Wie innovative Logistik die zukunftsichere und nachhaltige Gestaltung der Automatisierung und Digitalisierung der Halbleiterindustrie unterstützt

Germar Schneider, Infineon Technologies Dresden GmbH & Co. KG, Dresden
Jacob Lohmer, Technische Universität Dresden, jacob.lohmer@tu-dresden.de

Abstract

Innovative Logistik ist eine Schlüsselfunktion in allen industriellen Bereichen und seit vielen Jahren einer der Erfolgsfaktoren bei Unternehmen in ihrem steten Wandel hin zu neuen Produkten und neuen Märkten. Dieser Artikel zeigt am besonderen Beispiel der Halbleiterindustrie als Einzelfallstudie, mit welchen Logistikmethoden das Unternehmen *Infineon Technologies Dresden* in enger Zusammenarbeit mit der *Professur für BWL, insb. Logistik* der *TU Dresden* eine führende Rolle in der Automatisierung zu einem der modernsten Unternehmen der Halbleiterindustrie erreichen konnte. Der Wandel von einer Hochvolumen-Fabrik mit wenigen Produkten zu einer kundenorientierten Logikfabrik konnte erfolgreich gestaltet werden. Parallel arbeiteten die Partner beständig an der digitalen Transformation des Unternehmens zur kontinuierlichen Steigerung der Produktivität und der Wettbewerbsfähigkeit. Dieser Artikel gibt eine Übersicht über die wichtigsten Arbeiten der letzten Jahre, in denen innovative Logistikmethoden einen entscheidenden Beitrag zur erfolgreichen Gestaltung des Wandels leisteten.

1 Einleitung – Halbleiterindustrie

Die Halbleitertechnologie hat ihren Ursprung in der Entwicklung des ersten Transistors im Jahr 1947 und seither eine sehr rasante Entwicklung durchlebt. Im Jahr 1965 postulierte Gordon Moore das sogenannte „Moore's Law“, in dem er vorhersagte, dass sich die Funktionalität der Produkte alle 18 Monate verdoppeln wird (Moore 1965). Damit ging einher, dass sich die Preise der Halbleiterprodukte in kürzesten Abschnitten drastisch reduzierten und die Halbleiterhersteller immer mehr Produkte mit einem Vielfachen an Funktionalität auf den Siliziumwafern integrieren mussten. Dies wurde durch die Verringerung der Strukturbreiten auf den Halbleitern, vom Mikrometerbereich bis hin in den Nanometerbereich, umgesetzt. Da dabei oftmals bereits die Grenzen der physikalischen Machbarkeit erreicht wurden, ist es für die Hersteller zunehmend schwieriger geworden, die Fertigbarkeit in hohem Volumen mit hoher Stabilität zu gewährleisten. Eine Vielzahl von Unternehmen unterlag diesem harten Wettlauf gegen die Grenzen der Physik und musste mit Mitwettbewerbern kooperieren oder den Markt komplett verlassen. Durch die Verkleinerung der Strukturbreiten, die Verschiebung zu immer größeren Volumen und den Trend der Industrie hin zu größeren Durchmessern der Wafer konnten sich zunehmend nur wenige große Unternehmen am Markt behaupten. Damit ist der Wettbewerb in der Halbleiterindustrie einer der härtesten aller Industriezweige und nur die besten und anpassungsfähigsten Unternehmen können überleben. Abb. 1 zeigt die Entwicklung des Halbleitermarkts in den Jahren 1996 bis 2019. Die Branche verfügt über ein jährliches, durchschnittliches Marktwachstum von ca. 15%, was durchaus attraktiv ist und veranschaulicht, wie hoch die damit verbundenen Gewinnchancen sein können. Das Prob-

Abb. 1. Durchschnittliches Wachstum der Halbleiterindustrie (Statista 2020)

lem ist jedoch, dass diese 15% Marktwachstum nur einen reinen Mittelwert darstellen und die tatsächlichen Werte hohen Schwankungen nach oben, aber auch nach unten unterliegen (siehe Abb. 1). Die Gewinnspannen reichten von -40% bis +40% pro Jahr über die mittleren Produkte (Statista 2020). In einzelnen Sparten waren diese Ausschläge teilweise noch deutlich höher. So gab es bei verschiedenen Elektronikprodukten wie Grafikkarten, Controllern und Speicherchips teilweise ein Marktwachstum von über 100%. Dies hatte den Effekt, dass viele Vertriebspartner doppelte Bestellungen platzierten, um an die raren Produkte zu kommen. Massive Downturns einige Zeit später und damit verbundenes negatives Wachstum waren die Folge. Es kam zu hohen Verlusten durch hohe Lagerbestände und oft auch damit verbunden hohem Verwurf der fertigen Produkte, da bereits neue Produkte am Markt platziert worden waren und die alten Technologien daher nicht mehr verkauft werden konnten.

Da die Halbleiterindustrie sehr kapitalintensiv ist und die Herstellung der Produkte in Massenproduktion jeweils sehr lange Vorlaufzeiten hat, können die Hersteller nur sehr schwer auf derartig heftige Marktschwankungen reagieren. Nur die größten und leistungsfähigsten Unternehmen können in diesem harten Wettbewerb bestehen. So liegen die Investitionskosten für den Reinraum einer klassischen Produktion von Halbleitern auf Basis von 300 mm Wafern heute bereits bei ca. 2 - 4 Milliarden \$. Die Zeit bis zum Anlauf einer Volumenproduktion beträgt oft weitere 1 - 3 Jahre, sodass auf kurzfristige und schnell wachsende Märkte meist nur sehr langsam reagiert werden kann. Das Umrüsten auf neue Produkte innerhalb bestehender Fertigungslinien kann bei ausreichender Kapazität durchaus schneller gewährleistet werden. Ältere, nicht mehr benötigte Technologien und Produkte werden dabei verdrängt. Allerdings ist auch dieses Umrüsten mit einer Bestellung von neuem Equipment und aufwendigen Qualifikationsprozessen in den Fertigungen verbunden. So beträgt die Durchlaufzeit eines Halbleiterproduktes in einer heutigen Linie meist zwischen 2 und 3 Monaten in der Frontendfertigung, wo die Chips in durchschnittlich 1.000 Arbeitsschritten auf den Wafern erzeugt werden. Es schließt sich eine ca. zweimonatige Fertigungszeit an, in der sie zu Säge- und Verpackungsprozessen in die Backend-Fertigungen gesendet werden (Mönch et al. 2017).

Tab. 1. Weltweite Marktanteile der führenden Unternehmen am Umsatz in der Halbleiterindustrie (Gartner 2020)

Firma Jahr	Intel	Samsung Electro- nics	SK Hy- nix	Qualcomm	Micron Techno- logy	Infineon Techno- logies	Sonstige
2011	16,5 %	9 %	3,1 %	3,2 %	2,5 %	-	65,7 %
2014	14 %	10,2 %	4,7 %	5,7 %	4,8 %	1,7 %	57,6 %
2019	16,2 %	12,5 %	5,3 %	3,2 %	4,8 %	-	58,1 %

Tab. 1 zeigt eine Übersicht der zehn größten Halbleiterunternehmen weltweit (Gartner 2020). An der Spitze der erfolgreichsten Halbleiterunternehmen steht seit vielen Jahren das Unternehmen *Intel* aus den USA, welches vor allem den Markt von Schaltkreisen für Mikrocontroller dominiert. An zweiter Stelle hat sich die Firma *Samsung* aus Korea etabliert, ein Großkonzern mit weltweit riesigen Fertigungsstätten. Unsere Fallstudie fokussiert auf *Infineon Technologies* (kurz: *Infineon*). *Infineon* stellte in den 90er Jahren auch Speicherprodukte für die Computerindustrie her, die allerdings einem immer härter werdenden Wettbewerb unterlagen. So trennte sich *Infineon* im Jahr 2009 komplett von diesem Markt, auch bedingt durch die Insolvenz des Tochterkonzerns *Qimonda*, welcher sich damals auf reine Speicherprodukte konzentrierte. Auch *Infineon* musste immer wieder größere Halbleiterproduktionen bereits nach wenigen Jahren schließen. Beispielhaft zu nennen, sind Werke in England oder den USA, welche dem Preisverfall so stark ausgesetzt waren, dass keine Gewinnaussichten mehr zugrunde lagen. Die durchschnittliche Lebensdauer eines Halbleiterwerks misst ca. 17 Jahre, wenn man die aktuell noch aktiven weltweiten Halbleiterwerke betrachtet. Damit hat *Infineon Dresden* mit 25 Jahren im Jahr 2019 dieses durchschnittliche Lebensalter bereits deutlich überschritten. Die Produktion konnte über die Jahre hinweg immer weiter ausgebaut werden. Immer neuere Technologien und Produkte im Bereich von Logikschaltkreisen konnten als äußerst kundenspezifische Lösungen entwickelt werden, welche in hohem Volumen mit modernsten Mitteln gefertigt werden. Dahinter lag ein Wandel im Bereich der Produktion, die von einer ehemaligen Monokultur als reine Fertigung von Speicherbauelementen zu einer kundenorientierten Halbleiterproduktion von zahlreichen Produkten, die sowohl in Kleinserien als auch in Großserien auf Wafer von 200 mm und 300 mm gefertigt werden, umgebaut werden konnte. Dies war nur durch das permanente Austauschen der Anlagen und die Verbesserung der Prozesse möglich. Parallel wurden beständig die logistischen Abläufe verbessert, um anschließend mittels Automatisierung und Digitalisierung einen Rahmen zu bilden, welcher die Produktivität und die Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig steigern konnte. Die nachfolgenden Kapitel zeigen, wie dieser Wandel in den letzten Jahren unter der besonderen Berücksichtigung der Rolle der Logistik erfolgte.

2 Ramp Up Prozesse in der Halbleiterindustrie

Der Halbleitermarkt ist einer der dynamischsten Märkte mit der Herausforderung zur stetigen Steigerung der Performance der Produkte bei gleichzeitigem Kostendruck. Die Produktlebenszeiten der Halbleiter sind dabei je nach Schaltkreis äußerst kurz und können im Extremfall geringer als ein Jahr sein. Ein Beispiel hierfür ist die ständige Innovation bei Smartphones, von denen jedes Jahr neue Produkte mit immer neuen technischen Innovationen auf den Markt kommen. Das Anlaufmanagement ist einer der wichtigsten Prozesse im Halbleiterbereich, da durch die genannten immer kürzeren Produktlebenszyklen ein steter Wandel zu neuen Technologien und Produkten benötigt wird.

Eine exzellente Logistik im Ramp Up Prozess ist dabei einer der Hauptschlüssel zum Erfolg. *Infineon* hat die Bedeutung eines geordneten Ramp Up Managements inklusive der Etablierung eines sogenannten „Ramp Up Managers“ erstmals im Jahr 2004 etabliert. Die Aufgabe des Ramp Up Managers ist es, alle technischen und organisatorischen Anforderungen und Regelungen so zu managen, dass sämtliche Ziele, die teilweise auch starke Zielkonflikte aufzeigen, optimal ausbalanciert werden können und das Anlaufmanagement optimal gestaltet werden kann. Dabei ist zu beachten, dass speziell die erste Phase im Produktlebenszyklus die Phase ist, in der die größten Gewinne erzielt werden können. Im Falle von Halbleiterherstellern ist diese Phase oft essenziell für das Überleben der Fabriken. Ein verspäteter Ramp Up in einer Fabrik kostet den jeweiligen Hersteller meist Millionenbeträge und muss daher unbedingt vermieden werden. Für Fabriken, die Moores Law folgen und jedes Jahr an einer Erhöhung der Funktionalitäten verbunden mit einer permanenten Strukturverkleinerung der Schaltkreise arbeiten (Moore

1965), ist es absolut essentiell, dass der jeweilige Ramp Up Prozess optimal erfolgt. Abb. 2 zeigt, wie stark der Marktpreis von klassischen Commodity Produkten wie DRAMs im Vergleich zur Produktionsmenge und damit auch zu einer idealen Soll-Anlaufkurve fällt (Keil et al. 2007).

Abb. 2. Preisverfall und Produktionshochlauf eines Speicherprodukts (in Anlehnung an Keil et al. 2007)

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit der *Professur für BWL, insb. Logistik* der *TU Dresden* wurden die Erfolgsfaktoren für ein optimales Ramp Up Management in den Jahren zwischen 2004 und 2006 erarbeitet und direkt auf den Ramp Up für die Einführung der 110 nm Technologien in der 200 mm Linie eingesetzt. Später wurde das erarbeitete Wissen aus dem Ramp Up Prozess für Speichertechnologien auch auf Ramp Up Prozesse für Logikprodukte übertragen (Keil et al. 2007). Ab dem Jahr 2007 wurden zahlreiche Logikprodukte in der 200 mm Linie entwickelt und in die Serienproduktion überführt, immer begleitet durch das bei den Speicherprodukten entwickelte Ramp Up Management. Ein wesentlicher Unterschied hierbei war, dass Speicherprodukte immer in Hochvolumenproduktion erzeugt werden und dabei meist ein gleiches Produkt nur auf einen neuen und kleineren Technologieknoten übertragen wird. Daher ist eine Zielgröße die Betrachtung des sogenannten „Revenue Crossover“, also der Punkt, an dem die Konversion auf die neue Technologie der Linien so erfolgen kann, dass die Wirtschaftlichkeit des neuen Produktes größer ist als die der älteren Technologie. Der Ramp Up muss dabei wegen der langen Durchlaufzeiten bereits Wochen oder Monate zuvor gestartet werden und sollte in kleineren Schritten erfolgen, damit auch Instabilitäten in den Prozessketten rechtzeitig erkannt werden können und ggf. gegengesteuert werden kann. In dieser äußerst wichtigen Phase des Ramp Up muss der jeweilige Ramp Up Manager stets die Linie und die wichtigsten Kenngrößen der Produkte und Technologien überwachen und den Einschleusprozess steuern. Die folgenden Kriterien geben einen Überblick über wichtige Kenngrößen für einen Ramp Up Manager, um stets den jeweiligen Technologie- bzw. Produktanlauf zu managen:

- 1.) Elektrische Ausbeuten der Produkte im Ramp Up
- 2.) Parametrische Ausbeuten der Produkte
- 3.) Kontrollen der Defektdichte und Inline-Kenngrößen cp/cpK Werte
- 4.) Durchlaufzeiten der Produkte und Technologien
- 5.) Flussfaktoren der Linie und der Einzelprodukte
- 6.) Qualität der Produkte, Zuverlässigkeitstest und Ausbeuten der Bausteine

Im Rahmen der Arbeiten zur Ermittlung der Einfluss- und Erfolgsfaktoren im Ramp Up Prozess wurde eine Metrik geschaffen, die sämtliche Einflussfaktoren im Ramp Up erfasst und diskutiert (Keil et al. 2007). Die wichtigsten Einflussfaktoren sind dabei folgende:

- Unternehmen (Art des Unternehmens, Größe, Ressourcen, Standort, Innovationskraft)
- Organisation (Organisationsstruktur, Aufbau-und Ablauforganisation)
- Technik (Technologiereifegrad, Fertigung-und Prozesstechnik, Qualitätsmanagement, IT)

- Mensch (Leistungsfähigkeit und Leistungsbereitschaft)

Ein ganz wesentlicher Erfolgsfaktor beim Ramp Up ist neben dem Technologie- und Fertigungsreife-grad das zur Verfügung stehende Lernvolumen. Mit diesem Lernvolumen müssen sämtliche Prozessketten im Ramp Up getestet und überwacht werden. Das sind im Falle der Halbleiterindustrie Versuchslose, mit denen neue Technologien und Anlagen getestet werden, bevor dort produktive Wafer prozessiert werden. Im Falle von Technologieumstellungen mit bis zu 10.000 Wafern pro Woche ist das meist kein Problem, da in einer frühen Phase des Ramp Up derartige Wafer genutzt werden können, um die Prozesse zu überwachen. Für einen Ramp Up von Logikprodukten steht aber ein derartiges Lernvolumen meist nicht zur Verfügung und es kann auch nicht auf einen älteren Technologieknoten zur Belieferung der Kunden zurückgegriffen werden. In den Jahren 2006 bis 2008 wurden in der 200 mm Linie die ersten Logikschaltkreise für Kunden aus dem Bereich Automotive und Chipkarten prozessiert und für die Serienproduktion vorbereitet, wo diese mit einem Minimum an Lernvolumen auskommen mussten. Ein Lösungsweg war damals intelligente Versuchsplanungen, sogenannte Design of Experiments (DoE) durchzuführen, die es ermöglichten, mit wenigen Wafern eine ganze Reihe von Testversuchen abzudecken. Eine weitere Möglichkeit war die Definition eines Leitprodukts, an dem die Linienstabilität auch für die neuen Produkte im Anlauf überwacht werden konnte. Aber auch beim Ramp Up von kundenorientierten Produkten hat sich die Vorgehensweise des klassischen Ramp Up Managements als äußerst erfolgreich bewiesen, indem ein abteilungsübergreifendes Ramp Up Team im Unternehmen etabliert wurde, das aus Experten aus verschiedenen Unternehmensbereichen bestehen kann:

- Technologieabteilung (Technische Entwicklung & Integration)
- Fertigungsabteilung (Liniensteuerung und je ein Vertreter der Prozessbereiche)
- Wafertest (Parameter und elektrische Ausbeuten)
- Defektdichte
- Kundensupport und Logistikabteilung (Ordermanagement)
- Qualitätsabteilung

Der Ramp Up Manager sorgt dabei für eine Metrik zur Erfassung der Kennzahlen und übernimmt die Leitung einer wöchentlichen Ramp Up Runde, in der die Kennzahlen betrachtet und die jeweiligen Entscheidungen zur Einschleusung auf wöchentlicher Basis abgestimmt werden. Bei kurzfristigen Problemen im Ramp Up ist der Manager auch befugt in Abstimmung mit den jeweiligen Experten die benötigten Maßnahmen sofort einzuleiten oder auch zu außerordentlichen Krisenteamrunden einzuladen. Ein Beispiel hierfür wären starke Einbrüche der elektrischen Ausbeuten oder Qualitätsprobleme im Backendprozess sowie beim Endkunden. Hierbei kann der Ramp Up Manager auch für einen sofortigen Stopp der Linien sorgen. Da dies meist zu massiven wirtschaftlichen Folgen oder Unzufriedenheit der Endkunden führen kann, muss der Ramp Up Manager in diesen Phasen seine Aktionen mit der jeweiligen Unternehmens- oder Geschäftsbereichsleitung abstimmen. Tab. 2 zeigt ein zufälliges Beispiel, wie die klassischen Kennzahlen im Ramp Up auf wöchentlicher Basis überwacht werden können.

Tab. 2. Metrik zur Steuerung eines Ramp Up in der Halbleiterindustrie

KPI / Ramp Up	Einheit	Status
Elektrische Ausbeute	80 %	
Inline Ausbeute, Parameter	90 %	
WIP	10.000 Wafer	
Cycle Time	50 d	
cp / cpK	2	
Lagerbestand	1000 Wafer	
Qualität	2 dpm	
Entscheidung	GO	

Elektrische Ausbeuten und Inline Ausbeuten der neuen Produkte können in Prozent der elektrischen Ausbeute gemessen werden. WIP (Work In Progress) sind die Anzahl der Wafer, die sich in der Frontendproduktion befinden und den Kundenbedarf decken sollen. Ein wichtiger Parameter ist immer auch die Durchlaufzeit der Produkte, da es durch eine Vielzahl noch nicht freigegebener Prozesse und Anlagen immer wieder zu Staus in der Linie kommen kann, worauf schnellstmöglich zu reagieren ist. Aber auch Stabilitätskriterien wie *cp* und *cpK* Werte geben eine gute Information über die Stabilität der verschiedenen Einzelprozesse in der Linie. Letztendlich ist auch die Qualität der Produkte, die im Rahmen des Anlaufmanagements bereits verkauft werden können, ein ganz wichtiger Erfolgsfaktor, der meist in *dpm* (dies per million) gemessen wird. 1 *dpm* entspricht einem Ausfall eines Chips pro Million gefertigter Chips. Raten über 1 *dpm* können bereits ein Kriterium für einen Produktionsstopp sein.

Die Erfassung der jeweiligen Kennzahlen war stets mit einem hohen Aufwand verbunden, da die verschiedenen Ingenieure jeweils wöchentlich die Daten zusammentragen und visualisieren mussten. In den Jahren 2004 bis 2007 erfolgte dies stets manuell mittels MS Excel oder PowerPoint. Dabei konnten nur Vergangenheitsdaten gesammelt werden, die rückblickend den Gesundheitszustand der Linie aufzeigen. Die Wafer in einer Halbleiterfertigung durchlaufen dabei ständig die jeweiligen Prozessabschnitte, so dass eine Visualisierung in Echtzeit ein enormer Vorteil wäre. In Keil et al. (2007) wurde bereits erstmalig die Idee dargestellt, die Waferkassetten mit intelligenter Sensorik auszustatten, um jederzeit an wichtige Prozessdaten heranzukommen. Aber erst mit der Einführung der Automatisierung und Digitalisierung ab dem Jahr 2015 standen derartige Systeme zur Verfügung, um mittels Sensoren erste Dashboards der Fertigungskennzahlen in Echtzeit zu erzeugen. Eine weitere Möglichkeit die aufkommende Automatisierung in der Fertigung zu nutzen, war auch das Reporting von administrativen Prozessen automatisiert ablaufen zu lassen. Ein Beispiel sind die wöchentlichen Einschleusprozesse, für die vorher wöchentlich Daten aus mehreren Datenbanken zusammenkopiert werden mussten. Durch die Automatisierung konnten die aufwendigen Reportingaufwände stark reduziert und der Schwerpunkt auf wesentlich wertschöpfendere Tätigkeiten gelegt werden. Daneben stehen nun neuartige Visualisierungslösungen wie Tableau® oder Open Source Softwarelösungen zur Verfügung, die helfen die Engineeringaufwände massiv zu reduzieren. Ein Beispiel hierfür ist die Nachvollziehbarkeit von Kundenausfällen im Backend mit der Korrelation zu Ausfällen im Frontend. Hier waren bis vor kurzem für die Ermittlung der Korrelationen mehrere Tage nötig, was durch eine intelligente Logistik und neuartige Workflows nun in wenigen Stunden möglich ist (siehe Abb. 3). Die durch die neuartigen Korrelationstechnologien gewonnene Zeit können die Produktspezialisten nun nutzen, um sich auf die Entwicklung und das Engineering im Ramp Up zu konzentrieren.

Abb. 3. Beispiel für eine Zeitreduktion zur digitalisierten Nachverfolgung von defekten Chips zwischen Frontend- und Backendstandorten

Durch die fortschreitende Automatisierung und Digitalisierung konnte das Produktportfolio von *Infiniteon Dresden* in den letzten Jahren enorm ausgeweitet und die Serienproduktion mehr als verdoppelt werden. Die Mitarbeiteranzahl ist dabei ebenfalls stark gewachsen, da jede Technologie und jedes Produkt auch weiterhin betreut werden muss und neue Technologien stets auch neue Anforderungen an die Produktion stellen. Jedoch ist der Anstieg der Personalzahlen nicht mehr linear zu dem Anstieg des Wafervolumens. So verlagerten sich die Arbeitsaufgaben immer mehr von simplen Tätigkeiten wie Wafertransport oder -inspektion zur Betreuung hochkomplexer Prozesse und Anlagen. Im Jahr 2010 konnte aufgrund des hohen Automatisierungsgrades die erste weltweite High-Volume Fab für Leistungshalbleiter auf 300 mm Wafern in Dresden etabliert werden. Im Rahmen von europäischen Großprojekten und sogenannten Pilotlinienprojekten zur Etablierung dieser Technologien in Zusammenarbeit mit Unternehmen sowie Universitäten konnte das Volumen dieser Produktion jährlich kontinuierlich gesteigert werden. Die *Professur für BWL, insb. Logistik der TU Dresden* arbeitete dabei im Rahmen des „Enhanced Power Pilot Line“-Projekts (EPPL, www.eppl.eu) zusammen mit den Automatisierungsexperten von *Infiniteon* an der optimalen Logistik der neuen Prozesse und Anlagen im Reinraum. In den folgenden Kapiteln wird darauf eingegangen, wie die Logistik im Bereich der Halbleiterindustrie im Anlaufmanagement und in der Serienproduktion dazu beiträgt, die Geschäftsprozesse immer effektiver zu gestalten.

3 Logistische Gestaltung der Halbleiterfertigung im Anlaufmanagement und in der Serienproduktion

Eine exzellente Logistik nimmt eine Schlüsselfunktion in der digitalen Transformation der Prozesse in einem Halbleiterunternehmen ein. Neben den äußerst anspruchsvollen Zielen der Technologieentwicklung und den hohen Sicherheits- und Qualitätsanforderungen neuer Schaltkreise ist ein weiterer Erfolgsfaktor der reibungslose Ablauf aller Geschäftsprozesse. Diese sind stark miteinander verzahnt und beeinflussen vor allem die Kennzahlen im Bereich der Lieferziele, Fabrikauslastung und Durchlaufzeiten. Nur die Firmen, die heute über sehr gute Fertigungsabläufe und eine effiziente Logistik mit einer hohen Transparenz verfügen, sind in der Lage, die oft im Konflikt stehenden Kennzahlen so zu optimieren, dass die Kunden höchste Qualität zum richtigen Zeitpunkt und zu optimalen Kosten erhalten. Die Beherrschung der Komplexität war dabei eine der wichtigsten Aspekte in den Projekten und bereits im Jahr 2008 erarbeitete das Automatisierungsteam erste Vorschläge zur Senkung der Komplexität in der 200 mm Linie (Heinrich et al. 2008; Keil et al. 2008; Keil et al. 2009). Weitere Arbeiten zur Verbesserung der Fertigung basierend auf Ansätzen aus der Fließfertigung folgten (Eberts et al. 2012; Keil, Eberts, et al. 2011; Keil, Schneider, et al. 2011). Dabei muss stets das Dreieck zwischen Qualität, Kosten und Durchlaufzeit ausbalanciert werden. Eine schnellere Durchlaufzeit in der Halbleiterproduktion hat einen negativen Einfluss auf die Auslastung des kostenintensiven Equipments und verursacht daher auch höhere Kosten. Bei einer Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit können mehr Fehler auftreten, die

wiederum zu Verwurf der angefertigten Schaltkreise führen. Durch die im Halbleiterprozess stark wachsende Wertschöpfung führt dies ggf. ebenso zu höheren Kosten und dem Verlust von Lieferungen. Andererseits ist durch eine schnellere Durchlaufzeit auch die Möglichkeit der früheren Fehlererkennung in optischen und elektrischen Tests möglich. Dies verdeutlicht die komplizierten Zusammenhänge innerhalb dieser Kennzahlen. Die Aufgabe eines guten Ramp Up Managers ist es daher, diese Kennzahlen so zu optimieren, dass alle Zielkonflikte optimal ausbalanciert werden können. Eine hohe Transparenz der Fertigung ist daher von hoher Bedeutung. Speziell die Automatisierung und Digitalisierung sind nicht nur in der Fertigung, sondern speziell auch in wertschöpfenden Büroprozessen, wichtige Erfolgsfaktoren, um alle Kennzahlen in einen optimalen Bereich zu verschieben. So wird das jeweilige Unternehmen in die Lage versetzt seine Kunden ständig rechtzeitig bei höchster Qualität und wettbewerbsfähigen Kosten mit neuen Mustern von neuen Produkten zu beliefern. Die fortschreitende Automatisierung der Fertigungen sorgt dabei nicht nur für eine drastische Senkung der Produktionskosten, sondern auch für eine Standardisierung aller Prozesse und eine Optimierung der Produktionsgeschwindigkeit sowie eine Steigerung der Qualität. Abb. 4 zeigt eine typische Automatisierungspyramide für Halbleiterunternehmen, in der sowohl erste Schritte mit Anpassungen im Fabriksteuerungssystem als Basis für eine Vollautomatisierung mittels Robotern als auch aktuellere Themen aus der künstlichen Intelligenz für eine Steuerung in Echtzeit Berücksichtigung finden.

Abb. 4. Automatisierungspyramide in einem Halbleiterunternehmen

In den Jahren von 2010 bis 2015 arbeitete das Automatisierungsteam von *Infineon Dresden* an der Automatisierung der 200 mm Logiklinie. Die Automatisierung erfolgte dabei in drei verschiedenen Schritten, die auch Bestandteil der Automatisierungspyramide sind. Im ersten Schritt wurde das Fabriksteuerungssystem so gestaltet, dass die An- und Abmeldung der Wafer jeweils automatisiert erfolgen kann. Durch die Vielzahl von Produkten mit unterschiedlichen Kundenlieferterminen wurde ein automatisches Dispatchingsystem eingeführt, dass die jeweiligen Lose stets nach Ihrem Termin steuert. Um die Operatoreffizienz zu verbessern, wurden für die Be- und Entladung der Wafer Robotersysteme installiert, die neben geringen Ausfallzeiten auch für stabilere Ausbeuten sorgten, da es zu geringerer Kontamination durch menschliche Partikel in den Fertigungsbereichen kam. Da die jeweiligen Automatisierungsstufen äußerst ressourcen- und zeitaufwändig waren, erfolgten die Schritte über einen Zeitraum von ca. 10 Jahren, wobei die Phasen der drei genannten Teilschritte sich überlappten. Diese Automatisierungsbemühungen sorgten dabei auch für eine verstärkte Standardisierung der Prozesse und eröffneten die Möglichkeit neue Technologien aus dem Bereich der Digitalisierung, wie maschinelles Lernen sowie innovative Produktionssteuerungsverfahren, anzuwenden. Diese neuartigen Technologien werden in den nächsten Jahren für den Fortbestand und Ausbau der europäischen Halbleiterfirmen entscheidend sein.

3.1 Logistische Betrachtung der Materialflüsse

Im Rahmen der Automatisierung ist ein elementares Kriterium den Bereich automatisierungsgerecht zu gestalten. Dies sollte vor der Automatisierung selbst und insbesondere vor der Installation von Robotersystemen erfolgen. Als besonders geeignet hat sich dabei eine umfangreiche Analyse aller Tätigkeiten inklusive des kompletten Layouts erwiesen, in dem später die automatisierte, digitalisierte Produktion etabliert werden soll. Im Rahmen des EPPL-Projekts wurde dabei ein Ziellayout für den neu zu errichtenden 300 mm Bereich für die Produktion von Dünnwafeln entwickelt, um einen optimalen Materialfluss zu ermöglichen. Abb. 5 zeigt dabei, wie der Zielfluss für den ersten Bereich der Linie optimiert wurde.

Abb. 5. Entwicklung eines geeigneten Ziellayouts für eine neu zu errichtende Linie

Wie in der oberen Hälfte der Abb. 5 erkennbar ist, wäre das ursprüngliche Anlagenlayout sehr ungünstig für den späteren Materialfluss und die Durchlaufzeiten gewesen. Das Material hätte immer wieder von einer Anlage zur nächsten Anlage und wieder zurücktransportiert werden müssen. Durch eine Vorstudie und eine Analyse der exakten Materialflüsse konnte ein optimales Layout ermittelt und definiert werden, welches im unteren Bildbereich dargestellt ist. Auch hier helfen heute moderne Visualisierungstechniken und Fabriksimulationen den Fluss der Lose durch die Fabrik in Echtzeit darzustellen. Bei *Infineon* wurden verschiedenste Simulationen verwendet, um die großen Herausforderungen beim Bau der weltweit ersten 300 mm Linie für Leistungshalbleiter zu überwinden (Keil et al. 2018; Rank et al. 2016; Schneider et al. 2015). So können auch zukünftige neue Produktionsflüsse schon im Vorhinein simuliert werden und mit geeigneten Materialflussautomatisierungen und modernen Lagermethoden wie neuartigen Regalsystemen oder Buffersystemen der Materialfluss optimiert werden. In Abb. 6 ist das moderne Transportsystem mit Buffermöglichkeit in der 300 mm Linie bei *Infineon* erkennbar. Mit diesem System können die Lose zu jedem Zeitpunkt schnellstmöglich an jede Anlage transportiert werden.

Abb. 6. Blick in die 300 mm Linie für Leistungshalbleiter bei Infineon Technologies Dresden mit Buffermöglichkeiten der Lose über den Anlagen

Dank dieser neuartigen Technologien und äußerst schnellen Transportmöglichkeiten ist *Infineon* heute in der Lage, Halbleiterprodukte in einer Art Fließfertigung mit äußerst geringen Durchlaufzeiten bei hohem Volumen sicher und qualitativ hochwertig zu produzieren. Auch bei dieser Technologieinnovation ist deutlich geworden, wie wichtig es ist, vorab entsprechende Analysen der Systeme durchzuführen.

3.2 Automatisierung repetitiver, administrativer Geschäftsprozesse

Mittlerweile ist *Infineon Dresden* auf dem Weg zur Vollautomatisierung des Produktionsprozesses weit vorangeschritten und fertigt mehr als 400 Produkte auf Basis von 200 mm- und 300 mm-Wafern (Infineon 2019). Der hohe Automatisierungsgrad ist dabei geprägt durch eine verstärkte Verlagerung von Tätigkeiten in den administrativen Bereich. Viele Mitarbeiter haben sich daher in den letzten Jahren weitergebildet und steuern und regeln nun virtuell über Softwaretools die Produktion, die sie vorher physisch im Produktionsbereich durchgeführt und überwacht haben. Konzepte und Methoden von Industrie 4.0 haben Einzug in verschiedene Fachbereiche gehalten (Weinert et al. 2017). Während im Zuge von Anpassungen der Produktionsprozesse oft eine spezifische Neugestaltung und Optimierung durchgeführt wird, ist dies bei damit in Verbindung stehenden organisatorischen Prozessen häufig nicht der Fall. So entstehen planerische, administrative Prozesse, die oft repetitiv sind und zur Wertschöpfung beitragen können, aber die Kreativität der Mitarbeiter nicht fordern und Arbeitszeit für wertschöpfende, kreative Tätigkeiten blockieren. Gerade durch die Trends zu kleineren Auftragsgrößen und häufigeren kundenindividuellen Bestellungen (Losgröße 1) wird ein weiterer Anstieg dieser Tätigkeiten in der Zukunft erwartet (Mönch et al. 2017).

Im Rahmen des aktuellsten Forschungsprojekts („Integrated Development 4.0“, iDev40) mit Beteiligung von *Infineon Dresden* und der *Professur für BWL, insb. Logistik* der *TU Dresden*, wurden verschiedene Prozesse untersucht, die einen repetitiven und administrativen Charakter haben und sich für die Automatisierungsbetrachtung anbieten. Insbesondere Prozesse aus der Liniensteuerung, der produktionssteuernden Abteilung bei *Infineon Dresden*, bedürfen durch ein hohes Optimierungspotenzial und einen sinnvollen Hebel der Automatisierung besonderer Berücksichtigung. Dabei ist nach den Phasenmodellen des Geschäftsprozessmanagements die erste Stufe die Modellierung der Abläufe, welche unter Nutzung der Business Process Model and Notation (OMG 2013) durchgeführt wurde. Dabei umfasste die Analyse insbesondere auch die Flussorientierung als bedeutendes Merkmal der Logistik (Lasch 2018). Neben den Material- und Warenflüssen waren in diesem Kontext die Informationsflüsse von Bedeutung. Eine wichtige Stellschraube, die in Digitalisierungsprojekten nicht vernachlässigt werden sollte, wurde auch in diesem Fall deutlich: Eine Automatisierung lohnt sich umso mehr, je mehr in die

vorherige Optimierung der Prozesse investiert wird. In diesem Anwendungsfall bezog sich dies neben der Standardisierung und Verschlankung von Prozessen auch auf klar definierte Verantwortungsübergänge und Regeln zur Reduzierung der meisten manuellen Tätigkeiten. Erste Ergebnisse dieser Arbeiten können im Detail in Lohmer et al. (2020) nachgelesen werden.

Basierend auf den Erkenntnissen aus diesem Teilprojekt und der großen Anzahl von unterschiedlichen Softwaresystemen, die für die Steuerung der komplexen Fertigungslandschaft nötig sind, ergab sich eine weitere Forschungsrichtung im Zuge des iDev40-Projekts – die Verknüpfung von Business Process Management (BPM) und Robotic Process Automation (RPA). Während sich BPM auf das umfassende Neudesign von Prozessen fokussiert, kann mit RPA eine schnelle Automatisierung unter Nutzung der bestehenden Systeme umgesetzt werden. Daher wurden basierend auf den Projekterkenntnissen die Unterschiede und Gemeinsamkeiten von BPM und RPA detailliert untersucht (Flehsig et al. 2019). Eine Methodik wurde erarbeitet, die beide Methoden kombiniert und RPA in das bekannte BPM-Lebenszyklusmodell von Dumas et al. (2013) einbettet. Anhand einer Fallstudie wurde die Vorteilhaftigkeit der entwickelten Methodik untersucht und bestätigt. Im Durchschnitt konnte die Zeit für die Ausführung von administrativen Tätigkeiten in der Fallstudie durch eine vorgelagerte Anwendung der BPM-Methodik um mehr als 13% gegenüber dem bestehenden Prozessablauf reduziert werden. Durch die dann aufgesetzte Nutzung von RPA konnte die Durchlaufzeit um ca. 78% im Mittel verbessert werden. Die Anwendbarkeit durch die Endnutzer selbst und die Vermeidung von Fehlern im Ablauf sind weitere Vorteile der Optimierung mit RPA. Zu einem späteren Zeitpunkt könnte die schnelle RPA-Optimierung durch eine tiefgreifende Optimierung der Softwaresysteme ergänzt bzw. abgelöst werden. Durch die große Vielzahl an unterschiedlichen und stets spezifischen Softwaresystemen zur Planung und Steuerung der Produktionsprozesse der High-Mix, High-Volume Fertigung bei *Infineon Dresden* gibt es viele Anknüpfungspunkte für die Nutzung der Methodik. Intelligente RPA, die auf selbstlernende und mit künstlicher Intelligenz untersetzte Prozesse aufbaut, ist der nächste Evolutionsschritt, der sich zukünftig für eine Eruierung anbietet (Agostinelli et al. 2019; Scheer 2020).

Durch die angesprochene Verschiebung der Tätigkeiten in den administrativen Bereich ergeben sich auch für Entwicklungsingenieure neue Möglichkeiten. Fertigungsexperimente und -umstellungen können remote gestartet, überwacht und kontrolliert werden. Dabei sind zu unterschiedlichen Zeitpunkten Interaktionen mit den Softwaresystemen notwendig, die optimalerweise an allen Standorten in Echtzeit harmonisiert werden. Durch die gestiegene Zahl von Änderungsvorhaben in den letzten Jahren, ist ein abgestimmter Prozess und ein Änderungsmanagement nötig, dass aktuell im Rahmen des iDev40-Projekts entwickelt wird. Ziel ist die Erhöhung der Transparenz durch die Darstellung der zeitlichen Verkettung der Änderungsvorhaben und die Harmonisierung der Softwaresysteme zur Vermeidung von administrativer Doppelarbeit. Durch die Anwendung der aktuell aufstrebenden Methodik des Process Mining, welche als evidenzbasierte Methodik die Nutzung von Prozessdaten zur Extraktion von Prozessmodellen vorsieht, wird eine weitere wissenschaftliche Vorgehensweise in der Praxis erprobt. Aus realen Ereignisdaten wird der Ist-Prozessablauf bestimmt („Discovery“), der im Folgenden mit dem Standardprozessmodell bzw. Soll-Prozessablauf verglichen werden kann („Conformance Checking“) (van der Aalst 2012). Im Unterschied zu den klassischen BPM-Methoden wird auf vorhandene Daten anstatt auf Interviews, Workshops oder Dokumente zurückgegriffen, um die Prozessmodelle zu entwickeln. Das „Enhancement“ als dritter Schritt des Process Mining zielt dann auf eine Verbesserung des bestehenden Prozessmodells unter Nutzung des Event Logs ab. Beispielsweise können Prozesse identifiziert werden, die zwingend zu durchlaufen sind, aber durch eine Berechtigungsbeschränkung ein natürliches „Bottleneck“ darstellen. Andere Möglichkeiten umfassen die Einbeziehung von Durchlaufzeiten, um fallspezifisch die zu erwartende Durchlaufzeit für jede Prozessinstanz auswerten zu können (Aguirre & Rodriguez 2017).

3.3 Nutzung der Blockchaintechnologie in der Halbleiterfertigung

In der Halbleiterindustrie werden als Folge der hohen Produktionskomplexität häufig verschiedenste heterogene Softwaresysteme zur Steuerung der Prozesse verwendet. Da die Systeme meist auf einen spezifischen Verwendungszweck zugeschnitten sind, ist die Übersichtlichkeit eingeschränkt und insbesondere eine Echtzeitdarstellung der zu erwartenden Lose in einem Fertigungsbereich kann nur mühsam

manuell erstellt werden. Dazu kommt, dass die unterschiedlichen Fertigungsbereiche intern um Kapazitäten konkurrieren und die variierenden Produktmixe es den Produktionsbereichen zusätzlich erschweren, verlässliche Planungen zukünftiger Bedarfe zu erstellen. Zur Optimierung der Datentransparenz der unterschiedlichen Fertigungsbereiche bei *Infineon Dresden* wurde daher die neuartige Blockchaintechnologie auf ihre Passfähigkeit für die komplexen Fertigungsprozesslandschaften der Halbleiterindustrie untersucht. Die Blockchaintechnologie stellt eine Technologie zur transparenten und unveränderlichen sowie dezentralen Speicherung von Transaktionen dar, die auf verschiedene Knoten in Peer-to-Peer Netzwerken verteilt wird (Swan 2015). Unter Nutzung der Design Science Research Methodik nach Hevner et al. (2004) wurde ein Konzept einer Blockchainlösung mit einem Fokus auf den Vormontagebereich der 300 mm Linie von *Infineon Dresden* erstellt. Die Umsetzung erfolgte auf einer privaten Blockchain unter Nutzung der *Hyperledger Fabric* Plattform (Hyperledger 2020). Die Operationen in den durchlaufenen Fertigungsbereichen werden losweise in den einzelnen Blockchains dokumentiert. Diese Transaktionen können analysiert werden, um bspw. mittels Simulation zukünftige Szenarien in der Vormontage zu bestimmen und die Anlagen auf die Szenarien vorzubereiten. Neben der Transparenz der Daten für alle angeschlossenen Fertigungsbereiche ermöglicht diese Lösung eine gesicherte Datenübergabe in einheitlicher Form, die Bündelung aller Informationen in einem Datensatz und ein fabriksweites Änderungsmanagement mit klarer Nachvollziehbarkeit. Mittels des analytischen Hierarchieprozesses (Saaty, 1994) wurde die Blockchainlösung mit einer traditionellen Datenhaltung in einem zentralen Data Warehouse verglichen. Neben ökonomischen Kriterien wurden dabei auch technische und organisatorische Kriterien mit verschiedenen Unterkriterien genutzt, wie z.B. Skalierbarkeit, Datenverfügbarkeit, Standardisierung oder auch Dokumentation und Service. Die ökonomischen Kriterien wurden dabei von den Experten als sehr wichtig herausgestellt, gefolgt von technischen und organisatorischen Kriterien. In der Bewertung der Alternativen zeigte sich die Dominanz der Blockchainlösung insbesondere für die ökonomischen und die organisatorischen Kriterien. Im technischen Bereich konnte die Blockchain die Unterkriterien Datensicherheit und -vollständigkeit sowie Fehlertoleranz für sich entscheiden. Der Designprozess hat aufgezeigt, dass eine Blockchainlösung auch für die interne Verwendung innerhalb eines komplexen Unternehmens sinnvoll sein kann, wenn verschiedene Geschäftsbereiche mit einem gewissen Eigeninteresse involviert sind. Als interessant für zukünftige Forschung kann hier die Integration von weiteren Fabriken aus der internen Supply Chain ebenso wie ein Anschluss externer Partner aus angrenzenden Bereichen genannt werden.

3.4 Anwendung von künstlicher Intelligenz in der Waferfertigung

Mittels der Automatisierung und Digitalisierung schaffen die Unternehmen, die diese neuen Technologien in Ihrer Produktion verstärkt einsetzen, einen großen Wettbewerbsvorteil gegenüber den Mitbewerbern, die sich der digitalen Transformation verschließen (Schneider et al. 2018). Mit der fortschreitenden Möglichkeit immer mehr Daten zu verarbeiten, entstand der nächste Hype in der Industrie: die Anwendung von künstlicher Intelligenz (engl. Artificial Intelligence). Da sich die Halbleiterindustrie durch eine enorme Produkt- und Prozesskomplexität auszeichnet, ist die Anwendung der künstlichen Intelligenz ein „Muss“ zur weiteren Steigerung der Fertigungseffizienz. Ein klassisches Halbleiterwerk verfügt heute meist über mehr als tausend Produktionsanlagen, die im Bruchteil von Sekunden Maschinendaten in das zentrale Steuerungssystem senden. Wenn es gelingt, diese Daten in Echtzeit zu verarbeiten und damit die Kontrolle und Steuerung der Werke zu verbessern, ist das die nächste Stufe zur Steigerung der Produktivität. Im Rahmen der künstlichen Intelligenz werden Algorithmen erstellt, die es ermöglichen, basierend auf den ausgewählten Maschinendaten komplexe Steuerungen durchzuführen. *Infineon* erstellt immer komplexere Algorithmen, um den stets steigenden Produktmix auf die noch stetiger steigenden Kundenanforderungen hin zu optimieren. Mathematische Berechnungen mit Unterstützung der künstlichen Intelligenz ermöglichen eine Optimierung der klassischen Zielkonflikte von Auslastung, Cycle Time und Umrüstvorgängen, so dass alle drei Kennzahlen positiv beeinflusst werden. Das rechtzeitige und automatisierte Erkennen verschiedenster Abweichungen, wie Ausbeuteverluste oder regelmäßig auftretender Defekte auf den Wafern anhand ihrer typischen Signaturen ist eine weitere Anwendungsmöglichkeit. Die Automobilindustrie nutzt diese Technologien bereits heute, um mittels roboterbasierter, optischer Methoden kleinste Unregelmäßigkeiten im Lack der Autos erkennen zu können. In der Halbleiterindustrie ist so eine Erkennung durch die Vielzahl unterschiedlicher Ebenen und

ständig wechselnder Produkte noch komplexer. Es wird jedoch an besseren Datenbanken und Algorithmen gearbeitet, die mittels großer Rechnerleistungen die rein intuitive Inspektion durch den Menschen gezielt ersetzen können.

Ein weiteres wichtiges Feld im Rahmen der künstlichen Intelligenz in der Halbleiterfertigung ist der Einsatz von Flotten von mobilen, frei fahrenden Robotern zur Be- und Entladung der Produktionsanlagen. Hierzu wurden Flottenmanager entwickelt, die mittels einer zentralen Steuerung die gezielte Abarbeitung der Lose mit einer Flotte von Robotern abarbeiten können. Die Roboter sowie nahezu alle Fertigungsanlagen im Reinraum verfügen über eine Vielzahl von Sensoren, die wiederum ständig Daten zur weiteren Verarbeitung in das Fabrikssystem senden. Die Datenverarbeitung erfolgt hier in Cloudsystemen. *Infineon* arbeitet im Rahmen des Forschungsprojekts „Arrowhead Tools“ (www.arrowhead.eu) in Zusammenarbeit mit 88 Partnern aus Industrie und Forschung an Architekturen und Softwarelösungen zur standardisierten Bearbeitung der Sensordaten. Dadurch wird auch ein Zugang zu Bereichen wie „Smart Energy“, „Smart City“ und „Smart Robotics“ erschlossen. Speziell im Bereich der Roboter ist es bereits gelungen, mittels neuer Algorithmen Daten von Sensoren aus optischen Kameras mit Daten aus Radar zu fusionieren und damit auf einfachste Weise die Mensch-Maschine Interaktionen im Reinraum zu verbessern (Zoghلامي et al. 2019). Diese entwickelten Algorithmen konnten schnell auf andere Anwendungsgebiete übertragen werden, wie z.B. das Zählen von Menschen in Gebäuden. So wurde in der Covid-19 Krise eine Time-of-Flight Kamera eingesetzt, um die Anzahl der Mitarbeiter in der Kantine zu zählen und die Auslastung zu überwachen. Mit immer besserer Computerleistung werden in den nächsten Jahren zahlreiche Applikationen in der Fertigung entstehen, die auf immer komplexeren Algorithmen basieren und mittels Cloud- oder Fog Computing weitere Aufgaben in der Fertigungssteuerung übernehmen können. Auf dem Weg zur Revolution der Halbleiterindustrie durch Supercomputing bleibt ein elementarer Punkt, dass der Mensch stets noch über die Kontrolle des Gesamtsystems verfügt und bei Bedarf jederzeit eingreifen kann (Luhn et al. 2018).

4 Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt die Historie der Bemühungen zur Nutzung innovativer Logistiklösungen zur Optimierung der Produktionsprozesse in der Halbleiterfertigung. Der Fokus liegt dabei auf der intensiven Zusammenarbeit von *Infineon Technologies Dresden* mit der *Professur für BWL, insb. Logistik* der *TU Dresden* in zahlreichen Projekten. Die Wissenschaft war dabei stets eine wichtige Unterstützung bei allen Fragestellungen zur Produktionslogistik an der Schnittstelle zwischen Technologieentwicklung und Produktion. Zu Beginn der Zusammenarbeit wurde das Thema Ramp Up Management fokussiert. Dieser Themenkomplex wurde anschließend mit neuen Ideen zur Beschleunigung von kundenspezifischen Produkten und wichtigen Entwicklungslosen aus dem Bereich der Fließfertigung erweitert. Erstmals wurde ein Konzept zur Fließfertigung im Bereich Wafer Test erarbeitet, welches die Steuerung wichtiger Produkte unterstützte. So konnten die Durchlaufzeiten der Produkte in wenigen Monaten mehr als halbiert werden. Anschließend wurde der Aufbau der 300 mm Pilotlinie am Standort durch die Praxiskooperation begleitet. Hier entstanden zahlreiche Vorschläge zur Verbesserung und Optimierung des Layouts der Fabrik, um bereits vor dem Start der Massenproduktion von 300 mm Leistungshalbleitern optimale Logistikabläufe zu ermöglichen, die zu geringen Durchlaufzeiten der Produkte führen. Im aktuellen Forschungsprojekt arbeiten die universitären und industriellen Partner unter anderem an der Automatisierung von administrativen Prozessen im Bereich der Liniensteuerung, um die digitale Transformation im Unternehmen voranzutreiben.

5 Ausblick:

Die Logistik gewinnt im Umfeld der Halbleiterproduktion stetig an Bedeutung. Dies wird unter anderem durch die rasant steigende Komplexität der Halbleiterfertigungen, getrieben von immer stärker voranschreitenden Technologien und einer Vervielfachung des Produktspektrums für die Kunden, deutlich. Die fortschreitende Automatisierung und Digitalisierung führen dabei zum Abbau zahlreicher nicht wertschöpfender Tätigkeiten in der Produktion und Verwaltung. Es kommt jedoch ein nicht unerheblicher Teil neuer Aufgaben auf die Mitarbeiter zu, die von immer weniger Menschen durchgeführt werden müssen. Dabei ist das benötigte Spezialwissen der Mitarbeiter ein wesentlicher Aspekt, der zum Erfolg

oder Misserfolg im Unternehmen beitragen kann. Klare und gut strukturierte Geschäftsprozesse sind durch logistische Optimierung erreichbar. Noch bevor jegliche Automatisierungs- und Digitalisierungsprojekte gestartet werden, ist es daher elementar, die bestehenden und die zukünftig zu optimierenden Prozesse strukturiert darzustellen, bspw. mittels BPMN. Auch die Projektziele sowie Zeit- und Ressourcenpläne müssen zuerst geklärt werden, genauso wie das zukünftige Betreiberszenario mit den entsprechenden Verantwortlichkeiten. Neuartige Visualisierungsmethoden oder auch Simulationen von Anlagen und Prozessen helfen heute bereits im Vorfeld Zeit und Ressourcen zu sparen. Beispiele können hier virtuelle Lose sein, durch die zukünftige Pilotlinien ohne Materialverschwendung im Vorfeld auf eine Volumenfähigkeit geprüft werden können. Mittels Big Data Analysen und Data Mining können Störungen schnell erkannt und Ressourcen für aufwendige Fehleranalysen eingespart werden. Diese Ressourcen können dann für wertschöpfendere Aufgaben wie die Produktbetreuung neuer Technologien verwendet werden. Daneben bieten Themen aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz Chancen, um schnell wichtiges Wissen in den Firmen zu generieren und übergreifend z.B. durch große Wissensdatenbanken zu verteilen. Ein weiteres Beispiel ist die Möglichkeit mittels Cloudcomputing und neuronalen Netzen eine Vielzahl von Sensordaten in einer komplexen Produktion abzugreifen und dabei völlig neue Möglichkeiten der Produktionsüberwachung einzuführen. Abb. 7 zeigt im Stil einer Roadmap, welche digitalen Technologien seit 1990 in die Halbleitertechnologien eingegangen sind, wie z.B. statistische Prozesskontrollen, Automatisierung der Linien und erste Digitalisierungen.

Abb. 7. Rückblick und Ausblick für zukünftige Fertigungsstrukturen

Die Einführung weiterer Automatisierungs- und Digitalisierungsprojekte sowie der verstärkte Einsatz von erweiterten Analyse- und Simulationstechniken bis hin zu Edge- und Supercomputing wird in den nächsten Jahren sukzessive Einzug in diese äußerst innovative Branche halten. Nur den Unternehmen, die sich den hohen Investitionen und komplexen Anpassungen stellen können, wird es gelingen, sich weiter am Markt zu behaupten. Ganz wichtig ist dabei immer, dass die Qualität der gefertigten Produkte auf höchstem Niveau ist und die Mitarbeiter der Unternehmen entsprechend geschult sind, um mit den neuen Technologien zu arbeiten. Die Bereitschaft zu ständigem Wandel ist eine wichtige Voraussetzung und kann als weitere Forschungsrichtung im Sinne der Mensch-Technologie-Zusammenarbeit herausgestellt werden. Auch das jeweilige Management muss diese Prozesse unterstützen und für funktionierende Abläufe sorgen und wandlungsfähige, nachhaltige Organisationsformen unterstützen.

Acknowledgment

This research was supported by the EU project iDev40. The iDev40 project has received funding from the ECSEL Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 783163. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program. It is co-funded by the consortium members, as well as grants from Austria, Germany, Belgium, Italy, Spain, and Romania. The content of this article does not reflect the official opinion of the Joint Undertaking ECSEL. Responsibility for the information and views expressed in the article lies entirely with the authors.

Literaturverzeichnis

- Agostinelli, S., Marrella, A., & Mecella, M. (2019). Research Challenges for Intelligent Robotic Process Automation. In *Lecture Notes in Business Information Processing* (Vol. 362 LNBIP, S. 12–18). https://doi.org/10.1007/978-3-030-37453-2_2
- Aguirre, S., & Rodriguez, A. (2017). Automation of a Business Process Using Robotic Process Automation (RPA): A Case Study. In J. C. Figueroa-García, E. R. López-Santana, J. L. Villa-Ramírez, & R. Ferro-Escobar (Eds.), *Communications in Computer and Information Science* (Vol. 742, S. 65–71). Springer International Publishing AG. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66963-2_7
- Dumas, M., La Rosa, M., Mendling, J., & Reijers, H. A. (2013). *Fundamentals of Business Process Management*. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33143-5>
- Eberts, D., Rottnick, R., Schneider, G., Keil, S., Lasch, R., & Buhmann, O. (2012). Managing variability within wafer test production by combining lean and six sigma. In *2012 23rd Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, ASMC 2012* (S. 33–38). <https://doi.org/10.1109/ASMC.2012.6212864>
- Gartner. (2020). Gartner Says Worldwide Semiconductor Revenue Declined 12% in 2019. Retrieved June 16, 2020, from <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-04-15-gartner-says-worldwide-semiconductor-revenue-declined-12-percent-in-2019>
- Heinrich, H., Schneider, G., Heinlein, F., Keil, S., Deutschländer, A., & Lasch, R. (2008). Pursuing the increase of factory automation in 200mm frontend manufacturing to manage the changes imposed by the transition from high-volume low-mix to high-mix low-volume production. In *ASMC (Advanced Semiconductor Manufacturing Conference) Proceedings* (S. 148–155). <https://doi.org/10.1109/ASMC.2008.4529020>
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75–105.
- Hyperledger. (2020). Hyperledger – Open Source Blockchain Technologies. Retrieved April 21, 2020, from <https://www.hyperledger.org/>
- Keil, S., Eberts, D., Igel, T., Schneider, G., Wilhelm, K., Lasch, R., & Deutschländer, A. (2011). Innovation and manufacturing excellence in mature multi-product semiconductor fabrication facilities via design for flow by 3. *IEEE - 2011 Semiconductor Conference Dresden: Technology, Design, Packaging, Simulation and Test, SCD 2011 - International Conference, Workshop and Table-Top Exhibition*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/SCD.2011.6068762>
- Keil, S., Lasch, R., Deutschländer, A., Heinlein, F., Heinrich, H., & Schneider, G. (2008). Flow Production in Semiconductor Industry – a Paradigm Shift in IC-Manufacturing. In *VIII: International Symposium, Research-Education-Technology Gdansk, June-2008*. Gdansk.
- Keil, S., Lasch, R., Deutschländer, A., Heinrich, H., & Schneider, G. (2009). Identifikation von Ablauffamilien zur Integration flussorientierter Fertigungsstrukturen in der Halbleiterproduktion. In *Logistik Management* (S. 161–185). Physica-Verlag HD. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2362-2_8
- Keil, S., Lasch, R., Deutschländer, A., & Schneider, G. (2007). Einfluss- und Erfolgsfaktoren auf den Ramp Up in der Halbleiterindustrie. In *Logistikmanagement* (S. 201–230). Wiesbaden: DUV. https://doi.org/10.1007/978-3-8350-5458-5_10
- Keil, S., Schneider, G., Eberts, D., Wilhelm, K., Gestring, I., Lasch, R., & Deutschländer, A. (2011). Establishing continuous flow manufacturing in a Wafer test-environment via value stream design. In *ASMC (Advanced Semiconductor Manufacturing Conference) Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ASMC.2011.5898196>
- Keil, S., Schneider, G., Kuttig, M., Deutschländer, A., Lange, A., & Heinrich, H. (2018). Enhancing flexibility and robustness of semiconductor production by using autonomous modular services. In *2018 29th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, ASMC 2018* (S. 359–364). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ASMC.2018.8373171>
- Lasch, R. (2018). *Strategisches und operatives Logistikmanagement: Prozesse* (2. Auflage). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Lohmer, J., Flechsig, C., Lasch, R., Schneider, G., Eberts, D., & Zettler, B. (2020). Automation of Cross-Factory Decision-Making Within Administrative Processes to Enhance Data Quality for Production. In S. Keil, R. Lasch, F. Lindner, & J. Lohmer (Eds.), *Lecture Notes in Electrical Engineering* (S. 64–71). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48602-0_7
- Luhn, G., Schneider, G., von der Weth, R., & Keil, S. (2018). On the deep nature of human knowledge: the oscillating mind-body-system (OMB). Thoughts about a physical-bio-logical inspired approach in neuroscience, its relationship to machine learning (‘deep learning’), and the capability to design information systems. In *apc conference*. Austin, Texas.
- Mönch, L., Uzsoy, R., & Fowler, J. W. (2017). A survey of semiconductor supply chain models part I:

- semiconductor supply chains, strategic network design, and supply chain simulation. *International Journal of Production Research*, 7543, 1–20. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1401234>
- Moore, G. E. (1965). Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38(8), 114–117.
- OMG. (2013). Object Management Group, Business process modeling notation (BPMN) version 2.0.2. *Object Management Group*, (December), 134. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33155-8>
- Rank, S., Hammel, C., Schmidt, T., Müller, J., Wenzel, A., Lasch, R., & Schneider, G. (2016). The correct level of model complexity in semiconductor fab simulation - Lessons learned from practice. In *2016 27th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, ASMC 2016* (S. 133–139). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ASMC.2016.7491145>
- Saaty, T. L. (1994). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *Interfaces*, 24(6), 19–43. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Scheer, A.-W. (2020). Robotic Process Automation (RPA). In *Unternehmung 4.0* (S. 117–132). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-27694-2_7
- Schneider, G., Keil, S., & Luhn, G. (2018). Opportunities, challenges and use cases of digitization within the semiconductor industry. In *2018 29th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, ASMC 2018* (S. 307–312). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ASMC.2018.8373173>
- Schneider, G., Wagner, T., & Kraft, M. (2015). Use of simulation studies to overcome key challenges in the fab automation of a 300 mm power semiconductor pilot line comprising thin-wafer processing. In *2015 26th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, ASMC 2015* (S. 42–47). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ASMC.2015.7164448>
- Statista. (2020). *Umsatz - Halbleiterindustrie 1988-2019* / Statista. Retrieved from <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/150901/umfrage/umsatz-in-der-halbleiterindustrie-seit-1988-weltweit/>
- Swan, M. (2015). *Blockchain: Blueprint for a New Economy* (1st ed.). Sebastopol, CA: O'Reilly Media.
- van der Aalst, W. (2012). Process mining: Overview and opportunities. *ACM Transactions on Management Information Systems*, 3(2), 1–17. <https://doi.org/10.1145/2229156.2229157>
- Weinert, N., Plank, M., & Ullrich, A. (2017). *Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik*. (N. Weinert, M. Plank, & A. Ullrich, Eds.), *Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54317-7>
- Zoghalmi, F., Heinrich, H., Schneider, G., & Hamdi, M. A. (2019). Tracking body motions in order to guide a robot using the time of flight technology. In *Indoor Positioning and Indoor Navigation IPIN19 IEEE Conference*. Pisa, Italy.