

Eine Softwareumgebung zur Modellierung, Simulation und Produktionsplanung von Pipeless Plants

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Dr.-Ing.
vom Fachbereich Bio- und Chemieingenieurwesen der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Andreas Liefeldt
aus
Mettmann

Tag der mündlichen Prüfung: 14. September 2007

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sebastian Engell
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schembecker

Dortmund 2007

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Anlagensteuerungstechnik
der Technischen Universität Dortmund
(Prof.-Dr. Sebastian Engell)

Band 1/2008

Andreas Liefeldt

**Eine Softwareumgebung zur Modellierung,
Simulation und Produktionsplanung
von Pipeless Plants**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dortmund, Techn. Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7008-7

ISSN 0948-7018

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Persönliches Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Systemdynamik und Prozessführung (ehemals Anlagensteuerungstechnik) im Fachbereich Bio- und Chemieingenieurwesen der Technischen Universität Dortmund.

Der Leiter des Lehrstuhls, Herr Prof. Dr.-Ing. Sebastian Engell, verschaffte mir mit einer Diplomarbeit im Umfeld Polymerisation den Eintritt in den Bereich der Modellierung und Simulation und erwies mir sein Vertrauen mit dem Angebot einer Promotionsstelle. Neben dem Promotionsprojekt ermöglichte mir Prof. Engell u. a. auch die Mitarbeit im Projekt Learn2Control, die Möglichkeit eine webbasierte Datenbank aufzubauen und übertrug mir die Organisation von Messeauftritten. All diese Aufgaben formten ein ganzheitliches, spannendes Schaffensfeld und boten mir vielfältige Möglichkeiten zur Weiterentwicklung. Professor Engell gilt mein herzlichster Dank.

Bei den Professoren Dr. Schembecker und Dr. Wichmann bedanke ich mich für ihre bereitwillige Mitwirkung in der Prüfungskommission.

Die „AST-ZEDO-Crew“ - namentlich Guido Sand, Martin Fritz, Mario Stobbe, Thomas Löhl, Christian Schulz und Silke Simon - begleiteten mich über einen Großteil meiner Lehrstuhlzeit und sorgten stets für ein angenehmes und partnerschaftliches Arbeitsklima. Insbesondere in meiner frühen Lehrstuhlzeit haben diese Kollegen mir in den Bereichen Solaris, Programmierung, Software Engineering und Chargenprozesse wertvolle Starthilfe gegeben.

Nicht zu vergessen sind natürlich auch die vielen hier nicht namentlich genannten Kollegen am Lehrstuhl, die mich fachlich bei der Arbeit als auch im privaten Umfeld begleiteten.

Mein Dank gilt ebenso Ernesto Elias-Nieland, der mit seiner Studienarbeit und seiner langjährigen Mitarbeit im PPSiM-Projekt integrale Beiträge geliefert hat und insbesondere bei der Planung der Softwarearchitektur ein wertvoller Gesprächspartner war.

Dr. Martin Käsemann (*HENKEL KGaA*), Ansprechpartner während der industriellen Anwendung von PPSiM, lieferte wertvolle Hinweise und Verbesserungsvorschläge welche die Praxistauglichkeit von PPSiM nachhaltig verbesserten.

Meinen Eltern danke ich für die fortwährende Unterstützung während meines Studiums und der Promotion. Einen großen Beitrag zu dieser Arbeit leistete meine Frau Sylvia, die mir privat den Rücken frei gehalten hat und sich nie über die fehlende gemeinsame Zeit beschwerte.

Kurzfassung

Bei der Herstellung von Feinchemikalien, Klebstoffen, Farben, etc. ist ein Trend erkennbar hin zu kleineren Produktionsvolumina bei gleichzeitig hohen Anforderungen an die Qualität. Häufig werden diese Produkte durch Chargenprozesse in rezepturgesteuerten Mehrproduktanlagen hergestellt. Allerdings stößt selbst dieser Anlagentyp an seine technischen Flexibilitätsgrenzen.

Rohrlose Anlagen oder Pipeless Plants sind eine modularere Alternative zu traditionellen Mehrproduktanlagen. Die Besonderheit besteht darin, dass der Transport der Stoffe nicht in Rohrleitungen, sondern mittels fahrbarer Behälter erfolgt. Die Prozessschritte werden nacheinander an fest in der Anlage installierten Stationen durchgeführt. Sowohl während der Anlagenplanung als auch des Betriebs resultiert aus der erhöhten Modularität eine große Zahl diskreter Entscheidungsvariablen, die den unterstützenden Einsatz von Simulationssoftware sinnvoll machen.

Das in dieser Arbeit entwickelte Programmpaket PPSiM - Pipeless Plant Simulation - ist eine Modellierungs- und Simulationsumgebung, die auf die spezifischen Charakteristika von Pipeless Plants zugeschnitten ist. PPSiM ermöglicht eine komfortable graphische Modellierung gemäß dem im Standard IEC 61512-1 definierten Modellierungskonzept für Chargenprozesse. Die ereignisdiskrete Simulation berücksichtigt nicht nur die verfahrenstechnischen Prozessschritte, sondern auch auf detaillierter Ebene das Routing der mobilen Behälter. Konfliktfreie Fahrtrouten werden automatisch durch einen Ansatz aus der Graphentheorie berechnet. Die notwendige Zuteilung der Ressourcen bei der Produktionsplanung kann manuell oder automatisch erfolgen. Der simulationsgestützte automatische Zuteilungsalgorithmus berechnet zulässige Apparatekombinationen für die einzuplanenden Prozessschritte und evaluiert die Kombinationen anhand der Ergebnisse der Prozess- und Routingsimulation.

In Zusammenarbeit mit *HENKEL* wurde ein rezepturgesteuerter Chargenprozess mit PPSiM modelliert und simuliert. Das Ziel der Simulationsstudien war ein Vergleich der Wirtschaftlichkeit und der Flexibilität einer existierenden Standard-Mehrproduktanlage mit denkbaren Pipeless Plant-Szenarien. Die Studie zeigt, dass das Pipeless Plant-Konzept im Bereich der betrachteten Chargengrößen zu bis zu 20% kürzeren Produktionszeiten führt, was die Herstellungskosten der Produkte deutlich reduziert. Ergänzend zur Studie wurde eine ausführliche Skalierungs- und Routing-Analyse durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit der in PPSiM integrierten Algorithmen zu untersuchen und Potenziale für Weiterentwicklungen zu identifizieren.

Abstract

In the production of fine chemicals, adhesives, colors, etc. the trend towards small production volumes of application-specific high value products continues, and the time to and in market of these products decrease. Therefore in the production of these chemicals flexibility and cost efficient and timely production are key factors for economic success.

Pipeless plants are an alternative to the traditional recipe-driven multipurpose batch plants. In this production concept, the batches are moved around in mobile vessels between stationary processing stations, where the processing steps are performed. During the plant layout as well as during the operation of pipeless plants a large number of discrete decision variables arise from the increased modularity, motivating the use of appropriate simulation tools.

This work presents the modelling and simulation environment PPSiM - Pipeless Plant Simulation - taking into account the specific characteristics of this plant type. The models can be built entirely in a graphical manner following the guidelines of the standard IEC 61512-1. PPSiM enables the user to specify a detailed representation of the plant layout, and performs a dynamic simulation including the routing of the mobile vessels, and the dynamics of the processing steps. Conflict free paths are generated automatically by a routing approach from graph theory. The resource allocations can be performed manually or automatically by a scheduling algorithm during a simulation run.

In co-operation with *HENKEL*, a recipe-driven batch process was modelled and simulated using PPSiM. The objective was a comparison of the profitability and flexibility between an existing multipurpose plant and different conceivable pipeless plant scenarios. It is shown that the pipeless plant concept leads to up to 20% smaller processing times. In addition a detailed scaling- and routing-analysis was carried out to investigate the capabilities and limits of the algorithms used and to identify potentials for further developments.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Gliederung	3
2	Flexible Batchanlagen	5
2.1	Eigenschaften und Einsatzgebiete	5
2.2	Klassifikation	7
2.2.1	Physische Anlagenstruktur	7
2.2.2	Grad der Flexibilität	9
2.3	Ebenenmodell der Prozessautomatisierung	11
2.4	Führung von Chargenprozessen	12
2.4.1	Modellkonzept der IEC 61512-1	13
3	Pipeless Plants	23
3.1	Eigenschaften	23
3.2	Einsatzbereiche	24
3.3	Konstruktive Aspekte	25
3.3.1	Transportsysteme	25
3.3.2	Reinigungssysteme	26
3.3.3	Kupplungssysteme	27
3.4	Wirtschaftliche Betrachtungen	27
4	Abgrenzung und Zielsetzung	29
4.1	Bisherige Arbeiten	29
4.2	Abgrenzung	30
4.3	Zielsetzung	31

5	Produktionsplanung	33
5.1	Begriffsdefinitionen	33
5.2	Feinplanung	34
5.3	Mathematische Programmierung	37
5.4	Heuristische und stochastische Verfahren	40
5.4.1	Nachbarschaftssuche	40
5.4.2	Simulationsgestützte Verfahren	41
5.4.3	Regelbasierte Verfahren	42
5.4.4	Constraint Programmierung	43
5.4.5	Genetische Algorithmen	44
5.5	Produktionsplanung von Pipeless Plants	46
6	Modellierung und Simulation	51
6.1	Vorgehensmodell	51
6.2	Modellformen und Modellierungstechniken	54
6.2.1	Klassifikation von Modellen	54
6.2.2	Hybride Systeme	56
6.3	Objektorientierte Modellierung	58
6.3.1	Modellierungsstandards und -tools	59
6.3.2	Vergleich OOM und OOSE	61
7	Routing	63
7.1	Routing-Probleme	63
7.2	Modellierung von Routing-Problemen	66
7.2.1	Abstraktion auf einen Graphen	67
7.2.2	Graphentheorie	68
7.2.3	Datenstrukturen für Graphen	69
7.3	Lösungsmethoden von Routing-Problemen	71
7.3.1	Dijkstra-Algorithmus	72
7.3.2	A*-Algorithmus	73
7.3.3	Routing-Algorithmen für AGVs	74
8	PPSiM-Architektur	75
8.1	PPSiM-Modellstruktur	75
8.2	Ablauf einer Simulation	81
8.2.1	Berechnung der maximalen Stoffmenge der Rezepte	81

8.2.2	Berechnung zulässiger Ressourcen	82
8.2.3	Berechnung der besten Ressourcen	83
8.2.4	Berechnung der Wege und Transferdauern der Behälter	85
8.2.5	Einplanung der Ressourcen	86
8.2.6	Fehlerbehandlung	87
8.3	AGV-Routing	87
8.3.1	Softwarearchitektur des Routing-Moduls	91
8.4	Ereignisdiskrete Simulation	93
8.4.1	Modellierung technischer Funktionen	95
8.4.2	Struktur und Algorithmus des Simulators	98
9	PPSiM-Programmpaket	101
9.1	Überblick	101
9.2	Rezepteditor	103
9.3	Anlageneditor	107
9.4	Produktionsplanungeditor	112
9.5	Stoffdateneditor	116
9.6	Simulator	116
9.7	Output-Klienten	118
9.8	Visualisierungstool „SimVis“	123
10	Industrielle Simulationsstudie	125
10.1	Prozessbeschreibung	125
10.2	Modellierung mit PPSiM	127
10.3	Simulationsergebnisse	129
10.4	Fazit der Simulationsstudie	137
10.5	Skalierungs- und Routing-Analyse	140
10.5.1	Skalierung der Anzahl der Chargen	140
10.5.2	Skalierung der Anlagenfläche	142
10.5.3	Minimierung der Freiflächen	142
10.5.4	Skalierung der Anzahl an Chargen und Apparaten	145
10.5.5	Zusammenfassende Bewertung	146
11	Zusammenfassung und Ausblick	147
11.1	Zusammenfassung	147
11.2	Ausblick	148

A Grundlagen von UML	151
B Ablaufschemata der Algorithmen	155
C XML-Dateischnittstellen	159
D Screenshots der Skalierungs- und Routing-Analyse	165
Literaturverzeichnis	169

Abbildungsverzeichnis

2.1	Einstranganlage	8
2.2	Mehrstranganlage	8
2.3	Netzwerk- bzw. Mehrstrang-Mehrweganlage	8
2.4	Komplexität und logistische Probleme von Chargenprozessen	10
2.5	Ebenenmodell der Prozessautomatisierung	11
2.6	Prozessmodell	14
2.7	Physisches Modell	15
2.8	Modell der Prozedursteuerung	16
2.9	Rezepttypen	17
2.10	Rezeptprozedur	18
2.11	Verknüpfung der Modelle der IEC 61512-1	19
2.12	Verschmelzung von Funktionsebenen	20
2.13	Modell der Steuerungsaktivitäten eines Chargenprozesses	21
5.1	Beispiel eines STN (links) und eines RTN (rechts)	39
5.2	Schematischer Ablauf eines Genetischen Algorithmus	45
5.3	Herringbone-Layout mit Pufferzonen (Huang & Chung, 2005)	48
6.1	Vorgehensweise bei der Simulation (VDI, 2003)	53
6.2	Klassifikation von Modellen nach der Art der Zustandsübergänge	54
7.1	Probleme beim AGV-Routing	65
7.2	Abstraktion eines Verkehrsnetzes auf einen Graphen	67
7.3	Datenstrukturen für Graphen	70
7.4	Vergleich der erforschten Suchräume (Dijkstra- und A*-Algorithmus)	74
8.1	Struktur eines PPSiM-Modells	76
8.2	Zuordnung von Grundoperationen zu technischen Funktionen	78
8.3	Schematische Darstellung eines Rezepts	78

8.4	Schematische Darstellung der Struktur des PPSiM-Simulators	82
8.5	UML-Sequenzdiagramm zur Berechnung der besten Ressourcen	84
8.6	Ausblenden von Kanten	89
8.7	Struktur der Routing Algorithmen	92
8.8	Kommunikationsstruktur des Routing-Moduls	94
8.9	Struktur des diskreten Simulators	98
8.10	Beispiel für die Aktivierung der Rezeptschritte	99
9.1	Zusammenspiel der PPSiM-Komponenten	102
9.2	Screenshot des PPSiM-Rezepteditors	103
9.3	Dialogfenster zur Parametrierung von Rezeptschritten	105
9.4	Dialogfenster zur Parametrierung einer Reaktionsgleichung	106
9.5	Dialogfenster zur Parametrierung einer Transition	106
9.6	Screenshot des PPSiM-Anlageneditors	108
9.7	Dialogfenster zur Dimensionierung der Anlagengrundfläche	109
9.8	Dialogfenster zum Editieren der Eigenschaften von Stationen und Behältern	110
9.9	Dialogfenster zum Einfügen und Editieren technischer Funktionen	112
9.10	Screenshot des PPSiM-Produktionsplanungseitors	113
9.11	Dialogfenster zum Editieren von Steuerrezepten	115
9.12	Screenshot des PPSiM-Stoffdateneditors	117
9.13	Screenshot des PPSiM-Simulators	118
9.14	Screenshot eines PPSiM-Gantt-Charts	119
9.15	Tabellarische Ansicht der Belegungen eines Apparats	120
9.16	Übersichtstabelle der Apparatebelegungen	120
9.17	Screenshot der Routing-Animation	121
9.18	Screenshot eines PPSiM-Zustand-Zeit-Diagramms	123
9.19	Screenshot von PPSiM-SimVis	124
10.1	Prozentualer Anteil der Edukte innerhalb der 9 Produktgruppen	127
10.2	Sequenz der Rezeptschritte Lagern, Abfüllen, Reinigen (Ausschnitt)	129
10.3	Anlagenmodell der Grundkonfiguration	130
10.4	Anlagenmodell mit reduzierten Freiflächen	134
10.5	Vergleich der Produktionszeiten	136
10.6	PPSiM-Gantt-Chart der Grundkonfiguration 2 (Szenario #G2)	138
10.7	PPSiM-Gantt-Chart der Referenzanlage (Szenario #R2)	139
10.8	Berechnungsdauer bei Vergrößerung der Anzahl der Chargen	141

10.9 Berechnungsdauer bei Skalierung der Anlagenfläche	143
10.10 Berechnungsdauer, Wege und Kollisionen in normierter Darstellung	145
A.1 Mögliche Sicht auf ein Softwaresystem	153
A.2 Verwendete graphische Elemente der UML-Notation	154
B.1 Ablaufschema des Dijkstra- und des A*-Algorithmus	155
B.2 Ablaufschema des Algorithmus zur Ressourcenzuteilung	156
B.3 Ablaufschema des Routing-Algorithmus	157
B.4 Ablaufschema des Algorithmus zur Kollisionserkennung	158
D.1 Verdopplung der Anzahl an AGVs, Behältern & Stationen (S7)	165
D.2 Skalierung der Anlagenfläche	166
D.3 Simulierte Herringbone-Konfigurationen 1/2	167
D.4 Simulierte Herringbone-Konfigurationen 2/2	168

Tabellenverzeichnis

9.1	Übersicht der Rezeptschritte und ihrer Parameter	105
9.2	Übersicht der Transitionen und ihrer Parameter	107
9.3	Übersicht der Eigenschaften der Apparatetypen	111
9.4	Editierbare Attribute der Elemente eines Masterplans	114
10.1	Zuordnung technischer Funktionen zu Stationen (Grundkonfiguration) . . .	131
10.2	Übersicht der evaluierten Anlagenkonfigurationen	132
10.3	Nutzungs- und Belegungsgrad der Stationen	133
10.4	Vergleich Standard-Mehrproduktanlage mit Pipeless Plant	135
10.5	Berechnungsdauer bei Vergrößerung der Anzahl der Chargen	141
10.6	Berechnungsdauer bei Vergrößerung der Anlagenfläche	142
10.7	Simulationsergebnisse bei Minimierung der Freiflächen	144
10.8	Skalierung der Anzahl an Apparaten und Chargen	146
C.1	Übersicht der in PPSiM verwendeten DTDs	160