Feldberechnung mit Personal Computern : Grundlagen und Erfahrungen

Autor(en): **Hafner, C.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **80 (1989)**

Heft 9

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-903669

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Feldberechnung mit Personal Computern: Grundlagen und Erfahrungen

Ch. Hafner

Die hohe Leistungsfähigkeit von PCs erlaubt heute, auf diesen Probleme zu behandeln, welche noch vor wenigen Jahren nur auf Grossanlagen mit enormen Kosten durchgeführt werden konnten. Auf gut ausgebauten – z.B. mit Transputern bestückten – PCs können heute auch kleinere Anwender numerische Berechnungen elektromagnetischer Felder vornehmen. Dank ihrer relativ einfachen Struktur konnten die an der ETH entwickelten MMP-Programme problemlos auf PCs übertragen und für Transputer parallelisiert werden.

Grâce à leurs hautes performances, les PCs permettent de traiter aujourd'hui des problèmes que seules de grosses installations pouvaient le faire il y a quelques années, et ceci au prix d'une énorme dépense. Avec des PCs bien équipés, par exemple de transputers, les petits utilisateurs peuvent procéder à des calculs numériques de champs électromagnétiques. Grâce à leur structure relativement simple, les programmes MMP développés à l'EPFZ ont pu être transférés sans problèmes sur des PCs et parallélisés pour transputers.

Adresse des Autors
PD Dr. *Christian Hafner*, Institut für Feldtheorie und Höchstfrequenztechnik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Die Leistungsfähigkeit der Personal Computer ist in der letzten Zeit enorm stark gesteigert worden. Damit kommen PCs nicht mehr nur als einfache Ein- und Ausgabehilfen bei der numerischen Feldberechnung in Frage. Von besonderem Interesse dürfte die direkte Behandlung einfacherer Feldberechnungsaufgaben auf PCs zunächst für den Unterricht und für kleinere Firmen sein. Es lassen sich heute aber auch aufwendige Problemstellungen direkt und effizient mit gut ausgerüsteten PCs behandeln. Dabei ergeben sich insgesamt fast immer geringere Wartezeiten als auf Mainframes oder sogar Supercomputern, mit dem grossen zusätzlichen Vorteil, dass die Wartezeit für aufwendige Rechnungen recht genau abgeschätzt werden kann.

Für die numerische Feldberechnung ist in erster Linie die schnelle Verarbeitung reeller Zahlen ausschlaggebend. Dazu tragen Compiler, welche effiziente Codes erzeugen, und vor allem Coprozessoren und FPA (Floating-Point-Accelerator) bei. Dazu ist allerdings zu bemerken, dass die meisten Geschwindigkeitsangaben völlig unbrauchbar sind. So schneidet beispielsweise ein AT mit 80 287-Coprozessor nur für kleinere Feldberechnungsaufgaben (bei denen I/O-Operationen dominieren) besser ab als ein XT mit 8087-Coprozessor von gleicher Taktfrequenz (Tab. I). Ein 386er mit 80 387-Coprozessor ist indessen klar schneller, insbesondere wenn er zusätzlich mit einem FPA (z. B. Weitek mW1167) bestückt ist und ein passender Compiler (z. B. NDP-Fortran) verwendet wird. Damit wird schon eine Geschwindigkeit erreicht, welche derjenigen von Workstations und kleineren Mainframes entspricht.

Von besonderem Interesse ist gegenwärtig die Entwicklung der T800-Transputer von Inmos [1]. Ein T800 ist etwa einem 80 386-Prozessor mit 80 387-Coprozessor und mW1167-FPA äquivalent; man erhält ihn jedoch zu einem weit geringeren Preis. Ausserdem können mehrere T800 in einen einfachen PC eingebaut werden. Ge-

Maschine	MHz	Proz.	Coproz.	Weitek	C	CA/C	R/C	RA/R
XT-comp.	8.0	8088	8087	-	7.5	0.87	0.42	1.0
M 24 SP	10.0	8086	8087	-	5.2	0.85	0.37	1.0
AT 03	8.0	80286	80287	-	9.9	0.79	0.30	0.9
M 380	16.0	80386	80387	-	2.2	0.78	0.34	0.9
M 380	16.0	80386	80387	1167	0.8	0.85	0.31	1.0
Sun 3/50	16.0	68020	68881	-	3.3	0.68	0.14	0.9
Sun 3/260	25.0	68020	68881	1164/1165	1.1	0.68	0.11	1.1
Sun 4/200	16.7	9010IU	9010FPC	1164/1165	0.5	0.71	0.14	1.1

Tabelle I Ausführungszeiten der MMP-Programme auf verschiedenen PCs und Workstations für mittlere Probleme mit M = 100 . . . 500 Gleichungen und *N* = 30 . . . 160 Unbekannten

C relative Rechenzeit der komplexen Programme

R relative Rechenzeit der reellen Programme. Mit diesen lassen sich nur verlustfreie Probleme lösen.

CA relative Rechenzeit für eine Variante mit spezieller Berücksichtigung der Nullen in der Systemmatrix (komplex)

RA relative Rechenzeit für eine Variante mit spezieller Berücksichtigung der Nullen in der Systemmatrix (reell)

genwärtig sind Boards mit bis zu 20 T800 mit je einem 1-MByte-Speicher erhältlich. Zwei solche Boards verleihen einem PC etwa ¼ der Geschwindigkeit eines Cray X-MP, und dies zum Preis einer gut ausgebauten Workstation. Da bei numerischen Feldberechnungen die Rechenzeit eng mit dem erforderlichen Speicher zusammenhängt, erscheint die Aufteilung des Speichers auf mehrere Prozessoren auch sinnvoll. Wichtig ist allerdings, dass die Programme effizient parallelisiert werden können, so dass alle verwendeten Transputer wirklich gleichzeitig arbeiten und möglichst voll ausgelastet werden. Dies kann insbesondere bei strukturell komplizierten Programmen sehr schwierig sein und wird sicher Rückwirkungen auf die verwendeten numerischen Methoden haben.

Zu bemerken ist, dass sich im Bereich der numerischen Feldberechnungen viele der neueren Programmiersprachen nicht bewährt haben. Für relativ aufwendige Programme werden hier fast ausschliesslich Fortran und C verwendet. Entsprechende Compiler sind auch für den FPA mW1167 und für Transputer erhältlich, während verschiedene andere auf sich warten lassen.

Numerische Feldberechnungen verlangen meist eine recht hohe numerische Genauigkeit, da sehr grosse Matrizen zu bearbeiten sind. Ausserdem werden oft komplexe Zahlen verwendet. Da Fortran zu den wenigen Sprachen gehört, welche den Zahlentyp Complex kennen, ist diese Sprache besonders beliebt. Leider ist aber dieser Typ nur mit einfacher, d. h. meist zu geringer Genauigkeit standardisiert. Zwar bieten verschiedene Compiler auch Complex mit doppelter Genauigkeit an, oftmals sind jedoch die zugehörigen Operationen und Funktionen schlecht oder gar fehlerhaft ausgeführt, so dass einige Vorsicht am Platz ist. Beispielsweise können bei Unix-Fortran (Sun-Workstations) enorm hohe Rechenzeiten entstehen.

Das Hauptproblem bei Feldberechnungen – das gegenwärtig von den PC-Herstellern eliminiert wird – besteht in der Speicherbeschränkung auf 640 kByte. Da immer noch sehr viele Maschinen mit lediglich 512 kByte ausgerüstet sind, sollten Feldberechnungsprogramme für PCs gegenwärtig noch mit relativ wenig Speicher auskommen, d. h. Codes und Matrizen müssen relativ klein sein. Die nachstehend beschriebenen MMP-Programme kommen dieser Anforderung entgegen und liessen sich deshalb auch problemlos auf PCs übertragen.

Die MMP-Programme

Die den MMP-Programmen[1] [2; 3; 4] zugrunde liegende Methode wurde an der ETH seit etwa 1980 entwickelt. Sie basiert auf Verfahren, welche Ende der 60er Jahre zu Gunsten der heute weit verbreiteten MoM (Method of Moments) aufgegeben wurden. Erst nachdem die MoM sehr stark ausgebaut war und offenbar die hochgesteckten Erwartungen doch nicht erfüllte, fand eine gewisse Rückbesinnung statt. Gegenwärtig arbeiten verschiedene Gruppen in den USA, Japan, Israel und der BRD an ähnlichen Programmen wie die Fachgruppe für elektromagnetische Felder der ETH. Es scheint, dass eine Einigung auf den Namen GMT (Generalized Multipole Technique) zustande kommt. Die MMP-Programme sind inzwischen weitgehend ausgereift. Deren relativ einfache Struktur erlaubt eine sehr rasche Anpassung an neue Hardware und Compiler. Dies hat sich z.B. bei der Parallelisierung der Programme gezeigt: Innerhalb weniger Tage konnte ein einfacher und doch recht effizienter Algorithmus entwickelt und implementiert werden.

Die wichtigsten Eigenschaften der GMT sind:

- Die Feldgrössen werden durch Reihenansätze approximiert. Dabei werden Basisfunktionen, welche die Feldgleichungen in den einzelnen Feldgebieten analytisch lösen, verwendet. Wegen ihres lokalen Verhaltens haben sich Multipolfunktionen als besonders geeignet erwiesen: Der Einfluss dieser Funktionen ist in der Nähe des Poles gross und wird für grosse Distanzen vernachlässigbar. Dies ermöglicht eine sehr flexible, problemangepasste Entwicklung.

- Die numerische Berechnung der Multipolfunktionen ist wesentlich aufwendiger als etwa die Berechnung einfacherer Funktionen, welche bei anderen Verfahren, z.B. Finite Elemente (FE), Finite Differenzen (FD), Method of Moments (MoM) verwendet werden. Es hat sich aber gezeigt, dass die Rechenzeit für die Berechnung der Funktionen nur bei sehr einfachen Aufgabenstellungen ins Gewicht fällt (und bei diesen ohnehin sehr klein ist).

- Ein wichtiger Vorteil der verwendeten Basisfunktionen ist die Möglichkeit einfacher Zooming-Routinen. Wir bezeichnen dieses Vorgehen als semianalytisch, da nur noch die Grenzbedingungen (auf den Grenzen der Feldgebiete) numerisch zu erfüllen sind.

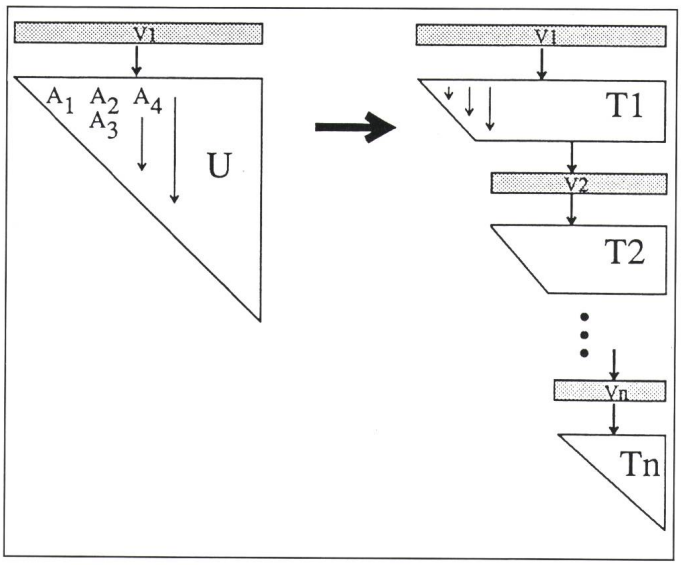
- Die Semi-Analytizität der GMT erlaubt einerseits relativ genaue Berechnungen elektromagnetischer Felder auch im Nahfeld, auf der Oberfläche und selbst in verlustbehafteten Materialien, ergibt aber auch zunächst eine Einschränkung auf stückweise lineare, homogene, isotrope Materialien. Ob diese Einschränkungen durch Erweiterung der Methode oder durch Kombination mit andern Verfahren aufgehoben werden kann, bleibt abzuwarten.

- Da die elektromagnetischen Feldgrössen selbst und nicht etwa Potentiale (wie z.B. bei FD) oder die Strom- bzw. Ladungsdichten (wie z.B. bei MoM) entwickelt werden, erübrigt sich die Berechnung der Feldgrössen aus den Potentialen bzw. Strom- und Ladungsdichten. Damit werden insbesondere aufwendige Integrationen (MoM) elegant und ohne Qualitätseinbusse vermieden. Obwohl die Berechnung der Multipolfunktionen numerisch nicht gerade trivial ist, ergibt sich deshalb bei den MMP-Programmen für die Berechnung der Elemente der Systemmatrix eine sehr geringe, d.h. praktisch vernachlässigbare Rechenzeit.

- Die Grenzbedingungen werden mit einer erweiterten Point-Matching-Technik behandelt. Sie werden in einzelnen Punkten der Gebietsgrenzen notiert und geeignet gewichtet. Das so entstehende (überbestimmte!) Gleichungssystem wird im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate gelöst. Es kann gezeigt werden, dass die Fehlermethode (mit geeigneter Fehlerdefinition) oder die Projektionsmethode (mit geeigneter Definition des Skalarproduktes und Galerkinscher Wahl der Testfunktionen) auf praktisch identische Lösungen führen – jedoch mit wesentlich grösserem Aufwand.

- Die Tatsache, dass nur die Grenzen und nicht die Feldgebiete selber diskretisiert werden, vereinfacht natürlich die Eingabedaten erheblich, was insbesondere im Hinblick auf das Arbeiten mit PCs sehr angenehm ist.

[1] Mehrfach-Multipol-Programme



Figur 1
Aufteilung der Dreiecksmatrix *U* in trapezförmige Teile *T1, T2 ... Tn* für parallele Verarbeitung mit Pipelinestruktur

Zu bemerken ist, dass viele Programme (z.B. NEC), welche auf der MoM beruhen, die bei der verwendeten Projektionsmethode anfallenden Integrale oft durch Einsatz der Diracschen Deltafunktion als Testfunktion vermeiden. Dies entspricht praktisch der einfachen Point-Matching-Technik und ergibt zwangsläufig weniger genaue Resultate. Insbesondere in Körpernähe bzw. auf der Grenze der Feldgebiete werden diese Verfahren unbrauchbar. Die erweiterte Point-Matching-Technik, welche in den MMP-Programmen implementiert ist, vermeidet die numerischen Probleme der einfachen Point-Matching-Technik, ohne den Aufwand wesentlich zu erhöhen.

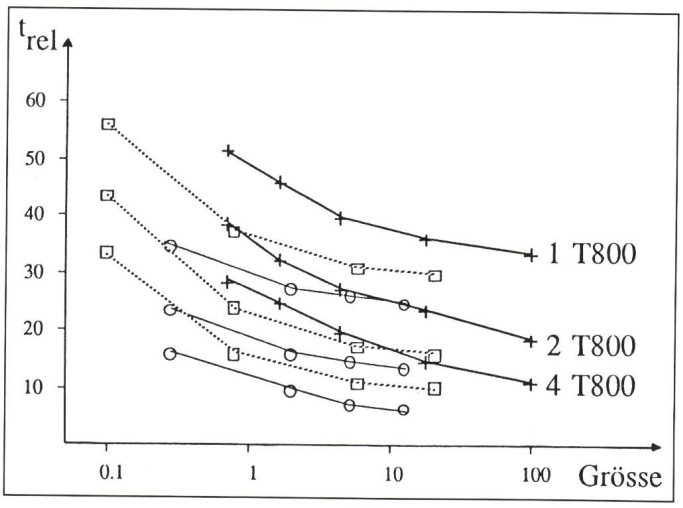
Gegenwärtig existieren MMP-Programmpakete für elektrodynamische (und im Grenzfall statische) Probleme mit erstens zylindrischer Geometrie und zweitens mit allgemeinen dreidimensionalen Geometrien. Die Materialien müssen stückweise linear, homogen und isotrop sein, die Zeitabhängigkeit harmonisch. Sowohl «Scattering»- als auch Eigenwertaufgaben (z.B. geführte Wellen auf unterschiedlichsten Konfigurationen) lassen sich damit lösen. Das Programmpaket enthält einen graphischen Editor zur schnellen Eingabe und Korrektur der Input-Daten und verschiedene Ausgabeprogramme (Plot von Feldpfeilen und Iso-Linien). An einem dreidimensionalen Input-Output-Paket für PCs und Workstations wird gearbeitet. Zudem werden Möglichkeiten zur Behandlung nicht harmonischer Zeitverläufe und anisotroper Materialien untersucht.

Parallelisierung der MMP-Programme

Aus Geschwindigkeitstests erkennt man, dass bei den MMP-Programmen für mittlere und grosse Problemstellungen fast die gesamte Rechenzeit für die Auflösung des Gleichungssystems benötigt wird. Da es sich dabei um ein überbestimmtes System handelt, wird – um Speicherplatz zu sparen – ein Updating-Verfahren verwendet, bei dem die rechteckige Systemmatrix A (mit M Zeilen und $N < M$ Kolonnen) auf eine Dreiecksform U (mit nur $N(N+1)/2$ Elementen) gebracht wird. A selbst wird dabei nicht gespeichert. Stattdessen werden die Zeilen $V1$ von A sukzessive berechnet und U nachgeführt (Updating). Eine grobe Abschätzung ergibt einen Rechenaufwand für das Updating einer Zeile, welcher proportional zum Quadrat von N bzw. proportional zur Fläche der Dreiecksmatrix U ist.

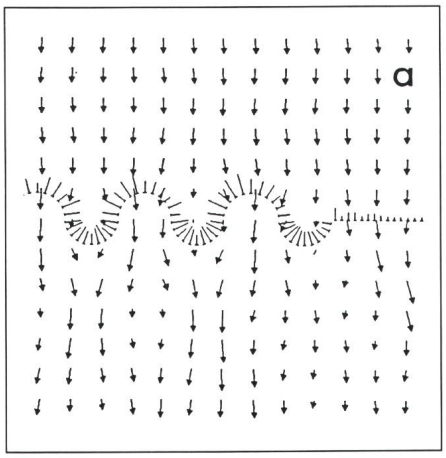
Die Arbeit für das Nachführen der Dreiecksmatrix lässt sich sehr einfach auf n Prozessoren bzw. Transputer verteilen: U wird in n etwa flächengleiche, trapezförmige Teile $T1, T2, ..., Tn$ zerlegt, welche je von einem Transputer bearbeitet werden. Der erste Transputer errechnet eine Zeile, d. h. den Vektor $V1$, bearbeitet den Teil $T1$ von U, errechnet den Vektor $V2$, der vom zweiten Transputer übernommen wird. Während dieser $T2$ bearbeitet, berechnet der erste Transputer einen neuen Vektor $V1$ und bearbeitet damit $T1$ usw. (Fig. 1). Nach einer gewissen Startphase arbeiten schliesslich alle Transputer gleichzeitig. Es ist offensichtlich, dass diese Pipeline-Struktur um so effizienter ist, je besser die Arbeit auf alle Transputer verteilt wird und je kürzer die Startphase im Vergleich zur gesamten Arbeit ist.

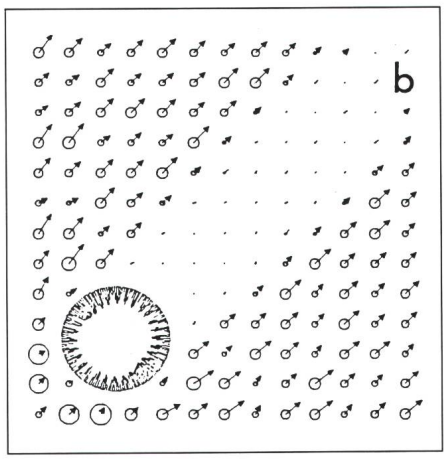
Um die Tauglichkeit dieses einfachen Verfahrens (bei dem ja nur ein sehr kleiner, aber rechenintensiver Teil des gesamten Programmes parallelisiert wird) praktisch zu prüfen, wurden verschiedene, zum Teil exotische Testbeispiele untersucht. Die Figur 2 zeigt die Rechenzeiten in Funktion der Problemgrösse für drei Beispiele unter Verwendung von 1, 2 und 4 Transputern. Die auf die Problemgrösse bezogene relative Rechenzeit ist für kleine Probleme grösser als für grosse Probleme, da dann die Zeit für die Berechnung der Zeilen ($V1$) stark ins Gewicht fällt. Werden mehrere Transputer verwendet, so wird bei kleinen Problemen nur der erste Transputer, welchem auch die Berechnung von $V1$ zukommt, ausgelastet, so dass die Rechenzeit t relativ hoch wird. Dies ist je-

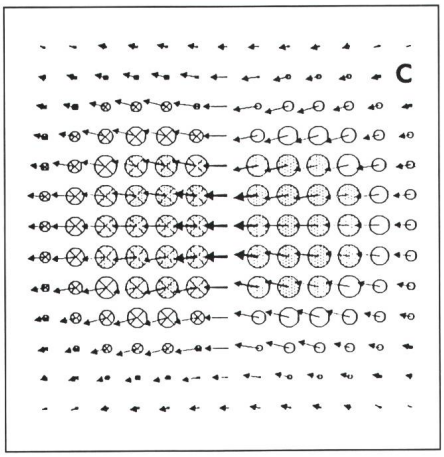


Figur 2
Relative Rechenzeiten verschiedener Beispiele in Funktion der Problemgrösse für Konfigurationen mit 1, 2 und 4 T800-Transputern

t_{rel} = t/Grösse [s]
Grösse = $M \times N^2/10^6$
+ Beispiel 1 Gerillte Oberfläche
□ Beispiel 2 Idealer Kreiszylinder
○ Beispiel 3 Gradientenfaser







Figur 3 Berechnungsbeispiele

a Ausschnitt aus gerillter Oberfläche. Zeitliches Mittel des Energieflusses (Poynting-Vektor) bei vertikal einfallender ebener Welle

b Zeitliches Mittel des Energieflusses (Poynting-Vektor) für schräg auf einen ideal leitenden Kreiszylinder einfallende, ebene Welle

c Elektrisches Feld der Grundwelle einer optischen Gradienten-Faser

doch nicht gravierend, da t ohnehin sehr klein ist. Bei grösseren Problemen hingegen ergibt sich eine gute Auslastung aller Transputer. Wie aus Figur 3a ersichtlich, hängt diese jedoch – wie auch die Rechenzeit selber – von der Art des Problems ab. Je nach Problemstellung kann nämlich die Systemmatrix voll oder aber eher schwach besetzt sein.

Das erste Beispiel behandelt die Streuung einer ebenen Welle an einer gerillten dielektrischen Oberfläche (Fig. 3a). Der Aufwand lässt sich einfach mit der Anzahl der Rillen steigern. Die sich ergebenden Systemmatrizen sind – unabhängig von der Rillenzahl – nahezu voll besetzt. Die relativ hohe Rechenzeit für Probleme dieses Typs überrascht deshalb nicht.

Im zweiten Beispiel wird die Streuung einer ebenen Welle an einem ideal leitenden Kreiszylinder untersucht. Im Lösungsansatz wird ein einziger Multipol verwendet, was dem bekannten analytischen Ansatz entspricht. Die Kolonnen der Systemmatrix werden hier orthogonal. Der Aufwand wird durch Erhöhung der maximalen Ordnung des Multipols und der Anzahl Matching-Punkte gesteigert. Die Systemmatrix ist nicht voll, aber doch recht gut besetzt. Die Figur 3 b zeigt den ausgeprägten Schattenwurf bei relativ hoher Frequenz der einfallenden Welle.

Als drittes Beispiel wird eine optische Gradienten-Faser durch ein Modell mit mehreren konzentrischen Kreiszylindern unterschiedlicher Dielektrizität angenähert. Der Aufwand wird durch die Anzahl der Feldgebiete gesteigert. Dabei ergeben sich stets sehr schwach besetzte Matrizen und deshalb – im Vergleich mit den andern Beispielen – kurze Rechenzeiten. Die Figur 3 c zeigt das elektrische Feld der Grundwelle.

Die Beispiele 1 und 3 ergeben etwa die obere und untere Schranke der Rechenzeiten für praktisch interessante Aufgabenstellungen. Selbstverständlich ist eine weitere Reduktion der Rechenzeiten durch Verbesserung der Methode (z.B. Berücksichtigung der Nullen in der Systemmatrix) oder durch Anwendung anderer Verfahren möglich. Es handelt sich hier lediglich um einen ersten Versuch, der jedoch zeigt, dass zum einen die verwendeten MMP-Programme sehr rasch neuen technischen Entwicklungen angepasst werden können und dass zum andern Transputer sicher eine interessante Alternative zu den Konzepten der Grossrechner darstellen.

Schlussfolgerung

Der praktische Einsatz – insbesondere der ausgereifteren 2D-MMP-Programme – hat gezeigt, dass das Arbeiten mit PCs nicht nur bequem, sondern in den meisten Fällen auch sehr effizient ist: Dateneingabe, Problemberechnung, Datenausgabe und Kontrolle sind auf einem einzigen Gerät möglich (zeitraubende Daten-Transfers entfallen). Die Ausführungszeit der Programme ist nicht von andern Benützern abhängig und daher recht genau voraussagbar. PCs sind praktisch überall verfügbar. Die Programme lassen sich bei Bedarf sehr rasch auf grössere Maschinen (Workstations, Mainframes) übertragen, was im umgekehrten Fall (bei Programmen, die auf Grossrechnern entwickelt wurden) meist nicht der Fall ist. Auch die Anpassung an neue Hardware ist relativ problemlos und konnte im Falle der Transputer in kurzer Zeit durchgeführt werden. Da die numerische Feldberechnung bisher zu den wichtigsten Aufgabenbereichen der Grossrechner gehört hat, wird hier der Trend zu kleineren, lokalen und doch leistungsfähigen Rechnern besonders deutlich. Angesichts dieser Entwicklung muss sicher auch die Bedeutung und der Sinn grosser Rechenzentren neu überdacht werden.

Literatur

[1] *C. Hafner:* Numerische Berechnung elektromagnetischer Felder. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag, 1987.

[2] *C. Hafner:* Numerische Berechnung geführter Wellenausbreitung. Bull. SEV/VSE 76(1985)1, S. 15 ... 19.

[3] *C. Hafner* u.a.: Ein Programmpaket zur Berechnung elektromagnetischer Felder. Bull. SEV/VSE 75(1984)7, S. 381 ... 383.

[4] *P.G. Kropf:* Paralleles Rechnen mit Transputern. Bull. SEV/VSE 79(1988)7, S. 356 ... 361.