ZUR QUALIFIZIERUNG DES TECHNISCHEN HINTERGRUNDES DER AUTOMATISCHEN SPRACHSIGNALVERARBEITUNG

Rüdiger Hoffmann

Technische Universität Dresden

1. Einleitung

Die automatische Sprachsignalverarbeitung (ASSV) wird in doppelter Hinsicht mit Architekturfragen konfrontiert. Zum einen hat sie anzugeben, welchen Aufbau ein für eine der zahlreichen praktischen Teilaufgaben der ASSV geeignetes, in der Regel echtzeitfähiges System haben soll. Zum anderen fordern die immer aufwendigeren Algorithmen in der Forschung so hohe Verarbeitungsleistungen, daß auch im experimentellen, nicht unbedingt echtzeitfähigen Bereich die Systemarchitektur vorrangig betrachtet werden muß. Beide Aspekte, die natürlich viele Gemeinsamkeiten haben, gelten noch trotz des ständig steigenden Angebotes an Prozessorleistung und Speicherplatz. Lediglich die hochgradig parallelverarbeitenden Strukturen bieten auf den ersten Blick ausreichende Größenordnungen an MIPS, die allerdings nur nutzbar gemacht werden können, wenn zu ihnen passende Verarbeitungsalgorithmen vorgelegt werden.

Die Entwicklung der Architekturen ist eng mit den Fortschritten der Modellbildung verknüpft, worauf für die ASSV in /5/ eingegangen wurde. Die Abhängigkeit der praktischen Realisierbarkeit von der Verfügbarkeit eines rechentechnischen Substrats ausreichender Leistungsfähigkeit führt zu einer engen Verknüpfung der Entwicklung der Geräteklassen der ASSV mit der Generationenfolge der Computertechnik /16/. Der vorliegende Beitrag hat das Ziel, folgende Gesichtspunkte etwas näher darzustellen:

a) Die gegenwärtigen politischen und ökonomischen Veränderungen haben in Erinnerung gerufen, daß die Prozesse der Technikentwicklung in globalere Prozesse eingebettet sind. Wir nehmen das Ende der Entwicklung einer DDR-eigenen Computertechnik zum Anlaß, eine kurze Bilanz ihrer Anwendung in der ASSV zu ziehen. (Abschnitt 2)
b) Während die Leistungsforderungen der Spracherkennung durch die Computertechnik noch nicht generell befriedigt werden, zeichnet sich für die Hilfsprozesse des "Computer Aided Speech Engineering" (CASE) die Herausbildung einer Geräteklasse auf der Basis von Workstations ab. (Abschnitt 3)
c) Parallel zur Entwicklung der Architekturen ist die Gestaltung der Softwaresysteme voranzutreiben. (Abschnitt 4)
d) Der Tendenz der ASSV, immer höhere Verarbeitungsleistungen der Computer zu fordern, kann nur durch Einbeziehung phonetischen Expertenwissens entgegengesteuert werden, das jedoch durch die klassische Phonetik nicht in geeigneter Form geliefert wird. CASE-Systeme erleichtern die experimentelle Gewinnung phonetischer Modellvorstellungen erheblich. Da diese nur allmählich anfallen und ihre Komplettierung nicht abgewartet werden kann, ist die Gestaltung von Hybridsystemen aus Experten- und "formalen" Komponenten eine aktuelle Aufgabe, die aber eine Anzahl von Problemen aufwirft. (Abschnitt 5)

2. Robotron-Rechentechnik und ASSV - eine Bilanz

Wie erwähnt, ist die Entwicklung sprachverarbeitender Systeme außer von der Qualifizierung der Modellvorstellungen hauptsächlich von der Verfügbarkeit moderner Rechentechnik und Schaltkreise abhängig. Die Arbeiten zur ASSV an der TU Dresden waren bis 1990 auf das rechentechnische Substrat des Kombinats Robotron angewiesen. Damit stand in den siebziger Jahren eine durchaus respektable Basis zur Verfügung. G. MERKEL, der ihre Entwicklung maßgeblich mitbestimmt hat, schätzt ein: "Aus meiner Sicht haben die ES 1040 (1973) und die K1520-Baugruppen (1978) zum Zeitpunkt ihres Erscheinens den höchsten Annäherungsgrad an das führende internationale Niveau, bezogen auf alle DDR-Rechner, gehabt, unmittelbar darauf folgt R 4000 (1972)" (/12/; Jahreszahlen von mir ergänzt). Ergänzend sei hinzugefügt, daß die ES 1040, ein IBM-kompatibler Großrechner, von uns für Analysezwecke genutzt wurde, während der Prozeßrechner R 4000 in seiner kleineren Variante KRS 4201 (1,3 µs Zykluszeit) Steuerrechner eines intensiv genutzten Sprachsignal-Experimentiersystems der TU Dresden (Analyse, DP-Worterkennung) sowie des heute noch wichtigen, zeichengesteuerten Formantsynthetisators ROSY war.

Das ebenfalls genannte System K 1520, ein OEM-System auf der Basis des Z80-kompatiblen Mikroprozessors U880 des Funkwerks Erfurt, hat aufgrund seiner hohen Qualität und breiten kommerziellen Verfügbarkeit für die DDR in Forschung und Industrie insgesamt einen Innovationsschub bewirkt, der meines Erachtens durch kein anderes einschlägiges Erzeugnis wieder erreicht wurde. Im Hinblick auf ASSV-Anwendungen bot das System Robotron die Grundlage dafür, erste Erkenner- und Synthesebaugruppen auf der Basis unserer Forschungskooperation in Kleinserien bereitzustellen. Außerdem bildet es heute noch die (durch Spezial- und Signalprozessoren aufgewertete) Basis für die Analysehardware des Sprachsignal-Experimentiersystems der TU Dresden. Dagegen hat das ursprünglich als Nachfolge-OEM-System konzipierte 16-Bit-Mikrorechnersystem MMS-16 wegen mangelnder kommerzieller Verfügbarkeit keine vergleichbaren Wirkungen hervorbringen können.

Die weitere Modellqualifizierung der ASSV führte insbesondere im Zusammenhang mit Experimenten zur Erkennung fließend gesprochener Wortfolgen zu steigenden Ansprüchen an den Steuerrechner des Experimentiersystems. Sie konzentrierten sich auf die (heute alltäglichen) Forderungen

- schnellerer Prozessor (Gleitkommahardware),
- multitask- und multiuserfähiges Betriebssystem,
- größerer Operativspeicher (Memory Management),
- schnelle Externspeicher,
- Erweiterbarkeit (nutzerfreundliches Bussystem).

Diesen Forderungen kam die Entwicklung des im RGW abgestimmten "Systems der Kleinrechner" (SKR) entgegen, das eine in den 80er Jahren wirksam gewordene Linie von (zunächst) PDP-11-kompatiblen Minirechnern ist, zu der Robotron die Serie K 1600 beisteuerte. Es gelang nach und nach, unser Experimentiersystem mit zwei K-1630-Konfigurationen auszubauen (Abb. 1). Gegenüber dem Zustand der siebziger Jahre vergrößerte sich im RGW jedoch der zeitliche Nachlauf zum Weltstand der Rechentechnik so stark, daß die von Robotron im SKR schließlich vorgelegte 32-Bit-Nachfolgefamilie K 1800 für die ASSV vor der nunmehr fälligen wirtschaftlichen Neuorientierung nicht mehr zum Tragen kam.

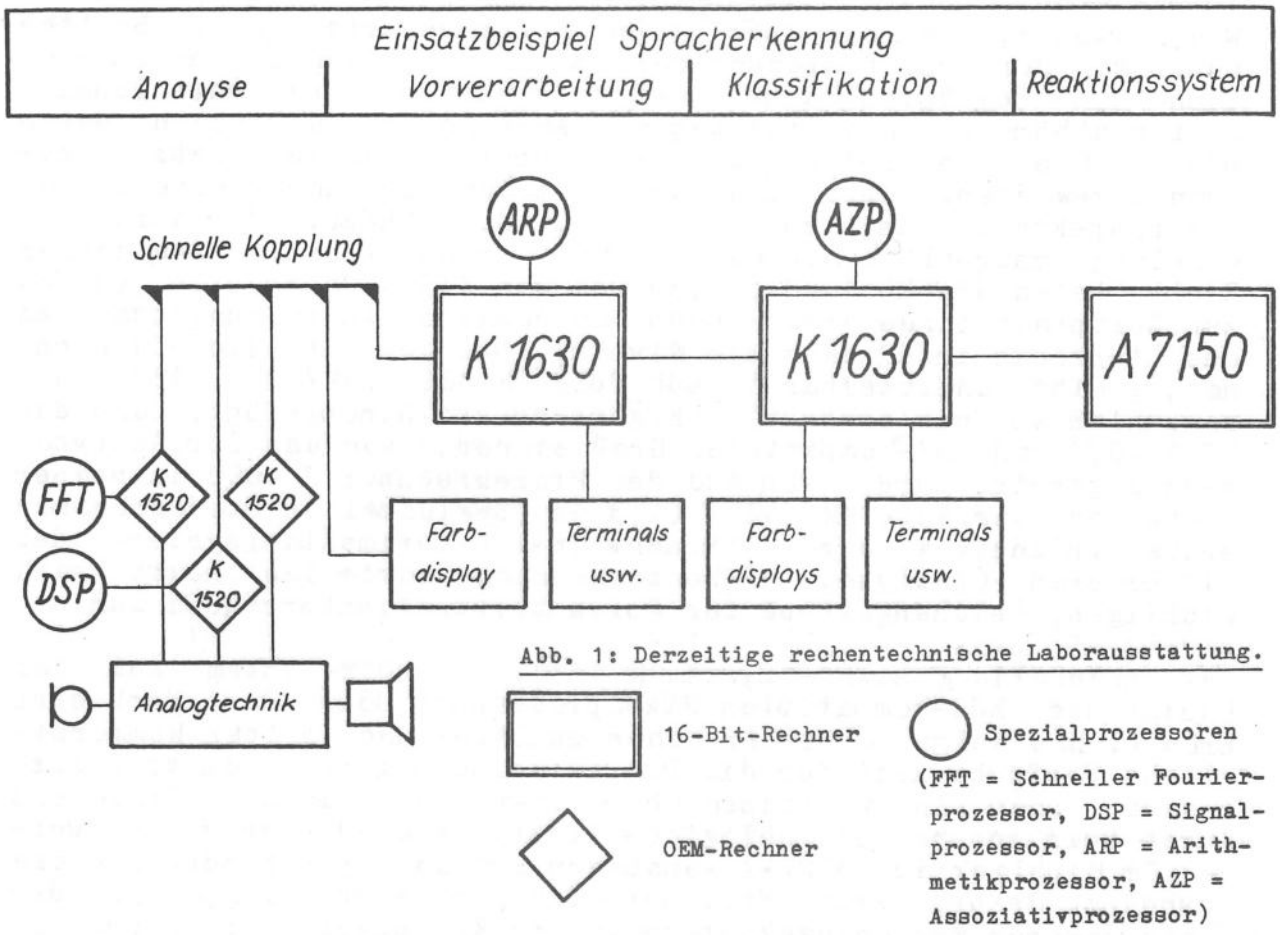

Abb. 1: Derzeitige rechentechnische Laborausstattung.

Mehrere Beiträge des vorliegenden Tagungsbandes zeigen, daß das Experimentiersystem mit der genannten SKR-Basis eine Anzahl bemerkenswerter Lösungen ermöglichte (Erkenner-Experimentiersoftware auf DP-Basis für fließend gesprochene Wortfolgen, Teillösungen für wissensbasierte Sprachsignalverarbeitung, hochwertige Experimentiermöglichkeiten für Untersuchungen an Sprachsynthetisatoren, Untersuchungen mit phonetischer Orientierung), die aber inzwischen an die Grenzen von Geschwindigkeit und Speicherplatz führten. Punktuelle Erweiterungen dieser Leistungsgrenzen wurden durch Vernetzungsarbeiten wie eine schnelle Kopplung mit den vorgelagerten Analyse-Mikrorechnern /6/ und durch die Adaption eines Assoziativprozessors /7/ angestrebt; letztere sowohl zur Speichererweiterung als auch im Hinblick auf die Nutzung in linguistischen Verarbeitungsstufen der ASSV. Diese Maßnahmen müssen aus heutiger Sicht als sehr aufwandsintensive Lösungen eingeschätzt werden. Die Implementierung moderner Standardalgorithmen der ASSV (HMM, Neurocomputing) war schließlich nur noch auf dem in /8/ beschriebenen Niveau von Demonstrationsprogrammen möglich, was unterstreicht, daß der Übergang zur nächsten Generation sprachverarbeitender Technik seitens des rechentechnischen Substrats an den Übergang mindestens zur 32-Bit-Technik (bzw. im Bereich der Applikation an die breite Verfügbarkeit von Signalprozessoren) zwingend gebunden ist. Dessen ungeachtet stellt das Dresdener System unseres Wissens ein Unikat im gesamten bisherigen RGW-Bereich (Comecon) dar.

3. CASE-Systeme

Signifikante Fortschritte in der Sprachsignalerkennung werden auch davon abhängen, wie gut es gelingt, die akustisch-phonetische Umsetzung als Eingangsstufe und die linguistische Strukturverarbeitung als nachgeschalteten Vorhersage- und Korrekturalgorithmus zu beherrschen. Während für letztere bewährte Konzepte prinzipiell existieren, sind die Vorstellungen auf der akustisch-phonetischen Seite nicht befriedigend. Insbesondere zeigt sich, daß bei vergleichbaren Aufgabenstellungen keiner der heute favorisierten Standardalgorithmen der Spracherkennung eine deutliche Überlegenheit aufweist. Das liegt offensichtlich daran, daß die eigentliche Leistungsreserve in der Vorverarbeitung liegt, deren Verbesserung mithin das zentrale Problem darstellt, wenn man leistungsfähige Algorithmen wie z. B. Neuro-Verfahren, die die Realisierung komplizierter Trennflächen im Merkmalraum erlauben, sinnvoll anwenden will. Das hat die Hinwendung zu den "phonetischen Invarianten" des Sprachsignals zur Folge /17/, deren Aufdeckung zum entscheidenden Schlüssel der ASSV wird.

So groß die Unsicherheiten bei der Bestimmung dieser relevanten Merkmale noch sind, so lang ist der Katalog potentieller Verfahren zu ihrer Extraktion. Daher ist die experimentelle Beurteilung von Verfahren (im Zusammenhang mit einer gegebenen Problemstellung) wichtig. Sie ist mit einem hohen Aufwand verbunden, der ökonomisch nur vertretbar ist, wenn die Arbeiten auf einem möglichst universellen, interaktiven Experimentiersystem durchgeführt werden können. Das unter 2. skizzierte Dresdener System kann als Vorläufer dieser Systemklasse betrachtet werden, für die hier die Bezeichnung CASE-Systeme (von Computer Aided Speech Engineering) verwendet werden soll. Wichtig sind sie zur experimentellen Beurteilung von Merkmalräumen insbesondere dann, wenn diese unterschiedlich geartete Koordinaten aufweisen (z. B. Formantdarstellung von Sprachsignalen).

Die Hardwarebasis von CASE-Systemen stellt heute kein grundsätzliches Problem mehr dar. Während z. B. für die "Speech Research Workstation" des MIT Mitte der 80er Jahre noch eine LISP-Maschine bemüht werden mußte /19/, stellen mittlerweile Standard-Workstations in Verbindung mit Signalverarbeitungskarten ausreichende Leistungsfähigkeit zur Verfügung. Die durch die "5-M-Regel"/2/ beschriebene untere Leistungsgrenze einer Workstation,

- 1 Million Befehle pro Sekunde (MIPS),
- 1 MByte Hauptspeicher,
- 1 Million Bildpunkte,
- 1 MBit/s Netzübertragungsgeschwindigkeit,
- Multi-Windowing / Multi-Tasking,

wird heute normalerweise weit überschritten (2 bis 20 MIPS durch 32-Bit-RISC-Prozessor, 4...128 MByte Hauptspeicher, Winchesterspeicher bis in den GByte-Bereich, parallele Grafik-Prozessoren, Ethernet 10 MBit/s). Damit lassen sich beim Experimentieren mit Sprachsignalen kurze Reaktionszeiten auch bei komplexeren Algorithmen erzielen, wobei die hochauflösende Farbgrafik in Verbindung mit einer Hardcopy-Möglichkeit besonders wichtig ist. Bei entsprechender Auslegung solcher Systeme wird sich ihr Einsatzbereich über die ASSV-Forschung hinaus auf klassische Felder der Sprachwissenschaft, Sprachpädagogik und -heilkunde und Musikwissenschaft im Sinne eines "Sprachlaborsystems" ausdehnen.

4. Softwaregestaltung

Ein wichtiger Aspekt der Entwicklung von Experimentiersystemen ist ein einheitliches Softwarekonzept. Aufgrund der Kompliziertheit verteilt sich die Bearbeitung der Software auf mehrere Mitarbeiter, die u. U. mit unterschiedlichen Programmiersprachen und auf unterschiedlichen Prozessoren (z. B. Spezialprozessoren für die Vorverarbeitung) arbeiten. Hier kann Wildwuchs jeden echten Fortschritt zunichte machen. Es ist notwendig, eine vernünftige Modularisierung durchzusetzen, rechtzeitig klare Schnittstellen zu definieren und in Form von Standards festzuschreiben. Für das spätere Zusammenwirken von unabhängig voneinander entwickelten Komponenten ist ein geeignetes Steuerkonzept zu entwickeln, das den perspektivischen Übergang zu einer Expertensystem-Strategie gestattet.

In der Praxis sind Standards für die Software von Experimentiersystemen mehr oder weniger an konkrete Systemrealisierungen gebunden (z. B. /10/, /19/). Für das unter 2. beschriebene Dresdener System wurde der in /13/ skizzierte Vorschlag unter einem RSX-kompatiblen Betriebssystem realisiert. Da sich ein relativ komplexer Schnittstellen-Standard nur durchsetzt, wenn für den Nutzer ausreichende Unterstützung zur Herabsetzung der Hemmschwelle vorhanden ist, wurde eine Hierarchie von Zugriffsroutinen geschaffen. Außerdem existiert eine Anzahl von Dienstprogrammen zur Darstellung und Manipulation standardgerechter Datenmengen, die für den Einsatz des Experimentiersystems sehr vorteilhaft sind. Eine tabellarische Übersicht über den erreichten Systemausbau kann /18/ entnommen werden.

Der Wert portabel gestalteter Software zeigt sich, wenn es z. B. darum geht, die Software des Experimentiersystems nach Abb. 1 so auf eine Workstation zu überführen, daß ein CASE-System im oben erläuterten Sinne entsteht. Real werden solche Bemühungen durch Besonderheiten der beteiligten Signalverarbeitungs-Hardware und häufig auch durch generelle Portabilitätsprobleme (z. B. unterschiedliche Gleitkommaformate) erschwert.

Wir sehen es deshalb als permanente Aufgabe an, die RSX-kompatiblen Zugriffsroutinen und Dienstprogramme bei Beibehaltung des einheitlichen Schnittstellen-Standards /13/ auch für andere Umgebungen zur Verfügung zu stellen. Damit werden die Schwierigkeiten wenigstens teilweise eliminiert, die dadurch entstehen, daß es in Anbetracht der Typenvielfalt auf dem Rechnermarkt nicht mehr gelingt, die Laborausstattung für die ASSV typenrein zu halten (schon durch die Dominanz von Kostenfaktoren).

Die hier nur angedeuteten, vielfältigen Aspekte der Softwaregestaltung führen immer wieder zu der Frage nach einer optimalen, ggf. auch unkonventionellen Umgebung. (So haben wir u. a. die Möglichkeit des Einsatzes von FORTH für die ASSV untersucht /4/ und sind dabei zu guten Ergebnissen, aber geringer Akzeptanz gekommen.) Es ist sicher, daß mit der weiteren Verbreitung von UNIX-kompatiblen Systemen eine Anzahl bisheriger technologischer Probleme verschwindet. Es genügt jedoch die Erwähnung von Stichworten wie Expertensysteme oder Parallelverarbeitung (Transputer!), um anzudeuten, daß die Softwaretechnologie auch in der ASSV ständiges Thema bleiben wird.

5. Entwicklungstendenzen

Beide in der ASSV verfolgten Ansätze zur akustisch-phonetischen Umsetzung, die phonetisch-wissensbasierte und die formal-mathematische Modellierung, führen bei der Anwendung auf die schwierigeren Fragen der Spracherkennung (Sprecherunabhängigkeit / fließende Sprache / große Wortschätze) zu extremen Leistungsforderungen. Dazu kommt, daß beide Herangehensweisen keinesfalls mit abgeschlossenen Konzepten aufwarten können. Wir teilen die Überzeugung, daß eine sinnvolle Verbindung beider auch an der TU Dresden gepflegten Linien zu "Hybridsystemen" nicht nur weitere Fortschritte bei Erkennungsleistungen, sondern auch eine Aufwandsoptimierung mit sich bringen wird.

Fragt man nach verwendbaren phonetischen Wissensquellen, dominiert als Antwort das Spektrogramm-Lesen. Die mit seiner Hilfe gewonnenen Regeln dienen insbesondere der Segmentierung des Sprachsignals, ggf. auch bereits einer Klassenzuordnung von Segmenten. Leider ist die Automatisierung des Spektrogramm-Lesens schwierig.

Weiterhin stehen für einzelne Lautklassen spezialisierte Modelle zur Verfügung. Die Verbindung der Wissensquellen miteinander und mit formalen Klassifikatoren führt nahezu zwangsläufig zu einer Expertensystem-Struktur, die für Experimentiersysteme auch günstig ist. Im Detail ergeben sich jedoch mehrere Probleme (z. B. Zeitsteuerung des Gesamtsystems). Zu ihnen zählt unter dem speziellen Gesichtspunkt der Kombination wissensbasierter und formaler Komponenten, daß deren Kompatibilität nicht automatisch gegeben ist. Für die verbreitetsten formalen Ansätze sollen dazu noch einige Bemerkungen folgen.

D P - E r k e n n e r sind relativ starr, so daß sich die Einbeziehung von phonetischem Know-how am ehesten in der Vorverarbeitung anbietet. Dadurch können Merkmalvektoren recht hoher Dimension entstehen, die aufwandssteigernd wirkt. Da diese Vektoren dann sehr unterschiedliche Komponenten enthalten können, entsteht zugleich das Problem, ein geeignetes Distanzmaß für die DP zu definieren. Gelingt in der Vorverarbeitung bereits die Identifikation gewisser Signalabschnitte, kann dieses Wissen durch eine partielle "Zwangsführung" des Optimierungsgraphen einbezogen werden /11/.

H M M - E r k e n n e r sind sehr flexibel; ihre Eigenschaft, sich zu Hierarchien kombinieren zu lassen, kommt der Struktur der Sprache entgegen. Die vorgeschaltete Vektorquantisierung bietet gute Möglichkeiten zur Einbeziehung phonetischer Expertise ("wissensbasierte Vektorquantisierung"), ohne daß der Verarbeitungsaufwand drastisch steigen muß /1//3/.

N e u r o n e n n e t z e sind für viele KI-Aufgaben prädestiniert. In ihrer Standardform (z. B. als Mehrebenen-Perzeptron) sind sie für die Spracherkennung allerdings nur im Sinne eines formalen (naiven) Ansatzes geeignet (Erkennung eines sonagrammartigen Bildes /9/). Neue Ansätze, die der Weiterentwicklung zu Folgenklassifikatoren dienen, sind deshalb sehr wichtig. Eine zweite Hauptaufgabe besteht darin, Neuronennetzwerke zu finden, die eine problembezogene (psychoakustische) Vorverarbeitung

ermöglichen und mit den neuronalen (Folgen-) Klassifikatoren zusammenpassen. Für solche Netzwerke gibt es Vorschläge (z. B. /15/) bis hin zu Cochleamodellen, die geeignet sind, die "direkte Modellierung" der Sprachverarbeitung voranzutreiben.

Die genannten Ansätze fordern zu ihrer Vervollkommnung und experimentellen Untersuchung erhebliche technische Mittel, die über die erwähnten CASE-Systeme weit hinausgehen und auf der Basis von Workstations nur dann bereitstehen, wenn eine Ergänzung durch geeignete Coprozessoren und Mittel zur Parallelverarbeitung (z. B. Transputernetzwerke) erfolgt. Ist mit dieser Hilfe eine anwendungstechnische Lösung erarbeitet worden, ist natürlich eine Aufwandsminimierung durch Beseitigung des Experimental-Overheads und sorgfältige Dimensionierung der Systemkomponenten möglich. Ein Beispiel für eine solche Minimierungsprozedur liefert /14/ anhand eines sprecherunabhängigen Worterkenners, der mit Phonemmodellen arbeitet.

6. Zusammenfassung

Es wurden die Arbeiten zur ASSV an der TU Dresden unter besonderer Berücksichtigung des rechentechnischen Hintergrundes betrachtet. Es wurde gezeigt, daß auf der Basis eines Mehrrechnersystems ein Experimentiersystem entstanden ist, das nach nunmehr vorliegender Verfügbarkeit leistungsfähiger PCs in ein vielseitig verwendbares CASE-Laborsystem überführt werden kann. Ein einheitliches Softwarekonzept schafft dafür die Voraussetzungen. Dagegen muß für die anspruchsvollen Ziele der Spracherkennung die technische Basis Hand in Hand mit der Modellentwicklung noch weiter qualifiziert werden; dabei wird die Kombination aus wissensbasierter und formaler Herangehensweise eine besondere Bedeutung erhalten.

7. Literatur

1. DE MORI, R.: Computer recognition of spoken letters and digits. In: NIEMANN, H., et al. (Eds.): Recent advances in speech understanding and dialog systems, Springer 1988, S. 207-233.
2. DOBROWOLSKI, L.; WANSCHURA, R.: Stand und Entwicklungstendenzen bei Workstations. Robotron-Elektronik Dresden, Fakten-Information 1/89.
3. HATON, J.-P., et al.: Interaction between stochastic modeling and knowledge-based techniques in acoustic-phonetic decoding of speech. Proc. IC ASSP, Dallas 1987, S. 868-871.
4. HOFFMANN, R.: Anwendung von FORTH in einem Experimentiersystem auf SKR-Basis. Studientexte zur Sprachkommunikation, Heft 2, TU Dresden 1986, S. 90-98.
5. HOFFMANN, R.: Besonderheiten der Architektur von Systemen zur automatischen Sprachverarbeitung. Wissensch. Ztschr. der TU Dresden 36(1987)6, S. 91-98.
6. HOFFMANN, R.: An experimental multiprocessor system for speech signal processing. Proc. MMPS 89, Stralsund 1989 = Informatik Informationen Reporte 5(1989)10, S. 85-93.

7. HOFFMANN, R.; KNOPF, I.: Einbeziehung eines Assoziativprozessors AZP K 2064 in ein sprachakustisches CAE-System. TU Dresden, Informationen 09-05-89.
8. HOFFMANN, R.: Zu einigen Entwicklungstendenzen in der Spracherkennung. Studientexte zur Sprachkommunikation, Heft 7, TU Dresden 1990, S. 25-54.
9. HOFFMANN, R.; KORTKE, A.; KORTKE, M.; REICH, S.: Neurocomputing in speech signal processing - Overview and application results in word recognition. Eingereicht für PARCELLA '90, Berlin 1990.
10. HUCKVALE, M. A., et al.: The SPAR speech filing system. Proc. Europ. Conf. on Speech Technology, Edinburgh 1987, Vol. 1, S. 305-308.
11. KIS, M. L.; MATAUSEK, M. R.: Machine speech recognition by BDSP, a knowledge based template matching algorithm. Proc. 13th Int. Congr. on Acoustics, Belgrade 1989, Vol. 2, S. 411-414.
12. MERKEL, G.: Vier Jahrzehnte Rechentechnik in der DDR. GI-Mitteilungen 4(1989)5/6, S. 147-152.
13. MITTIG, A.: Datenstrukturen in einem modularen Spracherkenner. Studientexte zur Sprachkommunikation, Heft 6, TU Dresden 1989, S. 37-41.
14. NIYADA, K.; HIRAOKU, S.; MORII, S.: Speaker-independent word recognition system for a large vocabulary based on phoneme recognition with high speed and compact hardware. (Japan.) Nihon onkyo gakkaishi, JASJ, 43(1987)4, S. 247-254.
15. REUTER, M.; KLUWE, R. H.: A new presentation of acoustical signatures and its simulation by neural networks. Univ. Bw. Hamburg 1990.
16. TSCHESCHNER, W.: Zur Entwicklung einer neuen Generation akustischer natürlichsprachiger technischer Kommunikationseinrichtungen. Wissensch. Ztschr. der TU Dresden 36(1987)3, S. 241-248.
17. TSCHESCHNER, W.: Die automatische Sprachsignalverarbeitung und die phonetischen "Invarianten". Studientexte zur Sprachkommunikation, Heft 5, TU Dresden 1988, S. 5-37.
18. TSCHESCHNER, W.: Möglichkeiten rechnergestützter phonetischer Untersuchungen. Proc. Sprechwiss. Tagung der Martin-Luther-Universität, Halle 1989 (im Druck).
19. ZUE, V. W., et al.: The development of the MIT LISP-machine based speech research workstation. Proc. IC ASSP, Tokyo 1986, S. 329-332.