

Nachfolgend finden Sie die Übersetzung ins Deutsche des frei verfügbaren Fachartikels:

Original:

„Combining Discrete Event Simulation and Material Flow Analysis in a Component-based Approach to Industrial Environmental Protection“.

Volker Wohlgemuth, Bernd Page.

Verfügbar unter (Stand 23.6.2025):

https://www.researchgate.net/publication/222560615_Combining_Discrete_Event_Simulation_and_Material_Flow_Analysis_in_a_Component-based_Approach_to_Industrial_Environmental_Protection

Dies ist eine nicht offizielle deutsche Übersetzung des Originals durch:

Markus Bans

ATS Prozessoptimierung Markus Bans

Web: <https://simio-simulation.de>

Lizenz:

Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

S. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Diskussionen, Statistiken und Autorenprofile für diese Publikation finden Sie unter: <https://www.researchgate.net/publication/222560615>

Kombination von ereignisdiskreter Simulation und Stoffstromanalyse in einem komponentenbasierten Ansatz für den industriellen Umweltschutz

Artikel in Environmental Modelling & Software - November 2006

DOI: 10.1016/j.envsoft.2006.05.015 - Quelle: DBLP

ZITATE

108

LIEST

725

3 Autoren, darunter:



Volker Wohlgemuth

HTW Berlin - Hochschule für Technik und Wirtschaft

244 PUBLIKATIONEN 997 ZITATE

PROFIL ANSEHEN



Bernd Page

Universität Hamburg

171 PUBLIKATIONEN 2,843 ZITATE

SEE PROFILE

Alle Inhalte dieser Seite wurden von [Volker Wohlgemuth](#) am 29. September 2018 hochgeladen.

Der Benutzer hat eine Verbesserung der heruntergeladenen Datei beantragt.

Kombination von ereignisdiskreter Simulation und Materialflussanalyse auf Basis eines bauteilorientierten Ansatzes für den industriellen Umweltschutz

Volker Wohlgemuth¹, Bernd Page² und Wolfgang Kreutzer³

Zugehörigkeiten:

¹ FHTW Berlin, Fachbereich Technik II, Industrielle Umweltinformatik, Ostendstraße 25, 12459 Berlin, Deutschland, E-Mail: *Volker.Wohlgemuth@fhtw-berlin.de* Telefon: 004930 5304-1295, Fax: 0049-30 5304 1299

² Universität Hamburg, Fachbereich Informatik, Vogt-Kölln-Str. 30, 22527 Hamburg, Deutschland, E-Mail: *page@informatik.uni-hamburg.de*

³ University of Canterbury, Department of Computer Science and Software Engineering, Private Bag, Christchurch, Neuseeland, E-Mail: *wolfgang@cosc.canterbury.ac.nz*

Abstrakt:

Während Ökobilanzen und Stoffstromnetze zur Analyse der Stoffströme innerhalb eines Unternehmens zu gängigen Bestandteilen von Umweltmanagement-Informationssystemen (EMIS) geworden sind, ist die ereignisdiskrete Simulation in diesem Bereich noch nicht weit verbreitet. In diesem Beitrag wird für die Kombination der diskreten Ereignissimulation mit der Materialflussanalyse plädiert, um sowohl die ökologischen als auch die ökonomischen Auswirkungen unternehmerischer Entscheidungen zu analysieren.

Nach einem kurzen Überblick über die Kerneigenschaften und Vorteile der ereignisdiskreten Simulation und Materialflussanalyse auf Basis sogenannter Materialflussnetzwerke wird eine Plug-in-basierte Architektur zur Generierung eines maßgeschneiderten Materialflusssimulators vorgestellt. Die Vorteile der bauteilbasierten Struktur dieses Frameworks werden dann im Zusammenhang mit seiner praktischen Anwendung auf die Lithographie bei der Herstellung von Halbleitern diskutiert. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Aspekte und Anwendungsbereiche des Frameworks schließt das Papier ab.

Schlüsselwörter: Stoffstromanalyse, ereignisdiskrete Simulation, Softwarekomponenten, Plug-in-Architekturen, Ökobilanzen

Software-Verfügbarkeit

Software Umberto:

Entwickelt von der ifu Hamburg GmbH und dem ifeu (Institut für Energie- und Umweltforschung)

Heidelberg GmbH). Kontaktadresse: ifu Hamburg GmbH, Große Bergstraße 219, 4.OG D-22767 Hamburg, Deutschland, Telefon: ++49404800090, Fax: ++49404800922,

info@ifu.com, 1993. Preise: von 300 € bis 9.900 €.

Software Mailand:

Entwickelt vom Fachbereich Informatik der Universität Hamburg und der ifu Hamburg GmbH.

¹ korrespondierender Autor

Kontaktadresse: Universität Hamburg, Dr. Volker Wohlgemuth und Prof. Dr. Ing. Bernd Page, Vogt-Kölln-Straße 30, D-22527 Hamburg, Deutschland, Telefon ++4940428832426, Fax ++49040428832311. Im Prototyp-Status und aktuell kostenlos.

1 Einführung: EMIS und Modellierung

Jede Geschäftstätigkeit erzeugt Energie- und Stoffströme, deren Steuerung ein integraler Bestandteil der Interaktion eines Unternehmens mit seiner Umwelt ist. *Industrielle Umweltinformationssysteme*, auch *Umweltmanagement-Informationssysteme (EMIS)* genannt, sind darauf ausgelegt, eine Vielzahl von Umweltgefahren und -belastungen zu erkennen, zu bewerten und zu verhindern. Konkret *handelt es sich bei EMIS* um Computerprogramme, die das Management unterstützen, indem sie alle relevanten Daten über die Wechselwirkung eines Unternehmens mit seiner Umwelt sammeln, dokumentieren und auswerten sowie alle Aktivitäten im Zusammenhang mit dem Umweltschutz planen, initiieren und steuern; vgl. Wohlgemuth, (2005), S. 144. Um negative Umweltauswirkungen zu vermeiden oder zu reduzieren, reicht eine einfache Erfassung relevanter Ströme, z.B. in Form einer Umweltbilanz, selten aus. Um kritische ökologische Faktoren zu identifizieren und die wahrscheinliche Wirksamkeit von Korrekturmaßnahmen zu beurteilen, ist häufig ein *Modell erforderlich*, das alle relevanten Strukturen und Flüsse aufzeigen muss.

Die Modellierung ist ein leistungsfähiges Werkzeug, um komplexe Systeme zu untersuchen, wie sie z. B. aus dem Netzwerk von Stoff- und Energieströmen eines Unternehmens bestehen. Im Rahmen von *EMIS* können alle umweltrelevanten Aspekte in Modellen abgebildet werden, deren Verhalten dann anstelle der realen Systeme, deren Repräsentationen sie darstellen, analysiert werden kann. Die Angewandte Informatik hat viele Software-Tools entwickelt, um diesen Prozess zu erleichtern, und im Bereich des Umweltschutzes können wir heute aus einer Vielzahl von Methoden und Software wählen, die in ein *EMIS integriert sind* und den Anwendern helfen, Energie- und Stoffflüsse auf einfache und effektive Weise zu modellieren.

Da *sich EMIS* in der Regel auf ökologische Aspekte eines Produktionssystems konzentrieren, sind ihre Möglichkeiten, auch ökonomische Aspekte zu analysieren, in der Regel eher begrenzt. Durch die Zuordnung von Kosten oder Erlösen zu den Energie- oder Stoffflüssen in einer Produktionskette in einem *EMIS* auf Basis von Stoffstromnetzen (siehe Abschnitt 3) könnte neben einer Umweltprüfung auch eine monetäre Kostenrechnung eingeführt werden. Darüber hinaus wären Modelle, die sowohl ökonomische als auch ökologische Gesichtspunkte abdecken, am nützlichsten, um komplexere ökonomisch relevante Probleme untersuchen zu können, z.B. wie z.B. die Planung von Produktionsprogrammen oder die Erkennung von Engpässen in Produktionsanlagen. Für solche Fragestellungen wäre die Anwendung von Simulationsmodellen sehr gut geeignet.

Simulationsstudien, die ökonomische mit ökologischen Modellen verbinden, um industrielle Systeme sowohl unter ökonomischen als auch unter ökologischen Kriterien zu analysieren, sind eher selten. In jüngster Zeit wurden einige mehr oder weniger verwandte Ansätze veröffentlicht, z.B. eine modellbasierte integrierte Toolbox, die es ermöglicht, hydroklimatische und hydrologische Analysen von Oberflächen- und Grundwasser mit ökonomischen und ökologischen Wirkungsmodellen zu verknüpfen (vgl. Quinn, et al. (2004)), das STEAP-Modell (STeel Environmental Assessment Program) zur Analyse von CO₂ Steuern (vgl. Gielen, et al. (2002)), ein Online-System zur Simulation von Industrieunfällen (vgl. Bellasio, et al. (2005)), verschiedene Ansätze zur Simulation von Belebtschlamm-Kläranlagen (vgl. Gernaey, et al. (2004)), Ökobilanzen zur Unterstützung einer umwelt- und ökonomisch verträglichen Regionalentwicklung (vgl. Lenz, u.a. (2003)) und ein Entscheidungsunterstützungssystem für

die integrierte landwirtschaftliche Produktion (vgl. Perini, et al. (2004)). Im Gegensatz zu diesen Ansätzen konzentrieren sich die in diesem Artikel vorgestellten Arbeiten auf die Integration diskreter Ereignissimulationen der industriellen Produktion mit strömungsbasierten Beschreibungen der Stoff- und Energieverteilung und -dissipation in Stoffstromnetzwerken. Es werden auch relevante Themen aus der Umperspektive diskutiert.

In diesem Beitrag konzentrieren wir uns auf einen neuartigen Ansatz, bei dem die etablierte Methode der diskreten Ereignissimulation zur Modellierung industrieller Produktionsprozesse mit dem relativ neuen Ansatz der ökologischen Stoffstromanalyse zur Beschreibung von Material- und Energieflüssen integriert wird, wodurch sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Gesichtspunkte im selben Modellierungsrahmen kombiniert werden. Unsere Arbeit ist wie folgt aufgebaut: In Abschnitt 2 behandeln wir kurz die ereignisdiskrete Simulation als Modellierungs- und Planungswerkzeug für industrielle Produktions- und Logistikprozesse unter wirtschaftlichen Aspekten (z.B. Engpässe, Maschinenauslastung, Wartung, Inventur etc.). Die Stoffstromanalyse ist ein relativ junger Ansatz zur Modellierung von Stoff- und Energieflüssen in Produktionsketten, vor allem unter ökologischen Aspekten (Abschnitt 3). In Abschnitt 4 skizzieren wir, wie wir Simulationsmöglichkeiten in Stoffflussnetzwerke für den industriellen Umweltschutz integrieren können. Ein Nachteil dieses Ansatzes besteht jedoch darin, dass das Simulationsmodell nur lokal ausgeführt werden kann, d.h. als Teil einer einzigen Transition eines Materialflussnetzwerks. Im zentralen Abschnitt 5 dieses Beitrags gehen wir noch einen Schritt weiter und zeigen, wie wir Materialflussanalyse und diskrete Ereignissimulation in einer einzigen Softwareumgebung kombinieren können, indem wir ein komponentenbasiertes Framework namens Milan einführen. Dieses Framework unterstützt den Anwender bei der Durchführung von Materialflussanalysen mittels eines ereignisdiskreten Simulationsmodells, ohne dass ein zusätzliches Materialflussmodell erstellt oder die Softwareumgebung geändert werden muss. Für das gesamte Modell kann ein Material-Input-Output-Konto erstellt werden, das auf dem gleichen Modell basiert, das auch für die Zusammenstellung der Simulationsergebnisse verwendet wurde. Um das Design und die Anwendbarkeit der komponentenbasierten Kombination aus ereignisdiskreter Simulation und Analyse von Materialflüssen zu testen, wurde eine Fallstudie bei einem Halbleiterhersteller durchgeführt (Abschnitt 6). Im letzten Abschnitt geben wir eine Zusammenfassung und kommen zu dem Schluss, dass die in diesem Beitrag beschriebene Software maßgeschneiderte Umweltmanagement-Informationssysteme (*EMIS*) erstellt, in denen Produktionsprozesse und alle Arten von Energie- und Stoffflüssen sowohl im Hinblick auf wirtschaftliche Maßnahmen als auch auf deren Umweltauswirkungen analysiert werden können.

2 Ereignisdiskrete Simulation der industriellen Produktion

Die *ereignisdiskrete Simulation* ist seit langem eine beliebte Technik zur Untersuchung industrieller Prozesse, wird aber auch häufig für Planungszwecke eingesetzt – insbesondere für die Bewertung verschiedener Designalternativen in einem Produktionsprozess; siehe Law und Kelton, (2000) und Oakshott, (1997). Die Methodik der ereignisdiskreten Simulation basiert auf der Vorstellung, dass wir, sobald sie richtig validiert sind, Modelle verwenden können, die uns bei der Beantwortung schwieriger Fragen zu komplexen Systemen helfen. Ein gutes Simulationsmodell kann unser Verständnis für das Verhalten eines Systems erheblich verbessern.

In vielen dynamischen Prozessen, insbesondere in industriellen Kontexten wie Fertigung, Transport und Bestandsverwaltung, ändern sich Systemzustände zu diskreten Zeitpunkten (z. B. Ereignissen) und nicht durch kontinuierliche Zustandsschwankungen. Ein Beispiel dafür sind Warteschlangen vor einer Gruppe von Maschinen oder anderen Fertigungsstätten, da sich

ihre Länge (Anzahl der Artikel, die für den Service anstehen) nur ändert, wenn Artikel ein- oder ausgehen. Solche *Warteschlangennetzwerke* bestehen in der Regel aus diskreten Komponenten wie Maschinen und Werkstücken, deren Verhalten Zustandsänderungen durch diskrete Ereignisse verursacht, die in der Regel zufällig entlang der Zeitachse eines Modells verteilt sind. Bei solchen diskreten Ereignissimulationen ist es oft wünschenswert oder sogar notwendig, viele Modellkomponenten als Individuen zu behandeln, jede mit ihren eigenen Eigenschaften und ihrer eigenen Verarbeitungsgeschichte. Während einer Simulation werden Modelle entlang einer simulierten Zeitleiste "verschoben", für die ein Modellmonitor eine Simulationsuhr und eine Ereignisliste verwalten muss. Ereignislisten werden verwendet, um zukünftige Ereignisse aufzuzeichnen und dem Modellmonitor die wiederholte Auswahl und Entfernung des *nächsten bevorstehenden* Ereignisses zur Ausführung zu ermöglichen. Der Monitor aktualisiert dann seine Uhr auf die relevante Modellzeit, was bedeutet, dass die Taktwerte in unregelmäßigen Abständen springen - von der aktuellen Modellzeit bis zum Zeitpunkt des nächsten Ereignisses. Auf diese Weise werden alle Zwischenzeitwerte übersprungen und die Dauer aller Aktivitäten einfach modelliert, indem entsprechende Start- und Stoppereignisse geplant werden. Der Modellmonitor überträgt auch die Steuerung an ein Programm, das relevante Änderungen an Modellzuständen vornimmt. z.B. der Beginn einer Verarbeitungstätigkeit. Solche Programme werden *als Ereignisroutinen bezeichnet*, und ihre Ausführung kann weitere Ereignisse (z. B. das Ende einer Verarbeitungsaktivität) für einige Zeit in die Zukunft der Simulation verschieben. Diese werden auf die Agenda des Modells gesetzt. Kapitel 2 von Page und Kreutzer (2005) bietet eine kurze Einführung und Zusammenfassung der Grundlagen der diskreten Ereignissimulation.

Im Gegensatz zu ihrer Popularität bei der Modellierung von Fertigungsprozessen, Informationsflüssen und Logistik ist die ereignisdiskrete Simulation bisher nicht in großem Umfang auf die Analyse von Umweltproblemen anwendbar (siehe Neumann, (1985) oder Wohlgemuth, (2000)). Unserer Meinung nach ist dies eher auf eine mangelnde Vertrautheit der meisten Experten für Umweltanalytik mit der Simulation diskreter Ereignisse zurückzuführen als auf konzeptionelle Unzulänglichkeiten der Methode selbst. Die Zunahme der Modellkomplexität, die durch die Verwendung diskreter Ereignissimulationen in *Kombination* mit anderen etablierten Techniken (z.B. Materialflussnetzwerke zur Materialflussanalyse) verursacht wurde, könnte weiter zu diesem Zustand beigetragen haben.

3 Materialflussnetze und das Softwaretool *Umberto*

Stoffstromnetzwerke sind eine spezielle Form von Petrinetzen, die Stoff- und Energieflüsse in mehrstufigen Produktionssystemen abbilden. Petri-Nets sind in der Informatik gut etabliert und bieten eine interessante Perspektive auf die Modellierung und Analyse komplexer Systeme. Wenn PetriNets für die Modellierung der Umweltaspekte der Geschäftstätigkeit eines Unternehmens angepasst und modifiziert werden, sind sie als *Materialflussnetzwerke bekannt geworden*.

Stoffstromnetze wurden ursprünglich an der Universität Hamburg entwickelt (vgl. Möller, (2000)), um den Stoff- und Energiefluss zu beschreiben, der durch wirtschaftliche Aktivitäten verursacht wird; siehe z.B.

Schmidt et al. (1997) und Wohlgemuth et al. (1997). Die Erfassung und Analyse der Umweltauswirkungen solcher Ströme ist eine der wichtigsten Aufgaben eines wirksamen Umweltmanagements. vgl. Rautenstrauch, (1999).

Während die Entwicklung von Stoffstromnetzen von Konzepten aus mehreren Disziplinen inspiriert wurde, sind die beiden wichtigsten Wurzeln die Petrinetztheorie der Informatik und

die doppelte Buchführung und Kostenrechnung der Betriebswirtschaftslehre. Stoffstromnetze sind Petri-Netze, die aus Übergängen, Plätzen und Pfeilen bestehen. Petri-Netze können daher als 3-Tupel $N = (T, S, F)$, F formalisiert werden ($S \rightarrow T \rightarrow S$), wobei T eine Menge von Übergängen ist, S eine Menge von Orten und F eine Reihe von Pfeilen zwischen ihnen; vgl. Baumgarten, (1996). In Diagrammen werden Übergänge als Quadrate dargestellt und zeigen den Ort von Stoff- oder Energieumwandlungen an. Platziert separate Übergänge und dienen als Inventar, die durch Flüsse erschöpft und wieder aufgefüllt werden. In Diagrammen zeichnen wir sie als Kreise. Pfeile zeigen Flüsse, d.h. wie sich Elemente wie Informationen, Energie und Material zwischen Übergängen und Orten bewegen. *Abbildung 1* zeigt ein Beispiel. Beachten Sie, dass der Stoffstrom-Netzwerk-Ansatz in diesem Sinne die Struktur von Petri-Netzen verwendet, sich aber nicht auf dynamischere Eigenschaften von Petri-Netzen wie Fairness, Lebendigkeit usw. bezieht.

Abbildung 1: Ein einfaches Materialflussnetzwerk

Das Netzwerk in *Abbildung 1* beschreibt nur die Struktur eines Petri-Netzes, und es bedarf weiterer Details, um sein Verhalten zu spezifizieren. Solche Verhaltensspezifikationen sind von besonderem Interesse in Modellen von Computersystemen, Computernetzwerken oder Kommunikationssystemen, in denen Petri-Netze am häufigsten verwendet werden. Da *Stoffstromnetze* als Abrechnungssysteme für Stoff- und Energieflüsse dienen, kann die doppelte Buchführung zur Beschreibung ihres dynamischen Verhaltens herangezogen werden; vgl. Moeller (2000). Aus dieser Perspektive können Pfeile als Konten (von Stoff- und Energieflüssen) betrachtet werden, und Orte behalten den Überblick über alle relevanten Bestände. Der erste Schritt der Datenerfassung erfasst daher alle Bestände zu Beginn eines bestimmten Zeitintervalls (d.h. den Anfangsbestand) und der zweite Schritt bestimmt alle Ströme während dieses Zeitraums. Aus diesen Zahlen können Lagerbestände am Ende einer Periode (d.h. des Endbestands) berechnet werden. Das Ergebnis ist ein Material- und Energiemodell, das auf unterschiedliche Weise als Grundlage für unsere Analyse dienen kann.

Stoffstromnetzwerke bieten ein breites Spektrum an Darstellungen für komplexe Stoffströme und können zur Unterstützung einer ganzen Reihe von Aufgaben des Umweltmanagements eingesetzt werden. Sie können zum Beispiel eingesetzt werden, um tiefere Einblicke in Produktion, Konsum, Transport, Abfallbehandlung und andere derartige Prozesse zu gewinnen. Übergänge beschreiben eine Aktivität oder Aufgabe, die mit allen benötigten Materialien eingegeben wird und neue oder geänderte Materialien als Ausgabe erzeugt. Auf diese Weise verknüpfen Übergänge Materialverbrauch und Produktion. Sogenannte *Übergangsspezifikationen* können zugrundeliegende Prozesse in Form von mathematischen Ausdrücken oder Algorithmen zusammenfassen, und für deren Berechnung werden Programme verwendet. Neben der Zerlegung großer Systeme und der Berechnung eines fehlenden Wertes ermöglichen Übergangsspezifikationen auch einen nahtlosen Wechsel von einem deskriptiven zu einem prädiktiven Modell.

Wir können zwischen verschiedenen Arten von Übergangsspezifikationen unterscheiden. Am einfachsten sind die sogenannten *Produktionskoeffizienten*, die lineare Beziehungen zwischen den Inputs und Outputs eines Prozesses definieren. In diesem Zusammenhang werden Produktionskoeffizienten zu Skalenfaktoren, und die Kenntnis einer einzelnen Strömung in unmittelbarer Nähe des Übergangs reicht aus, um die Stärken aller anderen Strömungen zu berechnen. *Abbildung 2* veranschaulicht die Vorgehensweise.

Abbildung 2: Eine einfache Übergangsspezifikation unter Verwendung von Produktionskoeffizienten und ihre Anwendung auf das Bauwesen; in Anlehnung an Schmidt et al. (1997), Seite 775.

Eine etwas komplexere, aber etwas flexiblere Methode verwendet eine Reihe von Ausdrücken, um die Beziehungen zwischen Eingabe- und Ausgabeflächen eines Übergangs zu beschreiben. Dadurch ist es möglich, nichtlineare Abhängigkeiten zu modellieren. Durch die Verwendung eines if-Ausdrucks kann sich diese Methode auch über mehrere Fälle oder Profile erstrecken, und die Einbettung eines Algorithmus in einen Übergang bietet uns ultimative Flexibilität. Zum Beispiel könnten wir Fuzzy-Logik innerhalb eines Übergangs verwenden, der Teil eines Färbereimodells ist, oder wir könnten eine diskrete Ereignissimulation eines Flaschenfüllprozesses codieren, die immer dann ausgeführt wird, wenn der Berechnungsalgorithmus innerhalb des Materialflussnetzwerks den relevanten Übergang berührt. Ohne ihre theoretischen Grundlagen zu verletzen, kann die Verwendung von Skripten, um komplexe Regeln oder Modelle an einen Übergang anzuhängen, Materialflussnetzwerke weiter erweitern (vgl. Page und Wohlgemuth, (2002)).

Das Attraktivste an Stoffstromnetzwerken besteht darin, dass sie die Erstellung von Input-Output-Ökobilanzen für ein Unternehmen, eine Industrieanlage oder einen Produktionsprozess nahtlos mit einer Analyse der Stoffströme im Zusammenhang mit bestimmten Produkten oder Dienstleistungen kombinieren können. Darüber hinaus bieten sie eine grafische Darstellung zur visuellen Analyse von verteilten Stoff- und Energieflüssen.

Die Softwareunterstützung für Materialflussnetze muss eine Reihe von Anforderungen erfüllen. So muss die Software in der Lage sein, komplexe Produktionsprozesse aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen wie Chemie oder Ingenieurwesen abzubilden und ein flexibles Datenmanagement für die Aktualisierung und Erweiterung des Modells bieten. Unterschiedliche Arten der Dateninterpretation und -darstellung müssen ebenfalls unterstützt werden. Das Umberto-System^{®2}, das Mitte der 1990er Jahre auf den Markt kam, war die erste Reihe von Programmen, die versuchten, diese Ziele zu erreichen. Umberto[®] ist ein leistungsstarkes und benutzerfreundliches Tool zur Analyse von Materialflüssen. Es läuft unter der Windows-Betriebssystemfamilie[®] von Microsoft und erfüllt die ergonomischen Standards der Software; siehe Schmidt et al. (1997). Es bietet auch mehrere Schnittstellen zu anderen Programmen, von denen eine die Spezifikation von Übergängen ermöglicht. In Kombination mit komplexen Algorithmen kann es Teilmodelle in Materialflussnetzwerke einbetten, die außerhalb von Umberto[®] entwickelt wurden. Dies kann über ein Skript erfolgen, das in einer der Sprachen geschrieben wurde, die die *Active Scripting Architecture* von Microsoft unterstützen. Diese Skripttechnik erweitert Materialflussnetze auf leistungsstarke Weise, und ihre Benutzer können einen Übergang angeben, ohne auf die[®] Standardeinstellungen von Umberto beschränkt zu sein.

4 Erweiterung von Materialflussnetzen durch Simulation

Wir haben die[®] Fähigkeit von Umberto zur Verknüpfung von Übergängen mit Modellen genutzt, um die Simulation diskreter Ereignisse in Materialflussnetzwerke zu integrieren und die Ergebnisse eines Modells an Umberto[®] zurückzugeben. Die Implementierung dieser Technik basiert auf der *Active Scripting Architecture* von Microsoft. Diese Strategie hat es uns ermöglicht, eine ereignisdiskrete Simulation eines einfachen Bestandsmodells in die Übergänge eines Materialflussnetzwerks einzubetten (vgl. Page und Wohlgemuth, (2002)). Um den Implementierungsaufwand deutlich zu reduzieren, wurde für die Codierung der Simulation die

² Weitere Informationen über Umberto[®] finden Sie unter <http://www.umberto.de/en>

Delphi-Version des an der Universität Hamburg entwickelten DESMOJ Discrete Event Simulation Frameworks (vgl. Page und Kreuzer, (2005)) verwendet. Dieses Framework enthält alle erforderlichen Funktionen für die Simulation diskreter Ereignisse, wie z. B. die Generierung von Zufallszahlen, das Zeitmanagement des Modells, die Ereignisbehandlung und die statistische Berichterstattung. Es mussten nur wenige Erweiterungen für die automatische Erfassung typischer Leistungskennzahlen des Materialflusses und der Transformationen an jeder Maschine, wie z. B. Produktionsmenge, Maschinenstunden, Rüstzeiten usw., an diesem Simulationsframework vorgenommen werden. Im Vergleich zu einfachen Materialflussnetzwerken nimmt dieser simulationsgestützte Ansatz eine eher auftragsbezogene Perspektive ein und ermöglichte es uns, alle Materialumwandlungen an jeder Maschine und für jeden Auftrag zu beobachten.

Inventursysteme sind für viele Industriezweige von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Sie haben auch einige interessante Auswirkungen auf die Umwelt. Die wichtigsten wirtschaftlichen Ziele von Bestandssystemen sind die Minimierung der Lagerkosten und die Aufrechterhaltung eines hohen Serviceniveaus. z.B. in Bezug auf die Geschwindigkeit, mit der ein Auftrag ausgeführt werden kann. Mathematische Methoden des Operations Research können helfen, diese Ziele in Einklang zu bringen. Aufgrund ihrer Komplexität und ihres weitgehend stochastischen Charakters werden Computersimulationen häufig eingesetzt, um optimale Kompromisse zwischen Kosten und Service zu finden. Da das Erfüllen von Bestellungen und das Auffüllen von Lagerbeständen zu Produktlieferungen (hauptsächlich per LKW) führt, die eine Umweltbelastung (z. B. Umweltverschmutzung und Lärm) mit sich bringen, können unterschiedliche Bestandsstrategien unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt haben. Die Verringerung der Umweltverschmutzung kann durch die Verringerung der Anzahl der Lieferungen, die Verkürzung der Transportwege (z. B. durch den Einsatz lokaler Lieferanten) oder durch die Auswahl umweltfreundlicherer Fahrzeuge erreicht werden. Die Wahl einer Bestellpolitik wird daher zu einer strategischen Geschäftsentscheidung, die sowohl ökonomische als auch ökologische Auswirkungen hat, und es ist sinnvoll, Simulationen wirtschaftlicher Faktoren mit Stoffstromnetzwerken zu verknüpfen, damit sowohl ökologische als auch ökonomische Indikatoren in die Bestandsstrategien einfließen können. Durch die Verknüpfung dieser beiden Ansätze können wir Fragen beantworten wie:

- Welche Emissionen werden durch die aktuelle Inventurstrategie verursacht?
- Können Emissionen durch alternative Strategien reduziert werden?
- Wie groß ist die Kostensteigerung oder -senkung für jede Strategie?
- Kann das erforderliche Maß an Kundenservice aufrechterhalten werden, wenn sich die Bestandsstrategien ändern?

Im folgenden Beispiel hängen wir eine einfache Bestandssimulation an eine Übergangsspezifikation in einem Umberto[®] Materialflussnetz an. Diese Inventursimulation wird nur ausgeführt, wenn eine relevante Transition stattfindet. Alle anderen Energieumwandlungen werden mit "normalen" Umberto-Methoden[®] beschrieben. Das Simulationsmodell spiegelt einige Aspekte eines fiktiven Bekleidungsunternehmens wider, das Hosen, Hemden und Schuhe verkauft. Bestellungen von Kleidung kommen telefonisch an und ihre Lieferung wird an ein Transportunternehmen delegiert. Das Bekleidungsunternehmen garantiert seinen Kunden die Lieferung innerhalb eines Werktages. Hemden und Hosen werden in der Regel per Schiff verschickt, außer bei Lagerengpässen, wenn eine Notfalllieferung per Flugzeug erforderlich ist, um sicherzustellen, dass das gewünschte Serviceniveau erreicht wird. Die Schuhlieferungen erfolgen per Luftfracht. Eine Nachbestellaktivität bis zum maximalen Lagerbestand wird ausgelöst, wenn ein Mindestbestandsschwellenwert erreicht wird. Die Kundennachfrage ist stochastisch und folgt einer Normalverteilung. Alle Transportzeiten sind

ebenfalls normal verteilt. Die Kostendaten setzen sich aus Bestandskosten, indirekten und direkten Auftragskosten, Kosten für Fehlmengen (d. h. durch Nichteinhaltung von Service Levels) und Transportkosten zusammen. Das Modell untersucht zwei Szenarien – eines mit einer rein ökonomisch motivierten Inventurpolitik und eines unter Berücksichtigung von Umweltaspekten. Im zweiten Szenario werden die Transportwege verkürzt und umweltfreundlichere Verkehrsmittel gewählt. Dies macht die Auftragslieferungen ökoeffizienter und sollte erreichbar sein, ohne notwendigerweise die Lagerkosten zu erhöhen oder das Serviceniveau des Unternehmens zu verringern.

Die obige Problemstellung ist eine typische Herausforderung für jedes Handelsunternehmen, das eine umweltfreundliche Optimierung der Auftragslogistik sucht. Anstelle von DESMOJ wurde bei der Implementierung der beiden Szenarien in der Fallstudie ein anderes Delphi-basiertes Simulationsframework für diskrete Ereignisse verwendet. Die Schnittstelle, die den Aufruf der[®] Umberto-Funktionalität aus dem Simulationsframework heraus ermöglicht, verwendet das *Component Object Model* (COM) von Microsoft und wird in Abschnitt 5 dieses Papiers beschrieben. Im Beispiel wird die Simulation immer dann aktiviert, wenn der Berechnungsalgorithmus[®] von Umberto den Übergang T4 erreicht (siehe *Abbildung 3*).

Abbildung 3: Verknüpfung einer Simulation des diskreten Ereignisbestands mit einem Materialflussnetzwerk; vgl. Wohlgemuth et al. (2001).

Relevante Informationen, wie z.B. die Lauflänge der Simulation, die dem Abrechnungszeitraum des Materialflussnetzes entspricht, werden über die COM-Schnittstelle ausgetauscht und die Steuerung an das Simulationsmodell übergeben. Nach Abschluss eines Simulationslaufs werden die durchschnittliche Anzahl der Lieferungen pro Transport, die Anzahl der angeforderten und gelieferten Produkte sowie die prognostizierten Kosten an Umberto[®] zurückgegeben. Auf Basis dieser Informationen ermittelt Umberto[®] dann alle relevanten Verkehrsemissionen. Dadurch können wir sowohl *ökonomische* als auch *ökologische* Planungsdaten für unterschiedliche Muster der Auftragslogistik und des Bestandsmanagements generieren. Weitere Einzelheiten finden sich in Wohlgemuth et al. (2001).

Ein Nachteil dieser Art der Kombination von Simulation mit Materialflussnetzen besteht darin, dass das Simulationsmodell nur lokal ausgeführt werden kann. d.h. als Teil eines einzigen Übergangs. Es können keine Informationen aus anderen Teilen des Netzwerks aufgenommen werden. Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass der Abrechnungszeitraum des Materialflussnetzes genau der Länge des Simulationslaufs entsprechen muss. Auch die Programmierung des Modells erfordert sowohl methodisches Wissen als auch Programmierkenntnisse, und wir müssen sicherstellen, dass alle relevanten Änderungen der Energie- und Stoffflüsse während einer Simulation erfasst werden. Abgesehen von der Notwendigkeit, diese Daten aufzuzeichnen, ist es recht selten, dass das Verhalten des Modells durch die Stärke der Strömungen beeinflusst wird.

5 Komponentenbasierte Architektur des Materialflusssimulators Mailand

Moderne Umweltinformationssysteme sind in der Regel eigenständige Programme, die nur wenige Erweiterungen und Modifikationen mit neuen Methoden und benutzerdefinierten Funktionen ermöglichen. Jede inhaltliche Erweiterung ist durch das eingeschränkt, was ein bestimmter Anbieter vorhersieht und zulässt. Bestehende EMIS-Architekturen sind selten offen genug, um den Austausch und die Änderung eines Großteils ihrer integrierten Funktionalität zu ermöglichen. Umberto[®] ermöglicht beispielsweise eine skriptbasierte Augmentation, um zusätzliche Informationen (z. B. fehlende Flüsse) zu berechnen. So ist es beispielsweise nicht einfach, die Flussmanagement-Strategie der Software oder den Materialflusssimulator durch neue

Komponenten mit benutzerdefinierten Funktionen zu ersetzen – und auch neue netzwerkweite Rechenmuster lassen sich nicht ohne weiteres in das System integrieren. Obwohl sie den Möglichkeiten der Benutzer manchmal unangenehme Grenzen setzen, sind solche Einschränkungen für die aktuelle EMIS-Generation recht typisch.

Im weiteren Verlauf dieses Beitrags schlagen wir einen konzeptionell anderen Ansatz vor und beschreiben ihn, der die Erstellung von kundenspezifischen Anwendungsframeworks aus EMIS-spezifischen Komponenten ermöglicht, ähnlich wie Plug-in-Erweiterungen Java-Programmierungsumgebungen ergänzen können; siehe z.B. *Eclipse* – Clayberg und Rubel, (2004). In einem solchen Framework können Komponenten frei ausgetauscht werden und Anwendungen bleiben unabhängig von bestehenden EMIS. Domänenspezifische Komponenten leiten Umweltinformationen aus diskreten Ereignismodellen ab, die relevante Materialflüsse simulieren. Durch die Kombination vieler verschiedener domänenspezifischer Komponenten in einem gemeinsamen Framework ermöglicht eine solche komponentenbasierte Architektur für Materialflusssimulationen dem Benutzer, Funktionen auszuwählen, die auf einen bestimmten Anwendungsbereich ausgerichtet sind. Die Komposition und Kommunikation zwischen Komponenten basiert auf klar definierten Schnittstellen und nicht auf Skripten, und die Abstraktionen dieser Schnittstellen bilden "Domänensprachen", die von Komponentendesignern verwendet werden müssen, die Plug-Ins erstellen möchten, die die Funktionalität des Frameworks erweitern.

5.1 Grundbegriffe

Um Materialflussanalyse und ereignisdiskrete Simulation in einer einzigen Softwareumgebung zu vereinen, ohne die Kommunikation zwischen den beiden Methoden auf einen einzigen Übergang zu beschränken, haben wir in den letzten drei Jahren ein komponentenbasiertes Framework entwickelt, das das COM-Interface von Microsoft verwendet. Das Milan-Framework bietet grundlegende Funktionen für diskrete Ereignissimulationen, die die Eigenschaften und Verhaltensweisen dynamischer Systeme untersuchen. So kann beispielsweise die industrielle Produktion untersucht werden, um kritische Bereiche und Engpässe zu lokalisieren. Das Framework unterstützt Anwender auch bei der Durchführung von Materialflussanalysen, ohne dass ein neues Modell erstellt oder die Softwareumgebung geändert werden muss. Das bedeutet, dass für ein gesamtes Modell oder eine einzelne Modellkomponente ein Material-Input/Output-Konto erstellt werden kann, das auf demselben Modell basiert, das auch für die Erfassung der Simulationsergebnisse verwendet wird. Auf diese Weise bilden die Materialflussanalyse und die ereignisdiskrete Simulation eine integrierte Umgebung, die es uns beispielsweise im Falle eines Halbleiterherstellers (siehe Abschnitt 6) ermöglicht, Fragen zu stellen wie:

- Können wir Energie sparen, wenn wir eine neue Maschine kaufen, ohne den Durchsatz zu verändern?
- Können wir die Auslastung einer Maschine erhöhen, indem wir den Produktionsprozess ändern, ohne die Abfallansammlung oder den Energiebedarf zu erhöhen?
- Können wir mehr Wafer produzieren, ohne mehr Lack zu kaufen, und das unter Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte für Lösemittlemissionen?

Um dieses Ziel zu erreichen, haben wir versucht, das Rad nicht noch einmal neu zu erfinden, d.h. unser Komponenten-Framework nutzt so viel vorhandene Funktionalität wie möglich. Ein typisches Merkmal aktueller Software zur Steuerung von Materialflüssen ist beispielsweise eine Materialverwaltungskomponente, über die der Benutzer alle Materialien festlegt, die für einen Produktionsprozess benötigt werden, und deren relevante Eigenschaften (siehe als Beispiel das

Informationssystem für industrielles Umweltmanagement Umberto[®]). Eine geeignete Komponente der Materialverwaltung sollte daher in unser Framework eingesteckt werden. Um die Funktionalität für die Simulation diskreter Ereignisse bereitzustellen, schließen wir eine Simulations-Engine an, die auf dem DESMOJ-Framework für die Simulation diskreter Ereignisse basiert. siehe Kapitel 10 von Page und Kreuzer, (2005). Auf diese Weise werden alle Funktionen eines bestimmten Materialflusssimulators durch Befehle und Komponenten definiert, die von Plug-Ins bereitgestellt werden, die für eine bestimmte Anwendung registriert sind. Das Framework selbst muss lediglich relevante Kommunikationsregeln durchsetzen und als Vermittler für die registrierten Plug-ins dienen. Wenn ein Benutzer mit den Befehlen und Modellkomponenten, die ein bestimmtes Plug-In bieten kann, nicht zufrieden ist, kann er es durch ein anderes Plug-In ersetzen, das er möglicherweise selbst gekauft oder geschrieben hat.

Abbildung 4: Aufbau eines Anwendungsframeworks für Materialflusssimulationen aus komponentenbasierten Plug-Ins

5.2 Kernkonzepte

Das beschriebene Milan-Framework bezieht seine gesamte Funktionalität aus der Registrierung und Deregistrierung geeigneter Plug-ins. Auf die Befehle und Modellkomponenten jedes Plug-Ins kann nur für eine Anwendung zugegriffen werden, für die es registriert ist. Ein Benutzer kann über die Menüstruktur einer Anwendung oder - sofern vom Plug-in-Entwickler zugelassen - über eine Schaltfläche in einer Symbolleiste (die automatisch für jedes Plug-in erstellt wird) auf verfügbare Befehle zugreifen. Auf ähnliche Weise kann eine Framework-Anwendung über ihre grafische Oberfläche Modellierungsfunktionen präsentieren. Wenn ein Plug-In dies anfordert, können Fenster als Container für ActiveX-Steuerelemente entsandt werden (siehe *Abbildung 5*) und die Anwendung dient als Vermittler für alle Benutzeraktionen.

Abbildung 5: Befehle und Komponenten für Plug-Ins – aus der Sicht einer Framework-Anwendung

Da vor einigen Jahren mit den Arbeiten am komponentenbasierten Materialflusssimulator begonnen³ wurde, wurde die Idee für die Plug-in-Architektur durch das *Component Object Model (COM) von Microsoft inspiriert* . In dieser Architektur muss jedes Plug-in, das für eine Framework-Anwendung registriert werden möchte, eine bestimmte Schnittstelle implementieren, deren Details in einer sogenannten *Typbibliothek veröffentlicht werden*, die ihrerseits auf Betriebssystemebene registriert ist. Um ein Plug-In zu registrieren, durchläuft die Framework-Anwendung alle verfügbaren COM-Objects und sucht nach der angegebenen Schnittstelle. Anschließend wird für jeden Befehl und jede Modellkomponente ein COM-Objekt erstellt, das das jeweilige Plug-In definiert. Da alle Funktionen über Schaltflächen oder Menüeinträge erreichbar sind, stehen der Anwendung alle Befehle und Komponenten zum Erstellen eines geeigneten Modells zur Verfügung (siehe *Abbildung 5*).

Um sowohl die Simulationsleistung (z.B. durch Maßnahmen wie Durchsatz, Auslastung, Termintreue etc.) als auch Materialflussanalysen auf Basis des gleichen Modells ganzheitlich betrachten zu können, haben wir eine Strategie entwickelt, bei der sogenannte *Materialkennzahlen* eine wichtige Rolle spielen. Diese Indikatoren kombinieren die

³ Siehe Kasten (1997) für weitere Einzelheiten zu COM.

ereignisorientierte Weltansicht der Simulationsmaschine (siehe Kapitel 10 von Page und Kreutzer, (2005)) mit Methoden zur Verfolgung von Materialien. Genauer gesagt definiert ein Materialindikator, welche Materialien als Eingaben für Modellkomponenten benötigt oder als Ausgaben von Modellkomponenten ausgegeben werden. Um auf das Beispiel eines Halbleiterherstellers zurückzukommen, kann ein Materialindikator für einen Beschichter definiert werden, der zu Beginn einer Aufgabe eine bestimmte Menge an Lack als benötigten Input reserviert. Am Ende der Aufgabe wird der verbleibende Lack recycelt und ein Teil des Lösungsmittels als Ausgangsstrom registriert (siehe *Abbildung 6*).

Abbildung 6: Beziehungen zwischen Materialindikatoren und Ereignissen für einen Coater

Die Anzeigen sind über ein spezielles Plug-in verfügbar. Ihre Implementierung basiert auf dem bekannten Beobachter-Entwurfsmuster der Softwareentwicklung, wie es in Gamma et al. (1998) beschrieben wird. Jedes Mal, wenn ein Ereignis mit einer Modellkomponente innerhalb des Simulationsmoduls auftritt, müssen alle Indikatoren, die die Modellkomponente beobachten, entscheiden, welche Materialien für diese Art von Ereignis reserviert werden sollen. Die Nutzer können ihre eigenen Indikatoren entwickeln, wenn keine vorhandenen Indikatoren ihren spezifischen Anforderungen entsprechen. Auf diese Weise können Materialein- und -ausgabesalden für alle Modellkomponenten und das gesamte Modell erstellt werden.

5.3 Verfügbare Plug-ins

Wir haben eine Reihe von Plug-ins für den Einsatz im Milan-Framework entwickelt. Diese können einer von zwei Gruppen zugeordnet werden. Die Plug-ins der ersten Gruppe bieten Funktionen für diskrete Ereignissimulationen und umfassen:

- ein Plug-in zum Erstellen von Zufallsvariablen aus einer angegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilung; z.B. exponentiell, normal, gleichmäßig usw.
- ein Plug-in für die grundlegende Verwaltung von Zeit- und Ereignislisten; d.h. eine sogenannte Simulations-Engine, die einen Scheduler, eine Uhr, einen Event-List-Handler usw. bereitstellt; siehe Kapitel 6 von Page und Kreutzer, (2005).
- ein Plug-in, das die Erstellung von Modellen in einem grafischen Stil ermöglicht; d.h. einen Modelleditor.
- Plug-ins für bestimmte Anwendungsdomänen, die spezialisierte Modellkomponenten für diesen Anwendungsbereich enthalten; z.B. Modellbauteile für Produktionssysteme wie Puffer, Arbeitsplätze, Gabelstapler, Ressourcen etc.
- ein Plug-in zur Analyse und Visualisierung von Simulationsergebnissen; z.B. Tortendiagramme und x/y-Plots für einzelne Modellkomponenten oder ganze Modelle.

Die zweite Gruppe von Plug-ins befasst sich mit Aspekten der Materialflussanalyse. Dazu gehören:

- ein Plug-in für die Verwaltung aller im Modell verwendeten Materialien, die aus der Materialflussanalyse-Software Umberto[®] gewonnen wurden. Dieses Plug-in enthält Befehle zum Exportieren von Simulationsergebnissen und Modellstrukturen nach Umberto[®] zur weiteren Verarbeitung.

- Ein Plug-in mit Materialindikatoren für die Integration von diskreten Ereignissimulationen und Materialflussanalysen, wie oben beschrieben.

Alle diese Plug-ins lassen sich in das Application Framework integrieren und können theoretisch durch alternative Plug-ins ersetzt werden, sofern sich deren Entwickler an einige wenige Schnittstellenregeln halten. Wir müssen jedoch darauf achten, dass logische Abhängigkeiten erhalten bleiben. Da sie beispielsweise absichtlich für die Arbeit mit dem *Simulationsmodul für diskrete Ereignisse* konzipiert wurden, wäre es nicht sehr sinnvoll, Materialindikatoren zu verwenden, wenn ein Benutzer das Simulationsmodul des Modells durch ein Simulationsmodul ersetzt, das kontinuierliche Zeitsimulationen unterstützt.

6 Eine Fallstudie aus der Halbleiterindustrie

Bei einem Halbleiterhersteller wurde eine empirische Studie durchgeführt, um das Design und die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Kombination aus ereignisdiskreter Simulation und Materialflussanalyse zu testen. Da es sich bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen um einen komplexen Prozess handelt, bei dem viele Planungs- und Steuerungsprobleme gelöst werden müssen, eignet sich dieser Bereich gut für einen empirischen Test der Implementierung des Materialflusssimulators. Der Einsatz von Simulationen als Instrument zur Entscheidungsunterstützung hat in der Halbleiterindustrie eine lange Tradition (siehe z.B. Yücesan, et al. (2002), Band 2, Seiten 1357-1437) und viele teure Materialien (z.B. Entwicklerchemikalien, Farben, Lösungsmittel, Säuren), deren Emission in das Ökosystem erhebliche Schäden verursachen kann und deren sichere Stilllegung ein teurer Prozess ist (siehe Vishay (2002)). werden in der Halbleiterproduktion eingesetzt. Die Erprobung unseres Frameworks mit einem Modell der Halbleiterproduktion, das sowohl wirtschaftliche (z.B. Engpässe erkennen, Wartungsplanung, Maschinenbeschaffung etc.) als auch Umweltaspekte (z.B. Emissionen, Rohstoff- und Energieverbrauch etc.) umfasst, war daher eine große Hilfe bei der Weiterentwicklung des Frameworks. Aufgrund des engen Zeitrahmens und des Wunsches, die Komplexität des Modells zu reduzieren, wurde für dieses Experiment nur die Produktionsstufe der *Lithographie* ausgewählt.

Abbildung 7: Ergebnisse einer Lithographie-Simulation und deren Stoffstromanalyse

Da sie die Geometrie eines Halbleiters bestimmen, spielen die Produktionsprozesse im Lithografiestadium eine wichtige Rolle bei der Strukturierung von Waferoberflächen. Bei der Lithografie werden lichtempfindliche Fotofarben verwendet, die auf einem Wafer abgeschieden und dann durch Lithografiemasken belichtet und entwickelt werden. Da dies in mehreren Schichten geschieht, müssen die Wafer mehrfach durch die Lithografiestufe geroutet werden. Wie viele Durchgänge genau benötigt werden, hängt von der Art des Halbleiters ab. Obwohl in diesem Unternehmensbereich noch nie Simulationen oder Materialflussanalysen eingesetzt wurden, erwies sich der Einsatz in Kombination als vorteilhaft, um Engpässe zu lokalisieren und alle gesetzlichen Anforderungen an den Lösemittelausstoß zu beachten.

Im Experiment haben wir mit unserem Materialflusssimulator den Lithographieprozess modelliert und ein Plug-in für diesen Bereich konstruiert. Dies konzentrierte sich auf halbleiterspezifische Modellkomponenten, die uns halfen, typische lithographische und andere Prozesse auf ein Simulationsmodell abzubilden (siehe *Abbildung 7*). Während dieses Prozesses haben wir eine Reihe verschiedener Modellkomponenten erstellt. *Coater*, *Stepper*, *Developer* und *Repacker* wurden durch Serverkomponenten repräsentiert, zwei Messgeräte wurden auf eine *MeasuringDevice-Komponente* abgebildet und Ein- und Ausstiegspunkt Komponenten

wurden verwendet, um Systemgrenzen zu definieren. Eine *RoutingControl-Komponente* gab die Pfade der Wafer durch das Modell an, und eine *Verbindungskomponente* wurde verwendet, um alle anderen Komponenten miteinander zu verbinden. Die Entwicklung dieser Komponenten und ihre Integration in unser Anwendungsframework wurde relativ zeitnah und schnell erreicht. Andere vorhandene Komponenten, wie z. B. der Modelleditor, die Engine für die Simulation diskreter Ereignisse und verschiedene Materialverwaltungsfunktionen, könnten direkt wiederverwendet werden. Um Verweilzeiten und andere halbleiterspezifische Eigenschaften zu säen, wurden einige Erweiterungen des bestehenden Analyse-Plug-ins vorgenommen.

Durch den Einsatz des Materialflusssimulator-Frameworks konnte der Aufwand für die Kombination von Simulation und Materialflussanalysen des untersuchten Systems deutlich reduziert werden. In der Vergangenheit hätten solche Untersuchungen nicht mit einer einzigen Software durchgeführt werden können, sondern den Einsatz separater Programme erfordert, was zu einem erheblichen Anstieg des Entwicklungs-, Wartungs- und Analyseaufwands geführt hätte.

Nach der Analyse der Produktion von 6-Zoll-Wafern wurde auf Wunsch des Gastgeberunternehmens ein zweites Modell zur Untersuchung von 8-Zoll-Wafern gebaut, da diese plante, die Waferproduktion auf diese größere Größe umzustellen. Das Modell ermöglichte die Analyse verschiedener Aspekte einer solchen Veränderung; z.B. Veränderungen im Durchsatz und Engpassverschiebungen sowie Veränderungen beim Verbrauch von Energie und Rohstoffen. All dies hatte sowohl ökologische Folgen als auch Auswirkungen auf die Kosten der Waferproduktion. Die Untersuchung zeigte auch einen weiteren Vorteil der Kombination von Simulation mit Stoff- und Energieflussanalysen auf. Da beide Techniken ein gemeinsames Modell verwenden, können sowohl die ökologischen als auch die wirtschaftlichen Auswirkungen von Veränderungen der Produktionstechniken und Stoffflüsse sowohl auf taktischer als auch auf strategischer Managementebene untersucht werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ereignisdiskrete Simulation und Materialflussanalyse sind komplexe Techniken, deren Beherrschung fundiertes technisches Wissen erfordert. Beide Methoden werden von spezialisierter Software gut bedient. Obwohl sie unterschiedliche Wurzeln haben, teilen sie einen gemeinsamen Standpunkt und bedienen sich Computermodelle von Produktions- und Vertriebsprozessen. Traditionell waren zwei separate Modelle erforderlich, um jede dieser Methoden mit Informationen zu versorgen, und für ihre Erfassung wurden unterschiedliche Software-Tools eingesetzt. Infolgedessen mussten zwei separate Modelle beibehalten werden, die oft ein hohes Maß an Redundanz aufwiesen. Die Sicherstellung der Modellkonsistenz war eine wichtige, aber alles andere als triviale Aufgabe.

In diesem Artikel wurde ein neuartiger Ansatz für die Integration der ereignisdiskreten Simulation und der Materialflussanalyse in ein komponentenbasiertes Framework vorgeschlagen, das auf einem *einzigem* Modell basiert. Dies hat das Potenzial, sowohl die Entwicklung als auch die Wartung eines Modells erheblich zu erleichtern. Mit der in dieser Arbeit beschriebenen Software wird ein maßgeschneidertes Umweltmanagement-Informationssystem (EMIS) erstellt, in dem Produktionsprozesse und alle Arten von Energie- und Stoffflüssen sowohl hinsichtlich wirtschaftlicher Maßnahmen (z.B. Durchsätze, Auslastungen, Engpässe etc.) als auch hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen analysiert werden können. Die komponentenbasierte Architektur der Software ermöglicht eine effektive Wiederverwendung bestehender Komponenten, deren Funktionalität dann über eine kleine Anzahl gut dokumentierter Schnittstellen zugänglich ist. Aus dieser Perspektive bietet das

beschriebene simulationsbasierte EMIS sogar einen verallgemeinerten Rahmen für die Zusammenarbeit zwischen Komponenten, die von verschiedenen Autoren entwickelt wurden.

Ein Beispiel für die Zusammenarbeit zwischen dem Umberto[®] EMIS und einigen Simulationskomponenten, die der COM-Architektur von Microsoft nachempfunden sind, wurde verwendet, um die Wirksamkeit dieses Konzepts zu demonstrieren. Um gute Plug-in-Komponenten zu entwickeln, müssen wir geeignete linguistische Abstraktionen für relevante Anwendungsdomänen identifizieren, da solche "Anwendungssprachen" geeignete Schnittstellen und Signaturen vorschlagen. Ein detaillierteres Beispiel für diesen Prozess findet sich bei Wohlgemuth (2005).

Referenzen

Baumgarten, B., 1996. Petri-Netze. Grundlagen und Anwendungen. Spektrum Publ.: Berlin, Heidelberg, New York.

Box, D., 1998. Addison-Wesley: Reading (MA) (Vereinigte Staaten).

Clayberg, E. und Rubel, D., 2004. Eclipse: Erstellen von Plug-Ins in kommerzieller Qualität. AddisonWesley Professional: Lesen (MA).

Gernaey, K.V., et al. 2004. Modellierung und Simulation von Belebtschlamm-Kläranlagen: Stand der Technik. Environmental Modelling & Software 19(9), Seiten 763-783.

Gielen, D. und Moriguchi, Y., 2002. Modellierung der CO₂ -Politik für die japanische Eisen- und Stahlindustrie. Umweltmodellierung und -software 17(5), Seiten 481-495.

Heffter, J., 1999. Konzepte und Realisierung einer Einbettung von Tourenplanungsmodellen in Stoffstromnetze. Diploma thesis, Department of Computer Science, University of Hamburg.

Gesetz, A. M. und Kelton, W.D., 2000. Simulationsmodellierung und -analyse. McGraw-Hill: New York.

Lenz, R. J. M. und Beuttler, A., 2003. Erfahrungen mit GIS-basiertem Planungstool für räumliche Ökobilanzen. Umweltmodellierung & Software 18(6), Seiten 581-585.

Möller, A., Häuslein, A., Rolf, A., 1997. Öko-Controlling in Handelsunternehmen: ein Leitfaden für das Stoffstrommanagement. Springer Publ.: Berlin, Heidelberg, New York.

Möller, A., 2000. Grundlagen stoffstrombasierter Betrieblicher Umweltinformationssysteme. Projekt Publ.: Bochum.

Möller, A., Page, B., Rolf, A., Wohlgemuth, V., 2001. Grundlagen und Anwendungen von computergestützten Stoffstromnetzen für das Umweltmanagement. In: Rautenstrauch, C., (Hrsg.), Umweltinformationssysteme in Industrie und Öffentlichkeit, Seiten 379-396. Idea Group Verlag: Hershey.

Neumann, K., 1995. Betriebliche Umweltschutzplanung mit Hilfe der Simulation. Ein integrierter Planungsansatz mit Anwendung auf einen landwirtschaftlichen Betrieb. Peter Lang Publ.: Frankfurt.

Oakshott, L., 1997. Geschäftsmodellierung und Simulation. Pitman: London.

Page, B. und Kreutzer, W., 2005. Das Java Simulation Handbook – Simulation diskreter Ereignissysteme in UML und Java. Shaker Verlag.: Aachen.

Page, B. und Wohlgemuth, V. 2002. Verknüpfung von ökonomischen Optimierungs- und Simulationsmodellen mit umweltrelevanten Stoffstromnetzen für Ökoeffizienz. In: Hilty,

- L.M., Seifert, E.K., Treibert, R. (Hrsg.), Informationssysteme für nachhaltige Entwicklung, Seiten 94-108. Idea Group Verlag: Hershey.
- Perini, A. und Susi, A., 2004. Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems für die integrierte Produktion in der Landwirtschaft. *Umweltmodellierung und -software* 19(9), Seiten 821-829.
- Quinn, N. W. T. et.al., 2004. Modellintegration zur Abschätzung zukünftiger hydroklimatischer Auswirkungen auf Wasserressourcen, landwirtschaftliche Produktion und Umweltqualität im San Joaquin Basin, Kalifornien. *Umweltmodellierung und -software* 19(3), Seiten 305-316.
- Rautenstrauch, C., 1999. Betriebliche Umweltinformationssysteme. Springer Publ.: Berlin, Heidelberg, New York.
- Schmidt, M., Möller, A., Hedemann, J., Müller-Beilschmidt P., 1997. Umweltfreundliches Material
 Strömungsanalyse nach dem Netzwerkansatz. In: Geiger, W., Jaeschke, O., Rentz, O., Simon, E., Spengler, Th., Zilliox, L., Zündel, T., (Hrsg.), *Umweltinformatik '97, 11. Internationales Symposium der Deutschen Gesellschaft für Informatik (GI), Straßburg, Frankreich*, Seiten 768-779. Metropole: Marburg.
- Vishay (2002). *Umwelterklärung 2002*. Vishay Semiconductor Itzehoe GmbH. Itzehoe.
- Wohlgemuth, V., Seite B., Meyer, U., Möller, A., Rolf, A., Schmidt, M., 1997. Computergestützte Unterstützung von Ökobilanzen und betrieblichen Ökobilanzen mit Hilfe von Stoffflussnetzen. In: Alef, K., Brandt, J., Fiedler, W., Hauthal, O., Hutzinger, D., Mackay, D., Matthies, M., Morgan, K., Newland, L., Robitaille, H., Schlummer, M., Schüürmann, G., Voigt, K., (Hrsg.). *Eco-Informa '97, Information und Kommunikation in Umwelt- und Gesundheitsfragen*, München, Deutschland, Seiten 179-191. Eco-Informa Press: Bayreuth.
- Wohlgemuth V., Page, B., Heffter, J., 2000. Kopplung eines Materialflussnetzwerks mit einem Optimierungsmodell. *Proc. Simulationstechnik*, Seiten 389-394. SCS Europäisches Verlagshaus: Gent.
- Wohlgemuth V. und Page, B., 2000. Einbettung von Transportmodellen und diskreten Simulationsmodellen in Stoffstromnetze. In: Cremers, A.B., Greve, K., (Hrsg.), *Umweltinformationen für Planung, Politik und Öffentlichkeit. 14. Internationales Symposium für Umweltschutz*, Seiten 345-360. Bonn.
- Wohlgemuth, V., Bruns, L., Page, B., 2001. Simulation als Ansatz zur ökologischen und ökonomischen Planungsunterstützung im Kontext betrieblicher Umweltinformationssysteme (BUI). In: Hilty, L. M., Gilgen., P. W., (Eds.). *Sustainability in the Information Society. 15th International Symposium for Environmental Protection*, Pages 999-1008. Zuerich.
- Wohlgemuth, V., 2005. Komponentenbasierte Unterstützung von Methoden der Modellbildung und Simulation im Einsatzkontext des betrieblichen Umweltschutzes. Shaker Publ.: Aachen.
- Yücesan, E., Chen, C.-H., Snowdan, J.L., Charnes, J.M. (Hrsg.) 2002. *Tagungsband der Wintersimulationskonferenz 2002*. Verband für Computermaschinen: New York.

Vitae:

Volker Wohlgemuth studierte von 1991 bis 1997 Informatik an den Universitäten Hamburg und Christchurch (Neuseeland). 1997 schloss er sein Studium als Dipl. Informatiker an der Universität Hamburg ab und war seitdem als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg sowie als Senior Software Developer und Key Account Manager bei der ifu Hamburg GmbH (bis 2005) tätig. 2005 promovierte er an der Universität Hamburg in Angewandter Informatik und im Oktober 2005 wurde er auf eine Professur für Industrielle Umweltingformatik an der FHTW Berlin berufen. Die Forschungsschwerpunkte von Prof. Wohlgemuth liegen in der Modellierung und Simulation von Umweltauswirkungen industrieller und betriebswirtschaftlicher Systeme.

Bernd Page hat an der Technischen Universität (TU) Berlin in Angewandter Informatik promoviert und an der Stanford University (USA) einen MS erworben. Vor seiner Berufung auf eine Professur für Angewandte Informatik an der Universität Hamburg war Prof. Page als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Umweltinformationssysteme des Umweltbundesamtes (in Berlin) tätig. Seit seinem Eintritt in die Fakultät der Universität Hamburg beschäftigt er sich mit Forschung und Lehre auf dem Gebiet der Computersimulation und Umweltingformatik. In den 1980er Jahren war er Mitbegründer und Vorsitzender der Special Interest Group "Informatik für den Umweltschutz" der Gesellschaft für Informatik (GI). Professor Page hat viele geförderte angewandte Forschungs- und Industrieprojekte initiiert und betreut. Er hat zahlreiche Publikationen veröffentlicht.

Wolfgang Kreuzer promovierte 1978 in Angewandter Informatik an der Universität Frankfurt am Main und war seitdem an verschiedenen Universitäten in Neuseeland, den USA, Kanada und Schweden tätig. Heute ist er außerordentlicher Professor an der University of Canterbury (Neuseeland). Privatdozent Kreuzer lehrt und forscht seit vielen Jahren in verwandten Bereichen. Seine aktuellen Interessen konzentrieren sich auf den Einsatz von visueller Darstellung und Animation in Simulationsmodellen, Programmiersprachen und Multimediasystemen.

Illustrationen:

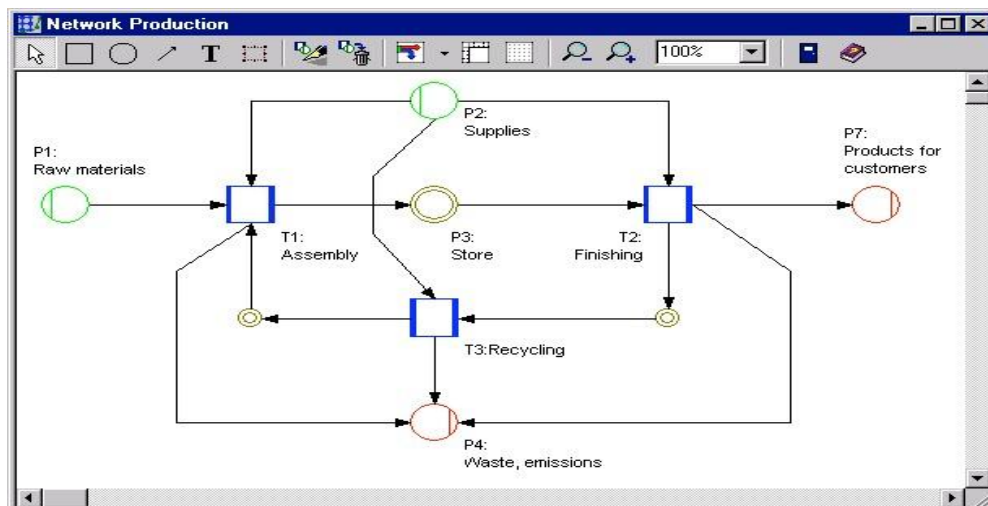


Abbildung 1: Ein einfaches Materialflussnetzwerk

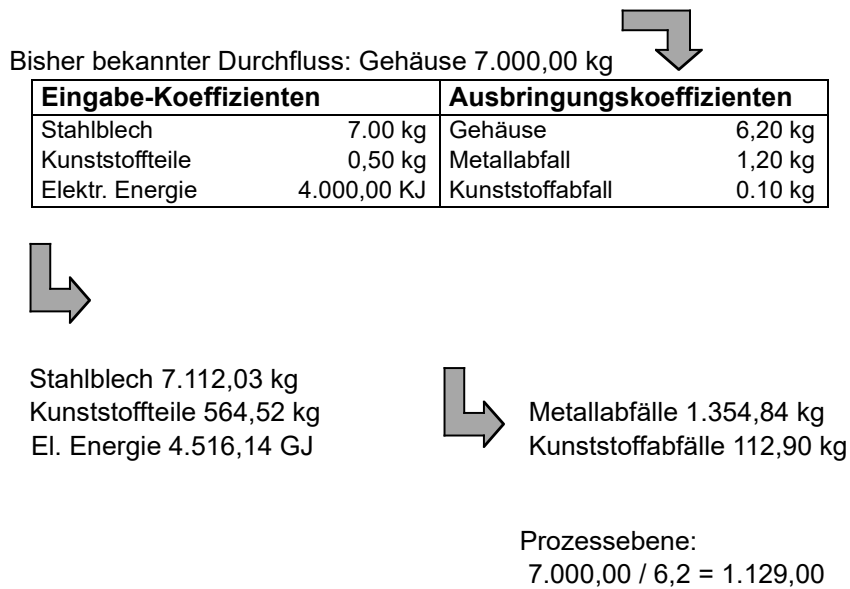


Abbildung 2: Einfache Übergangsspezifikation, die Produktionskoeffizienten verwendet, und ihre Anwendung auf das Bauwesen; basierend auf Schmidt et al. (1997), Seite 775.

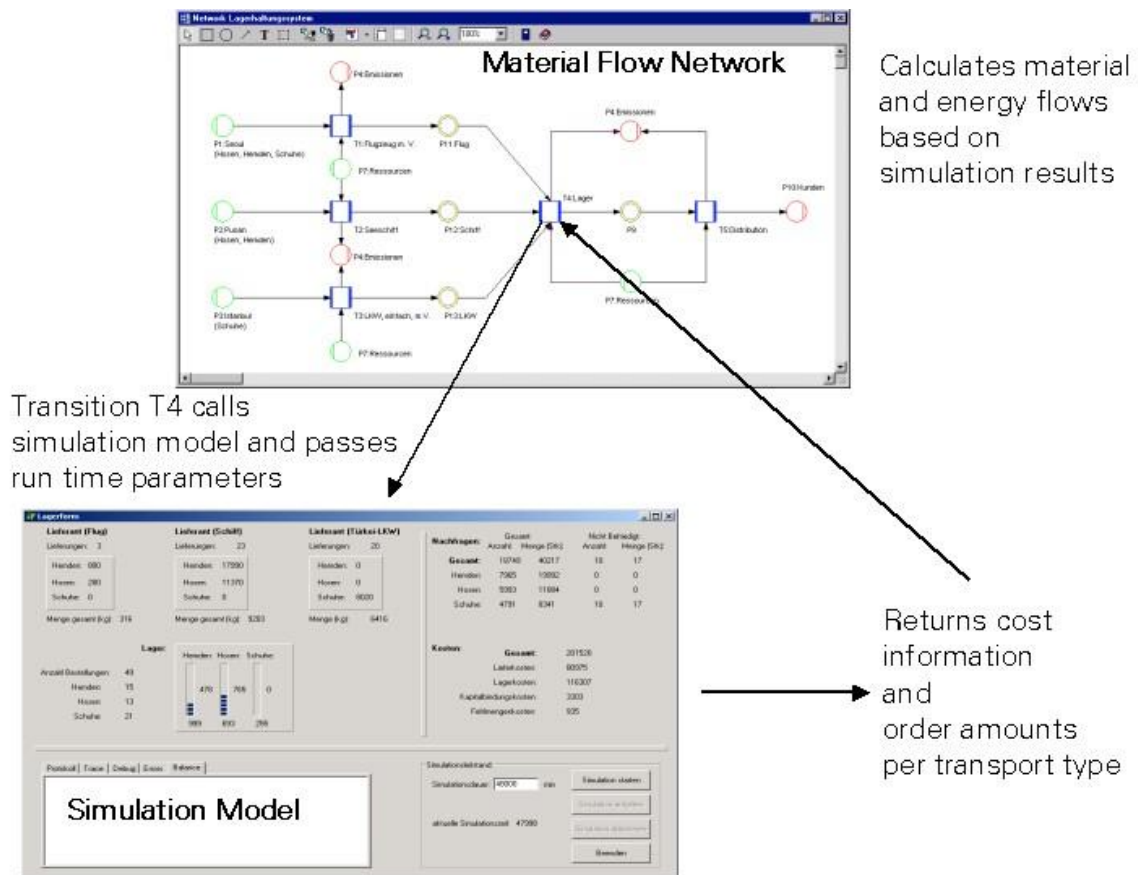


Abbildung 3: Verknüpfung einer ereignisdiskreten Bestandssimulation mit einem Materialnetzwerk; siehe Wohlgemuth, et al. (2001).

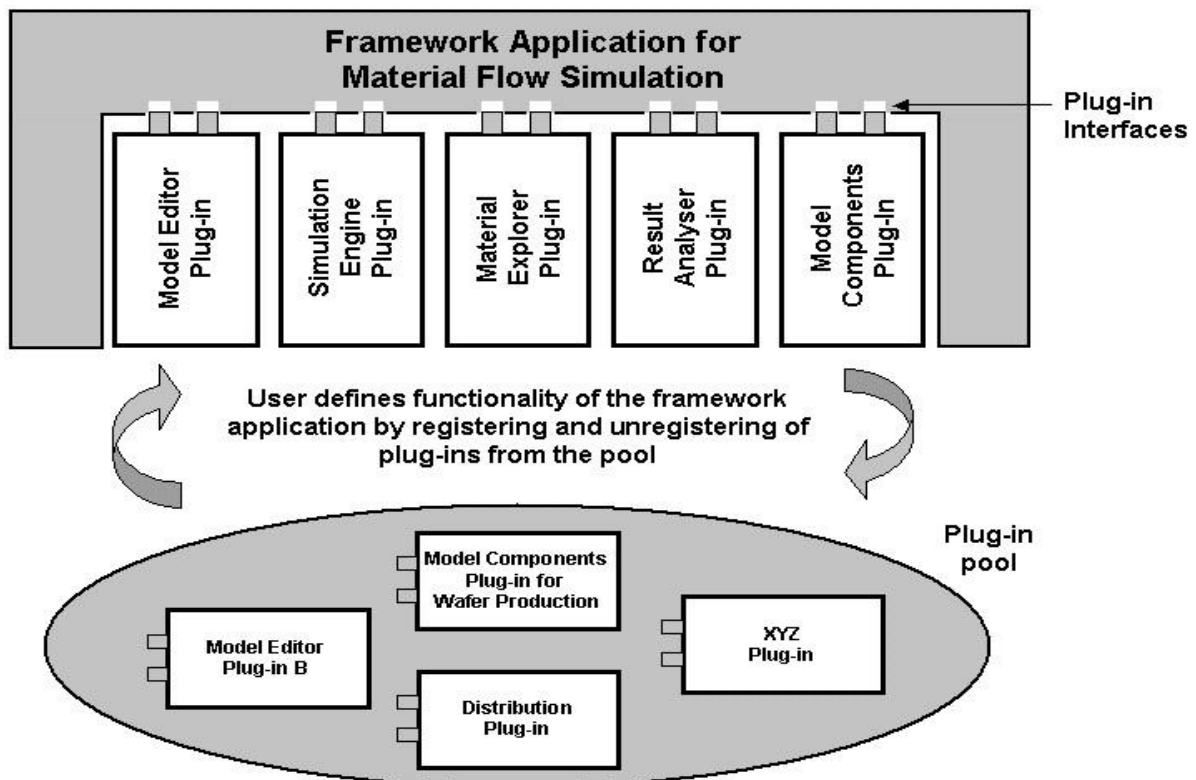


Abbildung 4: Aufbau eines Anwendungsframeworks für Materialflusssimulationen aus komponentenbasierten Plug-Ins

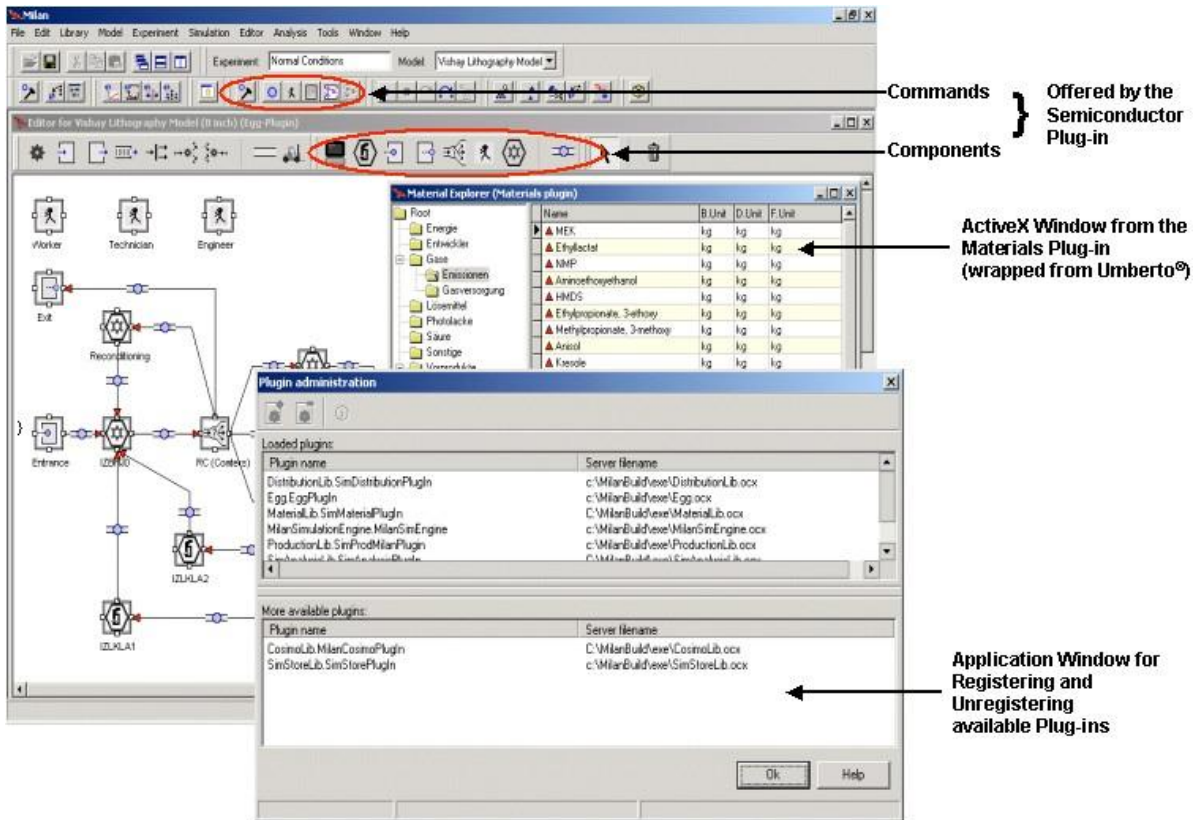


Abbildung 5: Befehle und Komponenten für Plug-Ins – aus der Sicht der Milan Framework-Anwendung

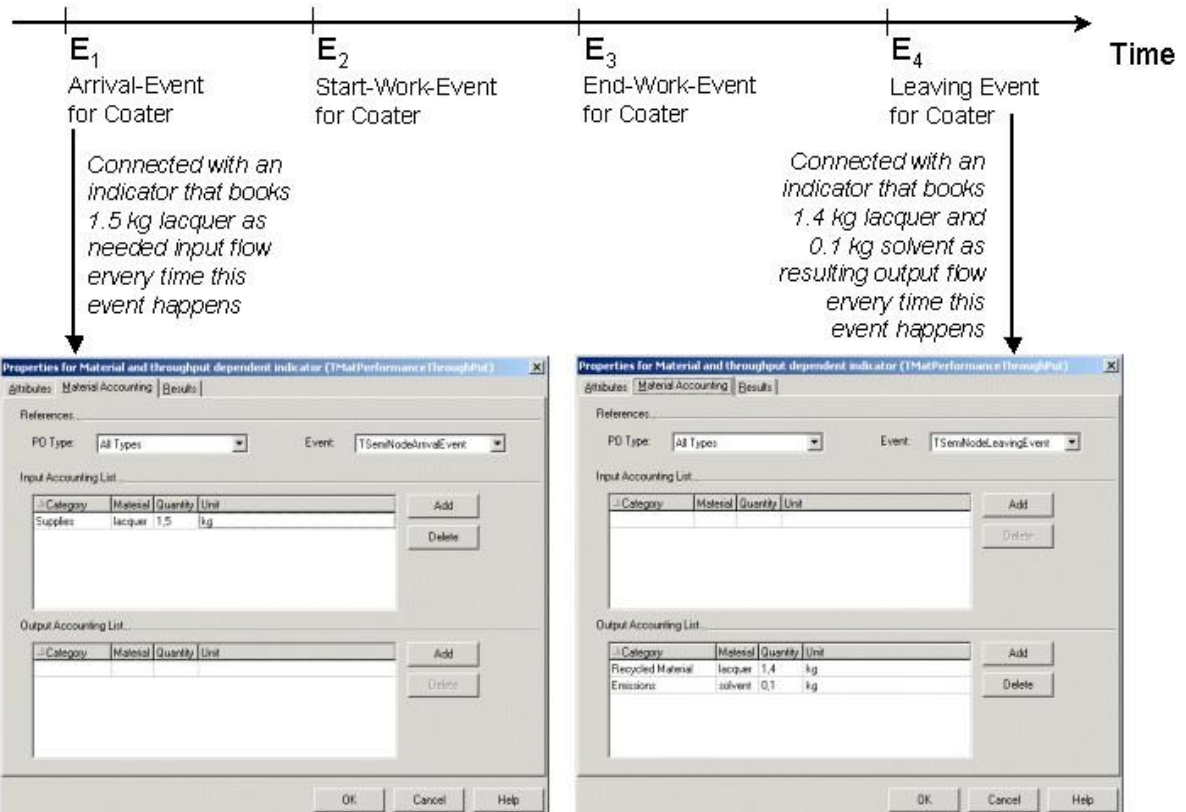


Abbildung 6: Beziehungen zwischen Materialindikatoren und Ereignissen für einen Coater

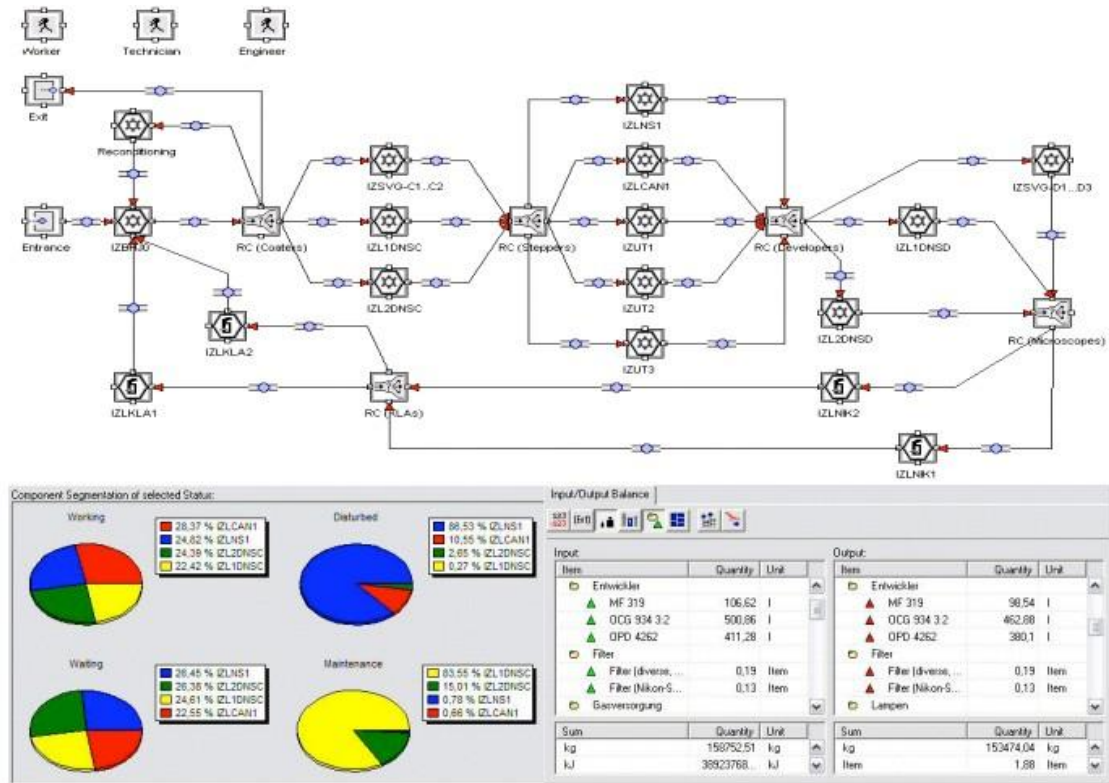


Abbildung 7: Ergebnisse einer Lithographie-Simulation und deren Stoffstromanalyse

Dies war eine Übersetzung ins Deutsche des frei verfügbaren Fachartikels:

Original:

„Combining Discrete Event Simulation and Material Flow Analysis in a Component-based Approach to Industrial Environmental Protection“.

Volker Wohlgemuth, Bernd Page.

Verfügbar unter (Stand 23.6.2025):

https://www.researchgate.net/publication/222560615_Combining_Discrete_Event_Simulation_and_Material_Flow_Analysis_in_a_Component-based_Approach_to_Industrial_Environmental_Protection

Dies war eine nicht offizielle deutsche Übersetzung des Originals durch:

Markus Bans
ATS Prozessoptimierung Markus Bans
Web: <https://simio-simulation.de>

Lizenz:

Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

S. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>