

Von Zielen und Grenzen der Informatik

Roland Vollmar
Universität Karlsruhe (TH)

Mai 2000

Zusammenfassung

Erfolge verbinden und sind identitätsstiftend. Am Beispiel der Computerentwicklung wird skizziert, welchen Weg die Informatik zurückgelegt hat. Dass ihr eine (immer wachsende) Zahl von Fragen zu beantworten bleibt, dabei solch grundlegende wie die Unterscheidung von "Information" und "Wissen", wird an Beispielen erläutert. Zu ihrer Lösung ist eine entsprechende Ausbildung erforderlich, die neben (theoretischen) Erkenntnissen vor allem Methoden beinhalten sollte, um zum *Verständnis* zu führen.

Die Grenzen der Informatik zu kennen, von den "harten" der Beschränktheit des algorithmisch Ausführbaren bis zu den ethisch bedingten, gehört dazu.

Im Verhältnis zu anderen Wissenschaften und Fächern sollten sie allerdings im Sinne der (englischen) "frontiers" verstanden werden und - unter Bewahrung der jeweiligen Eigenheiten - als Herausforderung zur Überwindung gesehen werden.

Bemerkung

Der vorliegende Bericht stellt die leicht erweiterte Fassung meines zur 10-Jahresfeier der Technischen Fakultät der Universität Bielefeld eingeladenen und am 12.5.2000 gehaltenen Vortrages dar.

Die entsprechende Diktion wird beibehalten, hinzugefügt sind u.a. die Zitatstellen.

Tagesaktualitäten sollen nicht zur Sprache kommen!

Vielmehr will ich aus der schon etwas "abgehobenen" Sicht eines alternden Informatikers den Blick auf unser Fach richten und dabei seine Einbettung nicht außer acht lassen.

Der eher essayistische Stil meines heutigen Vortrages enthebt mich der Präsentation einer Gliederung und Sie der Notwendigkeit zu überlegen, wie weit ich mich dem Ende meiner Ausführungen schon genähert habe.

Um Ihnen die Möglichkeit zu geben, meine folgenden Behauptungen und Meinungen einordnen und einschätzen zu können, will ich zunächst etwas zu meiner Ausbildungs- und Berufsbiographie sagen: Ich studierte Mathematik in Heidelberg und Saarbrücken und kam dort schon 1960/61 mit Theorie und Praxis elektronischer Rechenanlagen in Kontakt: Herr Händler, der damals gerade bei Prof. Walther promoviert hatte (über ein Minimierungsverfahren) und bei Telefunken maßgebend an der Entwicklung der TR4, des damals schnellsten europäischen Rechners, beteiligt war, kam als Habilitand nach Saarbrücken. Prof. Dörr, ein "angewandter Mathematiker" hatte nicht nur ihn, sondern auch eine Zuse Z22 dorthin geholt. Schon bald war ich (natürlich auf Kosten meiner Studienzeit) freier Mitarbeiter bei Telefunken und sogar einige Zeit in Konstanz als technischer Angestellter tätig. Nach meinem Diplom in Mathematik (mit Nebenfach Physik übrigens - und nicht Informatik) folgte ich dann Prof. Händler nach Hannover und bin damit seit 1965 "offiziell" in der Informatik tätig, zunächst vor allem auf dem Gebiet der Formalen Sprachen und Komplexitätstheorie, in dem ich auch 1968 in Erlangen promovierte. Dies geschah in der 1966 gegründeten Technischen Fakultät der

Universität Erlangen-Nürnberg, der ersten ihrer Art in Westdeutschland, und ich war der erste, der dort in Informatik promovierte. Dies ist natürlich nicht mein Verdienst, aber Sie werden verstehen, daß es mich sehr freut, an Ihrer Technischen Fakultät zu deren 10-jährigem Bestehen sprechen zu dürfen. Neben meinem herzlichen Glückwunsch darf ich meinen Dank dafür überbringen!

Ab 1970 arbeitete ich zwei Jahre in der Industrie, und zwar nicht in der Computer- oder Softwarebranche sondern bei den Buderus'schen Eisenwerken in Wetzlar als Projektleiter für "technisch-wissenschaftliche EDV-Anwendungen". An die Universität Erlangen-Nürnberg kehrte ich 1972 zurück, weil inzwischen das von den Professoren Händler und Keidel, einem Physiologen, initiierte interdisziplinäre Projekt "Datenverarbeitung in Organismen und Rechenautomaten (DORA)" bewilligt worden war. Die faszinierende Tätigkeit in diesem Rahmen endete für mich 1974 mit der Annahme eines Rufes an die Technische Universität Braunschweig auf einen Lehrstuhl für Automatentheorie und Formale Sprachen. 1989 wechselte ich an die Universität Karlsruhe (TH) und übernahm den neu etablierten Lehrstuhl "Informatik für Ingenieure und Naturwissenschaftler".

Sie erwarten sicherlich nicht ein Resümee meiner Erfahrungen in wenigen Sätzen. Wenn sie im folgenden noch nicht mal explizit dargestellt werden, haben sie aber natürlich meine Sicht auf die Informatik und ihre Beziehungen zu anderen Wissenschaften und vielleicht sogar zum "gewöhnlichen Leben" beeinflusst.

Nähern wir uns jetzt unserem Thema "Von Zielen und Grenzen der Informatik", allerdings nicht auf dem Wege einer Definition von "Informatik".

Identitätsstiftend sind Katastrophen oder Siege oder weniger martialisch ausgedrückt, Erfolge.

Nachdem die oft beschworene "Jahr 2000" - Katastrophe nicht stattfand, müssen wir uns wohl auf die Erfolge stürzen und stützen.

- Und hier bekomme ich Schwierigkeiten mit meinem obigen Satz. Überspitzt gesagt, war die Informatik "zu erfolgreich":

Die Informatik spielt eine so bedeutende Rolle in so vielen Anwendungsgebieten, daß die Absolventinnen und Absolventen über einen breiten Bereich von Firmen, Verwaltungen und Forschungsinstituten verteilt sind, eine Tatsache, die es ihnen auch in wirtschaftlich weniger guten Zeiten leicht machte, einen Arbeitsplatz zu finden und die derzeit zu einer besonders starken Nachfrage führt. Zum anderen verhinderte die geringe Größe „reiner Informatik-Unternehmen“ in Deutschland die Herausarbeitung eines klaren, einfachen Bildes.

Das - in der Öffentlichkeit - eher diffuse Berufsbild (zuletzt offensichtlich geworden bei der Diskussion um die "green card") "prägt" oder vielmehr läßt im Unklaren, was Informatik ist und damit natürlich auch, wozu sie gut ist.

Der obige Hinweis auf die Anwendungsgebiete könnte fälschlicherweise den Eindruck aufkommen lassen, daß dieses Durchdringen lediglich die elektronische Datenverarbeitung betreffe. Lassen Sie mich deshalb einige eher handgreifliche Erfolge der Informatik aufzählen und durch das Skizzieren (nur) eines mir wichtig erscheinenden Gebiete "mein Bild" der Informatik entwerfen:

"Altmodischerweise" will ich mit Computern beginnen.

Die Steigerung ihrer Geschwindigkeit und die Erhöhung ihrer Speicherkapazität bei gleichzeitiger enormer Preisreduktion bedeuten einen ungeheuren Erfolg. Dadurch wurde es u.a. möglich, erschwingliche Autos mit ABS und Airbags auszustatten und z.B. hochwertige, bequeme Hörgeräte zu bauen. Aber auch die Programmierung oder besser gesagt, die Software-Erstellung braucht sich nicht zu verstecken: Programme, die global arbeitende Buchungssysteme ermöglichen, die zuverlässige Kommunikation über das Internet gewährleisten, und z.B. solche, die den weitgehend ortsunabhängigen Einsatz von Handys erlauben, sind hierbei zu nennen. Daß die Geschwindigkeit und die Perfektion solcher Systeme noch nicht immer beherrscht werden, sei beleuchtet durch den Hinweis auf das Aussetzen des Handels an der New Yorker Börse vor einigen Jahren. Die Verwendung von Programmen zum Entwurf von Häusern und Maschinen, einschl. Computern selbst, zur Auffindung von Lagerstätten, zur Wettervorhersage und Klimamodellierung, in der Astronomie, zum Einsparen teurer Experimente, z.B. in Crashtests, zur „Konstruktion“ von Molekülen wird bereits als selbstverständlich betrachtet. Daß all dies nicht der Informatik allein gutzuschreiben ist, versteht sich von selbst.

All diesen Entwicklungen liegen aber Ergebnisse aus den folgenden Bereichen zugrunde, die mit zur neuen Methodologie der Informatik beitragen:

- 1) *Algorithmisierung*: Das Auffinden und Erfinden von Algorithmen ist nicht nur die Grundlage zur Lösung von Problemen sondern verhilft zum tieferen Verständnis der verschiedensten Phänomene, Probleme und Prozesse.
- 2) *Formalisierung*: Formale Beschreibungen und Symbolmanipulationssysteme haben insbesondere für die Spezifikation realer Systeme und ihre Verhaltensweisen eine besondere Bedeutung gewonnen.

3) *Komplexitätsuntersuchungen*: Die Einsicht, daß formale Objekte und Prozesse eine inhärente Komplexität besitzen, zu deren Messung unterschiedliche Ressourcenmaße herangezogen werden können, trägt wesentlich zu ihrem Verständnis bei und hat weitreichende Auswirkungen bez. ihrer Anwendbarkeit.

4) *Untersuchung komplexer Systeme*: Während lange Zeit in den Naturwissenschaften Fortschritte dadurch erzielt wurden, daß Grundphänomene isoliert untersucht wurden, erlauben Informatikmethoden das Herangehen an interagierende, stark miteinander verkoppelte Systeme.

Wesentliche Fortschritte werden dabei erzielt durch

- Simulation und
- Visualisierung.

Abstrahierungen von realen Systemen erlauben eine Modellbildung, die sich in Programme übersetzen läßt und durch deren (wiederholte und parametrisierte) Ausführung Rückschlüsse auf die realen Systeme gezogen werden können und diesen innewohnende Gesetze aufgedeckt werden können. (Noch) nicht existierende Systeme können untersucht werden, wobei sogar die physikalischen und/oder biologischen Gesetzmäßigkeiten modifiziert werden können. Beschleunigung oder Verlangsamung von Vorgängen ist ebenso möglich wie z.B. deren Umkehrung.

Ergebnisse solcher Simulationen sind, wie auch die von umfangreichen Berechnungen, z.B. der Wettervorhersage, oder der statistischen Analyse sehr großer Datenmengen (z.B. beim sog. data mining) nur dann nutzbar, wenn sie in einer dem Menschen entsprechenden Form vorliegen. Dies gewährleisten Werkzeuge zur Visualisierung bzw. im dynamischen Fall, z.B. bei Crashtests, der Animation.

Hiermit ist nur ein kleiner Teil von dem angesprochen, was das informatische Vorgehen zu einer neuen Methodologie werden ließ. In den Natur- und Ingenieurwissenschaften bildet es, nicht nur nach Auffassung eines Gremiums, das als Schweizer Pendant zu unserem Wissenschaftsrat angesehen werden kann (und nach Hartmanis und Lin [H92]), neben theoretischem und experimentellem Vorgehen die dritte Säule der wissenschaftlichen Arbeitsweise. Die Informatik erweitert die durch Theorie und Experiment gebotenen Möglichkeiten beträchtlich, insbesondere in den bisher nicht zugänglichen Bereichen komplexer Systeme, wofür hier die Telekommunikationsnetze als ein Beispiel angeführt seien. Komplexe Vorgänge werden verstehbarer, es können Voraussagen über ihr (künftiges) Verhalten gemacht werden, die auch dazu benutzt werden können, entsprechende physikalische, chemische, biologische und technische Prozesse zu optimieren; in den Worten des Rubbia-Reports:

„Bringing closely together simulation (a simplified abstraction of reality) and modelling (a conceptual artificial representation of the real world) it offers the triple power of explanation, prediction and optimisation.“

Gehen wir jetzt etwas näher auf die drei genannten Begriffe "explanation, prediction, optimisation" ein und versuchen dabei, uns klar zu werden, warum die Gesellschaft (mehr oder weniger willig) bereit ist, Geld für die Wissenschaft auszugeben - und nicht z.B. nur für Autobahnen und Freizeitparks. Lassen wir dabei einmal u.a. die medizinische Wissenschaft außer Betracht und konzentrieren uns auf die Natur- und Ingenieurwissenschaften, wobei jetzt ohne weitere (eigentlich notwendige) Diskussion Informatik und auch Mathematik subsumiert seien.

Bis zum Ende des Kalten Krieges, also etwa bis zur Auflösung der Sowjetunion, wurden diese Wissenschaften gefördert nicht nur, aber entscheidend, um die Verteidigungsfähigkeit zu erhalten und auszubauen. Inzwischen hat sich die Priorität eher auf den "nationalen Wohlstand" verschoben, worunter eine Verbesserung der Lebensverhältnisse in einem weiten Sinne zu verstehen ist, nicht nur den Konsum betreffend sondern auch z.B. den Umweltschutz.

Da wir - notwendiger- und erfreulicherweise - davon abgekommen sind, uns "die Erde untertan" zu machen und begriffen haben, daß menschliches und menschenwürdiges Leben nur im Einklang mit ihr auf die Dauer wird möglich sein, gewinnt auch die Erkenntnis Raum, daß dabei eine Vielzahl von Interdependenzen zu beachten sind. Zur Beantwortung der sich dabei aufdrängenden Fragen der Optimierung wird die Informatik entscheidend auch methodologisch beitragen (müssen).

Daß den Natur- und Ingenieurwissenschaften zugetraut wird, Vorhersagen zu machen, ja daß dies bei oberflächlicher Betrachtung als ihr Charakteristikum angesehen wird, braucht wohl nicht ausführlich erläutert zu werden. So selbstverständlich ist es uns, daß z.B. die Astronomie Methoden entwickelt hat, eine Sonnenfinsternis vorherzusagen bzw. voraus zu berechnen und daß z.B. eine Brücke nicht erst gebaut werden muß, um festzustellen, daß sie bestimmte Lasten tragen kann.

Hingewiesen sei auf die Unterschiedlichkeit dieser beiden Beispiele: Während bei dem ersten ein natürliches System analysiert und dann modelliert wird, steht beim zweiten die Modellierung eines zu bauenden Systems, das gewisse Eigenschaften aufweisen soll, im Vordergrund. Natke [N99] spricht zur Klarstellung der Unter-

schiede von direkten Modellen und inversen Modellen. In der Informatik wird man es, ebenso wie in den (übrigen) Ingenieurwissenschaften, hauptsächlich mit Aufgaben letzterer Art zu tun haben. Insofern ist es auch naheliegend, deren Konstruktionsprinzipien, vor allem Modularisierung und Hierarchisierung, zu adaptieren.

S. Toulmin hat in einem Büchlein mit dem Titel "Voraussicht und Verstehen" [T81] m.E. sehr schön dargelegt, daß wir mit den (richtigen) Voraussagen allein nicht zufrieden sind bzw. sein sollten, sondern daß wir (zusätzlich) Verständnis gewinnen wollen. Ich denke, ein überzeugendes Beispiel ist das der Pharmakologie. Ist man zunächst vielleicht froh, ein Medikament gegen ein bestimmtes Leiden entdeckt zu haben, wird man doch nicht ruhen, bis man zumindest im Grundsatz die Wirkungsmechanismen aufgeklärt hat.

Wir wollen etwas näher auf das "Verstehen" in der Informatik eingehen; dem seien Bemerkungen über die Wichtigkeit des Begriffes "Information" vorangestellt (Ausführlicher wird zu dem Folgenden in [G97] eingegangen): Bis zu Beginn des Industriezeitalters wurde der Fortschritt in dem Maße erreicht, in dem die Menschen lernten, das Potential der Natur zu nutzen, um genügend Nahrung in geeigneter Form zu erlangen.

In der industriellen Ära kam es für die Menschen darauf an, das Potential und die Gesetze der Natur so zu nutzen, daß Energie in entsprechender Weise verfügbar war.

Im Informationszeitalter, in das wohl zumindest die "erste Welt" bereits eingetreten ist, werden Fortschritte in dem Maße erreicht, in dem die Menschen lernen, Zu-

gang zu Informationen in genügender Menge und in wünschenswerter Form zu haben.

Akzeptiert man diese Sicht, so liegt es nahe, der Informatik die Bedeutung für diese "Informationswelt" zuzugestehen, die die Physik für die physikalische, durch Energie charakterisierte Welt hat.

Nachdem ich oben auf einige Erfolge der Informatik eingegangen war, will ich in diesem Zusammenhang jetzt einige Fragen vorlegen, auf die vollständige Antworten noch ausstehen:

- 1) Was ist Information ?
Was ist Wissen ?
Wie können sie gemessen werden ?
- 2) Welche Elemente, Strukturen und Prozesse bilden die Informationswelt ?
Durch welche Gesetze und welche Begrenzungen ist sie geprägt ?
- 3) Welche Probleme können mit Informatikmethoden in Angriff genommen werden ?
- 4) Welche Rolle spielen Ressourcen wie Zeit, Speicher, Parallelität, Nichtdeterminismus, Zufälligkeit, Interaktion bei der Problemlösung?
- 5) Welche Fähigkeiten besitzen existierende und denkbare informationsverarbeitende Maschinen ?
- 6) Wie können formale Beschreibungsverfahren effizient genutzt werden ?
- 7) Was sind komplexe Systeme ? Wie können sie spezifiziert, entworfen, konstruiert und verifiziert werden ?
- 8) Wie sind Informatikmodelle zu erstellen ? Wie können sie zum Verständnis der physikalischen, der biologischen, der sozialen Welt genutzt werden ?

Bereits über die im ersten Punkt zusammengefaßten Fragen könnte man auch als Laie lange reden; um die Unterschiede zwischen "Information" und "Wissen" zu beleuchten, darf ich als Kompetenten Mittelstraß [M00] zitieren:

"Unübersehbar beginnt unter dem Signum einer *Informationsgesellschaft* eine rationale Kultur ihre Orientierungs- und Wissensformen zu verändern, nämlich eine Situation ins Auge zu fassen, in der der Begriff der Information an die Stelle älterer Wissens- und Orientierungsbegriffe tritt. Steht uns eine neue Götterdämmerung bevor, in der diesmal nicht eine archaische, mythische Kultur, sondern die rationale Kultur, die sie ablöste, untergeht? Gehören die Begriffe des Wissens und der epistemischen Autonomie, d.h. der selbständigen Wissensbildung, auf den Müllplatz der Geschichte [...] ?

Daß wir uns in einer Informationswelt einzurichten beginnen, in der sich die Informations-, Kommunikations- und Produktionsstrukturen schneller ändern als je zuvor, und daß unsere Gesellschaft im Begriff der Informationsgesellschaft ein neues Selbstverständnis gewinnt, bedeutet nicht, daß eine derartige neue Welt und eine derartige neue Gesellschaft ohne Probleme wären. Tatsächlich löst die Informationswelt nicht nur Probleme, sie schafft auch (neue) Probleme. Zu diesen gehört, daß Information zwar auf Wissen beruht, daß sie sich immer konsequenter aber auch an die Stelle des Wissens setzt. Die Folge ist, daß wir immer weniger durchschauen, was uns in Form von Informationen zur Verfügung steht. Während man sich Wissen strenggenommen nur als Wissender aneignen kann, Wissen den Wissenden voraussetzt, setzt Information im wesentlichen Verarbeitungskapazität und Vertrauen voraus. Informationen muß man vertrauen, wenn man ihr Wissen, das über die Information transportierte Wissen, nicht prüfen kann. Dies bedeutet aber, daß im Medium der Information Wissen und Meinung ununterscheidbar wer-

den; der 'Informierte' weiß in der Regel nicht, ob er in einer Wissenswelt oder in einer Meinungswelt lebt. [...]

Hier kommt es darauf an, sich klarzumachen, daß Information nicht eigentlich eine Wissensform, sondern eine *Kommunikationsform* ist. In Informationsform machen sich Wissen und Meinungen transportabel. Das heißt aber auch, noch einmal, daß diese sich in Informationsform einander angleichen, schwer voneinander unterscheidbar werden. Informationen sieht man in der Regel nicht an, ob sich hinter ihnen Wissen oder Meinungen verbergen. Und eben darin liegt das Problem mit einem Informationsbegriff, von dem manche schon meinen, daß er einen neuen Wissensbegriff darstelle. [...]

Während Wissen damit, wie Kompetenz, Gegensatz von Dummheit ist, gilt dies von Information nicht grundsätzlich und nicht in allen Fällen. Gemeint ist, daß der sachverständige Umgang mit Wissen eigene Wissensbildungskapazitäten und eigene begründungsnahe Beurteilungskapazitäten voraussetzt, der Umgang mit Information in der Regel nicht."

Und hier muß ich nun doch einige Bemerkungen zu dem in den letzten Monaten intensiv diskutierten Problem der notwendigen IT-Fachleute machen, nicht um zu polemisieren, sondern weil es zu unserem Thema gehört. "Inwiefern?" werden Sie sich fragen, wenn von Zielen und Grenzen der Informatik und nicht des Informatikstudiums die Rede sein soll.

Letzteres kann aber nicht ausgegrenzt bleiben, denn woher sollen denn die Wissenschaftler kommen, die die Informatik voranbringen? Natürlich soll durch das Studium nicht nur auf den Beruf der Wissenschaftlerin vorbereitet werden. Ist also die in vielen Prüfungsordnungen zu findende Forderung, daß Absolventen in der Lage sein sollen, Probleme mit aktuellen wissenschaftlichen Methoden zu lösen

insofern zu anspruchsvoll, als sie nur von einem Teil von ihnen im Beruf benötigt werden wird?

M.E. führt diese Frage zu dem wesentlichen Schwachpunkt der Diskussion über die Anzahl der benötigten IT-Fachleute: Es wird allzu oft nicht unterschieden zwischen Personen, die in der Lage sein sollen, z.B. eine Homepage für die Web-Präsentation einer Firma zu entwerfen und solchen, die z.B. befähigt sind, ein komplexes System, wie es das Internet darstellt, soweit zu verstehen, daß sie es - sagen wir es mal sehr global - "verbessern" können. Dem genius loci Tribut zollend würde ich vielleicht besser als Beispiel ein Problem nennen, bei dem ein Absolvent ein biologisches oder physikalisches System mit informatischen Methoden modellieren soll.

Was ist dazu nötig?

Meiner Überzeugung nach - schlagwortartig - ein *Verständnis* dessen, was die Informatik ausmacht. Dies ist leicht gesagt, aber nicht so einfach umzusetzen, weil sich dahinter unterschiedliche Auffassungen verbergen können.

Schauen wir uns einmal eine Erklärung aus dem "Etymologischen Wörterbuch" [K60] an. Dort heißt es u.a. >> "Er versteht seine Sache" ist ursprünglich Rechtsausdruck ' er vertritt sie (vor dem Thing) in überlegener Weise, bis er obsiegt'. Die Vorsilbe (s. ver-) steht im Sinn des lat. per- in perstare. Von der geistigen Beherrschung einer (Rechts-) Sache geht die Entwicklung zum richtigen Erfassen eines geistigen Zusammenhangs:...<<

Für die Informatik könnte man dies vielleicht dahingehend paraphrasieren, daß über das Beherrschen von Ergebnissen und Methoden hinaus, was wir mit Handhabungs- oder Anwendungswissen bezeichnen wollen, eine Einsicht in Zusammenhänge und Grenzen anzustreben ist.

Notwendig scheint mir dies insbesondere in der Informatik - wegen ihrer Jugend und damit ihrer nicht allzu großen Fülle von Ergebnissen (verglichen z.B. mit der Mathematik), aber auch ihres hohen Anspruches als Querschnittswissenschaft wegen. Für sie gilt in besonderem Maße was Mittelstraß [M98] sehr schön mit folgenden Worten beschreibt:

"Hier war und ist es allemal so, daß mit jedem gelösten wissenschaftlichen Problem neue Probleme entstehen, mit jeder beantworteten Frage neue Fragen, mit jeder gewonnenen Einsicht neue Unwissenheiten. Im Anschluß an ein schon bei Pascal [...] auftretendes Bild formuliert: Das (wissenschaftliche) Wissen ist eine Kugel, die im All des Nichtwissens schwimmt und beständig größer wird. Mit ihrem Wachsen vergrößert sich ihre Oberfläche und mit dieser vermehren sich auch ihre Berührungspunkte mit dem Nichtwissen."

Richtiger als die von Bodenheimer [B92] als Buchtitel verwandte Aussage "Verstehen heißt antworten" halte ich den Satz "Verstehen heißt fragen können." Wie schwierig es ist, im Anschluß an einen Vortrag über ein komplexes Gebiet oder auch an einen nur ungeschickt dargebotenen mehr als Höflichkeitsfragen zu stellen, ist uns wohl allen klar. Erinnern darf ich auch, wie es ist, einem nichttrivialen längeren Beweis zu folgen: Wenn man auch noch Schritt für Schritt "versteht", hat man am Ende doch oft das Gefühl, "das Wesentliche" nicht begriffen zu haben, also eine Einsicht in den Gesamtzusammenhang nicht erhalten zu haben. Ähnlich

geht es, wenn man zu nah vor dem Werk eines Pointillisten steht: Man sieht Farbpunkte - aber kein Bild.

Während sich letzteres leicht durch Zurücktreten erhalten läßt, gibt es zum Verstehen von Beweisen keinen Königsweg.

Über *Einsicht*, ein anderer Begriff für Verständnis, zu verfügen, setzt Kenntnisse voraus - und je weniger die den "Zufälligkeiten technischer Entwicklungen" (F.L.Bauer) unterworfen sind, desto haltbarer und länger nutzbar sind sie zweifellos. Deshalb und meiner Biographie wegen plädiere ich für das Vermitteln theoretischer Ergebnisse. Allerdings sollten die sich nicht auf solche aus der sog. "theoretischen Informatik" - nebenbei gesagt, ein Rudiment einer m.E. völlig überholten Strukturierung des Faches - beschränken, sondern Prinzipien und Methoden der Analyse und der Konstruktion komplexer Systeme, seien sie natürlich, technisch oder gedanklich gegeben, ebenso umfassen wie die äußerst wichtige Algorithmik.

Über ersteres will ich detailliertere Aussagen machen, damit Sie einen sinnlichen Eindruck von dem bekommen, was ich meine.

Die Möglichkeiten des algorithmisch "Machbaren", z.B. formuliert in der Church-Turing-These, sollten ebenso wie das Wissen um die Existenz algorithmisch unlösbarer Probleme zum Bildungskanon aller Wissenschaftler gehören, die mit Computern Umgang pflegen. Informatiker sollten darüber hinaus nicht nur um das Vorhandensein dieser Grenze wissen, sondern sich auch näher mit deren Verlauf auseinandersetzen.

Ich denke dabei einmal an "minimale" universelle Maschinenmodelle, wie z.B. daß zwei Zustände bzw. (allerdings nicht gleichzeitig) zwei Bandsymbole bei 1-Band-Turingmaschinen ausreichen - letzteres auch als "Hinweis", daß die binäre Welt der Computer wirklich keine echte Einengung bedeutet oder, daß für Registerma-

schinen zwei Register genügen, aber auch an die Trennlinien - die keineswegs schon alle bekannt sind - zwischen entscheidbaren und unentscheidbaren Fällen von Problemen. Beispielhaft seien hier (Gruska [G97] zitierend) genannt:

- Bei 1-dimensionalen Turingmaschinen ist das Halteproblem entscheidbar, wenn das Produkt der Anzahl der Zustände und der Bandsymbole ≤ 6 ist und unentscheidbar, wenn es ≥ 24 ist.
- Das Äquivalenzproblem ist für Registermaschinen mit 7 Befehlen entscheidbar, mit 8 Befehlen unentscheidbar.
- Das Postsche Korrespondenzproblem über einem zweielementigen Alphabet ist entscheidbar, wenn die Listenlängen ≤ 2 sind und unentscheidbar, wenn sie ≥ 7 .

Das letztgenannte Beispiel führt uns nahtlos über zu Komplexitätsbetrachtungen und damit in das Gebiet des Handhabbaren oder effizient Machbaren: Es ist unmittelbar zu sehen, daß eine vorgegebene Längenbeschränkung der Indexfolge ein beliebiges Postsches Korrespondenzproblem entscheidbar werden läßt.

Können wir damit sicher sein, eine Lösung zu erhalten? Bekanntermaßen ist die Antwort "im Prinzip ja, aber ...". Der mit dem "aber" zum Ausdruck kommende Vorbehalt besteht "technisch gesehen" darin, daß die vorgestellte beschränkte Version des Postschen Korrespondenzproblems *NP*-vollständig ist.

M.E. kann die Einführung quantitativer Aspekte über Aufwandsabschätzungen von Algorithmen nicht hoch genug veranschlagt werden. Und dies unabhängig davon, was wir von der "unsicheren" Grenze zwischen *P* und *NP* halten mögen.

Jedenfalls erlaubt z.B. die Zeitkomplexität eine rationale Aussage über die Güte von Algorithmen zu machen. Damit kommen weitere "Grenzen" ins Spiel: Gelingt

es, untere Komplexitäts-Schranken für ein Problem nachzuweisen und hat man Algorithmen, die mit diesem Aufwand auskommen, kann man sich *eigentlich* weitere Bemühungen sparen. "Eigentlich" sagte ich, weil es da noch einiges zu beachten gibt:

- Üblicherweise hat man nur "worst case"-Ergebnisse, ist aber eher am durchschnittlichen Verhalten interessiert.
- Möglicherweise hat man nur Instanzen des Problems zu betrachten, die spezielle Eigenschaften haben, wofür vielleicht doch noch Verbesserungen erzielbar sind.
- Oft ist nicht nur eine Ressource beschränkt, so daß Aussagen über Produktkomplexitäten realistischer wären.
- ...

Ein positives Resümee können wir aber ziehen:

Das Wissen um und die Kenntnis von Komplexitätsgrenzen macht die Nutzung der Computer effizienter.

Stößt man in Verfolgung einer Technik an (zumindest derzeit) unüberwindliche Grenzen, wird man einen anderen Weg ausprobieren. Ein *möglicher*, mir sehr sympathischer, ist der des Parallelismus, *wenn es darum geht*, Geschwindigkeitsgewinne zu erreichen. Daß meiner Überzeugung nach bei Parallelverarbeitung die Modellierung realer Systeme "natürlicher" ist und daß Redundanz leichter zu organisieren ist, sei dabei einmal außer Betracht gelassen.

Ich gehe nicht nur meiner persönlichen Vorlieben wegen auf dieses Gebiet ein als vielmehr deshalb, weil an ihm deutlich zu machen ist, daß Grenzziehungen unter unterschiedlichen Aspekten erfolgen können und daß dabei auch deutlich unterschiedliche Ergebnisse die Folge sind.

Drei Sichtweisen sollen gestreift werden:

1. die technisch-algorithmische
2. die abstrakt-modellhafte und
3. die physikalische

und anschließend soll kurz erläutert werden wie physikalische Grenzen auf die Modellbildung rückwirken.

"Technisch-algorithmisch" soll auf Untersuchungen verweisen, die im wesentlichen zum Ziel haben, für bestimmte Typen von Parallelrechnern - wobei Anzahl von Prozessoren und z.B. Speichergröße variabel gehalten werden - für gewisse Problemklassen - deren Abgrenzung ist selbstverständlich ebenfalls Forschungsgegenstand - "gute" parallele Algorithmen zu entwickeln und diese effizient zu implementieren. In erster Näherung wird man solche Algorithmen dann als "gelingen" betrachten, wenn die Ausführungszeiten umgekehrt proportional zur Ressourcengröße, also normalerweise der Anzahl der Einzelprozessoren, sind. Die Grenzen des durch Parallelismus Erreichbaren, lassen sich nicht so einfach beschreiben, es sei deshalb nur angemerkt, daß trotz sog. Amdahlschem Gesetz sogar superlineare Beschleunigungen erzielbar sind, was ganz grob gesprochen mit Möglichkeiten beim Einsparen von Wegverfolgungen zu tun hat.

Der Eigenart von Parallelrechnern entsprechend - es gibt nicht *den* Parallelrechner, sondern eine Vielzahl von Konstruktionen, nicht nur technisch gesprochen, sondern von der Grundkonzeption her - gibt es auch eine Vielzahl abstrakter Modelle. Um diese Problematik zu verdeutlichen, will ich hier nur eines erwähnen, und zwar eines, das in gewisser Weise ein Extrem darstellt: Die nichtdeterministische listenverarbeitende parallele Registermaschine (s. z.B. [V95]). Mit ihr lassen sich die Probleme aus NP in logarithmischer Zeit lösen! Wie kommt man zu einer solchen Aussage?

>Eine Menge< trägt natürlich der Nichtdeterminismus des Modells dazu bei. Aber auch das sog. uniforme Komplexitätsmaß spielt eine Rolle, die Tatsache nämlich, daß beliebig lange Wörter in einem Schritt z.B. zerlegt oder zwei solche Wörter konkateniert werden können. Und dazu kommt, daß mit fortschreitender Zeit eine exponentiell wachsende Anzahl von Prozessoren aktiviert werden kann.

Wenn wir uns wohl auch darüber einig sind, daß das skizzierte Modell nicht von besonderer Nützlichkeit sein dürfte, so ist die Frage nach den auf jeden Fall vorzunehmenden Änderungen nicht einfach zu beantworten: Wie schon eingangs bemerkt, sollten "technische Zufälligkeiten" bei diesen Modellierungen keine wesentliche Rolle spielen, gerade weil Entwicklungen in diesem Bereich gleichsam über Nacht die gesamte Landschaft ändern können: Wäre Kommunikation einfach z.B. mittels Licht (ohne physische feste Verbindungen) zu realisieren, wäre für einen Parallelrechner sicherlich der vollständige Graph das Kommunikationsnetzwerk der Wahl.

Hat man "klassische Rechner" im Auge, d.h. sieht man einmal von den noch offenen Möglichkeiten von Quantencomputern ab (s. z.B. [G99]), wird man sich wohl, Schorr [S83] folgend, auf zwei Grundannahmen verständigen können:

1. Jedes Prozesselement nimmt ein endliches Volumen >0 ein.
2. Informationsübertragung ist durch die Lichtgeschwindigkeit beschränkt.

Dann läßt sich beweisen, daß jeder auf diesen Annahmen basierende Parallelrechner in Polynomialzeit von einem sequentiellen Computer simuliert werden kann.

Damit haben wir eine weitere Grenzlinie aufgezeigt, nämlich die, die durch den Einsatz noch so vieler Prozessoren nicht überschritten werden kann.

Wenn dies auch ernüchternd klingen mag, hat es doch den Vorteil, unserer Intuition entgegenzukommen. Und außerdem darf nicht übersehen werden bzw. gering geachtet werden, daß z.B. eine für einen sequentiellen Rechner durch ein Polynom gegebene Zeitschranke durch Parallelverarbeitung um "mehrere Grade" gesenkt werden kann und damit Probleme von der "faktischen Unlösbarkeit" in den "handhabbaren Bereich" transformiert werden können. In diesem Zusammenhang sei auch darauf verwiesen, daß bei manchen Problemen bessere Algorithmen spektakuläre Beschleunigungen nach sich ziehen. Oosterlee et al. [O97] geben ein Beispiel, bei dem auf diesem Wege ein Faktor > 400 erhalten wurde und merken dazu an, daß die "Kombination von Adaptivität und Parallelität [...] eine der Herausforderungen des Wissenschaftlichen Rechnens" sei.

Kommen wir zurück auf physikalische Grenzen, die für unser Fach relevant sind. Von Bremermann [B74] gibt es eine sehr frühe Abschätzung - über quantenphysikalische Argumentation - über die maximal erreichbare Rechengeschwindigkeit. Sie liegt so hoch, daß wir uns während unserer Lebenszeit sicherlich nicht damit zu befassen brauchen.

Anders ist es um eine weitere physikalische Größe bestellt: die beim Rechnen erzeugte Wärme. Das Problem der Wärmeabgabe stößt mit dem Aufkommen tragbarer Computer wieder verstärkt auf das Interesse der Forschung, auch wegen der Frage des Energieverbrauchs.

Von irreversiblen Berechnungen, also solchen, bei denen aus dem Ergebnis nicht auf die Eingabe rückgeschlossen werden kann, weiß man, daß sie zwangsläufig Energie verbrauchen und damit Wärme erzeugen müssen.

Dies ist anders bei reversiblen Vorgehen, das im Prinzip ohne Energieverbrauch auskommt. Da man weiß, daß man alle Berechnungen so "erweitern" kann, daß sie reversibel werden, so gibt es z.B. universelle reversible Turingmaschinen, sollte das Problem gelöst sein, - ist es aber nicht, weil zumindest derzeit dem unbegrenzten reversiblen Vorgehen technische Schwierigkeiten entgegenstehen.

Im Zusammenhang mit Überlegungen zur dreidimensionalen Packung aktiver Prozessorelemente spielt die Wärmeabgabe eine besondere Rolle, hat man doch - bei einem naiven Ansatz - nur die Oberflächen zur Abstrahlung. Es läßt sich in der Tat zeigen, daß z.B. für das Modell des dreidimensionalen Zellularautomaten Probleme existieren, die wegen der begrenzten Wärmeabgabemöglichkeiten nicht mit der prinzipiell möglichen Geschwindigkeit behandelt werden können [S97].

Abschließen will ich diesen Abschnitt über Beispiele informatikimmanenter Grenzen mit einem Zitat von Gruska [G97] (übersetzt):

"Die Suche nach Grenzen zwischen dem Möglichen und Unmöglichem ist eines der Hauptanliegen [...] der Wissenschaft. Die Entdeckung solcher Grenzen [...] steht oft am Beginn einer langen Kette fruchtbarer Beiträge zur Wissenschaft. [...]"

Wenn auch - wie bereits an einigen Stellen angedeutet - der Grenzverlauf noch nicht überall bekannt ist, so ist vielleicht doch der Hinweis angebracht, daß diese Grenzen "hart" sind, in dem Sinne, daß unter den jeweils festgelegten Voraussetzungen entsprechende Aussagen bewiesen sind.

Über andersartige Grenzen, die für die Informatik von Bedeutung sind, entweder weil sie sie strikt einhalten sollte - Stichwort "ethische Grenzen"- oder gerade zu ihrer Überwindung beitragen sollte - Stichwort "Menschen mit speziellen Bedürfnissen"- habe ich an anderer Stelle ausführlich gesprochen [V99], so daß ich diesen Punkt hier übergehen will.

Um nochmals anders aufzufassende "Grenzen" handelt es sich beim Verhältnis der Informatik zu anderen Wissenschaften - einem Thema, dem an dieser Fakultät natürlich eine besondere Aufmerksamkeit gewiß sein dürfte. Ich bin überzeugt, daß Sie alle schon Ihres Selbstverständnisses wegen dieses Gebiet nach allen Richtungen ausgelotet haben und ich von Ihnen darüber sehr viel lernen könnte. Betrachten Sie deshalb meine Ausführungen dazu nur als solche aus der persönlichen Sicht eines "Laien".

Lassen Sie mich wieder mit einem Zitat beginnen [M69]:

" ... Nach unserem (i.e. kontinentaleuropäischen -d. A.) Empfinden ist eine Grenze etwas Festes, Geschlossenes - zeitweise vielleicht umkämpft, aber doch im wesentlichen unverrückbar [...]. Für den Angelsachsen ist *frontier* das Gegenteil, nämlich etwas Offenes [...]. Die >>Grenze<< [...] wurde zum Inbegriff alles Lockenden und Lohnenden, zum Ort, wo den Tapferen und Tüchtigen zwar Gefahr, aber auch reicher Gewinn erwartet, solange sie nur >>offen<< ist; eine >>geschlossene<< Grenze bedeutet das Ende der Hoffnung, den Zwang zur Resignation. [...]"

Ich denke, es findet breite Zustimmung, wenn ich dafür plädiere, Grenzen zwischen den Wissenschaften, bzw. speziell zwischen der Informatik und anderen Wissenschaften in diesem Sinne der *frontiers* zu verstehen.

Ich will das Thema nicht sehr vertiefen, sondern nur einige Zitate zum Verständnis der Informatik anführen.

F.L. Bauer sieht die Informatik als Ingenieurwissenschaft, allerdings in besonderer Nähe zur Mathematik [B91]:

"Innerhalb der gesamten Geisteswissenschaft ist eben die Mathematik die einzige exakt zu nennende Spielart; sie steht deshalb von den Ingenieurwissenschaften der Informatik am nächsten, der einzigen, die sich mit immateriellem, mit 'physik-freiem' *ingenium* befaßt. Das verbindet Mathematik und Informatik, macht sie zu Geschwistern."

Zemanek sagt dazu [Z92]:

"Die Nähe zu Gehirn und Geist macht die Informationstechnik zu einer Brücke zwischen Natur- und Geisteswissenschaften und gibt ihr selbst geisteswissenschaftliche Züge, mehr noch: Geisteswissenschaftliche Natur; sie ist mehr als Technik, so wie sie mehr als Mathematik ist, auch wenn Technik und Mathematik ihr Anfang waren und ihr Bild gestalteten."

Und bereits 1981 schrieb Ganzhorn [G81]: "Mit der >Information< als Element technischer Einrichtungen hat sich unversehens ein neuer [...] Bereich aufgetan, der typisch interdisziplinär seinen Platz zwischen Mathematik, Logik, Ingenieurwissenschaften und Linguistik finden mag. Nachdem jedoch auch biologische Prozesse wesentlich informatorisch bestimmt sind, wird jeder Versuch einer Abgrenzung zum sachlich schwer vertretbaren Dogma [...]".

Unabhängig davon, welchen Aspekt der Informatik man betonen möchte, ob man sie als Strukturwissenschaft, als eine Werkzeugwissenschaft des Geistes, als Schlüssel- oder als Querschnittsdisziplin sieht (Näheres dazu findet sich in [C97].),

vermeiden sollte man den Versuch, der Abgrenzung gegenüber anderen Gebieten, sondern sich bemühen, die positiven Seiten der Verwandtschaft zu entwickeln.

Gerade aber interdisziplinäres Arbeiten gedeiht nur in einem geeigneten Biotop. Zunächst wieder ein Zitat (von Kohler [K00]): "Oder hat Karl Schmid recht, wenn er 1973 [...] mit Nachdruck die <<Spontaneität des Forschens>>, das <<Originale>>, das <<Unkonforme>>, Querköpfige allen <<Wissenwollens>> unterstreicht und damit die <<autonome Freiheit des Forschers>> gegen jegliche Planungsziele verteidigt?"

Sie werden sich nach dem bisher Gehörten nicht wundern, daß dies für mich eine rein rhetorische Frage darstellt. M.E. wird man statt von Forschung eher von einer Entwicklungstätigkeit sprechen müssen, wenn am Beginn einer Arbeit die Ergebnisse bereits zu erkennen sind. Und dies soll durchaus nicht negativ verstanden werden, allein schon deshalb, weil wohl auch der Hauptteil der „reinen“ Forschung aus der Verfolgung sichtbarer Wege besteht - und ich habe im bisherigen Vortrag des öfteren auf solche Notwendigkeiten hingewiesen, und ich möchte ausdrücklich betonen, daß ich dies keineswegs als zweitklassig oder auch nur als einfacher ansehe. Wollen wir aber das uns oft vorgeworfene nur marginale Verbessern überwinden und genuin neue Methoden und Produkte entwickeln, so müssen auch Richtungen eingeschlagen werden, die ein Scheitern wahrscheinlicher machen als einen Erfolg. (Über die dabei zu überwindenden gesellschaftlichen Hürden kann ich aus Zeitgründen nicht sprechen.) Um Ihnen wenigstens einen Anhaltspunkt zu geben, wofür ich plädiere, will ich lediglich die Stichwörter Quanten-Computing und DNA-Computing erwähnen, aber auch darauf verweisen, daß ich im biologischen, insbesondere im physiologischen Bereich Ansätze sehe.

U.U. könnten dabei auch Teillösungen für die doch sehr verbesserungsbedürftige Interaktion zwischen Mensch und Computer gefunden werden.

Um es nochmals deutlich zu betonen: Forschung, die auf Anwendungen zielt oder auch diese nur im Auge hat, braucht keineswegs einen minderen Rang als "reine" Forschung zu haben, letztere hat meiner Auffassung nach aber nicht nur eine Existenzberechtigung im Rahmen der akademischen Freiheit, sondern ist unabdingbar für unser Verständnis der Welt und zur Erreichung u.a. der oben erwähnten Ziele.

Und da Wissenschaft von Generation zu Generation weitergegeben werden muß, braucht es vor allem begeisterte Menschen.

"Gute Lehrer und Lehrerinnen, die -auf allen Stufen und erst recht auf der universitären Ebene- dem vernünftigen Wissen und Wissen-Wollen auf die Sprünge helfen, sind nie bloss Kenntnisüberbringer, Funktionäre des Informationstransfers. Sie sind Hellmacher, Heimzünder, <<Aufwecker der Seele aus dem tiefen Schlaf der Gewohnheit >>, wie Ralph Waldo Emerson sagt. Um dazu aber imstande zu sein, braucht das Lehren die Spielräume der Individualität, die Rechte, die für die Stufe der Universität seit dem 19. Jahrhundert im Prinzip der <<akademischen Freiheit>> konzentriert sind, und nach wie vor gegen dogmatische Ansprüche, von welcher Seite sie auch erhoben werden mögen, eingeklagt und verteidigt werden müssen." [K00]

Tage, wie dieser heutige Festtag Ihrer Fakultät, sollten vor allem auch der Bestärkung im Streben nach solchen Idealen dienen!

Lassen Sie uns solche Tage auffassen (B. Steinbach zitierend) "als Prüfung in glücklichen Stunden zur Bekräftigung von [...] Grundvorstellungen aus historischem Bewußtsein."

Literatur

- [B91] Bauer, F.L.
Informatik und Algebra
In: Broy, M. (Hrsg.)
Informatik und Mathematik
Springer, Berlin, 1991, 28-40
- [B92] Bodenheimer, A.R.
Verstehen heißt antworten
Reclam, Stuttgart, 1992
- [B74] Bremermann, H.J.
Limitations on data processing arising from quantum theory
zitiert nach: Bremermann, H.J.: Complexity of automata,
brains, and behavior
In: Conrad, M., Güttinger, W., Dal Cin, M. (Eds.)
Physics and Mathematics of the Nervous System
Springer, Berlin, 1974, 304-331
- [C97] Coy, W.
Defining discipline
In: Freksa, C., Jantzen, M., Valk R. (Eds.)
Foundations of Computer Science
Springer, Berlin, 1997, 21-35
- [G81] Ganzhorn, K.E., Schulz, K.M., Walter, W.
Datenverarbeitungssysteme
Springer, Berlin, 1981

- [G97] Gruska, J.
Foundations of Computing
Thomson, London, 1997
- [G99] Gruska, J.
Quantum Computing
McGraw-Hill, London, 1999
- [GV97] Gruska, J., Vollmar, R.
Towards adjusting informatics education to information era.
In: Freksa, C., Jantzen, M., Valk, R. (Eds.)
Foundations of Computer Science
Springer, Berlin, 1997, 49-67
- [H92] Hartmanis, J., Lin, H. (Eds.)
Computing the Future
National Academy Press, Washington, D.C., 1992
- [K60] Kluge, F.
Etymologisches Wörterbuch der Deutschen Sprache
18. Auflage, de Gruyter, Berlin, 1960
- [K00] Kohler, G.
Über die Weisheit der Igel und die Einsichten der Hasen
Neue Zürcher Zeitung, 10.4. 2000, 23
- [M98] Mittelstraß, J.
Das Udenkbare denken
UVK Universitätsverlag, Konstanz, 1998
- [M00] Mittelstraß, J.
Der Bibliothekar als Partner der Wissenschaft
Manuskript eines in Leipzig im März 2000 gehaltenen Vortrages

- [M69] Mönch, K.
In: Clarke, A.C.
Anmerkung des Übersetzers
Im höchsten Grade phantastisch
Fischer, Frankfurt/M., 1969, 93
- [N99] Natke, H.G.
Systemtechnik und Gewässergüte: Operationalisierung
Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen
Gesellschaft, XLIX (1999), 81-98
- [O97] Oosterlee, K., Schüller, A., Trottenberg, U.
Durchbruch im Wissenschaftlichen Rechnen durch adaptive
Mehrgitterverfahren auf Parallelrechnern
Der GMD-Spiegel 3, 1997, 15 -18
- [S97] Sanders, P., Vollmar, R., Worsch, T.
Feasible models of computation: Three-dimensionality
and energy consumption
In: Lengauer, C., Griebel, M., Gortlatch, S. (Eds.)
Euro-Par '97, Springer, Berlin, 1997, 384-388
- [S83] Schorr, A.R.
Physical parallel devices are not much faster than
sequential ones
Information Processing Letters, 17, 1983, 103-106
- [T81] Toulmin, S.
Voraussicht und Verstehen
Suhrkamp, Frankfurt/M., 1981

- [V99] Vollmar, R.
Grenzüberschreitende Informatik?
Techn. Bericht 1999-16, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1999
- [V95] Vollmar, R., Worsch, T.
Modelle der Parallelverarbeitung
Teubner, Stuttgart, 1995
- [Z92] Zemanek, H.
Das geistige Umfeld der Informationstechnik
Springer, Berlin, 1992