

Experimentelle Analyse zur Einschleusplanung in der Halbleiterfertigung mittels einer stochastischen Rückwärtssimulation

Christoph Laroque^{1*}, Madlene Leißau¹,
Wolfgang Scholl², Germar Schneider², Patrick Preuß²

¹Industry Analytics, Westsächsische Hochschule Zwickau, Kornmarkt 1, 08056 Zwickau, Deutschland;
**christoph.laroque@fh-zwickau.de*

²Infiniteon Technologies Dresden GmbH & Co. KG, Königsbrücker Straße 180, 01099 Dresden, Deutschland

Abstract. Manufacturing companies are experiencing many challenges regarding customer-oriented and on-time production, especially in the context of an intensified global business and while advancing the digital transformation. Accordingly, the ongoing development and deployment of Industry 4.0 solutions for customisable products in small batch sizes, not only pose new problems for work preparation, but also for operative production planning in connection with high cost, time, and quality pressure. Modern, complex, and highly automated production systems (in this case from the semiconductor domain) must be operated close to an optimal operating state to be economically reasonable. Promised delivery dates and throughput times specified in contracted service agreements must be ensured and require a permanent and effective adjustment of production planning and control in daily execution. All other general conditions of an economic production remain unchanged. Today, the question of whether the production target is realistic and whether all promised delivery dates are met are still answered with rather simple backward-oriented approaches, mostly without considering uncertainties, stochastic behaviour of the manufacturing system or alternatives that arise during operation. As shown in previous publications by the authors, these questions can be answered in more detail and more resilient using a backward-oriented discrete event-based simulation approach (SimBack). This article presents additional findings. The results show and deepen the impression, that the SimBack approach can successfully solve scheduling questions for customer-specific orders in a real-world environment.

1 Motivation

Der intensive globale Wettbewerb und die fortschreitende digitale Transformation sowie eine kundenorientiertere und termingerechtere Produktion und Lieferung sind entscheidende Wettbewerbsfaktoren für produzierende Unternehmen über viele Branchen hinweg. Die stetige Weiterentwicklung der Vision von Industrie 4.0 – zukünftig auch Industrie 5.0 [1] – und das Konzept einer "smarten Fabrik" für individualisierbare Produkte in kleinen Losgrößen stellen die Arbeitsvorbereitung sowie die operative Produktionsplanung vor immer neue Herausforderungen. Hochautomatisierte Produktionsanlagen müssen in einem Betriebszustand nahe am Optimum betrieben werden, um wirtschaftlich erfolgreich zu sein. Darüber hinaus müssen zugesagte Liefertermine und Durchlaufzeiten aus Rahmenverträgen (Service Level Agreements) eingehalten werden und erfordern eine permanente (effektive) Anpassung der Produktionsplanung und -steuerung im täglichen Betrieb.

Zur Herstellung und Erhaltung eines solchen (weitmöglichst) „optimalen Betriebszustands“ müssen sich Unternehmen fortwährend über die konkreten Stell-schrauben einer wirksamen Anpassung der Produktionsplanung und -steuerung bewusst sein. Ansonsten können kleinste Unsicherheiten im Rahmen von Produktionsplanung und -steuerung sowie daraus resultierender Anpassungen unerwartete Rückwirkungen auf die Leistung des gesamten (Produktions-)Systems sowie eine Fehlnutzung monetärer und zeitlicher Ressourcen zur Folge haben. Produktionsplanung und -steuerung müssen aber auch anpassbar bleiben, um gleichermaßen eine bestimmte Flexibilität in Bezug auf die zu planenden

Aufträge zu erhalten, um auf kurzfristige Kunden- und Marktänderungen noch reagieren zu können. Die damit verbundenen Risiken sind im laufenden Betrieb für Unternehmen zumeist nicht vollumfänglich oder gar nicht abzuschätzen; Methoden und Werkzeuge simulationsgestützter Optimierung erfahren hier mehr und mehr Bedeutung. Die andauernde Digitalisierung der Produktionsplanung und -steuerung unterstreicht in diesem Zusammenhang den stetig wachsenden Stellenwert der Simulation [2][3][4]. Demgemäß „zeigt sich regelmäßig, dass der Einsatz der Simulation bei der Planung von komplexen dynamischen Produktions- und Logistiksystemen zu abgesicherten und besser nachvollziehbaren Planungsergebnissen führt“ [4].

Im Rahmen des EU-ECSEL-Forschungsprojektes iDEV40 (Präsentation des Gesamtprojektes unter www.idev40.eu) wurden Einsatzszenarien der rückwärtsorientierten Materialflusssimulation in der Halbleiterfertigung erschlossen. Während die prinzipielle Machbarkeit des Ansatzes auf Fabrikebene bereits mehrfach nachgewiesen werden konnte [5][6], galt es im Vorhaben, die Methode an die Besonderheiten der Halbleiterfertigung anzupassen und in einem praxisnahen Modell zu verproben.

Gegenüber anderen Branchen sind die Produktionssysteme und -prozesse der in dieser Arbeit adressierten Halbleiterfertigung durch ein überdurchschnittlich hohes Maß an Komplexität charakterisiert. Im Hinblick auf die Prozessstabilität gelten die eingesetzten Fertigungstechnologien im Mikro- und Nanometerbereich als besonders sensitiv und beinhalten daraus resultierend sehr komplexe Steuerungslogiken. In Abhängigkeit verschiedener im Vorfeld festgesetzter Produkt- und Prozesskriterien durchlaufen einzelne Produktionslose zum Teil mehr als 1000 Prozessschritte. Einzelne Produktionslose werden mitunter mehrfach sowie mit hohem Automationsgrad unter Reinraumbedingungen über spezielle und teilweise dieselben Maschinen und Transportrouten prozessiert (Re-Entry-Cycles). Die resultierende Komplexität der Produktionssysteme und -prozesse führt folglich nicht selten zu einem Ausschuss von Zwischenprodukten in relevanter Größenordnung, den es dann (kurzfristig) durch zusätzliche Einschleusungen auszugleichen gilt.

Nach einer kurzen Darstellung des wissenschaftlichen Stands der Technik sowie einer Erläuterung des prinzipiellen Lösungsansatzes sollen in diesem Beitrag im Schwerpunkt aktuelle Experimentiererergebnisse eines „real-world use-case“ unter Verwendung des Simulationswerkzeuges AutoSched AP detailliert beschrieben

und dargestellt werden. Die abschließende Zusammenfassung beschreibt das weitere Vorgehen der Autoren nach Abschluss des EU-Projektes im Oktober 2021.

2 Rückwärtssimulation

In Ergänzung zu konventionellen Lösungsverfahren der gemischt-ganzzahligen Optimierung, verschiedenen Heuristiken oder der einfachen Vorwärts- und Rückwärtsterminierung (mit oder ohne Kapazitätsbeschränkungen) beschäftigt sich dieser Beitrag mit einem Ansatz der diskreten ereignisorientierten Simulation, wobei Entscheidungs- und Planungsprobleme einer rückwärts gerichteten Terminierung unterzogen werden. Ein solcher Ansatz wird nachfolgend als Rückwärtssimulation verstanden und meint die Umkehrung des Materialflusses einer Simulation, seiner Ablauflogik samt der implementierten Steuerungs- und Prioritätsregeln (Figure 1) und die daraus resultierende rückwärtsgerichtete Ausführung des Simulationslaufes selbst. Anknüpfend an eine rückwärtsgerichtete Ausführung einer Simulation lassen sich nach Jain und Chan [7] sowie Laroque [8] fundierte Aussagen über zu erreichende Zielgrößen im Kontext zugesagter Liefertermine treffen. Die Rückwärtssimulation ist ein effizientes Werkzeug für die Implementierung der Verfahrensweisen einer (einfachen) Rückwärtsterminierung. Demgegenüber kann die Rückwärtssimulation die Lösungsqualität eines herkömmlichen Produktionsplanungs- und Terminierungsmechanismus verbessern und die Vorteile bezüglich der Ausführungsgeschwindigkeit simulationsbasierter Terminierungsansätze (bspw. gegenüber optimierenden Verfahren) wirksam werden lassen [7].

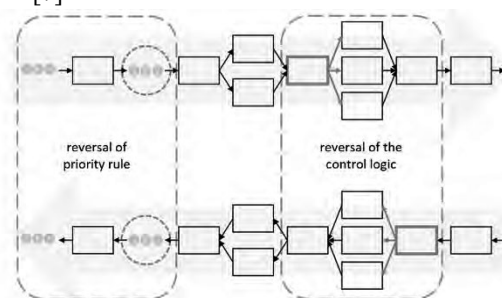


Figure 1: Umkehrung der Ablauflogik einer Simulation samt der implementierten Steuerungs- und Prioritätsregeln

Die vorwärtsgerichtete Ausführung einer Simulation und die Termin- und Reihenfolgeplanung orientieren sich an denselben Prinzipien wie die Verfahrensweise einer

(einfachen) Vorwärtsterminierung. Entsprechend bestimmen eine Termin- und Reihenfolgeplanung durch fortlaufende Addition produktspezifischer Bearbeitungszeiten, d. h. einzelner Vorgangslaufzeiten die frühestmöglichen Zwischen- und Endtermine einzelner Arbeitsvorgänge und die möglichen Fertigstellungstermine einzelner Aufträge [9][10]. Im Gegensatz dazu beginnen Termin- und Reihenfolgeplanung einer rückwärtsorientierten Simulation mit dem Ziel einer Nullverspätung und danach einer zeitlichen Realisierbarkeit zugesagter Liefertermine mit dem spätestmöglichen Fertigstellungstermin sowie der höchsten Dispositions-/Produktionsstufe [6][9][10][11]. Für die Art und Weise einer Auftragsfreigabe an einer Maschine beziehungsweise Ressource werden Aufträge, welche innerhalb einer rückwärtsgerichteten Ausführung an erster Stelle ausgewählt und bearbeitet werden, in einer vorwärtsgerichteten Ausführung auf der Zeitachse später betrachtet [11].

Eine solche Inversion oder Linksverschiebung auf der Zeitachse im Sinne einer vorwärtsgerichteten Simulation ist nach der rückwärtsgerichteten Simulation zur Generierung eines Einschleusplans durchzuführen, um die resultierende Lösungsmenge validieren zu können. Entsprechend lassen heutige Simulationswerkzeuge und der implementierte (vorwärtsorientierte) Planungszeitraum keine eins-zu-eins beziehungsweise zeitlich absteigende Einlastung im Sinne einer rückwärtsgerichteten Simulation zu. So kann angenommen werden, dass ein Auftrag *A1* mit einem (originären) Fertigstellungstermin in 5 Tagen in einer vorwärtsgerichteten Simulation Vorrang gegenüber einem Auftrag *A2* mit einem Fertigstellungstermin in 15 Tagen besitzt, diese Aufträge gemäß einer Rechtsverschiebung und einer rückwärtsgerichteten Simulation jedoch in umgekehrter Reihenfolge (ausgehend des spätestmöglichen Fertigstellungstermins) zu betrachten sind. Im Anschluss konkretisiert eine Linksverschiebung auf der Zeitachse im Sinne einer vorwärtsgerichteten Simulation und ferner einer Anwendung und Validierung der resultierenden Lösungsmenge die Differenz eines (originären) Fertigstellungstermins und einer simulierten Durchlaufzeit (nach rückwärtsgerichteter Ausführung). Eine Nullverspätung und danach eine zeitliche Realisierbarkeit zugesagter Liefertermine ist erreicht, wenn der Zeitpunkt der (simulierten) Fertigstellung früher liegt als der zugesagte Liefertermin [11][12]. Erste Anwendungsstudien, bei denen Aufträge mit Hilfe einer Rückwärtssimulation zeitlich rückwärtsgerichtet eingeplant werden, sind bereits seit den 1990er Jahren verfügbar [7][12][13][14].

Das Vorhaben und die anschließende Modellierung einer rückwärtsgerichteten Ausführung einer Simulation verlangen im Vorfeld einige sorgfältige Überlegungen, um eine korrekte Umkehrung des Simulationsmodells vornehmen zu können und sich von der Denkweise einer vorwärtsgerichteten Modellierung zu lösen. Diese Überlegungen beziehen sich insbesondere auf eine Umkehrung einzelner Produktionsprozessfolgen, beispielsweise einer Montage in eine Demontage [7]. Zum abstrahierten Nachempfinden des Verhaltens eines bereits bestehenden und/oder zukünftig beabsichtigten (realen) Systems innerhalb einer vorwärtsgerichteten Simulation sind in der rückwärtsgerichteten Modellierung ebenso die implementierten Steuerungs- und Prioritätsregeln zu übertragen. Steuerungs- und Prioritätsregeln lassen sich nicht immer eins-zu-eins in das korrespondierende Rückwärts-Pendant invertieren; hier sind spezifische Regeln für das Rückwärtsmodell zu entwickeln und das resultierende Modell auch diesbezüglich durch die vorwärtsgerichtete Simulation zu validieren. Eine experimentelle Untersuchung kann die Lösungsqualität eines solchen Ansatzes bezogen auf zeitlich rückwärtsgerichtete Entscheidungs- und Planungsprobleme weiter steigern. Ferner lassen sich nach Graupner et al. [6] die Vorteile einer vorwärts- und rückwärtsgerichteten Simulation in einer kombinierten Ausführung vereinen und mögliche Modellierungsdiscrepanzen bezogen auf die rückwärtsgerichtete Modellierung ausgleichen.

Die Modellierung einer rückwärtsorientierten Ausführung einer Ablaufsimulation zieht immer eine Umkehrung der Quelle-Senke-Beziehung nach sich. Konkret heißt das, dass Aufträge oder Lose an den Stellen in das System eingeschleust werden, an der sie dieses in der vorwärtsorientierten Ausführung verlassen. Andersherum verlassen sie das Rückwärts-Pendant an den Einschleusstellen der vorwärtsgerichteten Ablaufsimulation („from product to raw material“). Die Rückwärtssimulation ist dennoch nicht als reine ‚Umkehrfunktion‘ der Vorwärtssimulation zu verstehen. So verweisen Ying und Clark [14] darauf, dass Vorwärts- und Rückwärtssimulation zur selben jeweils berechneten Simulationszeit nicht denselben Zustand aufweisen müssen (die Rückwärtssimulation ist kein „Zurückspulen“ des Vorwärtsmodells, sondern eine eigenständige Abstraktion).

Neben der Verkürzung der Durchlaufzeit und einer Erhöhung des Durchsatzes sowie der aktuellen Verfügbarkeit und Wertschöpfung einzelner Produktionsanlagen (Overall Equipment Effectiveness) gilt es im Zuge einer rückwärtsberechneten Ausführung einer

Simulation unerwünschte Wartezeiten, die im Verlauf einer reinen vorwärtsgerichteten Simulation entstehen, auf ein Minimum zu reduzieren [6][7].

3 Integration in betriebliches Simulationswerkzeug und aktuelle Ergebnisse

Nachdem in Vorarbeiten bereits ein vereinfachtes Modell des nachfolgend beschriebenen „real-world use case“ unter Verwendung des Simulationswerkzeuges AnyLogic modelliert und bezüglich einer rückwärtsorientierten Materialflusssimulation untersucht wurde [15][16], galt es den methodischen Ansatz zur Generierung einer Einschleusplanung durch Rückwärtssimulation innerhalb des Simulationswerkzeuges AutoSched AP beim Praxispartner zu integrieren und zu erproben.

Das betrachtete Modell des Vormontageprozesses besteht im Wesentlichen aus 13 Stationengruppen mit bis zu 27 Stationen pro Stationengruppe und einer verfügbaren Kapazität von bis zu 8 Losen pro Station. Eine zusätzliche Stationengruppe *DUMMY* ist eine starke Abstraktion der abzubildenden Realität und bezogen auf die Anzahl baugleicher Anlagen eine Ausnahme (Stationenanzahl = 1000); sie wurde gewählt, um künstlich entstehende Engpässe in der Simulation des Materialflusses zu vermeiden.

Entsprechend der implementierten Steuerungs- und Prioritätsregeln des realen Vorbildes gelten für das nachempfundene System und gemäß einer Bearbeitungsliste innerhalb einer Stationengruppe (*FWLRANK*) und einer Bearbeitungsliste einzelner Stationen (*RULE*) konkrete Prioritätsregelverfahren. Bezogen auf das Prioritätsregelverfahren *Earliest Due Date* (*EDD*, *rank_EDD*) haben diejenigen Lose Vorrang, die den zeitlich frühesten Termin der Fertigstellung aufweisen, während das Prioritätsregelverfahren *First In – First Out* (*FIFO*, *rule_First*) die Lose gemäß des spezifischen Eintreffens an der Anlage bearbeitet. Das Prioritätsregelverfahren *Same Setup* (*SSU*, *rule_SSU*) sortiert die Lose in der Warteschlange in Abhängigkeit des Rüstzustands der Anlagen.

Der Prozessfluss eines jeden Loses und die eindeutige Aufeinanderfolge von Operationen innerhalb des Produktionsprozesses werden über einen Arbeitsplan bestimmt. Entsprechend werden 92 Arbeitspläne mitsamt dazugehöriger Operationen und Prozesszeiten definiert. Während ein solcher Arbeitsplan bis zu 21 Operationen

umfassen kann, sind die Operationen eindeutig einem Workcenter zuordenbar. Die Workcenter sind im Gegensatz zu einer Abstraktion der Stationengruppe *DUMMY* detailliert im Modell abgebildet und können im Anschluss an die Simulation über einen speziellen Report (subset.rdf) ausgewertet werden.

Die Zeit, die für die Vorbereitung von Anlagen für die Bearbeitung einzelner Lose gemäß eines Prioritätsregelverfahrens *Same Setup* erforderlich sein kann, ist über eine Zuordnung einer bestimmten Konfiguration zu einem gleichnamigen Arbeitsplan und einer Zeitmenge gegeben. Darüber hinaus werden auch Verfügbarkeit und Ausfallzeiten einer Stationengruppe mit Hilfe einer dafür vorgesehenen Kalenderzuweisung definiert. Während für das Modell des zugrunde liegenden Vormontageprozesses lediglich (stochastische) Ausfallzeiten zu definieren sind, lassen sich auf diese Weise, beispielsweise, auch (vorbeugende) Wartungszeiten und Arbeitsschichten definieren.

Neben der Zuordnung eines Arbeitsplanes besitzen Lose und die darin enthaltenen Wafer (Produkte) einen Grundtyp (*Basic Type*): eine prinzipielle Beschreibung der Größe und Anzahl der auf einem Wafer enthaltenen Chips. Insgesamt sind 605 Grundtypen auf die 92 Arbeitspläne verteilt.

Die nachstehende Abbildung (Figure 2) soll die Komplexität des zugrunde liegenden Produktionsprozesses anhand der implementierten Arbeitspläne über die Workcenter noch einmal veranschaulichen. Hierbei werden auch die einleitend erwähnten Re-Entry-Cycles deutlich.

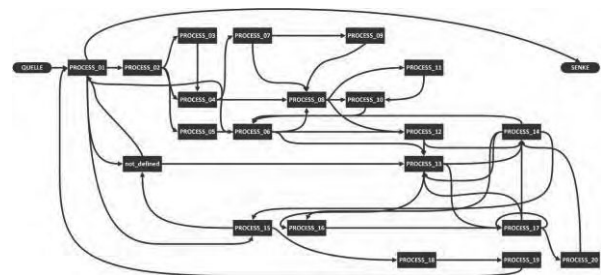


Figure 2: Prozessabfolge über die Workcenter gemäß der zugrunde liegenden Arbeitspläne

Ausgangspunkt des später beschriebenen vollfaktoriellen Experimentdesigns ist die Betrachtung der Kapazitäten an den Stationen von drei zusammengehörenden Stationengruppen und der Auswirkung der Kapazitätsbeschränkungen auf die Gesamtleistung des Systems, beispielsweise aufgrund von unvorhergesehenen Ausfällen

oder (vorbeugenden) Wartungszeiten. Die betrachteten Stationengruppen bilden Prüf- und Inspektionsstationen ab, wo mehrere manuelle und/oder automatische Inspektionsschritte ablaufen (darum bietet sich eine gemeinsame Betrachtung hier an).

Im Folgenden wird ein vollfaktorieller Versuchsplan aufgestellt, durch den sich die ganzheitliche Untersuchung aller Wechselwirkungsbeziehungen der Einflussgrößen unter sonst gleichen Bedingungen anstellen lässt (*ceteris paribus*). Gemäß der Einflussgrößen *STNCAP_01*, *STNCAP_02* und *STNCAP_03*, die im Folgenden die zur Verfügung stehenden Kapazitäten an den Stationen der gleichnamigen Stationengruppen beschreiben, werden je 3 Faktoreinstellungen (*gering*, *mittel* und *hoch*) konkretisiert. Während ein Faktor *gering* danach etwa 42,86 beziehungsweise 50,00 Prozent und eine Stellgröße *mittel* etwa 71,43 beziehungsweise 75,00 Prozent zur Verfügung stehende Kapazitätseinheiten annehmen, beziffert eine Stellgröße *hoch* 100 Prozent zur Verfügung stehender Kapazitätseinheiten. Darauf aufbauend zeigt die nachstehende Tabelle (Table 1) noch einmal eine Übersicht über die verwendeten Einflussgrößen sowie die jeweils gewählten Stellgrößen mitsamt einer Definition gemäß einer zur Verfügung stehenden Kapazität.

Einflussgrößen	Stellgrößen des Faktors
STNCAP_01	gering (3), mittel (5), hoch (7)
STNCAP_02	gering (3), mittel (5), hoch (7)
STNCAP_03	gering (4), mittel (6), hoch (8)

Table 1: Definition der Stellgrößen eines Faktors je Einflussgröße entsprechend der zur Verfügung stehenden Kapazität an den Stationen einer Stationengruppe

Durch die im Modell implementierten (stochastischen) Ausfallzeiten an den Stationengruppen werden die Versuchsläufe des jeweiligen Versuchspunktes des vollfaktoriellen Versuchsplans repliziert und unter Verwendung verschiedener Seedwerte durchgeführt. Die verschiedenen Versuchspunkte verwenden jeweils dieselben Seedwerte. Eine im Vorfeld getätigte Durchführung für mehrerer Konfidenzläufe für einzelne Versuchspunkte und eine Auswertung dieser zeigte in diesem Modell aber auch nur geringe Schwankungen.

Die Versuchsläufe werden mittels des auf die Halbleiterfertigung spezialisierten Simulationswerkzeuges AutoSched AP auf einem Quad-Core-Prozessor Intel

Core i5-9300H und einem physischen Arbeitsspeicher von 16 GB gestartet. Die resultierenden Simulationsdaten werden im Falle der rückwärtsgerichteten Ausführung des Simulationsmodells manuell und im Falle der vorwärtsgerichteten, validierenden Ausführung des Simulationsmodells automatisiert über einen KNIME-Workflow (Figure 3) aufbereitet und in einem Bericht (*Report*) ausgewertet.

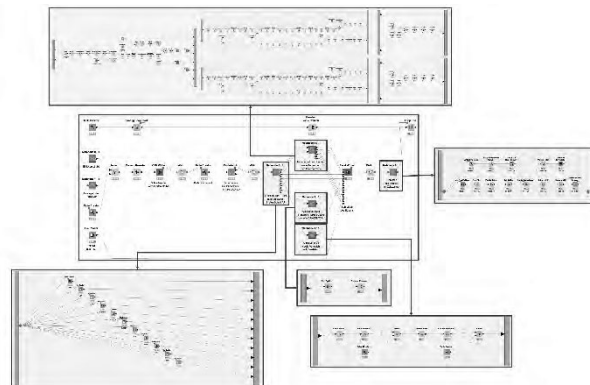


Figure 3: KNIME-Workflow für die vorwärtsgerichtete Ausführung des Simulationsmodells und eine nachstehende Datenaufbereitung sowie -auswertung

Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich auf einen kurzfristigen Planungshorizont gemäß der formalen Zusage von Lieferterminen (*DUE*) über einen Zeitraum vom 08. März 2021 bis zum 22. März 2021. Für die reale Einlastung (*REAL*) und ein Zeitintervall von je 2 Tagen um den *DUE* (-48, 48] ließen sich in der Praxis insgesamt 652 von 1197 Aufträge (rund 54,47 Prozent) fertigstellen. Ein solches Zeitintervall (-48, 48] umfasst sämtliche Aufträge mit einer Abweichung von > -48 bis ≤ 48 Stunden und kann (laut Praxispartner) als hinreichend gegenüber der Einhaltung zugesagter Liefertermine angesehen werden. Für ein Zeitintervall (-12, 12] und damit unmittelbar um eine Nullverspätung herum lassen sich insgesamt 158 von 1197 Aufträge (rund 13,20 Prozent) abschließen. Im Vergleich dazu können bei einer kombinierten Ausführung des Simulationsmodells im Sinne einer stochastischen Rückwärtssimulation insgesamt 923 von 1197 Aufträge (rund 77,11 Prozent) in einem Zeitintervall (-48, 48] im Mittel und bei voller Kapazität fertiggestellt werden. In dem Zeitintervall (-12, 12] lassen sich in dieser Konfiguration 211 von 1197 Aufträgen (rund 17,62 Prozent) fertiggestellt werden. Entsprechend können gegenüber einer realen Einlastung (*REAL*) im Mittel etwa 263 Aufträge (rund 22,04 Prozent) mehr gemäß einer Abweichung von > -48 bis ≤ 48 Stunden abgeschlossen

werden. In Summe heißt dies, dass sich in einem Zeitintervall $(-48, 48]$ im Mittel insgesamt 915 von 1197 Aufträge (rund 76,51 Prozent) fertigstellen lassen. Weiterhin werden in einem Zeitintervall $(-12, 12]$ im Mittel insgesamt 183 von 1197 Aufträge (rund 15,34 Prozent) abgeschlossen.

Die Anwendung und die Ergebnisse des methodischen Ansatzes der Rückwärtssimulation zeigen damit auf, dass die stochastische Rückwärtssimulation unter den Spezifika der Halbleiterfertigung die avisierte Leistungsfähigkeit als Instrument zur Produktionsplanung erbringen kann. Die zu fertigenden Aufträge lassen sich mittels einer Einschleusplanung durch die Rückwärtssimulation in Summe in einem deutlich geringeren Zeitintervall, d. h. mit einer Abweichung von > 24 bis ≤ 96 Stunden fertigstellen. Bei einer realen Einlastung werden demgegenüber im gleichen Zeitintervall lediglich 979 (rund 81,79 Prozent) abgeschlossen.

In der nachstehenden Abbildung (Figure 4) ist die Ist-Fertigstellung (*REAL* und *SIMBACK*) gegenüber der Plan-Fertigstellung einmal grafisch dargestellt. Der grau markierte Bereich kennzeichnet dabei das Zeitintervall $(-48, 48]$, das als hinreichend („pünktlich“) angenommen werden kann.

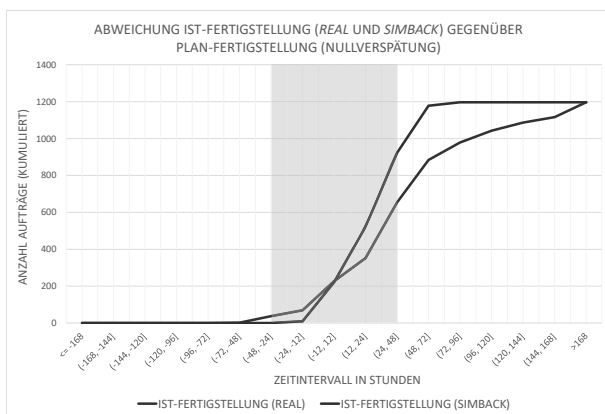


Figure 4: Abweichung einer Ist-Fertigstellung (*REAL* und *SIMBACK*) gegenüber einer Plan-Fertigstellung (Nullverspätung)

Die folgende Abbildung (Figure 5) soll darüber hinaus noch einmal die Ist-Fertigstellung (*REAL* und *SIMBACK*) und eine Plan-Fertigstellung bezogen auf konkreter Aufträge im Zeitverlauf darstellen und die resultierende Abweichung gegenüber einer Plan-Fertigstellung verdeutlichen.

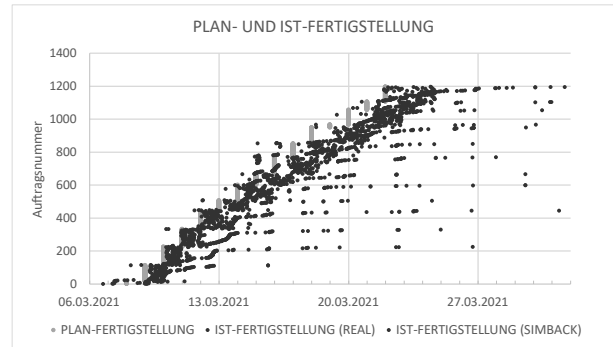


Figure 5: Abweichung einer Ist-Fertigstellung (*REAL* und *SIMBACK*) gegenüber einer Plan-Fertigstellung (Nullverspätung) anhand konkreter Aufträge

Die Ergebnisse nach den durchgeführten Versuchsläufen des vollfaktoriellen Versuchsplanes lassen in Summe darauf schließen, dass eine solche kombinierte Ausführung im Sinne einer stochastischen Rückwärtssimulation sinnvoll angewendet werden kann, Kapazitätsbeschränkungen sinnvoll berücksichtigt und damit als Instrument zur Produktionsplanung geeignet sein kann.

Die Versuchsläufe des vollfaktoriellen Versuchsplanes deuten auch im Mittel auf eine Verbesserung der Termintreue und einer in Summe geringeren Abweichung gegenüber einer Plan-Fertigstellung (Nullverspätung) hin.

Aus den Beobachtungen bezogen auf einen kurzfristigen Planungshorizont über einen Zeitraum von 2 Wochen und den Versuchsläufen des vollfaktoriellen Versuchsplanes lässt sich feststellen, dass die gewählten Kapazitätsbeschränkungen keine signifikante Wirkung auf eine Termintreue zugesagter Liefertermine zeigen. Der Interquartilsabstand (engl. Interquartile Range, IQR), d. h. der Abstand zwischen dem dritten und dem ersten Quartil zeigt eine gemessene Abweichung von 1,00 Prozent für eine Abweichung von > -48 bis ≤ 48 Stunden und 0,25 Prozent für eine Abweichung von > -72 bis ≤ 72 Stunden. Entsprechend ordnen sich zwischen dem dritten und dem ersten Quartil 50 Prozent der gemessenen Ergebnisse ein.

4 Ausblick

Die auf Basis eines “real-world use-case” erzeugten Ergebnisse zeigen, dass der methodische Ansatz zur Generierung einer Einschleusplanung durch Rückwärtssimulation unter auch unter Berücksichtigung stochastischer Modell-Einflüsse funktioniert und vielversprechende Ergebnisse liefern kann. Aufbauend auf Vorarbeiten

[15][16][17] mit dem Simulationswerkzeug AnyLogic zeigt dieser Beitrag die Anwendbarkeit des methodischen Ansatzes der Rückwärtssimulation in einem weiteren Simulationswerkzeug (AutoSched AP) anhand eines detaillierteren Modells des betrachteten Vormontageprozesses im praktischen Kontext. Das Modell grenzt sich durch eine höhere Komplexität und einen höheren Detaillierungsgrad, u. a. durch die implementierten Steuerungs- und Prioritätsregeln, von den Modellen in Vorarbeiten ab und kann dennoch die dort beschriebenen Ergebnisse hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des methodischen Ansatzes der Rückwärtssimulation bestätigen.

Die Erprobung und Anwendung mehrerer Simulationsmodelle sowie die Durchführung und Analyse verschiedener Experimente im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes iDEV40 zeigen, dass eine Rückwärtssimulation im Sinne einer kombinierten Ausführung des Simulationsmodells ein leistungsfähiges Werkzeug für die operative Produktionsplanung darstellen kann.

Im Anschluss an das Forschungsprojekt iDEV40 soll nun die Entwicklung des methodischen Ansatzes der Rückwärtssimulation hin zu einer zielgerichteten Datengenerierung und -auswertung anhand der Vorgehensweise des *Data Farming* entwickelt werden. Ziel ist die Verbesserung der Lösungsqualität, insbesondere in Bezug auf die Einhaltung zugesagter Liefertermine und weiterer relevanter Leistungskennzahlen. Die Verwendung der resultierenden Ergebnisdaten als Teil einer Trainingsphase von Verfahren des maschinellen Lernens (engl. *Machine Learning*) und die Bereitstellung eines leistungsfähigen Werkzeuges (Anwendungsphase) als operative Entscheidungsunterstützung für die Termin- und Reihenfolgeplanung in der Halbleiterindustrie sollen die Anwendbarkeit des Lösungsansatzes für unmittelbare Entscheidungsträger sicherstellen und den Zeit- und Ressourcenbedarf minimieren.

Ein Erproben der Methode des Transferlernens (engl. *Transfer Learning*) adressiert die Schwierigkeit, die auf maschinellen Lernen basierende Entscheidungsunterstützung und das dahinterstehende Vorhersagemodell neu mit problemspezifischen Daten (Simulations- und Echt-daten) trainieren zu müssen, sobald sich das zugrundeliegende System entscheidend verändert und/oder ähnliche Anwendungsfälle betrachtet werden sollen.

Danksagung

Der vorliegende Beitrag wurde teilweise durch das europäische Forschungsvorhaben iDEV40 finanziert, das vom ECSEL Joint Undertaking (JU) unter der Fördervereinbarung Nr. 783163 gefördert wird. Das JU erhält Unterstützung aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union. Es wird von den Konsortiumsmitgliedern sowie Zuschüssen aus Österreich, Deutschland, Belgien, Italien, Spanien und Rumänien mitfinanziert. Die in dieser Veröffentlichung enthaltenen Informationen und Ergebnisse sind die der Autoren und spiegeln nicht zwingend die Meinung des ECSEL Joint Undertaking wider.

References

- [1] Breque M, De Nul L, Petridis A. *Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European Industry*. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2021.
- [2] Kühn, W. *Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner*. München/Wien: Carl Hanser Verlag; 2006.
- [3] März L, Weigert G. Simulationsgestützte Optimierung. In: März L, Krug W, Rose M, Weigert G, editors. *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Berlin: Springer; 2011, p 3-12.
- [4] Gutenschwager K, Rabe M, Spieckermann S, Wenzel S. *Simulation in Produktion und Logistik: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg; 2017.
- [5] Arakawa M, Fuyuki M, Inoue I. *A Simulation-based Production Scheduling Method for Minimizing the Due-date-deviation*. International Transactions in Operational Research 9 (2); 2002. p 153-167.
- [6] Graupner TD, Bornhäuser M, Sihn W. Backward simulation in food industry for facility planning and daily scheduling. *Proceedings of the 16th European Simulation Symposium (ESS)*, 17th-20th October, Budapest (Hungary); 2004.
- [7] Jain S, Chan S. Experiences with Backward Simulation Based Approach for Lot Release Planning. *Proceedings of the 29th Winter Simulation Conference (WSC)*, 7th – 10th December, Atlanta (USA); 1997. p 773-780.
- [8] Laroque C. *Ein mehrbenutzerfähiges Werkzeug zur Modellierung und richtungsorientierten Simulation von wahlweise objekt- und funktionsorientiert gegliederten Fertigungssystemen* [dissertation]. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Institut; 2007.
- [9] Dangelmaier W, Warnecke HJ. *Fertigungslenkung: Planung und Steuerung des Ablaufs der diskreten Fertigung*. Berlin: Springer; 1997.

- [10] Kurbel K. *Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management*. 6th Edition. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag; 2005.
- [11] Huang C, Wang H. Backward Simulation with Multiple Objectives Control. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS)*, 18th -20th March 2009; Vol. II.
- [12] Watson EF, Medeiros DJ, Sadowski RP. Generating Component Release Plans with Backward Simulation. *Proceedings of the 25th Winter Simulation Conference (WSC)*, 12th-15th December, Los Angeles (USA); 1993. p 930-938.
- [13] Watson EF, Medeiros DJ, Sadowski RP. A simulation-based backward planning approach for order-release. *Proceedings of the 29th Winter Simulation Conference (WSC)*, 7th-10th December, Atlanta (USA); 1997. p 765-772.
- [14] Ying CC, Clark GM. Order release planning in a job shop using a bidirectional simulation algorithm. *Proceedings of the 26th Winter Simulation Conference (WSC)*, 11th-14th December, Orlando (USA); 1994. p 1008-1012.
- [15] Laroque C, Leißau M, Scholl W, Schneider G. Rückwärtssimulation als Instrument zur Produktionsplanung – Erkenntnisse aus einer praxisbezogenen Fallstudie. In: Franke J, Schuderer P, editors. *Simulation in Produktion und Logistik 2021*. Göttingen: Cuvillier Verlag; 2021, p 295-304.
- [16] Laroque C, Leißau M, Scholl W, Schneider G. Backward Simulation for Production Planning – Recent Advances in a Real-World Use-Case. *Proceedings of the 2021 Winter Simulation Conference (WSC)*, 13.-17. Dezember, Phoenix (AZ, USA); 2021.
- [17] Laroque C, Löffler C, Scholl W, Schneider G. Einsatzmöglichkeiten der Rückwärtssimulation zur Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung. *Proceedings ASIM SST 2020*. Wien: RGE SIM Report AR 59; 2020. p 397-401.