

Dynamische Simulation verfahrenstechnischer Prozesse und Anlagen –Ein Vergleich von Werkzeugen–

R. v. Watzdorf¹, F. Allgöwer², A. Helget², W. Marquardt¹, E. D. Gilles²

1 Einleitung

Die dynamische Simulation stellt ein immer wichtiger werdendes Werkzeug bei der Analyse und Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse und Anlagen dar und wird in der chemischen Industrie routinemäßig angewandt. Haupteinsatzgebiete sind u.a. die Analyse des transienten Verhaltens von Anlagen (Lastwechsel, An- und Abfahren, Betriebsstörungen), der Entwurf von Regelungssystemen, sowie die Auslegung inhärent dynamischer Prozesse (z.B. Batch-Prozesse, Druckwechseladsorption). Gegenüber der rein stationären Berechnung chemischer Prozesse zeichnet sich die dynamische Simulation durch eine sehr große Breite der Aufgabenstellungen aus: von der reinen Auslegungsrechnung über die regelungstechnische Analyse und Synthese bis hin zur Bearbeitung von Echtzeitfragestellungen. Dementsprechend wird eine Vielfalt von Simulationswerkzeugen angeboten. In dieser Arbeit sollen vier unterschiedliche Simulationswerkzeuge zunächst vorgestellt und anschließend auf ihre Eignung hinsichtlich der dynamischen Simulation von verfahrenstechnischen Prozessen untersucht werden. Der Vergleich erfolgt konkret anhand eines typischen verfahrenstechnischen Prozesses, nämlich der Destillation, welcher wichtige und typische Eigenschaften, wie hohe Systemordnung, differential-algebraische Formulierung, Sparsity, Steifheit und starke Nichtlinearität zeigt. Zwei der Werkzeuge (ACSL Level 10F (β), von Mitchell & Gauthier Associates, Inc., Concord, MA [9] und SIMULINK 1.2d, von The Mathworks, Inc., Natick, MA [8]) dienen der Beschreibung und Simulation allgemeiner dynamischer Systeme, während die Programme DIVA 3.2² [1, 4] und SPEEDUP 5.4, von Aspen Technology, Cambridge, MA [2] speziell für die Simulation verfahrenstechnischer Prozesse entwickelt wurden. Bei SIMULINK, SPEEDUP, und ACSL handelt es sich um kommerzielle Systeme, während DIVA bisher ausschließlich im universitären Bereich, sowie in einzelnen Industriekooperationen eingesetzt wird.

In der vorliegenden Arbeit werden die wichtigsten Unterschiede zwischen den einzelnen Werkzeugen im Hinblick auf die Simulation verfahrenstechnischer Prozesse und Anlagen herausgearbeitet. Diese Beurteilung kann und soll keine "Kaufhilfe" sein, da eine solche Entscheidung weitere wichtige Aspekte, wie z.B. die Qualität der Handbücher oder den angebotenen Support umfassen muß.

2 Die Simulationswerkzeuge

SIMULINK ist eine Erweiterung von MATLAB zur Simulation und Analyse von dynamischen Systemen. Im Gegensatz zu ACSL und SPEEDUP arbeitet SIMULINK blockorientiert, wobei Blöcke entweder einer Standard Blockbibliothek entnommen werden können, oder vom Anwender selbst erzeugt und zu einer eigenen Blockbibliothek zusammengestellt werden können. Unseres Wissens nach existieren keine kommerziell vertriebenen Modellbibliotheken für verfahrenstechnische Prozesse. Für diese Untersuchung wurde die in [6] beschriebene "Process Model Toolbox" verwendet, die 13 unterschiedliche verfahrenstechnische Modelle für SIMULINK enthält. Blöcke können in SIMULINK auf zwei Arten erzeugt werden. Die komfortabelste Möglichkeit ist durch Verwendung des Block-Diagramm-Editors in Verbindung mit Blöcken aus der Standard Blockbibliothek gegeben. Als Alternative können sogenannte S-Functions erzeugt werden, die als m-files oder mex-files realisiert sein können. M-files sind in der MATLAB-Sprache geschrieben und werden bei jedem Aufruf interpretiert, wohingegen mex-files in C oder FORTRAN geschrieben werden und vor dem Simulationslauf kompiliert werden müssen. Diskontinuitäten des Modells können in SIMULINK nicht einfach beschrieben werden. Die Verschaltung einzelner Blöcke (z.B. Prozesse) zu größeren Einheiten (z.B. Anlagen) ist mit Hilfe der graphischen Oberfläche von SIMULINK sehr einfach und komfortabel möglich. Die Generierung

¹Lehrstuhl für Prozeßtechnik, RWTH Aachen, Turmstraße 46, 52064 Aachen

²Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik, Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart

von allgemeinen Blöcken (z.B. einer Destillationskolonne mit variabler Bodenzahl und variabler Anzahl von Gemischkomponenten) ist einfach möglich. Das Einbinden benutzereigener FORTRAN- oder C-Routinen, zum Beispiel zur Berechnung von Stoffdatenbeziehungen oder zur Übernahme bereits validierter Modellteile, ist in SIMULINK mittels der dynamischen Linkfunktion von MATLAB möglich. Die eigentliche Simulation kann entweder befehlsorientiert auf MATLAB-Ebene, oder als interaktive Simulation menüorientiert in Dialogboxen in der SIMULINK-Graphikumgebung erfolgen. Zur Visualisierung der Simulationsergebnisse steht die leistungsfähige objektorientierte 2-D und 3-D Graphikarchitektur von MATLAB zur Verfügung. In SIMULINK stehen desweiteren eine Vielzahl von Analysefunktionen zur Verfügung, wie z.B. eine Linearisierungsfunktion oder die automatische Bestimmung stationärer Betriebspunkte. Da SIMULINK eine Erweiterung von MATLAB darstellt, können die numerischen Rechenmöglichkeiten von MATLAB bzw. von MATLAB-Toolboxen (z.B. für den Reglerentwurf oder zur Optimierung) in idealer Weise genutzt werden. Durch die offene Architektur von MATLAB ist ein einfacher Datenimport und -export gewährleistet. Für SIMULINK wird eine Echtzeiterweiterung angeboten, die zum Beispiel eine Ankopplung an reale Prozesse gestattet [3].

ACSL (Advanced Continuous Simulation Language) ist eine auf der Basis von FORTRAN konzipierte, gleichungsorientierte Simulationssprache. Eine ACSL Simulation besteht aus zwei Schritten: der Modelldefinition in der ACSL Sprache und dem eigentlichen Simulationsexperiment. Die Modelldefinition kann auch block-orientiert mit Hilfe des ACSL/Graphic Modellers erfolgen. Besonders erwähnenswert ist das komfortable event-handling System von ACSL. Zur Durchführung des Simulationsexperimentes wird aus dem ACSL-Code ein ausführbares FORTRAN-Programm erzeugt. Die eigentliche Simulation kann befehlsorientiert oder menügesteuert über Dialogboxen erfolgen. Die graphische Ausgabe erfolgt über bereitgestellte Plotfunktionen. Eine Möglichkeit zur on-line Visualisierung von laufenden Simulationen ist gegeben. Das Einbinden benutzereigener FORTRAN-Routinen ist möglich. Eine Vielzahl komfortabler Analysefunktionen (z.B. automatische Bestimmung stationärer Betriebspunkte und Linearisierung) stehen zur Verfügung. Eine Schnittstelle zu MATLAB wird angeboten. Die Möglichkeit zur Echtzeitsimulation ist durch die ACSL-Version ACSLrt gegeben.

SIMULINK 1.2d und ACSL Level 10D sind speziell für die Integration von Systemen von gewöhnlichen Differentialgleichungen und nicht von differential-algebraischen Anfangswertproblemen ausgelegt. Mit ACSL Level 10F, das gegenwärtig als β -release vorliegt, und der angekündigten ACSL Version Level 11 können dagegen Differential-Algebra (DA)-Systeme simuliert werden. In diesem Aufsatz beziehen wir uns auf unsere Erfahrungen mit ACSL Level 10F, in dem der DASSL-Code zur Lösung von hinreichend glatten semi-expliziten DA-Systemen zur Verfügung steht. An Integrationsroutinen für reine Differential-Systeme stehen acht Verfahren, einschließlich dem Gear Verfahren, zur Verfügung. Da in SIMULINK keine expliziten DA-Löser zur Verfügung stehen, können die algebraischen Gleichungen nur unterlagert, mit vom Benutzer selbst zur Verfügung gestellten Algorithmen, gelöst werden. In SIMULINK werden standardmäßig sieben Integrationsalgorithmen für reine Differential-Systeme bereitgestellt. In ACSL Level 10F und SIMULINK 1.2d werden keine speziellen Algorithmen zur Verarbeitung von dünn besetzten Matrizen verwendet. Nützliche Hilfsmittel bei der Simulation von DA-Systemen, wie die Berechnung konsistenter Anfangsbedingungen für die algebraischen Variablen, Freiheitsgradanalyse oder eine Index-Überprüfung, werden weder in ACSL noch in SIMULINK angeboten.

DIVA ist ein Programmpaket zur dynamischen Simulation verfahrenstechnischer Anlagen auf dem Niveau des Fließbildes. Zur Durchführung einer Simulation wählt der Benutzer die gewünschten Modelle aus einer vom Entwickler vorgefertigten Grundelemente-Bibliothek aus und verknüpft diese durch Spezifikation der Fließbildtopologie. Im Gegensatz etwas zu Speedup oder ACSL handhabt der Benutzer also nicht direkt die Gleichungen sondern immer einen verfahrenstechnischen Apparat oder eine prozeßtechnische Einheit. Nach der Spezifikation der Anlage kommuniziert der Benutzer mit dem Simulator über eine Befehlsschnittstelle. Die Visualisierung der Ergebnisse findet durch

eine interaktive graphische Umgebung in MATLAB statt. Modelle müssen durch einen erfahrenen Modellierer in linear-impliziter DA-Formulierung erstellt werden. Der Modellierer formuliert die Erhaltungsgleichungen und erstellt die rechten und linken Seiten in FORTRAN. Zusätzlich sind beliebige zeitexplizite sowie zeitimplizite Schaltvorgänge zulässig. Damit ist z.B. die Formulierung von Strömungsumkehrvorgängen etc. leicht möglich. Der Benutzer soll zwischen Modellvarianten (beispielsweise Stoffaustausch- oder Gleichgewichtsmodell für eine Destillationskolonne) sowie zwischen unterschiedlichen Vereinfachungen (Modell mit oder ohne Energiebilanz) durch Angabe von Parametern wählen können. Auch die zu verwendenden Stoffdatenkorrelationen können vom Benutzer anhand ihres Namens spezifiziert werden. Die erforderlichen Parameter werden vor der eigentlichen Simulation aus Datenbanken besorgt (z.B. aus der "Dechema Stoffdatenbank" oder der "Dortmunder Datenbank"). An numerischen Lösungsverfahren stehen dem DIVA-Benutzer Verfahren zur *simultanen* Lösung des linear-impliziten DA-Systems (Rückwärtsdifferenzen-, Runge-Kutta- und Extrapolationsverfahren) sowie zur Lösung von nichtlinearen Gleichungen zur Verfügung. Durch Einsatz eines Fortsetzungsverfahrens können stationäre Lösungen in Abhängigkeit eines Parameters berechnet werden. Damit können beispielsweise instabile Bereiche oder mehrfache stationäre Lösungen des Systems gesucht werden. Startwerte für das DA-System werden entweder durch direktes Lösen des Konsistenzgleichungssystems gewonnen, oder durch einige anfängliche Integrationsschritte bestimmt. Sollten Probleme bei der numerischen Behandlung auftreten, so sind Diagnosewerkzeuge (strukturelle Indexanalyse, Visualisierung der Jacobi-Matrizen) verfügbar. DIVA verfügt über wichtige Schnittstellen zu anderen Softwarepaketen: Der Benutzer kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt der Simulation eine lineare Approximation des Gleichungssystems nach MATLAB zur Analyse aber auch zur Reglersynthese übergeben. Ein entworfener Regler kann dann an DIVA zum Test am nichtlinearen Modell zurückgegeben werden. Bei Echtzeitaufgaben, wie beispielsweise der prozeßbegleitenden Simulation, wird der Simulator mitsamt der Simulation in die DIVA Echtzeitumgebung eingesetzt. Dort werden alle zeitkritischen Aufgaben (z.B. die Kommunikation sowie die Archivierung) von dedizierten Prozessen übernommen.

SPEEDUP ist ein Programmpaket zur Entwicklung von Modellen und zur dynamischen Simulation von Prozessen der Verfahrenstechnik. Wie in ACSL implementiert der Benutzer ein Modell durch direkte Eingabe der Bilanzen in symbolischer Form. Er benutzt dazu eine leistungsfähige Modellierungssprache. Auch hier können Modellgleichungen in FORTRAN-Routinen ausgelagert werden. Modelldiskontinuitäten können komfortabel in die Modellbeschreibung integriert werden. Aus dieser symbolischen Darstellung des Problems wird automatisch FORTRAN-Code erzeugt, welcher die eigentliche Simulation durchführt. SPEEDUP bietet eine Bibliothek mit z.Zt. 98 Modellen verfahrenstechnischer und regelungstechnischer Prozeßbausteine. Es handelt sich um stationäre und dynamische Modelle unterschiedlichen Detaillierungsgrades, die zum Teil als FORTRAN-Routinen realisiert sind. Hauptschwerpunkt der verfahrenstechnischen Modellbausteine ist die Beschreibung von Destillationsprozessen. Zur Berechnung der Stoffdaten stehen besondere *Routinen* nebst einer Schnittstelle zur Stoffdatenbank von ASPEN+ zur Verfügung. Die Verknüpfung von Teilmodellen wird in SPEEDUP durch das Konzept der *Ströme* unterstützt.

Alle numerischen Methoden in SPEEDUP sind, wie in DIVA, in Sparse-Formulierungen implementiert. SPEEDUP besitzt vier verschiedene Integrationsalgorithmen (Rückwärtsdifferenzen-, einfaches explizites Euler-Verfahren und Runge-Kutta-Verfahren). Weiterhin erlaubt SPEEDUP die Angabe des Anfangszustandes in Form von unabhängigen, expliziten Beziehungen für beliebige algebraische und differentielle Variablen. Die Berechnung des stationären Zustands ist möglich. Die Jacobi-Matrix wird bei den Programmen ACSL, DIVA und SIMULINK numerisch durch Finite-Differenzen-Verfahren berechnet. SPEEDUP berechnet die Jacobi-Matrix des Gleichungssystems analytisch. Lediglich für Gleichungen, die in Form von externen FORTRAN-Routinen gegeben sind, werden finite Differenzen verwendet. SPEEDUP prüft zu Beginn der Simulation die Zahl der Freiheitsgrade und unterstützt den

Benutzer bei der Diagnose linearer Abhängigkeiten und des Index des DA-Systems. Wie die anderen Simulatoren hat auch SPEEDUP eine graphische Ergebnisvisualisierung, sowie eine generische Schnittstelle zum Export des linearen Zustandsraummodells des Gleichungssystems. Durch benutzerprogrammierbare FORTRAN-Schnittstellen kann eine Kommunikation mit anderen (auch realen) Prozessen für Echtzeitanwendungen erreicht werden.

3 Vergleich der Werkzeuge anhand der Simulation von Destillationskolonnen

Schon nach der Vorstellung der Werkzeuge ist klar, daß jeder Simulator eine andere Benutzergruppe anspricht. Beispielsweise zielt SPEEDUP und ACSL auf die Gruppe der Modellentwickler, während DIVA jene Benutzer anspricht, welche auf Niveau des Fließbildes arbeiten, ohne sich mit den einzelnen Grundoperationen zu sehr auseinandersetzen zu wollen. SIMULINK wiederum wird jene anziehen, welche das Arbeiten in MATLAB bisher schon gewohnt sind und durch eine möglichst komfortable Oberfläche unterstützt werden wollen. Hier wollen wir mit allen Werkzeugen das gleiche Simulationsproblem behandeln um einerseits die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit zu verdeutlichen, andererseits aber auch die Zielkonflikte bei der Entwicklung eines Simulators herauszuarbeiten. Als Testproblem wird in allen Simulationswerkzeugen das Modell einer 40-bödigen Destillationskolonne für das binäres Gemisch Methanol-Propanol implementiert. Die konkrete Auslegung entspricht einer am Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik der Universität Stuttgart vorhandenen Technikumskolonne. Es werden vier Fälle betrachtet, welche auf unterschiedlichen Modellannahmen basieren:

Modell 1: Berechnung des Phasengleichgewichts mit konstanten relativen Flüchtigkeiten, Annahme konstanter molarer Stoffströme in der Kolonne.

Modell 2: Berechnung des Phasengleichgewichts mit der Antoine-Gleichung, Annahme konstanter molarer Stoffströme.

Modell 3: Berechnung des Phasengleichgewichts mit der Antoine-Gleichung, Berechnung der Stoffströme mit Stoff- und Energiebilanzen.

Modell 4: Berechnung des Phasengleichgewichts mit konstanten relativen Flüchtigkeiten, Berechnung der Stoffströme mit Stoff- und Energiebilanzen.

In DIVA, ACSL und SIMULINK wurden die vier Modelle identisch implementiert. Von SPEEDUP wird eine Modifikation und Umorganisation des Gleichungssystems durchgeführt, weshalb die letztendlich zur Lösung kommenden Systeme eine unterschiedliche "Größe" besitzen. Die Modellierung der Destillationskolonne mit Energiebilanzen (Modelle 3 und 4) führt in natürlicher Weise auf eine linear-implizite Struktur der Gleichungen, die zur Implementierung in ACSL vom Modellierer erst in die benötigte semi-explizite Form gebracht werden muß.

In Modellvariante 1 und 4 können die aus der Modellierung resultierenden algebraischen Gleichungen (Schließbedingungen und Berechnung der Stoffströme) explizit aufgelöst und in die DGLn eingesetzt werden. Dies ist für Modellvariante 4 allerdings nur mit sehr großem Aufwand möglich und die resultierenden rechten Seiten des ODE-Systems werden sehr komplex. Diese Implementierungsvarianten werden im folgenden als Variante 1.b bzw. 4.b bezeichnet. Für die Modelle 2,3 und 4 kann ein Zwischenweg beschritten werden: Die Berechnung der Stoffströme wird als algebraische Gleichungen formuliert; Nur die einfach aufzulösenden Schließbedingungen werden in die DGLn eingesetzt. Diese Varianten werden als 2.b, 3.b und 4.c bezeichnet. Da DIVA und SPEEDUP über eine konsequente DA-Numerik für dünn besetzte Matrizen verfügen, wurde bei diesen beiden Simulatoren auch nur dieser Fall untersucht. In ACSL und SIMULINK wurden auch die "reduzierten" Beschreibungen realisiert (vergl. Tabelle 1). In SIMULINK wurden alle Varianten als S-Functions und sowohl als m-file, als auch als mex-file (in C) implementiert.

Das durchgeführte Simulationsexperiment setzt sich aus vier Phasen zusammen: 30 Minuten Simulation, ausgehend von stationären und konsistenten Anfangsbedingungen; Fünf-minütige ram-

penförmige Änderung des Rücklaufs und des Dampfstromes um plus bzw. minus 60% pro Stunde; Konstanthalten des Rücklaufs und Dampfstroms auf den Endwerten für 30 Minuten; Sprungförmiges Zurücksetzen der beiden Ströme auf die anfänglichen Werte; Konstanthalten für weitere 90 Minuten. Tabelle 1 enthält die Rechenzeiten (CPU-Zeiten) aller Varianten auf einer Workstation (SUN Sparstation 10).

		Modell 1		Modell 2		Modell 3		Modell 4		
		1	1.b	2	2.b	3	3.b	4	4.b	4.c
SIMULINK	dyn.Gl.	42	42	*	*	*	42	*	42	42
	alg.Gl.	206	0	*	*	*	122	*	0	80
	CPU-m	14196	113.8	*	*	*	NV	*	404	50958
	CPU-mex	3278	6.8	*	*	*	NV	*	16.7	9448
ACSL	dyn.Gl.	42	42	42	42	42	42	42	42	42
	alg.Gl.	206	0	248	42	248	122	206	0	80
	CPU	40.8	2.4	49.7	7.8	94.6	30.6	82.7	10.4	21.7
DIVA	dyn.Gl.	42	*	42	*	42	*	42	*	*
	alg.Gl.	206	*	248	*	248	*	206	*	*
	CPU	7.2	*	13.4	*	19.9	*	23.6	*	*
SPEEDUP	dyn.Gl.	42	*	42/84	*	84	*	42	*	*
	alg.Gl.	290	*	372/373	*	551	*	496	*	*
	CPU	16.3	*	17.2/28.5	*	48.6	*	41.8	*	*

Tabelle 1: Rechenzeiten der Simulationswerkzeuge in Sekunden. Der Eintrag "*" steht für "nicht implementiert", "NV" für "keine Werte verfügbar". Integration mit DASSL.

Die ermittelten CPU-Zeiten zeigen Unterschiede in die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Simulationstechniken. Berücksichtigt man die unterschiedliche Anzahl implementierter Gleichungen bei SPEEDUP und DIVA, so ergeben sich für beide Werkzeuge ähnliche Rechenzeiten. Bei identisch gleicher Implementierung ergibt sich für ACSL die etwa vierfache Rechenzeit wie für DIVA, was primär auf die sparse-Implementierung von DIVA zurückzuführen ist. Da in SIMULINK keine simultanen DA-Löser zur Verfügung stehen, ergeben sich bei gleicher Implementierungsvariante für DA-Systeme wesentlich größere Rechenzeiten (z.B. Faktor 100 im Vergleich zu ACSL für Modell 1). Deshalb wird in SIMULINK stets ein erhöhter Implementierungsaufwand betrieben werden müssen, um möglichst viele algebraische Gleichungen zu eliminieren. Es sollte allerdings betont werden, daß die hier verwendeten m-files zur Lösung der unterlagerten algebraischen Gleichungen, sicher noch effizienter implementiert werden können. Für reine Differential-Systeme (Modelle 1b und 4b) ergeben sich in ACSL etwas kürzere Rechenzeiten als in SIMULINK. Ein ausführlicher Vergleich zwischen den Simulationsumgebungen ACSL und SIMULINK ist in [5] zu finden.

Wie man Tabelle 1 entnehmen kann, ist in SIMULINK eine Realisierung der Modellgleichungen als mex-File immer dann von Vorteil, wenn DGLn mit aufwendig auszuwertenden rechten Seiten simuliert werden sollen. So ergibt sich z.B. für Modell 1.b nur eine ca. 10-fach, für Modell 4.b eine ca. 25-fach höhere Simulationsgeschwindigkeit.

Tabelle 1 zeigt auch, daß sich der nur unwesentlich höhere Modellierungsaufwand für die "reduzierten" Modelle 2.b, 3.b und 4.c in einem klaren Rechenzeitvorteil auszahlt. In ACSL ergibt sich eine bis zu sechs-fache Reduktion der Rechenzeit, die damit teilweise unter den Zeiten für DIVA liegt (z.B. Modell 4.b. in ACSL und Modell 4 in DIVA).

Da in ACSL keine konsistenten Startwerte berechnet werden, können nur glatte Nichtlinearitäten simuliert werden. Daraus folgt, daß im Prinzip keine sprunghaftigen Änderungen von Eingangsgrößen aufgegeben werden dürfen. Die durchgeführten Simulationen mit der unstetigen Anregungsfunktion

zeigten jedoch, daß in der Praxis dennoch simuliert werden kann, wenn auch die Schrittweitensteuerung beeinträchtigt wird. Ähnliche Probleme ergeben sich bei der Verwendung des Totzeitoperators in ACSL [7].

Zusammenfassend zeigten unsere Erfahrungen daß sich prinzipiell alle betrachteten Werkzeuge zur Simulation verfahrenstechnischer Prozesse und Anlagen eignen. Die Werkzeuge zeichnen sich allerdings durch eine unterschiedliche Zielrichtung aus: SIMULINK bietet einen sehr hohen Modellimplementierungs-, Verschaltungs- und Bedienkomfort; ACSL und SPEEDUP sind für die Modellierung und Implementierung neuer Modelle besonders geeignet, wobei SPEEDUP speziell die Bedürfnisse der Verfahrenstechnik unterstützt; DIVA ist weniger auf den Modellierer und mehr auf den Anwender ausgerichtet, der aus vorhandenen Bibliotheken Modelle auswählt, parametriert und verschaltet. Der Komfort von SIMULINK bedingt einen beträchtlichen Overhead, welcher sich im Vergleich zu den anderen Simulatoren in einer reduzierten Leistungsfähigkeit bemerkbar macht. Bei den in der Verfahrenstechnik üblichen großen, dünn besetzten DA-Systemen mit vielen unterlagerten algebraischen Gleichungen ist jedoch eine effiziente simultane numerische Lösung unabdingbar. SIMULINK ist deshalb ausschließlich für kleinere Probleme geeignet. ACSL eignet sich hingegen, trotz seiner nicht speziell auf verfahrenstechnische Probleme ausgelegten Struktur, auch für größere Simulationsaufgaben. Einzig die fehlende sparse-Implementierung steht einer Verwendung bei *sehr* großen Gleichungssystemen mit mehr als 10^4 Gleichungen entgegen. Wie zu erwarten war, sind die auf die speziellen Bedürfnisse der Verfahrenstechnik ausgerichteten Simulatoren DIVA und SPEEDUP für sehr große Simulationsprobleme im industriellen Maßstab geeignet.

Danksagung: Die Autoren danken Frau A. Wahl, Frau D. Rainer, Herrn M. Klander sowie Herrn M. Groebel für ihre Unterstützung bei der Vorbereitung der durchgeführten Simulationsstudien.

Literatur

- [1] A. Kröner, Holl, P., Marquardt, W., und Gilles, E. D.: DIVA - An open architecture for dynamic simulation. Proc. European Symposium on Computer Applications in Chemical Industry (Hrsg.: Eckermann, R.), DECHEMA, VCH. 1989, S. 173–179.
- [2] Aspen Technology SPEEDUP-Manual, 1993.
- [3] BAUSCH-GALL GmbH Echtzeiterweiterung für MATLAB / SIMULINK, Unterföhring, 1994.
- [4] Helget, A. und Gilles, E. D.: Dynamische Prozess- und Anlagensimulation. In: Prozeßsimulation (Hrsg.: Schuler, H.), VCH 1994.
- [5] Klander, M.: Dynamische Simulation verfahrenstechnischer Prozesse — Ein Vergleich zwischen den Simulationsumgebungen SIMULINK und ACSL. Studienarbeit, Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, 1993.
- [6] Klander, M., Wahl, A., und Allgöwer, F.: Realisierung einer *Process Model Toolbox* in den Simulationsumgebungen ACSL und SIMULINK. Interner Bericht, Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, 1994.
- [7] Majer, C., Braun, A., Moser, R., Rothfuß, R., Gilles, E. D., und Zeitz, M.: Untersuchungen zur ACSL-Numerik für Differential-Algebra-Gleichungen und Totzeiten an verfahrenstechnischen Beispielen. Proc. 9. Symposium Simulationstechnik; ASIM 1994 (Hrsg.: Kampe, G. und Zeitz, M.), 1994.
- [8] Mathworks Inc. SIMULINK Users Guide, 1992.
- [9] Mitchell & Gauthier Associates, Inc. ACSL - Advanced Continuous Simulation Language Reference Manual, 1991.