

Simulation verfahrenstechnischer Prozesse*

M. Zeitz

Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, D-70550 Stuttgart, Germany
email: zeitz@isr.uni-stuttgart.de, fax: ++49-711-685-6371

Abstract

Zeitz, M.: Simulation of Chemical Engineering Processes. In chemical engineering, mathematical process modeling, dynamical simulation, nonlinear analysis, and advanced process control design are issues of growing importance. As a software tool addressing these issues, the modeling and simulation environment PROMOT/DIVA is introduced. This environment comprises tools for process modeling, model preprocessing, and code generation. Advanced algorithms for numerical simulation, parameter continuation, and dynamical optimization can be applied to the coded differential algebraic equations of the considered process model. As an application of the simulation environment DiVA, the design and implementation of slate estimation are presented. Moreover, the simulation methods and tools for chemical processes are showing much parallelism to those for ventilation networks of coal mines which are studied at Technical University of Donetsk.

1 Einführung

Das Gebiet der Simulation technischer Prozesse bildet den Ausgangspunkt und zugleich auch den Schwerpunkt der über 25-jährigen Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik (ISR) der Universität Stuttgart und der Fakultät für Rechen- und Technische Informatik (FRTI) der Technischen Universität Donezk. Dabei konzentrieren sich die simulationstechnischen Anwendungen in Donezk auf gasdynamische Prozesse in Grubenbewetterungsnetzen zur Projektierung von den automatisierungs- und sicherheitstechnischen Einrichtungen. In Stuttgart werden vorwiegend Prozesse der Verfahrenstechnik, wie zum Beispiel chemische Reaktoren und Destillationskolonnen, mit Hilfe der Simulation und im Experiment untersucht, um u.a. deren Dynamik zu analysieren oder eine Prozessführung zu entwerfen.

Sowohl in Donezk als auch in Stuttgart werden als Simulationsmodelle dynamische Systeme mit konzentrierten und mit verteilten Parametern verwendet, die durch gewöhnliche und partielle Differentialgleichungen (Dgl.) beschrieben werden [1, 2]. Auch bei den eingesetzten Simulationswerkzeugen gibt es viele Parallelen. Zu Beginn der Kooperation wurden Analog-AFybridrechner zur Simulation benutzt, um Gasnetze zur Bewetterung von Kohlegruben [3] oder chemische Rohrreaktoren [4] zu untersuchen. Danach wurde die analog/hybride Simulation durch die verschiedenen Generationen der digitalen Simulationswerkzeuge abgelöst [5]. Auch bei der digitalen Simulation gibt es an der FRTI und am ISR eine parallele Entwicklung. Beim Einsatz von FORTRAN-Simulationsprogrammen hat man in Stuttgart und in Donezk festgestellt.

*Vortrag auf dem Internationalen Seminar *Probleme der Simulation und rechnergestützten Projektierung von sicherheitskritischen dynamischen Systemen*, TU Donezk, Ukraine, 4.-6. Sept. 2000.

dass komplexe Simulationsaufgaben nur mit modular aufgebauten Werkzeugen effizient bearbeitet werden können. In Stuttgart wurden verschiedene FORTRAN-Programme in der Simulationsumgebung DIVA zur dynamischen Simulation verfahrenstechnischer Anlagen integriert [6,7]. In Donezk wurde die massiv parallele Simulationsumgebung MPSU entwickelt, wobei die für die Analog-fflybridrechenstechnik typische parallele Simulation mit SMD- und MBVID-Rechnern realisiert wird [8-17].

Ein sowohl in Stuttgart als auch in Donezk im Rahmen der Lehre und Forschung eingesetztes Simulationswerkzeug ist das 1983/84 am ISR entwickelte Simulationssystem ISRSM [18,19]. ISRSM ist ein interaktives und blockorientiertes Werkzeug für die numerische Simulation von dynamischen Systemen mit konzentrierten Parametern. Dies bedeutet, dass das Simulationsproblem wie beim Analog-/Hybridrechner in Form eines Rechenplans programmiert wird. Die Eingabe des Rechenplans erfolgt über eine grafische Oberfläche. ISRSM ist als Interpretierprogramm in FORTRAN implementiert und stand anfangs auf Prozessrechnern und dann auch auf PCs zur Verfügung.

Die folgenden Ausführungen zur Simulation verfahrenstechnischer Prozesse beschränken sich auf die Mitwirkung des Autors bei der Entwicklung und Anwendung der Modellierungs- und Simulationsumgebung PROMoT/DIVA Rahmen verschiedener Dissertationen und Forschungsprojekte auf den Gebieten der Simulation [20-25] und der Zustandsschätzung [26-31]. Im einzelnen werden die Architektur von PROMoT/DIVA, die rechnergestützte Modellierung verfahrenstechnischer Prozesse, die symbolische Ortsdiskretisierung von partiellen Dgln. sowie die Zustandsschätzung als Beispiel für die Anwendung von DIVA behandelt.

2 Modellierungs- und Simulationsumgebung PROMOT/DIVA

Bei der Bearbeitung von komplexen Simulationsaufgaben spielt die Unterstützung des Benutzers bei den verschiedenen Lösungsetappen eine wichtige Rolle. Deshalb sollten neben der Simulation auch das Aufstellen, die Vorverarbeitung und die Codierung von Simulationsmodellen mit entsprechenden Werkzeugen unterstützt werden. Hierzu wurden für die Simulationsumgebung DIVA das Modellierungswerkzeug PROMoT (Process Modelling Tool) [24], das Vorverarbeitungswerkzeug SYPPROT (Symbolic Preprocessing Tool) [25], ein Code-Generator [23] sowie eine fließbildorientierte grafische Benutzeroberfläche [21] entwickelt. Mit diesen Werkzeugen wird der Modellierer beim Aufstellen, der Umformung, Codierung und Parametrierung von Simulationsmodellen unterstützt. Denn erst wenn die zeitaufwendige und fehleranfällige Herleitung und Codierung der Simulationsmodelle vollzogen ist, können die in modernen Simulationswerkzeugen verfügbaren leistungsfähigen Algorithmen zur dynamischen Simulation oder Optimierung auch effizient angewendet werden.

Nach Abbildung 1 sind die hierfür entwickelten Werkzeuge die wesentlichen Moduln der Modellierungs- und Simulationsumgebung PROMoT/DIVA. Die Architektur von PROMoT/DIVA umfasst die vier Ebenen: Modellierung, Vorverarbeitung und Codierung sowie die numerische Simulation [6, 7].

Das in LISP implementierte Modellierungswerkzeug PROMoT enthält die Module grafischer Modelleditor, Texteditor und Wissensbasis zur Spezifikation und Aggregation von Apparatemodellen aus in der Wissensbasis abgelegten Modellbausteinen. Dies geschieht entweder - wie in Abbildung 1 rechts oben dargestellt - grafisch oder mit einem Texteditor.

Die Werkzeuge der Vorverarbeitung und Codierung sollen die Modellgleichungen in die in Abbildung 1 angegebene linear-implizite Form von Differential-Algebra-Gleichungen (DA-Gln.) transformieren und die Matrix B und den Vektor f automatisch in entsprechenden FORTRAN-Unterprogrammen codieren. Diese Werkzeuge sind in der Symbolsprache MATHEMATICA

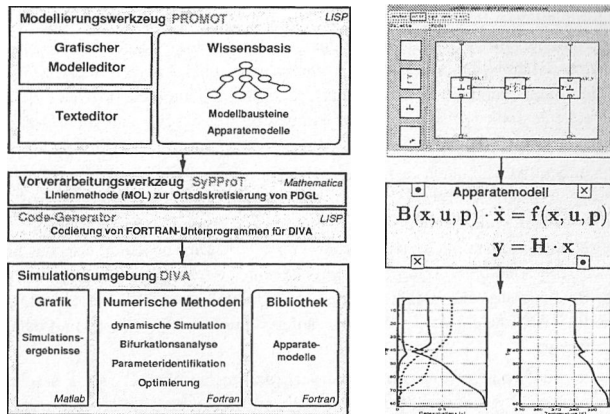


Abbildung 1: Architektur der Modellierungs- und Simulationsumgebung PRoMoT/DIVA

bzw. in der KI-Sprache LISP implementiert.

Die in FORTRAN implementierte Simulationsumgebung DIVA stellt dem Benutzer numerische Algorithmen zur dynamischen Simulation, Bifurkationsanalyse, Identifikation und Optimierung zur Verfügung, um die in der Bibliothek verfügbaren und parametrisierten Modelle zu untersuchen. Wegen der Vielfalt der Simulationsergebnisse spielt deren Visualisierung eine wichtige Rolle. In DIVA gibt es dazu eine Schnittstelle zur Visualisierungsgrafik von MATLAB.

3 Modellierungswerkzeug PRoMoT

Der Konzeption des Modellierungswerkzeugs PRoMoT liegt eine Modellierungssystematik zugrunde, die die methodische Vorgehensweise bei der mathematischen Modellierung für verfahrenstechnische Prozesse beschreibt [20, 24]. Die grundlegende Idee des Modellierungskonzepts ist in Abbildung 2 für die Modellierung eines Destillationsprozesses auf der Anlagen- und auf der Apparate-Ebene grafisch dargestellt. Auf beiden Ebenen beinhaltet die Systematik eine Unterteilung in strukturelle, in verhaltensbeschreibende und in stoffbeschreibende Modellierungsschritte. Damit ist die Systematik an dem Vorgehen vieler erfahrener Modellierer orientiert, indem der zu modellierende Prozess zunächst in einzelne Teilsysteme zerlegt wird und anschließend die Teilsysteme mit Hilfe von mathematischen Modellen beschrieben werden.

Bei der strukturellen Modellierung mit Hilfe von PRoMoT wird das Apparatemodell durch die Definition von Teilmodellen aus einzelnen Modulen zusammengesetzt. Dabei werden den definierten Teilmodellen Anschlüsse zugeordnet, über die sie paarweise verschaltet werden. Das Gesamtmodell eines Apparats entsteht durch die Aggregation und Verkopplung von Modulen. Auf diese Weise wird durch die strukturelle Modellierung die Topologie des Prozesses festgelegt.

Im zweiten Modellierungsschritt werden dem strukturellen Modell verhaltensbeschreibende Modellbausteine zugewiesen. Diese Modellbausteine repräsentieren einerseits Prozessgrößen, die den Modulen und deren Anschlüssen zugeordnet werden. Andererseits beschreiben die verhaltensbeschreibenden Modellbausteine das dynamische Verhalten eines strukturellen Modellbausteins mit Hilfe von differential-algebraischen Gleichungen.

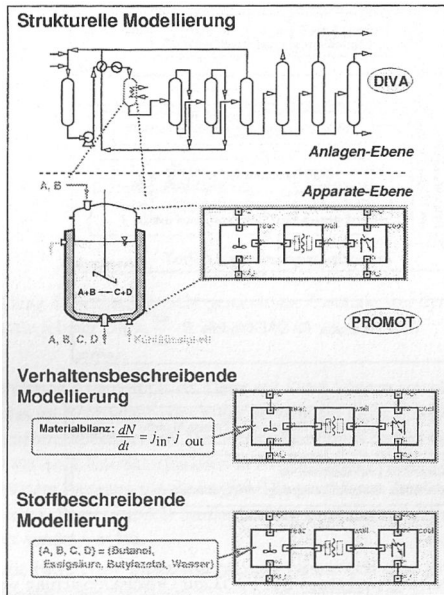


Abbildung 2: Modellierungssystematik für verfahrenstechnische Prozesse mit den strukturellen, verhaltens- und stoffbeschreibenden Modellierungsschritten auf der Anlagen- und der Apparate-Ebene.

Ein Charakteristikum verfahrenstechnisch-chemischer Prozesse ist, dass viele Modellparameter stoffabhängig sind. Deshalb werden im dritten Modellierungsschritt die in dem Prozess auftretenden Stoffe angegeben, um die benötigten Stoffdaten aus Datenbanken zu laden.

Die durch die Modellierungssystematik beschriebene Modellierung weist wesentliche Merkmale der objektorientierten Modellierung auf. Deshalb bietet es sich an, die Modellbausteine und deren Aggregations- und Koppelbeziehungen in einer objektorientierten Spezialisierungs- und Aggregationshierarchie von Modellbausteinen zu beschreiben. Dieses auf W.Marquardt zurückgehende Modellierungskonzept [20] wurde in der Dissertation von F.Tränkle [24] weiterentwickelt und in dem Modellierungswerkzeug PROMOT mit der KI-Sprache LISP und der damit entwickelten Modelldefinitionssprache MDL (Model Definition Language) implementiert.

4 Symbolische Vorverarbeitung von Apparatemodellen

Die rechnergestützte Modellierung liefert ein symbolisches Apparatmodell in Form von gewöhnlichen Dgln., algebraischen Gln. und partiellen Dgln. In Abhängigkeit von der verwendeten Numerik müssen die Modellgleichungen auf eine Standardform gebracht werden. Für DIVA ist dies die linear-implizite DA-Form in Abbildung 1.

Im Fall von Apparaten mit verteilten Parametern wie z.B. Rohrreaktoren bedeutet dies, dass die partiellen Dgln. und Randbedingungen in einem Vorverarbeitungsschritt auf gewöhnliche Dgln. und algebraische Gln. abgebildet werden müssen. Hierzu wird von R.Köhler im Rahmen seiner Dissertation das Vorverarbeitungswerkzeug SYPPRoT entwickelt und mit der Symbolsprache MATHEMATICA implementiert. Zur Approximation der partiellen Dgln. und Randbedingungen dient die Linienmethode, wobei der Ortsbereich durch eine Gitterfunktion unterteilt

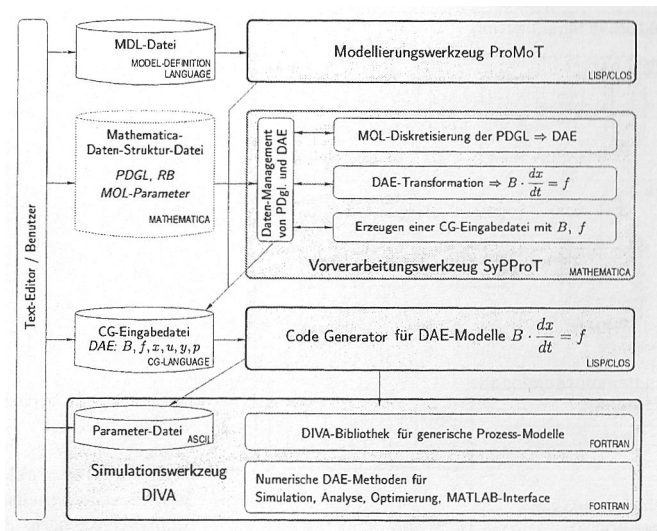


Abbildung 3: Architektur des Vorverarbeitungswerkzeugs SYPPROT zur Ortsdiskretisierung von partiellen Dgl'n.

wird [22, 25]. Dabei wird zwischen äquidistanten und nicht-äquidistanten sowie zwischen festen und mitbewegten Gitterpunkten unterschieden. Außerdem stehen in SYPPROT verschiedene Diskretisierungsverfahren, u.a. das Finite-Differenzen- und das Finite-Volumen-Verfahren, für die Approximation der Ortsableitungen zur Verfügung.

In Abbildung 3 sind die Architektur und Anordnung des Vorverarbeitungswerkzeugs SYPPROT zwischen dem Modellierungswerkzeug ProMoT und der Simulationsumgebung DIVA dargestellt. Die Anwendung der Linienmethode verlangt, dass in der MATHEMATICA-Eingabedatei neben den Modellgleichungen auch die Diskretisierungsparameter spezifiziert werden. Das Vorverarbeitungswerkzeug umfasst vier Moduln zum Einlesen der Daten, zur Ortsdiskretisierung, zur Transformation auf die linear-implizite DA-Form (Abbildung 1) und zur Erzeugung der Eingabe-Datei für den Code-Generator.

Da das Vorverarbeitungswerkzeug in MATHEMATICA implementiert ist, können damit auch noch weitere Rechenoperationen auf die in symbolischer Form vorliegenden Modellgleichungen angewendet werden.

5 Schätzung nicht gemessener Zustände mit DiVA

Die Simulationsumgebung DIVA bietet aufgrund der modularen Architektur auch die Möglichkeit, die codierten Simulationsmodelle nicht nur numerisch zu lösen, sondern auch für eine dynamische Analyse oder den Entwurf einer Prozessführung zu verwenden. Dies erspart insbesondere bei komplexen Prozessen viel Zeit für eine mehrfache Codierung der Modellgleichungen.

Eine besonders interessante Möglichkeit bietet DiVA für den Entwurf und die Anwendung von Verfahren zur Schätzung nicht gemessener Zustände von dynamischen Systemen, wie dies

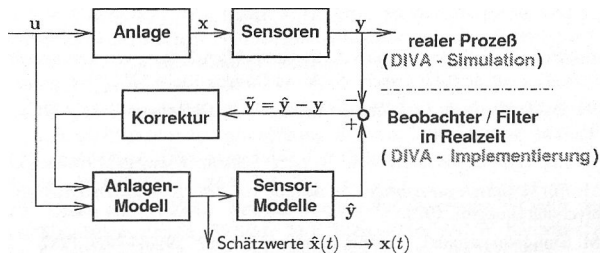


Abbildung 4: Schätzung nicht gemessener Zustände von dynamischen Systemen mit der Simulationsumgebung DIVA.

in Abbildung 4 dargestellt ist. Denn mit DIVA können sowohl der zu untersuchende Prozess als auch das im Beobachter oder Filter verwendete Prozessmodell in einfacher Weise nachgebildet bzw. implementiert werden. Der Schätzalgorithmus enthält bekanntermaßen zusätzlich noch eine zu entwerfende Korrekturfunktion in Abhängigkeit von der Differenz zwischen gemessenem und geschätztem Ausgang $y(t)$ bzw. $y_f(t)$. Die geschätzten Zustände $x(t)$ können aus dem in Realzeit simulierten Prozessmodell im Beobachter entnommen und anstelle der tatsächlichen Zustände $x(t)$ verwendet werden.

Mit Hilfe einer Zustandsschätzung lassen sich eine ganze Reihe von wichtigen Prozessführungsaufgaben realisieren [27]. Mit dem geschätzten Zustand $x_f(t)$ kann eine Prozessüberwachung durchgeführt werden, indem die Differenz $y_f(t) - y(t)$ dazu verwendet wird, einen Fehler in der Anlage oder in den Sensoren zu erkennen. Schließlich lässt sich eine Regelung mit der Rückführung von dem geschätzten $x(t)$ anstelle des tatsächlichen $x(t)$ realisieren. In jedem Fall ist vorauszusetzen, dass das Prozessmodell hinreichend genau ist, die Korrektur geeignet entworfen ist und die Realisierung der Zustandsschätzung in Realzeit funktioniert. Im ISR gibt es umfangreiche und recht positive Erfahrungen mit der Zustandsschätzung bei Destillationskolonnen, Adsorptions- und Reaktionsprozessen, siehe z.B. in [31] für die Anwendung auf einen periodisch betriebenen Druckwechsel-Adsorptions-Prozess. Dies liegt auch darin begründet, dass mit DiVA die komplexen Prozessmodelle in dem Schätzalgorithmus problemlos realisiert werden können.

Danksagung: Aus der nachfolgenden Literaturliste wird deutlich, dass an den Untersuchungen im ISR zur Simulation und Zustandsschätzung verfahrenstechnischer Prozesse viele Mitarbeiter und Kollegen beteiligt waren, was hiermit dankend anerkannt wird. Auch die langjährige erfolgreiche Zusammenarbeit mit der FRTI wäre ohne das vielfältige Engagement und die große Freundschaft der ebenfalls in der Literaturliste genannten Fachkollegen aus Donezk nicht möglich gewesen. Deshalb fühlt sich der Autor für die Auszeichnung mit der Ehrendoktorwürde durch die TU Donezk gegenüber allen Kollegen und Mitarbeitern in Stuttgart und in Donezk zu einem besonderen Dank verpflichtet. Schließlich wird die Förderang der Untersuchungen durch die DFG, die Stiftung Volkswagenwerk, den DAAD und die Robert Bosch Stiftung dankend erwähnt.

Literatur

- [1] Abramow, F₁ A., L. P. Feldman, and V.A. Svjatnyj. *Modellierung von dynamischen Prozessen der Gasdynamik in Kohlegruben*. Naukowa Dumka, Kiew, 1981 (in Russisch).
- [2] Gilles, E. D. *Systeme mit verteilten Parametern*. R. Oldenburg Verlag, München-Wien, 1981.
- [3] Svjatnyj, V.A. *Hybride Rechensysteme*. WiLscha Schkola, Kiew, 1981 (in Russisch).
- [4] Zeitz, M. *Ein Verfahren zur hybriden Simulation von örtlich verteilten Systemen*. Dissertation Universität Stuttgart, 1973.
- [5] Zeitz, M. Simulationstechnik. *Chemie-Ingenieur-Technik*, 59:464^169, 1987.
- [6] Mohl, K. D., A. Spieker, R. Köhler, E. D, Gilles, and M. Zeitz. DFVA - A simulation environment for chemical engineering applications. In *Informatics. Cybernetics and Computer Science(ICCS-97), Collected Volume ofScientific Papers*, 8-15.
- [7] Köhler, R., K.D. Mohl, H. Schramm, M. Zeitz, A. Kienle, M. Mangold, E.Stein, and E.D. Gilles. Method of lines within the simulation environment DrVA for chemical processes. In W. Schiesser, A. Vande Wouwer, and P. Saucez (Edits.): *Adaptive Method ofLines*. CRC Press, Boca RatonAJSa, 2001.
- [8] Svjatnyj, V.A., M. Zeitz, and A. Anoprienko. Realisierung eines Simulationssystems für dynamische Prozesse mit Parallelechneem und mit einem grafischen Interface (in Russisch). 1991, 85-94.
- [9] Anoprienko, A., V.S. Svjatnyj, T. Bräunl, A. Reuter, and M. Zeitz. Massiv Parallele Simulationsumgebung für dynamische Systeme mit konzentrierten und verteilten Parametern. In G. Kampe and M. Zeitz, (Hrsg.), *Simulationstechnik - Tagungsband, 9. ASIM-Symposium in Stuttgart*, Vieweg Verlag, BraunschweigAViesbaden, 1994 , 515-518.
- [10] Anoprienko, A., L. Feldmann, V. Lapko, V.S. Svjatnyj, T. Bräunl, A. Reuter, and M. Zeitz. Massive parallel models of net dynamic objects. In F. Breitenecker and F. Husinsky (Edts.): *Proceedings ofthe EUROSIM Conference in Vienna/Austria 1995*, Elsevier, 1995, 237-242.
- LI IJ Svjatnyj, V., V. Rasinkov, T. Bräunl, A. Reuter, and M. Zeitz. Problemorientierte massiv parallele Simulationsumgebung für dynamische Netzobjekte. In W. Kmg (Hrsg.): *Simulationstechnik - Tagungsband, 10. ASIM-Symposium in Dresden*, Vieweg Verlag, BraunschweigAViesbaden, 1996,515-518.
- [12] Feldmann, L., V. Lapko, V. Svjatnyj, I. Tmb, T. Bräunl, A. Reuter, and M. Zeitz. Algorithmen einer massiv parallelen Simulationsumgebung für dynamische Systeme mit verteilten Parametern. In W. Krug (Hrsg.): *Simulationstechnik - Tagungsband, 10. ASIM-Symposium in Dresden*, Vieweg Verlag, BraunschweigAViesbaden, 1996, 519-524.
- [13] Feldmann, L., V.A. Svjatnyj, T. Bräunl, A. Reuter, and M. Zeitz. Implementiemng und Effizienzanalyse von parallelen Simulationsverfahren für dynamische Systeme mit verteilten Parametern. In A. Kuhn and S. Wenzel (Hrsg.): *Simulationstechnik - Tagungsband, II. ASIM-Symposium in Dortmund*, Vieweg Verlag, BraunschweigAViesbaden, 1997, 38^7.
- [14] Svjatnyj, V., L. Feldmann, V. Lapko, A. Anoprienko, A. Reuter, T. Bräunl, and M. Zeitz. Massive parallel simulation of dynamic systems. In *Proceedings International Conference ComputerSystemsandNetworks, Rzeszow/Polen 1997, ZesztyNankowe-BandNr. 1/1997*, Hochschule für Informatik, 1997,207-216.
- [15] Feldmann, L., V.A. Svjatnyj, E.D. Gilles, M. Zeitz, A. Reuter, and K. Rothermel. Parallele Simualionsalgorithmen für dynamische Systeme. In G. Hohmann (Hrsg.): *Tagungsband 13. ASIM-Symposium Simulationstechnik in Weimar 1999*, SCS-Europe BVBA, Ghentffielgium, 1999,313-318.

- [16] Feldmann, L.P., V.A. Svjatnyj, V.V. Lapko, E. D. Gilles, M. Zeitz, A. Reuter, and K. Rothermel. Parallele Simulationstechnik. In *Problems of Simulation and Computer-Aided Design of Dynamic Systems, Collected Volume of Scientific Papers*. Donetsk State Technical University, Donetsk, Ukraine, 1999, 9-19.
- [17] Svjatnyj, V.A., E.D. Gilles, M. Zeitz, A. Reuter, and K. Rothermel. Simulationssoftware für eine verteilte parallele Simulationsumgebung für dynamische Systeme. In D.P.F. Möller (Hrsg.): *Tagungsband 14. ASIM-Symposium Simulationstechnik in Hamburg 2000*, SCS-Europe BVBA, Ghent/Belgium, 2000, 235-240.
- [18] Juen, G., V. Maass, and M. Zeitz. Simulation eines Radioteleskops mit Hilfe der blockorientierten Simulationsprache ISRSM. In F. Breitenecker and W. Kleinert (Hrsg.): *2. Symposium Simulationstechnik 1984*, Springer-Verlag, Berlin 1984, 636-640.
- [19] Krämer, R., W. Pauschinger, R. Rothfuß, and M. Zeitz. Bedienungsanleitung ISRSdV1 - Simulationssystem für dynamische Systeme mit graphischer Oberfläche. (Russische Übersetzung: Rechenzentrum des Ministeriums für Volksausbildung Minsk/AJDSRS, 1991), ISR Universität Stuttgart, 1990.
- [20] Marquardt, W. and M. Zeitz. Rechnergestützte Modellbildung in der Verfahrenstechnik. In I. Troch (Hrsg.): *Modellbildung für Regelung und Simulation. Methoden - Werkzeuge - Fallstudien. VDWDE-GMA-Aussprachetag, 25/16. März 1992 Langen. VDI-Berichte 925*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992, 307-341.
- [21] Bär, M. *Wissensbasierte und fließbildorientierte Bedienung eines verfahrenstechnischen Simulators*. Dissertation Universität Stuttgart, Düsseldorf, 1994.
- [22] VandeWouwer, A. *Simulation, Parameter and State Estimation Techniques for Distributed Parameter Systems with Real-Time Application to a Multizone Furnace*. European Doctorat Facult Polytechnique de Mons/Belgien, 1994.
- [23] Räumschüssel, S. *Rechnerunterstützte Vorverarbeitung und Codierung verfahrenstechnischer Modelle für die Simulationsumgebung DIVA*. Dissertation Universität Stuttgart. VDI Fortschritt-Berichte Nr. 20/270, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
- [24] Tränkle F. *Rechnergestützte Modellierung verfahrenstechnischer Prozesse für die Simulationsumgebung DTVA*. Dissertation Universität Stuttgart. VDI Fortschritt-Berichte Nr. 20/309, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000.
- [25] Köhler, R., A. Gerslauer, and M. Zeitz. Symbolic preprocessing for simulation of PDE models of chemical processes, special issue *Method of Lines in Journal of Math, and Comp. in Sim.*, 2000 (accepted).
- [26] Zeitz, M. *Nichtlineare Beobachter für chemische Reaktoren*. Fortschritt-Berichte Nr. 8/27, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1977.
- [27] Juen, G. and M. Zeitz. Beobachter im praktischen Einsatz. In M. Syrbe and M. Thoma (Hrsg.): *Fortschritte durch digitale Meß- und Automatisierungstechnik. Interkama-Kongreß 1983*. Springer-Verlag, Berlin 1983, 240-259.
- [28] Birk J. *Rechnergestützte Analyse und Lösung nichtlinearer Beobachtungsaufgaben*. Dissertation Universität Stuttgart. Fortschritt-Berichte Nr. 8/294, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [29] Schaffner J. *Zum Beobachterentwurf für nichtlineare Systeme mit mehreren Meßgrößen*. Dissertation Universität Stuttgart. Fortschritt-Berichte Nr. 8/620, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997.
- [30] Rothfuß R. *Anwendung der flachheitsbasierten Analyse und Regelung nichtlinearer Mehrgrößensysteme*. Dissertation Universität Stuttgart. Fortschritt-Berichte Nr. 8/664, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997.
- [131] Bitzer, M., A. Fehn, and M. Zeitz. State profile estimation for a nonisothermal adsorption process by a nonlinear distributed parameter observer. In *Keynote Paper IFAC Symposium ADCHEM 2000 - International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes*, Pisa/Italy, 2000, 287-292.