Hochleistungsrechnen mit PC-Clustern

Ernst Haunschmid, ZID
Helmut Hlavacs, Institut für Informatik und Wirtschaftsinformatik, Universität Wien
Dieter F. Kvasnicka, Institut für Physikalische und Theoretische Chemie
Christoph Überhuber, Institut für Angewandte und Numerische Mathematik

In den letzten Jahren hat die Idee, handelsübliche PCs oder Workstations mit gängiger Netzwerktechnik so zu verbinden, dass sie dem Benutzer wie ein einzelner Parallelrechner erscheinen, einen enormen Aufschwung erlebt. Die Gründe dafür sind die starke Leistungszunahme der Prozessoren und Netzwerkkomponenten und deren drastischer Preisverfall. Mittlerweile befinden sich mehrere PC-Cluster in der Liste der weltweit schnellsten Computer[1].

Beowulf Cluster[2], wie (bestimmte) PC-Cluster auch genannt werden, sind aus handelsüblichen PCs aufgebaut, die durch ein Kommunikationsnetzwerk verbunden sind und gemeinsam (parallel) an der Lösung eines Problems arbeiten. Dabei handelt es sich meist um Computer mit Intel- oder verwandten Prozessoren (wie z. B. den Athlon Prozessoren von AMD), aber auch Alpha-Prozessoren werden in solchen Computer-Systemen verwendet. Meistens gibt es einen Server-PC und mehrere Client-PCs, die die eigentlichen Berechnungen durchführen. Der Server-PC dient als Systemkonsole und Fileserver. Er stellt auch die Verbindung zum Internet her. Bei großen Clustern können auch mehrere Server-PCs vorhanden sein, die verschiedene Aufgaben übernehmen. Die Client-PCs haben keine direkte Verbindung zur „Außenwelt", meistens keine Tastaturen und Bildschirme, und werden nur über „remote login" angesprochen.

Eine typische Konfiguration wäre etwa eine Verbindung von 8 - 32 PCs (mit je einem, zwei oder vier Prozessoren) über Fast-Ethernet oder schnellere Netzwerke wie Gigabit-Ethernet[3], Myrinet[4] oder SCI[5] (*Scalable Coherent Interface*). Aber auch größere Cluster mit über 100 Prozessoren haben sich bereits als erfolgreich erwiesen.

Als Parallelrechner sind PC-Cluster zwischen MPPs (*Massively Parallel Processors*) und NOWs (*Networks of Workstations*) positioniert. PC-Cluster profitieren dabei von den Entwicklungen in beiden Architekturklassen. MPPs haben üblicherweise eine größere Anzahl von Prozessoren und schnellere Kommunikationseinrichtungen. Typische Probleme bei der Programmierung von MPPs sind die gleichmäßige Last- und Datenverteilung, die Wahl der geeigneten Granularität der Algorithmen und die Minimierung des Kommunikations-Overheads. Programme, die keine allzu feinkörnige Struktur erfordern, können meist problemlos auf PC-Cluster portiert werden und laufen dort sehr effizient. Die Programmierung von NOWs dient meist dem Versuch, unbenutzte Rechenzeit auf leistungsfähigen Workstations zu nutzen. Das erfordert Algorithmen, die extrem tolerant auf Leistungsschwankungen der beteiligten Workstations reagieren und daher eine sehr effiziente dynamische Lastverteilung besitzen müssen. Programme, die auf NOWs zufrieden stellend laufen, sind meist ebenso gut auf PC-Clustern lauffähig.

Als Betriebssystem wird vornehmlich Linux verwendet, das für viele Anwendungen aus dem technisch-naturwissenschaftlichen Bereich die ideale Grundlage darstellt: es ist (nahezu) kostenlos verfügbar, hat eine ausgezeichnete Stabilität, und es ermöglicht den Einsatz von jahrelang entwickelter und erprobter Software auch auf

---

[1] www.netlib.org/benchmark/top500.html
www.cs.sandia.gov/cplant/
cnls.lanl.gov/avalon/
wwwwissrech.iam.uni-bonn.de/research/projects/parnass2/

[2] Beowulf ist ein englisches Epos aus dem achten Jahrhundert, das einem Helden mit überlegener Kraft gewidmet ist. www.beowulf.org

[3] www.gigabit-ethernet.org

[4] www.myri.com

[5] www.scali.com

billigen Standard-PCs. Ein spezieller Vorteil von Linux gegenüber anderen Unix-Varianten für Standard-PCs ist die gute und schnelle Verfügbarkeit von Treibern für fast alle Hardwarekomponenten.

Mit vielen Anwendungsprogrammen können auf Standard-PCs bereits Leistungswerte erzielt werden, die mit jenen auf (wesentlich) teureren Workstations konkurrieren können. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass technische Neuerungen wegen der kürzeren Produktlebenszyklen der PCs schneller in die aktuellen Modelle aufgenommen werden. Im Preis-Leistungs-Verhältnis übertreffen Standard-PCs meist Workstations um ein Vielfaches.

Ein PC-Cluster an der TU Wien

Im Februar 1999 wurde vom Institut für Angewandte und Numerische Mathematik und vom Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der TU Wien ein PC-Cluster konfiguriert, errichtet und in Betrieb genommen. Dieser besteht aus einem Server-PC und fünf Doppelprozessor-Client-PCs. Die fünf Rechenknoten sind 350 MHz Pentium II-Doppelprozessorsysteme mit 256 MB Hauptspeicher und lokalen 4,5 GB Festplatten. Der Server-PC hat einen einzelnen 350 MHz Pentium II-Prozessor, mehrere Festplatten (getrennt für System, Benutzerverzeichnisse und Backup) und 256 MB Hauptspeicher. Zwischen diesen sechs PCs wird über ein Fast-Ethernet-Netzwerk mit Switch kommuniziert. Als Betriebssystem wurde Linux (Suse 6.0, Kernel 2.2) installiert.

Zur Parallelprogrammierung stehen MPI (in Form der MPICH-Implementierung[6]), PVM[7] (Version 3.4), ein HPF-Compiler der Portland Group[8] und OpenMP[9] (zur Programmierung der speichergekoppelten Doppelprozessorsysteme) zur Verfügung.

Tätigkeit	Aufwand in Stunden
Hardwareplanung	80
Hardwarebeschaffung	20
Erstinstallation	120
Betrieb 2 Jahre	110
Summe	330

Tabelle 1: Richtwerte für den Personalaufwand bei Errichtung und Betrieb eines PC-Clusters.

Eine Übersicht über den für die Errichtung und den Betrieb dieses PC-Clusters erforderlichen Personalaufwand enthält Tabelle 1. Die Werte in dieser Tabelle gelten für Personen mit Erfahrung im (parallelen) Hochleistungsrechnen und beim Installieren und Betrieb von Linux-Systemen. Falls dieses Vorwissen nicht vorhanden ist, muss ein entsprechend größerer Aufwand einkalkuliert werden. Die Gesamtbetriebsdauer des Clusters wurde mit zwei Jahren angenommen. Zum Vergleich: vor drei Jahren waren bei PCs gerade Intel Pentium 200 MMX Prozessoren hochaktuell, die heute niemand mehr im Hochleistungsrechnen einsetzen würde, auch wenn sie noch problemlos funktionieren.

Ein PC-Cluster der TH Aachen

Es gibt fertig konfigurierte PC-Cluster zu kaufen, beispielsweise von Siemens[10] oder von Suse[11]. Dadurch kann ein großer Teil des Aufwands für die Hardware-Beschaffung und die Erstinstallation vermieden werden. Dies schlägt sich natürlich in deutlich höheren Anschaffungskosten nieder.

Zu Testzwecken wurde uns freundlicherweise von der RWTH Aachen deren Siemens-PC-Cluster[12] zur Verfügung gestellt. Dieser betriebsfertig ausgelieferte hpcLine-Cluster besteht aus 16 Doppelprozessor-PCs mit 400 MHz Pentium II-Prozessoren, 512 KB Level 2 Cache, 512 MB Hauptspeicher und lokalen 4 GB Festplatten. Die PCs kommunizieren entweder über ein Fast-Ethernet- oder ein SCI-Netzwerk, das als zweidimensionaler Torus konfiguriert ist.

Das Betriebssystem ist auch auf diesem Cluster Linux (Red Hat, Kernel 2.0.36 im SMP Modus).

Die SGI Origin 2000 der TU Wien

Um Leistung und Kosten von PC-Clustern mit den entsprechenden Werten gängiger Parallelrechner vergleichen zu können, wurde die SGI Origin 2000 des ZID der TU Wien herangezogen. Dieses speichergekoppelte Multiprozessorsystem ist mit 64 Prozessoren, insgesamt 27 GB Hauptspeicher, und über 500 GB Plattenspeicher ausgestattet.

Die SGI Origin2000 ist modular aufgebaut. Jeweils zwei MIPS R10000-Prozessoren (mit 250 MHz Taktfrequenz) befinden sich auf einem *Node-board*. Die einzelnen *Node-boards* sind über *Router-boards* miteinander verbunden (Hypercube Topologie, 780 MByte/s Bandbreite). Der Hauptspeicher ist auf die einzelnen *Node-boards* verteilt. Jeder Prozessor kann auf den gesamten Hauptspeicher zugreifen, die Zugriffszeiten auf einzelne Speicheradressen sind aber nicht einheitlich (*cache coherent non uniform memory access*, ccNUMA Architektur).

Für die Parallelprogrammierung stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

Parallele Bibliotheken: Die SGI *Cray Scientific Library* (SCSL) enthält eine Reihe parallelisierter Programme

[6] www-unix.mcs.anl.gov/mpi/
[7] www.epm.ornl.gov/pvm/
[8] www.pgroup.com
[9] www.openmp.org
[10] www.siemens.de/computer/hpc/de/hpc/cluster.htm
[11] www.suse.de/de/hardware/suse_hw/cluster/index.html
[12] www.rz.rwth-aachen.de:80/hpc/TAS/

zur Lösung numerischer Probleme. Diese, für den Benutzer mit sehr geringem Aufwand verbundene Art der Verwendung des Parallelismus der SGI Origin 2000 ist speziell bei Problemen aus dem Bereich der numerischen Linearen Algebra sehr effizient.

Parallelisierende Compiler: Die IRIX-Compiler der SGI Origin 2000 können parallelisierten Code automatisch erzeugen. Um eine befriedigende Leistung zu erzielen, muss aber der Programmierer in den meisten Fällen OpenMP-Direktiven in das Programm einfügen.

Parallelisierung mit MPI: Die Parallelisierung eines Programmes mittels MPI erfordert (verglichen mit den anderen zwei Möglichkeiten) den größten Aufwand. Dafür können Programme, die auf MPI aufbauen, auch auf Systemen mit verteiltem Hauptspeicher eingesetzt werden.

Algorithmen für PC-Cluster

Viele Programme, die nur einen sehr geringen Kommunikationsaufwand erfordern (d. h. *embarrassingly parallel* sind), wurden bereits erfolgreich auf PC-Cluster portiert und erfüllen dort die ihnen gestellten Aufgaben hervorragend.

Auch bei Algorithmen mit größerem Kommunikationsbedarf, z. B. Algorithmen aus der Linearen Algebra, kann mit speziellen Maßnahmen (z. B. mit den verschiedenen Formen des *Blockens*; Ueberhuber [9]) gute Gleitpunktleistung trotz langsamer Netzwerke erzielt werden. Allerdings muss bei langsamen Netzwerken die Kommunikationsstrategie sehr sorgfältig gewählt werden.

Algorithmen der Linearen Algebra

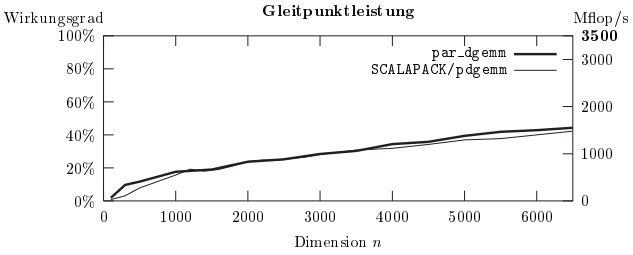

Abbildung 1: Matrizenmultiplikation auf 10 Prozessoren des Wiener PC-Clusters (Maximalleistung: 3.5 Gflop/s). Das HPF-Programm `par_dgemm` liefert ähnliche Performance wie das SCALAPACK-Programm `pdgemm`.

Algorithmen der numerischen Linearen Algebra sind eine ausgezeichnete Basis für den Leistungsvergleich von PC-Clustern und parallelen Großrechnern. Aus Platzgründen werden im Folgenden nur zwei prototypische Algorithmen behandelt: (1) die Multiplikation von zwei quadratischen Matrizen (siehe Abb. 1 und 2) sowie (2) die Cholesky-Faktorisierung einer symmetrischen, positiv definiten Matrix (siehe Abb. 3 bis 5).

Numerische Experimente wurden mit verschiedenen Implementierungen dieser zwei Algorithmen durchgeführt. Als Vergleichsbasis dienten dabei die entsprechenden Programme aus SCALAPACK, einem Programmpaket auf PVM- und MPI-Basis, das im Parallelrechnen eine ähnlich wichtige Rolle spielt wie LAPACK auf sequentiellen Computern.

Neben den SCALAPACK-Programmen wurden u.a. selbstentwickelte HPF-Programme getestet. Dabei konnte der Nachweis geführt werden, dass es mit HPF-Programmen möglich ist, die Leistungswerte von MPI-Programmen zu erreichen oder sogar zu übertreffen (siehe Abb. 1).

Die Experimente mit den Programmen zur Cholesky-Faktorisierung zeigen sehr deutlich, wie sich die Kommunikationsgeschwindigkeit in einem PC-Cluster auf die Gleitpunktleistung auswirken kann. Mit Fast-Ethernet-Kommunikationsnetzwerk sind nur enttäuschende Leistungswerte erreichbar (siehe Abb. 3). Mit dem schnelleren SCI-Netzwerk kann zufrieden stellende Gleitpunktleistung erzielt werden (siehe Abb. 4).

Diese Resultate sind charakteristisch für den kommunikationsintensiven Parallelismus von Algorithmen der Linearen Algebra. In vielen großen Anwendungsprogrammen ist ein kommunikationsarmer Task-Parallelismus anzutreffen. Um auch auf diesem Gebiet Erfahrungen zu sammeln, wurde das Programmpaket WIEN 97 herangezogen.

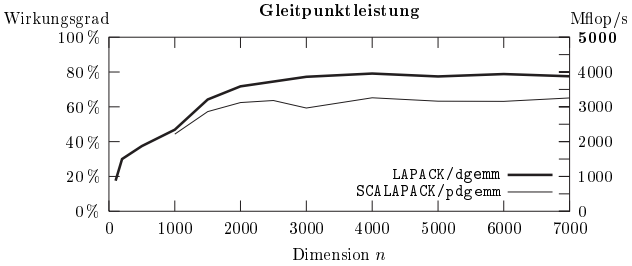

Abbildung 2: Matrizenmultiplikation auf 10 Prozessoren einer SGI Origin (Maximalleistung: 5 Gflop/s). Das speziell für die SGI Origin 2000 parallelisierte LAPACK-Programm `dgemm` liefert etwas bessere Gleitpunktleistung wie das SCALAPACK-Programm `pdgemm`.

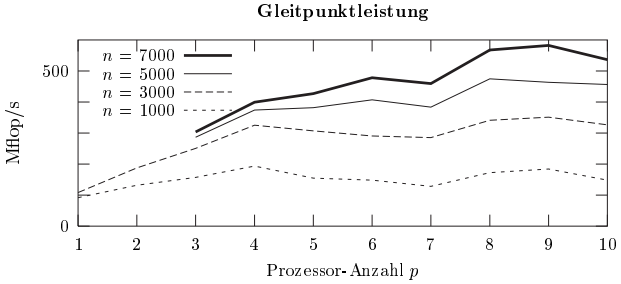

Abbildung 3: Cholesky-Faktorisierung symmetrischer, positiv definiter Matrizen der Dimension $n = 1000, ..., 7000$ auf $p = 1,2, ...,10$ Prozessoren des Wiener PC-Clusters (Kommunikation durch Fast Ethernet, Maximalleistung: $p \times 350$ Mflop/s) mit Hilfe des SCALAPACK-Programms `pdpotrf`.

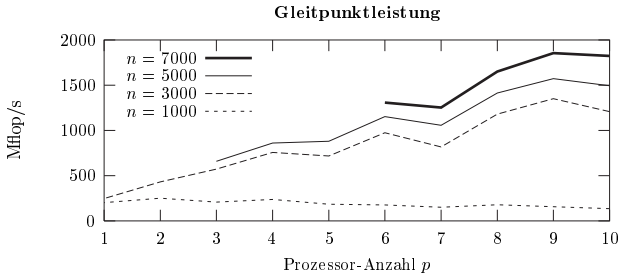

Abbildung 4: Cholesky-Faktorisierung symmetrischer, positiv definiter Matrizen der Dimension $n = 1000, ..., 7000$ auf $p = 1,2, ...,10$ Prozessoren des Aachener PC-Clusters (Kommunikation durch SCI, Maximalleistung: $p \times$ 400 Mflop/s) mit Hilfe des SCALAPACK-Programms `pdpotrf`.

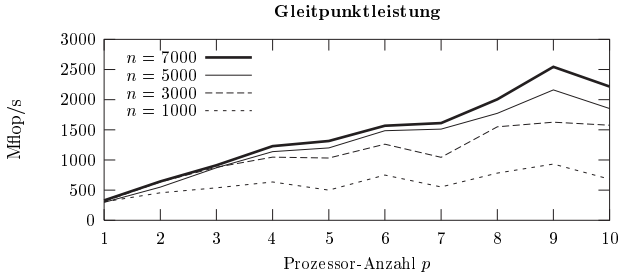

Abbildung 5: Cholesky-Faktorisierung symmetrischer, positiv definiter Matrizen der Dimension $n = 1000, ..., 7000$ auf $p = 1,2, ...,10$ Prozessoren der SGI Origin2000 des ZID der TU Wien (Maximalleistung: $p \times 500$ Mflop/s) mit Hilfe des SCALAPACK-Programms `pdpotrf`.

WIEN 97

WIEN 97 ist ein sehr großes Programmsystem aus dem Bereich der theoretischen Chemie zur Berechnung von elektronischen Eigenschaften von Festkörpern nach der FP-LAPW Methode (siehe Blaha et al. [1] und Singh [7]), mit dem sehr genaue Lösungen der Gleichungen der Dichtefunktionaltheorie[13] berechnet werden können.

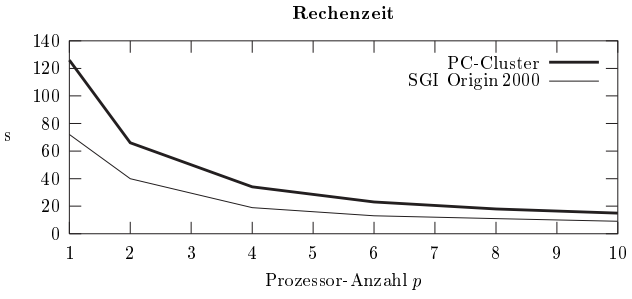

Abbildung 6: Ein Programmlauf von WIEN 97 auf $p = 1,2, ...,10$ Prozessoren. Um die gleiche Laufzeit zu erzielen, benötigt man am PC-Cluster doppelt so viele Prozessoren wie auf der SGI Origin 2000.

Mit einer parallelen Version des Programmpaketes WIEN 97[14] wurden auf dem Wiener PC-Cluster und auf der SGI Origin 2000 des ZID der TU Wien Laufzeituntersuchungen angestellt. Die gewählte Parallelisierung beruht auf der Verteilung von größeren Tasks über Shell-Scripts. Die Prozessoren rechnen jeweils mehrere Minuten unabhängig voneinander, die Kommunikation findet über Dateien statt. Die Effizienz dieser Parallelisierungsmethode ist üblicherweise sehr hoch (siehe Abb. 6 und Tabelle 2), sie wird nur durch Lastverteilungseffekte – es gibt nur eine begrenzte Anzahl an Tasks – und kurze sequentielle Programmteile begrenzt.

	PC-Cluster		SGI Origin 2000	
p	Laufzeit (Stunden)	Speed-up	Laufzeit (Stunden)	Speed-up
1	126.3	**1**	72.0	**1**
2	66.5	1.9	40.5	1.8
4	34.1	3.7	19.3	3.7
6	23.4	5.4	13.5	5.3
8	18.3	6.9	11.9	6.1
10	15.9	7.9	9.8	7.3

Tabelle 2: Laufzeit und Speed-up für die Berechnung der Elektronendichte des Hochtemperatursupraleiters $YBaCuO_7$ mittels WIEN 97 auf 1-10 Prozessoren eines PC-Clusters und einer SGI Origin 2000.

Simulation

Im Allgemeinen ist der Ankauf von Hardware durch die zur Verfügung stehenden Geldmittel begrenzt. Um nun mit gegebener finanzieller Ausstattung das Maximum an Rechenleistung für eine bestimmte Applikation zu erreichen, muss der Anwender aus einer Vielzahl möglicher Konfigurationen die für ihn optimale auswählen. Einflussmöglichkeiten bei der Konfiguration betreffen z. B. die Anzahl der Prozessoren, deren Taktfrequenz, Ein- oder Mehrprozessorknoten, die Größe des Hauptspeichers oder die Geschwindigkeit des Kommunikationsnetzwerkes.

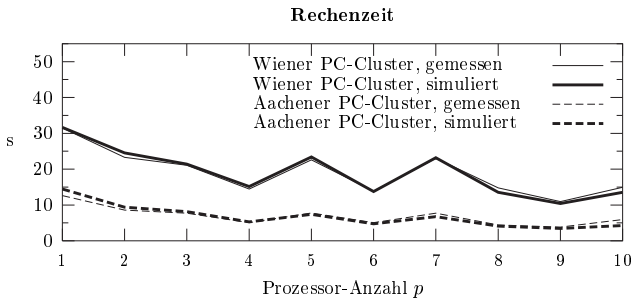

Abbildung 7: Simulation der Cholesky-Faktorisierung mit CLUE ($n = 2000$).

[13] Für seine Arbeiten an der Dichtefunktionaltheorie erhielt der gebürtige Österreicher Walter Kohn 1998 den Nobelpreis für Chemie.

[14] `www.tuwien.ac.at/theochem/wien97/`

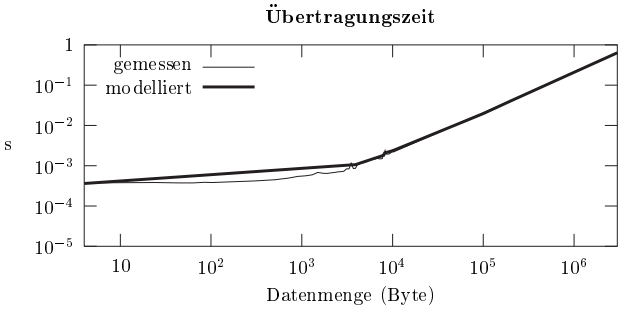

Abbildung 8: Performance der Kommunikation zwischen zwei Knoten eines PC-Clusters mit Fast Ethernet Netzwerk.

Eine Unterstützung bei der Entscheidung für eine bestimmte Konfiguration kann durch Simulation gegeben werden. Für diesen Zweck wurde das Simulationssystem CLUE (CLUSTER EVALUATOR, Hlavacs et al.[4]) entwickelt. Dabei steht die Simulation von PVM-basierten Programmen im Mittelpunkt, es können aber auch MPI-basierte Programme erfolgreich simuliert werden.

Die simulierten Anwendungsprogramme laufen in praktisch unveränderter Form, nur eine Neuübersetzung und das Linken mit der Simulationsbibliothek MISS-PVM (siehe Kvasnicka, Ueberhuber [5]) ist notwendig. Die Simulationsgeschwindigkeit ist abhängig vom Computer, auf dem die Simulation durchgeführt wird. Da alle (parallelen) Teile wirklich ausgeführt werden, dauert der Simulationslauf mindestens so lange wie die Summe der Laufzeiten der parallelen Teile. Dazu kommt noch die Simulation der Kommunikation, die bei den meisten gut parallelisierbaren Algorithmen aber sehr rasch abläuft. Wenn notwendig (und im geplanten Netzwerk wirklich vorhanden) können auch Überlastsituationen (*contention*) simuliert werden.

Kostenvergleich

	Hardware und Systemsoftware	Personal	Gesamtkosten
PC-Cluster – eigenes Personal	240 000,-	90 000,-	330 000,-
PC-Cluster – externes Personal	240 000,-	460 000,-	700 000,-
SGI Origin 2000, p Proz.			$p \times 120\,000$,-

Tabelle 3: Gesamtkosten (in ATS) für 2 Jahre für einen PC-Cluster mit 10 Prozessoren, der entweder durch eigenes oder durch externes Personal errichtet und gewartet wird, sowie für die SGI Origin 2000.

Um einen Vergleich der Kosten verschiedener Rechnersysteme anstellen zu können, ist es notwendig, die erzielte Rechenleistung in irgendeiner Weise zu normieren. Der folgende Vergleich konzentriert sich auf den Wiener PC-Cluster und die SGI Origin 2000 und stützt sich auf zwei Fälle: (1) Die Cholesky-Faktorisierung (siehe Abb. 3 und 5), bei der die Leistung von 10 Prozessoren des Wiener PC-Clusters schon von zwei Prozessoren der SGI Origin 2000 übertroffen wird. (2) Die wesentlich weniger kommunikationsintensive Anwendung WIEN 97 (siehe Abb. 6 und Tabelle 2), bei der etwa ein Faktor zwei zwischen der Leistungsfähigkeit der beiden Computersysteme liegt.

Tabelle 3 gibt einen Kostenvergleich zwischen dem PC-Cluster und dem Hochleistungsserver der TU Wien. Beim PC-Cluster wurde ein Stundensatz von ATS 280 für vorhandenes (Hochschul-)Personal angenommen (inklusive Lohnnebenkosten). Für externes Personal wurde nach den Honorarrichtlinien für EDV-Dienstleistungen der Wirtschaftskammer ein Stundensatz von ATS 1400 (inkl. 20 % MWSt.) zugrunde gelegt. Die Kosten für die SGI Origin 2000 entsprechen der Kostenstellenrechnung des ZID der TU Wien und inkludieren Hardware-Kosten sowie anteiligen Personalaufwand.

Zusätzliche Kosten für ein schnelleres Netzwerk am PC-Cluster belaufen sich derzeit auf etwa ATS 20 000 pro Rechenknoten für die Hardware. Auch mit entsprechend höherem Installationsaufwand ist zu rechnen. Damit kann auch für kommunikationsintensive Algorithmen eine vergleichbare Gleitpunktleistung wie auf der SGI Origin 2000 erreicht werden (siehe Abb. 4 und 5), die Kosten steigen aber auch in vergleichbare Höhe.

Nutzungsdauer pro Tag (Stunden)	Anzahl p der Prozessoren				
	1	5	10	20	30
1	5 000	25 000	50 000	100 000	150 000
6	30 000	150 000	300 000	600 000	
18	90 000	450 000	900 000		

Tabelle 4: Gesamtkosten (in ATS) für 2 Jahre Nutzung von p Prozessoren der SGI Origin 2000 bei einer täglichen (durchschnittlichen) Nutzungsdauer von 1, 6 oder 18 Stunden.

Wenn man die Gesamtkosten aus Tabelle 3 vergleicht, dann ergibt sich, dass mit den Kosten des PC-Clusters ungefähr drei bis sechs Prozessoren des Hochleistungsservers zwei Jahre lang durchgehend finanziert werden können.

Abgesehen davon, dass für den universitären Anwender (derzeit noch) keine Kosten für die Verwendung des Hochleistungsservers anfallen, ist diese Darstellung auch noch aus einem anderen Grund unrealistisch: Der Betreiber eines PC-Clusters trägt tatsächlich die vollen Kosten, unabhängig davon, wie lange der Cluster unbenutzt leer steht. Die Verwendung eines Zentralservers, der einer Vielzahl verschiedener Benutzer zur Verfügung steht, verursacht aber – vom Standpunkt des Anwenders – nur Kosten, wenn er tatsächlich verwendet wird. Damit verringern sich aber die Kosten des Zentralservers dramatisch (siehe Tabelle 4) und der PC-Cluster kommt aus Kostenüberlegungen kaum mehr in Betracht.

Beim Kostenvergleich muss noch ein wesentlicher Unterschied zwischen einem PC-Cluster und einem zentralen Hochleistungsserver berücksichtigt werden: Der PC-Cluster steht seinem Besitzer jederzeit vollständig zur Verfügung. Zentrale Server werden von vielen Benutzern im *Multi-user-Betrieb* gleichzeitig verwendet. Die Antwortzeit kann damit signifikant länger ausfallen als die z. B. in Abb. 5 dargestellte Laufzeit.

Zusammenfassung

PC-Cluster stellen eine Alternative zu den großen Zentralrechnern dar. Sie bestechen durch ein attraktives Preis-Leistungs-Verhältnis und können auf Grund ihrer hohen Rechenleistung für viele Algorithmen erfolgreich eingesetzt werden.

Der Installationsaufwand eines PC-Clusters hält sich in Grenzen. Etwas Erfahrung mit Linux vorausgesetzt, können PC-Cluster in kurzer Zeit in Betrieb genommen und erfolgreich verwendet werden. Standard-Linux-Versionen sind einfach zu benutzen, und Unterstützung für das parallele Programmieren ist in einschlägigen Fachbüchern und im Internet reichlich zu finden.

Seriöse Kostenvergleiche gehen allerdings (derzeit noch) deutlich zu Gunsten der zentralen Hochleistungsserver aus.

Literatur

[1] P. Blaha, K. Schwarz, P. Sorantin, S. B. Trickey, *Full-Potential, Linearized Augmented Plane Wave Programs for Crystalline Systems*, Comp. Phys. Commun. 59 (1990), pp. 399-415.

[2] R. Buyya (Ed.), *High Performance Cluster Computing: Architecture and Systems*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1998.

[3] R. Buyya (Ed.), *High Performance Cluster Computing: Programming and Applications*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1998.

[4] H. Hlavacs, D. F. Kvasnicka, C. W. Ueberhuber, CLUE – *Cluster Evaluation*, Technical Report AURORA TR 2000-05, Vienna University of Technology, 2000, `www.vcpc.univie.ac.at/aurora/publications/`.

[5] D. F. Kvasnicka, C. W. Ueberhuber, *Developing Architecture Adaptive Algorithms using Simulation with MISS-PVM for Performance Prediction*, Proceedings of the International Conference on Supercomputing, ACM, 1997, pp. 333-339.

[6] G. F. Pfister, *In Search of Clusters, 2nd ed.*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1998.

[7] D. J. Singh, *Planewaves, Pseudopotentials and the LAPW Method*, Kluwer, Dordrecht, 1994.

[8] T. L. Sterling, J. Salmon, D. J. Becker, D. F. Savarrese, *How to Build a Beowulf*, MIT Press, 1999.

[9] C. W. Ueberhuber, *Numerical Computation*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1997.

[10] B. Wilkinson, M. Allen, *Parallel Programming Techniques and Applications Using Networked Workstations and Parallel Computers*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999.