

Technische Universität München

Lehrstuhl für Fluidmechanik und Prozessautomation

Softwaretools zur Kapazitätsplanung in lebensmittel- und biotechnologischen Betrieben

Martin Johannes Otto Nagel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. H.-Chr. Langowski
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. A. Delgado
(Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg)
2. Univ.-Prof. Dr. Th. Becker
3. Univ.-Prof. Dr. H. Horn

Die Dissertation wurde am 14.12.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 03.05.2011 angenommen.

Automatisierungstechnik / Prozessinformatik

Martin Nagel

**Softwaretools zur Kapazitätsplanung in
lebensmittel- und biotechnologischen Betrieben**

Shaker Verlag
Aachen 2011

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.

Zagl.: München, Techn. Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0368-0

ISSN 1614-9874

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

Für Eva

Beim Forschen und beim Schreiben einer wissenschaftlichen Arbeit gerät man immer wieder in Sackgassen. Viele haben mir Wege aus den Sackgassen gewiesen - ihnen gilt mein herzlichster Dank: Allen voran mein Doktorvater Professor Antonio Delgado - nach jedem Gespräch konnte ich mich mit mindestens einer neuen Idee wieder auf Fahrt machen. Auf den richtigen Weg der Statistik und Mathematik brachte mich Dr. Hannes Petermeier. Die Stadtbrauerei Spalt und die Brauerei Gutmann haben mir Zugang zu ihren Betrieben und ihren Daten gewährt. Viele Mitarbeiter der Informationstechnologie Weihenstephan und des Lehrstuhls für Strömungsmechanik der Universität Erlangen haben mich in vielfältiger Weise unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Sourcecode-Listings	VI
1 Einführung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Forschung	2
1.3 Zielsetzung	4
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Petrinetze, Referenznetze	5
2.2 Methoden der künstlichen Intelligenz	14
2.3 Heuristische Suchalgorithmen	19
3 Ergebnisse und Diskussion	23
3.1 Hybride Simulation kontinuierlicher und zeitdiskreter Prozesse	23
3.1.1 Überblick	23
3.1.2 Objektbasierte Gestaltung von Referenznetzen	26
3.1.3 Abstraktions- und Steuerungsschicht	32
3.1.4 Parametervektor	34
3.2 Modellierung in der hybriden Simulationsumgebung	36
3.2.1 Virtuelle Versuchsbrauerei als objektbasiertes Referenznetzmodell	36
3.2.2 Integration externer Modelle	46
3.2.3 Realisierung komplexer Simulationsszenarien	50
3.2.4 Wissensextraktion aus gewonnenen Simulationsdaten	53
3.3 Untersuchungen zur Simulationsumgebung	57
3.3.1 Rechengeschwindigkeit und Leistung auf unterschiedlichen Rechnersystemen	57
3.3.2 Wiederholbarkeit und Interaktion zwischen den Modulen der Simulationsumgebung	61

3.3.3	Leistung der heuristischen Suchalgorithmen	65
3.3.4	Optimierungspotentiale	72
3.4	Energieoptimierung einer mittelständischen Brauerei mit Hilfe hybrider Simulation	76
3.4.1	Vorgehensweise und energetische Ausgangssituation	76
3.4.2	Modellierung der Energieverbraucher	82
3.4.3	Berechnung der Optimierungsparameter und Umsetzung im Betrieb	87
4	Zusammenfassende Diskussion und Ausblick	92
4.1	Umsetzung der modularen hybriden Simulation	92
4.2	Einsatzfähigkeit in der Praxis	93
4.3	Weiterführende Einsatzmöglichkeiten und Optimierungen des Simulationskonzepts	95
5	Zusammenfassung	97
	Literatur	98
A	Programmiertechnische Umsetzung	106
A.1	Hybride Simulationsumgebung	106
A.1.1	Überblick	106
A.1.2	Allgemeine Simulationssteuerung, Simulationsdatenerfassung	108
A.1.3	Datenspeicherung	112
A.1.4	Datenbankmodell	114
A.1.5	Beispielhafte Datenbankabfragen	117
A.1.6	Verteiltes Rechnen	121
A.2	Heuristische Suchalgorithmen	123
A.2.1	Genetischer Suchalgorithmus	123
A.2.2	Tabu-Suche	126
A.3	Quellcode und Lizenzierung	128
A.4	Verwendete Software und eingebundene Bibliotheken von Dritten	130
B	Netz-Bibliothek	132
B.1	„Virtuelle Versuchsbrauerei“	132
B.2	Energieoptimierung einer mittelständischen Brauerei	138

Abbildungsverzeichnis

1	Petrinetz als gerichteter Graph	5
2	Nach- und Vorbedingungen eines Ereignisses in Petrinetz-Syntax	6
3	Modulare Modellierung mit Petrinetzen	7
4	Schaltbarkeit von Petrinetzen	8
5	Beispielnetz N. Darstellung von Netzmatrizen.	10
6	Zeitbegriff in Netzen	11
7	Spezielle Kanten. Flexible Kanten, Freigabekanten, Inhibitor-kanten und Testkanten.	12
8	Synchrone Kanäle	12
9	Referenznetze	13
10	Zugehörigkeitsfunktionen zur Fuzzifizierung	15
11	Architektur eines künstlichen neuronalen Netzes (Feed-Forward-Netz)	17
12	Signalverarbeitung in einem Neuron	18
13	Schematischer Überblick der Rechenschritte eines genetischen Algorithmus	21
14	Schematischer Überblick der Iterationschritte einer Tabu-Suche	22
15	Überblick der hybriden Simulationsumgebung	24
16	Netz erzeugetanks, Erzeugung von Netzinstanzen	28
17	Zugriff auf Funktionen von Netzinstanzen, Befüllen und Entleeren eines Tanks	30
18	Zugriff auf Funktionen von Netzinstanzen, Befüllen, Mischen und Entleeren eines Tanks	31
19	Steuer- und Datenbeziehungen der Abstraktions- und Steuerungsschicht	33
20	Oberste Netzebene der „virtuellen Versuchsbrauerei“ - Netz Brauerei	39
21	Ausschnitte der mittleren Netzebene der „virtuellen Versuchsbrauerei“ - Netz Sudhaus	40
22	Teilnetze der dritten Netzebene der „virtuellen Versuchsbrauerei“	41
23	Prozessweiche anhängig von Prozessparametern	43
24	Integration von einfachen Modellen auf Netzebene	43
25	LIFO-Platz, Modellierung in der Referenznetzumgebung	44
26	Integration eines nicht linearen Modells zur Abschätzung der Gärdauer	47
27	Integration eines Fuzzy Sets	49
28	Schema zur Realisierung komplexer Simulationsszenarien	51
29	Belegung der Sudhausgeräte in einem einzelnen Simulationslauf	54

30	Füllstand der Gärtanks während eines einzelnen Simulationslaufs	55
31	Temperaturkurve eines einzelnen Sudes während einer Teilsimulation	56
32	Verteilung der Threads und CPU-Last in einem Dual-Core System	59
33	Vergleich der Rechenzeiten eines Simulationslaufs an unterschiedlichen Teststellungen	60
34	Interaktion zwischen den Modulen der Simulationsumgebung	63
35	Leistung der heuristischen Suchalgorithmen im Verhältnis zum gesamten Ergebnisraum	68
36	Dampfverbrauch im Sudhaus	80
37	Dampfverbrauch in Gärkeller und Füllerei	81
38	Simulierter Dampfverbrauch im Sudhaus über 2 Produktionswochen mit mehrfach auftretenden maximalen Lastspitzen	88
39	Simulierter Dampfverbrauch im Sudhaus über 2 Produktionswochen mit vorgegebenem Produktionsplan.	91
40	Sequenz-Diagramm der Simulationssteuerung.	109
41	Bildschirmfotos der Helferklasse zur Ausgabe des Simulationsstatus	110
42	Entity-Relationship-Modell der Datenbank der Simulationsumgebung	116
43	Arbeitsweise einer Cross-Over-Methode mit Erhalt der absoluten Mengen	124
44	Netz Brauerei	132
45	Netz Sudhaus	133
46	Netz Gaerkeller	134
47	Netz Maischbottich	135
48	Netz Laeuterbottich	135
49	Netz Puffertank	135
50	Netz Sudpfanne	136
51	Netz Whirlpool	136
52	Netz Kuehler	136
53	Netz Flotationstank	136
54	Netz Gaertank	137
55	Netz gutmannsublb	138
56	Netz gutmannsubsp	139
57	Netz gutmannsubmb	140
58	Netz gutmann _main	141

Tabellenverzeichnis

1	Teststellungen für die Ausführung der Simulationsumgebung	58
2	Bei 300 unabhängigen Suchläufen mit der Tabu-Suche gefundene Lösungen	70
3	Bei 300 unabhängigen Suchläufen mit dem genetischen Suchalgorithmus gefundene Lösungen	71
4	Optimierungsfrage zur schnellsten Produktionszeit in der „virtuellen Versuchsbrauerei“	74
5	Optimierungsfrage zur homogensten Temperaturbelastung von Suden einer Sorte in der „virtuellen Versuchsbrauerei“	75
6	Energieverbrauchsverteilung in Prozent in der mittelständischen Brauerei, aufgeschlüsselt nach Bereichen	78
7	Auflistung der Fehler der integrierten externen Modelle zur Abschätzung des Gesamtmodellfehlers	86
8	Übersicht von Art und Umfang der Programmiertätigkeit	106
9	Übersicht der Programmklassen der Simulationssteuerung	111
10	Übersicht der Programmklassen des genetischen Algorithmus	125
11	Übersicht der Programmklassen der Tabu-Suche	127

Listings

- 1 SQL-Abfrage zur Bestimmung der maximalen relativen Simulationszeit in einem Simulationslauf. 117
- 2 SQL-Abfrage zur Bestimmung aller diskreten Simulationszeitpunkte entsprechend aller Schaltzeiten von Transitionen während eines Simulationslaufs. 117
- 3 SQL-Abfrage zur Bestimmung der Simulationszeiten eines Laufes, zu der ein Platz belegt, d.h. ein Zustand erfüllt ist. 118
- 4 SQL-Abfrage zur Abfrage eines über einen Simulationslauf unveränderlichen Wertes, gespeichert in einem Platz, z.B. eine Geräte-Identifikation. 118
- 5 SQL-Abfrage zur Abfrage eines über einen Simulationslauf veränderlichen Wertes, gespeichert in einem Platz, z.B. Füllstand eines Tanks. 119
- 6 SQL-Abfrage mit Hilfe eines regulären Ausdrucks zur Abfrage des Parametervektors. 119
- 7 SQL-Abfrage zum Export der Simulationsdaten eines Simulationslaufs. Referenznetz-Instanz-Nummern werden nicht mit ausgegeben. 119