

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Automatisierte Durchführung und Auswertung von Simulationsexperimenten im Rahmen einer Rückwärtssimulation

Automated Execution and Evaluation of Simulation Experiments in the Context of Backward Simulation

Madlene Leißau, Christoph Laroque
Westfälische Hochschule Zwickau, Zwickau (Germany),
{Madlene.Leissau, Christoph.Laroque}@fh-zwickau.de

Abstract: Manufacturing processes are increasingly driven by new product requirements, innovation, and cost efficiency. As a result, researchers are exploring new techniques and tools to optimize operational production planning. One such tool is backward-oriented discrete event simulation (SimBack), which has shown great potential in this field. However, the process of conducting numerous simulation runs required for backward simulation is often time and resource-intensive, which limits its efficiency. To address this challenge, this paper presents an approach for automated execution and evaluation of simulation experiments in the context of a backward-oriented discrete event simulation approach for scheduling and capacity planning. The authors demonstrate their approach using a simulation model of the Semiconductor Manufacturing Testbed 2020 (SMT2020).

1 Motivation

Der effiziente Ablauf von Produktionsprozessen ist für die Produktionsplanung und -steuerung unabdingbar. Dementsprechend können Unsicherheiten in der Produktionsplanung und -steuerung und die daraus resultierenden Anpassungen unerwartete Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Produktionssystems haben und zu einer Fehlallokation von monetären und zeitlichen Ressourcen führen. Planer und Entscheidungsträger müssen einen systematischen Ansatz zur Planung und Steuerung des Ressourcenbedarfs entwickeln, um ein bestimmtes Produktionsprogramm und einzelne Aufträge in einer bestimmten Menge und einem festgelegten Zeitrahmen zu einem garantierten Fertigstellungstermin zu erreichen.

In der Halbleiterindustrie besitzen Produktionssysteme und -prozesse im Vergleich zu anderen Branchen ein überdurchschnittlich hohes Maß an Komplexität und werden weiterhin an Komplexität gewinnen (Bureau et al. 2006, S. 739; Mönch et al. 2011,

S. 193; Mönch et al. 2013, S. 1f.). Die Entwicklungen der letzten Jahrzehnte dokumentieren eine steigende Produktvielfalt, kleinere Losgrößen und eine sich schneller ändernde Produktpalette, während die Verbindungen zwischen Anlagengruppen durch die zunehmende Automatisierung ansteigen und somit Produktionsplanung und -steuerung erschweren. Mögliche, für die Planung relevante Abhängigkeiten resultieren beispielsweise aus beschränkten Anlagenkapazitäten, stochastischen Bearbeitungs-, Umrüst-, Warte- und Transportzeiten, einer vorbeugenden Instandhaltung, Rüstwechseln oder (dynamischen) Zeit- und/oder Kapazitätsbeschränkungen in Warteschlangen beziehungsweise entlang mehrerer Produktionsstufen (Lendermann et al. 2020, S. 1862).

Während im Laufe der Jahre kontinuierlich Anwendungsstudien zu Methoden der rückwärtsgerichteten Simulation erschienen (u. a. Jain et al. 1989; Watson et al. 1993 und 1995; Jain/Chan 1997; Mejtsky 2007; Okubo/Mitsuyuki 2021), werden in Laroque et al. (2021 und 2022) vielversprechende Ergebnisse gemäß einem methodischen Ansatz zur Rückwärtssimulation unter den Spezifika der Halbleiterindustrie und unter Berücksichtigung stochastischer Einflüsse beschrieben. Die Anwendung mehrerer Simulationsmodelle und eine Reihe von Experimenten zeigen, dass eine Rückwärtssimulation im Sinne einer kombinierten Ausführung ein leistungsfähiges Werkzeug zur operativen Produktionsplanung darstellen kann. Die kombinierte Ausführung des Simulationsmodells kann jedoch in Abhängigkeit von der Komplexität und Dimension des zu betrachtenden Entscheidungs- und Planungsproblems sehr zeitaufwändig und ressourcenintensiv sein, wodurch sich im Kontext der Entwicklung und Implementierung eines operativ einsetzbaren Entscheidungsunterstützungswerkzeugs ein Forschungsbedarf ergibt. Darüber hinaus blieben die zugrunde liegenden Daten und Informationen (bspw. Reihenfolge der Aufträge) in den bisherigen Arbeiten weitgehend unverändert (im Sinne einer Optimierung). Entsprechend werden die Potenziale von Simulationsmodellen zur zielgerichteten Datengenerierung und -auswertung sowie Anwendung resultierender Erkenntnisse bisher kaum genutzt.

Im vorliegenden Beitrag soll anhand des Semiconductor Manufacturing Testbed 2020, kurz SMT2020, in Form des Low-Volume/High-Mix Simulationsmodells (Kopp et al. 2020a) ein Ansatz zur automatisierten Durchführung und Auswertung umfangreicher Simulationsexperimente im Kontext der Rückwärtssimulation vorgestellt werden. Nach einer kurzen Darstellung des wissenschaftlichen Stands der Technik sowie einer ausführlichen Erläuterung des prinzipiellen Lösungsansatzes mit dem Simulationswerkzeug AutoSched AP und der Open-Source-Entwicklungsplattform KNIME werden erste Experimentiererergebnisse im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse beschrieben. Die Zusammenfassung des Beitrags beschreibt das zukünftige Vorgehen der Autoren in Bezug auf die Entwicklung und Implementierung einer auf maschinellem Lernen basierenden Entscheidungsunterstützung für die operative Produktionsplanung in der Halbleiterindustrie.

2 Rückwärtssimulation

Als Ergänzung zu existierenden Methoden (bspw. gemischt-ganzzahlige Optimierung) gewinnen Methoden und Werkzeuge simulationsgestützter Optimierung für produzierende Unternehmen in vielen Branchen und insbesondere in

der Halbleiterindustrie immer mehr an Bedeutung (Block et al. 2017; Lendermann et al. 2020, S. 1861f.). Im direkten Vergleich werden bei existierenden Methoden der gemischten-ganzzahligen Optimierung oft nur recht einfache und abstrakte Modelle eingesetzt, um die benötigte Rechenzeit in angemessenen Grenzen zu halten, während mit der diskreten ereignisorientierten Simulation (DES) sehr viel komplexere Modelle bearbeitet werden können.

Im Allgemeinen werden die Modelle zur diskreten ereignisorientierten Simulation einzeln oder in Kombination mit Heuristiken im Rahmen der simulationsgestützten Optimierung zur Untersuchung von zeitlich vorwärtsgerichteten Entscheidungs- und Planungsproblemen verwendet. Ein Ansatz der diskreten ereignisorientierten Simulation in Bezug auf zeitlich rückwärtsgerichtete Entscheidungs- und Planungsprobleme wird in der Literatur als Rückwärtssimulation beschrieben und konkretisiert sich durch die Umkehrung der Ablauflogik der Simulation mitsamt der implementierten Steuerungs- und Prioritätsregelverfahren und die rückwärtsgerichtete Ausführung der Simulationsläufe selbst. Für eine Validierung der Lösungsmenge aus dem Planungsschritt der rückwärtsgerichteten Simulation ist eine anschließende Validierung des Ergebnisses mittels einer vorwärtsgerichteten Simulation anzuschließen. Eine solche Kombination einer rückwärts- und vorwärtsgerichteten Simulation soll nachfolgend als kombinierte Ausführung im Sinne der Rückwärtssimulation (SimBack) verstanden werden.

Nach Jain und Chan (1997, S. 775) lassen sich anknüpfend an eine rückwärtsgerichtete Ausführung einer Simulation und einer anbindenden Validierung fundierte Aussagen über zu erreichende Zielgrößen im Kontext zugesagter Liefertermine treffen. Die Rückwärtssimulation ist ergo ein recht effizientes Werkzeug für die Implementierung der Verfahrensweisen einer (einfachen) Rückwärtsterminierung und kann als (stochastische) Rückwärtssimulation die Lösungsqualität eines herkömmlichen Produktionsplanungs- und Terminierungsmechanismus verbessern. Darüber hinaus werden die Vorteile der Ausführungsgeschwindigkeit simulationsbasierter Terminierungsansätze (bspw. gegenüber optimierenden Verfahren) wirksam (Jain/Chan 1997, S. 775).

3 Simulation als Instrument zur zielgerichteten Datengenerierung und -auswertung

Die Rückwärtssimulation im Sinne einer kombinierten Ausführung eines Simulationsmodells kann bei komplexeren Szenarien ebenfalls sehr zeitaufwändig und ressourcenintensiv sein. Die (vorwärtsgerichtete) Zeitfortschreibung in bestehenden Simulationswerkzeugen und die daraus resultierenden Transformationsschritte in Bezug auf Eingabe- und Ergebnisdaten bedingen bisher eine manuelle Anpassung sowie Durchführung einzelner Konfigurationen der vorwärts- beziehungsweise rückwärtsgerichteten Simulationsläufe.

Die Autoren schlagen nachfolgend einen konkreten Lösungsansatz zur automatisierten Durchführung und Auswertung umfangreicher Simulationsexperimente mit dem Simulationswerkzeug AutoSched AP und der Open-Source-Entwicklungsplattform KNIME vor. KNIME als Entwicklungsumgebung bietet hierbei die Möglichkeit, wahlweise vollständig in einer Low- beziehungsweise No-Code-Umgebung und/oder einer bevorzugten Programmiersprache zu arbeiten.

Für die Implementierung des in diesem Beitrag vorgeschlagenen Lösungsansatzes bedienen sich die Autoren an dem umfangreichen Spektrum zur Verfügung stehender Bausteine (Nodes) und ergänzen die bestehenden Funktionalitäten punktuell durch Python-Skripte.

3.1 Modellumkehrung

Das Semiconductor Manufacturing Testbed 2020, kurz SMT2020, nach Kopp et al. (2020a) beinhaltet vier Simulationsmodelle, die die Komplexität moderner Fabriken in der Halbleiterindustrie hinreichend genau abbilden sollen und als eine Aktualisierung beziehungsweise Erweiterung der MIMAC-Simulationsmodelle betrachtet werden können. Eine detaillierte Beschreibung der Modelle geben, beispielsweise, Kopp et al. (2020a) sowie Kopp et al. (2020b). Darüber hinaus können die Modelle (AutoSched AP-Modelle und Rohdaten) unter <https://p2schedgen.fernuni-hagen.de/> frei heruntergeladen werden.

Für die Implementierung des in diesem Beitrag vorgeschlagenen Lösungsansatzes wählen die Autoren das Low-Volume/High-Mix Simulationsmodell (Dataset 2) mit über 900 Maschinen (*STN*) gemäß 105 Maschinentypen (*STNFAM*) verteilt auf 11 Funktionsbereiche (*STNGRP*) und 10 Produkttypen (*PART*) mit Arbeitsplänen (*ROUTE*) und dazugehörigen Operationen (*STEP*) im Umfang zwischen 242 Operationen für Produkttyp 5 und 585 Operationen für Produkttyp 3 (Kopp et al. 2020a). Die konkrete Modellumkehrung erfolgt über die Maschinenliste (*tool.txt*), die Arbeitspläne (*route_{1-10}.txt*) und die zu betrachtende Auftragsliste (*order_{...}.txt*).

In der Maschinenliste stehen Fragestellungen rund um die Einplanung der Aufträge auf die Maschinen eines Maschinentyps (*FWLRANK*) und danach einer Einplanung auf den entsprechenden Maschinen selbst (*RULE*) im Vordergrund. Die Einplanung nach einer reinen Priorisierung von Aufträgen beziehungsweise Lösen, beispielsweise nach höherer Priorität (*rank_HP*), ist beizubehalten. Im Ergebnis werden die priorisierten Aufträge infolge der Rückwärtssimulation in der Tendenz zwar später eingelastet, können die zugrunde liegenden Plandaten (Due Dates) wegen ihrer Priorisierung in den erforderlichen Operationen jedoch noch immer innerhalb eines akzeptablen Zeitrahmens (hier $\pm 48h$) erfüllen. Demgegenüber ist eine Einplanung nach dem kritischen Verhältnis (*rank_CR*), also dem Verhältnis der Restzeit gegenüber den Plandaten und der verbleibenden Prozesszeit, im Kontext der Rückwärtssimulation aufgrund der fehlenden Bezugsgröße zu verwerfen.

Während sich die Transformation der Eingabedaten in den Arbeitsplänen in erster Linie auf die Umkehrung der erforderlichen Operationen fokussiert, beispielsweise von Operationsnummer 242 zu Operationsnummer 1 für Produkttyp 5, sind Definitionen einer Zuordnung im Sinne von Nacharbeiten (Rework) oder Zeitschleifen (Critical Queue Time) und einer Zuordnung einer eindeutigen Maschinenabhängigkeit eines Auftrages für Operationen auf demselben Maschinentyp umzukehren. Die Definition einer Maschinenabhängigkeit für einen Auftrag in Operation 247 für Operation 270 ist beispielsweise im Zuge der Transformation der Eingabedaten in den Arbeitsplänen invers in Operation 270 für Operation 247 festzusetzen.

Auf Basis der Plandaten kann eine Einlastung der Aufträge anhand der zu betrachtenden Auftragsliste stattfinden. Die Einlastung erfolgt gemäß dem Ziel der

Nullverspätung über alle Aufträge und der zeitlichen Realisierbarkeit der zugesagten Plandaten ausgehend vom spätestmöglichen Fertigstellungstermin.

Die von den Autoren umgesetzte Automatisierung der hier beschriebenen Transformationsschritte für die rückwärtsgerichtete Simulation bietet allen voran für Planer und Entscheidungsträger, die nicht über hinreichende Kenntnis der Simulation und speziell Rückwärtssimulation verfügen, zahlreiche Vorteile. Die intuitive Benutzeroberfläche (Abbildung 1) ermöglicht es dem Anwender, die zu betrachtende Auftragsliste auszuwählen und den Planungshorizont selbst festzulegen, wobei der Transformationsprozess beliebig oft ausgeführt werden kann. Eine Tabellenansicht bietet die Möglichkeit die erfolgte Transformation der selektierten Auftragsliste nachzuvollziehen.

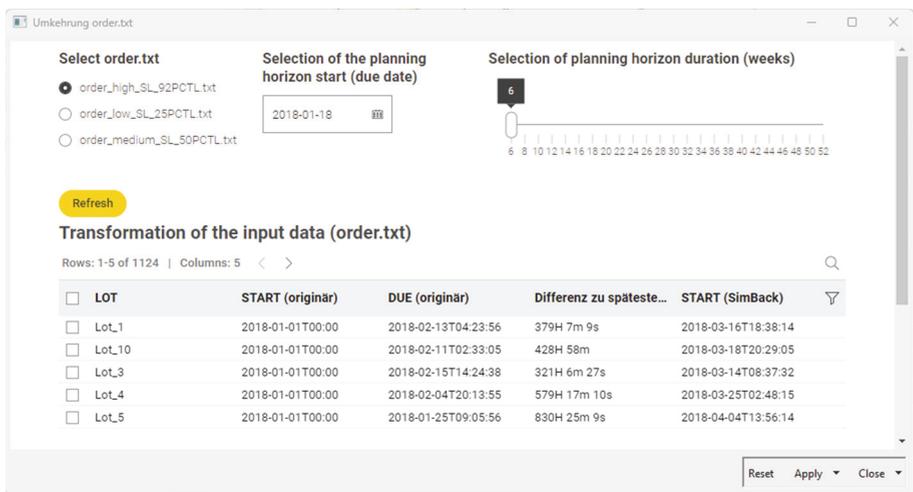


Abbildung 1: Benutzeroberfläche zur Auswahl der zu betrachtenden Auftragsliste und des Planungshorizonts

3.2 Versuchsplanung und -durchführung

Beziehentlich eines Experimentdesigns im Kontext einer Rückwärtssimulation verfügen bestehende Simulationswerkzeuge über unzureichende Möglichkeiten; die Transformation von Ergebnisdaten eines rückwärtsgerichteten Simulationslaufs und der nachkommenden Validierung anhand einer vorwärtsgerichteten Simulation ist ein maßgeblicher zu automatisierender Teilschritt, um eine integrierte Validierung der Ergebnisse der Rückwärtssimulation sicherzustellen.

Für die Durchführung der in diesem Beitrag vorgesehenen Sensitivitätsanalyse implementieren die Autoren eine prototypische Benutzeroberfläche zur Auswahl und Definition von Faktorkonfigurationen. Über Radiobuttons kann zunächst eine Auswahl getroffen werden, ob sich die Auswahl auf den gesamten Produktionsprozess oder nur auf bestimmte Funktionsbereiche beziehen soll, die über eine Doppelliste auszuwählen sind. Darüber hinaus können Anwender außerdem schrittweise die Auswahl einer prozentualen oder ganzzahligen Fixierung der Maschinenanzahl für alle Maschinentypen der ausgewählten Funktionsbereiche bestimmen.

In der Versuchsdurchführung werden definierte Faktorkonfigurationen mehrfach simuliert, um valide Aussagen über das nachempfundene (stochastische) System treffen zu können. Die Autoren simulieren die einzelnen Faktorkonfigurationen folgend der originären Einlastung vorwärts und schließen die Rückwärtssimulation im Sinne einer kombinierten Ausführung an. Dazu werden die Faktorkonfigurationen der Reihe nach über einen Schleifenprozess mittels Python-Skripte aus KNIME heraus direkt in AutoSched AP ausgeführt. Die Ergebnisdaten werden für jeden Simulationslauf zusammen mit einer Auflistung der ausgeführten Konfigurationen und allen Informationen zur Konfiguration selbst automatisiert unter einem individuellen Dateipfad für das durchgeführte Experiment abgelegt.

3.3 Datenaufbereitung und -analyse

Die Verfügbarkeit sämtlicher Ergebnisdaten nach Abschluss aller Konfigurationen eines oder mehrerer Experimente ermöglicht die umgehende Aufbereitung und Analyse der Daten. Dabei bietet die Verwendung des Workflow-Konzeptes in KNIME den Vorteil, dass nach einmaliger Modellierung des Analyseprozesses jede neue Konfigurationsreihe eines Simulationsexperimentes auf Knopfdruck analysiert werden kann. Die resultierenden Auswertungen können über ein interaktives Dashboard eingesehen werden. Die Autoren haben vier verschiedene Ansichten für das Dashboard implementiert. Die ersten drei Ansichten beziehen sich auf eine einzelne Konfiguration eines Experiments (bspw. Abbildung 2). In der vierten Ansicht konzentrieren sich die Auswertungen auf eine Reihe von Konfigurationen. Die Auswahl erfolgt durch Radiobuttons, Experimente und Konfigurationen können über Dropdown-Listen ausgewählt werden. Die Dashboard-Ansicht wird mit jeder neuen Auswahl automatisch aktualisiert.

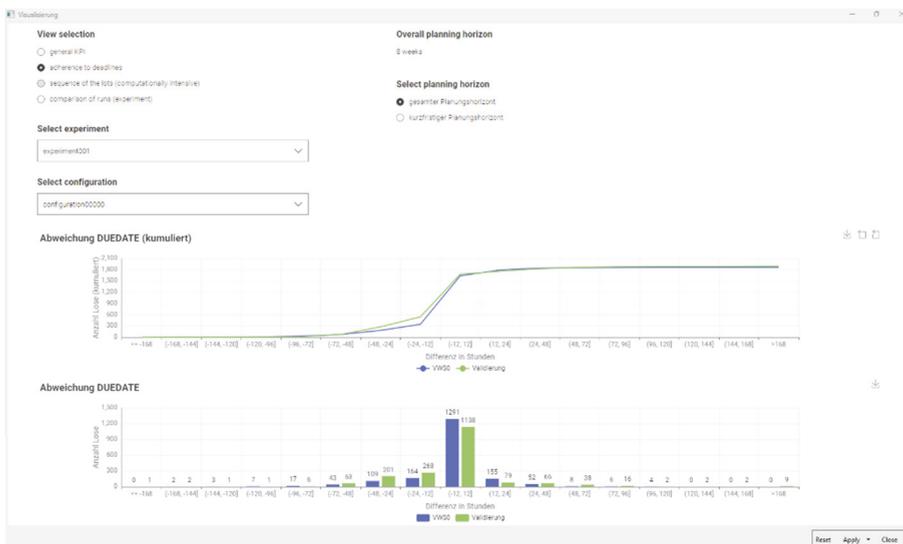


Abbildung 2: Dashboard zur Visualisierung der Simulationsergebnisse, hier speziell als Vergleich eines originären Simulationslaufs mit den Ergebnisdaten einer Rückwärtssimulation im Sinne einer kombinierten Ausführung

4 Ergebnisse

Mit dem vorgeschlagenen Lösungsansatz (Abbildung 3) zur automatisierten Durchführung und Auswertung umfangreicher Simulationsexperimente im Kontext der Rückwärtssimulation versuchen die Autoren folgenden Ziele zu erreichen. Entsprechend adressieren die Autoren zunächst die Schwierigkeit der Versuchsdurchführung im Kontext eines hinreichend sorgfältigen Experimentdesigns und die Notwendigkeit einer Automatisierung der Rückwärtssimulation. Die Implementierung eines übergreifenden Lösungsansatzes zur Automatisierung der Modellumkehrung, Versuchsplanung und -durchführung sowie Datenaufbereitung- und -analyse führen dabei nicht nur zu einer Zeitersparnis für die Simulationsexperten, sondern ermöglichen zumindest prinzipiell auch die Ausführung von Experimenten durch geschulte Anwender. Die Experimentierreihe selbst erreicht durch das Ausbleiben manueller Eingriffe eine signifikante Effizienzsteigerung und geringere Fehleranfälligkeit.

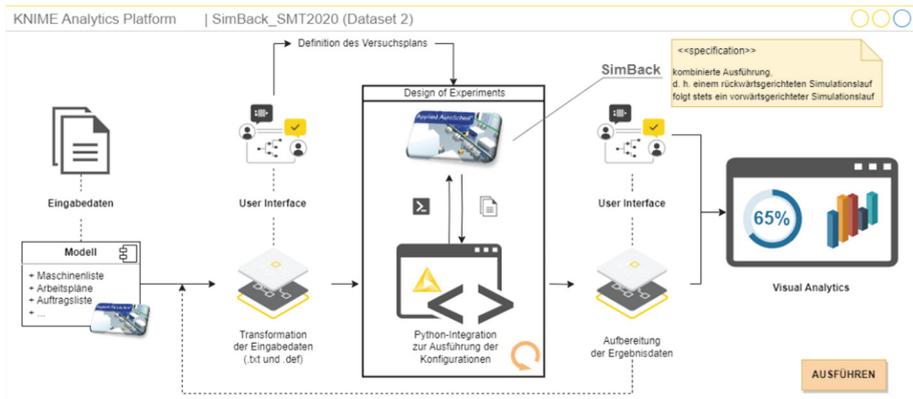


Abbildung 3: Schematische Darstellung des entwickelten Lösungsansatzes

Der Ansatz der Rückwärtssimulation soll mittels des beschriebenen Vorgehens auf ein komplexeres Modell übertragen werden und die Anwendbarkeit des vorgeschlagenen Lösungsansatzes zur automatisierten Durchführung und Auswertung umfangreicher Simulationsexperimente im Kontext der Rückwärtssimulation im Grundsatz dargestellt werden. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse haben die Autoren den Wirkungsraum in Bezug auf die Maschinenanzahl für die Maschinentypen ausgewählter Funktionsbereiche (*Dielectric, Diffusion, Dry_Etch, Litho, Litho_Met*) und eine Verringerung dieser um die Hälfte untersucht. Die resultierenden 57 Versuchsläufe (inklusive Ausgangskonfiguration) wurden anhand des entwickelten Lösungsansatzes auf einem Octa-Core-Prozessor Intel Xeon Silver 4215 und einem physischen Arbeitsspeicher von 256 GB gestartet. Gemäß einer Vergleichbarkeit der Ergebnisdaten startet der Lösungsansatz mit der Prozessierung des originären (vorwärtsgerichteten) Simulationslaufs, genannt *VWS0*, und schließt die Rückwärtssimulation im Sinne der kombinierten Ausführung des Simulationsmodells an. Der zugrunde liegende Planungshorizont wurde zunächst auf acht Wochen festgelegt.

Die Ergebnisse des Testexperimentes zeigen über alle Konfigurationen hinweg, dass die Rückwärtssimulation in Bezug auf die zeitliche Realisierbarkeit der zugesagten Plandaten ausgehend vom spätestmöglichen Fertigstellungstermin vielversprechende Ergebnisse gegenüber der Einschleusplanung der originären Simulation erzielen kann. Entsprechend weisen die Versuchsläufe gemäß einer Abweichung von ± 12 Stunden bis zu ± 96 Stunden im Vergleich zu den zugrunde liegenden Plandaten überwiegend eine höhere zeitliche Realisierbarkeit auf (Abbildung 4).

Adherence to due dates

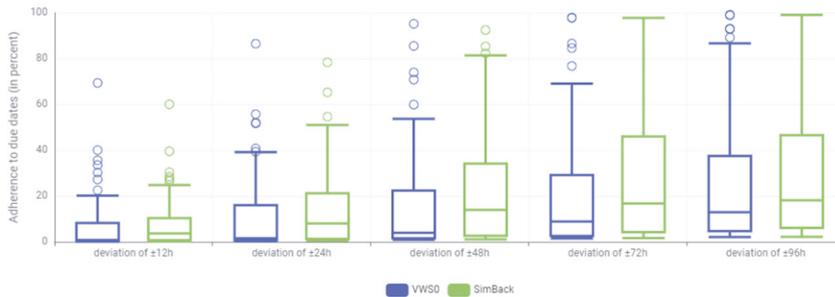


Abbildung 4: Auswertung des Testexperimentes über alle 57 Konfigurationen

5 Ausblick

Simulationsexperimente erfordern Aufwand und Zeit. Selbst, wenn ein bestehendes Modell nur mit neuen Parametern aktualisiert werden muss, ist die Laufzeit für die Ausführung der Simulation selbst notwendig (Pappert/Rose 2022). Planer und Entscheidungsträger müssen heute kurzfristig Produktionspläne entwickeln, die die Lagerbestände so gering wie möglich halten und gleichzeitig die Qualitätsanforderungen erfüllen und die zugesagten Liefertermine einhalten. Eine Möglichkeit, dieses Ziel zu erreichen, besteht in der Optimierung des gesamten Planungsprozesses, wofür übergreifende Optimierungsmethoden erforderlich werden (Laroque et al. 2022). Ziel dieses Beitrags war es, einen Ansatz zur automatisierten Durchführung und Auswertung umfangreicher Simulationsexperimente im Kontext der Rückwärtssimulation als eine erste Komponente eines größeren Gesamtkonzeptes vorzustellen.

Danach beabsichtigen die Autoren ein zielgerichtetes Data-Farming als Ausführung großer Mengen von Faktorenkonfigurationen als Teil der Trainingsphase von Verfahren des maschinellen Lernens zu verwenden, um insgesamt ein leistungsfähiges Werkzeug zur Unterstützung operativer Entscheidungen bei Termin- und Reihenfolgeplanung in der Halbleiterindustrie (Abbildung 5) bereitzustellen. Dies soll sicherstellen, dass der Lösungsansatz für Entscheidungsträger unmittelbar anwendbar ist und der Zeit- und Ressourcenbedarf minimiert wird, der mit der Verwendung der Verfahren verbunden ist.

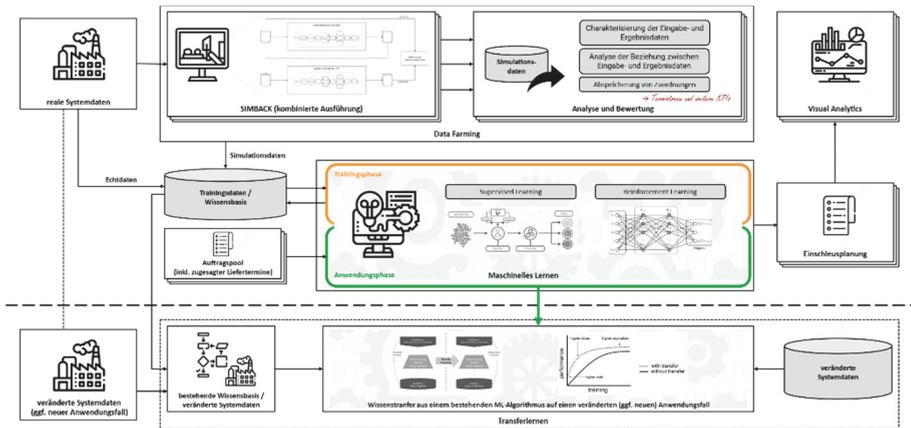


Abbildung 5: Lösungskonzept für ein leistungsfähiges Werkzeug zur Unterstützung operativer Entscheidungen bei Termin- und Reihenfolgeplanung

Literatur

- Block, C.; Kuhlenkötter, B.; Frank, T.; Burges, U.: Online-Materialflussimulationen zur Entscheidungsunterstützung in der PPS. *productivITY* 22 (2017) 1, S. 28–30.
- Bureau, M.; Dauzère-Pérès, S.; Mati, Y.: Scheduling Challenges and Approaches in Semiconductor Manufacturing. *IFAC Proceedings Volumes* 39 (2006) 3, S. 739–744.
- Jain, S.; Barber, K.; Osterfeld, D.: Expert Simulation For Online Scheduling. In: *Proceedings of the 1989 Winter Simulation Conference (WSC)*, Washington (DC), USA, 04.-06. Dezember, 1989, S. 930–935.
- 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 1997 Winter Simulation Conference (WSC)*, Atlanta (GA), USA, 7.-10. Dezember, 1997, S. 773–780.
- Kopp, D.; Hassoun, M.; Kalir, A.; Mönch, L.: SMT2020—A Semiconductor Manufacturing Testbed. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 33 (2020a) 4, S. 522–531.
- Kopp, D.; Hassoun, M.; Kalir, A.; Mönch, L.: Integrating Critical Queue Time Constraints Into SMT2020 Simulation Models. In: *Bae, K.-H.; Feng, B.; Kim, S.-H.; Lazarova-Molnar, S.; Zheng, Z.; Roeder, T.; Thiesing, R.M. (Hrsg.): Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference (WSC)*, 2020b.
- Laroque, C.; Leißau, M.; Scholl, W.; Schneider, G.: Rückwärtssimulation als Instrument zur Produktionsplanung - Erkenntnisse aus einer praxisbezogenen Fallstudie. In: *Franke, J.; Schuderer, P. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik 2021*. Göttingen: Cuvillier Verlag 2021, S. 295–304.
- Laroque, C.; Leißau, M.; Scholl, W.; Schneider, G.; Preuß, P.: Experimentelle Analyse zur Einschleusplanung in der Halbleiterfertigung mittels einer stochastischen Rückwärtssimulation. In: *Breitenecker, F.; Deatcu, C.; Durak, U.;*

- Körner, A.; Pawletta, T. (Hrsg.): Proceedings Langbeiträge ASIM SST 2022. Wien: ARGESIM Verlag 2022, S. 49–56.
- Lendermann, P.; Dauzere-Peres, S.; McGinnis, L.; Monch, L.; O'Donnell, T.; Seidel, G.; Vialletelle, P.: Scheduling and Simulation in wafer fabs: Competitors, Independent Players or Amplifiers? In: Bae, K.-H.; Feng, B.; Kim, S.-H.; Lazarova-Molnar, S.; Zheng, Z.; Roeder, T.; Thiesing, R.M. (Hrsg.): Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference (WSC), S. 1861–1874.
- Mejtsky, G.J.: A metaheuristic algorithm for simultaneous simulation optimization and applications to traveling salesman and job shop scheduling with due dates. In: Henderson, S.G.; Biller, B.; Hsieh, M.-H.; Shortle, J.; Tew, J.D.; Barton, R.R. (Hrsg.): Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference (WSC), Washington (DC), USA, 9.-12. Dezember, 2007.
- Mönch, L.; Fowler, J.W.; Dauzère-Pérés, S.; Mason, S.J.; Rose, O.: A survey of problems, solution techniques, and future challenges in scheduling semiconductor manufacturing operations. *Journal of Scheduling* 14 (2011) 6, S. 583–599.
- Mönch, L.; Fowler, J.W.; Mason, S.J.: *Production Planning and Control for Semiconductor Wafer Fabrication Facilities: Modeling, Analyses, and Systems*: Springer New York 2013.
- Okubo, Y.; Mitsuyuki, T.: Study on Job Shop Scheduling for Keeping the Requested Shipping Sequence by Production System Modeling and Backward Simulation. In: *Transdisciplinary Engineering for Resilience: Responding to System Disruptions*: IOS Press 2021, S. 203–212.
- Pappert, F.S.; Rose, O.: Using Data Farming and Machine Learning to Reduce Response Time for the User. In: Feng, B.; Pedrielli, G.; Peng, Y.; Shashaani, S.; Song, E.; Corlu, C. G.; Lee, L. H.; Chew, E. P.; Roeder, T.; Lendermann, P. (Hrsg.): Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference (WSC), Singapore, 11.-14. Dezember, 2022.
- 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.F. (Hrsg.): Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference (WSC), Los Angeles (CA), USA, 12.-15. Dezember, 1993, S. 930–938.
- Watson, E.F.; Medeiros, D.J.; Sadowski, R.P.: Order-release planning using variable lead times based on a backward simulation model. *International Journal of Production Research* 33 (1995) 10, S. 2867–2888.