak, Nick: 8.

⁵⁶ Center for the History of Electrical Engineering; Weiner (1988): 556.

⁵⁷ Niels Bohr Library & Archives; Weiner (1988): 553; vgl. zur Geschichte, Struktur und Ziele des AIP in Weart (1990).

⁵⁸ Heilbron (1968); Hoch (1992); Hoddeson et al. (1992); Doel (2003): 349; van Dormael (2012): xii.

Außer dem Rückgriff auf archivierte Transkriptionen von Oral History Interviews, wurden von der Autorin Interviews mit zeitgenössischen Akteuren der Molekularstrahlepitaxie bei den Bell Labs und in Deutschland durchgeführt. Der Schwerpunkt lag hierbei auf der Rolle des MPI FKF in Stuttgart, wobei das organisatorische Umfeld neben den wissenschaftlich-technischen Ereignissen ebenfalls berücksichtigt wurde. Um die Subjektivität der Aussagen aus- und abzugleichen, wurde ein breites Spektrum von Gesprächspartnern befragt. Unter diesen Personenkreis fielen externe Wissenschaftler aus Industrie und Forschung sowie Mitarbeiter am MPI FKF, die nicht direkt mit der MBE Projektgruppe zusammenarbeiteten, aber in Beziehung zu dem MBE-Team standen. Deren Reflektion lieferte Einsichten über die Atmosphäre am Institut und erweiterte den Horizont der Studie. Bei diesen Gesprächen war die Priorisierung der Themen flexibel und folgte im Wesentlichen dem Gesprächsverlauf. Aus der teilweise passiven Strategie der Interviewerin resultierten An- und Einsichten aus unterschiedlichen Themenfeldern.

Die übergeordnete Fragestrategie beruhte auf zwei Säulen. Am Beginn stand die Definition einer gemeinsamen Gesprächsebene, die aufgrund des wissenschaftlich anspruchsvollen Fachgebiets für das gegenseitige Verständnis notwendig war. Als gemeinsamer Nenner wurde ein für beide Seiten passendes Vokabular als Kommunikationsebene gefunden, ohne in einen fachspezifischen Diskurs zu verfallen. Der zwanglose Gesprächsverlauf bot die Gelegenheit, über die teils hochspezialisierten Fragestellungen eingehend zu sprechen und Randthemen ebenso einzubinden. Das Ziel war die transparente Interaktion zwischen dem Experten einerseits und dem historisch interessierten „Quasi-Experten“⁵⁹ andererseits.

In der Gesprächsvorbereitung dienten die wissenschaftlichen Erfolge des Interviewpartners als Leitfaden, die anhand der meistzitierten Veröffentlichungen identifiziert wurden. Als Kriterium diente die Zitationshäufigkeit, die bei der Autorensuche in der Datenbank *Web of Science*TM [WoS]⁶⁰ ausgewiesen wurden. Ausdrucke der Ergebnislisten lagen während des Interviews vor und dienten bei Bedarf als Referenz. So ließen sich Erinnerungslücken durch die Erwähnung bestimmter Stichworte schließen.⁶¹ Mit der Nutzung der vertrauten Termini verschwand zudem die anfängliche Befangenheit, die das Aufnahmegerät zunächst erzeugte. Die Gesprächsdauer bewegte sich zwischen 45 Minuten bis zu mehreren Stunden.

⁵⁹ Pfadenhauer (2009): 81.

⁶⁰ Clarivate Analytics (2020); für eine kurze Beschreibung der Informationsplattform siehe Stock und Stock (2003): 34ff.

⁶¹ Pfadenhauer (2009): 188.

Allgemeine Leitfragen standen am Beginn der Interviews, die in ähnlicher Form mehreren Personen gestellt wurden, um eine Vergleichbarkeit der Aussagen zu erreichen. Die chronologische Abfolge der wissenschaftlichen Ankerpunkte bestimmte nicht ausschließlich die Strukturierung des Interviews. Wenn sich die Thematik von dem ursprünglich avisierten Verlauf hin zu Randgebieten bewegte, wurde der Fragenkatalog spontan erweitert und das Gespräch ergebnisoffen weitergeführt. Auch private Belange kamen zur Sprache und wurden nur dann verwendet, sofern sie „in die für das Expertenhandeln primären funktionsbezogenen Relevanzen einfließen.“⁶² Diese Form der konzeptionellen und methodischen Herangehensweise wurde in der Sozialforschung entwickelt und ist „eines der am häufigsten eingesetzten Verfahren“.⁶³

Da die Interviews nicht anonymisiert wurden und an der *Universität Stuttgart* für die wissenschaftliche Verwendung archiviert werden, war die schriftliche Freigabe des Transkripts erforderlich. Aus diesem Grund bestand von Seiten des Interviewers keine Einschränkung hinsichtlich der Editierung, Korrektur und Ergänzung der sprachlich leicht geglätteten Rohfassung der Transkription durch die Gesprächspartner. Für die Vervollständigung und Präzisierung der fachlichen Informationen war diese Einflussnahme ausdrücklich gewünscht. Einige Wissenschaftler haben sehr ausführliche Zusätze im Stil einer wissenschaftlichen Publikation in das Transkript eingefügt. Da es sich in erster Linie um ergänzende Fakten handelte, blieb die ursprüngliche Intention der Aussage bestehen. Gleichzeitig wiesen Korrekturen oder Streichungen bestimmter Passagen auf ein erwartetes Konfliktpotential hin und lieferten so indirekt weitere Einsichten.

In einigen Fällen wurde auf eine Volltranskription verzichtet. Das tief verwurzelte Misstrauen, ob der eindeutige Transfer von gesprochenem Wort in die verschriftlichte Form möglich ist, kam teilweise erst nach Erhalt der Transkription bei den Befragten zutage und resultierte in Vorbehalten gegen die Verwertung der Interviews, wie die folgende Aussage repräsentativ zusammenfasste:

Ich finde das, was Sie machen wichtig und ich möchte auch ehrliche Antworten geben. Aber eigentlich hatte ich mir geschworen, keine Interviews mehr zu geben. Wissen Sie, da kommen Leute und ich erzähle und erzähle und am Ende wird irgendwas veröffentlicht, was mir gar nicht entspricht. Das muss ich dann wieder richtigstellen.⁶⁴

⁶² Meuser und Nagel (2009): 469.

⁶³ Meuser und Nagel (2009): 465.

⁶⁴ Brinkel (2008): 527.

Als Konsequenz wurden einige Aufzeichnungen nicht freigegeben. Auch wenn diese Interviews nicht direkt in die Arbeit einfließen, waren sie zur Evaluierung von Übereinstimmungen oder Diskrepanzen der Narrative relevant und stützten indirekt die Schlussfolgerungen. Gleichzeitig wurde offensichtlich, wie sensibel die Wissenschaftler auch nach dem Ausscheiden aus dem regulären Berufsleben auf die externe Darstellung ihres Wirkens reagierten. Die Auswahl der relevanten Passagen folgte der Regel: „Das Transkript muss – jenseits des schieren Textes – all die Informationen umfassen, die bei der Interpretation genutzt werden.“⁶⁵ Aus diesem Grund wurden parasprachliche Ereignisse nur dann wiedergegeben, wenn sie einen Mehrwert für die Interpretation darstellten.

In Ergänzung und als Abgleich zu den Aussagen in den Interviews standen Videoaufzeichnungen von Präsentationen zur Verfügung, die im Rahmen der *18th International Conference on Molecular Beam Epitaxy* im Jahr 2014 in Flagstaff, Arizona gehalten wurden.⁶⁶ Sie sind auf der Internetplattform *YouTube* veröffentlicht. Unter dem Motto „*Meeting with the MBE Pioneers*“ haben die federführenden Erfinder und Gestalter der MBE ihre Beiträge im Erfindungs- und Entwicklungsprozess geschildert. Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Aussagen stammten aus den Vortragsfolien, die von den Autoren zur Verfügung gestellt wurden.⁶⁷ Die partielle Transkription der Referate ermöglichte die Verwendung von wörtlichen Zitaten, die mit Zeitangabe und Dauer der Aussage ausgewiesen werden.

Bibliometrische Statistik

Als Gegengewicht zur individuellen Wahrnehmung der Entstehung und Optimierung der MBE diente die statistische Auswertung der wissenschaftlichen Publikationen im relevanten Zeitraum. Hierbei ergänzten sich die systemgestützte Analyse in der interdisziplinären Wissenschaftsdatenbank *Web of Science* und die Identifikation der Akteure und Forschungsschwerpunkte der ersten Stunde auf Basis der Monographie „*Molecular Beam Epitaxy of III-V Compounds. A comprehensive bibliography 1958-1983*“, ⁶⁸ die Klaus Ploog gemeinsam mit der informationstechnischen Unterstützung von Klaus Graf verfasste.

Mithilfe der Recherche und Analyse im WoS ließen sich makroskopisch das quantitative Publikationsverhalten sowie die bevorzugten Zeitschriften der Forscher ermitteln. Die systemtechnischen Einschränkungen, die das Fehlen von eindeutigen Termini in der Frühphase der

⁶⁵ Liebold und Trinczek (2009): 41.

⁶⁶ Brown und Ptak (2015): 1.

⁶⁷ Fischer (07.09. 2014); Ploog (07.09. 2014).

⁶⁸ Ploog und Graf (1984).

Entwicklung mit sich brachte, wurden durch die Auswahl von Ploog beseitigt. Er berücksichtigte alle Artikel, die nach seiner Einschätzung mit der Entstehung der MBE und III-V-Verbindungshalbleitern bis 1983 in irgendeiner Weise verknüpft waren. Zu diesem Zeitpunkt hatte sich MBE schon drei Jahre lang weltweit verbreitet. Um diesen Wissenschaftlern eine umfassende Bibliographie der wichtigen Literatur an die Hand zu geben, indizierte er die Auflistung der Forschungsstränge nach verschiedenen Kriterien:

Over the past three years the technology of molecular beam epitaxy has spread rapidly to most major research and development laboratories throughout the world [...] The comprehensive bibliography on this dramatically expanding topic helps chemists, engineers, materials scientists, and physicists working in semiconductor research and development areas to sort out the important literature of their particular interest.⁶⁹

Die Publikationen wurden pro Jahr in insgesamt elf Kategorien eingeteilt und theoretische Beiträge von den anderen Themen differenziert. Da sich ab 1981 die Gesamtzahl exponentiell steigerte, war die Grenze der quantitativen und qualitativen Erfassung auf diesem Weg erreicht. Die Kombination aus Fachwissen und aktiver Teilnahme an der MBE Community machte die Studie zu einer zentralen Quelle, um die weltweite Diffusion und Etablierung der MBE als Forschungstechnologie darzustellen.

Eine Momentaufnahme der deutschen MBE-Gemeinde erstellte der Physiker und MBE-Pionier Günter Weimann (*1940)⁷⁰ Anfang der 1990er Jahre.⁷¹ Dabei nutzte er die Zitationshäufigkeit im WoS, um die MBE-Aktivitäten in Deutschland insgesamt und das Maß der Kooperationen zwischen den Akteuren darzustellen. Der verwendete Zeitrahmen reichte von 1969 als Startpunkt und bis ins Jahr 1983, um eine Referenz zu Ploogs Auswertung herzustellen. Dementsprechend resultierte bei jüngeren Forschern eine geringere Anzahl von berücksichtigten Veröffentlichungen.

Überrestquellen wie persönliche Aufzeichnungen oder Labortagebücher standen in der Regel nicht zur Verfügung. Nach Aussage der Befragten wurden diese Quellen weder privat noch am Institut systematisch archiviert. Für die Akteure war die Aufbewahrung von Artefakten nicht erforderlich, da für sie die Dokumentation in den wissenschaftlichen Publikationen die Quintessenz ihres Wirkens repräsentierte. So bildeten auch für diesen Teil der Untersuchung

⁶⁹ Ploog und Graf (1984): Preface.

⁷⁰ Dibilitz: Interview am 05.09.2017 mit Weimann, Günter: 2.

⁷¹ Weimann (1992).

Artikel in Fachzeitschriften, Review-Artikel⁷² sowie Monographien,⁷³ Sammelbände⁷⁴ und die Veröffentlichung von Vorträgen bei Kongressen die überwiegende Quellenbasis.

Sekundärliteratur

Während die Akteure ihre Errungenschaften in umfassenden Fachdokumentationen zeitnah niederschrieben,⁷⁵ hinkte die historiographische Aufarbeitung hinterher. Das Interesse der Historiker an der Halbleitertechnologie setzte erst Ende des 20. Jahrhunderts in nennenswertem Umfang ein.⁷⁶ Neben biographisch ausgerichteten Monographien, die sich mit den prominenten Vertretern der Mikroelektronik⁷⁷ beschäftigten, wurde die Entwicklungslinie über einen größeren Zeitraum nur vereinzelt behandelt.⁷⁸ Hervorzuheben sind die Arbeiten unter Beteiligung von Lillian Hoddeson und Michael Riordan, die in großem Umfang Oral History Interviews durchführten und grundlegende, fachbezogene Publikationen und Monographien zur Entwicklungsgeschichte der Halbleitertechnologie verfassten⁷⁹ sowie die Bedeutung der Forschungsorganisation der Bell Labs in die Analyse einbezogen.⁸⁰ Beide Autoren waren maßgeblich an der Anthologie „*Out of the crystal maze*“ aus dem Jahr 1992 beteiligt, die zu einem Standardwerk avancierte.⁸¹ Insgesamt dreizehn Historiker mit physikalischem Hintergrund erarbeiteten einen umfassenden wissenschaftshistorischen Überblick der Halbleitergeschichte von den Wurzeln in der klassischen Physik bis zur Etablierung der Festkörperforschung als wissenschaftliche Gemeinschaft.

Der regionale Fokus lag überwiegend auf dem englischen und amerikanischen Sprachraum, doch es kamen auch die Experten des *Deutschen Museums* in München Michael Eckert und Jürgen Teichmann zu Wort. Ihr Forschungsschwerpunkt behandelte die Geschehnisse vor dem Zweiten Weltkrieg, wobei sich Eckert der Evolution der theoretischen Physik in Deutschland

⁷² Ploog (1980); Joyce (1981); Cho (1995); Cho (1999); Arthur (2002); Foxon (2002); Cho (2004).

⁷³ Herman und Sitter (1989); Orton und Foxon (2015).

⁷⁴ Matthews (1975); Parker (1985); Farrow (1995); Foxon (2019).

⁷⁵ Korn (1916); Ries (1918); (2016); Ries (1918).

⁷⁶ Hittinger (1973): 48; Isaacson (2018): 15.

⁷⁷ Johnson (1969); Goldstein (1993); Riordan et al. (1997); Handel (1999); Josephson (2010).

⁷⁸ Zur Frühphase der Halbleiter mit dem Schwerpunkt Selen siehe Hempstead (1977); Hess (2019); die Entwicklung der Halbleitertechnologie wurde umfassend behandelt in Braun und MacDonald (1978); Goldstein und Aspray (1997); Bassett (2002); Lécuyer (2006).

⁷⁹ Hoddeson (1980); Hoddeson (1981); Hoddeson (1992): 670ff; Hoddeson (1994); Riordan et al. (1997); Riordan und Hoddeson (1997b).

⁸⁰ Riordan und Hoddeson (1998a); weitere Literatur zur Rolle der Bell Labs siehe Agar (2000); Gertner (2012).

⁸¹ Hoddeson (1992); vgl. die Forderung nach einer Erweiterung dieser Anthologie durch Martin und Janssen (2015): 632f, die ebenfalls das Fehlen einer umfassenden historischen Aufarbeitung der Festkörperphysik und mangelndes Interesse diagnostizierten.

widmete.⁸² Die Expertise von Teichmann erstreckte sich auf die frühe Festkörperforschung an der Universität Göttingen an dem Beispiel der Farbzentren in Salzkristallen.⁸³

Den materialbezogenen Beitrag für diesen Sammelband⁸⁴ lieferte der in der Tschechoslowakei geborene Physiker Ern(e)st Braun. Er hatte bereits im Jahr 1978 in Kooperation mit Stuart McDonald eine grundlegende Untersuchung der Genese der Halbleiterindustrie und ihrer industriellen Verbreitung mit dem frei übersetzten Titel „Revolution im Miniaturformat“ vorgelegt.⁸⁵ An der fundamentalen Bedeutung von Materialien für diesen Prozess bestand für Braun kein Zweifel. Die Geschwindigkeit der Umsetzung und Kommerzialisierung von Halbleiterbauelementen hing direkt vom Zugang zu geeigneten Materialien ab: „The entire semiconductor industry is wholly dependent on the quality of its raw materials, and the history of semiconductor device development runs closely in parallel with material development.“⁸⁶

Die Rezeption orientierte sich jedoch weiterhin an den Anwendungen. Insbesondere die langfristige technologische und ökonomische Bedeutung des Transistors als elementarer Baustein der Informationstechnologie prägte die Thematik der Studien,⁸⁷ die durch die Vielzahl an verbalen und schriftlichen Äußerungen prominenter Akteure unterstützt wurde.⁸⁸

Der Hinweis auf die Einseitigkeit der bisherigen, historiographischen Aufarbeitung von Christophe Lécuyer verhallte ebenso wie seine Forderung nach einer „materialzentrierten“ Darstellung der Mikroelektronik.⁸⁹

Eine Sonderrolle unter den Halbleitern nahm die Selen-Forschung ein. Die lichtelektrischen Eigenschaften regten zu Beginn des 19. Jahrhunderts die Phantasie der Akteure nachhaltig an. Zum einen versprach die Vision einer Selenzelle die Energieerzeugung mit Sonnenlicht ohne den Einsatz fossiler Brennstoffe.⁹⁰ Zum anderen faszinierte das Element als künstliches Auge, das auf verschiedene Lichtstärken umgehend reagierte und eine erste Form des „elektrischen Sehens“⁹¹ vorstellbar machte. Durch die Option der Bildtelegraphie erschien das Medium des

⁸² Eckert und Schubert (1986); Hoddeson et al. (1992): 88-181; Eckert et al. (1992): 3-87; Eckert (1993); Eckert (2013).

⁸³ Teichmann (1988); Teichmann (1995).

⁸⁴ Braun (1992): 443-488.

⁸⁵ Braun und MacDonald (1978); vgl. den Review-Artikel von Brittain (1978) zum zweitgeteilten Aufbau des Werkes aus wissenschaftsgeschichtlicher Reflektion der Frühphase und technologischer Wirkungsgeschichte nach der Erfindung des Transistors.

⁸⁶ Braun (1992): 478.

⁸⁷ Vgl. Gibbons und Johnson (1982); Misa (1987); Bassett (2002); Collet (2003); Lécuyer (2006); Choi (2007b); Lécuyer und Brock (2010).

⁸⁸ Siehe die Beispiele von Hoddeson (1981); Holonyak (1992); Riordan et al. (1997); Moll (1997); Bardeen und Brattain (1998); Ross (1998); Riordan et al. (1999).

⁸⁹ Lécuyer und Brock (2006): 302; vgl. Lécuyer und Brock (2009); Lécuyer und Ueyama (2013). Die gleiche Forderung nach mehr Aufmerksamkeit für die Rolle von Materialien in Mody, Cyrus C. M. (2017): 218.

⁹⁰ Siemens (1885): 516; vgl. Ries (1918): 7.

⁹¹ Ries (1918): 10.

Fernsehens erstmals in eine realisierbare Reichweite zu kommen.⁹² Darüber hinaus wurde mit Selen ein verbessertes Photometer realisiert, das als optoelektronisches Instrument zu einem ersten kommerziellen Produkt führte.⁹³ Eine dezidierte Studie zu den frühen Halbleitern mit Selen als Schwerpunkt entstand bereits Ende der 1970er Jahre.⁹⁴ In der zeitgenössischen Historiographie wurde die aktive Rolle des Materials bei der Generierung von Wissen betont und dessen Funktion wissenschaftstheoretisch analysiert und interpretiert.⁹⁵

Nicht nur die Materialien wurden häufig übergangen, sondern auch vergleichbare Errungenschaften während der Transistor-Ära in anderen Ländern als den USA gerieten ins Hintertreffen. Zum Opfer dieser Praxis wurde die deutsche Halbleiterforschung nach dem Zweiten Weltkrieg, die erst Anfang der 2000er Jahren ein dezidiertes Sprachrohr fand, das ihre Leistungen in das historische Bewusstsein brachte.⁹⁶

Den maßgeblichen Beitrag zur Aufarbeitung der deutschen Halbleiteraktivitäten leistete der Physiker und Wissenschaftshistoriker Kai Handel mit seiner herausragenden Monographie über die „Anfänge der Halbleiterforschung- und -entwicklung, dargestellt an den Biographien der vier deutschen Halbleiterpioniere“.⁹⁷ In den Betrachtungszeitraum von 1940-1950 fielen die wesentlichen Entdeckungen und strukturellen Umbrüche, die zur Ablösung der europäischen Führungsrolle beitrugen. Unter den Portraitierten befanden sich Heinrich Welker und Eberhard Spenke, die insbesondere als Gestalter der Industrieforschung bei *Siemens* über Deutschland hinaus Wirkung entfalteten. Hervorzuheben sind auch die Publikationen von Reinhold Serchinger, der sich mit den langgedienten Siemensianern Spenke und Schottky (1886-1976)⁹⁸ beschäftigte.⁹⁹ Ansonsten wurden vor allem internalistisch geprägte Studien einbezogen.¹⁰⁰

Das Historische Archiv der *Infineon Technologies AG* [Infineon] in München stellte wertvolle Quellen zur Verfügung. Mit einer Mischung aus wissenschaftlichen Fakten und persönlichen Erinnerungen in den Jubiläumsschriften anlässlich des Geburtstags von Spenke, hatten er selbst und seine Mitarbeiter aussagekräftige Zeitdokumente der deutschen Industrieforschung

⁹² Vgl. die ausgezeichneten Darstellungen der Bedeutung Selens in der geschichtlichen Entwicklung des Fernsehens und ihre Interpretation in Hess (2019): 75-125; Hug (2020): 124-187.

⁹³ Siemens (1891).

⁹⁴ Hempstead (1977).

⁹⁵ Vgl. die Monographien von Hess (2019); Hug (2020).

⁹⁶ Vgl. Handel (1999): 122-126; Markoff (2003); Riordan (2004); van Dormael (2009); van Dormael (2012): xiii.

⁹⁷ Handel (1999); siehe auch Handel (2002) zur Radarforschung im Zweiten Weltkrieg.

⁹⁸ Mathis (2007): 501f; vgl. die biographischen Beiträge in Schubert (1986), (1986); Madelung (1999); Serchinger (2008).

⁹⁹ Serchinger (2000); Serchinger (2008).

¹⁰⁰ Madelung (1983); Pfisterer (1987): 35-38; Erker (1993); Berkner (2008); Lischka (2008); van Dormael (2010); Berkner (2012).

nach dem Zweiten Weltkrieg geschaffen.¹⁰¹ Insbesondere die einhundertfünfzigseitige Laudatio eines Autorenkollektivs aus dem Jahr 1965 schuf ein lebendiges Bild von Spenkes Wirken, in dem die Synergieeffekte der überdisziplinären Expertise des Teams und die integrative Persönlichkeit Spenkes schriftlich und bildlich zum Ausdruck gebracht wurde.¹⁰²

Molekularstrahlepitaxie

Erst mit dem Einsetzen der Nanotechnologie nach der Jahrtausendwende rückte die Bedeutung der Materialien in das Bewusstsein der Historiographie.¹⁰³ In den 1970er Jahren bezeichnete man diesen Maßstab noch als Submikron,¹⁰⁴ doch das zugkräftige Schlagwort steigerte das Interesse. Die lange Zeit des Wartens auf Anerkennung beklagte Herbert Kroemer (*1928)¹⁰⁵ im Jahr 2005:

few people realize that some of us have been practicing nano-technology for over 30 years – we just didn't call it nano-technology. By 1974 we saw the first papers on actual experimental devices demonstrating quantum effects, grown by the new molecular beam epitaxy (MBE) technology. Involving quantization effects, this work was NT per definitionem.¹⁰⁶

Die Situation änderte sich, als zwei Nobelpreise für Physik, an denen MBE-Materialien beteiligt waren, für einen nachhaltigen Impuls sorgten. Die Ehrungen ergingen zwar ausschließlich an die experimentellen und theoretischen Physiker, aber die Preisträger machten auf die Schlüsselrolle der Materialhersteller aufmerksam. In der Nobelpreisrede zur Entdeckung des fraktionierten Quanten-Hall-Effekts¹⁰⁷ im Jahr 1998 bezeichnete sie der Physiker Horst Störmer (*1949)¹⁰⁸ als die „wahren Helden“: „As to our own contributions, the creators of materials remain the true heroes of the trade“.¹⁰⁹

¹⁰¹ Spenke: Interview am Dezember 1985; Autorenkollektiv (1965); vgl. zur Halbleiterforschung bei *Siemens* in Eckert und Osietzki (1989): 138-160.

¹⁰² Spenke: Interview am Dezember 1985; Autorenkollektiv (1965).

¹⁰³ Unter dem Sammelbegriff werden alle Materialstrukturen subsummiert, deren Ausdehnung unterhalb von 0,1 Mikrometer liegen, was einer Größe von weniger als 0,0001 mm oder 1-100 Nanometer entspricht; siehe Fogelberg (2003); Baird et al. (2004); Nordmann et al. (2006); Nordmann (2009); Schummer (2009); Marcovich und Shinn (2014).

¹⁰⁴ Schummer (2009): 37.

¹⁰⁵ Stirn (2000); Kroemer (2008).

¹⁰⁶ Kroemer (2005): 959.

¹⁰⁷ Tsui et al. (1982); Störmer (1999).

¹⁰⁸ The Editors of Encyclopaedia Britannica (2019a).

¹⁰⁹ Störmer (1999): 888.

Während es sich im ersten Fall noch um ein „klassisches“ Halbleiterschichtsystem handelte, hatte sich die MBE-Materialbasis im zweiten Beispiel bereits auf andere Stoffgruppen erweitert. Der geteilte Physiknobelpreis von 2007 ging an den deutschen Physiker Peter Grünberg (1939-2018)¹¹⁰ für die unabhängige Co-Entdeckung des Riesenmagnetowiderstands.¹¹¹ Nur durch den gezielten Zugang zu Schichtstrukturen aus magnetischen Materialien in kleinsten Dimensionen konnte dieses Experiment gelingen und eröffnete die Aussicht auf neuartige und untypische Materialeigenschaften:

Currently there is much interest in layered magnetic structures, which is partly due to the prospect that layering can be used to modify the material properties or to obtain new properties, uncharacteristic for the bulk materials.¹¹²

Jetzt reagierten auch die Historiker. Patrick McCray forderte einen Platz für MBE in den Geschichtsbüchern: „MBE deserves a place in the history books“¹¹³ und stellte zwei Jahre später die Rolle der Materialien auf eine Stufe mit der Leistungsfähigkeit der instrumentellen Ausrüstung: „This history highlights the significant role that materials and instrumental capabilities have played in nanotechnology-related research“.¹¹⁴

Diese Einschätzung teilten auch die Wissenschaftssoziologen Anne Marcovich und Terry Shinn und klassifizierten die Materialherstellung über Epitaxieverfahren als „wissenschaftliche Revolution“, die der Halbleiterindustrie durch den Zugang zu neuartigen Quantenphänomenen neuen Schwung versetzte: „[...] molecular beam epitaxy increasingly lent momentum to the semiconductor-materials industry; it was this epitaxy that generated quantum wells and then quantum dots“.¹¹⁵ Jetzt wurde MBE auch dann berücksichtigt, selbst wenn sich die Methode am Ende nicht als die bevorzugte Variante durchsetzte, wie im Fall der optionalen Herstellungsverfahren des III-V-Verbindungshalbleiters Galliumnitrid (GaN). Dieser III-V Verbindungshalbleiter wird für die Erzeugung von blauen LEDs benötigt und war die Voraussetzung für den Zugang zu weißem LED-Licht.¹¹⁶

¹¹⁰ Fert (2018).

¹¹¹ Grünberg et al. (1986); Binasch et al. (1989); zur Materialherstellung siehe Prinz und Krebs (1981); vgl. die historiographische Rezeption in McCray (2009): 64f.

¹¹² Binasch et al. (1989): 4828.

¹¹³ McCray (2007): 259.

¹¹⁴ McCray (2009): 60.

¹¹⁵ Marcovich und Shinn (2011): 229.

¹¹⁶ Dollen von et al. (2014); vgl. Lécuyer und Ueyama (2013): 246; 259, die den Zugang zu Materialproben als eine Form der „material logic“ auffassen.

Mit den Beiträgen der deutschen Nanotechnologieforschung befasste sich intensiv Christian Kehrt in seiner Monographie „Mit Molekülen spielen“ aus dem Jahr 2016.¹¹⁷ Die umfassende Analyse fußte auf der Nanotechnologie als Gesamtphänomen sowie der Etablierung nanotechnologischer Forschungsfelder in der Region um München. In diesem Kontext kamen die MBE-Akteure Klaus Ploog, Günter Weimann und Gerhard Abstreiter (*1946)¹¹⁸ in Interviews zu Wort. Abstreiter war im Jahr 1975 als Postdoc in die Arbeitsgruppe von Manuel Cardona (1934-2014)¹¹⁹ an das MPI FKF nach Stuttgart gekommen und arbeitete in der Anfangsphase eng mit Ploog zusammen.¹²⁰ Später entwickelten sie gemeinsam die Idee zur Gründung eines Zentralinstituts für die Erforschung der Grundlagen der Halbleiterphysik an der *Technischen Universität München*.¹²¹ Aus dieser Initiative ging im Jahr 1986 das *Walter-Schottky-Institut* in Garching bei München hervor. Im Mittelpunkt der Aktivitäten stand die Stärkung des Austauschs zwischen Grundlagenwissenschaft und angewandter Forschung im Bereich der Halbleiterelektronik und natürlich die MBE, deren Anfänge Kehrt treffend als „do-it-yourself quantum mechanics“ charakterisierte.¹²²

Die Plädoyers für die Herausstellung der MBE als Meilenstein der Halbleiterherstellung blieben dennoch in der Minderheit. Dagegen erfuhren die übergeordneten Aktivitäten bei der Entstehung der Materialwissenschaften als interdisziplinäres Fachgebiet der Felder Physik, Chemie, Metallurgie und Ingenieurwesen mehr Aufmerksamkeit und wurden als Ergänzung der Literaturlbasis hinzugefügt.¹²³

1.2 Aufbau der Arbeit

Den Auftakt im zweiten Kapitel macht die Einführung der wissenschaftstheoretischen Modelle und Konzepte, die für die Interpretation der Dynamik im Zusammenwirken der vier Wissenschaftskategorien Theorie, Experiment, Instrumente und Materialien ausschlaggebend waren. In der Überblicksdarstellung werden die wirkmächtigen Modelle des 20. Jahrhunderts vorgestellt sowie die spezifische Begrifflichkeit eingeführt, die für die Analyse der Unterschiede und

¹¹⁷ Kehrt (2013); Kehrt (2016).

¹¹⁸ Technische Universität München (2020).

¹¹⁹ Deutsche Biographie Cardona, Manuel; siehe auch den Sammelband mit zahlreichen Erinnerungen und Reminiszenzen: Ensslin und Viña (2016).

¹²⁰ Bauer (2006); Kehrt (2013); Kehrt (2016): 143-151.

¹²¹ Kehrt (2016): 110, vgl. Diblitz: Interview am 12.09.2014 mit Abstreiter, Gerhard: 8.

¹²² Kehrt (2013): 309f; Kehrt (2016): 146.

¹²³ Cohen (1979); Weart (1992); Cahn (2001); Bensaude-Vincent (2011); kompakte Darstellungen der Entstehung der wissenschaftlichen Disziplin mit ausführlicher Bibliographie aus deutscher Perspektive in: Hentschel (2011) und mit amerikanischem Schwerpunkt in Mody, Cyrus C. M. und Martin (2020).

Gemeinsamkeiten von Instrumenten und Materialien im wissenschaftlichen Experiment erforderlich ist. Diese Terminologie bildet den Grundstock für die graphische Differenzierung der Zusammenhänge in den Momentaufnahmen des epistemisch-technischen Quartetts, die als Zusammenfassung am Ende der drei folgenden Kapitel von Phase 1 bis 3 folgen. Mit dieser Ergänzung kann die in der chronologischen Perspektive fehlende Interaktion präzisiert werden.

Der Entwicklungspfad der Halbleitertechnologie beginnt im dritten Teil mit Phase 1 von 1833 bis 1907. Nach der Schilderung und Analyse der Ereignisse in der Frühphase wechselt im vierten Kapitel, das den Zeitraum von 1907 bis 1930 umfasst, die Materialbasis. Da der Fortschritt in der Halbleitertechnologie stagnierte, wandte sich die Forschung den leichter zugänglichen Alkalihalogeniden zu, die als Modellmaterialien weitergehende Einblicke in die Festkörperphysik erlaubten. Die Rückwendung zu den Halbleitern folgt im fünften Abschnitt. In dem Zeitraum von 1931 bis 1948 gelang der Übergang von der initialen, explorativen Empirie zur theoriebasierten Halbleiterforschung. Gestützt auf umfangreiche Forschungsprogramme vor, während und nach dem Zweiten Weltkrieg, setzte die langfristige industrielle und militärische Nutzung von Halbleiterbauteilen ein. Alle notwendigen, wissenschaftlichen Werkzeuge standen zur Verfügung, um sich schrittweise dem Idealzustand der fachübergreifenden Interaktion zu nähern.

Der Blick auf die deutschen Nachkriegsaktivitäten wird im sechsten Kapitel intensiviert und mit den Vorgängen bei den Bell Labs verglichen. Dazu gehört die Vorstellung des Verfahrens von *Siemens* zur Herstellung von Reinstsilizium, dem dominierenden Halbleitermaterial der Mikroelektronik ebenso, wie die Erfindung der III-V Verbindungshalbleiter Anfang der 1950er Jahre. Die Erweiterung der Materialbasis durch die erste künstliche Halbleiter-Verbindungs-kategorie führte zu innovativen, optoelektronischen Anwendungen wie die Leuchtdiode [LED] und den Festkörperlaser.¹²⁴ Bei der Realisierung der immer komplexer werdenden Materialstrukturen standen die Wissenschaftler vor neuen Herausforderungen. In diesem Kontext werden einführend die Grundlagen von epitaktischen Verfahren behandelt, die zur Schlüsseltechnologie der III-V Verbindungshalbleiter wurden.

Das siebte Kapitel beginnt mit dem theoretischen Konzept der sogenannten Übergitter, die die Gestaltung von quantenmechanischen Effekten an künstlichen Schichtsystemen der III-V Verbindungshalbleiter in Aussicht stellten. Im Zuge ihrer Realisierung nahm die Erfindung der Molekularstrahlepitaxie im Jahr 1968 einen besonderen Stellenwert ein. Bei dem modularen

¹²⁴ Kurze Abrisse zur Entwicklung und Wirkungsgeschichte des Halbleiterlasers in Lemmerich (1987); Hecht (1999): 147-159; Dittmann und Hagmann (2011); Bimberg (2012): 25-28.

Verfahren handelt es sich um eine Variation der epitaktischen, physikalischen Gasphasenabscheidung. Nach der Schilderung der grundlegenden Verfahrensschritte des Aufdampfens sowie der zentralen Bestandteile der Apparatur, folgt das Narrativ der Entwicklungsgeschichte des Verfahrens bei den Bell Labs.

Die weltweite Diffusion der MBE setzte Mitte der 1970er Jahre schrittweise ein. Im achten Teil rücken die Aktivitäten der deutschen MBE-Akteure und deren wissenschaftliches Umfeld ins Zentrum der Betrachtung. Insbesondere die Etablierung der MBE-Projektgruppe am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart wird als Fallbeispiel vorgestellt. Für die Diskussion der Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Gegebenheiten in den USA und in Deutschland ist die Schilderung der langwierigen Gründungsgeschichte des Instituts zielführend. Insgesamt reicht der Themenbogen von der Frage nach der lokalen, organisatorischen Anbindung bis zur Formierung einer internationalen MBE-Community Mitte der 1980er Jahre.

Im abschließenden neunten Abschnitt führt der Weg zurück zum wissenschaftstheoretischen Einstieg. Während zuvor die makroskopische Abstraktion der Abläufe in der Halbleiterforschung das Erkenntnisinteresse bestimmte, werden nun die Charakteristika von Instrumentenbauern und Materialhersteller abschließend erörtert. Als Bezugspunkt diente die Idealtypologie der instrumentell ausgerichteten Forschungstechnologen, die um die sogenannten Materialtechnologen als spezifische Ausprägung erweitert wird.

Das Resümee im zehnten Kapitel fasst die zentralen Thesen der vorliegenden Arbeit zusammen.

2 Das epistemisch-technische Quartett der Halbleiterforschung

Um die Entstehung wissenschaftlicher Erkenntnis theoretisch zu erfassen, formierte sich Anfang des 20. Jahrhunderts eine Gruppe von Intellektuellen zu dem als „Wiener Kreis“ bekannten Zirkel. Deren wissenschaftsphilosophische Reflexion in den 1920 und 1930er Jahren wurde zum Ausgangspunkt des anhaltenden Diskurses, welche Faktoren für den Fortschritt in der naturwissenschaftlichen Forschung ausschlaggebend sind.¹ Nach der kurzen Einführung in die frühen, wissenschaftstheoretischen Modelle der „Moderne“ folgt die „postmoderne“ Interpretation des Zusammenwirkens durch Peter Galison.² Sein Modell dient als Grundlage für die erweiterte Interpretation der langfristigen Entwicklungslinien in der Halbleitertechnologie unter Berücksichtigung der Materialien als autarke Entität.

Der zweite, wissenschaftstheoretische Themenbereich befasst sich mit der Reflexion des Experiments als Keimzelle naturwissenschaftlicher Forschung, wobei die Erfassung der instrumentellen und materiellen Bestandteile im Mittelpunkt der Analyse stehen.

Abschließend wird das Konzept des epistemisch-wissenschaftlichen Quartetts eingeführt, das als Momentaufnahme die zeittypische Konstellation der vier Wissenschaftskategorien Experiment, Theorie, Instrument und Material erfasst.

2.1 Von der „modernen“ zur „postmodernen“ Wissenschaftstheorie

Bis in die 1930er Jahre leitete die Gestaltung einer „logischen Analyse der wissenschaftlichen Weltauffassung“ die Thematik des Wiener Kreises. Ausgangspunkt war die rasante Entfaltung naturwissenschaftlicher Errungenschaften nach dem Ersten Weltkrieg, die sich in innovativen Technologien niederschlug. Als Folge prägte eine physikalisch ausgerichtete Rezeption die Anschauung, in der empirische Forschung kontinuierlich Daten aus Beobachtungen und Experimenten erzeugt, die als kumulative Basis für induktive Schlussfolgerungen genutzt wird.³

¹ Vgl. Kötter (2017) für eine Darstellung der Entwicklungsgeschichte der Disziplin mit umfassender Bibliographie; siehe auch zur Vorgeschichte des Wiener Kreises Stadler (2015): 1-27 sowie die Anthologien mit ausgewählten Texten zur Weltauffassung von Schleichert (1975); Damböck (2013).

² Vgl. Galison (1988); die Diskussion in Galison (2004): 27-35.

³ Vgl. die Übersichtsdarstellungen in Galison (1988): 201f; Kötter (2017): 49f.

In dem sogenannten „Logischen Positivismus“ übernimmt somit die Genese von wissenschaftlichen Fakten die hierarchische Führungsrolle bei der Wissensproduktion, während Theorien lediglich dazu dienen, das Datenmaterial zu ordnen. Dabei treten Diskontinuitäten auf, die aber ohne direkten Einfluss auf den Fortgang der empirischen Untersuchungen bleiben.⁴ Die einseitige Ausrichtung auf die Belange der Physik und das Fehlen von theoretischen Überlegungen und Hypothesen als Gestaltungsprinzip erregte frühzeitig Widerspruch.⁵

Die Antwort auf dieses Gedankenmodell folgte als Gegenthese Mitte des 20. Jahrhunderts. Im sogenannten Antipositivismus wird das ambivalente Prinzip der Interaktion von Experiment und Theorie jedoch beibehalten, wobei nun der Theorie die Hauptrolle zugeschrieben wird. Das Experiment ist in dieser Vorstellung ohne theoretische Hypothesen nicht möglich. Die Funktion des Experiments reduziert sich zum Abgrenzungskriterien. Die theoretischen Vorgaben werden entweder bestätigt oder widerlegt. Gleichzeitig verliert das Experiment seinen autonomen Status.⁶

„Moderne“ wissenschaftstheoretische Modelle

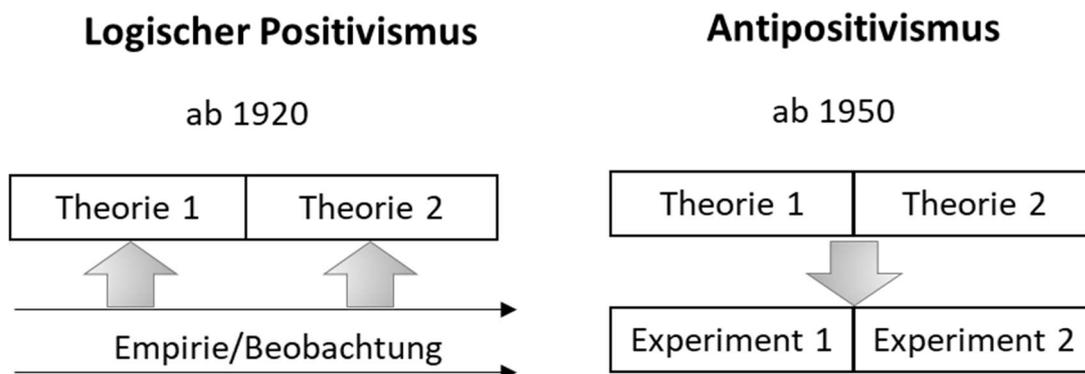


Abb. 1: Die wissenschaftstheoretischen Modelle der „Moderne“.

In Thomas S. Kuhn fand die antipositivistische Sichtweise einen wirkmächtigen Vertreter, der in den 1960er Jahren mit seiner modifizierten These der wissenschaftlichen Revolutionen das Primat der Theorie untermauerte.⁷ Insbesondere das Konzept des Paradigmenwechsels, bei

⁴ Vgl. Galison (1988): 202f.

⁵ Horkheimer (1937).

⁶ Popper (1934) [(1971)]; vgl. Poppers biographischer und philosophischer Werdegang Giedymin (1975); Gattei (2004); Maxwell (2017): 8-41; Diskussion der Abgrenzung beider Konzepte Galison (2008): 111.

⁷ Kuhn [(1962)] (1981).