

Cornelius Schubert

Technology Roadmapping in der Halbleiterindustrie

Das Hier und Jetzt technologischer Zukünfte am Beispiel der
International Technology Roadmap for Semiconductors

Technical University Technology Studies
Working Papers

TUTS-WP-2-2007

Technology Roadmapping in der Halbleiterindustrie.

Das Hier und Jetzt technologischer Zukünfte am Beispiel der International Technology Roadmap for Semiconductors*

1. Einleitung

Die Entwicklung komplexer Technologien ist heutzutage funktional wie auch finanziell äußerst anspruchsvoll. Diese hohen Ansprüche führen dazu, dass die Technologieentwicklung für die beteiligten Unternehmungen schwer vorherzusagen und dadurch mit hohem Risiko verbunden ist. Zudem vollziehen sich die technologischen Entwicklungsdynamiken zunehmend in global verteilten und heterogenen Zusammenhängen. Nicht zuletzt um diesen Risiken und Unsicherheiten im Prozess der Entwicklung komplexer Technologien Herr zu werden, nutzen Unternehmungen ebenso wie Forschungseinrichtungen heute oft Technology Roadmaps als Planungsinstrument. Wie dieses Instrument praktisch genutzt wird ist dagegen weniger bekannt. Untersucht werden soll daher, (1) wie diese heute weit verbreitete Form der Vorhersage – das so genannte *Technology Roadmapping* (TRM) – in der global vernetzten Technologieentwicklung der Halbleiterindustrie praktiziert wird und (2) wie sich die Art und Weise einer solchen antizipativen Technikbewertung auf die Ausgestaltung technischer Innovationen speziell in der Fertigungstechnologie für Computerchips auswirkt.

Methoden des antizipativen Technologiemanagements (bekannt unter dem englischen Ausdruck „technological foresight“) sind in wirtschaftlichen Unternehmen wahrlich nichts Neues (Wills et al. 1969). Ebenso gehört es in der Politik seit Jahrzehnten zum Guten Ton, Technikfolgenabschätzung zu betreiben (Ogburn 1937). Aktuell unterhält beispielsweise die EU mit dem *European Foresight Monitoring Network*¹ ein Programm zur Überwachung und Koordination bestehender wie auch neuer Vorhersageaktivitäten und fördert das Programm zu *Science and Technology Foresight*² innerhalb des 7. Rahmenprogramms. Erste Anfänge zur Vorhersage technologischer Entwicklungen werden auf die Aktivitäten des US-amerikanischen und des britischen Militärs zurückgeführt, die bereits im Zweiten Weltkrieg mit dem Ansatz der „operations research“ und ab 1948 der „system analysis“ maßgeblich die Richtung für die spätere Entwicklung der Methoden zum Technological Foresight beeinflussten (Jantsch 1967: 110). Roadmaps im engeren Sinne tauchen ab Mitte der 1970er-Jahre auf (s. dazu die Fallstudien von Willyard/McClees 1987, Barker/Smith 1995, Groenveld 1997, Überblicke finden sich bei Kappel 2001, Kostoff/Schaller 2001). So empfiehlt Pyke (1971) die Methode des „Mapping“ zur konzeptionellen Darstellung von Alternativen im antizipativen Planungsprozess, um unter anderem eine überraschungsarme, chronologische Anordnung praktikabler Optionen für ein bestimmtes Feld sowie die Reihenfolge der erforderlichen wissenschaftlichen Entdeckungen und technischen Entwicklungen für jede Alternative zu erzielen (ebd.: 319). Dies sind auch heute noch zentrale Punkte technologischer Roadmaps (vgl. Garcia/Bray 1997, Phaal et al. 2004, Strauss/Radnor 2004, Möhrle/Isenmann 2005).

Im Folgenden wird die *International Technology Roadmap for Semiconductors* (ITRS) als Beispiel für antizipatives Technologiemanagement und strategische Technologieentwicklung vorgestellt. Illustriert wird die wechselseitige Konstitution von kollektiven Prognosen auf der

* Dieses Papier entstand im Rahmen des von der VolkswagenStiftung geförderten und von Jörg Sydow und Arnold Windeler geleiteten Projekts „Path Creating Networks. Innovating Next Generation Lithography in Germany and the U.S.“. Der VolkswagenStiftung danke ich für die finanzielle Förderung des Projekts im Rahmen des Forschungsprogramms „Innovationsprozesse in Wirtschaft und Gesellschaft“ und unseren Gesprächspartnern für ihre Auskunftsbereitschaft. Darüber hinaus danke ich Tilman Deus und Monika Zink für die Vorarbeiten zu diesem Papier.

¹ <http://www.efmn.info>

² <http://cordis.europa.eu/foresight/home.html>

einen Seite und gegenwärtigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf der anderen Seite. Verdeutlicht werden dabei auch die möglichen unerwünschten Konsequenzen dieses absichtvollen Handelns und die damit verbundenen Rückwirkungen auf die Prognose und Prognosewahrnehmung. Dabei wird hauptsächlich auf die Besonderheiten der ITRS als Branchen-Roadmap in Bezug auf die Infrastrukturbildung eingegangen. Im zweiten Kapitel werden die Geschichte, die heutige Organisationsform und der Aufbau der ITRS nachgezeichnet. Danach wird im dritten Kapitel anhand der Einführung einer neuen Technologiegeneration die Verbindlichkeit und Orientierungsfunktion der ITRS herausgestellt und der rekursive Zusammenhang zwischen Vorhersage, Verbindlichkeit und gegenwärtiger F&E-Koordination hergestellt. Das dritte Kapitel schließt mit einer Übersicht, die die ITRS in den Gesamtkontext der globalen Aktivitäten in der Halbleiterindustrie einbettet. Es folgt ein Resümee, in dem der Bezug zur Analyse technologischer Innovationen hergestellt wird.

2. Die ITRS

Eine der heute prominentesten technologischen Roadmaps ist sicherlich die ITRS. Mit ihrer Hilfe koordiniert die globale Halbleiterindustrie die Weiterentwicklung der Computerchipfertigungstechnologie (Lithografie). Auf der Webseite der ITRS heißt es dazu:

“Through the cooperative efforts of the global chip manufacturers and equipment suppliers, research communities, and consortia, the Roadmap teams identify critical challenges, encourage innovative solutions, and welcome participation from the semiconductor community”

(<http://www.itrs.net/about.html>)

Wie das Zitat verdeutlicht, versteht die ITRS-Organisation die Roadmap als Resultat der Zusammenarbeit von Chipherstellern, Zulieferern, Forschungseinrichtungen und Konsortien. Impliziert ist damit mindestens zweierlei: die Überparteilichkeit der Planung und die Verbindlichkeit für die gesamte Industrie.

2.1 Geschichte

Die ersten Schritte zur Entwicklung eines industrieweiten Planungsinstruments wurden Anfang der 1990er -Jahre in den USA gemacht, als 1994 der Branchenverband der U.S.-amerikanischen Halbleiterhersteller, die *Semiconductor Industry Association* (SIA) erstmals die *National Technology Roadmap for Semiconductors* (NTRS) mit einem Zeithorizont von 15 Jahren herausgab. 1997 wurde diese auf nationaler Ebene fortgeschrieben. 1999 wurde die erste internationale Roadmap unter Beteiligung der USA, Europa, Korea, Japan und Taiwan erstellt. Die ITRS wird alle zwei Jahre neu herausgegeben, in den dazwischen liegenden Jahren werden so genannte Updates erstellt.

Ein Blick auf die Geschichte der technologischen Roadmap in der Halbleiterindustrie zeigt, dass sie von Anfang an nicht nur als ein Planungsinstrument zur Technologieentwicklung, sondern auch als ein Instrument zur Ausgestaltung der gegenwärtigen interorganisationalen Beziehungen zwischen den Abnehmern, den Produzenten und den Zulieferern der Fertigungstechnologie gedacht war (s. Schaller 2004: 410-468).

Der Startschuss für die NTRS war ein Workshop im November 1992, der durch das Mitte der 1980er- Jahre zur Koordination der technologischen Zusammenarbeit gegründete Industriekonsortium *Semiconductor Manufacturing Technology* (SEMATECH, s. Browning/Shetler 2000) organisiert und finanziert sowie von der *Semiconductor Research Corporation* (SRC)

technisch unterstützt wurde. Es folgten zwei Papiere im Sommer 1993, einmal die "Semiconductor Technology Workshop Conclusions", zum anderen der ausführliche Bericht „Semiconductor Technology Workshop Working Group Reports“ über technische Einzelheiten in verschiedenen Gebieten der Halbleiterfertigung. Jedoch war keiner der beiden Berichte offiziell als Roadmap titulierte.³ Diese Aktivitäten waren dazu gedacht, speziell die Forschungs- und Entwicklung (F&E) innerhalb der U.S.-amerikanischen Halbleiterindustrie besser zu vernetzen und auf diesem Wege der Marktdominanz japanischer Produkte zu begegnen. So wurde SEMATECH 1987 allein aus dem Bestreben heraus gegründet, die Beziehungen zwischen den Abnehmer, Produzenten und Zulieferer der heimischen Fertigungstechnologie für Halbleiter zu verbessern (vgl. Browning/Shetler 2000, Carayannis/Alexander 2004), ähnlich wie die SRC 1983 gegründet wurde, um die Verbindungen zu den universitären Forschungseinrichtungen zu stärken. Heute existiert die ITRS als Partnerorganisation von SEMATECH und ist untergliedert in regionale und internationale *Technology Working Groups* (TWGs), das *International Roadmap Committee* (IRC) als Steuerungskomitee und die immer noch bei SEMATECH befindliche Geschäftsstelle.

Die in den Forschungskonsortien SEMATECH und SRC organisierten Chiphersteller, wie etwa Motorola und IBM, blickten Mitte der 1980er -Jahre schon auf ungefähr ein Jahrzehnt hausinterner Roadmapping-Praktiken zurück (s. Schaller 2004: 420-433) und so war auch schon im Zusammenhag mit der Gründung von SEMATECH von Roadmapping die Rede, um die interne Arbeit zu strukturieren (ebd.: 416). Das Besondere an den Aktivitäten die zur NTRS und schließlich zur ITRS führten ist, dass sie sich nicht auf die Perspektive einer einzelnen Unternehmung – etwa in Bezug auf interne Koordination von F&E oder die externe Kommunikation einer Wettbewerbsstrategie – abzielten, sondern dezidiert eine nationale und später internationale Branchenperspektive verfolgten, die sich notwendiger Weise von der einer einzelnen Firma unterscheidet:

„Industry roadmaps are generally created by bringing together firms from across the sector, research institutes, associations, etc., to project the pathways, rate of change, requirements, or constraints on development in the sector. (...) Although the term ‘roadmapping’ is used, and there is something in common, the goals and processes in industry roadmapping can be quite different from corporate roadmapping”

(Probert/Radnor 2003: 29)

Die ITRS als Instrument der globalen F&E-Koordination ist für die Halbleiterindustrie aufgrund zweier Problemkomplexe bedeutsam. Erstens können auf der technologischen Seite die durch das bekannte Moore'sche Gesetz (die Verdopplung der Integrationsdichte etwa alle 18 Monate, vgl. Moore 1965) selbstgesteckten Fortschrittskriterien der Industrie eingehalten werden.⁴ Der rasante technologische Fortschritt benötigt eine neue Generation der Fertigungstechnologie etwa alle drei Jahre und über die Roadmap können sich die beteiligten Abnehmer, Produzenten und Zulieferer ein gemeinsames Bild über den Einführungszeitpunkt sowie die technischen Erfordernisse, Lösungen und Probleme machen. Zweitens muss bei der Einführung einer neuen Technologiegeneration die gesamte Infrastruktur aus Abnehmern, Produzenten und Zulieferern vorhanden sein. Neben den möglichen technologischen Problemen ist dies keineswegs selbstverständlich, denn moderne Lithografieanlagen sind immens kapitalintensive und komplexe Systemtechnologien, deren technische Machbarkeit und ökonomische

³ Intern wurde der Begriff Roadmap allerdings durchaus gebraucht (vgl. Shandle 1992).

⁴ Obwohl Moore seine Vorhersage nie als Gesetz formulierte, wurde es doch zum Treiber des technologischen Fortschritts da sich die Computerchiphersteller an der Vorhersage orientierten und bis heute mit allen möglichen Tricks und Kniffen versuchen ihr gerecht zu werden.

Brauchbarkeit von jeder einzelnen Komponente sowie dem Zusammenspiel der Komponenten untereinander abhängt.

Yan Borodovsky, der Leiter der Abteilung für *advanced lithography* bei Intel fasst die Verbindung von Roadmap und dem Moore'schen Gesetz auf einer Kongressfolie so zusammen (Borodovsky 2006: 31):

“Moore’s Law is there to set common Goals. Power of Moore’s Law observation and prediction was, is and will be for foreseeable future to provide common, easily understood quantified metric for everyone in semiconductor and IT economy to synchronize their efforts toward historically based, well defined, sustainable and mutually rewarding growth goals in the future.

Roadmaps are there to debate the Path. Path to achieving those goals (Roadmap) was, is and will be subject to unending debates as it reflects fundamental uncertainty of assessing risks to schedule and yields of ever more complex novel technologies over extending existing “tried and true” approaches beyond its originally defined limits in the absence of data.”

Die zentrale Orientierungsfunktion für die Industrie wird allerdings nicht der Roadmap, sondern dem Moore'schen Gesetz zugeschrieben. Die Roadmap soll dazu dienen, die möglichen Wege zur Erreichung der vom Moore'schen Gesetz vorgegebenen Ziele im Angesicht immer komplexerer Technologie zu diskutieren. Das Moore'sche Gesetz gilt in dieser Sichtweise als das stabilisierende, berechenbare Element und als Motor des technischen Fortschritts der gesamten Industrie, während die Roadmap die unsicheren technologischen Entwicklungen widerspiegelt und aus diesem Grund immer Gegenstand „endloser Debatten“ sein wird.

2.2 Organisationsform

Für die Erstellung der ITRS sind zwei Foren entscheidend. Zum einen werden öffentliche Konferenzen abgehalten, zum anderen treffen sich ausgewählte Industrieexperten in so genannten Technology Working Groups.

Im Prinzip – so wird immer wieder von Industrieexperten betont – steht die ITRS allen Interessierten offen. Die öffentlich zugänglichen *Konferenzen*, finden dreimal im Jahr abwechselnd in den USA, Europa und Asien statt. Die Konferenzen dienen nicht allein der internen Abstimmung, sondern sie sollen dem interessierten Fachpublikum eine Plattform für Rückmeldungen ermöglichen und dienen als Schnittstelle zur (Fach-)Presse. Diese prinzipielle Offenheit ist ein spezifisches Charakteristikum der ITRS als Branchen-Roadmap, denn es handelt sich bei der modernen Fertigung von Computerchips um ein Unterfangen, welches systematisch an den physikalischen, chemischen und mechanischen Grenzen der industriellen Massenfertigung operiert. Da durch den Ausfall oder die unzureichende Qualität einer einzelnen Komponente die gesamte Technologiegeneration gefährdet ist, sind die Akteure sehr bemüht ein Forum zu schaffen, in dem mit größt möglicher Offenheit über kritische Themen diskutiert werden kann.

Weniger zugänglich sind die *Technology Working Groups*, in denen die jeweiligen Experten aus Industrie und Wissenschaft für die einzelnen Teilbereiche⁵ in den verschiedenen Regionen die technologischen Erfordernisse, Lösungen und Probleme im Zusammenhang mit der Roadmap koordinieren. Obwohl die TWGs auch nicht öffentlich tagen, sind die jeweiligen

⁵ Diese sind: System Drivers, Design, Test & Test Equipment, Process Integration, Devices & Structures, RF and A/MS Technologies for Wireless Communications, Emerging Research Devices, Emerging Research Materials, Front End Processes, Lithography, Interconnect, Factory Integration, Assembly & Packaging, Environment, Safety, & Health, Yield Enhancement, Metrology, Modeling & Simulation

Mitglieder der Arbeitsgruppen, wie auch des Steuerungskomitees, auf den ersten Seiten jeder ITRS Ausgabe detailliert aufgeführt. Bis vor Kurzem waren selbst Telefonnummern und E-Mail-Adressen auf der ITRS Webseite öffentlich zugänglich. Der Rekrutierungsvorgang sowohl zu den TWGs als auch zum IRC ist dagegen nicht formal geregelt. Vielmehr stellen sich anerkannte Technologieexperten aus Industrie und Wissenschaft zur Verfügung, um das operative Geschäft der Erstellung der Roadmap zu leiten. Dabei ist für die TWGs eine deutliche Dominanz der Experten aus der Wirtschaft zu bemerken, die im Fall des IRC noch zunimmt. Sowohl die Mitglieder der TWGs als auch des IRC treffen sich regelmäßig zwischen den öffentlichen Konferenzen, auf denen sie ihre Ergebnisse präsentieren.

Diese Organisationsform soll zwei Erfordernissen Rechnung tragen: Zuerst bleiben die TWGs durch ihre kontinuierlichen Treffen am Puls der technologischen Entwicklung und schreiben die Roadmap auch zwischen den jeweiligen Ausgaben bzw. Updates fort, was gerade im Falle rasanter Innovationszyklen unabdingbar ist. Zweitens wird durch die Betonung des öffentlichen Charakters und die freiwillige Teilnahme eine Plattform für alle relevanten Akteure im Feld geschaffen, um nicht nur die technologischen, sondern auch die ökonomischen Risiken zu überblicken. Paolo Gargini, der Chairman der ITRS, drückt es für die Einführung einer neuen Fertigungstechnologie so aus:

„ ... estimate of investments required in establishing the whole infrastructure necessary for 13.5nm imaging technology is very large (~\$1B) ... most of the efforts on 13.5nm imaging technology has so far been carried out by consortia and cooperative organizations, as this technology is still considered as being in the pre-competitive phase. In addition, opportunities for cooperation among all of these organizations at the international level are many and are being explored. No single company or consortium can realistically allocate enough funds to successfully undergo the 3 wavelength conversions necessary for this decade. Cooperation at all levels is a must!“

(Gargini 2002)

Die Bedeutung der Roadmap für das Hier und Jetzt der Technologieentwicklung wird in diesem Zitat prägnant herausgestellt. Die ökonomischen und technischen Risiken werden selbst von großen und mächtigen Firmen so hoch eingeschätzt, dass sich keine einzelne Firma an die Forschung und Entwicklung einer neuen Systemtechnologie traut (vgl. Ham et al. 1998). Gleichzeitig beruht der technologische und ökonomische Erfolg der gesamten Industrie zum großen Teil auf der Einführung neuer Fertigungstechnologien im Dreijahresrhythmus. Diese Dynamik macht die technologische Zukunft zu einem sehr relevanten Gegenwartsproblem für die beteiligten Unternehmungen und Forschungsinstitute – und die Organisation der Infrastruktur zu einer Hauptaufgabe des Roadmapping.

2.3 Aufbau

Der tatsächliche Aufbau der ITRS Roadmap soll hier nur skizziert werden. Die ITRS besteht aus mehreren Dokumenten, eines für jeden Technologiebereich plus einer Zusammenfassung. Im Folgenden wird der Aufbau der Lithografie-Roadmap in der 2005er Ausgabe exemplarisch vorgestellt.⁶ Auf insgesamt 27 Seiten wird zuerst die Reichweite („scope“) der Roadmap definiert, wozu neben allgemeinen technischen Fertigungserfordernissen auch ökonomische Abschätzungen wie voraussichtliche Betriebskosten zählen. Es folgt eine Aufzählung schwieriger Probleme („difficult challenges“) und technologischer Erfordernisse („technological

⁶ <http://www.itrs.net/Links/2005ITRS/Litho2005.pdf>

requirements“), der letztere Abschnitt nimmt dabei den Großteil des Dokuments ein. Danach werden übergreifende Bedürfnisse und mögliche Lösungen („crosscut needs and potential solutions“) genannt. Das Dokument schließt mit zwei kurzen Absätzen zu Diskussionsthemen zwischen den TWGs („inter-focus ITWG discussion“) und möglichen Auswirkungen für zukünftige Entwicklungen („impact of future emerging research devices and materials“).

Table 76a Lithography Technology Requirements—Near-term Years

Year of Production	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
DRAM ½ pitch (nm) (contacted)	80	70	65	57	50	45	40	36	32
DRAM and Flash									
DRAM ½ pitch (nm)	80	70	65	57	50	45	40	35	32
Flash ½ pitch (nm) (un-contacted poly)	76	64	57	51	45	40	36	32	28
Contact in resist (nm)	94	79	70	63	56	50	44	39	35
Contact after etch (nm)	85	72	64	57	51	45	40	36	32
Overlay [A] (3 sigma) (nm)	15	13	11	10	9	8	7.1	6.4	5.7
CD control (3 sigma) (nm) [B]	8.8	7.4	6.6	5.9	5.3	4.7	4.2	3.7	3.3
MPU									
MPU/ASIC Metal 1 (M1) ½ pitch (nm)	90	78	68	59	52	45	40	36	32
MPU gate in resist (nm)	54	48	42	38	34	30	27	24	21
MPU physical gate length (nm) *	32	28	25	23	20	18	16	14	13
Contact in resist (nm)	111	97	84	73	64	56	50	44	39
Contact after etch (nm)	101	88	77	67	58	51	45	40	36
Gate CD control (3 sigma) (nm) [B] **	3.3	2.9	2.6	2.3	2.1	1.9	1.7	1.5	1.3
MPU/ASIC Metal 1 (M1) ½ pitch (nm)	90	78	68	59	52	45	40	36	32
Chip size (mm²)									
Maximum exposure field height (mm)	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Maximum exposure field length (mm)	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Maximum field area printed by exposure tool (mm ²)	858	858	858	858	858	858	858	858	858
Number of mask levels MPU	33	33	33	35	35	35	35	35	35
Number of mask levels DRAM	24	24	24	24	24	26	26	26	26
Wafer size (diameter, mm)	300	300	300	300	300	300	300	450	450

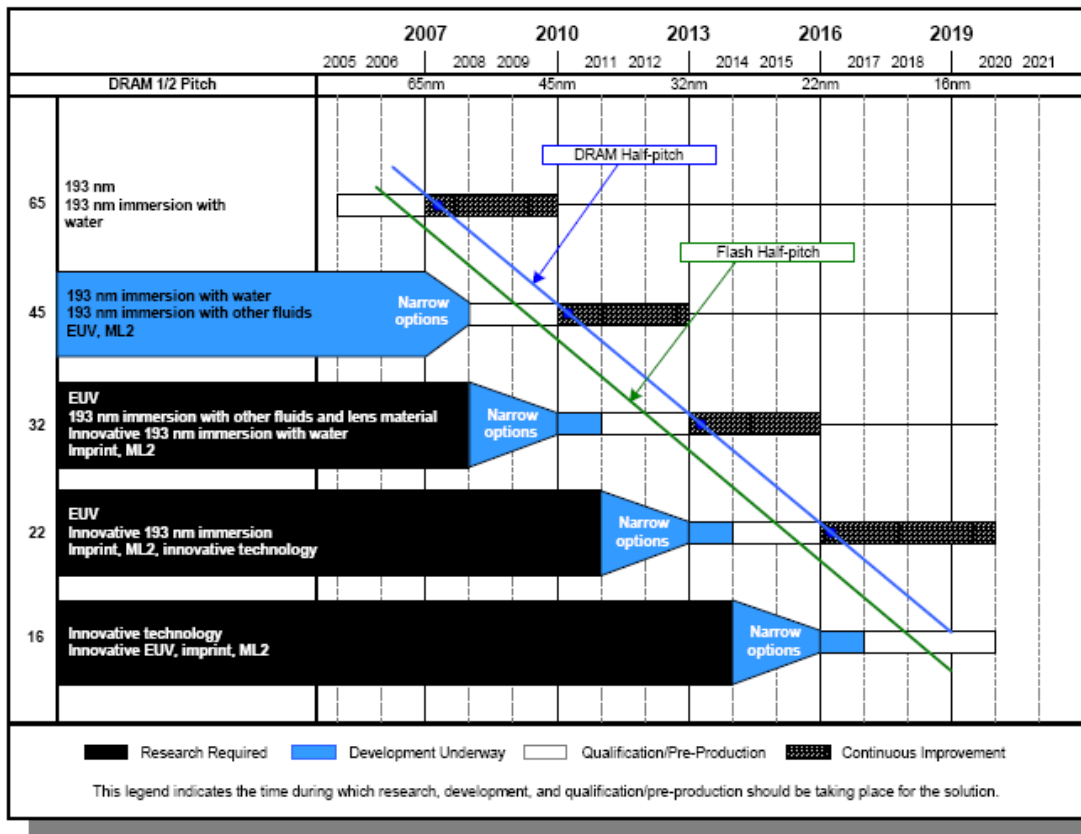
* MPU physical gate length numbers and colors are determined by several working groups and the ORTC.

** Noted exception for RED in next three years: Solution NOT known, but does not prevent production manufacturing.

Manufacturable solutions exist, and are being optimized	White box
Manufacturable solutions are known	Yellow box
Interim solutions are known	Yellow box with red diamond
Manufacturable solutions are NOT known	Red box

Abb. 1: ITRS, Ausgabe 2005, Bereich Lithografie, Seite 10.

Im Abschnitt zu den technologischen Erfordernissen dominieren Tabellen (s. Abb. 1.), in denen zu jedem technologischen Merkmal der Zeitpunkt der voraussichtlichen Einführung sowie die aktuell eingeschätzte Machbarkeit in vier Abstufungen (s. die Legende der Tabelle in Abb. 1) farblich gekennzeichnet sind. Diese Tabellen reichen vom Jahr 2005 bis 2020 und je ferner die technologischen Merkmale in der Zukunft liegen, desto unbekannter sind die für die Massenfertigung tauglichen Lösungen. Eine sehr häufig reproduzierte Grafik betrifft den Einführungszeitpunkt potentieller Belichtungstechnologien (s. Abb. 2). In ihrem Zentrum ist die durch das Moore'sche Gesetz vorausgesagte Entwicklung der Integrationsdichte über die Zeit als abfallende Linie eingetragen. So werden etwa für das Jahr 2007 Strukturbreiten von 65nm vorhergesagt, 45nm für 2010 und 16nm für 2019.



Notes: RET and lithography friendly design rules will be used with all optical lithography solutions, including with immersion; therefore, they are not explicitly noted.

Figure 67 Lithography Exposure Tool Potential Solutions

Abb. 2: ITRS, Ausgabe 2005, Bereich Lithografie, Seite 24.

In den horizontalen Balken stehen die jeweiligen Lithografiertechnologien, deren Produktionsreife, ebenso wie die der technologischen Merkmale in Abb. 1, farblich gekennzeichnet ist. Die in Abb. 2 enthaltenen Vorhersagen und Einschätzungen spiegeln die wesentlichen Eigenschaften der Roadmap als strategisches Planungsinstrument für die gegenwärtige Forschung und Entwicklung im Kontext industrieller Technologieentwicklung wider. Die diagonal abfallenden Linien symbolisieren die Moore'sche Entwicklungsdynamik und geben in diesem Sinne das Tempo der Entwicklung vor. Damit dienen sie der gesamten Industrie als Orientierung für die Erreichung der selbstgesteckten Fertigungsziele. Diese so genannten Technologieknoten (65nm, 45nm, 32nm, 22nm und schließlich 16nm) geben die minimale Strukturbreite für die Chipfertigung vor. Mit Hilfe der Roadmap orchestriert die Industrie einen koordinierten Auswahlprozess mit welcher Lithografiertechnologie diese Strukturbreiten erreicht werden können. Aktuell (2007) werden so genannte optische Lithografieverfahren (vgl. Levinson 2001) eingesetzt, die mit Laserlicht der Wellenlänge 193nm und vielen Tricks und Kniffen Strukturen von 65nm belichten können. Für 2010 werden sowohl eine Weiterentwicklung der optischen Lithografie, die so genannten Immersionslithografie mit 193nm, als auch zwei radikale Neuentwicklungen, die EUV Lithografie und die Maskenlose Lithografie, als mögliche Alternativen genannt. Der koordinierte Auswahlprozess für den 45nm Technologieknoten wird in der Roadmap für den Zeitraum 2007 – 2008 („narrow options“) angegeben. Genau so verhält es sich bei den nachfolgenden Technologieknoten. Dass der Auswahlprozess für den 32nm Knoten in der Roadmap für den Zeitraum von 2008 bis 2010 und die Produktionseinführung für 2013 vorgesehen ist bedeutet jedoch nicht, dass nicht heute schon mit großem

finanziellen und personellen Aufwand an der Entwicklung und Durchsetzung der Technologiealternativen gearbeitet würde.

Wie gesagt, dient die Roadmap der Orientierung. Sie versteht sich selbst allein als Instrument der Technologiebewertung ohne dabei ökonomische Überlegungen zu einzelnen Technologieoptionen vorzunehmen. So ist die Roadmap kein verbindlicher Fahrplan, in dem die Lithografiertechnologien und ihre Einführungszeitpunkte festgeschrieben sind, vielmehr spiegelt sie das Meinungsbild der technischen Experten in Bezug auf die technischen Erfordernisse, Probleme und Lösungen wider.

3. Die ITRS und die Suche nach einer neuen Lithografiertechnologie

Die Entwicklung einer neuen Lithografiengeneration ist alles andere als trivial. Zum einen sind die technologischen Anforderungen so hoch, dass nur noch wenige Unternehmungen weltweit die gewünschte Qualität in für die Massenproduktion ausreichender Menge zur Verfügung stellen können. Dazu gesellen sich immense Entwicklungs- und Anschaffungskosten, die keine Firma bereit bzw. in der Lage ist, alleine zu übernehmen. Zum anderen hängt die Moore'sche Entwicklungsdynamik, wie schon gesagt, von der kontinuierlichen Einführung neuer Technologiegenerationen ab, was den ökonomischen Erfolg einer Firma direkt an den technologischen Fortschritt koppelt und den Umstand erklärt, dass in den größeren Firmen Abteilungen für strategische Technologieentwicklung existieren. Die langjährigen Planungshorizonte der Halbleiterindustrie sind sowohl diesem Entwicklungsmodell geschuldet, wie auch den 15-20 Jahre dauernden kostenintensiven Entwicklungsvorläufen von einer Labortechnologie bis hin zur Massenfertigung.

3.1 Orientierungsfunktion und Verbindlichkeit der ITRS

Vorhersagen über das Ende einer technologischen Option bzw. über deren Einführungszeitpunkt oder Machbarkeit, werden in der Halbleiterindustrie mit Vorsicht betrachtet, haben sich diese Vorhersagen in der Vergangenheit doch oft nicht bewahrheitet (vgl. Henderson 1995). Im Interview brachte ein leitender Angestellter eines Forschungskonsortiums seine Einschätzung der Vorhersagekraft der Roadmap auf den Punkt:

“Look, I think by and large when you look at it, I think it's a pretty successful process, apart from the fact that it's completely unable to predict anything.”

Ein leitender Angestellter eines Zulieferers drückt es folgendermaßen auf:

„Bei der Roadmap gibt es auch ein interessantes Spiel. Es gibt ja eine offizielle Roadmap, eine Industrie-Roadmap, die ITRS. Das ist *fake*, das ist wirklich *fake*. Die ist vom Timing her *fake* und auch von vielen ... nicht alles ist schlecht, aber z.B. das Timing ist nicht real. Alle Firmen haben eine reale Roadmap und es ist immer das Spiel, eigentlich will man schneller sein als die Roadmap, deswegen macht man die offizielle Roadmap ein bisschen langsamer.“

Die Bedeutung des Timings kann dabei nicht unterschätzt werden, da besonders kleinere Unternehmungen durch die immensen Entwicklungskosten von einer rechtzeitig erzielbaren Rendite abhängen, sofern sie die Entwicklungskosten überhaupt schultern können. Zwei in der Halbleiterindustrie prominente Beispiele für schlechtes Timing sind der Verkauf des U.S.-amerikanischen Lithografiertool Herstellers SVGL an den holländischen Konkurrenten ASML

und der Abbruch der Entwicklungsarbeiten für die 157nm Lithografie. In beiden Fällen spielt die Roadmap eine Rolle.

Im Falle der Übernahme von SVGL durch ASML wird angeführt, dass die Probleme von SVGL, auf den ersten Blick vielleicht paradox, gerade daher rührten, die von der Roadmap vorgegebenen Ziele für die 193nm Lithografie zu erfüllen. Als die Technologie fast einsatzbereit war, nahmen aber mehrere Abnehmer ihre Anfragen zurück, da durch die Verbesserungen der bereits im Einsatz befindlichen Vorläufertechnologie (der 248nm Lithografie), ein Umstieg hinausgezögert werden konnte. SVGL äußert sich dazu in einem Plan zum Zusammenschluss mit ASML vor der U.S.-amerikanischen Securities and Exchange Commission:

„In June 1999, five participants withdrew from our 193-nanometer development program and declined delivery of initial tools. These participants withdrew in part due to delays in our product development and due to changes in their technical requirements for our product.“

(Silicon Valley Group Inc. 2000: 14)

In diesem Dokument wird die besondere Rolle der Zeit und die Bedeutung der Erwartungen im Halbleitergeschäft herausgestellt:

„Our expenses for the most part are fixed in the short term and are based in part on our expectations for future revenues. As a result, our operating results for a quarter may be impacted because we can not adjust our expenses if:

- our customers cancel or reschedule their orders or shipments,
- we experience production or shipping delays,
- we do not receive anticipated customer orders or
- we ship fewer systems than we anticipate“

(Silicon Valley Group Inc. 2000: 12)

Zwar hat jedes Geschäft eine zeitliche Dimension, in der Halbleiterindustrie aber wird diese durch die immensen Entwicklungskosten und den schnellen technologischen Wandel gerade für kleinere Unternehmungen jedoch sehr schnell prekär, da es nur eine kleine Anzahl von Abnehmern weltweit gibt und die Technologien selbst nur für kurze Zeit den aktuellen Stand der Technik repräsentiert (vgl. Linden et al. 2000: 96-97). Die Bereitstellung neuer Lithografiertechniken darf also nicht zu früh erfolgen, weil die Entwickler dann zu lange auf ihre Rendite warten müssen. Ebenso ist eine verspätete Markteinführung nicht wünschenswert, da die Technologie sehr schnell veraltet. Diese Spannung ist besonders für einzelne Firmen umgekehrt proportional zu ihrer Größe spürbar.

Nicht nur für einzelne Unternehmungen kann die Orientierung an der Roadmap problematisch sein. Ebenso können gemeinsame Entwicklungsvorhaben unerwartet abbrechen, wie im Fall der 157nm Lithografie, einer Technologieoption, die zwischen 2001 und 2003 in der Roadmap als wahrscheinliche Option für die zukünftig benötigte Fertigungstechnologie galt. So war die 157nm-Option der ITRS-Favorit 2001, um Strukturen von 65nm zu belichten und eine bevorzugte Lösung für 45nm in der ITRS Ausgabe 2003. Nach einer im Mai 2003 veröffentlichten Pressemitteilung von Marktführer Intel, diese technologische Option entgegen früherer Aussagen und Aktivitäten nicht weiterzuführen, stellten auch die anderen Chiphersteller und Zulieferer ihre Entwicklungsarbeiten ein; Entwicklungsarbeiten, die sich bis dahin auf mehrere hundert Millionen Dollar summiert hatten. An diesen beiden Fällen zeigt sich, warum die Akteure in der Halbleiterindustrie (wie die zwei vorherigen Interviewausschnitte aufzeigen) die Vorhersagekraft der ITRS kritisch betrachten und ihre Verbindlichkeit nicht überschätzen.

Dennoch ist die ITRS ein für die gesamte Branche wichtiges Prognose- und Planungsinstrument. Diese Bedeutung bezieht die Roadmap aus der Beteiligung der relevanten Industrieunternehmen, wie ein leitender Angestellter eines Chipherstellers rückblickend erklärt:

„And so I was involved in the 1994 version, but since that time – I’m not saying it in a negative way – it was dominated more by universities and national labs because they were the ones receiving most of the funding. The industry was participating but somewhat almost like a spectator. ... The '97 already was very different because there was a much larger industry component that began changing many of the numbers that at times were theoretical and not very practical. And in addition I observed another problem. At times I would go to Japan there would be a presentation showing how the roadmap was wrong and they were right. So, the best way if you want to be right, then you take the people that criticize and make them part of the process.“

Der Drang nach weltweitem Konsens wirkt dabei sowohl auf die Chiphersteller wie auch auf die Produzenten der Fertigungstechnologie und ihrer Zulieferer. Die Chiphersteller bevorzugen eine Dual Sourcing-Strategie, um nicht von einem einzigen Zulieferer abhängig zu sein. Ebenso ermöglichen gemeinsame Industriestandards für die Fertigungstechnologie den Zulieferern der Chipindustrie ein verbreitertes Abnehmerspektrum.⁷ Interessant ist, dass die Wahrnehmung der Verbindlichkeit und damit auch der Orientierungsfunktion der Roadmap mit der jeweiligen Position der Firma entlang der Wertschöpfungskette variiert.

Das lässt sich an den vorhergesagten Einführungszeitpunkten einer neuen Technologiegeneration verdeutlichen. In unseren Interviews zeigt sich das Bild, dass die Computerchiphersteller – unter dem in der Industrie üblichen Vorbehalt – die Einführung der nächsten Lithografiegeneration ausnahmslos als sicher einstufen, während die Hersteller der Fertigungstechnologie selbst sowie ihre direkten Zulieferer deutlich Vorbehalte zum Ausdruck bringen. Momentan sehen letztere etwa eine kritische Phase im Entwicklungsprozess der zurzeit weltweit als wahrscheinlich geltenden Option für die nächste Generation von Fertigungstechnologien, der so genannten EUV Lithografie. Die geäußerte Vorsicht rührt daher, dass Intel, der bisherige Treiber der Entwicklung der EUV Lithografie, auf der wichtigen SPIE Konferenz Anfang 2006 in einem zentralen Plenarvortrag die Einführung von EUV aufgrund von Weiterentwicklungen der optischen Lithografie etwas weiter nach hinten verschob.⁸ Nach Auffassung der Zulieferer benötige man nun einen neuen Treiber, d.h. einen relevanten Chiphersteller, um die vorhergesagte Einführung der EUV Technologie realisieren zu können.

Allgemein lässt sich feststellen, dass der wahrgenommene Grad der Verbindlichkeit mit zunehmender finanzieller Abhängigkeit von einer einzigen technologischen Option sinkt. So äußerte sich ein spezialisierter Komponentenhersteller, dass er erst dann von der Durchsetzung der EUV Technologie sprechen würde, wenn er die Bestellungen in seinen Büchern vorliegen habe. Diese Aussage weist entgegen der niedrig eingeschätzten Verbindlichkeit auf die zentrale Orientierungsfunktion der Roadmap in der internationalen Halbleiterindustrie hin.

Wie schon oben am Zitat von Paolo Gargini deutlich wurde, hängt die erfolgreiche Einführung einer neuen Technologiegeneration an der konzertierten Entwicklung einer kompletten Infrastruktur aller für die Systemtechnologie benötigten Einzelkomponenten. Gerade für kleinere Unternehmungen ist das Investieren in die ungewisse Zukunft einer anderweitig nicht verwertbaren Technologiekomponente wenig attraktiv. Die Roadmap fungiert diesbezüglich

⁷ Bereits Anfang der 1970er Jahre schlossen sich die U.S.-amerikanischen Zulieferer der Halbleiterindustrie im Semiconductor Equipment and Materials Institute (SEMI) zusammen, um durch die Standardisierung ihrer Produkte ihre Position gegenüber den Chipherstellern zu stärken.

⁸ http://download.intel.com/technology/silicon/Yan_Borodovsky_SPIE_2006.pdf

als Orientierungshilfe in der gemeinsamen Technologieentwicklung, um die Möglichkeiten und ganz besonders die Probleme einer Technologie besser abschätzen zu können. Dadurch können sich die Chiphersteller öffentlich und gemeinsam auf aus ihrer Sicht vielversprechende Technologien einigen und die Zulieferer können sich an diesen Vorgaben orientieren. Die Technologieentwicklungsabteilungen der Zulieferer können ihrerseits die Roadmap nutzen, um Legitimation und Zustimmung für eine Technologieoption innerhalb ihrer Firma zu erzeugen und über Jahre hinweg aufrecht zu erhalten.

Eine viel höhere Verbindlichkeit für die Zulieferer weisen allerdings die internen Technologieroadmaps der Unternehmungen auf, die nicht öffentlich, in bilateralen Gesprächen mit ihren Zulieferern/Abnehmern abgeglichen werden. So mag die ITRS zwar typischer Weise fehlerhaft sein, aber alle Interviewpartner stellten die bedeutende Orientierungsfunktion und, noch viel wichtiger, die Notwendigkeit zu einer kompetenten Deutung der Roadmap heraus. Dazu ein leitender Angestellter eines Forschungskonsortiums:

„I think first and foremost it helps people within organizations to align their resources to be able to tackle these problems. So if you’ve got a champion within the company and by making use of the roadmap or making use of these surveys, they can help get the management support they need. But apart from that, at the end of the day it’s purchase orders and signed contracts that really decide. You know, it’s the purchase orders for the tools, it’s the purchase orders for the sub-components within the tools. It’s the purchase orders for the research contracts. It all flows down and it’s money and bilateral agreements, the multilateral piece helps people stay synchronized.“

Fehlerhaft sei die Roadmap nach Aussagen anderer Industrieexperten vor allem, weil sie rein technische Aspekte beurteile und keine Aussagen über die Wirtschaftlichkeit einer Technologie mache. Aus diesem Grund gibt es neben der Roadmap bzw. dem Prozess des Roadmapping noch unzählige bilaterale Beziehungen zwischen den Unternehmungen, in denen die konkrete Entwicklungsarbeit abgestimmt wird, wie ein leitender Angestellter eines Zulieferers betont:

“Wir machen Roadmaps, die wir von unseren Produkten ableiten und die wir den Lieferanten geben. Das sind also Ziele, wo wir dann in regelmäßigen Meetings mit unseren Fachleuten und den Lieferanten checken, wo wir stehen.“

Während also die organisationsinternen Produkt-Roadmaps eine hohe Verbindlichkeit besitzen und zur direkten Abstimmung kooperativer Entwicklungsvorhaben dienen, ist die ITRS wenig verbindlich. Die in ihr gemachten Prognosen würden denn auch, so heißt es in der Branche, oft „nur“ zu politischen Zwecken genutzt, etwa um eine technologische Option besser aussehen zu lassen, als sie es „tatsächlich“ ist.

Alle Industrieexperten wiesen darauf hin, dass es nicht sonderlich schwer sei, eine technologische Option auf die ITRS zu bringen. Als Beispiel dafür wurde in den Interviews oft die so genannte Elektronen Projektionslithografie (EPL) angeführt, deren Existenz auf der Roadmap der letzten Jahre allein dem Bestehen eines Japanischen Forschungsprogramms geschuldet sei, obwohl sich die Industrie von dieser Option im Prinzip schon abgewandt habe.⁹ Tatsächlich war EPL schon auf der 2003er Ausgabe der Roadmap als Option gekennzeichnet, die nur in einer Region verfolgt würde und schließlich wurde EPL nach Auslaufen des staatlichen Förderprogramms von der 2005er Ausgabe der Roadmap genommen. Auch dieser Punkt unter-

⁹ Bei dieser Einschätzung kann es sich um einen euro-amerikanischen Bias handeln, da EPL in den letzten Jahren hauptsächlich in Japan entwickelt wurde unsere Interviewpartner bis auf eine Ausnahme aber nicht aus Japan kamen.

streicht die Notwendigkeit für die Industrieexperten, eine kompetente Lesart der ITRS zu entwickeln, um die legitimatorischen Aspekte von denen der technologischen und ökonomischen Machbarkeit zu trennen und somit zu einer treffenderen Einschätzung der Entwicklung zu gelangen. Vor diesem Hintergrund kann man die Rolle der ITRS noch einmal präzisieren, wie dies ein Industrieexperte im Interview tat:

„Natürlich wie gesagt, da ist schon Politik drin. Also die Roadmap ist eine Sache, da steht eigentlich nur drin, wann man was können muss. Wie man des macht, steht noch nicht drin.“

Im Gegensatz zur Metapher der Straßenkarte zeigt die ITRS gerade nicht einen vorgegebenen schnellsten Weg zum Ziel. Man sollte sie daher eher mit einer Art Kompass vergleichen, der in die Richtung zeigt, die in der Industrie als erstrebenswert angesehen wird. Den Weg entlang dieser Technologieentwicklungsrichtung müssen die Akteure selber bahnen, sie müssen die damit verbundenen technologischen und ökonomischen Unwägbarkeiten bewältigen und sich darüber verständigen, welche der einzuschlagenden Richtungen denn mit größter Wahrscheinlichkeit zum erstrebten Ziel führt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die ITRS auf globaler Ebene daher eine wichtige Orientierungsfunktion einnimmt, wobei die geringe Verbindlichkeit und Vorhersagekraft durch die kompetenten Akteure in für sie brauchbare Aussagen rückübersetzt wird. Es wird deutlich, dass nicht die Roadmap an sich ein wertvolles Instrument ist, sondern erst durch Initiierung weltweiter Koordinations-, Aushandlungs- und Orientierungsprozesse im Prozess des Technologie-Roadmappings zu diesem wertvollen Instrument wird. Somit konstituieren sich neben der konkreten Technologieentwicklung auch die kooperativen F&E-Netzwerke über die ITRS, ebenso wie umgekehrt über diese Netzwerke wiederum die ITRS konstituiert wird. So ist es sicherlich kein Zufall, dass die ITRS eine Partnerorganisation von SEMATECH ist und die NTRS überhaupt erst durch den Industrieverband SIA ins Leben gerufen wurde.

3.2 Rekursive Technologieentwicklung und die ITRS

Mit Bezug auf das Hier und Jetzt der ITRS lässt sich nach dem bisher Gesagten feststellen, dass es in unserem Fall im Kern eben nicht um die Vorhersage technologischer Entwicklungen analog zu einer Vorhersage wie der des Wetters handelt. Die Lithografiegenerationen ziehen nicht im Dreijahresrhythmus wie meteorologische Phänomene über die Halbleiterindustrie hinweg – vielmehr werden sie *überhaupt erst durch die Vorhersage erschaffen*. Das bedeutet, dass sich die Unternehmungen im Roadmapping-Prozess nicht nur auf eine vorhergesagte Entwicklungsrichtung einstellen, sondern eben diese Entwicklungsrichtung durch ihre Teilnahme am Roadmapping-Prozess mitprägen. Das Phänomen der wechselseitigen Konstitution von Vorhersageinstrument und konkreter Technologieentwicklung wird im Folgenden als *rekursive Technologieentwicklung* bezeichnet.

Die ITRS ist in diesem Sinne keine selbst erfüllende Prophezeiung (Merton 1948), die allein dadurch wahr wird, weil sie gemacht wird (was andererseits auf das Moor'sche Gesetz durchaus zutrifft, s. van Lente/Rip 1998: 206-208). Trotzdem spielen Erwartungen der Akteure, auch Erwartungs-Erwartungen und die Prophezeiungen der Roadmap durchaus eine Rolle für die Technologieentwicklung. Wie orientieren nun die Akteure ihre Handlungen am Vorhersageinstrument und wie werden dadurch die Vorhersagen selbst verändert? Etwas deutlicher kann die Kraft einer solchen Vorhersage eingefangen werden, wenn man zusätzlich nach der Bedeutung des „Thomas-Theorems“ und des „Matthäus-Effekts“ für die Technologieentwicklung schaut (Merton 1995). Das Thomas-Theorem beschreibt bekannter Maßen den Umstand,

dass wenn Menschen eine Situation als real definieren, diese Situation reale Konsequenzen hat (Thomas/Thomas 1928: 572), während man unter dem Matthäus-Effekt einen selbstverstärkenden Prozess versteht (umgangssprachlich aus dem Matthäus Evangelium: „Wer hat, dem wird gegeben).

Das Thomas Theorem und die ITRS

In Einklang mit den Zweifeln der Industrieexperten muss man im Sinne des Thomas-Theorems die Frage stellen, welche Situation denn genau in der Roadmap definiert wird. Sicher nicht die einer belastbaren Vorhersage von Technologieeinführungszeitpunkten.¹⁰ Aus den bisherigen Interviewzitatzen lässt sich die Vermutung ableiten, dass die ITRS von den relevanten Akteuren eben gerade als politisches Artefakt und unzuverlässige Technologievorhersage gedeutet wird, was die reale Konsequenz hat, dass neben der Roadmap als Resultat der darin betriebene Abstimmungsprozess mindestens ebenso von Bedeutung ist. Dieser Punkt ist gesondert zu beachten, da es sich ja nicht um individuelle Situationsdefinitionen handelt, sondern um kollektiv ausgehandelte: Es ist der kollektive Aushandlungsprozess, der sowohl die kollektive Situationsdefinition der ITRS hervorbringt, gleichzeitig aber auch die Kompetenz der Akteure, diese Situationsdefinition als politisches Artefakt zu erkennen und in seiner Relevanz für die Managemententscheidungen der jeweiligen Firma zu dekodieren. Die ITRS muss demnach auch immer in Zusammenhang mit den anderen Abstimmungspraktiken des Feldes, also Konferenzen, Workshops, Teilnahme an Forschungskonsortien und Joint-Ventures, gesehen werden. Folglich ist die ITRS – und das sollte bis hier deutlich geworden sein – weder eine beliebige Fiktion noch ein zuverlässige Vorhersage. Nutzen wir das Thomas-Theorem für die Analyse der rekursiven Technologieentwicklung, so kann man die Erstellung der ITRS als Vorhersage einer technologischen Entwicklungslinie als reale Konsequenz einer gemeinschaftlichen Situationsdefinition innerhalb der Halbleiterindustrie verstehen. Gleichzeitig fungiert sie selbst wieder als Definition einer Situation, an der die Akteure ihre Handlungen kompetent orientieren. Sie ist gewissermaßen ein kollektiver Bezugspunkt, der durch die kollektive Bezugnahme zum einen erst dazu gemacht wird, der sich aber zum anderen dadurch auch kontinuierlich wandelt.

Der Matthäus-Effekt und die ITRS

Betrachten wir den Punkt der kollektiven Bezugnahme etwas genauer. Merton (1968, Merton 1988) hat mit seiner Formulierung des Matthäus-Effekts auf die selbstverstärkenden Tendenzen wissenschaftlicher Bezugnahmen, also Zitationen bzw. Referenzen, hingewiesen. Aber Wissenschaft ist nicht gleich industrielle Technologieentwicklung. Allein weil eine große Anzahl von Akteuren in der Halbleiterindustrie eine technologische Option favorisiert, muss diese Option noch lange nicht bis zum Einsatz in der Massenproduktion gelangen. Hier zeigen die falschen Vorraussagen der ITRS, dass kein unabhängiger sich selbst verstärkender Prozess am Werke ist, sondern dass die Bezugnahme auf eine technologische Option kontinuierlich von den Akteuren aufrecht erhalten werden muss (Windeler 2003). Nach dem Rückzug Intels von der 157nm Lithografie beispielsweise versuchten die verbliebenen Befürworter die Technologie auch ohne den Champion noch eine Zeitlang weiterzuentwickeln, stellten dann aber doch ihre Bemühungen ein. Und selbst die so massiv geförderte EUV Lithografie kam ins Schlingern, als Intel die Einführung auf der eigenen Roadmap nach hinten verschob. Die Po-

¹⁰ Das Scheitern einer Firma an der ITRS lässt sich dagegen sehr wohl durch das Thomas-Theorem beschreiben: Definiert eine Firma die Einführungszeitpunkte von Technologien anhand der Roadmap als real, so hat dies (höchst wahrscheinlich) die reale Konsequenz, dass diese Firma bankrott geht. In diesem Fall haben wir es mit den klassischen unintendierten Konsequenzen absichtsvoller Handlungen zu tun (Merton 1936).

sition Intels als unangefochtenem Marktführer kann wiederum sehr schön durch den Matthäus-Effekt beschrieben werden. Betrachtet man neben den vorhergesagten technologischen Optionen auch die voraussichtlichen ökonomischen Transaktionen so wird die Nachfragemacht Intels auch durch die Bezugnahme der Zulieferer auf Intel konstituiert. Anders ausgedrückt: Erst durch die allgemeine Akzeptanz der Marktführerschaft Intels und der sich daraus für die Zulieferer ergebenden Absatzkalkulation kann diese Marktführerschaft entstehen. Zudem orientieren sich auch die anderen Chiphersteller an Intel, so dass die Einführung einer neuen Fertigungstechnologie ohne Intel fast undenkbar erscheint.

Nutzen wir den Matthäus-Effekt zur Analyse der wechselseitigen Bezugnahmen in der Halbleiterindustrie so wird deutlich, dass neben der ITRS die (strategischen) Manöver der relevanten Akteure hohe Aufmerksamkeit finden. Die relevanten Akteure können diese Aufmerksamkeit nutzen um daraus noch mehr Aufmerksamkeit und damit Bedeutung zu erzeugen. Dieser Effekt lässt sich dann auf die Richtung der Technologieentwicklung übertragen. Wenn beispielsweise Intel, wie Ende der 1990er Jahre geschehen, seine F&E-Bestrebungen auf die EUV Lithografie konzentriert (vgl. Linden et al. 2000), kann es vorkommen das andere Hersteller wie IBM und Infineon, ihre alternativen Entwicklungsrichtungen verlassen um mit dem Marktführer – zumindest teilweise – mithalten zu können. Intels eigene Bestrebungen in der EUV Lithografie fasst ein leitender Angestellter so zusammen:

„If this technology doesn't work, we're going to be out on the order of \$250 million. On the other hand, if it works, what we want to do is recover our investment. But more importantly, what we want is access to the tools prior to our competitors who didn't take that risk.“

(Sander H. Wilson, zitiert in Linden et al. 2000: 103)

Intel gibt eine Entwicklungsrichtung vor, bei der nicht nur der Weg festgelegt wird, sondern auch wer auf diesem Weg gehen wird. Die Gruppe der risikofreudigen Halbleiterhersteller, die Intel um die EUV-Technologie scharen will soll - im übertragenen Sinne - einen Vorsprung auf dem von ihr gebahnten Weg haben. Unternehmungen die nicht an der gemeinsamen Entwicklungsleistung beteiligt sind hätten dementsprechend einen sehr realen technologischen Nachteil. Rekursive Technologieentwicklung bedeutet in diesem Falle sowohl die Vorhersagen der ITRS als auch die reale F&E-Arbeit als Komponenten der Technologieentwicklung zu begreifen.

Gegenwart und Zukunft rekursiver Technologieentwicklung

Bei genauerem Hinsehen stellt sich die Rekursivität zwischen Vorhersage und Gegenwart als gleichzeitiger Prozess der wechselseitigen Stabilisierung von Erwartungen und einer an den Erwartungen orientierten Entwicklung dar, wobei die an den Erwartungen orientierte Entwicklung dann wiederum die Erwartungen beeinflusst. Demgemäß bedeutet das erfolgreiche Manövrieren in diesem Wechselspiel für die Unternehmungen der Halbleiterindustrie nicht nur die Möglichkeit, rechtzeitig auf das „richtige Pferd“ zu setzen, sondern gleichzeitig – wenn wir im Bild des Pferdesports bleiben – die Bedingungen des Rennens, d.h. die Erfolgskriterien der Technologie in technologischer wie in ökonomischer Sicht in einem gewissen Rahmen zu manipulieren. Gerade machtvolle Akteure wie Intel sind prädestiniert dazu im Sinne des Thomas-Theorems eine relevante Situationsdefinition strategisch zu platzieren und das geschickte Manövrieren innerhalb der von ihnen definierten Situation verschafft ihnen gemäß dem Matthäus-Effekt zusätzlichen Einfluss.

Die ITRS kann als ein Element rekursiver Technologieentwicklung in der Halbleiterindustrie angesehen werden. Sie ist in diesem Sinne keine sich selbst erfüllende Prophezeiung, sondern

eine Prophezeiung die erst noch von machtvollen Akteuren erfüllt werden muss, wobei besonders die oben erwähnte Gleichzeitigkeit von Vorhersage und F&E sowie die politischen Aspekte des Roadmapping-Prozesses in den Mittelpunkt rücken. Andere Elemente sind Machbarkeitsumfragen nach wichtigen Konferenzen oder die Teilnahme an zentralen F&E-Programmen. Dazu abschließend noch ein leitender Angestellter einer Zulieferfirma:

„Meine Kollegen sagen mir immer: na, bei euch (in der Halbleiterindustrie) ist das ja toll, ihr habt 'ne Roadmap, und dann wisst ihr schon, welche Produkte ihr machen sollt, und dann lach' ich immer laut los. Weil, es ist nichts fehllitender als diese offiziellen Roadmaps. Das muss man so verstehen, was dahinter ist, und letzten Endes mit den Kunden wirklich den Kontakt haben, um zu sehen, wo die wirklichen Bedürfnisse sind. Es ist auch im hohen Grade ein politisches Artefakt.

...

Also diese berühmte ITRS Roadmap. ... Auf diese berühmten Optionen auf der Roadmap kommt man relativ leicht, also wenn einer der Chiphersteller sagt, er sieht das als eine Option, dann ist es dann meistens dann schon drauf. Welches Gewicht das hat, ist dann damit überhaupt nicht gesagt. Und wie sich das entwickelt, welche Option sich durchsetzt, ich mein, es geht in unserem Geschäft überhaupt nicht, eigentlich gar nicht um Technologie, sondern um Geschäft, und das ist, mein ich sehr, sehr hart.“

3.3 Die ITRS im Kontext anderer F&E-Praktiken

Wie schon gesagt, ist die ITRS nur ein Instrument zur Planung der Technologieentwicklung in der Halbleiterindustrie. Um ihre Funktion als Branchen-Roadmap zu verstehen ist es notwendig, noch etwas genauer auf die anderen Elemente einzugehen. Der letzte Satz des vorhergehenden Zitats macht noch einmal sehr deutlich, dass es sich beim Gegenstand der ITRS um die Entwicklung einer immens kapitalintensiven und komplexen Systemtechnologie handelt. Die Entwicklung dieser Technologien findet seit ungefähr zwanzig Jahren in zunehmend global vernetzten F&E-Konsortien statt, da keine einzelne Unternehmung das Know-how bzw. das Kapital für eine Alleinentwicklung aufbringen möchte oder gar könnte. Neben den industriell finanzierten F&E-Konsortien wie SEMATECH in den USA, IMEC in Belgien oder SELETE in Japan, bestehen staatliche Förderprogramme wie MEDEA+ in Europa oder MIRAI in Japan in denen gemeinsam an neuen Fertigungstechnologien für die Halbleiterbranche geforscht wird. Zusätzlich gibt es eine ganze Reihe von Konferenzen und Workshops in den USA, in Europa und in Asien, auf denen der technologische Stand der Dinge mehr oder weniger genau vorgestellt und diskutiert wird. Schließlich sollte man die bilateralen Joint-Ventures nicht vergessen. Die ITRS als kollektives Vorhersageinstrument ist direkt in dieses Bündel aus kollaborativen F&E-Praktiken eingebunden.

An dieser Stelle ist noch einmal drauf hinzuweisen, dass sich die Funktionsweise und Bedeutung der ITRS mit den Jahren gewandelt hat, wie ein leitender Angestellter eines Chipherstellers im Interview betont:

„Instead of arguing at a distance on a theoretical basis, once you get everybody into a room, the first couple of years there were many people dissenting. But by now the level of agreement is very high because, first of all, they know each other and trust each other and at this point they're not positioned any longer. There is not enough time or enough money to support options that are not viable. And so I

think it has become a much more useful document, because it really provides a guidance.“

In dieser Aussage wird noch einmal auf die besondere Bedeutung der Zusammenarbeit hingewiesen. Die Roadmap bezieht ihre Legitimation nicht allein aus der Tatsache, dass sie als überparteiliches, kollektiv erstelltes Vorhersageinstrument angesehen wird, sondern gerade aus den zur Erstellung der Roadmap nötigen Beziehungen zwischen den Firmen. Dadurch können Vertrauensverhältnisse etabliert, die Möglichkeiten und Grenzen der jeweiligen Technologieoptionen diskutiert und die Akzeptanz kooperativer F&E Anstrengungen erhöht werden.

4. Resümee und Ausblick

Wie sich gezeigt hat ist die ITRS als ein dynamischer Prozess zu verstehen, der nicht nur in Bezug auf die technologischen Optionen – im Sinne einer rollierenden Planung – beständig aktualisiert wird, viel mehr verändern sich auch die Funktion und Bedeutung der ITRS über die Jahre. War es anfangs noch das Ziel überhaupt erst einen Diskussionsprozess über vielversprechende Entwicklungen zu initiieren so stehen heute direkte ökonomische Interessen im Vordergrund. Mit dieser Entwicklung und der stärkeren Beteiligung der Industrie am Roadmapping-Prozess nahmen die Verbindlichkeit und die Orientierungsfunktion zu, ohne dass die ITRS tatsächlich damit ein verlässliches Vorhersageinstrument ist.

Will man technologische Innovation in der Halbleiterindustrie mittels der ITRS verstehen, so muss man sie in den Kontext der anderen dort praktizierten F&E-Aktivitäten setzen. Besonders interessant scheint hier die unterstützende Orientierungsfunktion der Roadmap für die sich immer stärker vernetzenden Akteurskonstellationen sein. An dieser Stelle sei auf zwei weiter führende Fragen zum Thema hingewiesen.

Erstens kann die Entstehung und Etablierung der ITRS als Industrie-Roadmap im Sinne des „institutional entrepreneurship“ (DiMaggio 1988: 14) genauer analysiert werden. Technology Roadmapping kann dann als eine neue Institution verstanden werden, die kollektiv von den Akteuren der Halbleiterindustrie hervorgebracht wurde. Es wäre hier zu schauen, welche Akteure und Konstellationen von Akteuren mit welchen Interessen an der Initiierung der ITRS beteiligt waren, wie die ITRS als legitime Orientierung innerhalb der Halbleiterindustrie etabliert wurde und wie sie sich in diesem Prozess gewandelt hat (vgl. Garud et al. 2002). An diesem Punkt wäre die genauere Betrachtung der Rolle rekursiver Technologieentwicklung in kollektiven F&E-Prozessen sinnvoll und eine Auseinandersetzung mit den ehemaligen und aktuellen Organisationsformen des technologischen Fortschritts (Inhouse vs. Netzwerke) in der Halbleiterindustrie lohnend (s. Ham et al. 1998, Mowery/Rosenberg 1998, Browning/Shetler 2000, West 2001, Carayannis/Alexander 2004, Chuma 2006).

Um eine zentrale Frage der Roadmap aufzunehmen wäre *zweitens* zu untersuchen wie genau der Selektionsprozess des „narrowing of options“ vonstatten geht. Wir gehen dieser Frage im Forschungsprojekt „Path-Creating Networks: Innovating Next Generation Lithography in Germany and the U.S.“ unter besonderer Berücksichtigung der Rolle von netzwerkartig organisierten Forschungsk Kooperationen nach (vgl. Sydow et al. 2004). Welche Rolle die ITRS als Orientierungsinstrument neben den Konsortial- und Konferenzaktivitäten zur Koordination und Aushandlung dann für die Erzeugung des Momentum für einen neuen technologischen Pfad (Windeler 2003, Meyer/Schubert 2005) innehat, wäre an dieser Stelle zu überprüfen. Technologische Entwicklungen als Pfade (David 1985, Arthur 1989) zu verstehen, die nicht unkontrolliert hinter dem Rücken der Akteure emergieren, sondern die ebenso absichtsvoll geschaffen werden können (Garud/Karnøe 2001, Rip/Schot 2002), ist hier eine fruchtbare Perspektive.

Für die Frage nach technologischen Innovationen an sich, ist besonders die kollektive Hervorbringung komplexer Technologien von Interesse (Langlois/Robertson 1995, Powell et al. 1996). So geht es nicht allein um die Einführung einer funktionierenden Technologie, sondern gleichzeitig um die Koordinierung einer tragfähigen Allianz zur Produktion dieser Technologie (s. Callon 1991, 1992). Im Fall der Halbleitindustrie betrifft dies hauptsächlich die vorwettbewerbliche Aufstellung der gesamten benötigten Infrastruktur vom Materialzulieferer für Subkomponentenhersteller über die Produzenten der Fertigungstechnologeanlagen bis hin zu den Chipherstellern in den kollaborativen F&E-Vorhaben. Die ITRS hilft, die Aktivitäten heterogener Konstellationen von Akteuren mit den ihnen eigenen Interessenlagen aufeinander abzustimmen und drauf aufbauend strategische Allianzen auszubilden, die einzelne technologische Optionen unterstützen (vgl. Kemp et al. 1998). Sie geht dabei über den Status eines reinen „boundary objects“ (Star/Griesemer 1989) hinaus, da sie nicht nur heterogene Akteursgruppen koordiniert, sondern auch deren jeweilige Aktivitäten aufeinander ausrichtet. Technologische Entwicklungen und institutionelle Arrangements sind in diesem Prozess eng miteinander verbunden (van de Ven/Garud 1994) und können sich wechselseitig stabilisieren, wie es Fujimura (1988) am Beispiel des „scientific bandwagon“ gezeigt hat.

Allgemeiner gefasst ist die Technologievorhersage insofern ein konstitutives Element der Technologieentwicklung und über die Technologieentwicklung werden wiederum die Teile der Technologievorhersage konstituiert. Die Vorhersage wie auch die Entwicklung sind eingebettet in die so genannten vorwettbewerblichen F&E-Beziehungen, über die sich wiederum die Akteure als Marktteilnehmer etablieren (Windeler/Schubert im Druck). Technologievorhersagen als Moment rekursiver Technikentwicklung dienen im Fall der ITRS hauptsächlich der wechselseitigen Orientierung der Akteure wobei andere Momente wie etablierte F&E-Netzwerke als Koordinationszentren fungieren, die ebenso durch die Koordinationstätigkeit die Technologieentwicklung beeinflussen und selbst erst durch technologische Entwicklungshindernisse zu akzeptierten Koordinationsformen wurden. Die Halbleiterindustrie ist für derartige wechselseitige Zusammenhänge ein ergiebiges Forschungsfeld, da durch die hohe technologische Entwicklungsdynamik eine hohe Dynamik sozialer Aktivitäten wie Koordination, Aushandlung und Orientierung besteht und die industrieweiten – und damit weltweiten – Veränderungsprozesse in relativ kurzen Zeiträumen und mit einer relativ überschaubaren Anzahl relevanter Akteure beobachtet werden können. Dabei ist nicht zu vergessen, dass die technologische Entwicklungsdynamik nicht aus sich heraus existiert, sondern zum großen Teil durch die gemeinsam angestrebte Erfüllung der Vorhersagen des Moore'schen Gesetzes getrieben ist, also durch die Befolgung selbst auferlegter Entwicklungsziele.

Am Beispiel der ITRS zeigt sich, dass es beim Technology Roadmapping als industrieweiter Koordinationspraxis weniger um die Prognose einer antizipierten Technologieentwicklung oder um einen „gültigen Fahrplan“ zukünftiger Technologieentwicklung handelt. Die Bedeutung der ITRS liegt dagegen zu großen Teilen in der Gegenwart der kooperativen Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen. Die Roadmap in der Halbleiterindustrie ist ein Instrument der Planung technologisch komplexer, ökonomisch aufwendiger und dabei hoch risikoreicher kooperativer Entwicklungsvorhaben. Da Technologieentwicklung zunehmend in verteilten, heterogenen Konstellationen von Akteuren durchgeführt wird, werden auch die Praktiken der Koordination solcher Vorhaben an Bedeutung gewinnen. Der wechselseitige Zusammenhang von Prognose und Gegenwart in den Vorhersageinstrumenten stellt dabei einen wichtigen analytischen Punkt dar, da hier die kollektiven Orientierungen der beteiligten Akteure expliziert werden und in ihrer Gestaltungskraft für zukünftige Technologien deutlich zutage treten.

Literaturverzeichnis

- Arthur, W. Brian (1989): Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. In: *Economic Journal*, 99: 116-131.
- Barker, Derek/David J. H. Smith (1995): Technology foresight using roadmaps. In: *Long Range Planning*, 28 (2): 21-28.
- Borodovsky, Yan (2006): Marching to the beat of Moore's Law. San Jose, SPIE Microlithography plenary talk slides, Url: http://download.intel.com/technology/silicon/Yan_Borodovsky_SPIE_2006.pdf.
- Browning, Larry D./Judy C. Shetler (2000): SEMATECH: Saving the U.S. semiconductor industry. College Station, Texas A&M University Press.
- Callon, Michel (1991): Techno-economic networks and irreversibility. In: Law, John (Hg.): *A sociology of monsters? Essays on power, technology and domination*. London, Routledge: 132-161.
- (1992): The dynamics of techno-economic networks. In: Coombs, Rod/Saviotti, Paolo/Walsh, Vivien (Hg.): *Technological change and company strategies*. London, Academic Press: 72-102.
- Carayannis, Elias G./Jeffrey Alexander (2004): Strategy, structure and performance issues of pre-competitive R&D consortia: Insights and lessons learned from SEMATECH. In: *IEEE Transactions on Engineering Management*, 51 (2): 226-232.
- Chuma, Hiroyuki (2006): Increasing complexity and limits of organization in the microlithography industry: implications for science-based industries. In: *Research Policy*, 35: 394-411.
- David, Paul A. (1985): Clio and the economics of QWERTY. In: *American Economic Review*, 75 (2): 332-337.
- DiMaggio, Paul J. (1988): Interest and agency in institutional theory. In: Zucker, Lynne G. (Hg.): *Institutional patterns and organizations: Culture and environment*. Cambridge, Ballinger: 3-22.
- Fujimura, Joan (1988): The molecular biological bandwagon in cancer research: Where social worlds meet. In: *Social Problems*, 35 (3): 261-283.
- Garcia, Marie L./Olin H. Bray (1997): Fundamentals of technology roadmapping. Sandia National Laboratories, Strategic Business Development Department.
- Gargini, Paolo (2002): Worldwide technologies and the ITRS in the current economic climate. SPIE Proceedings Vol. 4688, p. 25-28, Url: <ftp://download.intel.com/research/library/IR-TR-2002-8-PaoloSPIE02.pdf>.
- Garud, Raghu/Peter Karnøe (2001): Path creation as a process of mindful deviation. In: Garud, Raghu/Karnøe, Peter (Hg.): *Path dependence and creation*. Mahwah, Lawrence Erlbaum Associates: 1-38.
- Garud, Raghu/Sanjay Jain/Arun Kumaraswamy (2002): Institutional entrepreneurship in the sponsorship of common technological standards: The case of Sun Microsystems and Java. In: *Academy of Management Journal*, 45 (1): 196-214.
- Groenveld, Pieter (1997): Roadmapping integrates business and technology. In: *Research-Technology Management*, 40 (5): 48-55.
- Ham, Rose Marie/Greg Linden/Melissa M. Appleyard (1998): The evolving role of semiconductor consortia in the United States and Japan. In: *California Management Review*, 40 (1): 137-163.
- Henderson, Rebecca (1995): Of life cycles real and imaginary: The unexpected long old age of optical lithography. In: *Research Policy*, 24 (4): 631-643.
- Jantsch, Erich (1967): Technological forecasting in perspective. A framework for technological forecasting, its techniques and organisation. OECD.

- Kappel, Thomas A (2001): Perspectives on roadmaps: how organizations talk about the future. In: *The Journal of Product Innovation Management*, 18: 39-50.
- Kemp, René/Johan Schot/Remco Hoogma (1998): Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: the approach of strategic niche management. In: *Technology Analysis & Strategic Management* 10 (2): 175-195.
- Kostoff, Ronald N./Robert R. Schaller (2001): Science and technology roadmaps. In: *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48 (2): 132-143.
- Langlois, Richard N./Paul L. Robertson (1995): Innovation, networks, and vertical integration. In: *Research Policy*, 24 (4): 543-562.
- Levinson, Harry J. (2001): *Principles of lithography*. Bellingham, SPIE PRESS.
- Linden, Greg/David C. Mowery/Rosemarie Ham Ziedonis (2000): National technology policy in global markets: Developing Next-Generation Lithography in the semiconductor industry. In: *Business and Politics*, 2 (2): 93-113.
- Merton, Robert K. (1936): The unanticipated consequences of purposive social action. In: *American Sociological Review*, 1 (6): 894-904.
- (1948): The self-fulfilling prophecy. In: *Antioch Review*, 8: 193-210.
- (1968): The Matthew Effect in science. In: *Science*, 159: 56-63.
- (1988): The Matthew Effect in science, II: Cumulative advantage and the symbolism of intellectual property. In: *ISIS*, 79: 606-623.
- (1995): The Thomas Theorem and the Matthew Effect. In: *Social Forces*, 72 (2): 379-424.
- Meyer, Uli/Cornelius Schubert (2005): *Die Konstitution technologischer Pfade. Überlegungen jenseits der Dichotomie von Pfadabhängigkeit und Pfadkreation*. TUTS Working Paper 6-2005. Berlin, Technische Universität, Institut für Soziologie.
- Möhrle, Martin G./Ralf Isenmann (Hg.) (2005): *Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologie-Unternehmen*. Berlin, Springer.
- Moore, Gordon E. (1965): Cramming more components onto integrated circuits. In: *Electronics*, 38 (8):
- Mowery, David C./Nathan Rosenberg (1998): *Paths of innovation. Technological change in 20th-century America*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Ogburn, William F. (1937): *Technological trends and national policy*. Washington, United States Government Printing Office.
- Phaal, Robert /Clare J. P. Farrukh/David R. Probert (2004): Technology roadmapping. A planning framework for evolution and revolution. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 71 (1-2): 5-26.
- Powell, Walter W./Kenneth W. Koput/Laurel Smith-Doerr (1996): Interorganizational collaboration and the locus of innovation: Networks of learning in biotechnology. In: *Administrative Science Quarterly*, 41 (1): 116-145.
- Probert, David R./Michael Radnor (2003): Frontier experiences from industry-academia consortia. In: *Research Technology Management*, 42 (2): 27-30.
- Pyke, Donald L. (1971): Mapping - A system concept for displaying alternatives. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 2 (3-4): 311-320.
- Rip, Arie/Johan W. Schot (2002): Identifying loci for influencing the dynamics of technological development. In: Sørensen, Knut H./Williams, Robin (Hg.): *Shaping Technology, Guiding Policy. Concepts, Spaces and Tools*. Cheltenham, Edward Elger: 155-172.
- Schaller, Robert R. (2004): *Technological innovation in the semiconductor industry: A case study of the international technology roadmap for semiconductors*. Fairfax, Ph.D. Dissertation, George Mason University, Url: http://www.xecu.net/schaller/schaller_dissertation_2004.pdf.
- Shandle, Jack (1992): Semiconductor summit seeks technology road map. In: *Electronics*, 65 (17): 4.

- Silicon Valley Group Inc. (2000): Form 10-Q Quarter Period Ended December 31. U.S. Securities and Exchange Commission. Url: <http://www.secinfo.com/d11e4c.4p4.htm>.
- Star, Susan L./James R. Griesemer (1989): Institutional ecology, 'translations' and boundary objects: Amateurs and professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-1939. In: *Social Studies of Science*, 19: 387-420.
- Strauss, Jeffrey D./Michael Radnor (2004): Roadmapping for dynamic and uncertain environments. In: *Research-Technology Management*, 47 (2): 51-57.
- Sydow, Jörg/Arnold Windeler/Guido Möllering (2004): Path-Creating Networks in the Field of Next Generation Lithography: Outline of a Research Project. Technology Studies Working Papers. TUTS-WP-2-2004. Berlin, Technische Universität, Institut für Soziologie.
- Thomas, W.I./D.S. Thomas (1928): *The Child in America*.
- van de Ven, Andrew H./Raghu Garud (1994): The coevolution of technical and institutional events in the development of an innovation. In: Baum, J./Singh, J. (Hg.): *Evolutionary Dynamics of Organizations*. London, Oxford University Press: 425-443.
- van Lente, Harro/Arie Rip (1998): Expectations in technological developments: An example of prospective structures to be filled in by agency. In: Disco, Cornelis/van der Meulen, Barend J. R. (Hg.): *Getting new technologies together. Studies in making sociotechnical order*. Berlin, de Gruyter: 203-229.
- West, Jonathan (2001): Two best ways? Institutions and the evolution of the US and Japanese semiconductor industries. In: Burgelman, Robert A./Chesbrough, Henry (Hg.): *Comparative Studies of Technological Evolution*. Amsterdam, Jai Press: 37-57.
- Wills, Gordon/David Ashton/Bernard Taylor (Hg.) (1969): *Technological forecasting and corporate strategy*. New York, Elsevier.
- Willyard, Charles H./Cheryl McClees (1987): Motorola's technology roadmap process. In: *Research Management*, 30 (5): 13-19.
- Windeler, Arnold (2003): Kreation technologischer Pfade: ein strukturationstheoretischer Analyseansatz. In: Schreyögg, Georg/Sydow, Jörg (Hg.): *Managementforschung 13*. Wiesbaden, Gabler-Verlag: 295-328.
- Windeler, Arnold/Cornelius Schubert (im Druck): Technologieentwicklung und Marktkonstitution. Eine strukturationstheoretische Perspektive auf die Hervorbringung von Märkten für Fertigungstechnologie in der Halbleiterindustrie. In: Beckert, Jens/Diaz-Bone, Rainer/Ganssmann, Heiner (Hg.): *Die sozialen Strukturen des Marktes*. Frankfurt/M., Campus

In der Reihe „Working Papers“ sind bisher erschienen:

1/1999	W. Rammert	Technik Stichwort für eine Enzyklopädie Bestell-Nr. TUTS-WP-1-1999
1/2000	H.-D. Burkhard W. Rammert	Integration kooperationsfähiger Agenten in komplexen Organisationen. Möglichkeiten und Grenzen der Gestaltung hybrider offener Systeme Bestell-Nr. TUTS-WP-1-2000
2/2000	K. Scheuermann	Menschliche und technische ‚Agency‘: Soziologische Einschätzungen der Möglichkeiten und Grenzen künstlicher Intelligenz im Bereich der Multi-agentensysteme Bestell-Nr. TUTS-WP-2-2000
3/2000	I. Schulz-Schaeffer	Enrolling Software Agents in Human Organizations. The Exploration of Hybrid Organizations within the Socionics Research Program Bestell-Nr. TUTS-WP-3-2000
4/2000	H. Braun	Soziologie der Hybriden. Über die Handlungsfähigkeit von technischen Agenten Bestell-Nr. TUTS-WP-4-2000
5/2000	J. Hage R. Hollingsworth W. Rammert	A Strategy for Analysis of Idea Innovation, Networks and Institutions National Systems of Innovation, Idea Innovation Networks, and Comparative Innovation Biographies Bestell-Nr. TUTS-WP-5-2000
7/2000	W. Rammert	Ritardando and Accelerando in Reflexive Innovation, or How Networks Synchronise the Tempi of Technological Innovation Bestell-Nr. TUTS-WP-7-2000
8/2000	W. Rammert	Nichtexplizites Wissen in Soziologie und Sozionik. Ein kursorischer Überblick Bestell-Nr. TUTS-WP-8-2000
9/2000	H. Braun	Formen und Verfahren der Interaktivität – Soziologische Analysen einer Technik im Entwicklungsstadium Bestell-Nr. TUTS-WP-9-2000
10/2000	F. Janning	Multiagentensysteme im Krankenhaus. Sozionische

1/2001	K. Scheuermann C. Schubert W. Rammert	Gestaltung hybrider Zusammenhänge Bestell-Nr. TUTS-WP-10-2000 The Cultural Shaping of Technologies and the Politics of Technodiversity Bestell-Nr. TUTS-WP-1-2001
2/2001	I. Schulz-Schaeffer	Technikbezogene Konzeptübertragungen und das Problem der Problemähnlichkeit. Der Rekurs der Multiagentensystem-Forschung auf Mechanismen sozialer Koordination Bestell-Nr. TUTS-WP-2-2001
1/2002	W. Rammert	The Governance of Knowledge Limited: The rising relevance of non-explicit knowledge under a new regime of distributed knowledge production Bestell-Nr. TUTS-WP-1-2002
2/2002	W. Rammert	Die technische Konstruktion als Teil der gesellschaftlichen Konstruktion der Wirklichkeit Bestell-Nr. TUTS-WP-2-2002
3/2002	W. Rammert	Technik als verteilte Aktion Wie technisches Wirken als Agentur in hybriden Aktionszusammenhängen gedeutet werden kann Bestell-Nr. TUTS-WP-3-2002
4/2002	W. Rammert I. Schulz-Schaeffer	Technik und Handeln - Wenn soziales Handeln sich auf menschliches Verhalten und technische Artefakte verteilt. Bestell-Nr. TUTS-WP-4-2002
5/2002	C. Schubert	Making interaction and interactivity visible. On the practical and analytical uses of audiovisual recordings in high-tech and high-risk work situations Bestell-Nr. TUTS-WP-5-2002
6/2002	M. Meister u.a.	Die Modellierung praktischer Rollen für Verhandlungssysteme in Organisationen. Wie die Komplexität von Multiagentensystemen durch Rollenkonzeptionen erhöht werden kann Bestell-Nr. TUTS-WP-6-2002
8/2002	W. Rammert	Zwei Paradoxien einer Wissenspolitik: Die Verknüpfung heterogenen und die Verwertung impliziten Wissens Bestell-Nr. TUTS-WP-8-2002

9/2002	W. Rammert	Gestörter Blickwechsel durch Videoüberwachung? Ambivalenzen und Asymmetrien soziotechnischer Beobachtungsordnungen Bestell-Nr. TUTS-WP-9-2002
1/2003	R. Gerstl u.a.	Modellierung der praktischen Rolle in Verhandlungen mit einem erweiterten Verfahren des fallbasierten Schließens Bestell-Nr. TUTS-WP-1-2003
2/2003	W. Rammert	Technik in Aktion: Verteiltes Handeln in soziotechnischen Konstellationen Bestell-Nr. TUTS-WP-2-2003
3/2003	R. Burri	Digitalisieren, disziplinieren. Soziotechnische Anatomie und die Konstitution des Körpers in medizinischen Bildgebungsverfahren Bestell-Nr. TUTS-WP-3-2003
4/2003	W. Rammert	Die Zukunft der künstlichen Intelligenz: verkörpert – verteilt – hybrid Bestell-Nr. TUTS-WP-4-2003
5/2003	R. Häußling	Perspektiven und Grenzen der empirischen Netzwerkanalyse für die Innovationsforschung am Fallbeispiel der Konsumgüterindustrie Bestell-Nr. TUTS-WP-5-2003
6/2003	M. Meister u.a.	Agents Enacting Social Roles. Balancing Formal Structure and Practical Rationality in MAS Design Bestell-Nr. TUTS-WP-6-2003
7/2003	K. Scheuermann R. Gerstl	Das Zusammenspiel von Multiagentensystem und Mensch bei der Terminkoordination im Krankenhaus: Ergebnisse der Simulationsstudie ChariTime Bestell-Nr. TUTS-WP-7-2003
8/2003	E. Lettkemann M. Meister	Vom Flugabwehrgeschütz zum niedlichen Roboter. Zum Wandel der Kooperation stiftenden Universalismus der Kybernetik Bestell-Nr. TUTS-WP-8-2003
9/2003	H. Braun-Thürmann C. Leube, K. Fichtenau S. Motzkus, S. Wessälly	Wissen in (Inter-)Aktion - eine technografische Studie Bestell-Nr. TUTS-WP-9-2003
10/2003	C. Schubert	Patient safety and the practice of anaesthesia: how hybrid networks of cooperation live and breathe Bestell-Nr. TUTS-WP-10-2003

1/2004	C. Jung	Die Erweiterung der Mensch-Prothesen-Konstellation. Eine technografische Analyse zur ‚intelligenten‘ Beinprothese Bestell-Nr. TUTS-WP-1-2004
2/2004	J. Sydow A. Windeler G. Möllering	Path-Creating Networks in the Field of Text Generation Lithography: Outline of a Research Project Bestell-Nr. TUTS-WP-2-2004
3/2004	W. Rammert	Two Styles of Knowing and Knowledge Regimes: Between ‘Explicitation’ and ‘Exploration’ under Conditions of ‘Functional Specialization’ or ‘Fragmental Distribution’ Bestell-Nr. TUTS-WP-3-2004
1/2005	Uli Meyer Ingo Schulz-Schaeffer	Drei Formen interpretativer Flexibilität Bestell-Nr. TUTS-WP-1-2005
2/2005	Estrid Sørensen	Fluid design as technology in practice – Spatial description of online 3D virtual environment in primary school Bestell-Nr. TUTS-WP-2-2005
3/2005	Daniela Manger	Entstehung und Funktionsweise eines regionalen Innovationsnetzwerks – Eine Fallstudienanalyse Bestell-Nr. TUTS-WP-3-2005
4/2005	Gesa Lindemann	Verstehen und Erklären bei Helmuth Plessner Bestell-Nr. TUTS-WP-4-2005
5/2005	Gesa Lindemann	Beobachtung der Hirnforschung Bestell-Nr. TUTS-WP-5-2005
6/2005	Uli Meyer Cornelius Schubert	Die Konstitution technologischer Pfade. Überlegungen jenseits der Dichotomie von Pfadabhängigkeit und Pfadkreation Bestell-Nr. TUTS-WP-6-2005
7/2005	Peter Biniok	Kooperationsnetz Nanotechnologie – Verkörperung eines neuen Innovationsregimes? Bestell-Nr. TUTS-WP-7-2005
1/2006	Michael Hahne	Identität durch Technik: Wie soziale Identität und Gruppenidentität im soziotechnischen Ensemble von Ego-Shooterclans entstehen Bestell-Nr. TUTS-WP-1-2006
2/2006	Alexander Peine	Technological Paradigms Revisited – How They Contribute to the Understanding of Open Systems of Technology Bestell-Nr. TUTS-WP-2-2006

3/2006	Werner Rammert	Technik, Handeln und Sozialstruktur: Eine Einführung in die Soziologie der Technik Bestell-Nr. TUTS-WP-3-2006
4/2006	Esther Ruiz Ben	Timing Expertise in Software Development Environments Bestell-Nr. TUTS-WP-4-2006
1/2007	Werner Rammert	Technografie trifft Theorie Bestell-Nr. TUTS-WP-1-2007
2/2007	Cornelius Schubert	Technology Roadmapping in der Halbleiterindustrie Bestell-Nr. TUTS-WP-2-2007