

## **Rückwärtssimulation als Instrument zur Produktionsplanung – Erkenntnisse aus einer praxisbezogenen Fallstudie**

### ***Backward Simulation for Production Planning – Recent Advances in a Real-World Use-Case***

Christoph Laroque, Madlene Leißau, Westsächsische Hochschule Zwickau,  
Zwickau (Germany), christoph.laroque@fh-zwickau.de, madlene.leissau.gel@fh-  
zwickau.de

Wolfgang Scholl, Germar Schneider, Infineon Technologies Dresden GmbH & Co.  
KG, Dresden (Germany), wolfgang.scholl@infineon.com,  
germar.schneider@infineon.com

**Abstract:** The focus on customer orientation and on-time production as well as delivery characterise the competitive environment for manufacturing companies. Customer-specific products must be manufactured and delivered in specified lead times, according to promised delivery dates. In this context, questions as to whether the production programme is feasible and whether all previously promised delivery dates will be met are often answered with backward-oriented planning approaches without taking into consideration any uncertainty or alternatives, that arise during operations. Regarding complex manufacturing systems (here semiconductors with re-entry cycles), these questions can be answered in a more detailed and robust manner by a discrete event-based simulation (DES) approach used in a backward-oriented manner. Research results show that the taken approach can be applied successfully for the scheduling of customer-specific orders in a real-world setting.

## **1 Motivation**

Die Intensivierung globaler Unternehmung und eine stärker kundenorientierte sowie termingerechte Produktion und Logistik sind prägende Wettbewerbsfaktoren für produzierende Unternehmen. Die Entwicklung der Vision von Industrie 4.0 – zukünftig wohl auch Industrie 5.0 (Breque et al. 2021) – und das Konzept einer „smarten Fabrik“ für individualisierbare Produkte in kleinen Losgrößen stellen die Arbeitsvorbereitung wie auch die operative Produktionsplanung fortwährend vor neue Herausforderungen. Moderne, komplexe und hochautomatisierte Produktionssysteme müssen aber in einem möglichst „optimalen Betriebszustand“ betrieben werden, um wirtschaftlich erfolgreich zu sein. Zugesagte Liefertermine und in

Rahmenvereinbarungen festgelegte Durchlaufzeiten sind sicherzustellen und bedingen in der täglichen Durchführung eine permanente (wirksame) Anpassung der Produktionsplanung und -steuerung. Alle weiteren Rahmenbedingungen einer wirtschaftlichen Produktion bleiben unverändert und gelten auch weiterhin.

Im Vergleich zu anderen Branchen besitzen die Produktionssysteme und -prozesse der in diesem Beitrag adressierten Halbleiterfertigung ein überdurchschnittlich hohes Maß an Komplexität. Die eingesetzten Fertigungstechnologien im Mikro- und Nanometerbereich sind im Hinblick auf die Prozessstabilität sehr sensitiv und beinhalten komplexe Steuerungslogiken. In Abhängigkeit verschiedener im Vorfeld festgesetzter Merkmale erfordern einzelne Produktionslose teilweise mehr als tausend Prozessschritte. Stellenweise müssen einzelne Produktionslose innerhalb des bestellten Produktmix mehrfach mit hohem Automationsgrad und unter Reinraumbedingungen über spezielle und teilweise dieselben Maschinen und Transportrouten prozessiert werden (Re-Entry-Cycles). Die Komplexität resultiert nicht selten in Ausschuss angefertigter Produkte in relevanter Größenordnung, der kurzfristig durch zusätzliche Einschleusungen ausgeglichen werden muss. Fragestellungen im Rahmen der Produktionsfeinplanung können mittels existierender Werkzeuge zur Generierung von Ablaufplänen und dem folgend herkömmlicher Planungsverfahren in den meisten Fällen nur unzureichend oder gar nicht beantwortet werden. Nicht kalkulierbare Rückwirkungen einer solchen mangelhaften Ablaufplanung haben erheblichen Einfluss auf die Gesamtleistung und bergen mit Blick auf die zunehmende Konkurrenzsituation und die eigene Stellung am Markt ein immenses Optimierungspotential für produzierende Unternehmen im Bereich der Halbleiterfertigung wie auch allgemein.

Im Rahmen des EU-ECSEL-Forschungsprojektes iDEV40 (Darstellung des Gesamtprojektes unter [www.idev40.eu](http://www.idev40.eu)) werden Einsatzszenarien der rückwärtsorientierten Materialflusssimulation in der Halbleiterfertigung erschlossen. In relevanten Vorarbeiten konnte die prinzipielle Machbarkeit dieser Methode auf Fabrikebene zwar nachgewiesen werden (Arakawa et al. 2002; Graupner et al. 2004), musste im Projekt aber auf die Spezifika der Halbleiterbranche adaptiert und neu verprobt werden. Der hier vorliegende Beitrag beschreibt als wesentliche Erweiterung zu eigenen Vorarbeiten der Autoren (vgl. bspw. Scholl et al. 2014) und einer ersten Publikation aus dem Forschungsprojekt mit einem Testmodell (Laroque et al. 2020) neuere Ergebnisse auf Basis eines „real-world use-case“ und zeigt damit spezifischer als bisher Potentiale und Grenzen der Methode auf. Nach einer kurzen Darstellung des wissenschaftlichen Stands der Technik sowie einer Erläuterung des prinzipiellen Lösungsansatzes sollen Projektergebnisse detailliert beschrieben und dargestellt werden. Eine Zusammenfassung beschreibt abschließend die nächsten Schritte im Projekt.

## 2 Rückwärtssimulation

Entsprechend einer Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit konzentrieren sich die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) heute auf eine Reihe von Schlüsselmaßnahmen. Darunter zählen neben der Verkürzung der Durchlaufzeit, der Erfüllung von Qualitätsanforderungen bei möglichst niedrigen Beständen und der Einhaltung zugesagter Liefertermine gleichermaßen die Erhöhung des Durchsatzes sowie der aktuellen Verfügbarkeit und Wertschöpfung einzelner Produktionsanlagen

(Overall Equipment Effectiveness). Diese Zielgrößen werden entscheidend durch Produktionsplanungs- und Terminierungsmechanismen beeinflusst, wodurch übergreifende Optimierungsansätze notwendig werden, um eine merkliche Verbesserung herbeizuführen (Jain und Chan 1997).

Als Ergänzung zu existierenden Methoden der gemischten-ganzzahligen Optimierung, unterschiedlichen (simulationsbasierten) Heuristiken, einfacher Vorwärts- oder Rückwärtsterminierung (mit oder ohne Kapazitätsbeschränkungen) und Methoden des maschinellen Lernens (bspw. Kuhnle et al., 2019 und 2021) beschäftigt sich dieser Beitrag mit einem Ansatz der diskreten ereignisorientierten Simulation (DES) in Form der Rückwärtssimulation. Modelle zur DES können eine genaue Nachahmung eines realen Systems entsprechend dessen Funktionsweise über die Zeit darstellen, sind gut zu parametrisieren und berücksichtigen die Variabilität der Realität, indem zufällige Einwirkungen über stochastische Bestandteile in die Modelle integriert werden können (Banks 1998; Law und Kelton 2000). Darüber hinaus kann DES gleichauf verschachtelte Ressourcenbeziehungen, Wartungsvorgänge und spezifische Ablauf-, Prioritäts-, Batch- oder Rüstregeln abbilden. Ausgehend davon und einer Eingabe eines konkreten Produktionsprogramms in ein solches Simulationsmodell, kann DES angewendet werden, um Fragestellungen bezüglich einer Realisierbarkeit des Produktionsprogramms und einer Einhaltung im Vorfeld zugesagter Liefertermine (bestmöglich) zu beantworten. Eine derartige Anwendung eignet sich dabei besonders für die Planung im Bereich der Halbleiterfertigung.

Der Ansatz zur Untersuchung zeitlich rückwärtsgerichteter Planungsprobleme (im Folgenden: Rückwärtssimulation) konkretisiert eine Umkehrung der Ablauflogik einer Simulation und die daraus resultierende rückwärtsgerichtete Ausführung derselbigen. Danach kommen die Vorteile der Simulation auch in der Anwendung der rückwärtsorientierten Planung zum Tragen (Huang und Wang 2009; Schumacher und Wenzel 2000). Die Rückwärtssimulation kann nach Jain und Chan (1997) als ein effizientes Werkzeug für die Implementierung der Rückwärtsterminierung angesehen werden. Dem folgend vereint eine Reihenfolge- und Einschleusplanung nachkommend der Rückwärtssimulation die Lösungsqualität herkömmlicher Terminierungsansätze und die Ausführungsgeschwindigkeit simulationsbasierter Terminierungsansätze. Erste Anwendungsstudien, bei denen Aufträge mit Hilfe einer Rückwärtssimulation zeitlich rückwärtsgerichtet eingeplant werden, sind bereits seit mehr als fünfzehn Jahren verfügbar. Watson et al. (1993 und 1997), Ying und Clark (1994) und Jain und Chan (1997) nutzen solche Verfahren, um die Freigabezeitpunkte von Aufträgen oder Losen auch unter stochastischen Charakteristika der Modelle berechnen zu können.

Eine Modellierung einer rückwärtsgerichteten Ausführung einer Ablaufsimulation verlangt im Vorfeld einige sorgfältige Überlegungen, um eine korrekte Umkehrung im Kontext des abzubildenden Materialflusses vornehmen zu können und sich von der Denkweise einer vorwärtsgerichteten Modellierung zu lösen. Diese Überlegungen beziehen sich insbesondere auf eine Umkehrung einzelner Produktionsprozesse (bspw. einer Montage in eine Demontage) und vorgesehener Steuerungsregeln (Jain und Chan 1997). Letztgenannte Steuerungsregeln lassen sich jedoch nicht immer ein-zu-eins in das entsprechende Rückwärts-Pendant übertragen. Analog zur Rückwärtsterminierung in PPS-Systemen wird auch die Rückwärtssimulation in Kombination mit vorwärtsgerichteten Simulationsläufen durchgeführt, um die

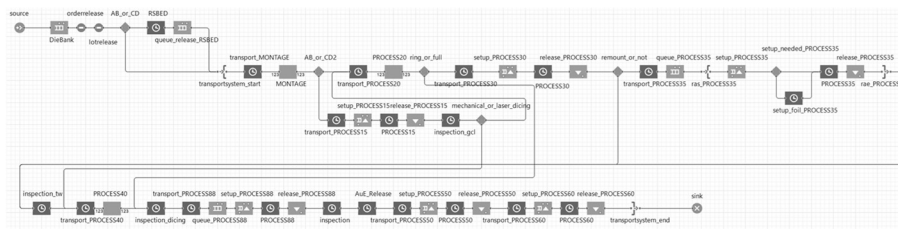
resultierenden Pläne nochmals abzusichern. Nach Graupner et al. (2004) können anhand einer derartigen kombinierten Ausführung die Vorteile beider Simulationen vereint mögliche Modellierungsdiskrepanzen der Rückwärtsimulation ausgeglichen werden.

Eine Modellierung einer rückwärtsorientierten Ausführung einer Ablaufsimulation zieht immer auch 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 Rückwärtsimulation ist dennoch nicht als reine „Umkehrfunktion“ der Vorwärtsimulation zu verstehen. So verweisen Ying und Clark (1994) darauf, dass Vorwärts- und Rückwärtsimulation zur selben berechneten Simulationszeit nicht denselben Zustand aufweisen müssen.

In der Domäne der Halbleiterfertigung konnten durch die Autoren in den vergangenen Jahren erste Beispiele erfolgreich realisiert und publiziert werden (Scholl et al. 2014; Laroque et al. 2020). Nachfolgend soll das in diesem Beitrag betrachtete Modell daran anknüpfend nun ebenso spezielle Eigenschaften der Halbleiterfertigung (s.o.) berücksichtigen.

### 3 Erzielte Ergebnisse

Das Modell eines Vormontageprozesses aus dem Bereich der Halbleiterfertigung (Abb. 1) stellt den Ausgangspunkt für die nachkommend beschriebenen Untersuchungen im Zuge der Rückwärtsmodellierung und -simulation dar.

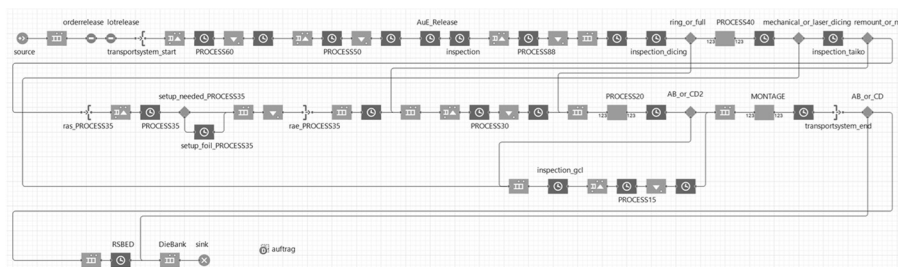


**Abbildung 1:** Übersicht der Modellstruktur des realen Modellbeispiels

Im ausgewählten Prozessabschnitt kommen verschiedene Maschinenanlagen unterschiedlicher Komplexität zum Einsatz, die im Wesentlichen innerhalb des Hauptmodells MAIN abgebildet wurden. Komplexe Teilprozesse in Form der Maschinenanlagen MONTAGE, PROCESS20 und PROCESS40 wurden in gleichnamigen Teilmodellen abgebildet und in das Hauptmodell eingebettet. Die Teilmodelle (mit jeweils bis zu 26 Instanzen) folgen dabei einem entwickelten Regelwerk, das eine sogenannte Same-Setup-Regel nachempfunden und auf diese Weise die eintreffenden Lose innerhalb der Simulation koordinieren und bearbeiten soll. Die Umrüstung zur Verfügung stehender (freier) Teilmaschinen erfolgt danach gemäß verschiedener Variablen in Abhängigkeit eines losbezogenen Parameters.

Startpunkt des vorwärtsgerichteten Simulationsmodells (Startpunkt der Untersuchung) bilden Auftragsdaten, die in Tabellenform über einen Zeitraum von Dezember 2019 bis April 2020 in das Modell eingeschleust werden. Die Aufträge werden hierbei durch eine Reihe von Parametern definiert (beispielsweise *processgroup*, *basictype* oder *producttype*), um eine Zuordenbarkeit der eintreffenden Lose über den gesamten Simulationslauf hinweg zu gewährleisten. Entsprechend ergeben sich in Abhängigkeit des Produkttypen (Parameter *producttype*) eines Auftrages spezielle Routen. Möglich sind im Zuge dessen beispielsweise diverse bedingungs-basierte Aufteilungen des ausgewählten Prozessabschnittes nach *Product A*, *Product B* und *Product C* sowie *Product D*.

In Folge der Modellierung einer ereignisdiskreten Rückwärtssimulation (Abb. 2) diene das Hauptmodell MAIN als Ausgangspunkt. Die eingebetteten Teilmodelle MONTAGE, PROCESS20 und PROCESS40 werden hierbei genauso wie weniger komplexe Maschinenanlagen (beispielsweise PROCESS50 und PROCESS60) in umgekehrter Reihenfolge betrachtet und modelliert. Die daraus resultierende ereignisdiskrete Rückwärtssimulation hat auftrags-spezifische Angaben aus der vorwärtsgerichteten Modellierung übernommen und diene als Grundlage verschiedener umfangreicher Simulationsexperimente, um zeitliche Diskrepanzen im Rahmen der Simulation weitmöglichst ausschließen zu können. Ein Teil der daraus hervorgehenden Ergebnisse soll im Folgenden dargestellt werden.



**Abbildung 2:** Modellstruktur der ereignisdiskreten Rückwärtssimulation

Ausgangspunkt für die experimentellen Versuche bilden Liefertermine (Due Dates), die durch einen vorwärtsgerichteten Simulationslauf generiert wurden (basierend auf den originär hinterlegten Auftragsdaten). Die resultierenden Liefertermine bilden in Folge einer Anpassung die Eingabedaten für die eigentliche Rückwärtssimulation. Die Notwendigkeit einer Anpassung der resultierenden Liefertermine ist darin begründet, dass bestehende Simulationstools den zugrundeliegenden Planungszeitraum einer Simulation zeitlich vorwärts betrachten. Eine „simple“ Eingabe der resultierenden Liefertermine in zeitlich absteigender Reihenfolge in das Rückwärts-Pendant des Simulationsmodells bleibt demnach ohne positives Ergebnis, sodass die aus der Vorwärtssimulation generierten Liefertermine zunächst in Bezug auf eine rückwärtsgerichtete Ausführung der Ablaufsimulation anzupassen waren. Die Anpassung der resultierenden Liefertermine, die im Weiteren als „reale“ Liefertermine angenommen werden, hatte gegenüber der Einschleusplanung *VWS0* eine Verzögerung des Starts der Simulationszeit (Dezember 2019 zu April 2020) ausgehend des zuletzt fertiggestellten Auftrages (JobNr. 2119) zur Folge. Für die

weitere Anpassung wurde danach der Liefertermin des zuletzt fertiggestellten Auftrages jeweils mit der Differenz aus dessen  $dueDateVWS0$  und einem  $dueDateVWS0$  eines früheren Liefertermins addiert. Die resultierende Einschleusplanung  $RWSI$  (Abb. 3) wurde anschließend für eine rückwärtsberechnete Ausführung in das Simulationsmodell eingegeben. Im Kontext einer erneuten Anpassung und einer Einschleusplanung  $VWSI$  (Abb. 4) kann dann eine Beantwortung der Fragestellung erfolgen, wann konkrete Produktionsaufträge einzuplanen sind, um zugesagte Liefertermine hinsichtlich einer zeitlichen Realisierbarkeit und Erfüllung sicherzustellen.



Abbildung 3: Anpassung gemäß einer Einschleusplanung  $RWSI$



Abbildung 4: Anpassung gemäß einer Einschleusplanung  $VWSI$

Für eine Kategorisierung und Auswertung aus der Rückwärtssimulation und einer anschließenden Vorwärtssimulation (je ein Simulationslauf nach erfolgreicher Anpassung der Eingabedaten im deterministischen Fall) resultierender Liefertermine wurden die Zeitintervalle *viel früher*, *früher*, *pünktlich*, *später* und *viel später* definiert. Diese Zeitintervalle stehen in Abhängigkeit zu den ursprünglichen Due Dates. In das Zeitintervall *viel früher* werden alle Aufträge eingeordnet, welche durch die Einplanung der Rückwärtssimulation eine Verfrühung  $t > 6h$  aufweisen. Dagegen kategorisiert das Zeitintervall *viel später* Aufträge, die eine Verspätung  $t > 6h$  anzeigen. Die Zeitintervalle *früher* und *später* weisen analog auf eine vorzeitige Ankunft bzw. Verspätung von  $t \leq 6h$  sowie  $t > 3h$  hin, während das Zeitintervall *pünktlich* alle Aufträge innerhalb von  $t \leq 3h$  rund um den „realen“ Liefertermin einschließt.

In einem ersten Schritt und mit dem Ziel die Lösungsgüte der aus der Rückwärtssimulation ermittelten Einschleusplanung  $VWSI$  mit konkurrierenden Planungsverfahren der kapazitätsbeschränkten Rückwärtsterminierung zu vergleichen, wird die Einschleusplanung aus der Rückwärtssimulation, einer Rückwärtsterminierung  $RT1$  gemäß der Differenz aus  $dueDatesVWS0$  und  $avCycleTimeVWS0$  sowie einer Rückwärtsterminierung  $RT2$  gemäß der Differenz aus  $dueDatesVWS0$  und  $avCycleTimeVWS0$  nach *producttype* gegenübergestellt (Tab.1).

**Tabelle 1:** Vergleich der Rückwärtssimulation mit Planungsverfahren deterministischer Rückwärtsterminierung

	viel früher	[%]	früher	[%]	pünktlich	[%]	später	[%]	viel später	[%]
VWS1	668	31,49	489	23,06	874	41,21	43	2,03	47	2,22
RT1	1848	87,13	0	0,00	0	0,00	0	0,00	273	12,87
RT2	1987	93,68	38	1,79	42	1,98	7	0,33	47	2,22

Die Ergebnisse der gegenübergestellten methodischen Ansätze zur Generierung einer Einschleusplanung durch Rückwärtssimulation und konkurrierenden Planungsverfahren deterministischer Rückwärtsterminierung verweisen darauf, dass die Methode der Rückwärtssimulation die Einschleusplanung im Zusammenhang mit den resultierenden Lieferterminen sehr viel zuverlässiger gestalten kann. Folglich werden gemäß einer Einschleusplanung *VWS1* 41,21 Prozent aller Aufträge in einem Zeitintervall  $t \pm 3h$  pünktlich fertiggestellt, während die Planungsverfahren deterministischer Rückwärtsterminierung hier lediglich einen Wert von 0,00 Prozent gemäß einer Einschleusplanung *RT1* und einen Wert von 1,98 Prozent gemäß einer Einschleusplanung *RT2* aufweisen. Zusätzlich lassen die Ergebnisse, mehr oder weniger, deutliche Vorsprünge auf Seiten einer Einschleusplanung durch Rückwärtssimulation im Hinblick auf ein Zeitintervall  $t > 6h$  (vor und nach dem angenommenen „realen“ Liefertermin) erkennen, das heißt, dass die resultierenden Liefertermine sehr viel genauer um die festgesetzten (oder angenommenen) Liefertermine streuen.

Im Weiteren wird die Lösungsgüte der aus der Rückwärtssimulation ermittelten Einschleusplanung *VWS1* einer Einschleusplanung mit stochastischer Rückwärtssimulation *mSTO* (Tab. 2) sowie nach mehreren Versuchsläufen *STO1* bis *STO10* (Tab. 3) gegenübergestellt (*mSTO* ist hier der Mittelwert der ermittelten Einschleustermine). Für die korrespondierenden Simulationsläufe (vor- und rückwärtsorientiert) werden dabei gleiche Seed-Werte verwendet, um eine Vergleichbarkeit der Simulationsläufe zu gewähren. In Folge der Abbildung stochastischer Bearbeitungszeiten und den daraus resultierenden Werten lassen sich sowohl für einzelne Simulationsläufe als auch für deren Mittel tendenziell mehr Verspätungen im Vergleich zu der deterministischen Rückwärtssimulation aufzeigen.

**Tabelle 2:** Ergebnisse stochastischer Rückwärtssimulation im Mittel

	viel früher	[%]	früher	[%]	pünktlich	[%]	später	[%]	viel später	[%]
VWS1	668	31,49	489	23,06	874	41,21	43	2,03	47	2,22
mSTO	759	27,31	467	22,01	842	39,70	127	5,98	106	5,00

**Tabelle 3:** Ergebnisse stochastischer Rückwärtssimulation nach mehreren Versuchsläufen (in Prozent, gerundet)

	viel früher	früher	pünktlich	später	viel später
VWS1	31,49	23,06	41,21	2,03	2,22
STO1	25,79	21,83	41,96	5,19	5,23
STO2	27,58	22,30	34,84	9,85	5,42
STO3	27,96	23,24	40,55	3,63	4,62
STO4	27,02	21,59	41,25	5,19	4,95
STO5	26,54	23,57	38,76	5,89	5,23
STO6	28,15	21,17	40,17	5,80	4,71
STO7	28,76	19,94	39,23	7,45	4,62
STO8	26,59	22,21	41,49	4,38	5,33
STO9	26,78	22,11	41,54	4,38	5,19
STO10	28,34	20,56	38,52	8,72	3,87

Allgemein muss beachtet werden, dass die Kategorisierung der resultierenden Liefertermine und die Definition der hier beschriebenen Zeitintervalle gegenüber dem angenommenen originären Liefertermin nicht (immer) optimal ist. Entsprechend ordnen sich die resultierenden Liefertermine der Aufträge sowohl in Bezug auf eine Rückwärtssimulation als auch gemäß konkurrierender Planungsverfahren der kapazitätsbeschränkten Rückwärtsterminierung mitunter nur geringfügig später bzw. früher in das nächstgelegene Zeitintervall ein.

Eine sich daran anknüpfende Untersuchung ermittelt auf Grundlage der Einschleusplanung stochastischer Rückwärtssimulation nach mehreren Versuchsläufen eine zusätzliche Einschleusplanung gemäß einer bestimmten relativen Größe eines Auftrages (Tab. 4).

**Tabelle 4:** Ergebnisse stochastischer Rückwärtssimulation nach mehreren Versuchsläufen gemäß einer bestimmten relativen Größe eines Auftrages

	viel früher	[%]	früher [%]	pünktlich [%]	später [%]	Viel später	[%]
VWS1	668	31,49	489	23,06	874	41,21	43 2,03 47 2,22
KK3	1545	72,84	233	10,99	192	9,05	46 2,17 105 4,95
KK4	1508	71,10	284	13,39	205	9,67	41 1,93 83 3,91
KK5	1448	68,27	310	14,62	246	11,60	46 2,17 71 3,35
KK6	1406	66,29	300	14,14	283	13,34	40 1,89 92 4,34
KK7	1260	59,41	389	18,34	359	16,93	33 1,56 80 3,77
KK8	1250	58,93	398	18,76	381	17,96	25 1,18 67 3,16
KK9	1194	56,29	365	17,21	427	20,13	50 2,36 85 4,01



Im Rahmen der daraus resultierenden Einschleusplanung und den Simulationsläufen *KK3* bis *KK9* werden hierfür der jeweils über die Versuchsläufe zeitlich gesehen drittfrüheste (*KK3*) bis zweitspäteste (*KK9*) Einschleustermin aus der stochastischen Rückwärtssimulation *STO1* bis *STO10* übernommen.

Die Ergebnisse einer stochastischen Rückwärtssimulation gemäß einer bestimmten relativen Größe eines Auftrages und den Simulationsläufen *KK3* bis *KK9* zeigen, dass sich die Zahl *pünktlich* fertiggestellter Aufträge auf einen Anteil zwischen rund 9,1 Prozent und 20,1 Prozent beläuft. Hinsichtlich eines Zeitfensters von  $t \pm 6h$  gegenüber des angenommenen „realen“ Liefertermins werden dagegen zwischen 22,3 Prozent und 39,7 Prozent der Aufträge fertiggestellt. Die 39,7 Prozent beziehen sich hier auf den Simulationslauf, der jeweils den zweitspätesten Einschleustermin eines jeden Auftrages vorsah, während sich die 22,3 Prozent auf den Simulationslauf mit dem drittfrühesten Einschleustermin beziehen. Dies verdeutlicht noch einmal die zuvor herausgestellten Vorsprünge des methodischen Ansatzes der Rückwärtssimulation, indem die ermittelten Liefertermine noch immer genauer um die angenommenen „realen“ Liefertermine als bei den beiden herangezogenen Planungsverfahren deterministischer Rückwärtsterminierung streuen. Darüber hinaus kann auf Grundlage der Simulationsläufe *KK3* bis *KK9* festgehalten werden, dass eine spätere Einschleusplanung (für jeden Auftrag) in Summe zuverlässigere Liefertermine gegenüber der angenommenen „realen“ Liefertermine zur Folge hat.

#### **4 Ausblick**

Die auf Basis eines „real-world use-case“ erzeugten Ergebnisse zeigen, dass der methodische Ansatz zur Generierung einer Einschleusplanung durch Rückwärtssimulation unter den Spezifika der Halbleiterfertigung und unter Berücksichtigung stochastischer Einflüsse funktioniert und vielversprechende Ergebnisse liefern kann. Über mehrere Modelle konnte nun nachgewiesen werden, dass die Rückwärtssimulation als ein leistungsfähiges Werkzeug zur Einschleusplanung unter Berücksichtigung stochastischer Einflüsse dienen kann. Ein nächster Schritt im Vorhaben soll sein, den methodischen Ansatz innerhalb des betrieblichen Simulationswerkzeuges (AutoSched AP) beim Praxispartner zu erproben und zu integrieren. Zukünftig wäre es möglich das hier angewendete Verfahren mit verschiedenen Heuristiken zu einer simulationsbasierten Optimierung (rückwärtsgerichtet) weiterzuentwickeln. Anknüpfend daran soll die Anwendbarkeit des Verfahrens an sich als auch solch simulationsbasierter Optimierungskombinationen in anderen Domänen erprobt werden.

#### **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.

## Literatur

- Arakawa, M.; Fuyuki, M.; Inoue, I.: A Simulation-based Production Scheduling Method for Minimizing the Due-date-deviation. *International Transactions in Operational Research* 9 (2002) 2, S. 153-167.
- Banks, J.: *Handbook of simulation: Principles, methodology, advances, applications, and practice*. New York: Wiley 1998.
- 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.
- Graupner, T. D.; Bornhäuser, M.; Sihm, W.: Backward simulation in food industry for facility planning and daily scheduling. In: Lipovszki, G.; Molnár, I. (Hrsg.): *Proceedings of the 16th ESS, Budapest (Ungarn), 17.-20.10.2004*.
- Huang, C.; Wang, H.: Backward Simulation with Multiple Objectives Control. *Proceedings of the IMECS Vol. II, 18.-20.03.2009*.
- Jain, S.; Chan, S.: Experiences with Backward Simulation Based Approach for Lot Release Planning. In: Andradóttir, S.; Healy, K. J.; Withers, D. H.; Nelson, B. L. (Hrsg.): *Proceedings of the 29th WSC, Atlanta (USA), 7.-10.12.1997*, S. 773-780.
- Kuhnle, A.; Röhrig, N.; Lanza, G.: Autonomous order dispatching in the semiconductor industry using reinforcement learning. In: *Proceedings CIRP 79 (2019)*, S. 391-396.
- Kuhnle, A.; Kaiser, J.-P., Theiß, F.; Stricker, N.; Lanza, G.: Designing an adaptive production control system using reinforcement learning. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 32 (2021), S. 855-876.
- Laroque, C.; Löffler, C., Scholl, W.; Schneider, G.: Einsatzmöglichkeiten der Rückwärtssimulation zur Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung. In: Deatcu, C.; Lückerath, D.; Ullrich, O.; Durak, U.: *Proceedings ASIM SST 2020*. Wien: RGSIM Report AR 59, S. 397-401.
- Law, A.; Kelton, D.: *Simulation Modeling and Analysis*. 2<sup>nd</sup> Edition. New York: McGraw Hill 2000.
- Scholl, W.; Laroque, C.; Weigert, G.: Evaluations on Scheduling in Semiconductor Manufacturing by Backward Simulation. In: Tolk, A.; Diallo, S. Y.; Ryzhov, I. O.; Yilmaz, L.; Buckley, S.; Miller, J. A. (Hrsg.): *Proceedings of the 2014 WSC, Savannah (USA), 7.-10.12.2014*, S. 2552-2560.
- Schumacher, R.; Wenzel, S.: Der Modellbildungsprozess in der Simulation. In: Wenzel, S. (Hrsg.): *Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik*. Gent: SCS-Europe BVBA 2000, S. 5-11.
- Watson, E. F.; Medeiros, D. J.; Sadowski, R. P.: Generating Component Release Plans with Backward Simulation. In: Evans, G. W.; Mollaghasemi, M.; Russel, E. C.; Biles, W. E. (Hrsg.): *Proceedings of the 25th Winter Simulation Conference (WSC), Los Angeles (USA), 12.-15. Dezember 1993*, S. 930-938.
- Watson, E. F.; Medeiros, D. J.; Sadowski, R. P.: A simulation-based backward planning approach for order-release. In: Andradóttir, S.; Healy, K. J.; Withers, D. H.; Nelson, B. L. (Hrsg.): *Proceedings of the 29th Winter Simulation Conference (WSC), Atlanta (USA), 7.-10. Dezember 1997*, S.765-772.
- Ying, C. C.; Clark, G. M.: Order release planning in a job shop using a bidirectional simulation algorithm. In: Tew, J. D.; Manivannan, M. S.; Sadowski, D.A. (Hrsg.): *Proceedings of the 26th WSC, Orlando (USA), 11.-14.12.1994*, S. 1008-1012.