

FORSCHUNGS FORUM

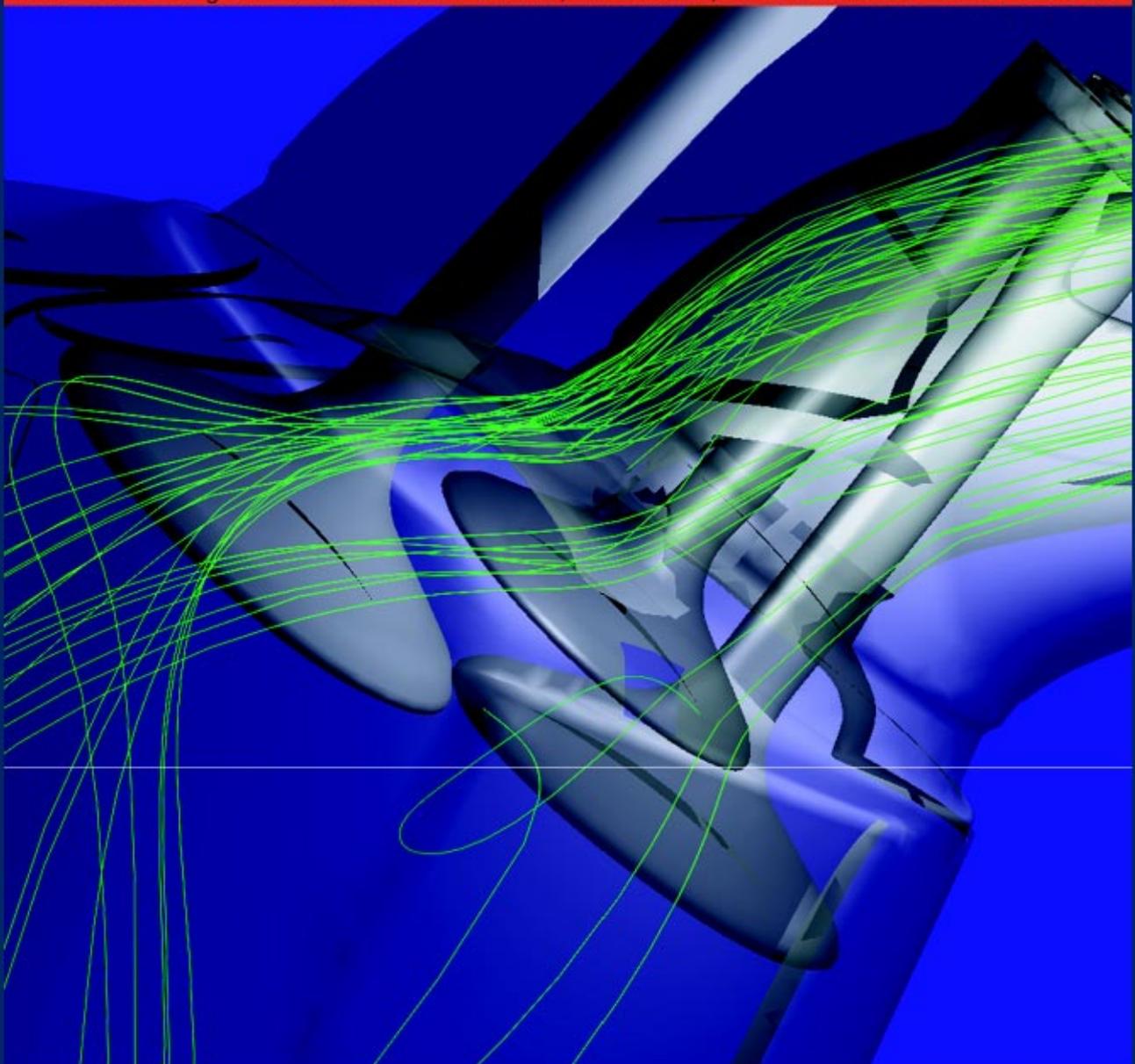
PADERBORN



Paderborner Universitätsmagazin

3-2000

Mit Beiträgen aus Paderborn, Höxter, Meschede und Soest



- **Forschung mit
Synchrotronstrahlung**
- **Virtuelle
Modelleisenbahn**
- **Kleine Lautsprecher
– großer Klang**

- **Strategische
Produktplanung**
- **Forschungsprojekt
Elbe-Ökologie**
- **Von der Hollerith-Maschine
zum Parallelrechner**

IMPRESSUM

Herausgeber

Prof. Dr. Wolfgang Weber
Rektor der Universität Paderborn

Konzeption und Redaktion

Ramona Wiesner

Referentin für Öffentlichkeitsarbeit

Referat Hochschulmarketing und Universitätszeitschrift

Warburger Str. 100, 33098 Paderborn

Tel.: 05251/60 2553, 3880

E-Mail: wiesner@zv.uni-paderborn.de

<http://hrz.uni-paderborn.de/hochschulmarketing>

ForschungsForum Paderborn (ffp) im Internet

<http://www.uni-paderborn.de/ffp/>

Wissenschaftlicher Beirat

Prof. Dr. Gitta Domik

Prof. Dr. Wilfried B. Holzapfel

Prof. Dr. Jörg Jarnut

Prof. Dr. Klaus Meerkötter

Prof. Dr. Winfried Reiß

Prof. Dr. Heinrich Schulte-Sienbeck

Prof. Dr. Jürgen Voß

Prof. Dr. Jörg Wallaschek

Drucklegung

Dezember 1999

ISSN (Print) 1435-3709

Layout

PADA-Werbeagentur

Heierswall 2, 33098 Paderborn

Druck

Bonifatius GmbH, Druck-Buch-Verlag, 33100 Paderborn

Anzeigenverwaltung

Verlag für Marketing und Kommunikation

D-Worms, Hafenstrasse 99

Auflage

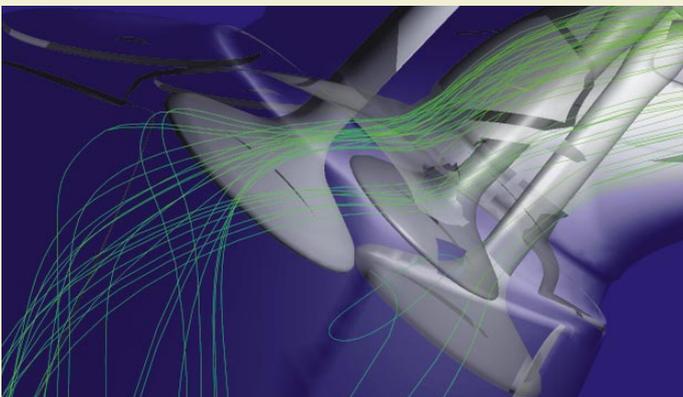
5 000

Um das Prinzip der Wirtschaftlichkeit zu garantieren, wird die Herstellung dieser und aller folgenden Ausgaben des „ForschungsForum Paderborn“ durch Anzeigen finanziert. Wir danken daher allen Firmen und Organisationen, die unser Projekt unterstützen.

Das ForschungsForum Paderborn erscheint weitestgehend auf der Grundlage der neuen amtlichen Rechtschreibregeln.

Titel

Einlasskanal eines Fünfventil-Motors (Audi-AG).
Berechnung dreidimensionaler Strömungen auf massiv parallelen Computersystemen, Fachbereich 17/Mathematik, Informatik und PC² (ab Seite 100).



Editorial



Liebe Leserin, lieber Leser,

Sie halten die 2. Ausgabe unseres Forschungsmagazins „ForschungsForum Paderborn“ in den Händen. Diese noch junge Zeitschrift, die über aktuelle Forschungsarbeiten und -ergebnisse unserer Universität berichtet, hat sich bereits jetzt zum tragenden Element der Öffentlichkeitsarbeit und Außendarstellung entwickelt. Mit einer Auflage von 5 000 Exemplaren erreicht sie die Zielgruppe der an Wissenschaft interessierten Bürgerinnen und Bürger unserer Region, aber auch die nationale wie internationale Fachwelt und trägt so dazu bei, hervorragende Ergebnisse sowie neue Erfolg versprechende Ansätze unserer wissenschaftlichen Arbeit bekannt zu machen.

Das Erscheinungsdatum der vorliegenden Ausgabe fällt in die ersten Tage meiner Amtszeit als Prorektor für Forschung und wissenschaftlichen Nachwuchs. Es mag Sie erstaunen, dass der Prorektor das Editorial verfasst, während sein Vorgänger das Vorwort schreibt, dennoch gibt es dafür einen guten Grund. Auf diese Art können beide, mein Vorgänger im Amt, Professor Dr.-Ing. Klaus Meerkötter, und ich uns bei den Personen bedanken, die ganz wesentlich zum Erfolg dieser Zeitschrift beigetragen haben. Unser besonderer Dank gilt Ramona Wiesner, die die Herausgabe dieses ForschungsForums anregte. Als Redakteurin hat sie das Magazin von Anfang an betreut und all die Dinge erledigt, die – neben sehr guten Beiträgen – auch erforderlich sind, um eine Zeitschrift zu machen, die den Vorstellungen der Herausgeber entspricht. Die Aufgabe, stets aktuelle und qualitativ erstklassige Aufsätze zu gewinnen, wurde vom wissenschaftlichen Beirat auch dieses Mal wieder hervorragend gelöst. Freuen Sie sich, liebe Leserin und lieber Leser, auf die Lektüre der Beiträge dieser Ausgabe.

Ich wünsche Ihnen dabei viel Vergnügen.

Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek

Prorektor für Forschung und wissenschaftlichen Nachwuchs

Seite 8

Rechtzeitig fertig:
Die neue Paderborner Stadtgeschichte
1200 Jahre – von Karl dem Großen
bis zu Wilhelm Lüke

Prof. Dr. Jörg Jarnut, Prof. Dr. Karl Hüser, Prof. Dr. Frank Göttmann



Seite 16

Jugend und Sport in
Deutschland und den USA – ein Kulturvergleich
Amerikanisierung der jugendlichen Sportkultur – Fakt
oder Fiktion?

Prof. Dr. Wolf-Dietrich Brettschneider, Dr. Hans Peter Brandl-Bredenbeck



Seite 24

Die virtuelle Modelleisenbahn
Computerunterstützung
komplexer Entscheidungen im Bahnverkehr

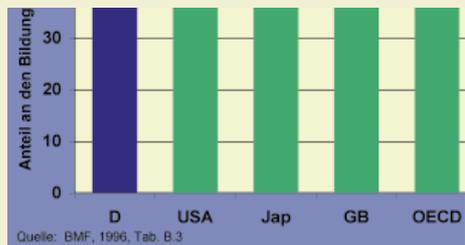
Prof. Dr. Leena Suhl, Dr. Taieb Mellouli, Dipl.-Wirt.-Inform. Johannes Goecke



Seite 30

Standort Deutschland
Eine langfristige Strategieentwicklung ist überfällig

Prof. Dr. Thomas Gries



Seite 36

Gesund altern
Zur Bedeutung von Ernährung
und Bewegung im Alter und im hohen Alter

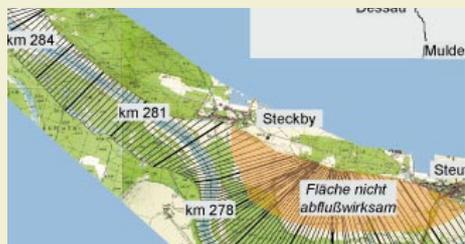
Prof. Dr. Helmut Hesecker



Seite 42

Projekt zur Elbe-Ökologie
Hydraulische und sedimentologische
Berechnungen zur Morphodynamik

Prof. Dr.-Ing. Klaas Rathke, Prof. Dr.-Ing. Günther Meon, Dipl.-Ing. Kerstin Adam



Seite 46

Dienstleistung im Verborgenen
Biologische Gegenspieler in Gräsern
und ihre praktischen Anwendungsmöglichkeiten

Prof. Dr. Volker H. Paul, Dipl.-Biol. Anke Holzmann, Dipl.-Chem. Johannes Reinholz, Dr. rer. nat. Peter Dapprich



Seite 52

Forschung mit Synchrotronstrahlung

Von der Röntgenstrahlung zur Synchrotronstrahlung

– ein historischer Abriss und aktuelle Anwendungen

Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Wortmann, Dipl.-Phys. Rainer Lübbers



Seite 58

Strategische Produktplanung

Der erste und entscheidende Schritt auf dem Weg zu den Produkten für die Märkte von morgen

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Dipl.-Wirt.-Ing. Andreas Kühn, Dipl.-Ing. Bernd Riepe



Seite 70

Schnelle Herstellung von Prototypen und Vorserien

Neue Möglichkeiten mit dem Vollformgießverfahren

Prof. Dr.-Ing. Ortwin Hahn, Dipl.-Ing. Michael Wappelhorst

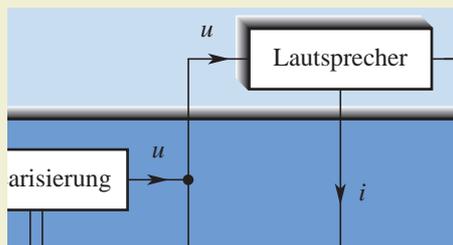


Seite 76

Kleine Lautsprecher – großer Klang

Modellierung und Reduktion des nichtlinearen Verhaltens von Lautsprechern

Dipl.-Ing. Joachim Waßmuth



Seite 82

Symbiose von Hardware und Software

Beispiel eines gelungenen Transfers von Grundlagenforschung in die industrielle Praxis

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Teich

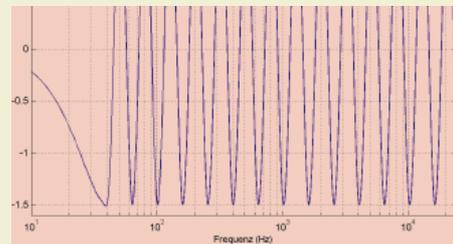


Seite 88

Neue Möglichkeiten in der Audiotechnik

31-Band-Equalizer mit einstellbaren Verzögerungszeiten

Prof. Dr. Sigmar Ries, Dipl.-Ing. Günter Frieling



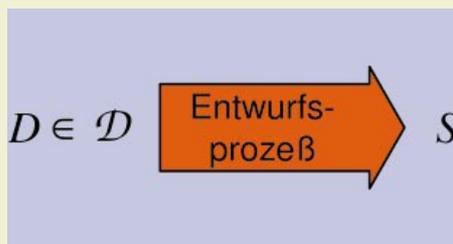
Seite 94

Dem Menschen abgeschaut

– fallbasiertes Lösen von Problemen

Nutzbarmachung eines mächtigen Paradigmas in der Informatik

Prof. Dr. Hans Kleine Büning, Dr. Benno Stein

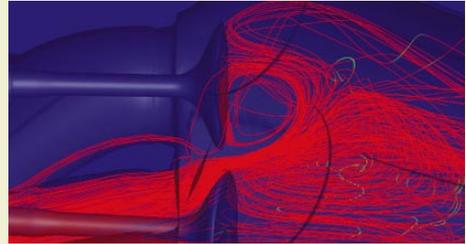


Seite 100

Berechnung dreidimensionaler Strömungen auf massiv parallelen Computersystemen

Eine Herausforderung für Mathematik und Informatik

Dipl.-Math. Stephan Blazy, Prof. Dr. Wolfgang Borchers, Dipl.-Math. Ralph Bruckschen, Dipl.-Math. Serge Kräutle, Prof. Dr. Reimund Rautmann, Dr. Nicole Roß, Dipl.-Math. Kerstin Wielage



Seite 106

Das Stadtspiel

Eine virtuelle Umgebung für den Geometrieunterricht der Primarstufe

Prof. Dr. Hans-Dieter Rinkens, Dorothea Backe-Neuwald, Prof. Dr. Gitta Domik, Dipl.-Inform. Sabine Volbracht



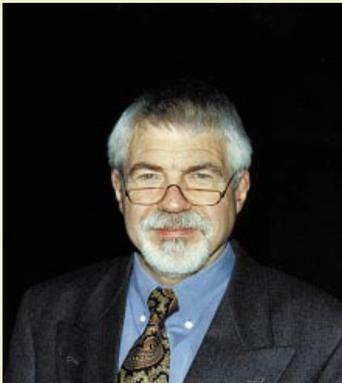
Seite 112

Von der Hollerith-Maschine zum Parallelrechner

Die alltägliche Aufgabe des Sortierens als Fortschrittsmotor für die Informatik

Prof. Dr. Friedhelm Meyer auf der Heide, Dr. Rolf Wanka





Vorwort

In kaum einem anderen Bereich unseres Lebens spielt eine präzise Sprache eine so wichtige Rolle wie in der Wissenschaft. Welche Bedeutung hat schon eine wissenschaftliche Aussage, wenn sie mit verschwommenen Begriffen und nicht genau definierten Wörtern getroffen wird? Dennoch verwenden viele Wissenschaftler gern eine Sprache, die den Laien und vielfach sogar den in der Nachbardisziplin arbeitenden Kollegen beeindrucken soll. Besonders beliebt ist die Verwendung von allgemein nicht gebräuchlichen Abkürzungen oder von sprachlichen Übertreibungen. Auch werden in deutschsprachigen Texten gern Anglizismen eingestreut, selbst wenn äquivalente deutsche Ausdrücke existieren und seit Jahrzehnten in der Wissenschaft eingeführt sind. Schließlich werden hastig neue oder vermeintlich neue Begriffe besetzt, auch wenn deren Bedeutung nicht klar ist. Der Größte Anzunehmende Unfall (GAU) erscheint häufig nicht groß genug; im politischen Raum wird daher gerne vom Super- oder Mega-GAU gesprochen. Da aber die Sprache der Politiker häufig als Vorbild dient oder bedenkenlos von der Gesellschaft wie auch der Wissenschaft übernommen wird, nehmen Wissenschaftler Begriffe wie Innovationsprogramm oder Innovationsfonds offenbar zum Anlass, ihre Forschung als innovativ zu bezeichnen, obwohl doch im wissenschaftlichen Kontext Forschung selbstverständlich das Ziel und die Aufgabe hat, neue Erkenntnisse zu gewinnen.

Als Beispiel für einen Begriff, der von zahlreichen Wissenschaftlern aus allen Disziplinen unkritisch übernommen wurde, sei Multimedia genannt. Da unter Multimedia zunächst jeder etwas anderes verstand, konnten sich viele hiermit identifizieren. Nur wenige hatten eine klare Vorstellung von Multimedia, aber viele wollten das moderne Forschungsgebiet frühzeitig besetzen, zumal ein hoher Forschungsbedarf prognostiziert wurde und Förderprogramme in erheblichem Umfang lockten. In Zusammensetzungen wie Multimediasystem oder Multimedieveranstaltung trat der Begriff Multimedia zwar bereits in den sechziger Jahren vor allem im Bereich der Kunst und der Musik auf, hierbei spielten elektronische Medien aber nur am Rande eine Rolle. Mit der enormen Verbreitung dieser Medien und dem Siegeszug des Internets zu Beginn der neunziger Jahre wurde dann die Bedeutung des Begriffs Multimedia vielfach eingengt auf den Bereich der digitalen Speicherung, Übertragung und Verarbeitung elektronisch repräsentierter Texte, Bilder sowie Sprach-, Musik- und Videosignale. Ernsthafter Forschungsgegenstand ist Multimedia wohl nur für einige Wissenschaftsbereiche; die Mehrheit nutzt Multimedia als hervorragendes Werkzeug vor allem für die Informationsbeschaffung und die Wissensvermittlung.

Um der Tendenz entgegenzuwirken, dass die Zahl der Wissenschaftler, die über immer weniger immer mehr wissen, stetig wächst, ist ein ständiger Informationsaustausch zwischen unterschiedlichen Fächern notwendig. Nur hierdurch kann interdisziplinäre Forschung auf Dauer erfolgreich betrieben werden. Damit dies aber auch gelingt, bedarf es einer klaren und eindeutigen Sprache, die auch über Fachgrenzen hinaus verstanden wird und möglichst nicht die in der Werbung gängigen Übertreibungen übernimmt.

Ich hoffe, dass es den Autoren der vorliegenden Schrift gelungen ist, eine Sprache zu finden, die diesem Anspruch gerecht wird.

Klaus Meerkötter

Prorektor für Forschung und wissenschaftlichen Nachwuchs (1995-1999)

Rechtzeitig fertig: Die neue Paderborner Stadtgeschichte

1200 Jahre – von Karl dem Großen bis zu Wilhelm Lüke

Es entbehrt nicht einer gewissen Kuriosität (ist aber gar nicht so singulär), dass Stadtgeschichten manchmal eine eigene, anekdotenverbrämte Vorgeschichte haben. 1977, als man in Paderborn fast so stolz wie der damals Gefeierte selbst des zwölfhundertsten Jahrestages der triumphalen Reichsversammlung Karls des Großen an der Pader gedachte, sollte eine neue Stadtgeschichte erscheinen. Sollte ...

Es war vor diesem Hintergrund nicht ganz einfach, neue Kräfte zu mobilisieren, die das einmal gescheiterte Vorhaben nun doch zu verwirklichen bereit und in der Lage waren, zumal es um die Erforschung der Paderborner Geschichte (mit einigen Ausnahmen) damals noch sehr schlecht bestellt war. Um der Chronistenpflicht wenigstens im Prinzip zu entsprechen, soll der Hinweis genügen, dass es nach zehnjährigen Bemühungen 1994 schließlich gelang, einen Rahmenvertrag zwischen der Stadt, der Universität und dem Schöningh-Verlag abzuschließen, der vorsah, dass 1999 – wieder ein Jubiläumsjahr! – eine dreibändige wissenschaftliche Geschichte der Stadt unter dem Titel „Pader-



Die Herausgeber der Paderborner Stadtgeschichte (v.l.): Prof. Dr. Jörg Jarnut, Prof. Dr. Karl Hüser und Prof. Dr. Frank Göttmann, Fachbereich 1/Geschichte der Universität Paderborn.

born. Geschichte der Stadt in ihrer Region” vorgelegt werden sollte. Als Herausgeber, die jeweils mit einer Gruppe einschlägig spezialisierter Historiker ihren Band gestalten sollten, fungierten die Paderborner Geschichtswissenschaftler Karl Hüser (19. und 20. Jahrhundert), Frank Göttmann (Frühe Neuzeit) und Jörg Jarnut (Mittelalter). Gefördert mit erheblichen städtischen Geld- und



Tragaltar des Roger von Helmarshausen aus dem Dom. Auf der Stirnseite Christus zwischen den beiden Dompatronen, links der hl. Kilian, rechts der hl. Liborius.



Blick auf die Türme von Gaukirche, Busdorfkirche und Dom (von links).

mit nicht geringzuschätzenden universitären Personalmitteln wurden die drei Bände in diesem Jahr (1999) tatsächlich abgeschlossen und der Öffentlichkeit übergeben. Damit erscheinen sie rechtzeitig im Jubiläumsjahr, in dem die Stadt auf vielfältige Weise die vor 1200 Jahren erfolgte historische Begegnung zwischen Karl dem Großen und Papst Leo III. hier in der Paderstadt feiert.

100 Jahre nach der letzten, für ihre Zeit sehr verdienstvollen, aber nur bis ins 17. Jahrhundert reichenden und natürlich veralteten Gesamtdarstellung der Paderborner Geschichte durch Wilhelm Richter liegt damit ein Werk vor, das sich als wissenschaftliche, den aktuellen Stand der Forschung repräsentierende Stadtgeschichte in erster Linie an die Bürgerinnen und Bürger Paderborns und seiner Region wendet. Ihnen sollen mit dieser Geschichte Einblicke in die bewegte Vergangenheit ihrer Stadt ermöglicht werden, Einblicke, die sich vielleicht auch für das Verständnis ihrer eigenen Gegenwart als hilfreich erweisen können.

Im Folgenden stellen die Herausgeber den jeweils von ihnen betreuten Band mit seinen wichtigsten Inhalten bzw. Forschungsergebnissen selbst vor.

Band 1: Das Mittelalter. Bischofsherrschaft und Stadtgemeinde, herausgegeben von Jörg Jarnut

Die Autoren des Bandes und ihre Beiträge:

- A. Manfred Balzer (Paderborn/Münster): Paderborn im frühen Mittelalter (776-1050): Sächsische Siedlung – karolingischer Pfalzort – ottonisch-sächsische Bischofsstadt
- B. Matthias Becher (Bonn): Zwischen Reichspolitik und regionaler Orientierung: Die Entwicklung der Stadt im Hochmittelalter (1050-1200)

- C. Heinrich Schoppmeyer (Bochum/Witten): Die spätmittelalterliche Bürgerstadt (1200-1600)

Bischofsherrschaft und Stadtgemeinde

Die heterogene und durch die ausgesprochen uneinheitliche Quellenlage für die einzelnen Epochen auch sehr unterschiedliche und ungleich dicht dokumentierte Geschichte Paderborns im Mittelalter lässt sich kaum unter ein einheitliches und dann noch in einem Bandtitel kondensiertes Leitthema stellen. Am ehesten ist der Untertitel des Bandes „Bischofsherrschaft und Stadtgemeinde“ gerechtfertigt, der einerseits das Neben-, andererseits vor allem auch das Nacheinander verschiedener Kräfte in der Stadt, ihre Verhältnisse zueinander und damit die verschiedenen Stufen – umfassend verstandener – verfassungsgeschichtlicher Entwicklungen wenigstens im städtischen Kernbereich andeutet.

Die Anfänge im Frühmittelalter

Allerdings ist es in diesem Kontext angebracht, sehr nachdrücklich darauf hinzuweisen, dass Paderborn nicht etwa als Bischofssitz begründet wurde, sondern schon drei Jahrzehnte vor dem Amtsantritt seines ersten Oberhirten Hathumar (806) als Pfalz und Burg Karls des Großen. Der Herrscher wollte inmitten sächsischer Siedlungen am Hellweg und in der Nähe der Lippequellen einen zentralen Ort für das zu erobernde und noch zu missionierende Sachsen schaffen. Welche Bedeutung Karl dieser Gründung beimaß, wird daraus ersichtlich, dass er sie, antike Vorbilder und insbesondere Kaiser Konstantin und seine Schöpfung Konstantinopel imitierend, „urbs Karoli“, Karlsburg, nennen ließ. Der Name verschwand zwar nach der Zerstörung dieses Ortes durch die Sachsen im Jahre 778, aber der wieder



Wandputzreste mit Spiralrankenverzierung und Schrift. In der oberen Zeile ist DRACO (=Drache) zu lesen, unten MEM. – Bleiruten und Fensterglas, ebenfalls aus der Pfalzengrabung; die Glasklumpchen bezeugen die Glasherstellung beim Bau der Pfalz Karls des Großen.

aufgebaute und erweiterte Pfalzort erfüllte die ihm zugedachte zentrale Rolle. Erst im Verlauf des 9. Jahrhunderts wurde aus dem bis dahin ganz vom König bestimmten Ort allmählich eine von der Herrschaft des Bischofs geprägte Stadt, die aber weiterhin bis weit in das 11. Jahrhundert hinein im Dienste des Herrscherhauses stand.

Das Hochmittelalter

Der Investiturstreit am Ende dieses Jahrhunderts, in dem die gesamte Ordnung der Welt in Frage gestellt wurde, erschütterte auch das Bistum Paderborn und bewirkte, dass das nördliche Deutschland und damit auch diese Stadt dem Königtum immer stärker entfremdet wurden. Auf der anderen Seite wuchsen im 12. Jahrhundert die äußerst heterogenen Siedlungs- und Rechtsbezirke um die Domburg immer mehr zusammen und wurden durch eine Ummauerung zu einer Einheit zusammengefasst.

Damals wurden auch die Grundlagen für die bald in Gegensatz zur bischöflichen Herrschaft tretende genossenschaftliche Stadtgemeinde gelegt.

Das Spätmittelalter

Die lange spätmittelalterliche Periode der Paderborner Geschichte (etwa 1200-1600) ist durch die Entwicklung der auf ein hohes Maß städtischer Autonomie bedachten genossenschaftlich organisierten Bürger- oder Stadtgemeinde in ihrem Ringen mit dem fortbestehenden Herrschaftsanspruch des Bischofs gekennzeichnet. Dabei tragen der Anfang und das Ende jener Epoche dramatische Züge: Die erste Vertreibung des Bischofs aus seiner Stadt im Jahre 1222 und ihre gewaltsame Einnahme durch dessen Truppen im Jahre 1604 markieren diese Wendepunkte. Die Ereignisse des Jahres 1604 beenden darüber hinaus nach den Forschungen Heinrich Schoppmeyers die mittelalterliche Geschichte Paderborns: „Als sich in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts die Stadt als protestantische Bürgergemeinde auf der Basis der spätmittelalterlichen Privilegien durchzuformen begann, musste sie auf die Gegnerschaft des Landesfürsten stoßen, der dem frühmodernen katholischen Konfessionsstaat verpflichtet war. Der vom spätmittelalterlichen Stadtherrn zum frühneuzeitlichen Landesfürsten gewandelte Bischof obsiegte und bereitete 1604 sowohl dem Experiment der gemeindekirchlich verfassten protestantischen Bürgerschaft als auch der spätmittelalterlichen städtischen Autonomie ein prinzipielles Ende.“ (S. 473)

Resümierend ließe sich festhalten, dass Karl der Große, indem er sich vor mehr als 1200 Jahren entschloss, das Gebiet um die Paderquellen zum Zentrum seiner Herrschaft über Sachsen auszubauen, damit die Grundlagen für eine Stadt legte, deren wesentliche Strukturen, also „Bischofsherrschaft und Stadtgemeinde“, sich zwar im Mittelalter ausprägten, aber mutatis mutandis über alle geschichtlichen Brüche der Folgezeit hinweg bis in die Neuzeit für sie bestimmend blieben und selbst für die Gegenwart noch von einiger Bedeutung sind.



Privileg Elekt Ottos von Rietberg und des Domkapitels für die Stadt Paderborn mit der Ersterwähnung des Paderborner Rathauses („rathus sive pretorium“, Zeile 6), 1279 Okt. 24.

Band 2: Die Frühe Neuzeit. Gesellschaftliche Stabilität und politischer Wandel, herausgegeben von Frank Göttmann

Die Autoren des Bandes und ihre Beiträge:

- A. Frank Göttmann (Paderborn): Paderborn – eine Stadt in der Frühen Neuzeit
- B. Stefan Ehrenpreis (Berlin) und Gregor Horstkemper (München): Paderborn im Zeitalter der frühmodernen Landesherrschaft und Konfessionalisierung
- C. Bettina Braun (Paderborn): Paderborn nach 1604
- D. Bettina Braun (Paderborn): Paderborn im Dreißigjährigen Krieg
- E. Roland Linde (Horn-Bad Meinberg): Vom Westfälischen Frieden bis zum Ende des Fürstbistums (1648-1802)

Katholische Konfessionalisierung

Auch Paderborn wurde seit den 1520er-Jahren nachhaltig von der reformatorischen Bewegung



Blick vom Turm der Busdorfkirche. Im Vordergrund links das St. Vincenz-Krankenhaus, auf der anderen Straßenseite die Synagoge.

erfasst, und letztlich blieb – was man in der älteren Paderborner Historiographie gerne verdrängt hat – die Konfessionsfrage bis weit in das 17. Jahrhundert noch offen, ehe Paderborn wieder als rein katholische Stadt gelten konnte. In den Auseinandersetzungen innerhalb der Bürgerschaft um politische Mitwirkungsrechte verbanden sich im Laufe des 16. Jahrhunderts ebenso wie im Konflikt zwischen der Stadt und ihrem bischöflichen Stadtherrn um die städtische Autonomie politische und Verfassungsfragen mit der Glaubensfrage. So bestätigten sich auch in Paderborn wie andernorts Reformation und Konfessionsbildung als eine verschränkte politische, gesellschaftliche und religiös-kirchliche Erscheinung, und die sukzessive Rekatholisierung bedeutet unter dem seit geraumer Zeit die Forschungsdiskussion beherrschenden Begriff der Konfessionalisierung zugleich die Transformation des altständischen Herrschaftssystems zum frühmodernen Verwaltungsstaat, insbesondere für Paderborn, pointiert gesprochen, von der autonomen Bürgerstadt zur untertänigen Landstadt. Dass zur Bezeichnung dieses qualitativen Wandlungsprozesses der lange übliche, spiegelbildliche Begriff Gegenreformation nicht taugt, braucht nicht betont zu werden.

Die Krise des 17. Jahrhunderts

In dem skizzierten Wandlungsprozess kam dem Dreißigjährigen Krieg, bei allen schlimmen Begleiterscheinungen und Folgen für Wirtschaft, Finanzen und Einwohnerschaft, letztlich nur eine weitere Katalysatorfunktion zu. Entgegen allen die Paderborner Historiographie darüber sowie über den Verlust der alten Freiheiten beherrschenden Klageliedern eröffnen die Neubewertung bekannter Tatsachen und die neu erarbeiteten Befunde eine durchaus andere Perspektive: Die sich festigende Rolle Paderborns als Hauptstadt eines geistlichen Reichsfürstentums hat ihm unleugbar einen nachhaltigen und lange nachwirkenden

Funktions- und Bedeutungszuwachs, auch in zentralörtlichem Sinne, verschafft. Sei es als Mittelpunkt der Territorialverwaltung und der Jurisdiktion, sei es als Markt- und Produktionsstandort höherwertiger Konsumgüter, sei es als weit ausstrahlendes geistliches und kulturelles Zentrum – dabei besonders erwähnenswert seine auf die Theologenausbildung konzentrierte Universität.

Gesellschaft und Wirtschaft: Blüte oder Verfall?

Gerade im Zusammenhang mit der neuen Hauptstadtrolle Paderborns muss die Frage nach der Stichthaltigkeit des alten Verdikts von der gesellschaftlich-geistigen Erstarrung nach dem wirtschaftlichen Niedergang Paderborns seit seiner „großen“ Zeit als autonome Stadt und Mitglied der Hanse aufgeworfen werden. Die Antwort modifiziert das Bild erheblich: Bei einer grundsätzlichen Stabilität der sozialen Schichtung zeichnete sich die Paderborner Gesellschaft durch eine überraschende Dynamik aus. Sowohl eine vertikale soziale Durchlässigkeit als auch eine rege horizontale Mobilität (Zuwanderung) sorgten für eine ständige Erneuerung der sozialen und demographischen Substanz. Eine ganze Reihe von Zuwanderern aus dem südlichen Voralpengebiet, welche in kaum einer Generation in höchste städtische und landesherrschaftliche Ämter aufstiegen, zeugt von der erstaunlichen Integrationsfähigkeit der Paderborner Gesellschaft des 18. Jahrhunderts.

Vergleichbare Beobachtungen lassen sich an der Wirtschaftsentwicklung machen: Gewiss, die traditionellen Produktionszweige der Grundversorgung der Bevölkerung stagnierten mehr oder weniger. Aber solche Branchen und Berufsgruppen prosperierten, welche das Personal der die Hauptstadtfunktion tragenden geistlichen und weltlichen Verwaltungs- und Bildungseliten mit Gütern und Dienstleistungen des gehobenen Bedarfs (z.B. Buchdruck, Seidenweberei und -färberei, Goldschmiede, Zinngießer)



Nordseite. In der Mitte die 1928 abgebrannte große Möbelfabrik Stadler, halbrechts Eingang zum Paderberg.

bedienten. Und trotz der weiträumigen Verlagerung der europäischen Produktions-, Handels- und Kapitalschwerpunkte nach Nordwesteuropa, womit Paderborn gewissermaßen an die Peripherie rückte, konnte es im Wesentlichen seine regionale und überregionale Marktstellung behaupten. Das zeigt sich auch darin, dass Paderborn ausgangs des 18. Jahrhunderts nach wie vor zu den größten westfälischen Städten zählte, nachdem so bedeutende wie Soest oder Dortmund längst zurückgefallen waren.

**Band 3: Das 19. und 20. Jahrhundert.
Traditionsbindung und Modernisierung,
herausgegeben von Karl Hüser**

Die Autoren des Bandes und ihre Beiträge:

- A. Wolfgang Maron (Lippstadt): Vom Ende des Fürstentums bis zur Gründung des Deutschen Reiches (1802-1871)
- B. Karl Hüser (Paderborn): Von der Reichsgründung bis zum Ausbruch des Ersten Weltkrieges (1871-1914)
- C. Ludger Grevelhörster (Paderborn/Münster): Von Weltkrieg zu Weltkrieg (1914-1945)
- D. Barbara Stambolis (Paderborn/Hagen): Die Jahrzehnte des Umbruchs (1945-1975)
- E. Michael Wittig (Brakel): Paderborn als kirchlicher Vor-Ort. Die Bedeutung für Stadt und Region
- F. Karl Hüser (Paderborn): Die Großstadt Paderborn. Entwicklungslinien im Überblick

Traditionsbindung und Modernisierung

Die zeitliche Abgrenzung gegenüber dem zweiten Band ergab sich für die Herausgeber unstrittig aus der großen europäischen Politik, die im Zuge der Säkularisation das Hochstift Paderborn dem protestantischen preußischen Staat überantwortete und für die im Jahre 1802 rund 4 750 Seelen zählende und bis auf eine knapp 5 Prozent zählende jüdische Minderheit katholische

Einwohnerschaft Paderborns einen einschneidenden Kontinuitätsbruch herbeiführte.

Schon bei den ersten Besprechungen über die zu setzenden Schwerpunkte und die innere Gliederung des Bandes tauchte in verschiedenen inhaltlichen und zeitlichen Zusammenhängen immer wieder das Begriffspaar „Traditionsverbundenheit und Modernisierung“ in einem fortwährenden wechselseitigen Spannungsverhältnis auf, mit dem sich offensichtlich alle Autoren auseinanderzusetzen hatten. Schon vor der thematischen Abgrenzung der Arbeitsgebiete untereinander entstand daher der Untertitel: „Traditionsbindung und Modernisierung“, und zwar jeweils in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft.

Wegen der entscheidenden Bedeutung der katholischen Kirche und insbesondere des bischöflichen Stuhls für die Stadtgeschichte während des gesamten zu untersuchenden Zeitraums übernahm Michael Wittig die Erarbeitung dieses zeitübergreifenden Kapitels, in dem auch der sog. „Kulturkampf“ insgesamt thematisiert und die Entwicklung des evangelischen Kirchenkreises Paderborn sowie das grausame Ende der jüdischen Gemeinde als Opfer der nationalsozialistischen Rassenpolitik dargestellt wird.



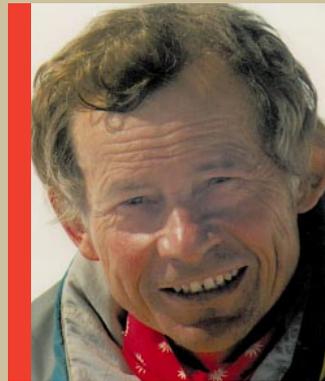
Der Geist des Krieges (links oben: Generalfeldmarschall von Hindenburg).

Jugend und Sport in Deutschland und den USA – ein Kulturvergleich

Amerikanisierung der jugendlichen Sportkultur – Fakt oder Fiktion?

Unter der Schlagzeile „Die Amis kommen!“ veröffentlichte die Zeitschrift *Sports International* (5/93) die Ergebnisse einer Umfrage unter Jugendlichen in Deutschland, die nach ihrer Liebessportart befragt wurden. Bei den männlichen Jugendlichen landeten die US-Importe Basketball (2. Platz), American Football (3. Platz) und Baseball (5. Platz) ganz weit vorne in der Beliebtheitsskala. Im Hinblick auf die Lieblingssportler waren es Michael Jordan (3. Platz), Carl Lewis (7. Platz) und Charles Barkley (8. Platz), die bei den Jungen den Sprung unter die Top Ten schafften. Bei den Mädchen konnten sich immerhin noch Michael Jordan und Charles Barkley unter den ersten zehn platzieren.

Solche Ergebnisse wie auch die mediale Präsenz der nordamerikanischen Sport- und Jugendkultur in Deutschland¹ münden in die These der Globalisierung und Amerikanisierung der Freizeit- und Sportkultur. Für die Entwicklung der Sportkulturen Jugendlicher in den westlichen Industrienationen bedeutet dies: Alles ist überall und jederzeit anzutreffen. Inline-Skates gehören zum Straßenbild in Berlin ebenso wie in New York; Streetball ist ein wichtiger Bestandteil jugendlicher Lebenswelten in Deutschland und Amerika; Beach-Volleyball hat sich zu einem weltweiten Faszinosum entwickelt.



Prof. Dr. Wolf-Dietrich Brettschneider ist Professor für Sportwissenschaft im Fachbereich 2. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich Jugend und Sport sowie im Bereich interkulturell vergleichender Studien. Er ist Mitglied im Direktorium des Bundesinstituts für Sportwissenschaft. Darüber hinaus ist er in mehreren nationalen und internationalen wissenschaftlichen Gremien und Beiräten tätig.

Insofern ist es nicht verwunderlich, dass die Trendforschung, die sich mit Analyse und Prognose der Veränderungen der Alltagskultur befasst, für die letzten 30 Jahre eine recht fruchtbare „kulturhistorische Pipeline“ von Amerika nach Deutschland ausgemacht hat. Deren Produktivität dürfte sich in dem Maße erhöhen, in dem die Austauschgeschwindigkeit kultureller Trends zwischen beiden Ländern wie auch zwischen den verschiedenen Kulturkreisen über den „communication superhighway“ zunimmt.



In Deutschland kaum vorhanden – in den USA nicht wegzudenken: Baseball.



Kulturspezifische Besonderheiten müssen bei der Interpretation der Daten berücksichtigt werden.

Neue Horizonte durch komparative Forschung?

So plausibel die These der Amerikanisierung² auch klingt, ernst zu nehmende empirische Befunde zur Frage, ob und inwieweit sich eine Amerikanisierung der Alltags- und Sportkultur von Jugendlichen bemerkbar macht, sind jedoch kaum vorhanden. In deutlichem Gegensatz zu den vermuteten Tendenzen der Amerikanisierung oder Globalisierung von Jugend- und Sportkultur(en) steht die in der Sportwissenschaft weitgehend nationalstaatliche Begrenztheit der Erforschung dieser sozialen Phänomene. Insofern zielt die vorgenommene Untersuchung über jugendliche Sportkulturen in Deutschland und in den USA vor allem darauf ab, einen Blick über den „eigenen Tellerrand“ hinaus zu werfen sowie die eigenweltliche Isolation der sozialwissenschaftlich orientierten Sportwissenschaft zu überwinden und in einen internationalen Dialog einzutreten. Hierzu wurden in der Bundesrepublik Deutschland und den Vereinigten Staaten fast 4 000 Jugendliche der Jahrgangsstufen 7, 9 und 12 zu verschiedenen Aspekten ihrer Alltags- und Sportkultur befragt. In diesem Beitrag sollen die Sportgewohnheiten und das Sportverständnis der Jugendlichen vergleichend dargestellt werden.³

Ein Vergleich von Äpfeln und Birnen?

Kulturvergleiche gelten methodologisch als anspruchsvoll, da sie Gefahr laufen, „Äpfel mit Birnen“ zu vergleichen. Dies liegt darin begründet, dass Kulturvergleiche sich mit einer Vielzahl spezifischer Probleme konfrontiert sehen. Hier sollen nur zwei wesentliche Punkte genannt werden: 1. Bei Kulturvergleichen wird implizit von der Homogenität der jeweiligen Kulturen ausgegangen, ohne intrakulturelle Unterschiede zu berücksichtigen. 2. Der direkte Vergleich von Datenmaterial über Mittelwerte kann zu einer systematischen Fehlinterpretation der Ergebnisse führen, wenn nicht gleichzeitig die unterschiedlichen kulturellen Rahmenbedingungen in den Auswertungs- und Interpretationsprozess einfließen.

Um einen Vergleich von „Äpfeln“ mit „Birnen“ zu verhindern und um Konfundierungseffekte zu minimieren, beziehen sich die folgenden Analysen lediglich auf Angehörige der „white main stream culture“ in New York und Jugendliche deutscher Nationalität in Berlin.

Sport in the „global village“: Welche Sportart treiben die Jugendlichen?

Opaschowski (1994) hat deutlich gemacht, dass sich das Freizeitverhalten und die Sportbedürfnisse laufend verändern. Gerade im Bereich der jugendlichen Sportkultur wird diesem Prozess eine besondere Dynamik unterstellt. Doch was wissen wir tatsächlich über die Veränderungen der sportiven Praxen der Jugendlichen? Und wie sieht es mit den Tendenzen zu einer Globalisierung der Freizeit- und Sportkulturen aus?

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen deutlich: Die jugendliche Sportwelt zeichnet sich aus durch konventionelle Sportarten, geschlechtsspezifische Vorlieben und kulturgebundene Aktivitäten.

Der von den Medien kolportierte dramatische Wandel im Sport, vor allem in Richtung neuer Trendsportarten, ist nicht feststellbar. Sportarten, bei denen „thrill“ und „sensation seeking“ im Mittelpunkt stehen, wie z.B. Bungee Jumping, Free Climbing, River Rafting und Snow Boarding, sind in der Sportwirklichkeit der deutschen und amerikanischen Jugendlichen praktisch nicht existent.

Diese Ergebnisse werfen natürlich einige Fragen auf: Sind die vielzitierten Trendsportarten regional stärker begrenzt als vielleicht angenommen? Würden sich also neue Sportarten z.B. bei einer Befragung in Kalifornien stärker nachweisen lassen? Ist es vielleicht eine andere Altersgruppe als die befragte 13- bis 19-jährige, die potenziell am stärksten an den Trendsportarten partizipiert? Oder ist die Wahrnehmung der Realität durch ein schiefes Bild in den Medien beeinflusst, wonach vorwiegend das Seltene und Außergewöhnliche zum Gegenstand der Berichterstattung wird?

Die Sportwirklichkeit der Jugendlichen in Deutschland

Prozentuierungsbasis sind alle Antworten (Mehrfachnennungen möglich) „... im letzten Jahr regelmäßig betrieben“

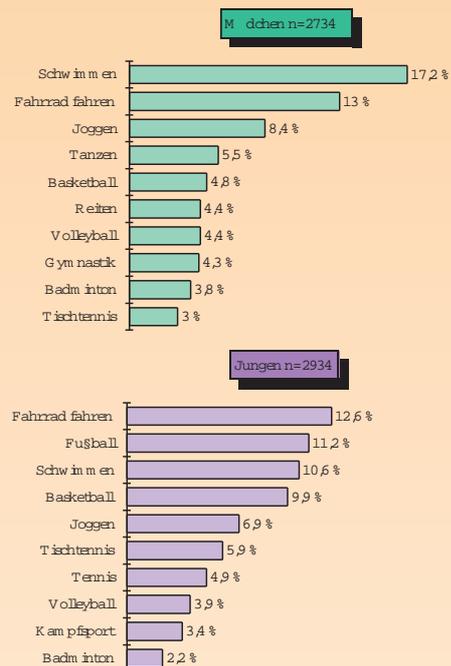


Abb. 1: Die Sportwirklichkeit der Jugendlichen in Deutschland.

Die Sportwirklichkeit der Jugendlichen in den USA

Prozentuierungsbasis sind alle Antworten (Mehrfachnennungen möglich)
 „... im letzten Jahr regelmäßig betrieben“

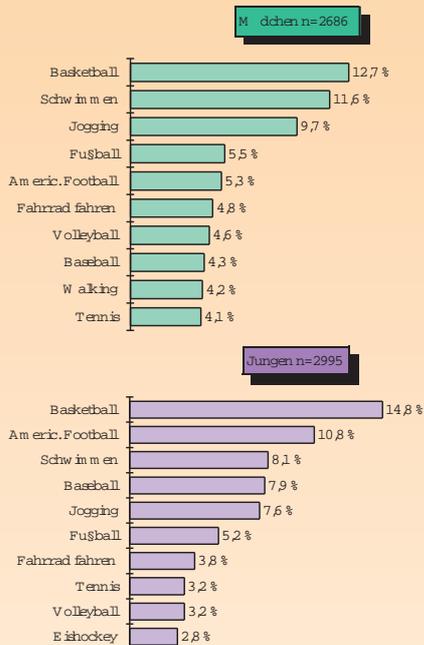


Abb. 2: Die Sportwirklichkeit der Jugendlichen in den USA.

Sport as a universal language – viele Dialekte, syntaktische und semantische Unterschiede

Neben der beschriebenen Sportrealität der Jugendlichen in Deutschland und den USA ist auch die Frage nach der individuellen Sinngebung des Sports von herausragender Bedeutung. Die These vom Sport, der alle Sprachen spricht und somit kulturübergreifend völkerverständigendes und friedentiftendes Potential besitzt, ist zum festen Bestandteil der Sportwelt geworden. In der vorliegenden Untersuchung wurde das subjektive Sportverständnis der Jugendlichen in den USA und in Deutschland mit Hilfe der Assoziationsmethode zu erfassen versucht. Die inhaltsanalytische Systematisierung von Assoziationen zeigt Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede in der inhaltlichen Struktur des Sportverständnisses in den beiden Jugendkulturen. Unabhängig vom kulturellen Kontext besitzt Sport bei den Jugendlichen ein kaum angetastetes positives Image, welches in entscheidendem Maße ihr Sportverständnis prägt. Bei den amerikanischen Jugendlichen gibt es hinsichtlich der Aktivitäten im Alltagsbewusstsein eine Dominanz der Mannschaftssportarten (Baseball, Basketball und Football), deren Bedeutung in der amerikanischen Öffentlichkeit und auch im Bildungswesen verankert ist. Bei den Beweggründen und Gratifikationen, die mit Sport verbunden werden, ist aufseiten der amerikanischen Jugendli-

„If you can't win why play?“

„Winning is not everything, it is the only thing.“

„Defeat is worse than death because you have to live with defeat.“

Slogans in vielen Sporthallen und Umkleidekabinen amerikanischer High Schools.

chen die Präsenz der Vorstellungen von Konkurrenz und Sieg auffällig. Das Prinzip des Gewinnens lässt sich als ein zentrales Merkmal des Sportverständnisses amerikanischer Jugendlicher identifizieren.

Die deutschen Jugendlichen setzen dagegen mehr auf ein diffuses Spaßkonzept. Für sie sind auch solche körperlichen Aktivitäten noch Sport und machen zudem Spaß, wenn Konkurrenz und Siegenwollen eine untergeordnete Rolle spielen – eine Vorstellung, mit der amerikanische Jugendliche Schwierigkeiten haben.

Anhand einiger ausgewählter Items, die diese zentralen Determinanten des Sportverständnisses abbilden, sollen die Unterschiede deutlich gemacht werden. Es handelt sich hierbei um den „Spaß-Aspekt“ und den „Trainings-Aspekt“ bzw. „Leistungs-Aspekt“. Die vorliegende Untersuchung bestätigt deutliche Konturen traditioneller Geschlechtsstereotype, wonach insbesondere Mädchen und junge Frauen eine starke Betonung der Spaß- und Stimmungsbezogenheit sportiver Praxen bekunden. Für die Kategorie „Spaß“ im Sport gibt es statistisch signifikante Unterschiede hinsichtlich der beiden untersuchten Haupteffekte (vgl. Tabelle 1, S. 21). In beiden kulturellen Kontexten bewerten die weiblichen Jugendlichen das Spaß-Motiv höher als ihre männlichen Altersgenossen. Vor dem Hintergrund des interkulturellen Vergleichs kann man konstatieren, dass die Berliner Jugendlichen dem Spaß am Sport eine noch größere Bedeutung beimessen als die jungen Männer und Frauen aus New York (Abbildung 3). Weniger eindeutig sind die Befunde hinsichtlich des Trainings- und Leistungsmotivs (Abbildungen 4 und 5). Die Ergebnisse der vorliegenden interkulturell vergleichenden Studie spiegeln Geschlechtsstereotype nur für die deutschen Befragten wider

„Ob man als Sportler erfolgreich ist oder nicht, ist für mich ziemlich egal. Es kommt vor allem darauf an, dass man Spaß hat.“



Abb. 3: Mittelwertunterschiede zum „Spaß-Aspekt“. Jungen und Mädchen aus Berlin und New York im Vergleich.

„Für mich gehört es zum Sport, regelmäßig zu trainieren.“

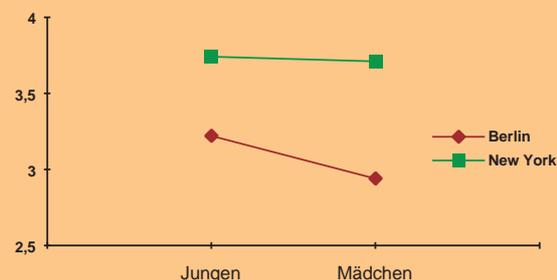


Abb. 4: Mittelwertunterschiede zum „Trainings-Aspekt“. Jungen und Mädchen aus Berlin und New im Vergleich.

„Leistungsvergleiche gehören für mich in jedem Fall zum Sport.“



Abb. 5: Mittelwertunterschiede zum „Leistungs-Aspekt“. Jungen und Mädchen aus Berlin und New York im Vergleich.

(Abbildung 4). Für die Jungen gehört regelmäßiges Training in signifikant höherem Maße zum Sport als für die Mädchen. In New York gibt es hinsichtlich des Aspekts „Training“ keinen Unterschied zwischen den Jungen und Mädchen.

Noch etwas anders gelagert sind die Ergebnisse bezüglich des „Leistungs-Aspekts“ im Sportverständnis der Jugendlichen (Abbildung 5). Hier zeigt sich deutlich, dass insbesondere bei den männlichen New Yorker Jugendlichen Leistungsvergleiche als wichtiges Element ihres Sportverständnisses zu zählen sind. Die Mädchen aus New York sowie die männlichen und weiblichen Jugendlichen aus Berlin formen ein übereinstimmendes Cluster: Für diese Gruppe besitzt der „Leistungs-Aspekt“ eine ähnliche Bedeutung.

Ein eindimensionales und monokausales Modell, welches ein globales Sportverständnis zugrundelegt, scheint nach den bisherigen Befunden eher Fiktion als Fakt. Um den komplexen Zusammenhängen von Sportverständnis und gesellschaftlich-kulturellen Rahmenbedingungen nachzuspüren, sollen an den Beispielen Fußball und Basketball Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede konkretisiert werden.

Fußball und Basketball – „global players“?

Auf die Frage nach denjenigen Sportarten, die sie im Jahre 1994 regelmäßig betrieben haben, nennen Jugendlichen in New York wie in Berlin „Soccer“ und Basketball etwa in gleichem Maße. In New York war „Soccer“ mit 5,9 Prozent der Nennungen auf dem sechsten Platz der Aktivitätenliste zu finden, in Berlin war Fußball mit 6,5 Prozent der Nennungen auf Platz fünf der regelmäßig betriebenen Sportarten vertreten. Basketball wurde in New York mit 12 Prozent der Nennungen am häufigsten, in Berlin mit 9 Prozent am dritthäufigsten genannt. Mit Blick auf Internationalisierungs- und Globalisierungstendenzen könnte man argumentieren, dass dieser Befund nur allzu logisch sei und beide Sportarten in beiden Ländern bereits äquivalente Phänomene darstellen. Die mittels der Assoziationsanalyse vorgefundenen Unterschiede im Sportverständnis mahnen jedoch, Interpretationen quantitativer Befunde sorgfältig und differenziert anzulegen. Auch wenn die Jugendlichen Sportarten betreiben, die auf einer phänomenologischen Ebene identisch sind, so kann ein Blick auf den jeweiligen soziokulturellen Hintergrund zu differenzierteren Einsichten verhelfen. Am Beispiel Fußball kann gezeigt werden, dass Äquivalenz mehr verlangt als identische Oberflächenphänomene.

A tie is like kissing your sister⁴ – die kulturspezifische Interpretation von Fußball

In Deutschland gilt Fußball nicht nur als „Nationalsport“, sondern ist auch die Nummer eins der von männlichen Jugendlichen betriebenen Sportarten. 1,4 Millionen Kinder und Jugendliche (bis 18 Jahre) weist die Statistik des Deutschen Sportbundes als Mitglieder des Spitzenverbandes auf. Allerdings sind davon ca. 1,3 Millionen männliche und 100 000 weibliche Jugendliche. Wenngleich Fußball in Deutschland zunehmend auch bei weiblichen Jugendlichen Interesse findet, so ist die Sportart nach wie vor als Männerdomäne zu betrachten. Nicht selten wird Fußball, wie er in Deutschland gespielt wird, von Beobachtern in Nachbarländern mit der Vorstellung eines kraftvollen, disziplinierten und kämpferischen Verhaltens verknüpft.



Der Ball – das unbekannte Wesen!?

Für die USA stellt MARKOVITS (1990) die provokante Frage: „Why is there no soccer in the US?“, obgleich die Statistik 3,9 Millionen amerikanische Kinder und Jugendliche (bis 18 Jahre), darunter 2,2 Millionen männliche und 1,7 Millionen weibliche Jugendliche als „soccer-player“ ausweist. Trotz seiner Popularität unter den Jugendlichen erfährt „Soccer“ in den USA eine von den deutschen Verhältnissen abweichende Deutung. „The U.S.



„Soccer“ in den USA ist etwas für Kinder und Mädchen.



Der Coach gibt seine strategischen Anweisungen und hält jede Spielaktion im Statistikbogen fest.

wins by not loosing" titelte „Newsweek" anlässlich des Unentschiedens der USA gegen die Schweiz im ersten Spiel der Fußballweltmeisterschaft 1994. Ein Unentschieden wie einen Sieg zu werten, widerspricht dem Sportverständnis der meisten US-Amerikaner. Für sie gilt: „A tie is like kissing your sister". Diese Charakterisierung des Fußballspiels macht deutlich: „Soccer" ist etwas für Kinder und Mädchen, aber nichts für „richtige Männer".

Anders als etwa American Football oder Baseball fehlt etwas, um „Soccer" als richtigen All-American-Sport anzusehen. In der amerikanischen Kultur geschätzte Werte wie Männlichkeit, Entscheidungsfreude, Konkurrenz und Gewinnen finden sich hier nicht hinreichend repräsentiert. Die Struktur des Spiels ist deshalb nicht kompatibel mit den in den USA üblichen Sportvorstellungen. Es gibt zu wenig faszinierende Aktionen, zu wenig Entscheidungs- und Erfolgsmomente und zu wenig statistikrelevante Ereignisse. Strategie, Quantifizierung, Spezialisierung und das Erzielen von Rekorden als Wesensmerkmale des modernen Sports sind insbesondere in den USA auf fruchtbaren Boden gefallen.

Für den europäischen Fußball jedoch ist eine hohe Spezialisierung weder im gleichen Maße möglich, noch erscheint sie besonders wünschenswert. Der hohe Grad an kooperativen und entstandardisierten Spielaktionen lässt eine statistikträchtige Quantifizierung nur bedingt zu.

Fußballspielen in den USA bleibt deshalb letztlich etwas für Kinder, weibliche Jugendliche und junge Frauen. „Richtiger" Sport ist Fußball (noch) nicht⁵ und kann es auch derzeit nicht werden, weil der für die Popularisierung der Sportart notwendige organisatorische Rahmen zur Durchführung von Wettkämpfen lediglich für Heranwachsende, nicht aber für ältere Jugendliche und schon gar nicht für Erwachsene gegeben ist.⁶

Zeitgeist oder klassisches Repertoire – Basketball in Deutschland und den USA

Am Beispiel der Sportart Basketball lässt sich ebenfalls aufzeigen, dass oberflächlich ähnliche Sportaktivitäten in den unter-

schiedlichen kulturellen Kontexten nicht zwangsläufig vergleichbare Konstrukte repräsentieren. Wie die rapide steigenden Mitgliederzahlen im Deutschen Basketball-Bund (1988: 48 000 gegenüber 1994: 81 000 Jugendliche) sowie die ständig wachsende Teilnehmerzahl der großen Streetballturniere zeigen, erfreut sich Basketball unter deutschen Jugendlichen zunehmender Beliebtheit. Nach den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung wurde Basketball von den Jugendlichen in Berlin (9 Prozent) fast ebenso häufig als regelmäßig betriebene Sportart angegeben wie von den Jugendlichen in New York (12 Prozent). Was macht Basketball in Deutschland gegenwärtig so erfolgreich, und gibt es Unterscheidungen zum amerikanischen Basketball? Basketball ist Symbol eines modernen, vom Zeitgeist der neunziger Jahre beseelten Lebensstils, der weit über die Grenzen des Spielfeldes hinausreicht und durch spezifisches Outfit und Sprache unterstrichen wird. Das Spiel entspricht dem Lebensgefühl der jungen Generation. Es zeichnet sich durch permanente „action" aus und ist auf Entscheidungssituationen zugespitzt. Es gibt nur Angriff oder Abwehr. Fast break, slam dunks, fade away jump shots und hook shoots stehen im ständigen Wechsel mit spektakulären Abwehraktionen, die die Intensität und Erlebnisqualität des Spiels noch steigern. Sieg und Niederlage liegen eng beieinander und werden auf dem Spielfeld in einem dynamischen Prozess dramatisch in Szene gesetzt. Basketball und seine von Jugendlichen bevorzugte subkulturelle Variante Streetball sind Sportaktivitäten, die als Symbole eines modernen Lebensstils gelten können, in dem Körperinszenierungen eine wichtige Rolle spielen.

Wenngleich Basketball gängiger Bestandteil in der sportlichen Alltagskultur der Berliner geworden ist, gibt es gegenüber dem Basketball, wie ihn New Yorker Jugendliche erleben, erhebliche Unterschiede. In den USA repräsentiert Basketball nicht so sehr den aktuellen Zeitgeist; vielmehr spiegelt er die Wesensmerkmale des modernen Sports wider: Rationalisierung und Quantifizierung schlagen sich in einer Vielzahl statistischer Angaben zum Verlauf eines Spiels nieder. Trefferquoten sind fast ebenso wichtig wie der aktuelle Spielstand; die Spieler sind in allen Dimensionen vermessen und werden vor, während und nach dem Spiel vergleichend analysiert. Der hohe Grad an Spezialisierung macht es zudem möglich, Erfolg und Misserfolg direkt an die Leistung einzelner Spieler rückzubinden. Vor allem aber wird Basketball in den USA mit Dynamik, Kraft und Gewandtheit, zuweilen auch aggressiven, „typisch männlichen" Verhaltensmustern assoziiert. Basketball repräsentiert – auch in der jugendlichen Variante – geschätzte amerikanische Werte wie Männlichkeit, Entscheidungsfreude, Mut, Konkurrenz und Mannschaftsgeist.

Die divergierenden soziokulturellen Rahmenbedingungen für „Soccer" und Basketball sowie die daraus resultierenden Unterschiede im Verständnis der jeweiligen Sportart in Deutschland und den USA machen deutlich, dass eine aufgrund identischer Oberflächenphänomene angenommene Vergleichbarkeit nicht unhinterfragt vorausgesetzt werden kann. Insbesondere die Sportart Basketball scheint ein gutes Beispiel für „kulturelle Anleihen" im Rahmen einer globalen Entwicklung zu liefern. Denn Basketball erfreut sich sowohl in Deutschland wie auch in den USA großer Beliebtheit, die auf der Mikroebene zutage tretenden „lokalen Antworten" auf das globale Phänomen zeichnen sich jedoch durch große Variationsbreite – vom informellen Streetball zur amerikanischen Profiligen NBA – aus.

**„Diminishing Contrasts – increasing Varieties“:
Dialektik von Annäherung und Ausdifferenzierung**

Die empirischen Ergebnisse zeigen, dass die Sport- und Alltagskultur der Jugendlichen in Berlin und in New York Gemeinsamkeiten wie auch Unterschiede aufweist. So besitzt Sport in beiden kulturellen Kontexten ein uneingeschränkt positives Image. Im Sportverständnis der Jugendlichen in Berlin scheinen jedoch individuelle Sinnzuschreibungen mehr ins Gewicht zu fallen als kulturell überformte Deutungsmuster. Insofern lässt sich das Sportverständnis als tendenziell offen und vielfältig charakterisieren. Die Antworten der jungen Leute aus New York orientieren sich stärker am Bild der All-American-Sportarten. In ihrem Sportverständnis kommen verstärkt kulturell überformte Werte und Sinnorientierungen zum Ausdruck. Von daher erscheint das Sportverständnis der Jugendlichen aus New York tendenziell enger und weniger facettenreich als das ihrer Berliner Altersgenossen.

Es gibt darüber hinaus Unterschiede im Sportverständnis, die die Berliner von den New Yorker Jugendlichen trennen. Auch wenn fast jede Sportart überall und jederzeit anzutreffen ist, so werden diese unterschiedlichen Sportarten – wie im vorliegenden Fall für Fußball und Basketball gezeigt werden konnte – in Abhängigkeit von der Kultur, in der sie praktiziert werden, unterschiedlich interpretiert. Nicht zuletzt deshalb sollten zukünftige Untersuchungen zur Globalisierung im Sport auf der Mikroebene analysieren, inwieweit „lokale“ Antworten zum Sport innerhalb und zwischen Kulturen variieren. Auch der Einfluss zentraler unabhängiger Variablen wie Geschlecht, Herkunft und Alter müssen in kulturvergleichenden Untersuchungen verstärkt berücksichtigt werden. Erst ein solcher dezidiert analytischer und empirischer Blick auf die Mikroebene verspricht die soziale Realität angemessen zu erfassen.

ITEMS	Mittelwerte					F-Werte		
	Total	Jungen		Mädchen		Kultur	Gesch	Ku X Ge
	(n=1991)	Berlin (n=582)	New York (n=509)	Berlin (n=482)	New York (n=418)			
1) Es gehört zum Sport, regelmäßig zu trainieren.	3.39	3.22	3.74	2.94	3.71	311.9 **	21.89 **	3.38 **
2) Leistungsvergleiche gehören zum Sport.	2.85	2.86	3.21	2.57	2.69	28.40 **	82.66 **	6.82 *
3) Es kommt vor allem darauf an, dass man Spaß hat.	3.48	3.51	3.27	3.66	3.50	46.76 **	27.14 *	1.63

Tab. 1: Kovarianzanalyse ausgewählter Items zum Sportverständnis; männliche und weibliche Jugendliche aus Berlin und New York im Vergleich (Alter herauspartialisiert); Signifikanzniveau ** p<.001; * p<.01.

Fußnoten

- ¹ Neben der starken Präsenz US-amerikanischer Sportarten in den verschiedenen Sportkanälen des Fernsehens finden sich auch in der sportbezogenen Zeitschriftenlandschaft zahlreiche Magazine, die sich ausschließlich mit dem nordamerikanischen Sport befassen (z.B. „American Sports“, „Basket“, „Magic Sport“, „US-Sport“).
- ² Neben Amerikanisierung wird auch von Internationalisierung oder

Globalisierung gesprochen. In unterschiedlicher Akzentuierung ist damit gemeint, dass es in verschiedenen gesellschaftlichen Bereichen Phänomene und Tendenzen gibt, die sich nahezu weltweit nachweisen lassen.

³ Die Untersuchung wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziell gefördert.

⁴ „Ein Unentschieden ist so, wie wenn du deine Schwester küsst“. (Übersetzung der Autoren).

⁵ Deutlich wird der Unterschied auch in der nationalen Verarbeitung des 3:0-Erfolges der US-Nationalmannschaft im Februar 1999 gegen die deutsche Fußballnationalmannschaft. Während die Niederlage für die deutsche Nation einem Trauma gleichkam, wurde der Erfolg in den USA überhaupt nicht zur Kenntnis genommen.

⁶ In den USA gibt es kein zu Deutschland vergleichbares Vereinswesen. Wettkampfsport wird vor allem in den Schulen organisiert. Wettkämpfe werden zwischen den Bildungseinrichtungen durchgeführt. Auch die Kommunen bieten ein organisiertes Sportprogramm für die Kinder an. Mit dem Erreichen der Adoleszenz und dem Ausscheiden aus der High School wird es für nicht leistungsportorientierte junge Menschen jedoch fast unmöglich, an sportlichen Wettkämpfen teilzunehmen.

Literatur

Brettschneider, W.-D./Brandl-Bredenbeck, H.P.: Sportkultur und jugendliches Selbstkonzept – eine interkulturell vergleichende Studie über Deutschland und die USA. Juventa Verlag. Weinheim und München. 1997.

Rees, C. R./Brettschneider, W.-D./Brandl-Bredenbeck, H.P.: Globalization of Sport Activities and Sport Perceptions Among Adolescents From Berlin and Suburban New York. In: Sociology of Sport Journal, (15) 1998, 216-230.

Maguire, J.: Sport, identity politics, and globalization: Diminishing contrasts and increasing varieties. In: Sociology of Sport Journal, (11) 1994, 398-427.

Markovits, A.S.: The Other „American Exceptionalism“: Why is there no Soccer in the United States? In: International Journal of the History of Sport, 7(2) 1990, 230-264.

Opaschowski, H.: Neue Trends im Freizeitsport. B.A.T. Freizeit- und Forschungsinstitut. Hamburg 1994.



Dr. Hans Peter Brandl-Bredenbeck ist wissenschaftlicher Angestellter im Fachbereich 2/Sportwissenschaft. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der interkulturellen Forschung. Darüber hinaus beschäftigt er sich mit Fragen der Sportethik, der Bedeutung des Körpers für die jugendliche Entwicklung sowie mit Fragen zur Sport-Umwelt-Thematik.

Die virtuelle Modelleisenbahn

Computerunterstützung komplexer Entscheidungen im Bahnverkehr

„Der InterRegio 3478 aus Aachen zur Weiterfahrt nach Konstanz verspätet sich voraussichtlich um 15 Minuten.“
 „Aus betrieblichen Gründen verspätet sich die Ankunft der Sennebahn aus Bielefeld um etwa 10 Minuten“. „Sehr geehrte Fahrgäste, wegen einer technischen Störung wird der ICE 34 „Karl der Große“ umgeleitet. Wir bitten um Ihr Verständnis.“ Vom Bahnverkehr redet man meist dann, wenn es mit den Verbindungen nicht geklappt hat. Praktisch jeder, der mit der Bahn fährt, hat schon einmal Verspätungen und sich daraus ergebende Unannehmlichkeiten erlebt.

Innovationen zur Unterstützung komplexer Entscheidungen

In der Arbeitsgruppe Wirtschaftsinformatik 4, Decision Support & Operations Research Labor (DS&OR Labor), wird seit drei Jahren untersucht, wie die Entscheidungsfindung von Disponenten im Bahnverkehr mit wissenschaftlichen Methoden unter Verwendung moderner Informationstechnologie optimal unterstützt werden kann. Damit sollen die Unannehmlichkeiten der Fahrgäste möglichst minimiert und gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit des Verkehrsdienstleisters verbessert werden.

Ein modernes Schienennetz ist in regelmäßigen Abständen mit integrierten Sensoren ausgestattet, die automatisch eine Nachricht (Zuglaufmeldung) zur regional zuständigen Transportleitung senden, wenn ein Zug darüber rollt. Basierend auf diesen Meldungen wird der aktuelle Stand der fahrenden Züge im

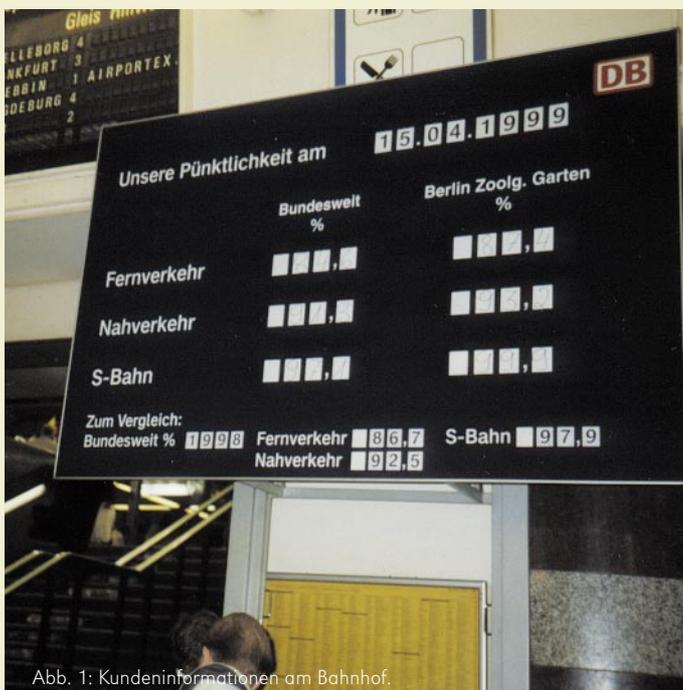


Abb. 1: Kundeninformationen am Bahnhof.



Prof. Dr. Leena Suhl ist seit 1994 Professorin für Wirtschaftsinformatik an der Universität Paderborn. Ihr Fachgebiet ist Decision Support & Operations Research.

verteilten Rechnernetz konstruiert, am Bildschirm für Disponenten grafisch aufbereitet und zeitlich dynamisch fortgeschrieben. Falls ein Zug eine signifikante Verspätung hat, wird eine Störungsmeldung generiert und dem zuständigen Disponenten angezeigt.

Beim verspäteten Eintreffen eines Zuges an einem Bahnhof werden die angebotenen Anschlüsse gefährdet. Wenn die Verspätung nicht zu gravierend ist, greifen die so genannten Wartezeitregeln; beispielsweise

- wartet ein InterCityExpress (ICE), InterCity/EuroCity (IC/EC) oder InterRegio (IR) auf einen anderen ICE, IC/EC oder IR bis zu 5 Minuten,
- wartet jedoch ein ICE, IC/EC oder IR nicht auf einen Stadt-Express (SE) oder eine Regionalbahn (RB), und
- ein SE oder RE wartet auf einen ICE, IC/EC oder IR bis zu 10 Minuten.

Falls die erwartete Verspätung dieses Zeitfenster überschreitet, wird ein Konflikt erzeugt. Der Disponent muss in jedem Konfliktfall entscheiden, ob der Anschlusszug auf den verspäteten Zug wartet (und evtl. weitere Konflikte im Zugverlauf verursacht) oder ob der Zug planmäßig abfährt (und die Übergangsreisenden den Anschluss verlieren). Die Situation wird dadurch verkompliziert, dass eine Verspätung oft nicht einzeln eintritt, sondern mehrere Verspätungen aus unterschiedlichen Richtungen sich gegenseitig beeinflussen.

Im Konfliktfall arbeitet ein Disponent unter hohem Stress und Zeitdruck (Abbildung 2). Dann sind stets schnelle und gute Entscheidungen gefordert. Ein wichtiges Ziel ist es, die Anzahl der Konflikte bzw. Verspätungsminuten zu minimieren. Dabei sind jedoch die Entscheidungsgrundlagen und Konsequenzen nicht vollständig bekannt, z.B. weiß man meistens nicht genau, wie viele Passagiere in einem Zug sitzen und welche endgültigen Reiseziele und Rahmenbedingungen sie haben.



Abb. 5: Magnetschwebebahn Transrapid auf einer Testfahrt durch das Emsland.

Im Zuge der Privatisierung von Verkehrsanbietern wie auch aufgrund des steigenden Wettbewerbsdrucks wird die betriebswirtschaftliche Bewertung der getroffenen Entscheidungen immer wichtiger. Eine Zielsetzung des Forschungsprojektes am DS&OR Labor besteht darin, betriebswirtschaftliche Kosten- und Zielstrukturen zu modellieren, um eine bessere Bewertung und Kostenrechnung zu ermöglichen. Statt der Summe der Verspätungsminuten von Zügen sollen in Zukunft verstärkt kumulierte Warteminuten von Passagieren als Entscheidungskriterium zählen.

Der Betrieb heutiger sehr hoch ausgelasteter Bahnnetze, unter denen das Netz der Deutschen Bahn AG mit seinen täglichen 36 000 Zugverbindungen weltweit eines der dichtesten und am stärksten beanspruchten ist, kann nur durch moderne Informations- und Kommunikationstechnologie aufrecht erhalten werden. Das System ist naturgemäß hochgradig verteilt, wobei die Disponenten in mehreren Transportleitzentralen tätig und ständig darauf angewiesen sind, untereinander sowie mit den Mitarbeitern an Strecken und Bahnhöfen zu kommunizieren.

Optimale Mensch-Maschine-Interaktion in Netzwerken

Dispositionsaufgaben im Bahnverkehr sind ein typisches Beispiel semistrukturierter Entscheidungsprozesse. Dabei sind in einem komplexen Umfeld Entscheidungen notwendig, die nur durch intelligentes Zusammenwirken von Mensch und Technik zu bewältigen sind. Das verteilte Informations- und Kommunikationssystem produziert und verarbeitet blitzschnell und zuverlässig eine riesige Datenmenge, für die ein Mensch Jahre brauchen würde. Aus diesen Daten werden maschinell Informationen generiert und mit modernen Werkzeugen auf dem Bildschirm in einer grafischen Form aufbereitet, die dem menschlichen Entscheidungsträger leicht verständlich ist. Ohne diese Aufberei-

tung würden den Disponenten viele wichtige Informationen vorenthalten bleiben.

Auf der anderen Seite sind Dispositionsentscheidungen generell nicht automatisierbar. Es gibt oft Sonderfälle, Ausnahmen und Ermessensfragen, die in einem Entscheidungsprozess jene unstrukturierten Komponenten bilden, bei denen der Versuch einer Automatisierung keinen Sinn ergibt. Die assoziativen Qualitäten des menschlichen Gehirns liegen bei der Verarbeitung unstrukturierter Informationen auf einem weitaus höheren Niveau als die eines Computersystems. Es ist in absehbarer Zeit nicht zu erwarten, dass die Denkweise von Menschen bei solch vielfältigen Entscheidungssituationen vollständig im Rechner abgebildet werden kann. Nichtsdestotrotz – oder gerade deswegen –, ist es eine anspruchsvolle Forschungsaufgabe, nach den Grenzen der Automatisierbarkeit und der optimalen Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine zu suchen. Diese Grenzen sind übrigens nicht konstant: mittels der heutigen digitalen Informations- und Kommunikationstechnologie ist es möglich, viel tiefer in Entscheidungsprozesse einzugreifen, als es z.B. noch vor 20 Jahren möglich war.



Abb. 2: Disponent bei der Arbeit in einer Transportleitzentrale.

Aus den verdichteten und graphisch aufbereiteten Informationen wird im Gehirn des zuständigen Experten Wissen generiert. Dieses Wissen ist naturgemäß nicht explizit ausformuliert, sondern existiert nur implizit, basierend auf Erfahrung, Intuition, Logik und den assoziativen Fähigkeiten eines Menschen. Wenn ein größerer Anteil des impliziten Wissens extrahiert werden könnte, wäre es – zumindest prinzipiell – einem computerbasierten Informationssystem zugänglich und könnte somit auch für andere nutzbar gemacht werden. Weil vieles aus dem Erfahrungswissen kaum zu formalisieren ist, muss im gesamten Bereich dieses Wissensmanagements jedoch sehr sorgfältig vorgegangen werden. Erschwerend kommen die (bewussten oder unbewussten) Ängste der Experten hinzu, eventuell die durch den überlegenen Wissensstand erworbene Machtposition zu verlieren. Es steht außer Zweifel, dass das Wissensmanagement bei Dispositionsaufgaben ein bei weitem noch nicht vollständig verstandenes oder gelöstes Problem ist, und dass es als ein interdisziplinäres Forschungsgebiet angesehen werden muss. Ein weiterer, wichtiger Aspekt ist die inhärente Verteiltheit des Dispositions- und Überwachungssystems in einem komplexen Verkehrsnetz. Beispielsweise gibt es im Fernverkehr der DB AG derzeit 15 Transportleitungen, deren Anzahl in den nächsten Jahren auf sieben gesenkt werden soll. In jedem Fall müssen die Transportleitungen intensiv miteinander kommunizieren, weil sie die selben Züge steuern und rechtzeitig über erwartete Verspätungen oder Ausfälle in anderen Regionen informiert werden müssen. Früher erfolgte diese Kommunikation hauptsächlich über Telefon, Telex und Telefax. Heute werden in zunehmendem Maße die Möglichkeiten der digitalen Informations- und Kommunikationstechnologie genutzt. Beispielsweise basiert das

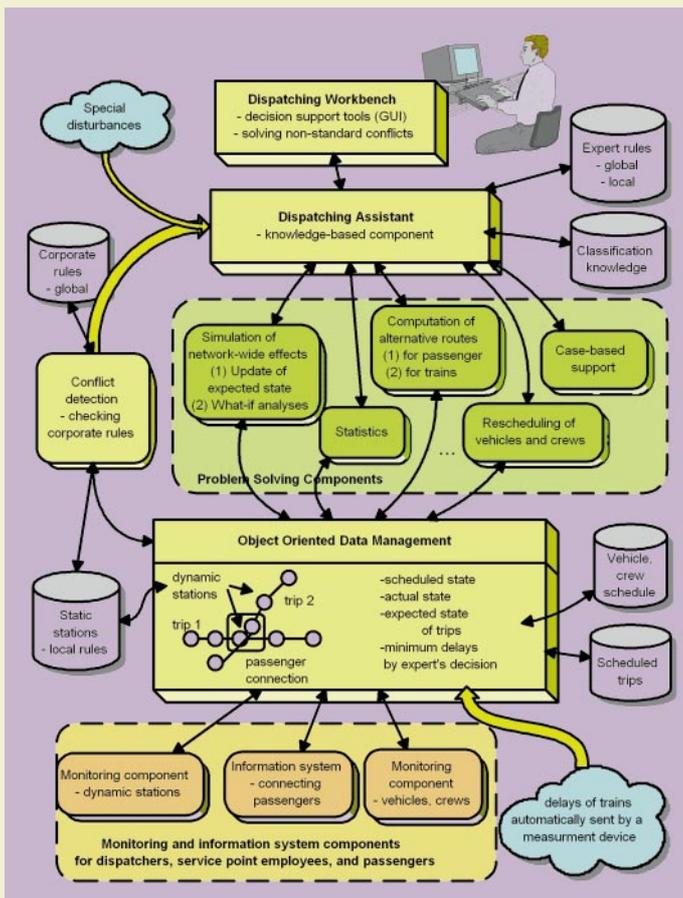


Abb. 3: Gesamtarchitektur des Disponentenunterstützungssystems.

kooperative Dispositionsunterstützungssystem ISTP der Transport-, Informatik- und Logistikconsulting (TLC) GmbH, das derzeit als Pilotinstallation in der Testphase läuft, auf der Internet-Technologie. Algorithmen und Benutzeroberflächen sind in Java geschrieben. Die Verspätungsmeldungen, Umleitungsmaßnahmen etc. werden als Message-Objekte unter Lotus Notes kommuniziert. An Bahnhöfe weiterzuleitende Informationen können außer mit Message-Objekten bei Bedarf auch als Fax oder (mit Hilfe der Computer-Telefonie-Integration) als Voice-Mail verschickt werden.

Systemarchitektur für ein Disponentenunterstützungssystem

Am DS&OR Labor wurde eine integrierte informationstechnische Systemarchitektur für Verkehrsdispositionssysteme entwickelt, die den gesamten Prozess von der Zuglaufmeldung bis zur Dispositionsentscheidung und deren Weiterleitung an Mitarbeiter und Kunden beinhaltet (Abbildung 3).

Aus dem eintreffenden immensen Datenfluss wird für jeden fahrenden Zug neben dem planmäßigen auch der aktuelle (bisherige) Zuglauf generiert und in einer objektorientierten Datenbasis gespeichert. Der tatsächliche Zuglauf wird mit dem Fahrplan verglichen, wobei Ist- und Sollzustand unter Berücksichtigung der kurzfristigen Dispositionsentscheidungen dynamisch fortgeschrieben werden. Diese Datenbasis bildet die Informationsgrundlage für Kunden und Disponenten. Im Hintergrund berechnen Propagierungsalgorithmen die erwartete Verspätungsausbreitung, wobei globale und lokale Wartezeitregeln berücksichtigt werden. Kommt es zu einer Verletzung dieser Regeln, wird der Disponent sofort über Eintreten und Lage von Konflikten informiert.

Auf der obersten Ebene des Systems arbeitet ein Disponent, dem alle Entscheidungsbefugnisse in Absprache mit Disponenten aus anderen Transportleitungen überantwortet sind. Er bedient eine rechnergestützte „Dispatching Workbench“, die von einem „virtuellen Assistenten“ unterstützt wird. Wenn der Disponent einen Konfliktfall lösen oder eine What-If-Analyse starten will, ruft er den Assistenten auf, der im Dialog mit dem Disponenten die entsprechenden Berechnungen vorbereitet. Ein wichtiges Forschungsthema stellt dabei die Ergonomie der Benutzeroberfläche dar, weil der Disponent sehr schnell reagieren muss und selbst im günstigsten Fall nur wenig Zeit hat, um seinen Rechner zu bedienen. Die Analysekomponenten können aber auch in ruhigeren Phasen zur Analyse der getroffenen Entscheidungen und zur Vorbeugung von Konflikten genutzt werden.

Eine mögliche grafische Benutzungsoberfläche für die Konflikterkennung und -lösung wurde im Labor prototypisch entwickelt (siehe Abbildung 4). Beim Eintreten von Konflikten in einem Bahnhof blinkt zunächst seine geographische Lage auf einer Landkartengrafik. Per Mausklick wird eine Übersicht der Zustände an diesem Bahnhof gezeigt; links vom Zeitstrahl werden ankommende, darunter verspätete Züge und rechts davon die abfahrenden Anschlusszüge sichtbar gemacht. Für jeden der Anschlusszüge, die von Konflikten betroffen sind, kann man per Mausklick eine What-If-Analyse durchrechnen lassen, die das Ausmaß der Verspätungsausbreitung sowie andere Analysedaten unter der Annahme berechnet, dass der Anschlusszug warten soll. Aufgrund der Anwendung von abgebildetem Expertenwissen

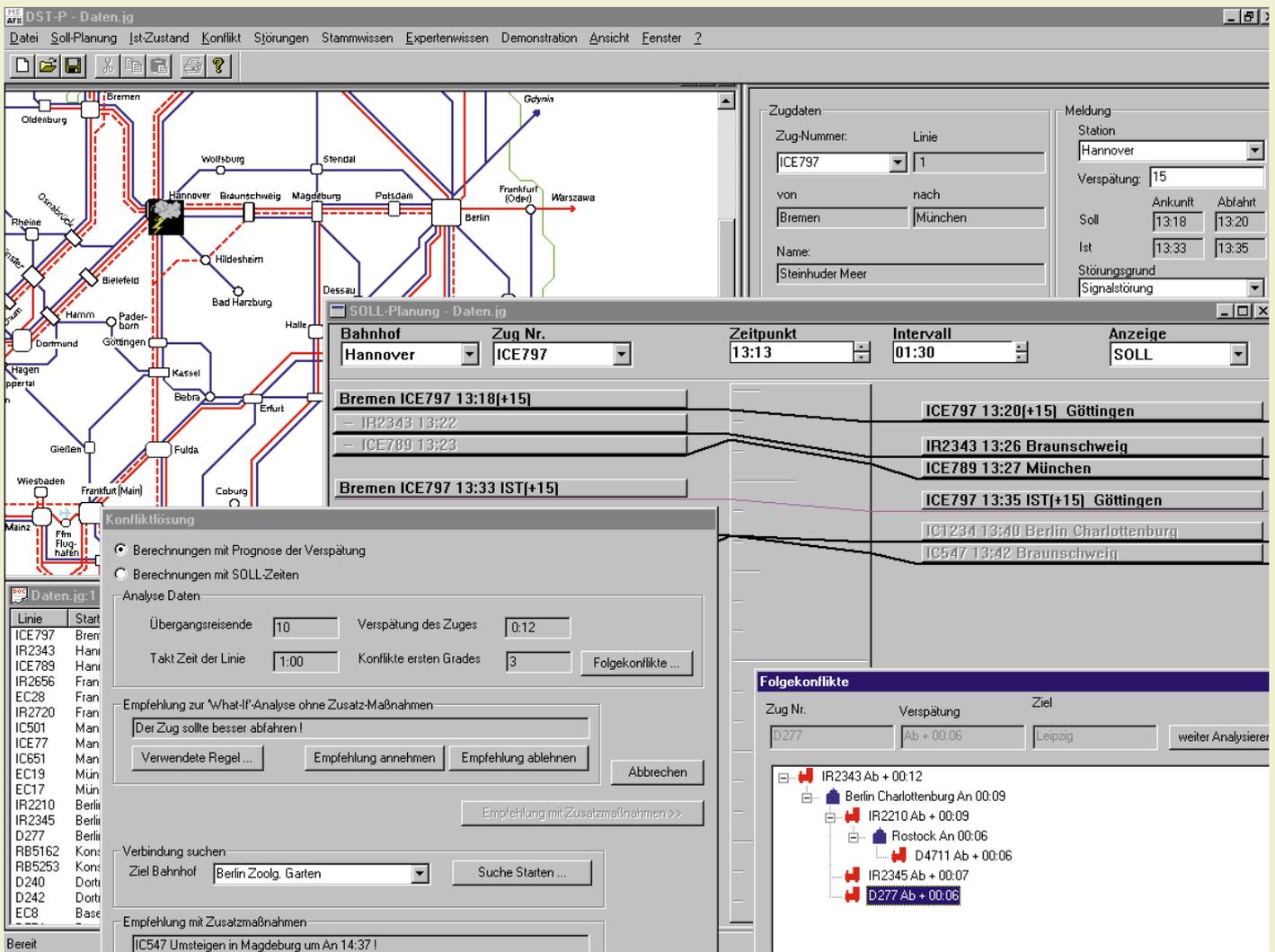


Abb. 4: Prototyp: Disponentenunterstützung bei der Konfliktlösung.

sollte das Paderborner System idealerweise aus den Analysedaten Schlussfolgerungen ziehen und mit Hilfe der zugrunde liegenden Expertenregeln dem Experten einen Vorschlag zur Konfliktlösung unterbreiten. Der Disponent kann diesen Vorschlag annehmen oder verwerfen. Entscheidet der Experte über die Verzögerung der Weiterfahrt eines Anschlusszuges, wird diese Information in der objektorientierten Datenbasis als „minimale Verspätung“ und nicht nur als erwartete Verspätung gespeichert, da Entscheidungen des Experten von Propagierungsalgorithmen zwar verwendet, aber nicht überschrieben werden dürfen. Diese Architektur wird in verschiedenen Projekten mit Kooperationspartnern aus der Praxis komponentenweise umgesetzt und evaluiert. An den Projekten sind derzeit die Deutsche Bahn AG, Geschäftsbereich Fernverkehr, und die TLC GmbH beteiligt. Die Kompetenz des DS&OR Labors fließt u.a. bei der Umsetzung der Problemlösungskomponenten ein. Methoden des Operations Research, wie mathematische Optimierung und diskrete Simulation, sind im System eingebettet und können bei Bedarf aufgerufen werden – ohne dass der Disponent genau wissen muss, welche Algorithmen das System verwendet. Dabei sind die Wartezeitregeln mit weiteren allgemeinen und speziellen betrieblichen Regeln in einer Regelbasis softwaremäßig abgebildet. Die Komponente Case-Based-Reasoning bietet einen Mechanismus an, mit dem innerhalb der Datenbasis nach früheren ähnlichen Konflikten gesucht werden kann, um aus den damals getroffenen Entscheidungen zu lernen.

In einem aktuellen Forschungsprojekt beschäftigen wir uns mit der Fragestellung, wie die virtuelle Modelleisenbahn zur Robustheit der wirklichen Eisenbahn beitragen könnte: Wie kann man die virtuelle Eisenbahn schon in der Planungsphase dazu verwenden, größeren Verspätungen und Konflikten im operativen Einsatz vorzubeugen?

Die Idee besteht darin, aus der statistischen Analyse von Historie-Daten über wirkliche Verspätungen Verteilungen von Verspätungen zu generieren. Durch Simulationsläufe mit Hilfe dieser Verteilungen wird erhofft, Engpässe im Fahrplan ausfindig zu machen. Dies sind örtlich und zeitlich bestimmte Stellen/Anschlüsse im Fahrplan, die oft Konflikte verursachen. Die Aufhebung dieser Engpässe könnte durch gezieltes Redesign des Fahrplans mit Hilfe einer Lösung geeigneter Optimierungsmodelle oder auch durch lokale Veränderung der Wartezeitregeln für die operative Durchführung des Fahrplans erfolgen.

Die virtuelle Modelleisenbahn: Ein Schulungssystem auf Intranet-Basis

In einem verwandten Projekt werden Konzepte für ein neuartiges Simulations- und Schulungssystem entwickelt und erprobt. Bei einer Schulung sollen Disponenten oder Trainees als Gruppe mit dem tatsächlich eingesetzten System ISTP in Anbindung an die echten Zuglaufmeldungen arbeiten. Von einem Trainer werden verschiedene Störungen und Konflikte des realen Netzes im Intranet generiert, so dass sie den Trainees als echt erscheinen.

Sie müssen unter realen Bedingungen schnell reagieren und Konflikte unter Einbeziehung aller relevanten Informationen lösen. Das System simuliert den Netzbetrieb eine Weile weiter, damit die Auswirkungen klar erkennbar werden. In der Bewältigung dieses Simulationsvorgangs stecken hoher Forschungsbedarf und eine beträchtliche Herausforderung, weil die aus dem Netz kommenden Zuglaufmeldungen nicht direkt übernommen werden können, sondern aufgrund der „virtuell“ getroffenen Entscheidungen modifiziert werden müssen.

Das teamorientierte Schulungskonzept mit dem Arbeitstitel Presto soll in Stufen ausgebaut werden, wobei die bereits abgeschlossene erste Stufe einen gegebenen Fahrplan ohne Störungen simuliert, nach Wunsch in Echtzeit oder schneller. In der nächsten Ausbaustufe werden verspätete Zuglaufmeldungen und Gleiswechselfeldmeldungen generiert, die entweder nach einer bestimmten stochastischen Verteilung oder vom Trainer explizit vorgegeben werden. Die von Disponenten getroffenen virtuellen Entscheidungen wie Umleitungen, außerplanmäßige Haltepunkte, Wartezeitüberschreitungen oder Entlastungszüge werden mittels einer Hilfsoberfläche eingegeben. Die benötigten Angaben werden als Message-Objekte an das System und den Trainer weitergesendet.

Weil mehrere Disponenten aus unterschiedlichen regionalen Transportleitungen gemeinsam geschult werden sollen, kann die Zusammenarbeit in Form von Verhandlungen und kooperativ getroffenen Entscheidungen unter Leitung eines erfahrenen Trainers in einem kontrollierten Umfeld geübt werden.

Intelligente Fahrplanoptimierung für Magnetschnellbahnen

Konzepte der Entscheidungsunterstützung im Bereich Transport und Verkehr sind außer bei der Echtzeit-Disposition auch bei der vorangehenden Planung von Strecken, Fahrplänen, Kapazitäten, Personal- und Zugdispositionen notwendig. Am DS&OR Labor werden Operations-Research-basierte Methoden wie Opti-

mierung, Simulation und regelbasierte Systeme, zur betriebswirtschaftlichen Planung von Verkehrssystemen entwickelt und informationstechnisch umgesetzt.

Ein Beispiel ist das vor kurzem abgeschlossene Projekt FOKUS – Fahrplan Optimierung Konstruktion und Simulation – für Magnetschwebbahnen im Auftrag der Transrapid International. In verschiedenen Ausbaustufen wurde ein innovatives Werkzeug erstellt, das bei der Fahrplanerstellung für Magnetschwebbahnen assistiert. Dabei wird auf strikte Einhaltung der speziellen technischen Eigenarten von Magnetbahnen geachtet, um die Realisierbarkeit des Fahrplans zu gewährleisten. Hierbei kann das Verhalten des Fahrplans bei Verkehrsstörungen bis hin zur Sperrung von Teilstrecken und eingleisigem Betrieb simuliert werden, so dass schon im Vorfeld die betriebliche Stabilität sichergestellt werden kann.

Das Werkzeug FOKUS wird zum einen für die Evaluation der geplanten Transrapid-Verbindung Berlin-Hamburg und zum anderen bei der Angebotserstellung für ausländische Investoren verwendet. Es ermöglicht die schnelle Generierung realitätsnaher Szenarien, um Vorteile und Kosten dieses Verkehrsmittels in einem frühen Planungsstadium genau analysieren zu können. Weitere Informationen zu diesem Thema und zu den Arbeitsgebieten des DS&OR Labors finden sich im WWW unter <http://dsor.uni-paderborn.de>.



Dr. Taïeb Mellouli und Dipl.-Wirt.-Inform. Johannes Goecke sind Mitarbeiter im Decision Support & Operations Research Labor Wirtschaftsinformatik 4 der Universität Paderborn.

Standort Deutschland

Eine langfristige Strategieentwicklung ist überfällig

Die derzeit noch relativ günstige Weltkonjunktur und der Exporterfolg der vergangenen Jahre werden als Hinweise dafür gedeutet, dass sich die internationale Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands inzwischen deutlich verbessert hat. Diese Interpretation verkennt jedoch die Langfristigkeit des Problems. Die internationale Wettbewerbsfähigkeit eines Landes wird von dessen langfristigen Potenzialen bestimmt. Sie wird über lange Zeiträume aufgebaut und – wenn sie sich verschlechtert – auch nur schleichend zurückgehen. Wird eine langfristige Strategieentwicklung verpasst, kann Deutschland mit seiner ehemals hohen Wettbewerbsfähigkeit sicherlich noch einige Zeit von seiner Substanz zehren. Bei Abschwächung der kurzfristig relativ günstigen Weltkonjunktur werden die nach wie vor vorhandenen Probleme jedoch umso schmerzhafter wieder sichtbar.

Verheerend wirkt sich daher aus, dass die politische Diskussion zum Standort Deutschland kaum aus einer langfristigen und gesamtgesellschaftlichen Sicht geführt wird. Wichtige gesellschaftliche Gruppen wie Unternehmensverbände und Gewerkschaften dominieren mit ihren interessen gebundenen Perspektiven die Diskussion. Auch die häufig herangezogenen Indikatoren zur vermeintlichen Messung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit wie reale Wechselkurse, Leistungsbilanzergebnisse, Direktinvestitionen oder Lohnstückkosten sind beliebig interessen gebunden interpretierbar. Die Politik selbst, die eigentlich eine gesamtgesellschaftliche langfristige Perspektive einnehmen sollte, folgt je nach ideologischem Standpunkt, der Argumentation der einen oder anderen Interessenvertretung. Die Sichtweisen der Interessengruppen spiegeln zwar wichtige Elemente der internationalen Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands wider, es sind jedoch immer nur Teilaspekte, die den Teilzielen der Interessengruppen dienen.

Funktionierende Märkte gewährleisten Wohlstand

Das zu lösende ökonomische Problem lautet: Wie sollen in Deutschland, dessen Unternehmen im internationalen Wettbewerb erfolgreich bestehen müssen, die institutionellen Arrangements und Standortfaktoren gestaltet werden, damit funktionierende Märkte ein Höchstmaß an Wohlstand in Deutschland gewährleisten? Wie können Vollbeschäftigung und ein hohes Lohn- und Einkommensniveau, eine gerechte Einkommensstruktur und der Erhalt kultureller und gesellschaftlicher Werte durch richtig gesetzte Rahmenbedingungen ermöglicht werden? Die Teilziele der Interessengruppen wie die Verbesserung der Gewinnlage der Unternehmen oder die Lohnsituation der



Prof. Dr. Thomas Gries ist seit 1995 Professor für Internationale Wachstums- und Konjunkturtheorie im Fachbereich 5/Wirtschaftswissenschaften der Universität Paderborn. Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich Wachstum und Globalisierung, Wachstum und Arbeitslosigkeit, Internationale Wettbewerbsfähigkeit sowie Arbeitsmarkttheorie.

Beschäftigten greifen hier zu kurz.

Um das Standort-Deutschland-Problem zu lösen, müssen die Funktionsweisen des internationalen Wettbewerbs und seine dynamischen Veränderungen beachtet werden. Die Mechanismen des globalisierten Wettbewerbs führen aus wirtschaftstheoretischer wie empirischer Sicht für Deutschland zu einem sehr einfachen Ergebnis: Deutsche Unternehmen können im Preiswettbewerb internationale Wettbewerbsvorteile nur bei technologie- und humankapitalintensiven Produkten und Branchen realisieren. Auch im Innovationswettbewerb, der charakteristisch für den Wettbewerb zwischen den Industrieländern ist, können nur erstklassige technologische Fähigkeiten in Verbindung mit qualifiziertem Humankapital¹ die noch bestehenden Wettbewerbsvorteile sichern. Durch die rasanten Aufholprozesse der Schwellenländer Asiens und Lateinamerikas (Abbildung 1) und massive Investitionen in deren geistige und physische Infrastruktur verringern sich nicht nur die bestehenden Wettbewerbsvorteile deutscher Unternehmen auch in humankapitalintensiven Bereichen; der Innovationswettbewerb wird aufgrund beschleunigter Innovationszyklen ebenfalls härter.

Exzellentes Humankapital – Voraussetzung für Innovationskraft Deutschlands

In der so charakterisierten Wettbewerbssituation ist damit der Erhalt des Vorsprungs in der Erzeugungsfähigkeit von und des Umgangs mit neuesten Technologien zentraler Wettbewerbsfaktor. Voraussetzung sowohl für die Innovationskraft Deutschlands als auch für die ebenso wichtige Fähigkeit des Umgangs mit der Technologie ist ein exzellentes Humankapital, also hervorragende Bildung und Ausbildung, in allen erforderlichen Differenzierungen. In einer Welt, in der Realkapital international absolut mobil und damit nicht mehr charakteristisch für die wirtschaftlichen Potentiale eines Landes ist, fällt dem an die Menschen

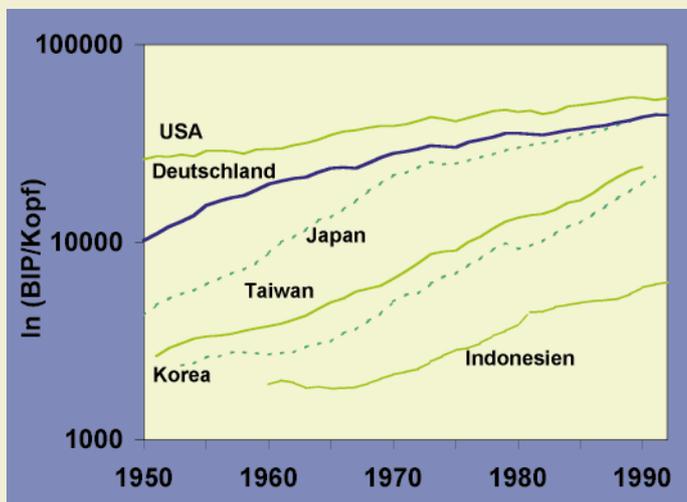


Abb. 1: Internationale Wachstums- und Aufholprozesse; Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes/Kopf: Das globale Wachstum lässt sich als Aufholprozess beschreiben. An der Spitze steht das vom Niveau her führende Land, die USA. In der ersten Phase verläuft der Aufholprozess sehr schnell. Es entsteht der Eindruck, diese Länder könnten sogar die USA in voraussehbarer Zeit überholen. In der zweiten Phase bremst sich der Prozess jedoch ab, so dass das langfristige Niveau ähnlich hoch wie das US-amerikanische ist. In den 50er- und 60er-Jahren waren die europäischen Länder die aufholenden Kräfte, in den 70er- und 80er-Jahren vor allem die asiatischen Länder.

gebundenen Humankapital als dem weitgehend immobilien Produktionsfaktor die Schlüsselrolle zur Charakterisierung der jeweiligen nationalen Wirtschaftskraft zu.

Einige wesentliche Ergebnisse der internationalen Wachstumstheorie der vergangenen Jahre lassen sich für Deutschland in der folgenden Weise konkretisieren: Der Erfolg der deutschen Unternehmen in den globalen Märkten wird letztlich aus gesamtwirtschaftlicher Sicht von der Quantität und Qualität des heimischen Humankapitals bestimmt. Die Verfügbarkeit erstklassigen Humankapitals ist eine der zentralen Rahmenbedingungen für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Unternehmen. Grundlage dafür ist ein ausgezeichnetes Bildungs- und Ausbildungssystem. Dieses ist nicht nur Voraussetzung für den Erfolg der in Deutschland produzierenden Unternehmen; es ist auch der Schlüssel zur internationalen Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands hinsichtlich der Erzielung eines möglichst hohen Wohlstandsniveaus.

Wettbewerbsfähigkeit nur durch entsprechende Produktivität

Wohlstand entsteht durch Wettbewerbsfähigkeit, Vollbeschäftigung und ein hohes Lohnniveau, denn ca. 90 Prozent der Erwerbstätigen erzielen ihr Einkommen als abhängig Beschäftigte. Ein niedriges Lohnniveau bedeutet daher direkt einen Wohlstandsrückgang der großen Masse der Bevölkerung. Wettbewerbsfähigkeit und hohe Lohneinkommen lassen sich jedoch nur durch eine entsprechende Produktivität erzielen. Vor allem die Arbeitslosigkeit ist ein direktes Ergebnis mangelnder Produktivität. Andauernde Unterbeschäftigung heißt, dass die Produktivität der Arbeitslosen nicht ausreicht, um die daraus entstehenden Güter international verkaufen zu können. Arbeitslosigkeit und der daraus resultierende Lohndruck sind also nicht das Problem der nicht wettbewerbsfähigen deutschen Unternehmen – wie häufig argumentiert wird – sondern vielmehr die zum Teil nicht wettbewerbsfähigen deutschen Arbeitskräfte. Eine Anhebung der Produktivität der Arbeit in allen Segmenten des

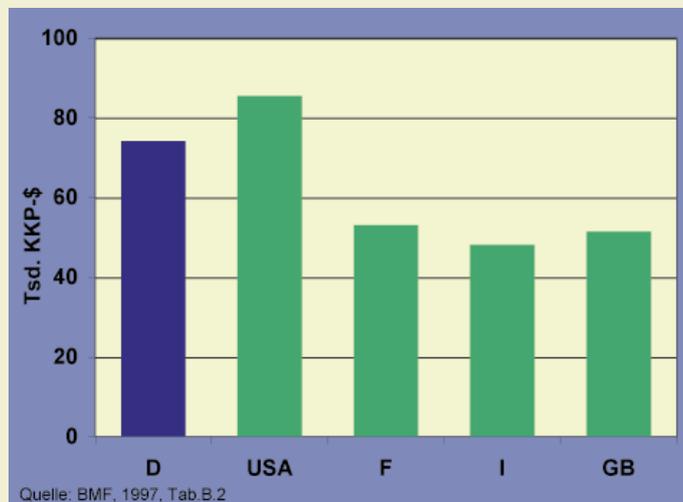


Abb. 2: Durchschnittliche Humankapitalausstattung eines 25- bis 64-jährigen im internationalen Vergleich (gemessen in Kaufkraftparitäten-\$ (KKP in \$)): Die Arbeitskräfte in Deutschland verfügen nach den USA über die durchschnittlich höchste Humankapitalausstattung. Sie ist eine wesentliche Quelle des Wohlstands in Deutschland.

Arbeitsmarktes und eine Anpassung an die erforderlichen Strukturen stellen daher eine Lösung dar, die nicht nur langfristig zur Vollbeschäftigung führen wird, sondern zusätzlich sogar ein hohes Lohn- und Einkommensniveau sichert. Wie bei den Unternehmen ist auch bei der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der Arbeit das Humankapital Schlüssel zur Produktivitätssteigerung und damit zu mehr Wettbewerbsfähigkeit. Der Struktur nach richtig und gut ausgebildete Arbeitskräfte besitzen die Fähigkeiten, um in innovativen Unternehmen Produkte und Dienstleistungen bereitzustellen, die nicht nur Absatz auf dem Weltmarkt finden, sondern zudem auch hohe Preise erzielen. Humankapital erwirkt also durch hohe Produktivität eine hohe Wettbewerbsfähigkeit im gesamtgesellschaftlichen Sinn.

Fehlende Investitionen im Bildungs- und Ausbildungssystem

Erstklassiges Humankapital mit den daraus resultierenden Produktiv- und Innovationsfähigkeiten von Menschen ist damit aus gesamtwirtschaftlicher langfristiger Sicht Standortfaktor Nummer 1 eines Landes. Es ist daher umso erstaunlicher, dass bei Auswertung des internationalen empirischen Materials in Bezug auf Humankapital und Technologiefähigkeit der OECD-Länder Deutschland ein geradezu erschreckendes Bild abgibt. Deutschland hat zwar sowohl in den geschätzten Humankapitalbeständen als auch in der technologischen Leistungsfähigkeit traditionell eine gute Ausgangsposition (Abbildung 2), die Entwicklung in der jüngeren Vergangenheit ist jedoch schwer nachvollziehbar. Fehlende Investitionen im Bildungs- und Ausbildungssystem zeigen deutlich, dass Deutschland von seiner Substanz zehrt. Dies gilt nicht nur, aber vor allem in Bereichen, die für die wichtige Innovationsfähigkeit entscheidende Bedeutung haben – wie die Hochschulen. Hier nimmt Deutschland im OECD-Vergleich nur einen hinteren Platz ein (Abbildung 3). Mit einem Anteil der Bildungsausgaben von knapp 4,5 Prozent des BIP liegt Deutschland klar hinter den USA mit 5,1 Prozent oder Frankreich mit 5,6 Prozent. Entsprechendes gilt auch für den Vergleich mit Italien und Großbritannien. Deutschland kann nicht einmal mit dem Durchschnitt der übrigen Industrieländer mithalten.

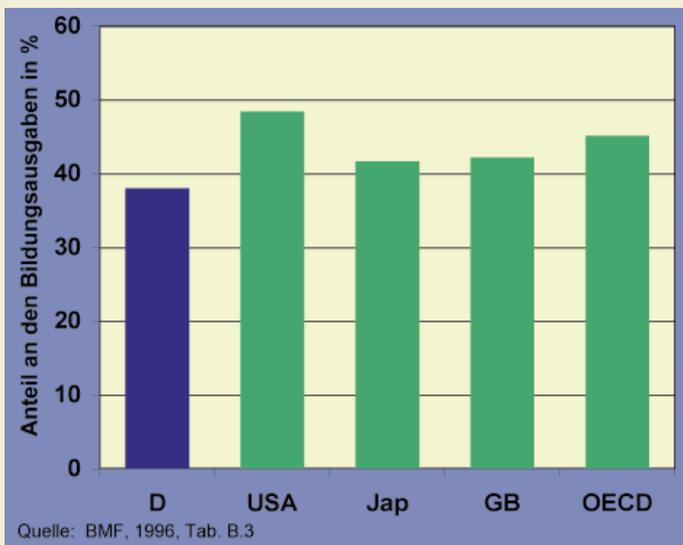


Abb. 3: Anteil der Bildungsausgaben im Tertiärbereich: Das Hochschulsystem wird in Deutschland im internationalen Vergleich eher stiefmütterlich behandelt. Der Ausgabenanteil für das Hochschulsystem in Deutschland fällt deutlich geringer aus, als im internationalen Durchschnitt. Werden in Deutschland nur etwa 40 Prozent der gesamten Bildungsausgaben im Tertiärbereich ausgegeben, beträgt dieser Anteil in den USA fast 50 Prozent.

Auch nennenswerte Investitionstätigkeit hinsichtlich produktionsrelevanten Humankapitals ist kaum zu erkennen. Betrug 1975 die Investitionen für Bildung noch fast 5 Prozent des BIP, sind diese bis 1995 auf kaum über 4 Prozent des BIP gesunken. Im internationalen Vergleich liegt Deutschland mit dieser schwachen Bildungsinvestitionstätigkeit klar unter dem Durchschnitt der OECD-Länder (Abbildung 4).

Hinzu kommt eine kaum erkennbare Reformfähigkeit. Struktur und Inhalte unseres Bildungssystems sind in den vergangenen Jahren nicht kontinuierlich den sich verändernden wirtschaftlichen Anforderungen angepasst worden. Dies wird bereits an den Schulen mehr als deutlich. Unabhängig vom Schultyp hat der zukunftsorientierte Umgang mit modernen Informationstechnologien noch kaum Einzug in die Klassenzimmer gehalten. Die Internet-Host-Intensität der USA ist 4,5-mal höher und die der

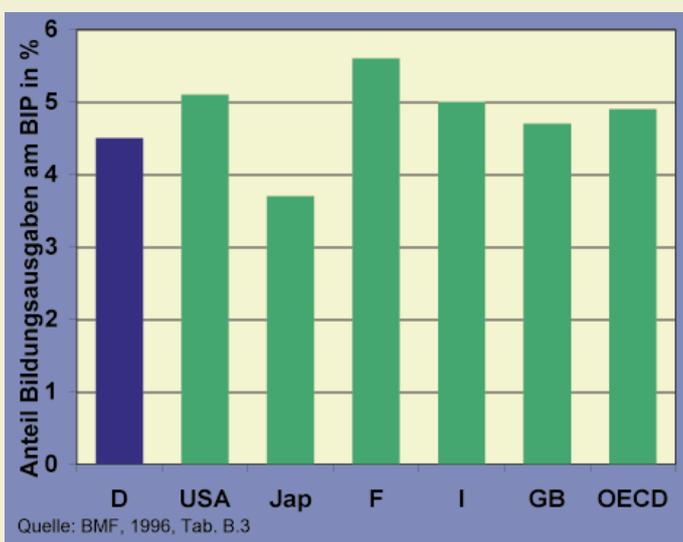


Abb. 4: Anteil der Bildungsausgaben im internationalen Vergleich, 1993: Deutschland nimmt im internationalen Vergleich eine hintere Position bei den Bildungsausgaben ein. Dies ist umso gravierender, da für Deutschland die internationalen Wettbewerbsvorteile entscheidend von der Humankapitalausstattung mitbestimmt werden.

Niederlande mehr als doppelt so hoch wie hierzulande. Für Deutschland, das schon jetzt in den globalen Märkten eine Dienstleistungswirtschaft darstellt, wird die universelle Kommunikationsfähigkeit durch Informationstechnologien und Mehrsprachigkeit einen ähnlich grundlegenden Stellenwert für den wirtschaftlichen Erfolg einnehmen wie zur letzten Jahrhundertwende die Alphabetisierung. Die mangelnde Investitionsbereitschaft des Staates in eine flächendeckende Ausstattung der wichtigsten Schultypen mit modernen Informationstechnologien wird die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands wesentlich schwächen.

Die Entkopplung des Bildungs- und Ausbildungssystems von den wirtschaftlichen Erfordernissen ist aber nicht nur in den Schulen deutlich erkennbar. Auch das Ausbildungssystem genügt den Anforderungen nicht. Während Deutschland am Ende dieses Jahrhunderts mit einem Anteil von fast 70 Prozent aller Arbeitsplätze als Dienstleistungsland auftritt, hat die Ausbildung immer noch die Struktur eines klassischen Industrielandes wie zur Zeit der Jahrhundertwende. Mit ca. 60 Prozent aller Ausbildungen in Fertigungsberufen gegenüber nur 35 Prozent in Dienstleistungsberufen erscheinen die Verhältnisse von Angebots- und Bedarfsstruktur geradezu umgekehrt. Der „Mismatch“ in der Struktur programmiert noch während der Ausbildung zukünftige strukturelle Arbeitslosigkeit vor. Diese Fehlentwicklung ist besonders drastisch bei männlichen Auszubildenden: Bei ihnen erwerben ganze 15 Prozent der männlichen Auszubildenden Abschlüsse in Dienstleistungsberufen. Das Resultat ist erhöhter Lohndruck in den Fertigungsberufen bei sinkenden Einkommen – oder der Weg direkt in die Arbeitslosigkeit. Während das Ausbildungssystem eigentlich Motor für zukunftsweisende Qualifikationen in künftigen Märkten sein sollte, ist es in Deutschland heute mangels eines vorausschauenden bildungspolitischen Managements nicht einmal mehr in der Lage, den Anforderungen bereits lange vollzogener Marktentwicklungen zu entsprechen.

Trotz seiner Schlüsselfunktion spielt der zentrale Standortfaktor Humankapital in der Öffentlichkeit wie in der Politikgestaltung von Bund und Ländern praktisch keine Rolle. Die in der öffentlichen Diskussion als wichtig wahrgenommenen Prozentpunkteveränderungen von Sozialabgaben oder Grenzsteuersätzen sind für die langfristige Wettbewerbsposition Deutschlands, verglichen mit den Defiziten bei Humankapital- und Forschungsinvestitionen, nahezu unbedeutend. Dieses Versäumnis wird sich zwar nicht kurz-, jedoch mittelfristig verheerend auf die wirtschaftliche Situation in Deutschland auswirken.

Überholte bürokratische Strukturen im Verwaltungs- und Sozialsystem

Zusätzlich zu den Versäumnissen bei der zentralen Investitionstätigkeit in Humankapital und Innovationskraft stellen überholte bürokratische Strukturen im Verwaltungs- und Sozialsystem eine Belastung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands dar. Der Staat nimmt seine wesentlichen allokativen und investiven Aufgaben nicht mehr ausreichend wahr. Machten noch vor 25 Jahren Investitionen in die geistige und physische Infrastruktur den Großteil der Ausgaben aus, so hat sich heute dieser investive Ausgabenanteil ganz deutlich zugunsten des Umverteilungsanteils an den Staatsaktivitäten verändert (Abbildung 5).

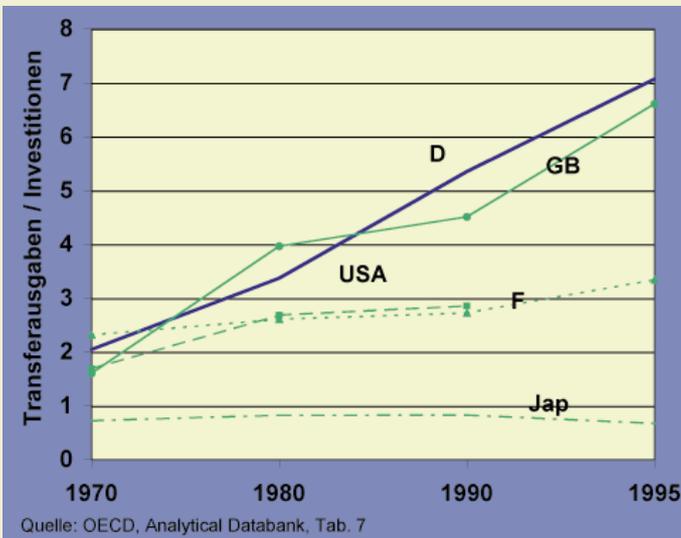


Abb. 5: Entwicklung des Verhältnisses zwischen Verteilungsausgaben und Investitionsausgaben des deutschen Staates: Die extreme Zunahme der Verteilungsaktivitäten zu Lasten der Investitionstätigkeit lässt befürchten, dass Deutschland ohne ausreichende Investitionen nur noch von der Substanz lebt.

Grundversorgungssystem für ganze Bevölkerungsgruppen dringend reformbedürftig

Ohne Fragen der Gerechtigkeit solcher Verteilungsaktivitäten zu tangieren, lässt sich aus der Effizienz­sicht der Ökonomen erkennen, dass viele dieser Umverteilungsmaßnahmen bei frühzeitiger und ausreichender Investitionstätigkeit des Staates nicht notwendig wären. Die Struktur des staatlichen Transfersystems und vor allem des Grundsicherungssystems entstammt einer Zeit, in der ihre Inanspruchnahme ein individueller vorübergehender Notfall war. Heute ist die Grundsicherung kein eigentliches Versicherungssystem mehr im Sinne der Absicherung bei unerwarteten Schicksalsschlägen. Aufgrund fehlender individueller und öffentlicher Humankapitalinvestitionen und mangels eines effizienzorientierten Anreizsystems ist aus dem ursprünglichen Versicherungssystem ein dauerhaftes Grundversorgungssystem für ganze Bevölkerungsgruppen entstanden. Diese Situation ist dringend reformbedürftig. Doch auch die Reform der Sozialsysteme muss nicht ihr Abbau sein – wie vielfach als einziger Weg propagiert. Es muss – auf welchem Niveau auch immer – vor allem um die Effizienz dieser Systeme gehen, welche hauptsächlich durch entsprechende Anreizsysteme gewährleistet wird.

Effizienzorientierung innerhalb der staatlichen Verwaltung erforderlich

Effizienzorientierung ist ebenso innerhalb der staatlichen Verwaltung erforderlich. Dies würde jedoch einer Revolution des administrativen Sektors gleichkommen. Dabei sind es nicht die Beamten selbst, die Effizienz ablehnen. Vielmehr stellt das extrem von juristischen Denkstrukturen geprägte Selbstverständnis deutscher Verwaltungen ein schier unüberwindbares Hindernis für effizientes Arbeiten dar. Der „deutsche Bürokrat“ ist ein Verwalter, ein Ausführer und kein Manager. Er führt einmal Beschlossenes dezidiert durch, ob in der praktischen Realität effizient oder nicht. Spielräume zu flexibler effizienter Gestaltung der inhaltlichen Vorgaben des Gesetzgebers sind meist nicht gegeben. Dafür werden die Vorgaben des Gesetzgebers immer detaillierter, da er glaubt, alle Möglichkeiten vorwegdenken und vorregeln zu können. Die weitreichenden Probleme, die eine Gesellschaft mit einem ausufernden juristischen Regelungs-

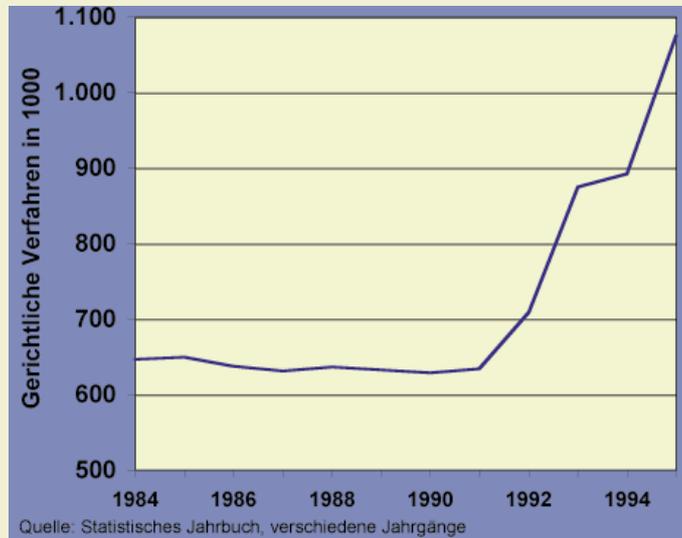


Abb. 6: Verfahren an deutschen Verwaltungs-, Sozial- und Arbeitsgerichten: Die weitreichenden Probleme, die eine Gesellschaft mit einem ausufernden juristischen Regelungssystem hat, spiegeln sich in der drastischen Zunahme von Prozessen wider. Eine solche Prozesslawine darf nicht die Alternative zu anreizkompatiblen ökonomisch orientierten Regelungsmechanismen sein.

system hat, spiegeln sich in der drastischen Zunahme von Prozessen wider (Abbildung 6). Mehr Kompetenzen, aber auch Verantwortung und Rechenschaftspflicht für eigenverantwortliche Entscheidungen sollten stattdessen den administrativen Organisationen durch den Gesetzgeber eingeräumt werden, um die Abläufe und Einzelentscheidungen effizienter zu gestalten.

Gigantische Lastenaufbürdung für die nächste Generation

Jedoch sind nicht nur die Allokativaufgaben in der Vergangenheit durch den Staat zunehmend weniger wahrgenommen worden. Auch die Verteilungsaufgaben zwischen den Generationen werden nicht zufrieden stellend erfüllt. Der Mangel an geistigen und physischen Infrastrukturinvestitionen lässt bereits die jetzige Generation von der einst aufgebauten Substanz leben und entzieht der zukünftigen Generation die wirtschaftlichen Potenziale. Der gleichzeitige Anstieg der öffentlichen Verschuldung und die daraus resultierenden Zinszahlungen belasten die nachfolgende Generation zusätzlich. Das in Abbildung 7 dargestellte Verhältnis zwischen Investitionen und Zinszahlungen macht deutlich, dass wir bereits heute immer weniger in die Zukunft investieren und dafür immer mehr Schuldendienste für die Verschuldung aus der Vergangenheit aufbringen müssen. Die nächste Generation wird unter Beibehaltung dieser Politik nicht nur ihrer wirtschaftlichen Potenziale beraubt, sondern auch die von uns geerbten Verbindlichkeiten bedienen müssen. Hinzu kommt ein riesiges demografisches Problem für das Umlageverfahren der Rentenversicherungen, das sich ebenfalls zu Lasten der nächsten Generation entwickeln kann. Alle drei Elemente bedeuten eine gigantische Lastenaufbürdung für die nächste Generation, die sich heute – da die Weichen hierfür gestellt werden – nicht dagegen zur Wehr setzen kann.

Soll die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands nachhaltig verbessert werden – und dies ist zum Erhalt des vorhandenen Wohlstandsniveaus dringend erforderlich –, muss eine umfassende Strategie-debatte zu den wirklich wichtigen Standortfaktoren geführt werden. Eine langfristig angelegte Strategie muss das Flickwerk interessenorientierter Wirtschaftspolitik ersetzen.

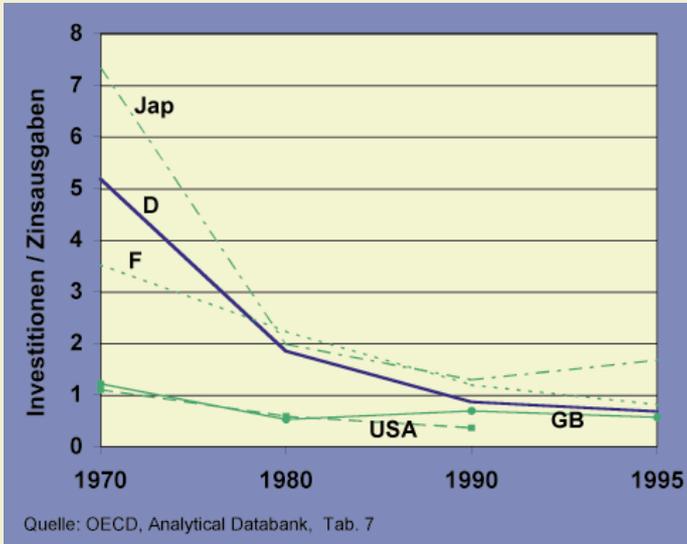


Abb. 7: Verhältnis zwischen öffentlichen Investitionen und Zinsausgaben:
 Während 1970 die Investitionsausgaben des Staates noch fünfmal höher waren als die Zinsausgaben, übertreffen die Zinsausgaben inzwischen die Investitionsausgaben. Dies bedeutet eine Umverteilung zu Lasten zukünftiger Generationen.

Fußnote

¹ Qualifiziertes Humankapital bedeutet eine hervorragende Bildung und Ausbildung in allen erforderlichen Differenzierungen. Das heißt, Humankapital steht für die Fähigkeit der Menschen die vorhandene Technik effizient einzusetzen und neue Technologien zu entwickeln.

Gesund altern

Zur Bedeutung von Ernährung und Bewegung im Alter und im hohen Alter

Jahrtausendlange Bemühungen der Menschheit, den Traum vom nie versiegenden Jungbrunnen wahr werden zu lassen, haben sich bis heute nicht erfüllt. Immer mehr Menschen haben heute die Chance, nicht nur alt, sondern sogar sehr alt zu werden. Jedoch leiden viele ältere Menschen an chronisch-degenerativen Erkrankungen und sind im letzten Lebensabschnitt nicht mehr zu einem gesunden, selbsterfüllten und unabhängigen Leben befähigt. Werden erfolgreich gealterte Hundertjährige nach den Ursachen für ihr hohes Alter gefragt, dann nennen sie fast immer eine gesunde Ernährung und viel Bewegung. Auch wenn die Ursachen vieler chronisch-degenerativer Erkrankungen noch nicht in allen Details geklärt sind, können aus den bisher vorliegenden wissenschaftlichen Befunden wichtige primär- und sekundärpräventive Strategien entwickelt werden. Eine bedarfsdeckende Ernährung und altersgemäße Bewegung können zwar nicht zu ewigem Leben verhelfen, sie tragen jedoch dazu bei, dass mehr Menschen als bisher auch das hohe Alter in guter körperlicher und geistiger Verfassung erleben.

Die Altersentwicklung unserer Bevölkerung und ihre Folgen

Die durchschnittliche Lebenserwartung und die Altersstruktur der deutschen Bevölkerung haben sich innerhalb der letzten 100 Jahre entscheidend verändert (Abbildung 1). Die durchschnittliche Lebenserwartung für Männer liegt heute bei 72,5 und für Frauen bei 79 Jahren. Der Anteil der über 60-jährigen Personen an der Gesamtbevölkerung ist mit 20 Prozent inzwischen genauso hoch wie der Anteil der unter 20-jährigen. Heute sind bereits fast 4 Prozent der Gesamtbevölkerung 80 Jahre alt oder älter. Prognosen gehen von einer weiteren Verschiebung der Altersstruktur aus, so dass im Jahr 2010 ca. ein Viertel und im Jahr

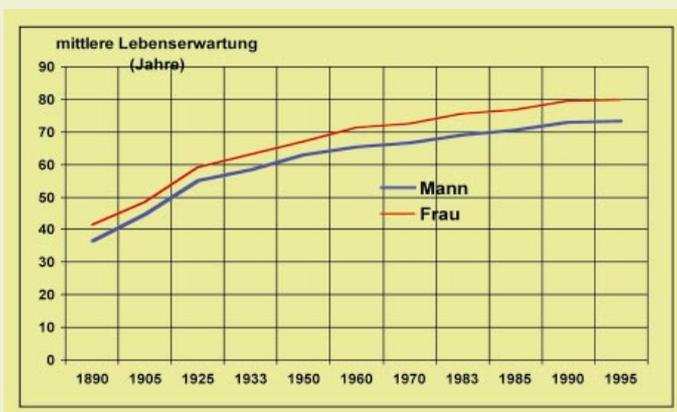


Abb. 1: Veränderung der Lebenserwartung in den letzten 100 Jahren.



Prof. Dr. Helmut Heseker ist seit 1997 Professor für Ernährungswissenschaft im Fachbereich 6/Physik der Universität Paderborn. Seine Forschungsschwerpunkte bilden Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Ernährung, Gesundheit und Leistungsfähigkeit in verschiedenen Lebensphasen sowie Studien zur Bioverfügbarkeit und Wirkung von sekundären Pflanzeninhaltsstoffen. Im Auftrag des Bundesministeriums für Gesundheit führt er zurzeit eine umfangreiche Evaluation der Ernährungserziehung in allen Bundesländern durch.

2025 ein Drittel der deutschen Bevölkerung über 60 Jahre sein wird.

Diese demografische Entwicklung wird das gesellschaftliche, soziale und wirtschaftliche Leben der Zukunft nachhaltig beeinflussen. Vor allem im höheren Lebensalter treten z.B. zunehmend chronische Erkrankungen und Behinderungen auf, welche die Menschen in ihrer Selbständigkeit, Aktivität und damit Lebensqualität mehr oder weniger stark einschränken. Lebensqualität im Alter bedeutet u.a.: selbstbestimmt, eigenverantwortlich und zufrieden leben; geringe Inanspruchnahme medizinischer Leistungen, Erhaltung der geistigen und körperlichen Beweglichkeit sowie der Sinne, aktive Teilnahme am gesellschaftlichen Leben (Tabelle 1).

Durch die sich mit dem Alter generell häufenden gesundheitlichen Probleme werden die Sozialversicherungssysteme schon heute von älteren Menschen besonders stark in Anspruch genommen. Die seit Jahren zu beobachtende Kostenexplosion

- selbstbestimmt und eigenverantwortlich leben
- keine oder nur geringe Zahl von Krankenhaustagen im Jahr
- keine oder geringe Inanspruchnahme medizinischer Hilfsmittel
- geringe Medikamenteneinnahme
- Teilnahme am gesellschaftlichen Leben
- Erhaltung der geistigen Beweglichkeit
- Erhaltung der körperlichen Beweglichkeit (Mobilität)
- Erhaltung der Sehfähigkeit
- Zufriedenheit und Freude am Leben

Tab. 1: Lebensqualität im Alter.

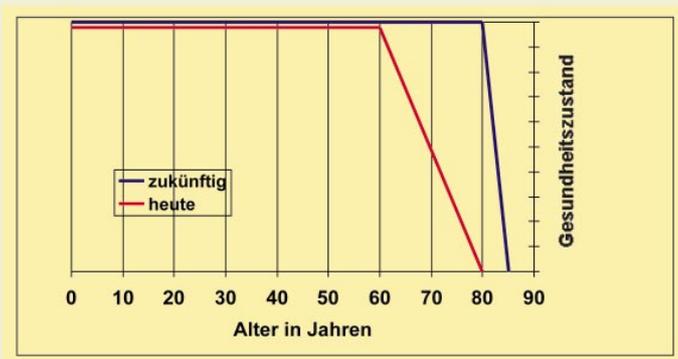


Abb. 2: Gesund alt werden ist das Ziel.

im Gesundheitswesen ist u.a. auf die genannte Veränderung der Altersstruktur zurückzuführen. Vor diesem Hintergrund gewinnen vorbeugende Maßnahmen an Bedeutung, die es älteren Menschen ermöglichen, angenehmer als bisher zu altern und auch die letzte Lebensphase gesund und unabhängig zu erleben. Ein weiteres Ziel dieser Präventionsmaßnahmen liegt darin, die Zeitspanne einer eventuellen Pflegebedürftigkeit so weit wie möglich zu reduzieren (Abbildung 2). Unsere derzeitige Situation wird treffend wie folgt beschrieben: „wir leben zu kurz, und wir sterben zu lange!“ Neueste wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass Fehlernährung und Bewegungsmangel unsere Gesundheit viel nachhaltiger beeinträchtigen und die Entstehung weit verbreiteter chronischer Erkrankungen viel stärker begünstigen, als dies bisher angenommen wurde.

Alt ist nicht gleich alt

Nach einer Definition der Weltgesundheitsorganisation (WHO) wird als „alt“ klassifiziert, wer das 40. Lebensjahr überschritten hat. Allein die Lebensspanne über 65-jähriger Menschen umfasst mehr als 35 Lebensjahre. Daher erfolgt demgemäß eine weitere Differenzierung dieser Altersgruppe nach dem chronologischen Lebensalter:

- 65-74-jährige ältere Menschen (= junge, aktive Alte)
- 75-90-jährige Hochbetagte
- 90-100-jährige Höchstbetagte
- über 100-jährige Langlebige

Die Senioren einer Altersklasse stellen jedoch aufgrund großer Unterschiede innerhalb ihrer Lebens- und Gesundheitssituation sowie der physischen und psychischen Leistungsfähigkeit eine sehr heterogene Gruppe dar, so dass chronologisches und biologisches Alter häufig große Abweichungen aufweisen. Daher wird zusätzlich eine Einteilung aufgrund der Gesundheitssituation vorgenommen:

- unabhängig lebende Senioren,
- hilfsbedürftige Senioren,
- pflegebedürftige Senioren.

Altersabhängigkeit von Körperfunktionen

Zum Zeitpunkt der Geburt sind viele Körperfunktionen noch nicht ausreichend entwickelt, um den Organismus zu einem selbständigen Leben zu befähigen (Abbildung 3). Die Organsysteme entwickeln sich nach der Geburt weiter und erreichen in vielen Fällen erst nach 20 bis 30 Jahren ihr Funktionsmaximum.

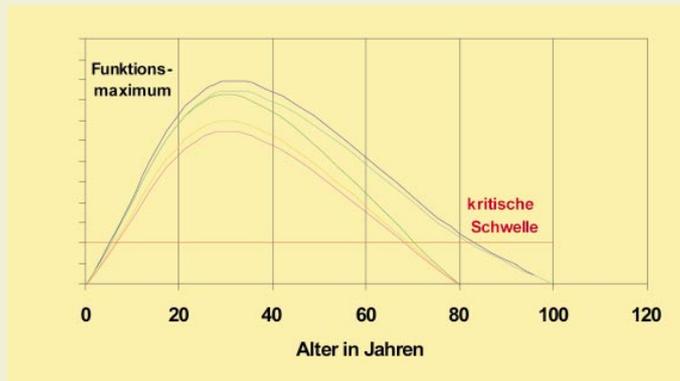


Abb. 3: Altersabhängigkeit von Körperfunktionen.

Oft übersteigt dieses Funktionsmaximum die kritische Schwelle um ein Vielfaches und ermöglicht mit seiner Überkapazität auch Höchstleistungen. Der physiologische Alterungsprozess führt wiederum zu einer Abnahme der Körperfunktionen, die aufgrund der Kapazitätsreserven allerdings nicht gleich spürbare Leistungseinbußen mit sich bringen. Das Ausmaß dieser Abnahme wird durch unseren Lebensstil und die langfristige Ernährung beeinflusst. Eine unzureichende Nährstoffversorgung kann z.B. dazu führen, dass die zur Aufrechterhaltung einer Funktion notwendige kritische Schwelle im Leben bereits frühzeitig erreicht wird. Die damit verbundenen Funktionseinbußen können eine drastische Beeinträchtigung der Gesundheit und damit der Lebensqualität verursachen. Andererseits kann eine Optimierung der Nährstoffversorgung zu einer verzögerten Abnahme dieser altersbedingten Organveränderungen führen, so dass die kritische Schwelle gar nicht oder erst sehr viel später im Leben überschritten wird.

Ernährungsrelevante physiologische Veränderungen

Wie bereits dargestellt, wird mit dem Altern ein biologischer Prozess beschrrieben, der als solcher nicht aufgehalten werden kann. Die vielfältigen Auswirkungen physiologischer Altersveränderungen, aber auch körperliche Behinderungen, psychische und soziale Probleme, geistige Beeinträchtigungen, Krankheiten und multiple Medikamenteneinnahme stellen ihrerseits entscheidende Risikofaktoren für eine Unterversorgung mit essentiellen Nährstoffen dar (Tabelle 2).

- Abnahme des Seh-, Geschmacks- und Geruchsvermögens
- Zahnverlust und Kaubeschwerden
- Mundtrockenheit und Schluckbeschwerden
- Reduzierung des Appetits und verringerter Esstrieb
- früher Eintritt von Sättigung während der Nahrungsaufnahme durch erhöhte Aktivität von Sättigungshormonen (z.B. Cholecystokinin)
- Verminderung des Durstempfindens
- Abnahme der Magensäureproduktion
- Abnahme der Muskelmasse
- allgemeine Verminderung der Stoffwechselrate
- Abnahme der Fähigkeit, Glukose zu verstoffwechseln; Abnahme der Glukosetoleranz

Tab. 2: Ernährungsrelevante physiologische Veränderungen des Körpers im Alter.

Unterernährung im Alter

Während in den mittleren Altersgruppen und bei jungen Seniorinnen und Senioren durch Übergewicht bedingte oder mitbedingte Erkrankungen verstärkt auftreten, gewinnt im höheren Alter die Problematik der Unterernährung zunehmend an Bedeutung. Bei vielen Hochbetagten finden sich deutliche Hinweise auf Ernährungsdefizite. Die wesentlichen Einflussfaktoren, welche die Entstehung von Unterernährung im Alter begünstigen, konnten inzwischen identifiziert werden (Tabelle 3). Sie können in altersbedingte, physiologische Veränderungen, direkte Ernährungsfaktoren, Krankheit und Medikamenteneinnahme, körperliche und geistige Beeinträchtigungen sowie sozioökonomische Faktoren unterteilt werden. Bedauerlicherweise werden diese Faktoren in der Praxis bisher viel zu wenig berücksichtigt.

physiologische Altersveränderungen
Altersanorexie: veränderte Hunger- u. Sättigungsregulation
nachlassende Sinneswahrnehmungen
Kauprobleme
Verdauungs- und Resorptionsstörungen
geringere Muskelmasse

Ernährungsverhalten

- einseitige Ernährung
- fehlende Anpassung an veränderten Nährstoffbedarf

Krankheits- und Medikamenteneffekte

- Anorexie
- Behinderung der Nahrungsaufnahme
- Verdauungs- und Resorptionsstörungen
- erhöhte Nährstoffverluste
- erhöhter Nährstoffbedarf

körperliche Behinderungen

- Mobilitätsstörungen, Immobilität
- Behinderung der oberen Extremitäten
- Kaubeschwerden
- Schluckstörungen

geistige und psychische Beeinträchtigung

- Vergesslichkeit, Verwirrtheit, Demenz
- Depressionen, Essensverweigerung

sozioökonomische Faktoren

- Bildung
- Einkommen, finanzielle Situation
- Wohnsituation

Tab. 3: Ursachen von Unterernährung im Alter.

Folgen der Unterernährung im Alter

Unterernährung und Untergewicht sind im Alter nicht nur weit verbreitet, sondern auch mit zahlreichen, teilweise schweren Folgen für den Gesundheits- und Allgemeinzustand, das Wohlbefinden und die Lebensqualität verbunden (Tabelle 4). Umfang und Schwere der Folgen hängen wesentlich von Ausmaß und

unspezifische Folgen: beeinträchtigter Allgemeinzustand
 allgemeine Schwäche
 Müdigkeit
 Antriebslosigkeit

Organfunktionen:

Skelettmuskulatur Schwäche, Abnahme der Muskelkraft
 erhöhtes Sturz- und Frakturrisiko
Atemmuskulatur Störung der respiratorischen Funktion
Immunfunktion erhöhte Infektanfälligkeit
Haut erhöhtes Dekubitusrisiko
 (= Wundliegen)
Gehirn neurologische und kognitive Störungen

Krankheitsverlauf:

beeinträchtigte Wundheilung
 verlangsamte Rekonvaleszenz
 erhöhtes Komplikationsrisiko

Mortalität:

erhöhtes Mortalitätsrisiko
 (= Sterblichkeitsrisiko)

Tab. 4: Folgen der Unterernährung im Alter.

Dauer der vorangegangenen Unterernährung ab. Während bei leichten Formen einer allgemeinen Unterernährung meist nur unspezifische Krankheitssymptome auftreten, führt ein anhaltendes Energie- und Nährstoffdefizit zu spezifischen klinischen Erscheinungsbildern, Funktionsstörungen und Mangelsymptomen. Es kommt zu Störungen wichtiger Organfunktionen. Im Krankheitsfall wird eine Genesung meist ungünstig beeinflusst. Neben diesen negativen Folgen für Organfunktionen und Gesundheitszustand ist Mangelernährung auch mit einem erhöhten Mortalitätsrisiko verbunden.

Durch Ernährung

beeinflussbare Organsysteme

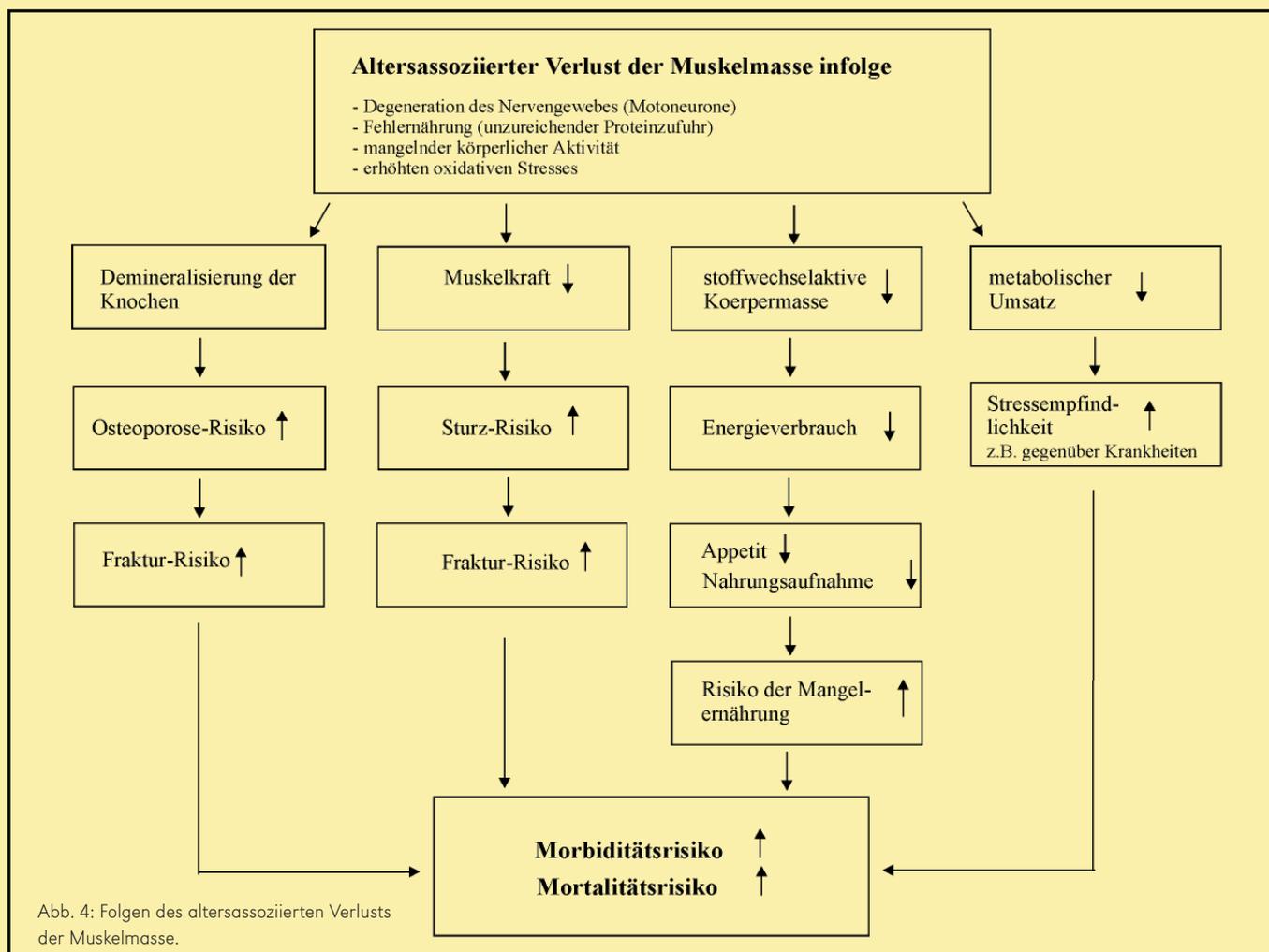
Inzwischen konnten verschiedene altersbedingte Veränderungen von Organen und Körperfunktionen identifiziert werden, die durch Qualität und Quantität der Nahrung beeinflussbar sind. Diese betreffen:

- den Bewegungsapparat,
- das Herz-Kreislauf-System,
- das Nervensystem,
- das Immunsystem und
- den Sehapparat.

Bewegungsapparat:

Skelettsystem

Eine ausreichende Calcium-, Vitamin-D- und möglicherweise Vitamin-K-Aufnahme sind wichtige Determinanten eines normalen Knochenstoffwechsels und können das Auftreten z.B. von Osteoporose verzögern oder gänzlich verhindern. Eine langandauernde Unterversorgung mit Calcium führt zu einer verringerten Knochendichte. Wenn zum Zeitpunkt der maximalen Knochenmasse (um das 30. Lebensjahr) keine optimale Knochendichte erreicht wurde, beginnt der altersbedingte Knochenabbau von einem niedrigeren Niveau aus und resultiert bereits frühzeitig im Erreichen einer kritischen Knochendichte (siehe auch Abbildung 3). Eine ausreichende Calciumversorgung in der Jugend und im Erwachsenenalter, verbunden mit reichlich körperlicher Bewegung, die den Knochenaufbau stimuliert, gelten daher als wichtige präventive Maßnahmen zur Verminderung des Osteoporoserisikos im Alter.



Da mit zunehmendem Alter die Fähigkeit zur Vitamin-D-Synthese in der Haut abnimmt, verdient die ausreichende Vitamin-D-Versorgung älterer Menschen besonders in den sonnenarmen Jahreszeiten und bei ans Haus gebundenen Personen eine erhöhte Aufmerksamkeit. Selbst im hohen Alter gehen von einer gesteigerten Calcium- und Vitamin-D-Aufnahme noch positive Effekte aus und verlangsamen z.B. die Progression einer Osteoporose. Auch eine defizitäre Vitamin-K-Versorgung scheint für die Pathogenese der Osteoporose ebenfalls von Bedeutung zu sein. Für die Altersgruppe der über 65-jährigen wird daher heute eine höhere Calcium- und Vitamin-D-Aufnahme empfohlen.

**Bewegungsapparat:
Muskelmasse**

Die Skelettmuskulatur ist beim jüngeren Erwachsenen das größte Körperorgan, nimmt aber mit zunehmendem Alter ab. Eine wesentliche Ursache für den Muskelabbau im Alter scheint in der Degeneration des Nervensystems und dem damit verbundenen Verlust von Motoneuronen zu liegen. Es werden jedoch auch eine unzureichende Proteinzufuhr, körperliche Inaktivität sowie erhöhter oxidativer Stress als Faktoren für den Verlust an Muskelzellen diskutiert. Der altersassozierte Muskelschwund ist aus funktioneller Sicht besonders bedeutsam und hat weitreichende (patho-)physiologische Konsequenzen, die in Abbildung 4 dargestellt sind.

Eine Abnahme an Muskelmasse führt durch weniger stoff-

Eine hohe Muskelmasse im Alter

- verbessert Kohlenhydrat-, Lipid- und Proteinstoffwechsel,
- steigert den Energiebedarf,
- steigert den Appetit und die aufgenommene Nahrungsmenge,
- verbessert die Gesundheitserwartung,
- reduziert das Risiko für Stürze und Knochenfrakturen,
- erhöht die Mobilität,
- reduziert das Risiko für eine Nährstoffunterversorgung.

Tab. 5: Bedeutung der Muskelmasse im Alter.

wechselaktive, energieliefernde Zellen zu einer verminderten körperlichen Leistungsfähigkeit bzw. Muskelkraft und zu allgemein reduzierten StoffwechsellLeistungen (Tabelle 5). Durch die schwindende Muskelmasse nimmt außerdem die Widerstandsfähigkeit gegenüber Stress (z.B. Krankheitsstress) deutlich ab. Ein Erhalt der Muskelmasse wirkt dagegen einer Abnahme des Energiebedarfs entgegen, steigert auf diese Weise Appetit und Nahrungsaufnahme und reduziert somit das Risiko für eine Nährstoffunterversorgung. Gesundheitserwartung und Mobilität bzw. Gehfähigkeit werden insgesamt verbessert. Das Risiko für Stürze und Knochenfrakturen ist bei Senioren mit normaler Muskelmasse deutlich geringer.

Dieser bedeutsame Zusammenhang zwischen Muskelmasse und

Gesundheitsstatus wurde bislang viel zu wenig beachtet. Besonders problematisch wirkt sich aus, dass ein entstehendes Untergewicht vom Betroffenen, von seinen Angehörigen oder vom Pflegepersonal und Hausarzt häufig nicht erkannt wird. Aus diesem Grund sind u.a. eine regelmäßige Gewichtskontrolle sowie das Führen einer Gewichtsverlaufskurve sinnvoll. Die Entwicklung geeigneter, altersgerechter Bewegungsprogramme und deren Evaluierung sowie die Zusammenstellung einer Ernährung, die den Muskelerhalt und -wiederaufbau unterstützt, werden die Aufgaben zukünftiger gemeinsamer Forschungsaktivitäten von Ernährungs- und Sportwissenschaft sowie Sportmedizin sein.

Herz-Kreislauf-System

Arteriosklerose und die damit einhergehenden Folgeerkrankungen (Herzinfarkt, Schlaganfall, Verschlusskrankheiten der Extremitäten) stellen unter den ernährungsabhängigen oder -mitbedingten Erkrankungen im Alter das größte Gesundheitsproblem dar. Es sind inzwischen viele Ernährungs- und Lebensstilfaktoren bekannt, die das Arterioskleroserisiko erhöhen:

- überhöhte Energieaufnahme und daraus resultierendes starkes Übergewicht,
- hohe Gesamtfett- und Cholesterinaufnahme,
- Bluthochdruck,
- Bewegungsmangel und
- Zigarettenkonsum.

Es gibt jedoch auch Faktoren, die das Arterioskleroserisiko vermindern:

- ausreichend hohe Zufuhr an mehrfach ungesättigten Fettsäuren, wobei die in Fischölen vorkommenden Omega-3-Fettsäuren besonders wichtig sind,
- ausreichend hohe Zufuhr der antioxidativen Vitamine E und C,
- ausreichend hohe Folsäurezufuhr,
- viel körperliche Bewegung und
- sinnvolle Stressbewältigung.

Nervensystem

Eine durch unzureichende Ernährung verursachte Vitamin-B6-Verarmung führt bei älteren Menschen zu stärkeren Veränderungen von Gehirnfunktionen als bei jüngeren Menschen. Ergebnisse klinischer Studien belegen, dass eine ausreichende Vitaminaufnahme bei älteren Menschen kognitive Funktionen bzw. Gedächtnisleistungen und die allgemeine Befindlichkeit signifikant steigern kann. Verbesserungen werden besonders bei Personen mit anfänglich unzureichender Vitaminversorgung erzielt.

Immunsystem

Der Alterungsprozess geht mit einigen gravierenden Veränderungen im Immunsystem einher, die zu einer erhöhten Morbidität und Mortalität führen. Diese Veränderungen betreffen besonders die zellvermittelte Immunität. Eine unzureichende Versorgung mit Zink, Selen und Vitamin B6 führt zu einer signifikant schwächeren Immunantwort und einem deutlich erhöhten Infektionsrisiko. Aus klinischen Untersuchungen ist z.B. bekannt, dass hohe Vitamin-E-Gaben spezifische Immunfunktionen positiv beeinflussen. Eine solche allgemeine Stärkung der

Körperabwehr bewirkt bei alten Menschen meist eine geringere Häufigkeit und kürzere Dauer von Infekten.

Sehapparat

Senile Katarakte (Grauer Star) sind im Alter weit verbreitet, beeinträchtigen das Sehvermögen entscheidend und verursachen beträchtliche Kosten im Gesundheitswesen. Bei der Formation von Katarakten scheint die Oxidation von Linsenproteinen eine zentrale Rolle zu spielen. Epidemiologische und auch klinische Studien sprechen dafür, dass sich die Kataraktentwicklung durch eine adäquate Aufnahme antioxidativer Vitamine aufhalten oder zumindest verlangsamen lässt. In vielen Fällen kann eine Operation durch eine entsprechende Prävention um Jahre verschoben oder gar vermieden werden.

Die altersbedingte Makuladegeneration (AMD) ist die häufigste Ursache für Erblindung im Alter. Sie scheint als Folge einer hohen Empfindlichkeit der Netzhaut gegenüber oxidativem Stress aufzutreten, der wiederum eine Folge des hohen Gehalts der Photorezeptormembranen mit mehrfach ungesättigten Fettsäuren und der direkten Lichteinwirkung darstellt. In einigen Studien konnte eine enge Beziehung zwischen einer hohen Vitamin-E- und Carotinoidaufnahme und einem verringerten AMD-Risiko beobachtet werden.

Durstgefühl und Alter

Viele ältere Menschen haben ein verringertes Durstempfinden und trinken daher deutlich zu wenig. Manchmal führen auch Angst vor Inkontinenz, Prostataprobleme oder falsche Vorstellungen („Trinken ist ungesund“) zu einer unzureichenden Flüssigkeitszufuhr. Besonders an heißen Tagen oder in überhitzten Räumen verursacht die zu geringe Flüssigkeitsaufnahme verbunden mit erhöhten Flüssigkeitsverlusten rasch einen gefährlichen Wassermangel. Es kommt zu Austrocknungszuständen, die u.a. Verwirrtheit und Nierenversagen hervorrufen können. Dieser auch als Exsikkose bezeichnete Zustand ist nicht selten mit einer vorübergehenden Krankenhauseinweisung verbunden und kann ohne rechtzeitige Hilfe den Tod auslösen (Tabelle 6).



Vorbeugemaßnahmen im Alter

Ziel aller Ernährungs- und Bewegungsmaßnahmen im Alter sind letztlich die Erhaltung und Verbesserung der Lebensqualität durch Minimierung von physiologischen Altersveränderungen, durch die Erhaltung von Funktionen, Vermeidung bzw. Verzögerung von Krankheiten und dadurch Verminderung vorzeitiger

persönliche Gesundheitsvorsorge

60-75 Jahre: Vorbereitung auf das hohe Alter

1. Muskelmasse/Körpergewicht erhalten
2. Rauchverzicht; kein Alkoholabusus
3. ausreichend Flüssigkeit trinken
4. Obst, Gemüse, Säfte und Kartoffeln in fünf Portionen über den Tag verteilt
5. fettarm und ballaststoffreich essen
6. körperliche Bewegung und Entspannung
7. Unfallquellen im Haushalt beseitigen
8. Küche und Wohnung altersgerecht einrichten
9. geistige Beweglichkeit erhalten

Tab. 7: Vorbereitungsmaßnahmen auf das hohe Alter.

Hinfälligkeit und Pflegebedürftigkeit. Die rechtzeitige Vorbereitung auf das Alter durch eine gesunde Ernährung und Lebensweise ist daher von großer Bedeutung.

Da ausreichende Ernährung und regelmäßige Bewegung in der frühen Seniorenphase (60 bis 75 Jahre) zu einer Konstanz der Muskel- und Knochenmasse beitragen, Herz und Kreislauf in Schwung sowie Nerven- und Immunsystem intakt halten, sollten die Betroffenen diese Lebensphase nutzen, um sich durch eine gezielte Umstellung der Ernährungs- und Lebensweise auf das hohe Alter vorzubereiten (Tabelle 7). Im Lebensabschnitt über 75 Jahren treten dann Maßnahmen in den Vordergrund, die zu einer weiteren Erhaltung der Lebensqualität beitragen können (Tabelle 8).

persönliche Gesundheitsvorsorge

über 75 Jahre: Erhaltung der Lebensqualität

1. Muskelmasse erhalten
2. ausreichend Flüssigkeit trinken; da häufig kein Durst verspürt wird → Gedächtnisstützen
3. genug essen, da der Appetit oft nachlässt
4. erlaubt ist nahezu alles, was gern gegessen und gut vertragen wird
5. vitamin- und mineralstoffreiche Kost
6. körperliche Bewegung

Tab. 8: Maßnahmen zur Erhaltung der Lebensqualität im hohen Alter.



Dr. rer. nat. Almut Schmid ist seit 1995 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Paderborn. Sie arbeitete zunächst im Sportmedizinischen Institut an der Entwicklung multimedialer Gesundheitsprogramme sowie in sportmedizinischen Studien mit. Seit ihrem Wechsel in die Fachgruppe für Ernährung und Gesundheit wirkt sie seit 1998 u.a. an Untersuchungen zum Ernährungsstatus von Senioren mit.

Projekt zur Elbe-Ökologie

Hydraulische und sedimentologische Berechnungen zur Morphodynamik

Im Rahmen der „Ökologischen Forschung in der Stromlandschaft Elbe (Elbe-Ökologie)“ fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) seit Juli 1996 ein umfangreiches Programm interdisziplinärer Untersuchungen zur Erfassung der Zusammenhänge in natürlichen Ökosystemen in der Elbelandschaft. Das Programm wird Entscheidungsgrundlagen für eine dauerhaft umweltgerechte Entwicklung der Elbe und ihres Einzugsgebietes liefern. Insgesamt werden derzeit 15 Verbundprojekte gefördert.

Verbundprojekt „Morphodynamik der Elbe“

Das Verbundprojekt „Morphodynamik der Elbe“ (FKZ 0339566) ist in die oben genannte Forschungskonzeption eingebunden und hat die Erfassung des Ist-Zustandes der Elbe und ihrer Überflutungsbereiche zum Ziel (Projekt I). Hierzu werden die hydrologischen, morphologischen und landschaftsökologischen Zusammenhänge und deren Wechselwirkungen erfasst und analysiert werden. Als Beitrag zur Erstellung von ökologischen Leitbildern in Teilräumen der Elbe werden die abiotischen Parameter



Prof. Dr.-Ing. Klaas Rathke ist seit 1993 Professor im Fachbereich 8/Technischer Umweltschutz der Fachhochschulabteilung Höxter, Lehrgebiet Hydraulik – Quantitative Wasserwirtschaft.

(z.B. Wasserstände, Abflüsse, Feststofftransport) mit einer räumlichen und zeitlichen Auflösung definiert und quantifiziert, die den zu erwartenden ökologischen Fragestellungen gerecht werden.

Ergänzend zur Bewertung des Ist-Zustandes der Elbe werden die Grundlagen für die Untersuchung zukünftiger Zustände und Entwicklungen in Teilräumen der Elbe durch Naturmessungen

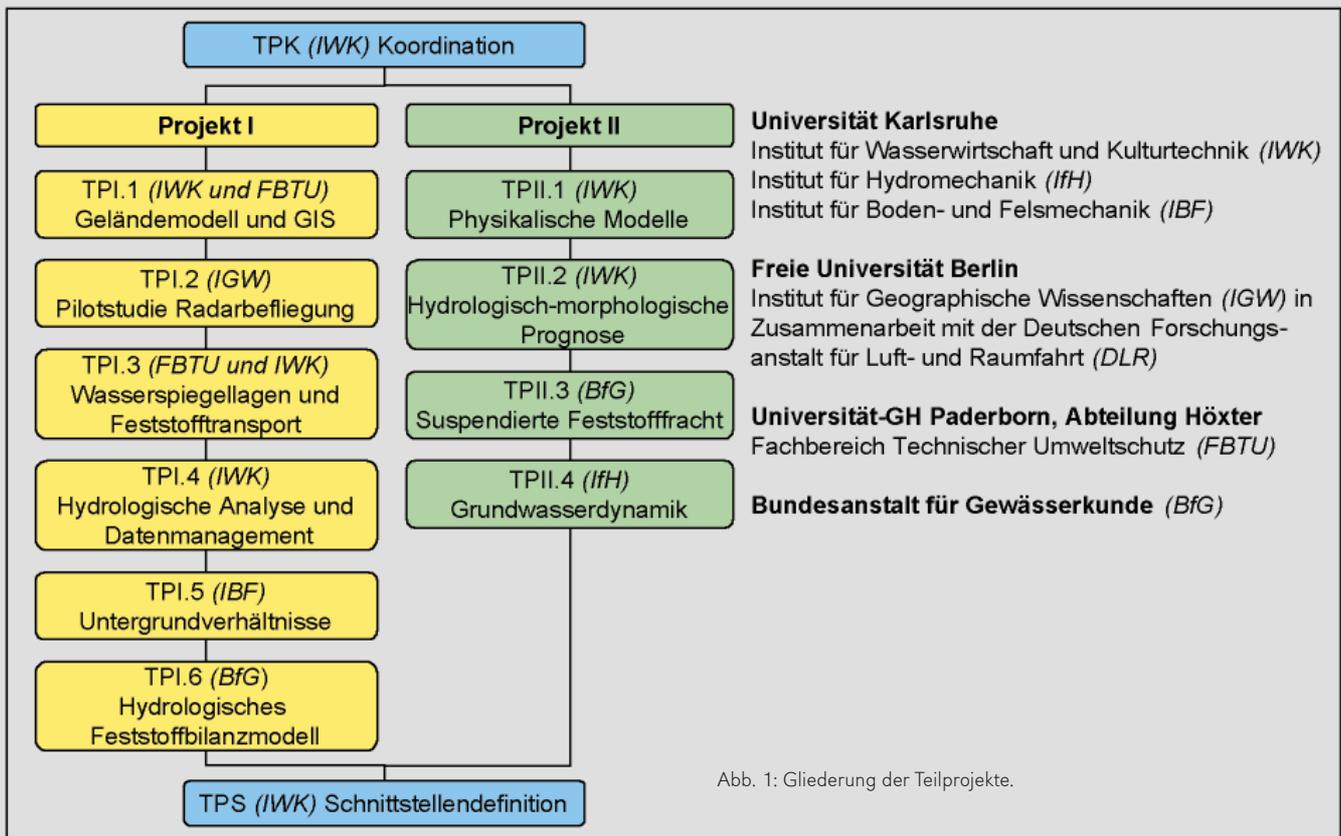


Abb. 1: Gliederung der Teilprojekte.

und experimentelle Laboruntersuchungen erarbeitet (Projekt II). Ebenso dienen die erarbeiteten Daten zur Beschreibung des Ist-Zustandes für die Abschätzung zukünftiger Entwicklungen in der Elbe-Aue.

Abbildung 1 zeigt den interdisziplinären Charakter des Verbundprojektes durch Auflistung der beteiligten Teilprojekte und Projektpartner. Über die Teilprojekte „Schnittstelle“ (TPS) und „Koordination“ (TPK) wird die Kommunikation (Datenaustausch in kompatiblen Formaten) mit anderen Verbundprojekten ermöglicht.

Teilprojekt „1D-Modellierung der Wasserspiegellagen und des Feststofftransports“

Die Beurteilung des Abflussverhaltens, seiner Veränderung und insbesondere des davon direkt beeinflussten Feststofftransports von Sohlenmaterial (wiederum mit der Rückkopplung auf das Abflussgeschehen) gelingt nur durch eine gesamtheitliche Betrachtung und Bestimmung der entsprechenden Größen. Aufgrund der Fließlänge der deutschen Elbe von der tschechisch-deutschen Grenze bis zur Staustufe Geesthacht (rd. 600 km) lassen sich die oben genannten Ziele nur über eindimensional-hydrnumerische (1D-HN) Berechnungen realisieren. Hierbei wird zunächst auf bewährte Berechnungsverfahren und -programme sowohl für die hydraulischen (Programm HEC-2) als auch für die sedimentologischen Berechnungen (Programm HEC-6) zurückgegriffen. Damit ist gewährleistet, dass die Grundlagendaten und Ergebnisse direkt mit planenden Institutionen (Bundesanstalt für Wasserbau, BAW bzw. Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG) ausgetauscht werden können. (Abbildung 1)

Darüber hinaus wurde im Rahmen der Projektbearbeitung ein vollständig neues Berechnungsprogramm entwickelt, das den weiteren Bearbeitungsinstanzen (BfG, BAW) ebenfalls zur Verfügung gestellt wird.

Aufbau und Eichung von 1D-Modellen

Aufgabe der Lehrgebiete Hydrologie/Wasserwirtschaft und Hydraulik/Quantitative Wasserwirtschaft im Fachbereich Technischer Umweltschutz der Abteilung Höxter war der Aufbau eindimensionaler Rechenmodelle für die deutsche Elbe oberhalb von Geesthacht. Eindimensionale hydraulische und sedimentologische Berechnungen in Fließgewässern für stationäre ungleichförmige Strömungsbedingungen werden nach folgendem Schema durchgeführt:

- Diskretisierung der Fließstrecke in Querprofile aus Peilungsprotokollen im Flussschlauch und kartographischen Informationen in den Vorländern (digitale Geländemodelle für die Elbe liegen z.Z. noch nicht vor).
- Belegung der Querprofilgeometrie mit Rauheitsparametern zur Charakterisierung der Fließwiderstände (Eichparameter).
- Festlegung der unterstromigen Randbedingungen (Wasserspiegel für entsprechenden Abfluss).
- Schrittweise iterative Berechnung der hydraulischen Größen (Wasserspiegellage, Fließgeschwindigkeiten, Sohlschubspannungen ...) für jedes Querprofil unter Berücksichtigung der zwischen den Profilen auftretenden Fließwiderstände.
- Berechnung des Feststofftransportvermögens nach entsprechenden Transportfunktionen (Auswahl bzw. Adaption durch Vergleich mit Naturmessungen, siehe TPI.6). Dabei werden



Abb. 2: Lageplan Biosphärenreservat „Mittlere Elbe“.

sowohl das sohlennah transportierte Material (Geschiebe) als auch das suspendierte Sohlenmaterial (Schweb) berücksichtigt. Die durchlaufende Spülfracht (Feinststoffe = Feinsand und organisches Material) werden nicht betrachtet.

- Über die Differenz der Transportraten von Querprofil zu Querprofil kann schließlich für einen Zeitabschnitt die Massen- bzw. Volumendifferenz ermittelt werden. Dieses Maß kann wiederum direkt in eine Veränderung der Sohlenhöhe (Abtrag oder Auflandung) umgerechnet und dementsprechend die Profilgeometrie angepaßt werden. Damit ist eine Rückkopplung der beweglichen Sohle auf das Abflussgeschehen hergestellt.
- Mit der Veränderung der Randbedingungen am unterstromigen Modellrand in Zeitschritten von einem Tag in Form einer Ganglinie (z.B. über einen Zeitraum von bis zu 30 Jahren) werden Strömung, Feststofftransport und Sohlengeometrie quasi-instationär (jeder Zeitschritt für sich wird stationär behandelt) ermittelt.

Die Arbeiten für insgesamt ca. 400 km der insgesamt rund 600 km Laufstrecke sind abgeschlossen, und die Modelle und Berechnungsergebnisse zum Ist-Zustand sind in Form entsprechender Datensätze in die zentrale Projektdatenbank eingestellt worden.

Die Berechnungen sollen anhand einer Beispielstrecke der Elbe näher erläutert werden. Das Biosphärenreservat „Mittlere Elbe“ ist mit einer Fläche von 43 000 ha das größte zusammenhängende Schutzgebiet in Sachsen-Anhalt. Es erstreckt sich entlang der Elbe zwischen Coswig über Dessau, Mulde- und Saalemündung bis hinunter nach Barby. Der hier beispielhaft vorgestellte Streckenabschnitt beginnt oberhalb von Aken bei Elbe-km 271,2 und endet kurz vor der Saalemündung bei Elbe-km 288,3 (Abbildung 2).

Nach Aufbereitung der Querprofilgeometrie im 100m-Abstand und Festlegung der unterstromigen hydrologischen Randbedingungen erfolgte die Eichung anhand in der Natur aufgenommener Wasserspiegelfixierungen. Dabei werden die vorab eingestellten Rauheitsgrößen so weit variiert, bis eine Abweichung zwischen Messung und Rechnung kleiner als 10 cm erreicht ist. Als Berechnungsergebnisse zur Beurteilung der hydraulischen Eigenschaften dienen die berechnete Wasserspiegellage und die Abflussfläche mit zugehöriger Fließgeschwindigkeit (gegliedert in Flussschlauch und die beiden Vorländer).

Ausgehend von dem geeichten Modell mit fester Sohle wird das Modell mit Feststofftransport aufgebaut. Neben dem „Sediment-

reservoir" Sohle, das als Kornverteilungsband eingeht, wird der abflussabhängige Feststoffeintrag als Geschiebe- und Schwebanteil am oberstromigen Modellrand berücksichtigt. Die Kalibrierung des Modells erfolgt durch Nachbildung der Sohlveränderungen mit der am Pegel Aken (Elbe-km 274,8) gemessenen Ganglinie über einen Zeitraum der vergangenen 30 Jahre. Die berechneten Parameter zur Charakterisierung des Sedimenthaushaltes sind die Jahresfrachten des Geschiebe- und Schwebanteils, der Verlauf der mittleren Sohlhöhe und des Talweges sowie die veränderten hydrologischen Randbedingungen. Ergebnisse der Berechnungen mit dem entwickelten Programm sind nachfolgend dargestellt.

Entwicklung des Berechnungsprogramms

Im Rahmen des Vorhabens war die Neuentwicklung eines Berechnungsprogrammes vorgesehen, um mit der Verwendung des Fließgesetzes nach Darcy-Weisbach unter Einbeziehung der allgemeinen Widerstandsgesetze für Strömungen die auftretenden Rauheiten sehr viel differenzierter erfassen zu können. Mit dem Berechnungsprogramm HYSEMO32 (hydraulische, sedimentologische und morphologische Berechnungen) besteht nunmehr die Möglichkeit, die Fließwiderstände in den Vorländern jeweils maximal in 3 bewachsene und 4 unbewachsene Bereiche zu untergliedern. Im Flussschlauch selbst ist eine Unterteilung der Rauheiten in bewachsene und unbewachsene Böschungszonen sowie an der Sohle in Korn- und Formrauheiten (Rauheiten des Kornmaterials bzw. der je nach Strömungsintensität auftretenden Sohlenformen wie Riffeln oder Dünen) möglich. Ebenso wird die Verzögerung der Strömung in bewuchsfreien Bereichen durch angrenzenden Bewuchs berücksichtigt. In Zusammenhang mit der Berücksichtigung örtlicher Verluste kann das Abflussgeschehen in Fließgewässern bereits bei eindimensionaler Betrachtung naturgetreu nachgebildet werden. In Verbindung mit einer graphischen Oberfläche unter den Betriebssystemen Microsoft Windows 9x bzw. NT ist das Programm komfortabel zu bedienen und ermöglicht mit vielfältigen Darstellungen eine schnelle Veränderung der Eingabedaten bzw. Überprüfung der Berechnungsergebnisse.

Anwendung von 1D-Modellen

Als 1D-Modell wird die Kombination eines Berechnungsprogrammes mit den die natürlichen oder zukünftigen Verhältnisse charakterisierenden Daten verstanden. Das Ergebnis von Modellberechnungen kann z.B. eine Prognose der Sohlhöhenentwicklung sein. Mit der direkten Berechnung der kornbezogenen Strömungsgrößen an der Sohle wird die Bestimmung des Feststofftransportvermögens nach entsprechenden Transportansätzen möglich.

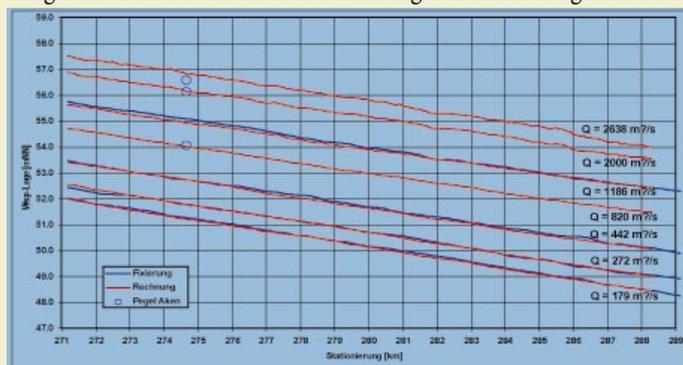


Abb. 3: Berechnete und gemessene Wasserspiegellagen.

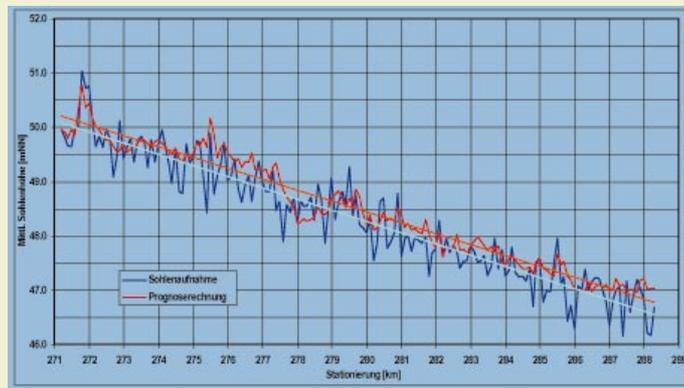


Abb. 4: Prognostizierte Sohlenentwicklung.

mungsgrößen an der Sohle wird die Bestimmung des Feststofftransportvermögens nach entsprechenden Transportansätzen möglich.

In Abbildung 3 sind nach Eichung des Modells für die in Abbildung 2 dargestellte Elbe-Strecke die berechneten und entsprechende gemessene Wasserspiegellagen (Fixierungen durch Messschiff der WSD-Ost bzw. Ablesungen am Pegel Aken) dargestellt. Aufgrund der über das gesamte Abflussspektrum hinweg sehr guten Übereinstimmung von Rechnung und Messung kann davon ausgegangen werden, dass das Modell die tatsächlichen Abflussbedingungen zutreffend nachbildet und dass dementsprechend auch die sedimentologischen Berechnungen auf naturgetreuen hydraulischen Grundgrößen basieren.

Analog zu den morphologischen Berechnungen des Programmes HEC-6 lässt sich mit HYSEMO32 ebenfalls die Sohlenentwicklung (hier z.B. über 30 Jahre, siehe Abb. 4) abschätzen. Die Berechnungen wurden unter folgenden Randbedingungen durchgeführt:

- Berechnung mit der Ganglinie 1964-1993, beginnend zum Zeitpunkt der Profilaufnahme 1993, in Tagesschritten.
- Keine Sohlenveränderung am oberstromigen Endprofil (da Transportberechnungen für oberstromige Anschlussstrecke noch nicht durchgeführt).

Es ergibt sich für die untersuchte Teilstrecke unter den gesetzten Randbedingungen im Mittel ein nahezu gleichmäßiger Auftrag der Sohle bei ebenfalls nahezu gleichbleibendem Gefälle.

Es kann daher davon ausgegangen werden, dass nach abschließender Zusammenführung aller Teilstrecken der Modelle der Feststoffhaushalt der Elbe beschrieben werden kann. Darüber hinaus wird insbesondere die Abschätzung der Auswirkungen von Veränderungen (Planungen) möglich sein.

Neben der direkten Bestimmung hydraulischer und sedimentologischer Größen bzw. ihrer Veränderungen können auch die Auswirkungen auf biotische Parameter herausgearbeitet werden. Die Verknüpfung der Topographie aus dem Digitalen Geländemodell (DGM, entwickelt aus den Querprofilaten, TPI.1) mit hydrologischen und abiotischen Strömungsparametern liefert wichtige Informationen im Hinblick auf auenökologische Fragestellungen.

Eine Verschneidung der Geländeoberfläche mit berechneten Wasserspiegeln in einem Geographischen Informationssystem (GIS) bietet z.B. die Möglichkeit, überflutete Auen darzustellen. Die für die Auen-Ökologie relevanten Abflüsse werden hierbei über eine Analyse der Pegelzeitreihen gewonnen (TPI.4). Für eine Betrachtung des Abflussgeschehens sind neben dem Wasserstand auch die Häufigkeit und Dauer sowie der Monat bzw. die Jahres-

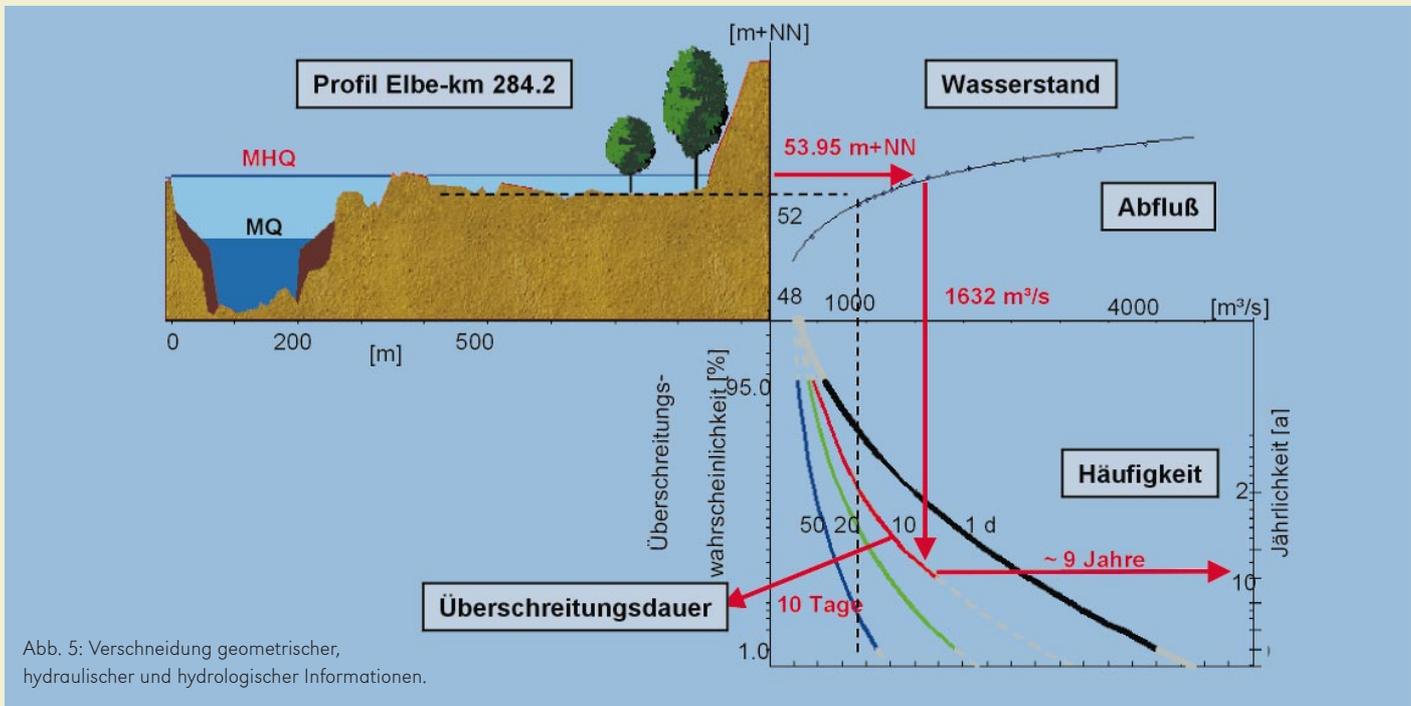


Abb. 5: Verschneidung geometrischer, hydraulischer und hydrologischer Informationen.

zeit eines Überflutungsereignisses ausschlaggebend. Abbildung 5 basiert auf berechneten Wasserspiegellagen und soll die aufgeführten Zusammenhänge verdeutlichen.

Die für die faunistische und floristische Bewertung im Vorland bedeutsame Information lässt sich aus Abbildung 5 wie folgt entnehmen:

Ein Wasserstand von 53,95 mNN, entsprechend einem Abfluss von 1632 m³/s im Profil Elbe-km 284,2, wird im Mittel bei einer Auftretenshäufigkeit von etwa 9 Jahren an 10 Tagen im Jahr überschritten.

Neben der Beschreibung des Ist-Zustandes durch geeichte hydro-numerische Modelle (Wasserspiegellagen und Feststofftransport) ist auch die Untersuchung von Entwicklungen in der Elbe-Aue möglich.

Mit der Variation von Rauheitsbeiwerten kann z.B. die Entwicklung von Auwald simuliert werden. Dabei ist etwa die Frage zu beantworten, ob mit dem erhöhten Fließwiderstand auf den Vorländern der Abflussanteil im Flussschlauch ansteigt und welche Folgen sich hieraus für die Wasserstände und den Feststoffhaushalt im Flussbett ergeben.

Ein weiterer Untersuchungsgegenstand ergibt sich aus möglichen Deichrückverlegungen. Mit der Erweiterung der überströmbaren Vorländer wird der Abflussanteil im Flussschlauch reduziert – mit entsprechenden Auswirkungen auf Wasserstand (Absenkung) und Feststofftransport (Verminderung mit der Folge von Verlandungen).

Weiterführende Arbeiten

Auch nach Abschluss des Vorhabens sind Weiterentwicklungen vorgesehen:

- Integration des Berechnungskerns HYSEMO32 in die Software HASE der BAW.
- Erweiterungen der Berechnungsansätze für eine automatische Bestimmung der Formrauheiten der Sohle.
- Erweiterungen um Bauwerksberechnungen (Wehre, Durchlässe).
- Erweiterungen für verzweigte Gewässersysteme.

Literatur

Adam, Rathke, Meon (1999): Möglichkeiten und Grenzen der 1D-Berechnung in einem Abschnitt an der mittleren Elbe (Biosphärenreservat). In: Fachtagung Elbe-Dynamik der Interaktion von Fluss und Aue in Wittenberge 4.-7.5.99, S. 68-75, Karlsruhe.

Bornhöft, Gruber (1998): Ökologische Forschung in der Stromlandschaft Elbe (Elbe-Ökologie) – aktueller Stand der Arbeiten im BMBF-Forschungsverbund. In: UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (Hrsg.), 8. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Gewässerschutz im Einzugsgebiet der Elbe, S. 287-290, Stuttgart.

HEC (1982, 1991): Water Surface Profiles (HEC-2) und Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs (HEC-6), User's Manuals, Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers.

Verbundprojekt „Morphodynamik der Elbe“ (1996), Projektantrag, Universität Karlsruhe, BMBF-Förderkennzeichen 0339 566, Karlsruhe.



Prof. Dr.-Ing. Günther Meon ist seit 1993 Professor im Fachbereich 8/Technischer Umweltschutz der Fachhochschulabteilung Höxter, Lehrgebiet Hydrologie – Wasserwirtschaft.



Dipl.-Ing. Kerstin Adam arbeitet im Projekt „Morphodynamik der Elbe“ im Fachbereich 8/Technischer Umweltschutz der Fachhochschulabteilung Höxter.

Dienstleistung im Verborgenen

Biologische Gegenspieler in Gräsern und ihre praktischen Anwendungsmöglichkeiten

Für das bloße Auge nicht sichtbar, wohnen in Gräsern manchmal Pilze, die Helfer oder Schädiger sein können. Betroffen sind vor allem die für die deutsche Kulturlandschaft besonders wichtigen Gräser, wie z.B. das Deutsche Weidelgras (*Lolium perenne*), sowie der Wiesen- und der Rohrschwengel (*Festuca pratensis* bzw. *F. arundinacea*). Ihre Blätter können mit Pilzen besiedelt sein, die nur mit speziellen Färbetechniken unter dem Mikroskop sichtbar werden. Im Gegensatz zu anderen Pilzen schädigen sie die Pflanze nicht, sondern liefern für Kost und Logis eine Reihe nützlicher Naturstoffe. So sind diese Pflanzen resistenter gegen Austrocknung, Insektenbefall oder Infektion durch pilzliche Krankheitserreger. Allerdings sind darunter auch Stoffe, die Weidetieren wie Rindern, Schafen und Pferden gefährlich werden können.

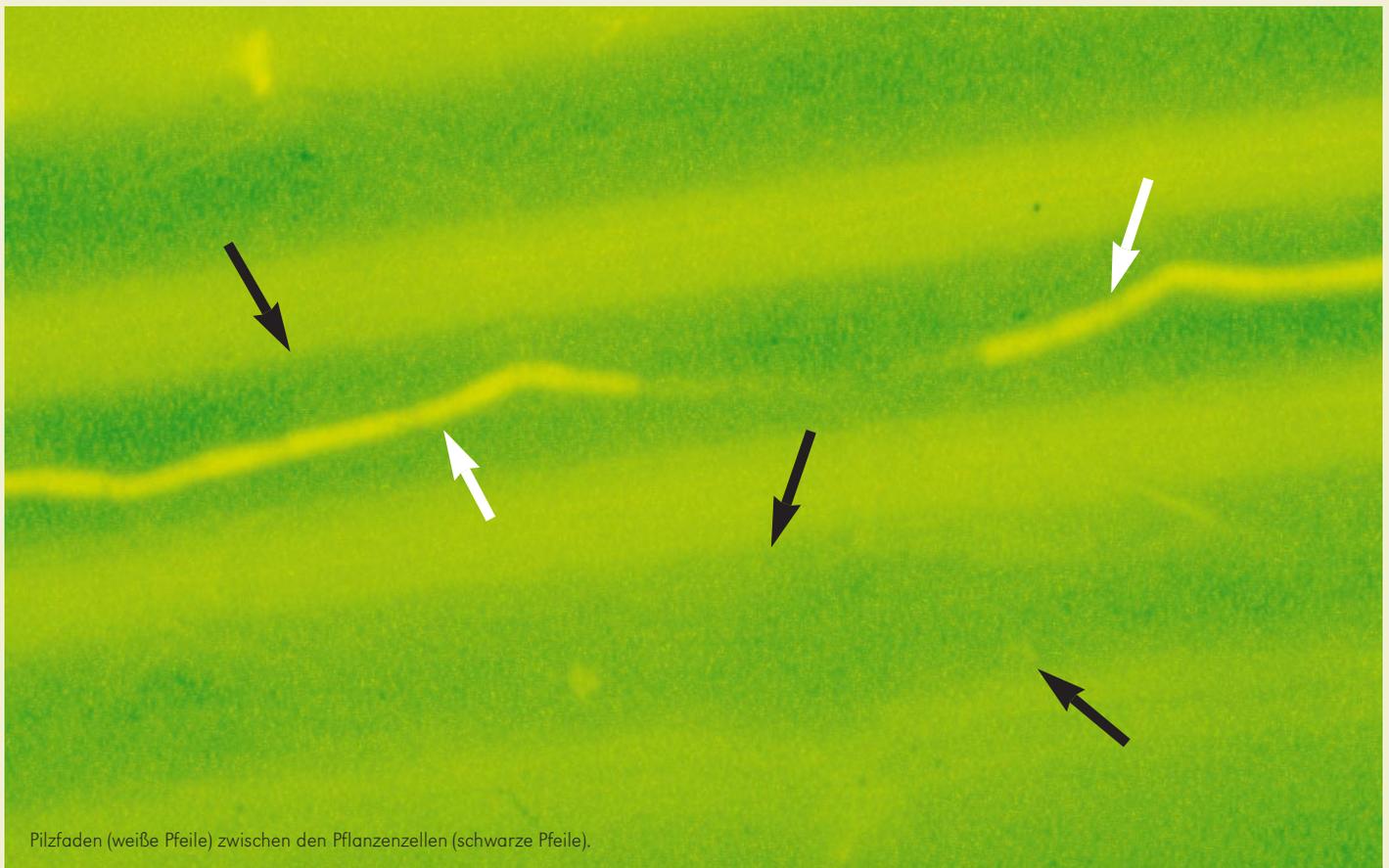
Janusköpfige Situation – die Umwelt als Auslöser

Das Phänomen der so genannten Endophyten (endo = innerhalb, phytos = Pflanze), wurde schon Ende des letzten Jahrhun-



Prof. Dr. Volker H. Paul
ist Phytopathologe und lehrt seit 1981 im Fachbereich Agrarwirtschaft. Er ist Leiter des Labors für Biotechnologie und Qualitätssicherung.

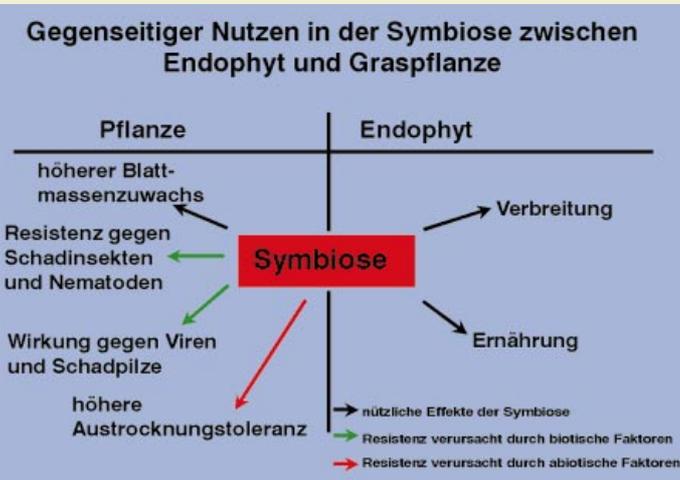
derts entdeckt. In den Samen des giftigen Taumellolchs (*Lolium temulentum*), einem Verwandten des Weidelgrases, konnte ein Pilz gefunden werden, der für die Giftigkeit verantwortlich war und keine Symptome an der Pflanze hervorrief. In den fünfziger Jahren litten Tiere auf Weiden, die mit einer neuen, besonders robusten Rohrschwengelsorte eingesät waren, bei warmem,



Pilzfaden (weiße Pfeile) zwischen den Pflanzenzellen (schwarze Pfeile).



Schaf mit „ryegrass staggers“-Symptomen.



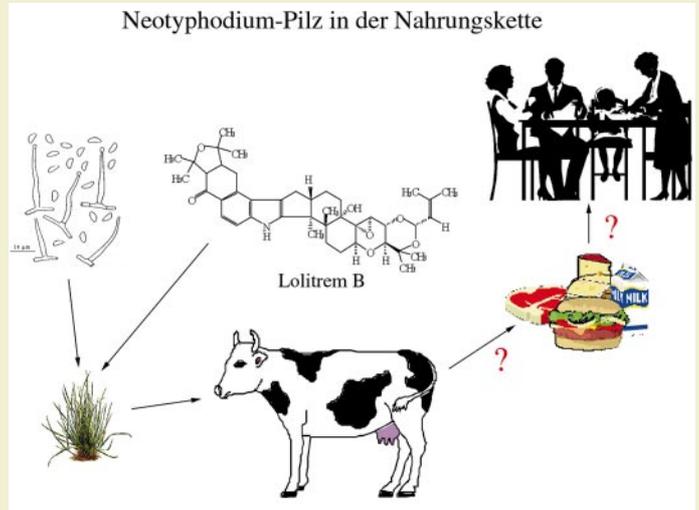
trockenem Wetter an einer Erkrankung mit ähnlichen Symptomen, wie sie durch Mutterkorn (*Claviceps purpurea*), einen Getreideparasiten, entstehen: Krämpfe in den Blutgefäßen, dadurch Lähmung und Absterben von Gliedmaßen bis zur Verkrüppelung. Die Krankheit erhielt den Namen „fescue toxicosis“ (fescue = engl. für Schwingelgras). Auch auf Weidelgrasweiden in Neuseeland kam es in warmen, trockenen Sommern zu Erkrankungen. Die „ryegrass staggers“ (Ryegrass = Weidelgras, stagger = taumeln) genannte Erkrankung äußerte sich in Muskelkrämpfen und Koordinationsschwierigkeiten.

Erst Ende der siebziger Jahre fanden amerikanische Wissenschaftler heraus, dass die Ursache mikroskopisch kleine Pilzfäden waren, die in den Graspflanzen als Symbionten lebten.

Diese Pilzfäden liegen im Gewebe der unteren Blattscheide zwischen den Zellen oder wandern in die Grasblüte ein. Dort werden sie mit den Samen verbreitet.

Die Pilze sind heute als Neotyphodim-Endophyten bekannt. Sie produzieren chemische Verbindungen, vorwiegend aus der Gruppe der Alkaloide, welche die betreffenden Vergiftungserscheinungen hervorrufen. Auffällig erschien, dass der Gehalt an giftigen Stoffen nach großer Hitze und Trockenheit erhöht war.

Bei weiteren Untersuchungen stellte sich heraus, dass der Pilz auch positive Eigenschaften besitzt. Gras, das den Pilz enthielt, war gesünder und kräftiger, es überlebte Dürreperioden besser und der Befall mit Schädlingen fiel geringer aus. Von da an wurden verstärkte Anstrengungen unternommen, um die Vorteile der Pilzbesiedlung zu nutzen und die Nachteile auszumerzen.



Bessere Stressbewältigung bei Trockenheit, Resistenz gegen Krankheitserreger und Schädlinge

Eigene Versuche des Labors für Biotechnologie an der Universität Paderborn bestätigten diese Aussagen.

In einer Untersuchung zur Trockenstressresistenz wurden Pflanzen trockengestellt, bis sie verwelkten. Anschließend wurden sie wieder gegossen. Der Anteil endophythalter Pflanzen unter den überlebenden Exemplaren stieg von durchschnittlich 49,7 beim Versuchsbeginn auf 66,7 Prozent am Versuchsende.

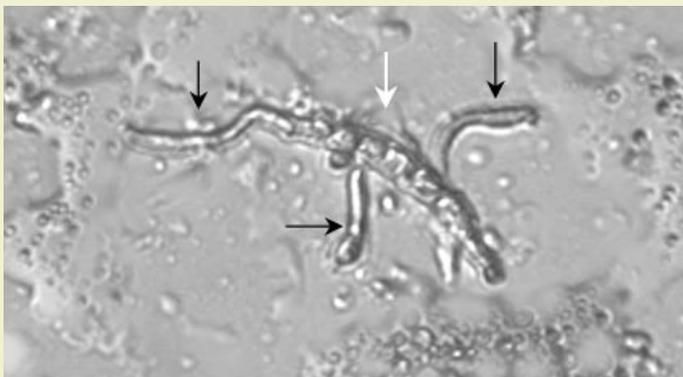
Vor Versuchsbeginn				Nach Versuchsende			
endophythalter		ohne Endophyt		endophythalter		ohne Endophyt	
Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
62	49,7	66	50,3	42	66,7	26	33,3

Tab. 1: Versuche zur Austrocknungstoleranz.

Neotyphodium hat ebenfalls eine Wirkung auf pilzliche Schaderreger: Infizierte endophythalte Pflanzen hatten im Durch-

Neotyphodium-Isolat	F-573	82/89	82/83	73	1/94	22/94
Pathogen						
<i>Drechslera siccans</i>	+	+	+	+	+	+
<i>D. anderseni</i>	+	+	+	+	+	+
<i>D. teres</i>	+	+	+	+	+	+
<i>D. dictyoides</i>	-	n. u.				
<i>Fusarium culmorum</i>	o	-	-	-	-	-
<i>F. avenaceum</i>	o	-	-	-	-	-

Tab. 2: Hemmhofbildung von Neotyphodium lolii gegen verschiedene Pathogene auf Nährböden (+ = Hemmeffekte/- = keine Hemmeff./o = zeitweise Hemmeff./n. u. = nicht untersucht). Alle Versuche auf Kartoffel-Glucose-Agar, Agarkonzentration 0,3 Prozent, 3 Wiederholungen.



Schadpilzspore (weißer Pfeil) durch Neotyphodium-Extrakt gehemmt (Keimschläuche verkürzt (schwarze Pfeile)).



Schadpilzspore (weißer Pfeil) ohne Neotyphodium-Extrakt (Keimschläuche normale Länge (schwarze Pfeile)).

schnitt weniger starke Symptome als Gräser ohne den Endophyten.

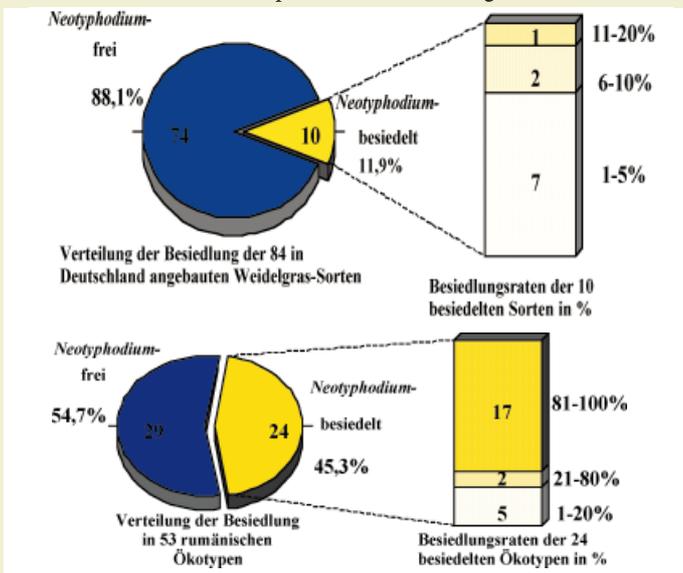
Wie in ihrer Wirtspflanze lassen die endophytischen Pilze auch auf künstlichem Nährmedium schädliche Pilze nicht gedeihen.

Um den Endophyten herum bildet sich durch ausgeschiedene Stoffe ein so genannter Hemmhof, in den der Schadpilz nicht einwachsen kann.

Extrakte aus diesen Hemmhöfen wirken dem Auskeimen von Schadpilzsporen entgegen. Gelänge es, die Struktur des wirksamen Moleküls aufzuklären und zu synthetisieren, könnte es als Fungizid eingesetzt werden.

Wie ist die Situation in Europa?

Da dieselben Gräserarten sowohl in Amerika und Neuseeland als auch in Europa angebaut werden, rückte die Endophyten-situation auch hier in den Blickpunkt der Forschung.



Zur Überprüfung der Endophyten-Situation in Europa wurde Saatgut der 84 vom Bundessortenamt in Hannover zum Anbau in Deutschland zugelassenen Weidelgrassorten und zum Vergleich eine Sammlung von 53 Weidelgrasswildtypen auf Besiedlung untersucht.

Nur 10 der 84 untersuchten Sorten, jedoch 24 der 53 Wildtypen zeigten eine Besiedlung. Auch bei der Besiedlungsrate ergaben sich große Unterschiede: Die Sorten wiesen geringe Besiedlungsraten (höchstens 20 Prozent) auf, während in den Wildtypen die überwiegende Zahl der Saatgutpartien zu mehr als 80 Prozent besiedelt war.

Geringes Vorkommen des endophytischen Pilzes in den europäischen Sorten

Neotyphodium wird ausschließlich durch Übertragung auf Saatgut der Mutterpflanze und durch Einwachsen in Seitentriebe weitergegeben. Bei der Züchtung einer neuen Sorte sind einige Determinanten von Bedeutung, die den Verlust des Symbionten und einen Rückgang der Besiedlungsrate verursachen können. Durch Langzeitlagerung von Saatgut stirbt der Endophyt schneller ab als der Graskeimling. Schon bei trocken und kühl gelagertem Saatgut ließ sich nach zwei Jahren ein Rückgang der Endophytenvitalität um 8 Prozent feststellen. Werden die Eigenschaften von Zuchtpflanzen über mehrere Jahre lang im Freiland beobachtet, kann es durch den Einfluss von Umweltbedingungen auf diese Pflanzen zum Schwund endophythaliger Pflanzen kommen. Bei der Überprüfung zweijähriger Pflanzen aus dem Wildtypensaatgut wurde ein Rückgang von 12 Prozent des vitalen Endophyten gegenüber dem Ausgangssaatgut festgestellt. Das von den untersuchten Pflanzen geerntete Saatgut zeigte jedoch fast identische Besiedlungsraten wie das Ausgangssaatgut. Bei der Bewertung des Aussehens zeigte sich innerhalb der Untersuchung allerdings, dass die Pflanzenhorste ohne Wildtypen-Endophyten im kühl-feuchten Klima Deutschlands einen signifikant besseren Allgemeinzustand als die endophythaligen Pflanzenhorste aufwiesen. Bei Umweltbedingungen, die nicht die Hilfe des Endophyten erfordern, zeigen somit diejenigen Pflanzen ein verbessertes Wachstum, die keinen Symbionten mit „durchfüttern“ müssen. So sind in der Vergangenheit offenbar verstärkt Graspflanzen ohne Endophyten gezüchtet worden.

Sind auch in Deutschland Weidetierkrankungen zu erwarten?

Lolitrem B ist der Wirkstoff, der für die Weidetierkrankung des „ryegrass staggers“ verantwortlich ist. Oberhalb eines Lolitrem-B-Gehaltes von 2000 µg/kg Trockenmasse (TM) Gras kommt es bei Rindern, Schafen und Pferden auf endophyteninfizierten Weiden zu Krankheitssymptomen.

Im Labor für Biotechnologie und Qualitätssicherung der Universität Paderborn/Abteilung Soest wurden dahingehend Untersuchungen durchgeführt, ob es auch in den für Deutschland typischen feuchten und kühlen Sommern zu der Weidetierkrankung „ryegrass staggers“ kommen kann. Da europäische Sorten kaum Endophyten enthalten, wurde eine neuseeländische Sorte verwendet.

Im Anbaujahr 1997 wurden bei der Sorte „Yatsyn“ (Besiedlungsrate 98 Prozent) geringe und hohe Düngeintensitäten hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Lolitrem-B-Gehalt untersucht. In Gewächshausversuchen hatte sich eine Erhöhung der Alkaloid-

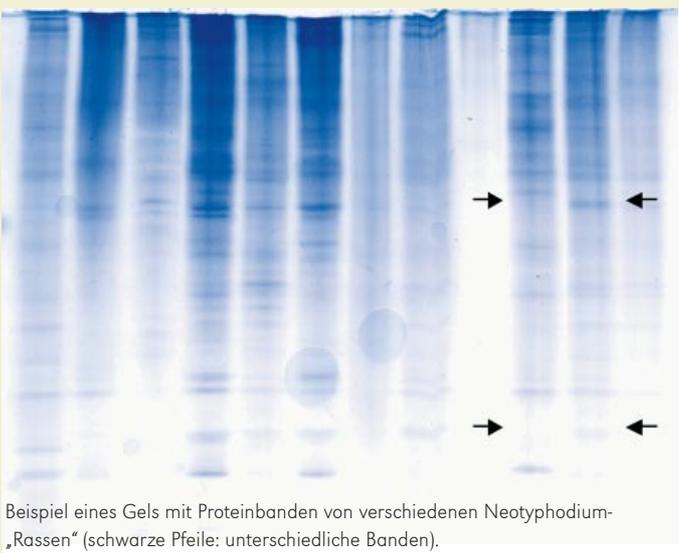


Hemmhof: links endophytischer Pilz, rechts Schadpilz *Drechslera andersenii*.

werte bei guter Stickstoffversorgung abgezeichnet (die Gerüste der Alkaloidmoleküle enthalten gewöhnlich etliche Stickstoffmoleküle). Bei allen drei Grünschnitten des Jahres 1997 lag der Lolitrem-B-Gehalt bei gesteigerter Stickstoffversorgung signifikant höher als bei der niedrigeren Düngungsstufe. In wenigen Parzellen lagen die ermittelten Lolitrem-B-Gehalte sogar oberhalb der toxischen Dosis von 2000 µg/kg TM. Folglich kann es selbst unter hiesigen Klimabedingungen zu hohen Lolitrem-B-Werten kommen. Voraussetzungen sind jedoch der Anbau hochbesiedelten Grases mit einem stark produzierenden Endophyten sowie eine längere Periode höherer Temperatur.

Genetische Variabilität des Pilzes

Die Alkaloidproduktion hängt stets in hohem Maße von der genetischen Ausstattung des Pilzes und sogar von der Kombination Endophyt/Graspflanze ab.



Beispiel eines Gels mit Proteinbanden von verschiedenen Neotyphodium-„Rassen“ (schwarze Pfeile: unterschiedliche Banden).

Vergleicht man die Wanderungsgeschwindigkeiten von Endophyten-Proteinen in einem Gel unter elektrischer Spannung, können die genetische Variabilität und Verwandtschaftsverhältnisse, vergleichbar einem „genetischen Fingerabdruck“, sichtbar gemacht werden.

Lässt man weiterhin verschiedene Endophyten auf künstlichen Nährböden wachsen und vergleicht ihre Lolitrem-B-Produktion mit der in „ihrer“ Graspflanze, scheinen manche Pflanzen die Alkaloidproduktion buchstäblich zu unterdrücken, andere sie zu fördern. Da auch die zum Anbau in Deutschland zugelassenen Sorten des Deutschen Weidelgrases nur geringe Besiedlung aufweisen (s.o.), ist es äußerst unwahrscheinlich, dass toxische Lolitrem-B-Werte in der landwirtschaftlichen Praxis erreicht werden. In Mitteleuropa profitieren wir stattdessen viel eher von den Vorteilen der Pilz-/Pflanzen-Symbiose. Im Zuge dieser Erkenntnisse drängen endophythalte Rasengrassorten bereits verstärkt auf den europäischen Markt.

Europapremiere an der Universität Paderborn

Ein Highlight zum Schluss: Vom 25. bis 29. 9. 2000 findet das vierte „Neotyphodium/Grass Interactions Symposium“ zusammen mit der dritten „Conference on Harmful and Beneficial Microorganisms in Grassland, Pastures and Turf“ an der Universität Paderborn und damit gleichzeitig zum ersten Mal in Europa statt. Internationale Experten werden dann über den Stand ihrer Forschung berichten.

Literatur (auszugsweise)

Clay, K.: Clavicipitaceous endophytes of grasses: their potential as biocontrol agents. *Mycol. Res.* 92: 1-12 1990.
Dapprich, P.: Untersuchungen zur morphologischen und molekularbiologischen Charakterisierung der Graserendophyten *Acremonium lolii* und *A. uncinatum* und deren Auswirkungen

auf ihren Wirt. Dissertation Paderborn 1996.

Grand-Ravel, C.: Les champignons endophytes des Graminées: Distribution et coévolution avec leurs especès hôtes. Dissertation Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand 1997.

Hoveland, C.: Importance and economic significance of the Acremonium endophytes to performance of animals and grass plant. Agric. Ecosystems Environ. 44: 3-12 1995.

Schöberlein, W. und Pfanmüller, M.: Endophytische Pilze in mehrjährigen Nutzgräsern – Problem oder Vorteile? Bericht über die 47. Arbeitstagung 1996 der Arbeitsgemeinschaft der Saatzuchtler im Rahmen der „Vereinigung österreichischer Pflanzzüchter“, BAL Gumpenstein, 26.-28. November 1996.

Holzmann, A., Reinholz, J., Ostbomke, H. und Paul, V.H.: Distribution of Neotyphodium lolii in Lolium perenne cultivars and ecotypes in Central Europe. ICPP 98, 7th International Congress of Plant Pathology, Edinburgh, Scotland 9-16 August 2.9.20.

Danksagung

Das Projekt wurde vom BMELF und der Gesellschaft zur Förderung der privaten deutschen Pflanzenzucht (GFP) unterstützt.



Dipl.-Biol. Anke Holzmann arbeitet im Labor für Biotechnologie an ihrer Dissertation über das Thema Neotyphodium-Endophyten.



Dipl.-Chem. Johannes Reinholz arbeitet im Labor für Biotechnologie an seiner Dissertation über das Thema Neotyphodium-Endophyten.



Dr.rer.nat. Peter Dapprich hat 1996 seine Dissertation über das Thema Neotyphodium-Endophyten an der Universität Paderborn abgeschlossen.

Forschung mit Synchrotronstrahlung

Von der Röntgenstrahlung zur Synchrotronstrahlung – ein historischer Abriss und aktuelle Anwendungen

Im Dezember 1895 entdeckte Wilhelm Conrad Röntgen in seinem Institut an der Universität Würzburg die nach ihm benannten Strahlen, als er mit Leuchterscheinungen in den Geißler'schen Röhren experimentierte. Ihre Eigenschaften und eigentliche Herkunft waren ihm noch nicht bekannt. Er nannte sie deshalb X-Strahlen (die Bezeichnung „X-Rays“ hat sich im englischen Sprachgebrauch erhalten). W.C. Röntgen erkannte jedoch eine wichtige Eigenschaft dieser unbekanntes Strahlung, nämlich Materie mit nur geringer Schwächung zu durchdringen, wobei leichtes Material (Gewebe) weniger und schwereres Material (Knochen) stärker absorbiert. Das auf einer photographischen Platte aufgenommene Schattenbild der Hand seiner Frau (siehe Abbildung 1) war die erste Röntgenaufnahme und ihre Veröffentlichung führte zu einer weltweiten Popularität der Röntgenmethode, gefolgt von einer Vielzahl von medizinischen Anwendungen. Röntgens Entdeckung veranlasste den französischen Wissenschaftler Henri Becquerel fluoreszierende Uransalze zu untersuchen, wobei er die α -, β -, und γ -Strahlen der natürlichen Radioaktivität entdeckte. Röntgen bekam übrigens den ersten Nobelpreis für Physik im Jahre 1901, H. Becquerel den Preis zusammen mit Marie und Pierre Curie im Jahre 1903.

Die Natur der Röntgenstrahlung, nämlich elektromagnetische Strahlung wie Licht zu sein, jedoch mit wesentlich kürzeren

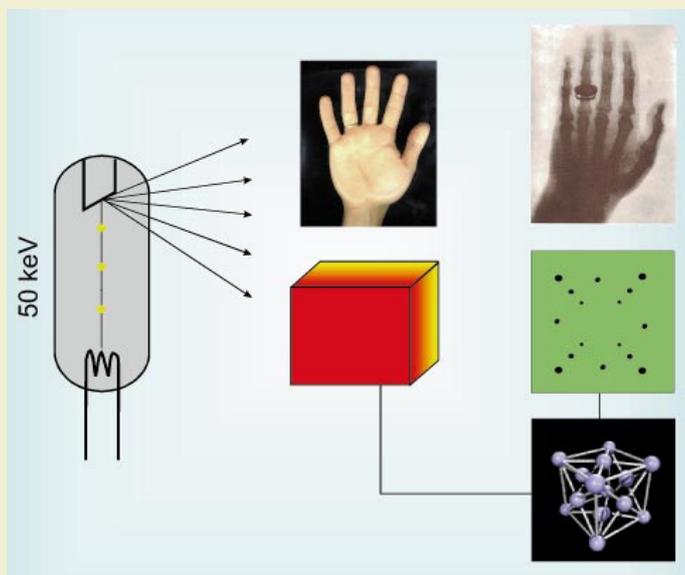
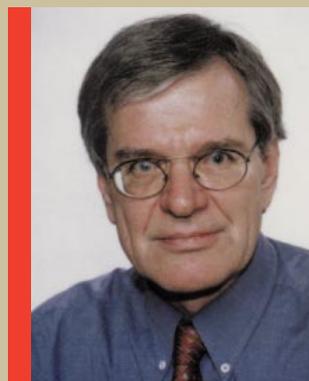


Abb. 1: Schematische Darstellung der Erzeugung von Röntgenstrahlung mit der ersten Röntgenaufnahme einer Hand bzw. der eines Kristalls, aus denen die jeweilige „innere“ Struktur ermittelt werden konnte.



Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Wortmann ist seit 1989 Professor für Experimentalphysik im Fachbereich 6/Physik an der Universität Paderborn. Arbeitsgebiete sind Hochdruckphysik und Festkörperspektroskopie mit Mössbauereffekt und Röntgenabsorption, wobei viele dieser Untersuchungen mit Synchrotronstrahlung durchgeführt werden.

Wellenlängen, wurde erst 1912 nachgewiesen, als man bei der Durchstrahlung eines Kristalls Beugungsbilder erzeugen konnte, analog zur Beugung des Lichts an regelmäßigen Gittern (Abbildung 1b). Mit den von Laue und Bragg entwickelten Techniken und Theorien der Röntgenbeugung wurde die Grundlage der heutigen „Festkörperphysik“ gelegt. – Inzwischen weiß man natürlich genau, dass der kontinuierliche Teil der Röntgenstrahlung bei der Abbremsung der mit typischerweise 50 kV beschleunigten Elektronen an der Anode der Röntgenröhre entsteht; diese „Bremsstrahlung“ ist, wie auch die typischen Röntgenlinien des Anodenmaterials, ungerichtet, sie wird wie das Licht von der Wendel einer Glühbirne nach allen Richtungen ausgestrahlt (Abbildung 1).

Was ist Synchrotronstrahlung ?

Synchrotronstrahlung ist das „Licht“ von Elektronen, die sich in Elektronenbeschleunigern bzw. Speicherringen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegen und durch starke Magnetfelder auf Kreisbahnen gezwungen werden (Abbildung 2a). Daraus resultiert eine starke Radialbeschleunigung, die dazu führt, dass die Elektronen elektromagnetische Strahlung emittieren, analog zur Hertz'schen Dipolstrahlung eines beschleunigten (klassischen) Elektrons. Da im Entstehungsprozess der Röntgenstrahlung verwandt, nennt man die Synchrotronstrahlung auch „magnetische Bremsstrahlung“. Beobachtet wurde sie erstmals 1947 in einem Synchrotron, daher die Namensgebung. Mit Synchrotrons wurden in den 40er- und 50er-Jahren Elektronen beschleunigt, um damit die innere Struktur der Atomkerne zu erforschen.

Die Synchrotronstrahlung zeichnet sich aus durch:

- ein intensives kontinuierliches Spektrum von infrarotem, sichtbarem und ultraviolettem Licht, über weiche bis zur harten Röntgenstrahlung, d.h. Wellenlängen von 10^{-4} m bis 10^{-12} m.

- die Strahlung erfolgt nur vorwärts in der Bewegungsrichtung der Elektronen und ist extrem gebündelt; diese „Strahlungskeule“ (siehe Abbildung 2b) hat einen sehr kleinen Öffnungswinkel, der mit zunehmender Energie der Elektronen immer kleiner wird (typisch ist eine Aufweitung des Strahls um 0,01 bis 0,1 mm auf einer Strecke von 1 m).
- die Strahlung ist in der Ebene des Speicherrings linear polarisiert und hat eine gepulste Zeitstruktur, definiert durch den zeitlichen Abstand der Elektronenpakete im Ring. Dabei nimmt die mittlere Energie der Strahlung mit der 3. Potenz der Elektronenenergie, die Intensität sogar mit der 4. Potenz zu. Typische Energien der Elektronen in einem Speicherring sind Giga-Elektronenvolt, angekürzt mit GeV. Das sind 10^9 eV, wobei 1 eV der Energiegewinn eines Elektrons ist, das die Spannungsdifferenz von 1 Volt durchläuft. (Die Elektronen in der obigen Röntgenröhre haben eine Energie von „nur“ 50 keV). Durch die Bündelung der Strahlung, ähnlich der eines Scheinwerfers, erreicht man eine Leuchtdichte bzw. Brillianz, die um 6 bis 12 Größenordnungen (10^6 - bis 10^{12} -mal) größer als die der besten Röntgenapparaturen ist (siehe Abbildung 2). Diese Eigenschaften ermöglichen eine Vielzahl von neuen spektroskopischen Untersuchungen zu Fragestellungen aus Physik, Chemie und Materialforschung, aber auch aus der Biologie (besonders aktuell die Strukturbestimmungen von Proteinen) und der medizinischen Diagnostik.

Synchrotronstrahlungslabors

Eine der modernsten und größten Strahlungsquellen für Synchrotronstrahlung ist die European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble, die von einem Konsortium von 15 europäischen Staaten betrieben wird, wobei Frankreich und Deutschland je ein Viertel der Kosten tragen. Durch einen 884 m langen evakuierten Ring kreisen Elektronen mit einer Energie von 6 GeV. Bei Speicherringen der 3. Generation wie der ESRF gibt es an geraden Strecken noch besondere Einbauten, Wiggler bzw. Undulatoren genannt. Dabei werden die Elektronen durch periodische Strukturen aus Permanentmagneten auf eine sinusförmige „Schlängellinie“ gezwungen, wodurch die Intensität der Strahlung mit Wiggler in einem weiten und mit Undulatoren in einem schmalen Energiebereich enorm verstärkt wird (siehe Abbildung 2b). So nähert man sich bei den Undulatoren den Eigenschaften des Lasers. Ein ehrgeiziges Ziel ist die Entwicklung eines „Freien-Elektronen-Lasers“ im harten Röntgenbereich, das derzeit am Hamburger Synchrotronstrahlungslabor, abgekürzt HASYLAB (DESY, Hamburg) verfolgt wird. Das HASYLAB ist seit 1979 die nationale Strahlungsquelle, vornehmlich für harte Röntgenstrahlung, während in Berlin BESSY-II (in Nachfolge von BESSY-I) als Quelle für „weiche“ Röntgenstrahlung dient.

Synchrotronstrahlungslabors sind nationale oder internationale „Forschungsfabriken“ mit ca. 30 bis 40 Messplätzen entlang des Elektronenrings, an denen Gruppen von Wissenschaftlern, oft auch Diplomanden und Doktoranden aus den Universitäten, rund um die Uhr arbeiten. Die Experimente müssen beantragt und genehmigt werden, sie verlangen deshalb eine langfristige Planung. Nach ca. einer Woche Messzeit reist dann die eine Arbeitsgruppe mit ihren Ergebnissen ab, die nächste Gruppe steht schon mit ihren Proben bereit und übernimmt die Messapparaturen.

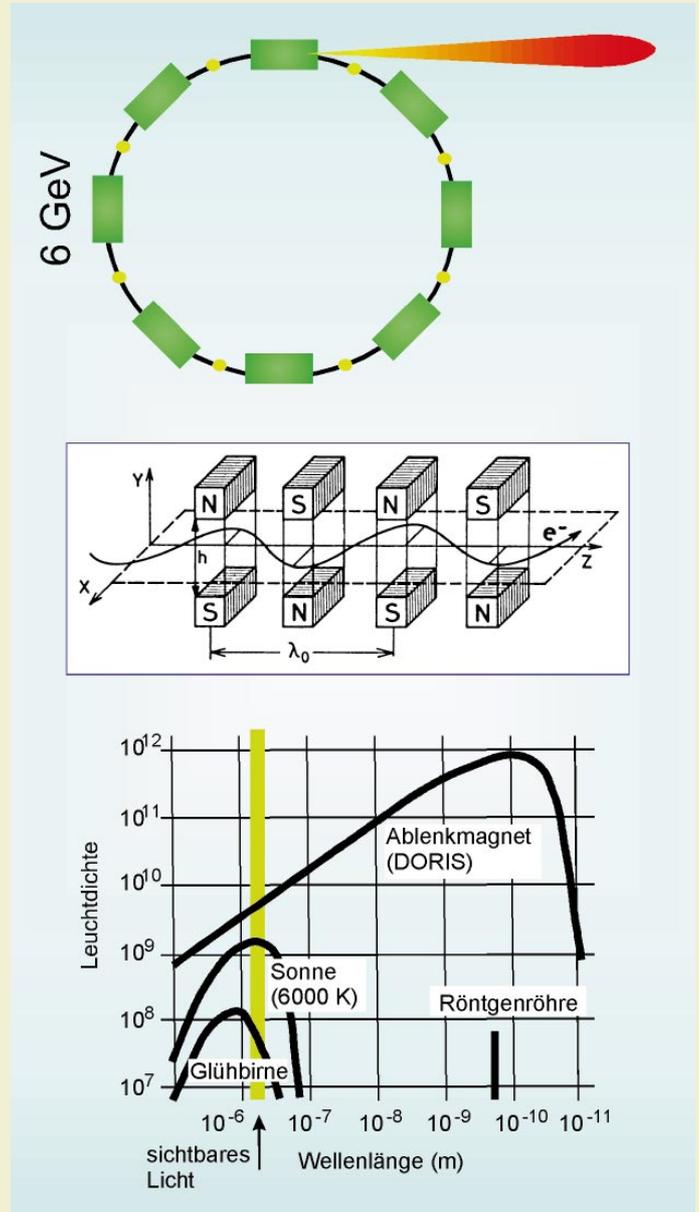


Abb. 2: (a) Schematische Darstellung der Erzeugung von Synchrotronstrahlung in einem Elektronen-Speicherring. (b) Elektronenbahn in einer periodischen Magnetstruktur. (c) Vergleich der Leuchtdichten an einem Ablenkmagneten, aufgetragen gegen die Wellenlänge, und Vergleich mit anderen Strahlungsquellen.

Für viele der Experimente muss aus der weißen Synchrotronstrahlung die Strahlung mit der richtigen Wellenlänge (Farbe) für das geplante Experiment herausgefiltert werden. Dies geschieht mit Hilfe von Monochromatoren, die im harten Energiebereich aus Siliziumkristallen bestehen und große Energieauflösungen (bis 1 meV) besitzen. Oft muss die Strahlung auf die untersuchte Probe fokussiert werden. Dazu werden Spiegel oder gebogene Kristalle, neuerdings auch Röntgenlinsen verwendet [Snigirev]. Fokussierung ist besonders wichtig für die hier vorgestellten Hochdruckexperimente, bei denen kleinste Proben von ca. 50 bis 200 μm mit Diamantstempeln bis zu Drücken von 1 Megabar (das sind 1 000 000 bar) komprimiert werden (siehe auch Beitrag von Prof. Holzapfel im Forschungsforum 1, p. 54, 1998).

Festkörperspektroskopie mit Synchrotronstrahlung

Die Paderborner Arbeitsgruppe betreibt Festkörperspektroskopie, um strukturelle, elektronische und magnetische Eigenschaften

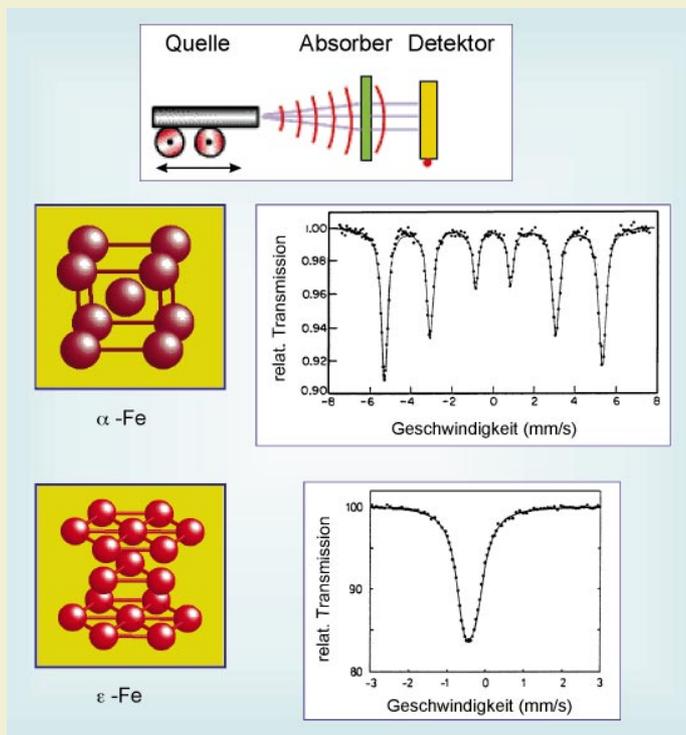


Abb. 3: Schematische Darstellung des Mössbauer-Effekts (oben) und darunter die Strukturen und Mössbauerspektren von kubischem (magnetischem) und hexagonalem (unmagnetischem) Eisen.

ten von Materialien mit aktuellem Interesse zu untersuchen. Als Methoden werden Röntgenabsorption, Röntgenbeugung und der Mössbauer-Effekt eingesetzt. Alle diese Methoden können besonders effektiv unter Hochdruck mit Synchrotronstrahlung betrieben werden. Wir zeigen hier als Beispiel Untersuchungen an metallischem Eisen. Wird der Mössbauer-Effekt im Labor betrieben, nutzt man dazu eine radioaktive Quelle, die die charakteristische γ -Strahlung eines Kerns, hier die 14,413 keV Strahlung des Fe-57 Isotops, emittiert. Durchstrahlt man eine Probe, die Eisen enthält, kann man die „rückstoßfreie Kernresonanzfluoreszenz“ beobachten (der Rückstoß wird später noch eine wichtige Rolle spielen). Dazu misst man die Transmission als Funktion der Geschwindigkeit der Quelle; wobei die extrem genaue Energie der γ -Strahlung durch den Dopplereffekt moduliert wird. In Abbildung 3 ist das Mössbauerspektrum von magnetischem Eisen bei Normaldruck gezeigt. Durch ein starkes Magnetfeldern am Kern des Eisens wird die Fe-57 Resonanz in 6 Linien aufgespalten. Wird Eisen einem Druck größer 130 kbar (entspricht 130 000 bar) ausgesetzt, findet ein Phasenübergang von der kubischen (α -Fe) in eine hexagonale (ϵ -Fe) Struktur statt, begleitet von einem Verlust der magnetischen Ordnung bzw. des magnetischen Moments der Fe-Atome. Dies zeigt sich im Mössbauerspektrum durch eine unaufgesplante Resonanzlinie (siehe Abbildung 3).

Kernstreuung von Synchrotronstrahlung

Seit einigen Jahren nutzt man die Synchrotronstrahlung als „Quelle“, um mit kernresonanter Streuung eine dem Mössbauer-Effekt eng verwandte Spektroskopie zu betreiben [Gerdau]. Dabei filtern die Kerne, hier wieder Fe-57, die richtigen 14,413 keV Photonen mit einer Bandbreite von nur $5 \cdot 10^9$ eV aus der monochromatisierten Synchrotronstrahlung heraus. Diese „reso-

nanten“ Photonen werden, entsprechend der langen Lebensdauer der angeregten Kernzustände, erst mit einer mittleren Verzögerung von 10^{-7} Sekunden in Vorwärtsrichtung (nuclear forward scattering, NFS) reemittiert und sind dadurch von der 10^6 -mal intensiveren nichtresonanten Strahlung unterscheidbar. Bei diesen NFS-Spektren (Abbildung 4) tritt, wenn am Kernort ein definiertes Magnetfeld herrscht, eine Modulation der Zerfallskurve durch ein Interferenzphänomen auf, das in der klassischen Optik der „Beugung am Doppelspalt“ entspricht. Aus dem periodischen Interferenzmuster des NFS Spektrums von magnetischem Eisen (Abbildung 4) kann das Magnetfeld am Kern des Eisens, wie beim obigen Mössbauerspektrum, sehr genau bestimmt werden. Im NFS-Spektrum der unmagnetischen Hochdruckphase des Eisens tritt diese Modulation nicht auf, man beobachtet den exponentiellen Zerfall eines unaufgespaltenen Zustands, der noch durch Dickeneffekte (beschrieben durch eine Bessel-Funktion) moduliert wird. Im optischen Analogon entspricht dies der Beugung am Einfachspalt. Im eigenen Hause wird in der Gruppe Prof. von der Osten die methodisch eng verwandte „optische Kurzzeitspektroskopie“ betrieben. Anregungsquelle ist dabei ein gepulster Laser, der analog zur zeitlich gepulsten Synchrotronstrahlung die angeregten Zustände erzeugt [von der Osten].

Phononenspektroskopie

Wir kommen jetzt zu einer weiteren Anwendung der kernresonanten Spektroskopie mit Synchrotronstrahlung. Wie oben erwähnt, wurde der Mössbauer-Effekt „rückstoßfreie“ Kernresonanzfluoreszenz genannt. In einem klassischen Bild wird bei der

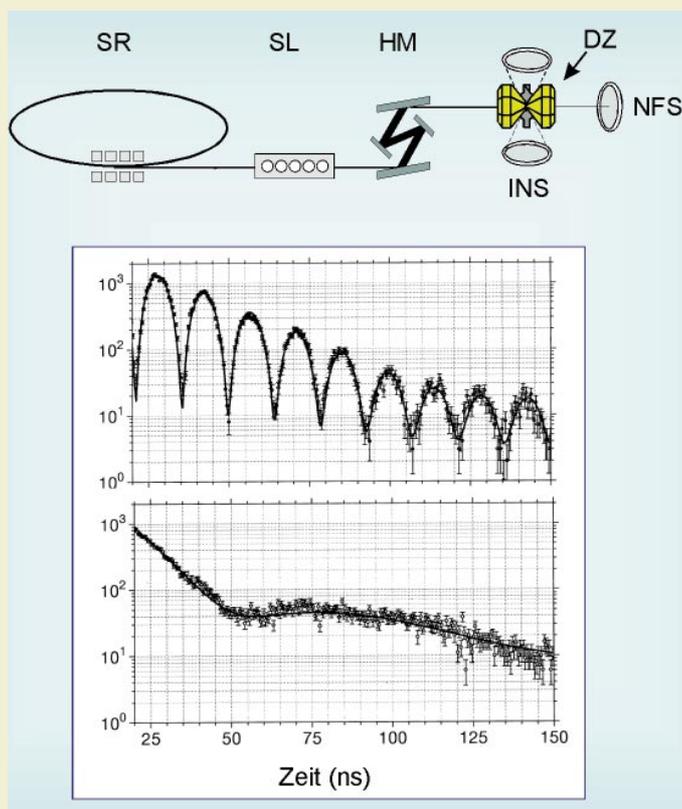


Abb. 4: (oben) Prinzipielle Messanordnung für Kernstreuexperimente mit Synchrotronstrahlung mit SR: Speicherring mit Undulator; SL: Snigirev-Linse; HM: hochauflösender Monochromator; DZ: Druckzelle mit Probe; NFS: Detektor für Kernvorwärtsstreuung; INS: Detektoren für inelastische Kernstreuung. Darunter die NFS-Spektren für magnetisches Eisen und die unmagnetische Hochdruckphase.

Emission bzw. Absorption eines Lichtquants mit der Energie von 14,413 keV auf den freien Fe-57 Kern eine Rückstoßenergie von $2 \cdot 10^3$ eV übertragen, wegen der extremen Schärfe der Resonanz (Linienbreite von $5 \cdot 10^9$ eV) wäre damit die Resonanzbedingung um 400 000 Linienbreiten verstimmt. Ist jedoch das emittierende oder absorbierende Atom in einem Festkörper eingebaut, wird der Rückstoß quantisiert übertragen. Daraus ergibt sich jetzt eine Wahrscheinlichkeit für rückstoßfreie Emission bzw. Absorption der γ -Quanten und auch für Prozesse, bei denen mehr (oder weniger) Energie als genau die Rückstoßenergie übertragen wird. Mit diesem Energieübertrag werden im Festkörper „Phononen“ angeregt. Diese Phononen sind bestimmte Schwingungsanregungen der im Festkörper regelmäßig angeordneten Atome. Diese Schwingungen können mit den Tönen einer Saite verglichen werden, die je nach Spannung bzw. Beschaffenheit, in verschiedenen Tonhöhen (Frequenzen), oft auch mit mehr als einem Ton („Obertöne“) schwingen kann. Das Phononenspektrum eines Festkörpers ist dann, anschaulich gesprochen, die Auflistung aller möglichen Frequenzen (Tonhöhen), die mit diesem Festkörper (Instrument) erzeugt werden können.

Mit der neuen Methode der inelastischen Kernstreuung (inelastic nuclear scattering, INS) von Synchrotronstrahlung lassen sich diese Phononenspektren ausmessen [Sturhahn]. Man misst jetzt mit Hilfe des hochauflösenden Monochromators die Wahrscheinlichkeit für einen Energieübertrag vom oder zum Festkörper. Hierzu wird der Monochromator in einem Bereich von ± 100 meV um die Resonanzenergie verstimmt, die Energiedifferenz dient zur Erzeugung oder Auslöschung von Phononenanregungen im Festkörper. Durch seitlich angebrachte Detektoren (Abbildung 4) kann man die inelastischen (INS) von elastischen (NFS) Prozessen unterscheiden. Typische Phononenspektren von Eisen sind in Abbildung 5 gezeigt. Dabei sieht man auf beiden Seiten der zentralen Linie (die von rückstoßfrei absorbierten γ -Quanten stammt) symmetrische Strukturen, die für $E > 0$ aus der Anregung, für $E < 0$ jedoch aus der Absorption (Auslöschung) von Phononen resultieren. Diese Spektren ähneln den Ramanspektren von Molekülen mit Stokes- und Anti-Stokeslinien. Aus den gemessenen INS-Spektren wird, nach einer Normierung (dazu wird der Erhaltungssatz für die Rückstoßenergie benutzt), der Subtraktion der elastischen Linie und der Eliminierung von Mehrfachanregungen, die Phononen-Zustandsdichte $D(E)$ bestimmt. Diese ist für die beiden Phasen des Eisens drastisch unterschiedlich (Abbildung 5); die für die Hochdruckphase wurde erstmals von uns gemessen. Aus dem niederenergetischen Bereich von $D(E)$ kann man mit einer einfachen Formel die Schallgeschwindigkeit ermitteln. Weitere wichtige thermodynamische Größen ergeben sich direkt aus dem Verlauf von $D(E)$. So lässt sich eine Debye-Frequenz bzw. Debye-Temperatur ermitteln, die ein Maß für die Bindungsstärke der Atome im Festkörper angibt; weitere wichtige Größen sind die spezifische Wärme und die Entropie des Gitters. Aus der Änderung dieser Größen als Funktion von Druck oder Volumen lassen sich wichtige Informationen über die Gitterdynamik bzw. über die Natur des strukturellen Phasenübergangs von der kubischen zur hexagonalen Phase ableiten. Die hexagonale Phase des Eisens ist dabei von besonderem geophysikalischen Interesse, da sich das Erdinnere aus einem festen Eisenkern mit eben dieser Struktur zusammensetzt. Zur Interpretation von seismographischen Messungen,

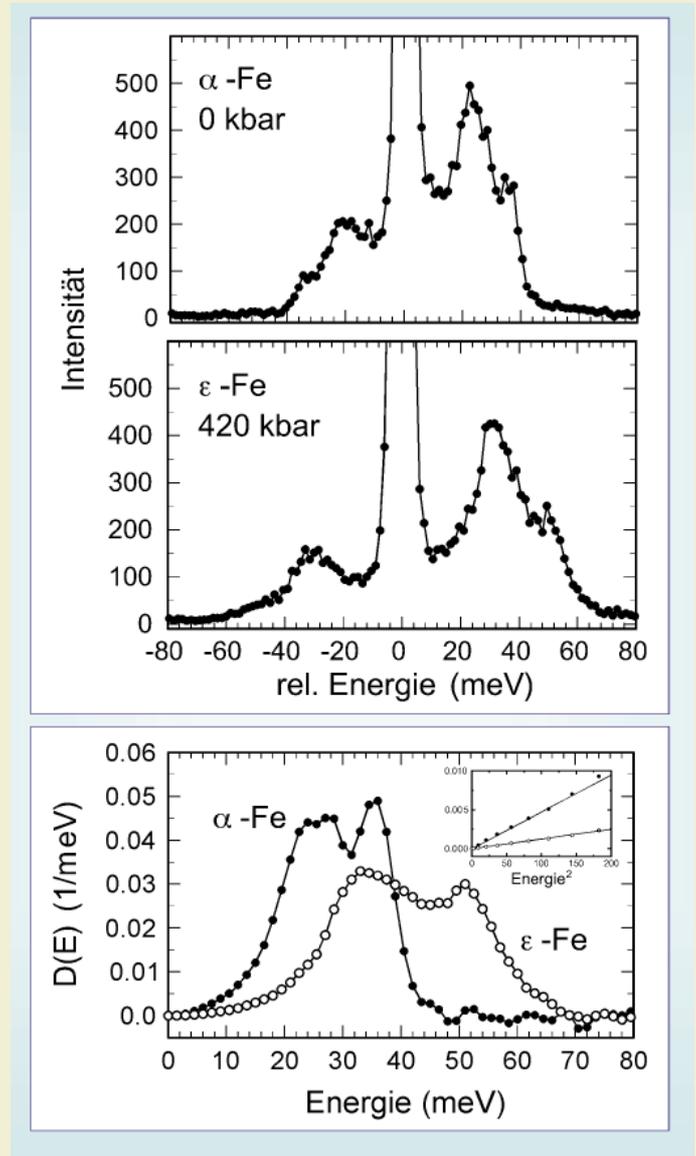


Abb. 5: INS-Spektren für kubisches Eisen (α -Fe bei Nulldruck, oben) und für hexagonales Eisen (ϵ -Fe bei 420 kbar, Mitte). Die aus diesen Spektren abgeleitete Phononzustandsdichte $D(E)$ ist unten gezeigt; der Einschub zeigt die Steigung von $D(E)$ gegen E^2 , woraus die Schallgeschwindigkeit ermittelt wird.

z.B. von durch Erdbeben ausgelösten Schallwellen, ist die Kenntnis der Schallgeschwindigkeit im Erdinneren wichtig. Obwohl die gegenwärtigen Untersuchungen noch nicht den Zustand im Inneren der Erde [Holzapfel] erreichen, ermöglichen sie doch eine genaue Überprüfung von aktuellen theoretischen Berechnungen, die zu den Eigenschaften der hexagonalen Eisenphase durchgeführt werden.

Weitere Hochdruckuntersuchungen mit Synchrotronstrahlung

Das magnetische Verhalten des Eisens in intermetallischen Verbindungen, besonders in „harten“ Permanentmagneten, kann hervorragend mit der NFS Methode unter hohem Druck untersucht werden. Im Rahmen der Doktorarbeit von R. Lübbers wurde in verschiedenen intermetallischen Verbindungen mit der Zusammensetzung RFe_2 die Größe des Fe-Moments und der Ordnungstemperaturen als Funktion des Drucks (bis 1 Mbar) untersucht, ergänzt durch entsprechende Untersuchungen der Änderungen der Gitterparameter mit energiedispersiver Röntgen-

beugung im HASYLAB in Zusammenarbeit mit G. Reiß (Arbeitsgruppe Prof. Holzapfel). Man beobachtet eine kontinuierliche Abnahme des Fe-Moments und eine drastische Abnahme bzw. ein Verschwinden der magnetischen Ordnungstemperaturen. Diese Ergebnisse sind zum Teil veröffentlicht [Lübbbers]. Erste NFS-Untersuchungen unter hohem Druck wurden auch mit der Eu-151 Resonanz durchgeführt. Dabei wurden von uns die magnetischen Eigenschaften der bekannten Europium-Chalkogenide, EuS und EuTe, erstmals in ihren Hochdruckphasen untersucht. Bei EuTe beobachten wir hier eine starke Zunahme der ferromagnetischen Ordnungstemperatur unter Druck. Auch zur Beobachtung von druckinduzierten Valenzübergängen $\text{Eu}^{2+} - \text{Eu}^{3+}$ eignet sich die NFS-Methode besonders gut [Pleines].

Erwähnt werden soll, dass unsere Gruppe inzwischen auch an der neuen amerikanischen Synchrotronstrahlungsquelle APS bei Chicago Hochdruckuntersuchungen der Phononen-Zustandsdichten in Zinn und Zinnoxid durchgeführt hat. Dies zeigt, dass bei entsprechendem Engagement auch für eine relativ kleine Arbeitsgruppe an der Universität Paderborn das Tor zur „großen“ Welt offen steht.

Unser Dank gilt Marianne Pleines, Kirsten Rupprecht, Hubertus Giefers, Hermann Grünsteudel, Hans-Josef Hesse und Matthias Strecker, die an einigen der hier vorgestellten Messungen beteiligt waren. Wir danken auch Alexandr Chumakov und Rudolf Ruffer von der ESRF für die langjährige Kooperation. Die Untersuchungen mit Synchrotronstrahlung werden durch das BMBF gefördert.

Literatur

[Gerdau] E. Gerdau et al., Phys. Rev. Lett. 54, 835 (1985); J.B.

Hastings et al., Phys. Rev. Lett. 66, 770 (1991).

[Grünsteudel] H.F. Grünsteudel, Dissertation (FB Physik, Universität Paderborn, 1997).

[Holzapfel] W.B. Holzapfel, ForschungsForum Paderborn, Vol. 1 p. 54 (1998). Hier sind die Hochdrucktechnik und die geophysikalischen Aspekte dargestellt.

[Lübbbers] R. Lübbbers et al., Hyperfine Interactions 120/121, 49 (1999).

[Pleines] M. Pleines et al., Hyperfine Interactions 120/121, 181 (1999); M. Pleines, Diplomarbeit (FB Physik, Universität Paderborn, 1998).

[Snigirev] A. Snigirev et al., Nature 384, 49 (1996).

[Sturhahn] W. Sturhahn et al., Phys. Rev. Lett. 74, 3832 (1995).

[von der Osten] V. Langer, H. Stolz and W. von der Osten, Phys. Rev. Lett. 64, 854 (1990).



Dipl.-Phys. Rainer Lübbbers

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachbereich 6/Physik. Im Rahmen seiner Doktorarbeit führt er Hochdruckuntersuchungen mit Kernstreuung von Synchrotronstrahlung durch. Aktuelle Zielrichtungen sind dabei Magnetismus und Gitterdynamik. Sein musikalisches Interesse gilt dem Waldhorn, das er auch in das Hochschulorchester einbringt.

Strategische Produktplanung

Der erste und entscheidene Schritt auf dem Weg zu den Produkten für die Märkte von morgen

Die Identifikation der Produkte und Märkte von morgen ist eine herausfordernde unternehmerische Aufgabe, die von der Strategischen Produktplanung zu leisten ist und ein bestimmtes Instrumentarium erfordert. Am Heinz Nixdorf Institut wird unter Leitung von Prof. Jürgen Gausemeier an einem solchen Instrumentarium seit Jahren gearbeitet. Als zentrale Methodik entstand im Rahmen dieser Arbeit das Szenario-Management. Mit ihm ist es möglich, Erfolgspotenziale der Zukunft wie auch Bedrohungen für ein bereits etabliertes Geschäft frühzeitig zu erkennen. Die Methodik wurde in vielen Industrieprojekten erfolgreich angewandt und ist mittlerweile auch Bestandteil der Marktleistung zweier Beratungsunternehmen – der ScMI AG und der UNITY AG –, die als Spin-Offs aus dem Heinz Nixdorf Institut hervorgegangen sind.

Hoher Lebensstandard erfordert Innovationen

Wir befinden uns in einem tief greifenden Wandel von der Industriegesellschaft zur globalen Informationsgesellschaft. Haupttreiber dieses Wandels sind die rasante Entwicklung von Technologien – allen voran die Informations- und Kommunikationstechnologie – und die Globalisierung. Auch in Zukunft wird sich der Lebensstandard einer hoch entwickelten Nation auf der Fähigkeit begründen, innovative Industrieerzeugnisse hervorzu bringen und auf dem Weltmarkt mit Gewinn zu verkaufen. In der Informationsgesellschaft nimmt die industrielle Produktion

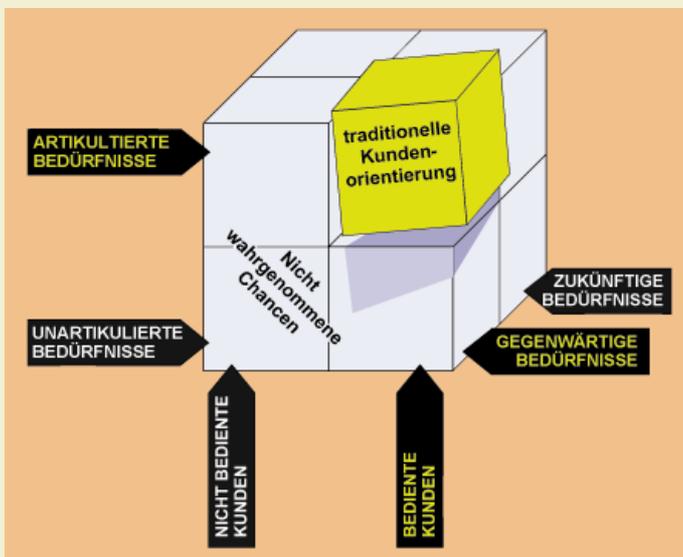


Abb. 1: Neben der traditionellen Kundenorientierung gibt es ein breites Spektrum nicht wahrgenommener Chancen.



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier ist Professor für Rechnerintegrierte Produktion am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn. In seiner zwölfjährigen Industrietätigkeit war Prof. Gausemeier Entwicklungschef für CAD/CAM-Systeme und zuletzt Leiter des Produktbereichs Prozessleitsysteme bei einem namhaften schweizer

Unternehmen. Prof. Gausemeier ist Initiator und Aufsichtsratsvorsitzender der UNITY AG – Aktiengesellschaft für Unternehmensführung und Informationstechnologie.

also nach wie vor eine Schlüsselposition ein, es finden nur weniger Menschen Beschäftigung in diesem Bereich. Im Vordergrund der Bemühungen um eine effektive Zukunftsgestaltung müssen Produktinnovationen und damit einhergehende Dienstleistungsinnovationen stehen. Ein hohes Lohnkostenniveau erfordert adäquate Spitzenleistungen an Kreativität und industrieller Wertschöpfung. Auf dem Weg zu den Produkten und Märkten von morgen wird es den Unternehmen kaum weiterhelfen, Kunden oder den Vertrieb zu befragen. Sie fordern oft Problemlösungen aus heutiger Sicht und zeichnen sich häufig durch eine gewisse Phantasielosigkeit aus. Wer die Probleme von heute löst, hat jedoch noch nicht unbedingt die Herausforderungen von morgen bewältigt. Diese ergeben sich etwa aus bereits wahrnehmbaren Entwicklungen wie einer zunehmenden Bedeutung der nachhaltigen Entwicklung (Sustainable Development) und der Verbreitung der Informations- und Kommunikationstechnik.

Entwicklungsmöglichkeiten übersteigen Vorstellungskraft

Beispielsweise ist damit zu rechnen, dass im Jahre 2020 ein Tischrechner eine Leistung bietet, wie sie heute alle Rechner in Silicon Valley gemeinsam erbringen, und dass in einigen Jahren voll kommunikationsfähige Sensoren und Mikroprozessoren zum Preis einer Schraube erhältlich sind. Die Möglichkeiten dieser beeindruckenden Entwicklungen scheinen nur durch unsere mangelnde Vorstellungskraft begrenzt zu sein. Es liegt auf der Hand, dass der technologische Fortschritt im Wechselspiel mit der Globalisierung das Geschäft der Schlüsselbranchen wie des Maschinen- und Anlagenbaus, der Automobil- und der Elektro-

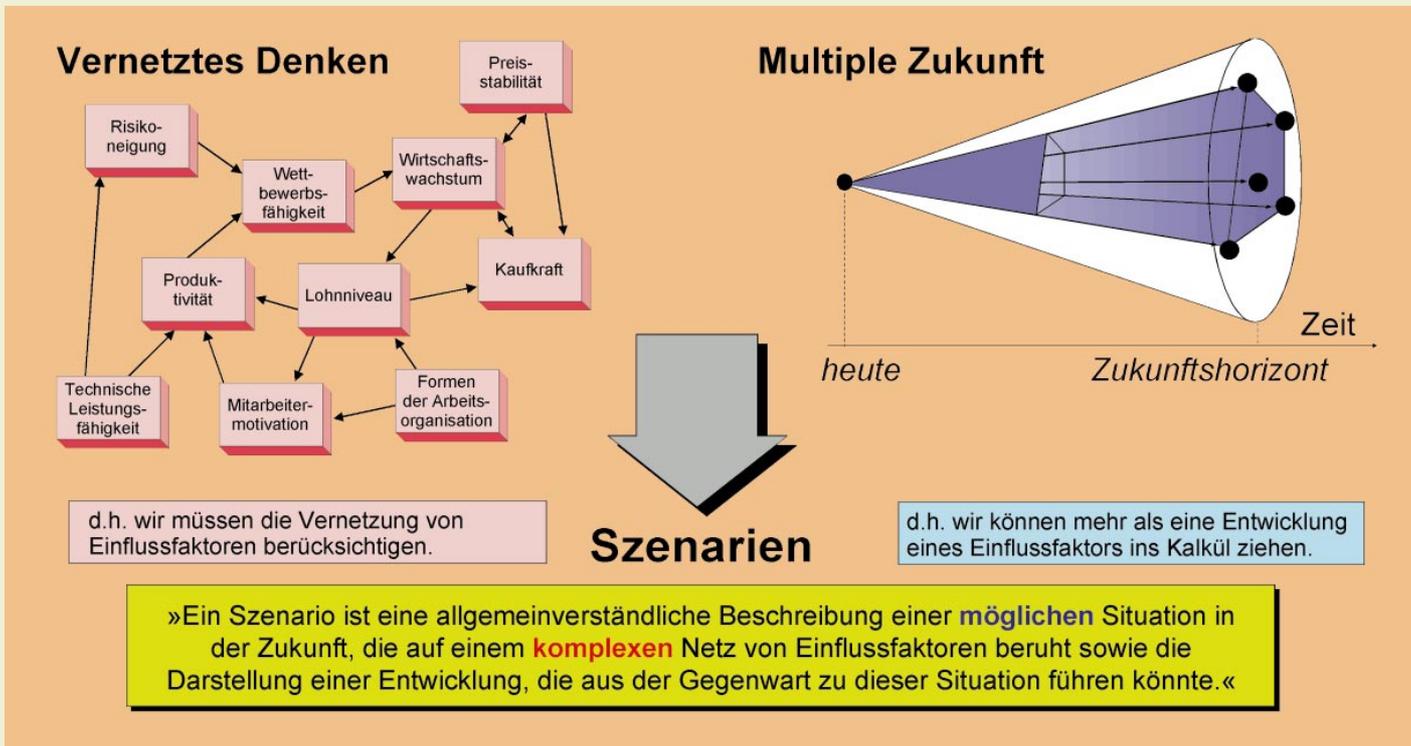


Abb. 2: Die zwei Grundprinzipien der Szenario-Technik.

industrie stark beeinflussen wird. Hier zeichnen sich neue faszinierende Möglichkeiten zur Gestaltung der Produkte und Dienstleistungen von morgen ab [1].

Die traditionelle Kundenorientierung reicht nicht aus, um diese Möglichkeiten zu erschließen (Abbildung 1). Sie konzentriert sich auf artikuliert Bedürfnisse der bedienten Kunden und ist gegenwartsbezogen. Die traditionelle Kundenorientierung lässt sowohl die unartikulierten Bedürfnisse, die nicht bedienten Kunden, als auch die zukünftigen Bedürfnisse der Kunden außer acht.

Mit Hilfe der Szenario-Technik die Zukunft vorausdenken

Mehr als bisher wird es in den nächsten Jahren darauf ankommen, die unternehmerischen Erfolgspotenziale der Zukunft frühzeitig zu identifizieren und rechtzeitig zu erschließen. Für das Erkennen dieser zukünftigen Erfolgspotenziale bietet sich die Szenario-Technik an [2], bei der es nach Kurt Sontheimer weniger um ein „Voraussagen“ der Zukunft, sondern mehr um das „Vorausdenken“ der Zukunft geht. Genau dies ist die Aufgabe der Unternehmen, wenn Agilität beim Wettlauf um Produkte und Märkte von morgen gefordert wird. Angesichts des rasanten Wandels und der Turbulenzen in den globalen Märkten fällt es schwer, sich mit der Zukunft zu befassen. Es zu unterlassen, wäre in den meisten Fällen jedoch fast fahrlässig. „Die Zukunft wird uns immer überraschen, aber sie sollte uns nicht überrumpeln“ (Buckminster Fuller).

Die Szenario-Technik beruht auf den zwei Grundprinzipien „vernetztes Denken“ und „multiple Zukunft“ (Abbildung 2). Nahezu jede Fragestellung in der Produktplanung erfordert die Betrachtung vieler Einflussfaktoren aus Bereichen wie Märkte, Branchen, Technologien und gesellschaftliches Umfeld, die in Wechselbeziehung zueinander stehen. Dietrich Dörner hat in seinem Buch „Die Logik des Misslingens“ sehr überzeugend dargestellt, dass wir sehr unbegabt sind, ein Netz von Einfluss-

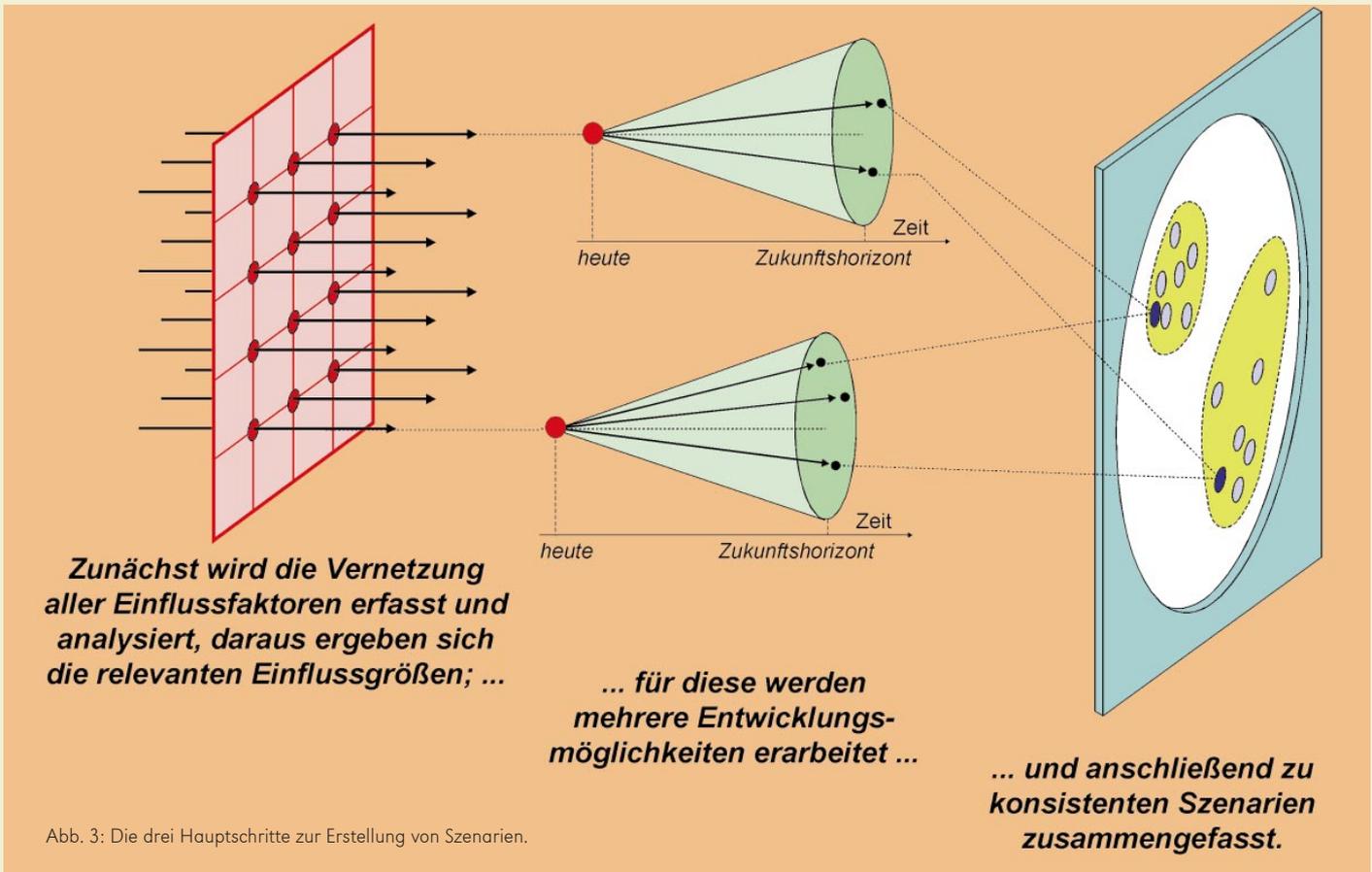
faktoren zu überblicken und adäquat zu handeln. Es ist daher wichtig, eine methodische Unterstützung für das vernetzte Denken vorzugeben, wie sie etwa die Szenario-Technik bietet. Multiple Zukunft bedeutet, dass mehr als die zukünftige Entwicklung eines Einflussfaktors ins Kalkül gezogen werden muss, um Zukunftsszenarien zu entwerfen. Die Entwicklung von Szenarien erfolgt in drei Hauptschritten (Abbildung 3):

1. Ermittlung von Schlüsselfaktoren: Ziel ist es, diejenigen Faktoren zu ermitteln, die einen besonders starken Einfluss auf die Fragestellung ausüben. Dazu werden insbesondere Vernetzungen zwischen lenkbaren und nicht lenkbaren Einflussfaktoren systematisch untersucht.
2. Prognose einer Entwicklung der Schlüsselfaktoren: Hier werden je Schlüsselfaktor mögliche künftige Entwicklungen – so genannte Zukunftsprojektionen – ermittelt. Je Schlüsselfaktor sind eine oder mehrere Zukunftsprojektionen zu entwerfen.
3. Entwicklung von Zukunftsszenarien: Zukunftsszenarien sind prägnante Darstellungen einer denkbaren Zukunftskonstellation. Sie beruhen auf widerspruchsfreien Kombinationen der zuvor ermittelten Zukunftsprojektionen.

Die Szenarien liefern neben Informationen über Chancen, Erfolgspotenziale und Bedrohungen für das etablierte Geschäft auch Herausforderungen und Handlungsoptionen. Damit existiert eine fundierte Basis für die Erarbeitung von Technologie-, Produkt- und Geschäftsstrategien. Der Einsatz der Szenario-technik zur Strategischen Produktplanung wird im Folgenden anhand zweier ausgewählter Praxisbeispiele verdeutlicht:

Beispiel 1: Die Zukunft der deutschen Pumpenindustrie

Das erste Beispiel betrachtet die Zukunft der deutschen Pumpenindustrie. Die untersuchte, mittelständisch geprägte Branche hat in den letzten Jahrzehnten eine führende Stellung auf dem Weltmarkt erlangt. Wesentlich für den Erfolg waren und sind unter anderem die hervorragende Produktqualität und die



technologische Führerschaft. Diese Position wird durch ausländische Wettbewerber – die im Bezug auf Qualität und Technologie bei häufig günstigeren Produktpreisen mehr und mehr aufschließen – zunehmend angegriffen. Als weiterer negativer Einflussfaktor kommen die standortimmanenten Kostennachteile in Deutschland hinzu. Naheliegende Ratschläge für diese Situation lauteten bislang meist dahingehend, die Kosten zu senken, die Fertigung ins Ausland zu verlagern und dort neue Märkte zu erschließen.

Unter diesen Voraussetzungen ging es in der betrachteten Untersuchung insbesondere um die Fragen: „Kann der standortimmanente Kostennachteil durch verstärkte Innovationsanstrengungen kompensiert werden? Wenn ja, welche Maßnahmen der vorwettbewerblichen Gemeinschaftsforschung der Branche bieten sich an?“

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden Einflussfaktoren aus den Bereichen Marketing, Technologie, Märkte und Umfeld identifiziert und miteinander vernetzt. Aus diesen Bereichen wurden 20 wesentliche Schlüsselfaktoren bestimmt und entsprechende Zukunftsprojektionen für das Jahr 2005 ermittelt. Zum detaillierten Vorgehen und zur wissenschaftlichen Begründung des Verfahrens sei auf [2] und [3] verwiesen. Auf diesem Weg entstanden vier Branchenszenarien (Abbildung 4):

- Szenario I „Begegnung der Internationalisierung durch Allianzen“ beschreibt eine Entwicklung, bei der eine mittelständisch geprägte Branche sich einem möglichen Konzentrationsprozess mit technisch anspruchsvollen Produkten und durch Allianzenbildung entgegenstellt.
- Szenario II „Preisgünstige High-Tech-Pumpen für globale Märkte“ zeigt eine Entwicklung auf, bei der die deutschen Unternehmen den ausländischen Billiganbietern technisch

hochwertige und preislich attraktive Produkte entgegenzusetzen. Aufgrund der großen Bedeutung der Stückkosten haben in diesem Szenario die Konzentrationsprozesse zugenommen.

- Szenario III „Spezialisten in traditionellen Märkten“ beschreibt ein Zukunftsbild, in dem eine mittelständisch geprägte Branche mit technisch anspruchsvollen Produkten die vielfältigen Anforderungen der Kunden bedient.
- Szenario IV „Einfache Pumpen in globalen Märkten“ bietet dagegen deutlich schlechtere Perspektiven. Hier dominieren internationale Großkonzerne mit weltweiten Fertigungsstätten. Bei weitgehend standardisierten Produkten ist der Preis das wesentliche Verkaufsargument.

Aus diesen Szenarien ergeben sich je nach Unternehmenstyp zwei strategische Stoßrichtungen. Zum einen ist eine auf Szenario IV fokussierte Strategie für wenige international wachsende

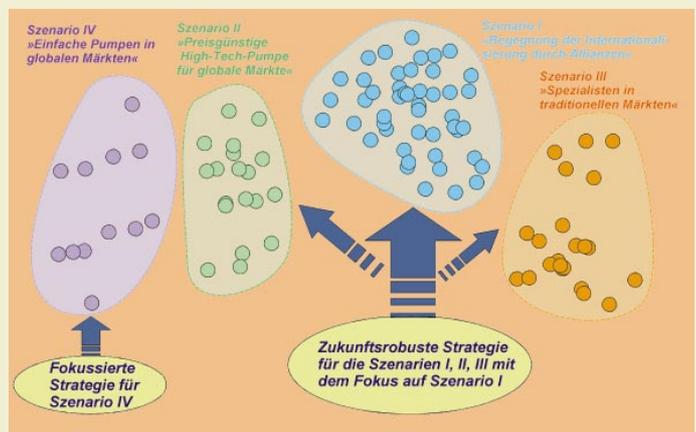


Abb. 4: Zukunftsrobuste Strategie für Szenarien I, II, III und fokussierte Strategie für Szenario IV.

Konzerne mit einer guten Kostenstruktur attraktiv. Sie ermöglicht Wachstum in neuen internationalen Märkten und zusätzliche Marktanteils Gewinne zu Lasten der kleineren Unternehmen. Wesentliche Konsequenz aus dieser Strategie wäre die Ablösung der deutschen Exportorientierung zugunsten einer Verlagerung der Wertschöpfung in neue Märkte.

Für den überwiegenden Teil der deutschen, mittelständischen Unternehmen in der betrachteten Branche bietet sich jedoch eine andere Strategie an. Hier wird eine zukunftsrobuste Strategie für die Szenarien I, II und III mit dem Fokus auf Szenario I empfohlen. Der Schwerpunkt liegt hier auf der Zusammenarbeit innerhalb der Branche, um künftige Herausforderungen gemeinsam zu bewältigen und gleichzeitig die Agilität einer mittelständisch geprägten Branche zu erhalten. Die Allianzenbildung muss insbesondere dazu beitragen, die technologische Spitzenposition auszubauen – beispielsweise durch Intensivierung der vorwettbewerblichen Gemeinschaftsforschung – und gemeinsam Skalen- und Synergieeffekte zu realisieren. Eine solche Strategie ist auch für das Szenario II geeignet, wobei hier aufgrund des starken Preiswettbewerbs kooperative Anstrengungen zur Kostensenkung im Vordergrund stehen. Auch für Szenario III ist diese „zukunftsrobuste“ Strategie geeignet; in diesem Fall haben gemeinsame Anstrengungen im Bereich der Forschung eine größere Bedeutung.

Beispiel 2: Die Zukunft des Leichtbaus in der Automobilindustrie

Ein weiteres Beispiel zur Anwendung von Szenarien in der Strategischen Produktplanung stellt eine Untersuchung zur Zukunft des Leichtbaus in der Automobilindustrie dar. Der Leichtbau erfordert völlig neue Fertigungsstätten und Wertschöpfungsketten, was mit erheblichen Investitionen verbunden ist. Das erarbeitete Szenario-Projekt sollte Informationen zur Unterstützung der erforderlichen Investitionsentscheidungen liefern. Das

Projekt wurde in vier Hauptschritten durchgeführt:

1. Bestimmung möglicher Fahrzeugkonzepte, die auf der Leichtbauweise beruhen (Abbildung 5),
2. Ermittlung von Markt- und Umfeldszenarien,
3. Zuordnung der Fahrzeugkonzepte zu möglichen Markt- und Umfeldentwicklungen (Abbildung 6),
4. Ermittlung relevanter Fertigungstechnologien (Abbildung 7).

Im ersten Schritt wurden mögliche Fahrzeugkonzepte bestimmt, die auf der Leichtbauweise beruhen. Diese Produktszenarien sind ebenfalls nach der bereits erläuterten Methode des Szenario-Managements erstellt worden. Allerdings wurden innerhalb der Produktszenarien nicht Einflussfaktoren, sondern Produktmerkmale eines möglichen Fahrzeugkonzeptes der Zukunft identifiziert. Die wichtigsten Produktmerkmale werden als Schlüsselmerkmale bezeichnet.

Nach Festlegung eines Zukunftshorizontes (hier das Jahr 2005) wurden für alle Schlüsselmerkmale mögliche künftige Entwicklungen – so genannte Zukunftsprojektionen – ermittelt. Das Schlüsselmerkmal „Motor“ kann z.B. durch Projektionen wie „Ottomotor“, „Dieselmotor“ und „andere Motorenkonzepte“ beschrieben werden.

Aus der möglichst widerspruchsfreien Kombination dieser Zukunftsprojektionen wurden daraufhin sechs alternative Fahrzeugtypen der Zukunft konzipiert (Abbildung 5). Stellvertretend werden hier zwei Fahrzeugkonzepte kurz charakterisiert:

Fahrzeug-Szenario I – konventionelles Massenfahrzeug: Dieses Fahrzeug wird in großen Stückzahlen hergestellt. Es werden konventionelle Verbrennungsmotoren für Benzin und Diesel eingesetzt. Die Gewichtsersparnis ist gering (< 10 Prozent). Die zusätzlichen Kosten für die Gewichtsreduzierung werden durch neue Konzepte ausgeglichen.

Fahrzeug-Szenario III – Hybridfahrzeug: Dieses Fahrzeug wird in kleinen bis mittleren Stückzahlen hergestellt. Es verfügt über einen Hybridantrieb, d.h. eine Kombination von mindestens

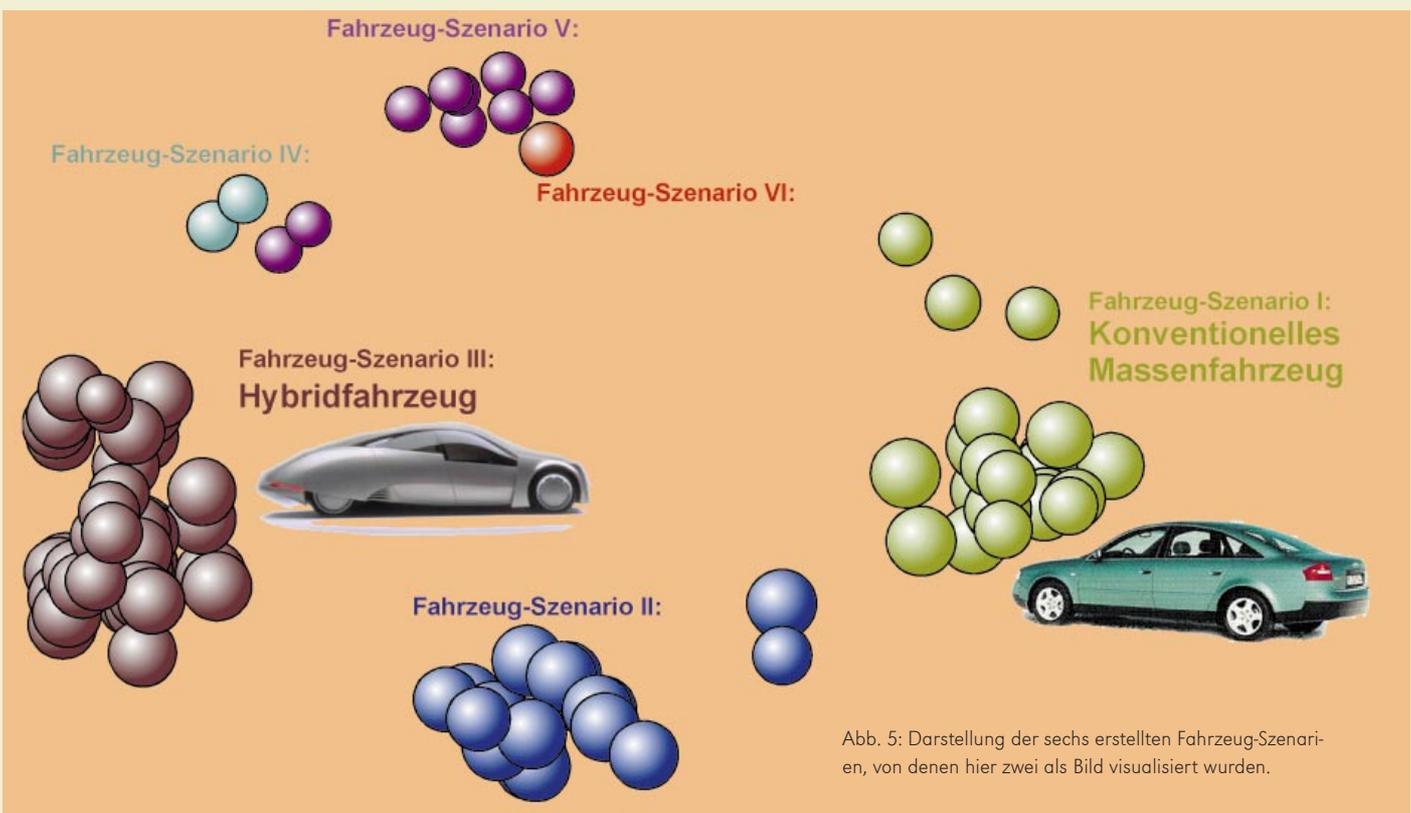


Abb. 5: Darstellung der sechs erstellten Fahrzeug-Szenarien, von denen hier zwei als Bild visualisiert wurden.

Mögliche Markt- und Umfeldentwicklungen	Umfeld-szenario I	Umfeld-szenario II	Umfeld-szenario III
Mögliche Produkt-konzepte			
Produktszenario 1:	⊕ ⊖	⊕ ⊖	⊕ ⊕ ⊕
Produktszenario 2:	⊕ ⊕ ⊕	⊕ ⊖	⊕ ⊕
Produktszenario 3:	⊕ ⊕	⊕	⊕ ⊖
Produktszenario 4:	⊖ ⊖ ⊖	⊕ ⊕	⊕ ⊕

Chance für das Produktszenario in dem betrachteten Marktszenario
 Gefahr für das Produktszenario in dem betrachteten Marktszenario

Abb. 6: Gegenüberstellung der erstellten Produktszenarien und der Umfeldszenarien (Prinzipdarstellung).

zwei verschiedenen Antriebssystemen. Größe und Zuladung des Fahrzeugs liegen erheblich unter dem Durchschnitt. Daher werden vornehmlich Kleinstwagen und City-Cars realisiert. Alle Fahrzeugkonzepte sind abhängig von den Entwicklungs-

möglichkeiten des Fahrzeugumfeldes (wie z.B. Automobilindustrie, Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsteilnehmer etc.) und des globalen Umfeldes (Politik, Wirtschaft, Gesellschaft, Technologie und Umwelt). Aus diesem Grund wurden zusätzlich zu den Produktszenarien Umfeldszenarien entwickelt, die alternative Entwicklungsmöglichkeiten im gesamten Umfeld des Leichtbau-Fahrzeuges aufzeigen.

Die ermittelten Produktszenarien wurden in einem weiteren Schritt mit den Umfeldszenarien kombiniert. Dazu wurde abgeschätzt, inwieweit die einzelnen Projektionen der Produktmerkmale mit den Umfeldszenarien korrelieren.

Diese Ergebnisse finden sich auch in der in Abbildung 6 dargestellten Matrix wieder. Sie fasst die Ergebnisse zusammen und liefert einen Überblick über die jeweiligen Handlungsmöglichkeiten:

- Handlungsoptionen aus Marktsicht: Je Spalte werden die Optionen aus der Sicht einer spezifischen Markt- oder Umfeldentwicklung betrachtet. Dies ist vor allem dann hilfreich, wenn die weitere Planung auf einem einzelnen Szenario aufbaut. Beispielsweise lassen sich Produktszenario 2 und 3 in Umfeldszenario I sehr gut realisieren, wobei die Chancen von Produktszenario 1 eher neutral einzustufen sind. Produktszenario 4 hingegen beinhaltet in Umfeldszenario I erhebliche Risiken.
- Handlungsoptionen aus Produktsicht: Je Zeile können die

Gestaltungsfeld	Szenariofeld					
	Szenario I Konvent. Massenfahrzeug	Szenario II	Szenario III Hybrid-Fahrzeug	Szenario IV	Szenario V	Szenario VI
Schlüsseltechnologien						
Schlüsseltechnologie 1	●●●●	●●●●	●●	●	●●●●	●●●●
Faserverbund-technologie	●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●
Schlüsseltechnologie 3	●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●
Schlüsseltechnologie 4	●●●●	●●●●	●●●●	●●	●●●●	●●●●
Patchworks	●●●●	●●●●	●●	●●	●●	●●●●
Schlüsseltechnologie 6	●●●●	●●●●	●●●●	●●	●	●●●●
Schlüsseltechnologie 7	●●●●	●●●●	●●●●	●●	●●	●●●●
Schlüsseltechnologie 8	●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Schlüsseltechnologie 9	●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Schlüsseltechnologie 10	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●

●●●●● und ●●●●● werden als Innovationsfelder bezeichnet

Abb. 7: Ermittlung der Innovationsfelder, d.h. der relevanten Technologien durch eine Verflechtungsmatrix (Prinzipdarstellung).

ermittelten Produktkonzepte auf ihre Marktrobustheit hin untersucht werden. So zeigt die letzte Zeile, dass Produktszenario 4 zwar in den Umfeldszenarien II und III realisierbar ist – dafür im Marktszenario I aber große Risiken birgt.

Im letzten Schritt der Untersuchung wurden die relevanten Fertigungstechnologien ermittelt. Dies erfolgte, wie in Abbildung 7 dargestellt, durch Kombination der Schlüsseltechnologien mit den erstellten Produktszenarien.

Aus der Grafik lässt sich beispielsweise ablesen, dass sich Schlüsseltechnologie 5 (Patchworks) für das betrachtete Produktszenario I (Konventionelles Massenfahrzeug) besonders gut eignet, während Schlüsseltechnologie 2 (Faserverbundtechnologie) bezüglich des Szenarios nur ein geringes produktspezifisches Technologiepotential aufweist. Diejenigen Kombinationen von Schlüsseltechnologien und Produktszenarien, die über sehr hohe spezifische Technologiepotentiale verfügen, werden als Innovationsfelder bezeichnet.

Literatur

- [1] Berliner Kreis – Wissenschaftliches Forum für Produktentwicklung e.V.: Kurzbericht über die Untersuchung „Neue Wege zur Produktentwicklung“; 2. Auflage, 1998.
 [2] Gausemeier, J./Fink, A.: Führung im Wandel – ein ganzheitliches Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung; Carl Hanser Verlag, München, 1999.

[3] Gausemeier, J./Fink, A./Schlake, O.: Szenario-Management – Planen und Führen mit Szenarien; Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 1996.

[4] Hamel, G./Prahalad, C.K.: Wettlauf um die Zukunft – wie Sie mit bahnbrechenden Strategien die Kontrolle über Ihre Branche gewinnen und die Märkte von morgen schaffen; Wirtschaftsverlag Ueberreuter, 1995.



Dipl.-Wirt.-Ing. Andreas Kühn studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität Paderborn und ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich „Innovationsmanagement“ am Heinz Nixdorf Institut. Seine Arbeitsschwerpunkte sind strategische Produktplanung und Szenario-Management.



Dipl.-Ing. Bernd Riepe studierte Maschinenbau an der Universität Paderborn und ist Teamleiter im Bereich „Innovationsmanagement“ am Heinz Nixdorf Institut. Seine Arbeitsschwerpunkte sind strategische Produktplanung und Entwicklungsmethodik.

Schnelle Herstellung von Prototypen und Vorserien

Neue Möglichkeiten mit dem Vollformgießverfahren

Der schnellen Herstellung von Prototypen und Vorserien kommt eine wachsende Bedeutung bei der Bauteil- und Produktentwicklung zu. Durch das so genannte „Rapid Prototyping“ und das „Rapid Tooling“ eröffnen sich in der Anwendung des Vollformgießverfahrens neue Möglichkeiten im Sinne einer schnelleren Produktentwicklung.

Die Nutzung der Potenziale innovativer Technologien stellt einen wesentlichen Beitrag zur Sicherung von Industriestandorten dar. Zunehmender Kostendruck und verschärfte Umweltauflagen zwingen Fertigungsbetriebe zur Neuorientierung ihrer Marktstrategie und technologischen Ausrichtung. Auch die Gießereiindustrie unterliegt ökologischen und ökonomischen Anforderungen, die neue Verfahren ins Blickfeld rücken, zu denen auch die Vollformgießtechnik zu zählen ist.

Die Vorteile der Vollformgießtechnik beruhen auf der Verwendung von Schaumstoffmodellen, die in Formstoff eingebettet und durch zugeführte Metallschmelze zersetzt werden. Bei diesem Arbeitsgang wird der entstehende Hohlraum durch das Metall ersetzt, wobei die durch das Modell vorgegebene Kontur exakt nachgebildet wird. Durch die Herstellung und das anschließende Fügen mehrerer Modellsegmente werden hochkomplexe Geometrien realisiert, die anschließend in einem Arbeitsgang abgegossen werden können.

Durch den Einsatz der Vollformgießtechnik werden dem Anwender eine nahezu grenzenlose Gestaltungsfreiheit und eine endkonturnahe Fertigung von Gusswerkstücken ermöglicht. Insbesondere bei der Herstellung von hochkomplexen Bauteilstrukturen ist ein erhebliches Einsparpotential durch den Wegfall zusätzlicher Arbeitsschritte gegeben (Abbildungen 1 und 2). Darüber hinaus werden bei den meisten Verfahrensvarianten der



Abb. 1: Al-Kurbelgehäuse (Werkstoff: Alu, Hersteller: Incon Engineering CO. USA).



Prof. Dr.-Ing. Ortwin Hahn ist seit 1976 Professor für Werkstoff- und Fügetechnik im Fachbereich 10/Maschinentechnik der Universität Paderborn. Als Leiter des Laboratoriums für Werkstoff- und Fügetechnik sind seine Arbeitsgebiete die mechanische Fügetechnik, die Klebtechnik, die Hybridfügetechniken und die Vollformgießtechnik.



Dipl.-Ing. Michael Wappelhorst ist Leiter der Forschungsgruppe Vollformgießen am Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik. Seine Arbeitsgebiete sind die Vollformgießtechnik und die Entwicklung von wissensbasierten Systemen.

Vollformgießtechnik bindemittelfreie Formsande verwendet, wodurch auch ökologische Gesichtspunkte für den Einsatz dieser Technologie sowohl in klein- und mittelständischen Betrieben als auch in der Großserienfertigung sprechen.

Vollformgießen in bindemittelfreiem Formstoff

Anhand einer kurzen, schrittweisen Betrachtung soll das Vollformgießen, das im englischen Sprachraum auch als Lost Foam bezeichnet wird, nachfolgend näher beschrieben werden.

Die Fertigungsschritte des Vollformgießens lassen sich grob in die zwei Hauptbereiche Modellherstellung und Gießprozess unterteilen, die im Fachjargon als „weiße und schwarze Seite“ bezeichnet werden.

Die Modellherstellung als erster Schritt

Das Vorschäumen, Konditionieren und Fertigschäumen bilden die ersten Fertigungsschritte der Prozesskette Vollformgießen. Ausgangsmaterial hierfür sind expandierbare Kunststoffgranulate, die von der chemischen Industrie bereitgestellt werden. Für das Aluminium-Vollformgießen wird im Regelfall expandierbares Polystyrol (EPS) verwendet. Hierbei handelt es sich um Polystyrolpartikel mit einem Durchmesser von ca. 0,3 mm, die auf Grund eines eingelagerten Treibmittels bei Wärmezufuhr expandieren.

Beim ersten Fertigungsschritt der Modellherstellung, dem Vorschäumen, werden die EPS-Partikel erwärmt und auf ein Vielfaches ihres Ausgangsvolumens expandiert. Durch diesen Vorgang wird eine gleichmäßige, niedrige Dichte erzielt, die bei

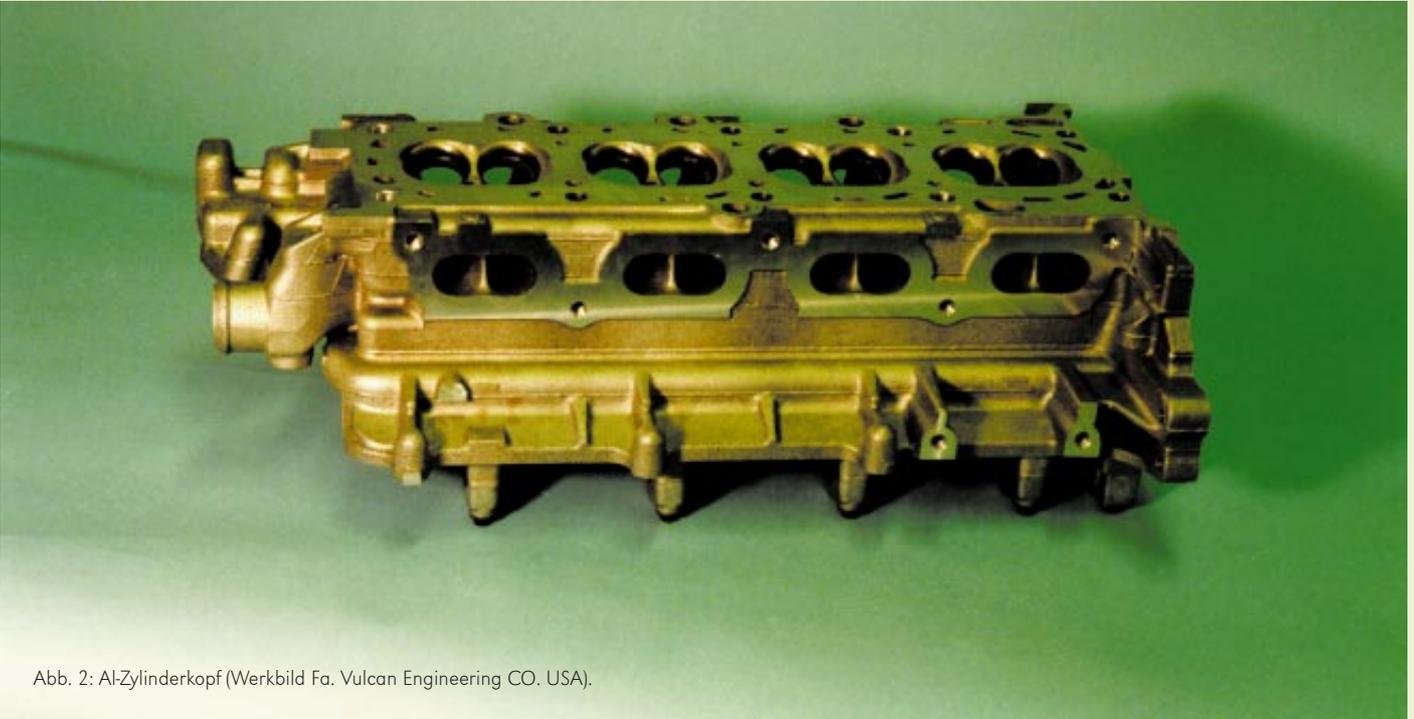


Abb. 2: Al-Zylinderkopf (Werkbild Fa. Vulcan Engineering CO. USA).

einer direkten Einbringung von Rohmaterial in den Fertigschäumprozess nicht realisierbar wäre. Das Vorschäumen wird in diskontinuierlich oder kontinuierlich arbeitenden Vorschäumautomaten durchgeführt, die im Regelfall aus senkrecht stehenden, zylindrischen Rührgefäßen bestehen und mit Wasserdampf durchströmt werden (Abbildung 3).

Nach dem Vorschäumen werden die Partikel in gut durchlüfteten Behältnissen gelagert. Hierbei kommt es zu Konzentrationsausgleichsvorgängen mit der Umgebungsluft. Dieser Fertigungsschritt wird als Konditionieren oder auch als Zwischenlagern bezeichnet.

Der formgebende Fertigungsschritt bei der EPS-Technik ist das Fertigschäumen, bei dem der Vorschaum zur endgültigen Geometrie verschweißt wird. Für das Fertigschäumen kommen im Regelfall Automaten zur Anwendung, deren Hauptbestandteil ein Schäumwerkzeug bestehend aus zwei Dampfkammern mit integrierten Formeinsätzen ist. Durch spezielle Düsen, die in den Formwänden angebracht sind, gelangt der Wasserdampf an das EPS. Die aktuell im Einsatz befindlichen Anlagen weisen entweder horizontale oder vertikale Werkzeugtrennebenen auf (Abbildung 4).

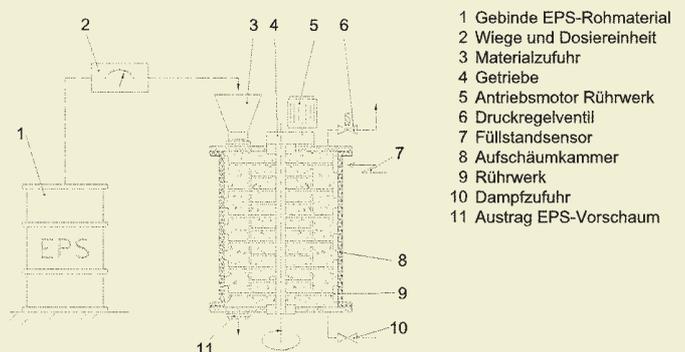
Je nach Komplexität der zu fertigenden Geometrie werden Modellsegmente hergestellt, die anschließend zum fertigen Gießmodell zusammengesetzt werden. Komplizierte Teile mit Hinterschnidungen und Hohlräumen können nicht in einem Arbeitsgang geschäumt werden; die einzeln gefertigten Modellsegmente muss man zu einem Gesamtmodell verbinden. In der Praxis gebräuchliche Fügeverfahren sind das Kleben, das Heizelementschweißen und das Stecken. Um die Effizienz des Gesamtprozesses zu erhöhen, werden mehrere Modelle zu einer Gießtraube verbunden und mit einem EPS-Angusssystem versehen.

Beim Gießprozess wird Sand benötigt

Die montierten Modelltrauben werden durch Tauchen in einer wasserlöslichen, keramischen Schlichte mit einer feuerfesten Schicht überzogen. Die entstehende Schichtstärke liegt beim Aluminium-Vollformgießen mit bindemittelfreiem Formstoff im

Bereich von einigen Zehntelmillimetern. Der Schlichteüberzug hat die Aufgabe, den Vergasungsverlauf des Modells und damit die Formfüllung zu steuern. Zudem bildet die Schlichteschicht eine Barriere zwischen dem Formstoff und dem fast ausschließlich flüssigen Bereich, der sich später zwischen dem noch festen EPS-Modell und der Metallschmelze aufbaut. Nach dem Trocknen der Schlichte ist die Beschichtung hart, aber gasdurchlässig. Die Trocknung der Modelltrauben kann bei Umgebungsluft oder in einem Trockenofen erfolgen. Eine ausreichende Trocknung der Schlichte ist Voraussetzung, um durch eine vorhandene Restfeuchtigkeit bedingte Gussfehler zu vermeiden.

Die trockene, geschichtete Modelltraube wird in einen Formbehälter eingesetzt und durch Berieselung in ungebundenem Quarzsand eingebettet. Das Umhüllen der Modelltraube und Verdichten des ungebundenen Sands stellen bei der Erzeugung der Form für das Vollformgießverfahren eine wichtige Verfahrensstufe dar. Von einer korrekten Durchführung dieses Prozessschritts wird maßgeblich die Gussstückqualität bestimmt. Die Formherstellung erfolgt dabei nach zwei Aspekten. Zunächst wird eine Modelltraube in einen Gießbehälter eingebracht und mit binderlosem, trockenem Quarzsand umhüllt. Ergänzend wird durch Vibration bei unterschiedlichen Frequenzen und einen eventuell zusätzlich an den Gießbehälter angelegten Unter-



- 1 Gebinde EPS-Rohmaterial
- 2 Wiege und Dosiereinheit
- 3 Materialzufuhr
- 4 Getriebe
- 5 Antriebsmotor Rührwerk
- 6 Druckregelventil
- 7 Füllstandsensor
- 8 Aufschäumkammer
- 9 Rührwerk
- 10 Dampfszufuhr
- 11 Austrag EPS-Vorschäum

Abb. 3: Schematische Darstellung eines diskontinuierlich arbeitenden Vorschäumautomaten.

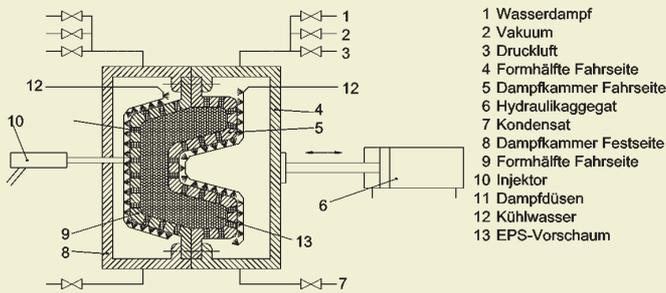


Abb. 4: Schematische Darstellung eines Fertigschäumautomaten mit vertikaler Trennebene.

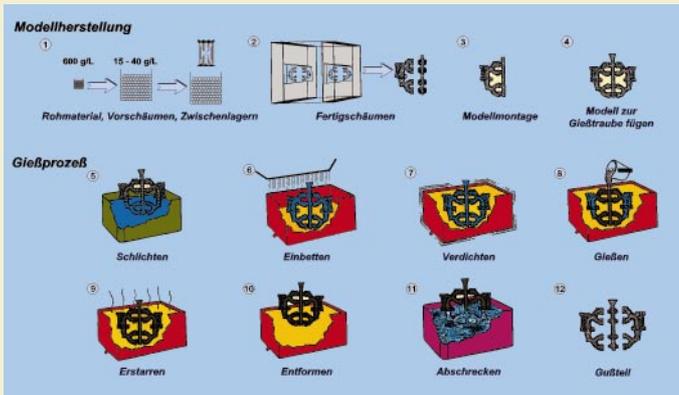


Abb. 5: Ablauf des Vollformgießens.

druck der Sand verdichtet. Der fließfähige Sand füllt dabei die Hohlräume der Modellelemente aus. Gute Verdichtungsergebnisse lassen sich durch Befüllung bei gleichzeitiger Verdichtung erzielen.

Beim Gießen wird die Metallschmelze über das Angussystem in die Schaumstoffmodelle geleitet. Dabei ersetzt das geschmolzene Metall das EPS-Material und bildet exakt die Modellgeometrie ab.

Nach Erstarren der Schmelze können die Gusstrauben durch Entleeren des Gießbehälters entformt und der Sand für die nachfolgende Einformung weiterer Trauben bereitgestellt werden. Nach einem Abschrecken der Gusstrauben und Abtrennen des Angussystems werden die Gussteile gereinigt. Für viele Anwendungsbeispiele der Technologie bedürfen die Gusswerkstücke keiner weiteren mechanischen Nachbearbeitung. Abbildung 5 zeigt im Überblick die Fertigungsschritte des Vollformgießens.

Potenziale des Vollformgießens hinsichtlich der Herstellung von Prototypen und Vorserien

Sinkende Produktlebenszeiten zwingen die Hersteller, in immer kürzeren Intervallen neue Produkte auf den Markt zu bringen. Somit sind für den Erfolg eines solchen Produktes nicht mehr nur Produktionskosten und Produktqualität allein entscheidend. Vielmehr gewinnt der Zeitpunkt der Markteinführung (time-to-market) zunehmend an Bedeutung. Während des Entwicklungsprozesses dienen Prototypen und Vorserien zur Überprüfung der Produktgestaltung und zur Auslegung der Fertigung für die spätere Serienproduktion.

Gute Möglichkeiten zur Herstellung von Prototypen oder Vorserien von Metallgussteilen ergeben sich bei Einsatz der Vollformgießtechnik auf Grund der Verwendung von Schaumstoffen als Modellwerkstoff. Schaumstoffgeometrien können als Einzelteil

durch spanabhebende bzw. ähnliche Fertigungsverfahren oder als Serienschäumteil mit Hilfe der Schäumtechnik (s.o.) hergestellt werden.

Schnelle Herstellung einzelner Modelle aus Hartschaumstoffblöcken

Die Herstellung von Modellen aus Schaumstoffblöcken kann beispielsweise durch Hochgeschwindigkeitsfräsen erfolgen. Nach der Erstellung von dreidimensionalen Daten für ein Fräsprogramm können entsprechend der zu fertigenden Gussteilgeometrie Schaumstoffmodelle bzw. Modellsegmente gefertigt werden. Auf diese Weise wird die zeit- und kostenintensive Fertigungszeit für ein Schäumwerkzeug eingespart. Darüber hinaus müssen die Schaumstoffe nach der Formgebung nicht getrocknet werden (Abbildung 6). Je nach Komplexität der Formen kann die Fertigung von Schaumstoffgeometrien und somit die Herstellung von gegossenen Prototypen in kürzester Zeit erfolgen.

Einsatz des Rapid Tooling für Schäumwerkzeuge

Die Formeinsätze für Schäumwerkzeuge werden im Allgemeinen aus Aluminiumlegierungen spanend gefertigt. Für die Bedampfung des EPS beim Fertigschäumvorgang werden Dampfdüsen in die Formwand, im Regelfall manuell, integriert. Gebräuchliche Düsenformen sind in Bohrungen eingepresste Düseneinsätze oder Feinbohrungen (Abbildung 7). Die Fertigungszeit für Formwerkzeuge ist daher kostenintensiv und zeitaufwendig. Die Lieferzeit für ein herkömmliches Schäumwerkzeug hingegen liegt erfahrungsgemäß bei 8 bis 10 Wochen.

Deutliche Verkürzungen der Herstellzeit von Schäumwerkzeugen sind durch die Verwendung von porösen Formstoffen gegeben.



Abb. 6: Aus Blockschaumstoff gefrästes Modell.

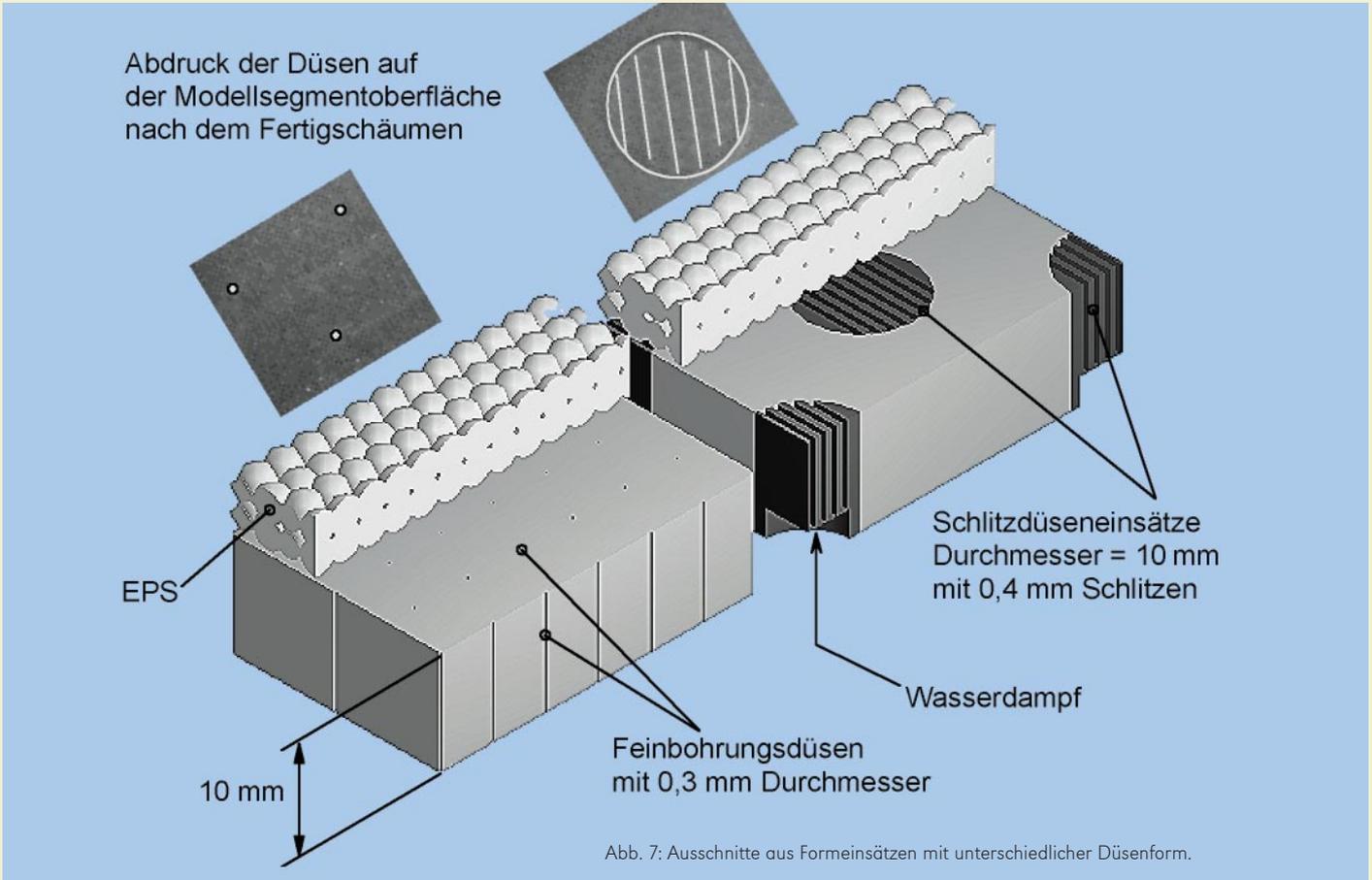


Abb. 7: Ausschnitte aus Formeinsätzen mit unterschiedlicher Düsenform.

Hierbei werden beispielsweise gesinterte Blockmaterialien verwendet, die zur Formgebung zwar spanend zu bearbeiten sind, auf Grund ihrer Porosität aber nicht mit Dampf Düsen ausgestattet werden müssen. Darüber hinaus können bei Bearbeitung dieser Werkstoffe höhere Schnittgeschwindigkeiten gefahren werden.

Als ein viel versprechendes Verfahren zur Verkürzung der Herstellzeiten von Schäumwerkzeugeinsätzen ist das so genannte „Selektive-Laser-Sintern (SLS)“ zu nennen. Mit diesem Verfahren können Bauteile oder Werkzeugformeinsätze direkt aus dem 3D-CAD-Modell hergestellt werden. Hierzu wird das Computermodell in einzelne Schichten zerlegt. Mit der SLS-Anlage wird das entsprechende Bauteil schichtweise aus einem Pulverwerkstoff aufgebaut, indem die Pulverschichten lokal mit einem Laserstrahl verfestigt werden (Abbildung 8).

Mit diesem Verfahren können Bauteile aus Edelstahl, Werkzeugstahl und Aluminium gefertigt werden, was das RP-Verfahren auch für das Lost-Foam-Gießen interessant macht. Je nach Größe der Bauteile dauert die Fertigungszeit nur wenige Stunden. Bei Verwendung des SLS-Verfahrens ergeben sich demnach erhebliche Verkürzungsmöglichkeiten. Abbildung 9 zeigt ein Bauteil, bei dem auf ein herkömmliches Aluminiumprofil eine Kontur mit Aluminiumpulver aufgesintert wurde.

Dampfdüsen können bei diesem Verfahren in einem Arbeitsgang integriert werden. Das bedeutet, dass manuelle Arbeiten vollständig entfallen können. Die unbearbeitete Oberfläche der Formeinsätze ist nicht glatt, wie es bei herkömmlichen Schäumwerkzeugen der Fall ist, sondern rau (Abbildung 9). Diese Kontur findet sich auf den Modellen und somit auch auf den Gussteilen wieder. Die erzielbare Oberflächenrauigkeit liegt aber im Größenbereich des herkömmlichen Sandgusses.

Zusammenfassung

Die Einzelfertigung von Polystyrolmodellen oder die direkte Bereitstellung geeigneter Formeinsätze für prototypische Schäumwerkzeuge zur Herstellung von EPS-Schaumteilen hat einen bedeutenden Einfluss auf die Entwicklungszeiten von neuen Gusswerkstücken. Dies trifft auch bei einer angestrebten Serienfertigung mit einem anderen Gießverfahren als dem Vollformgießen zu.

Da die Fertigungszeit für die Bereitstellung prototypischer Formeinsätze zur Herstellung von EPS-Modellen für die Voll-

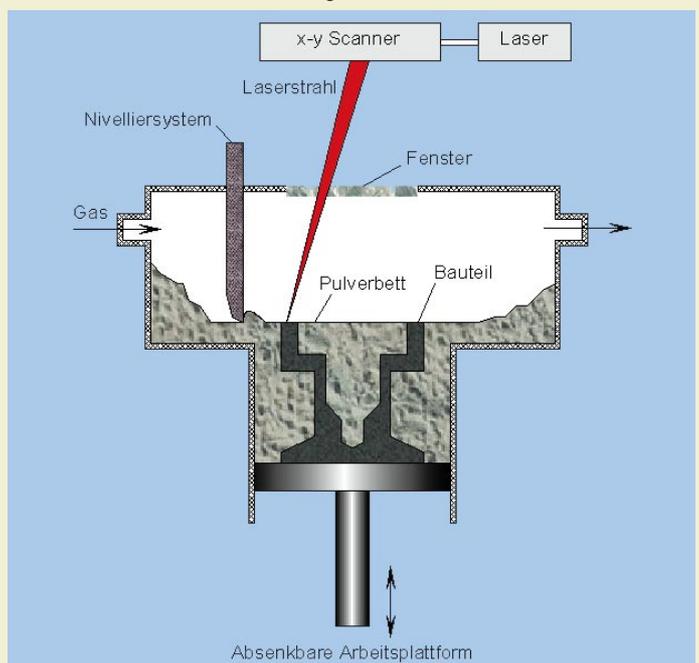


Abb. 8: Funktionsprinzip des Selektiven-Laser-Sinterns (SLS).

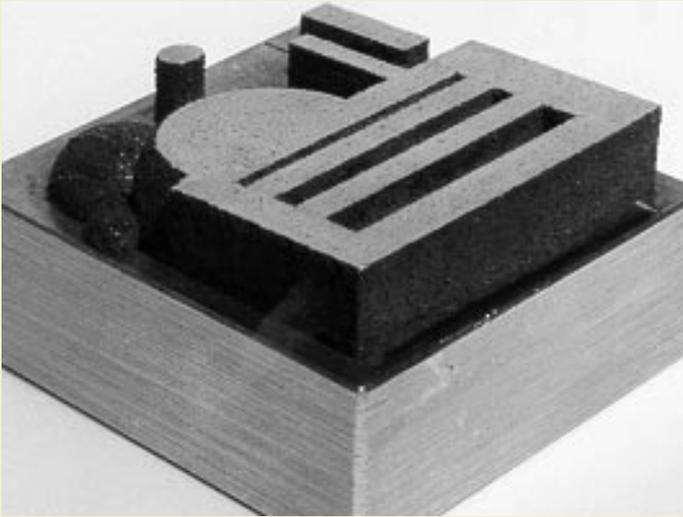


Abb. 9: Probegeometrie mit einer SLS-gesinterten Aluminiumkontur (Fertigungszeit: 2 Stunden).

formgießtechnik nur wenige Tage umfasst, ergibt sich gegenüber der konventionellen Werkzeugherstellung ein erheblicher Zeitvorteil, was für eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung durch die direkte Kosteneinsparung bei der Werkzeugherstellung in verstärktem Maße gilt.

Durch die schnelle Herstellung von Polystyrolmodellen für die Vollformgießtechnik ergeben sich für die Gießereitechnik bisher unerschlossene Perspektiven. Die Gießereibetriebe können auf Kundenwünsche mit einer schnellen und kostengünstigen Bereitstellung technischer Prototypen reagieren, was für diese Branche als ein Novum zu bewerten ist. So können in Zukunft auch solche Prototypen sehr schnell gießtechnisch produziert werden, die auf Grund des Zeitfaktors bisher nur in aufwendiger Weise mit anderen Fertigungsverfahren oder durch Kombination mehrerer Techniken hergestellt werden konnten.

Kleine Lautsprecher – großer Klang

Modellierung und Reduktion des nichtlinearen Verhaltens von Lautsprechern

Die gängigsten elektroakustischen Wandler arbeiten auch heute noch nach dem elektrodynamischen Prinzip, das bereits in den 20er-Jahren in der Lautsprechertechnik eingesetzt wurde. Trotz herausragender Verbesserungen bei der material- und produktionstechnischen Umsetzung dieses Konzepts konnten seine prinzipbedingten Schwächen nicht völlig beseitigt werden, so dass der elektrodynamische Lautsprecher nach wie vor das schwächste Glied in der elektroakustischen Übertragungskette darstellt.

Bei Betrachtung des Querschnitts (Abbildung 1) durch einen elektrodynamischen Lautsprecher lässt sich als ein wesentliches Bauteil die Membran (1) erkennen, die über die von außen sichtbare Sicke (2) und die weiter innenliegende Zentrierung (3) an einem Lautsprecherkorb (4) mechanisch aufgehängt ist. Die auf einem mit der Membran verbundenen Träger (5) gewickelte Schwingspule wird mit Hilfe der Zentrierung im Luftspalt eines Magnetsystems (6), (7) positioniert, welches seinerseits starr mit dem Lautsprecherkorb gekoppelt ist. Über die Anschlussklem-



Dipl.-Ing. Joachim Waßmuth ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Nachrichtentheorie des Fachbereichs Elektrotechnik und Informationstechnik. Er arbeitet auf den Gebieten der digitalen Audio-signalverarbeitung und der digitalen Nachbildung nichtlinearer Systeme.

men kann eine Spannung an die Schwingspule gelegt werden. Auf Grund des resultierenden Stromflusses wirkt eine Lorentz-Kraft auf den im Magnetfeld befindlichen Teil der Spule, so dass sich eine Auslenkung in axialer Richtung ergibt. Die Membranbewegung versetzt die angekoppelte Luft in Schwingungen und

der entstehende Schall(wechsel)druck kann vom Ohr wahrgenommen werden. Für die abgestrahlte Schallleistung P gilt bei Anregung mit einem Sinussignal der Frequenz f näherungsweise die Proportionalität

$$P \sim (h d^2 f^2)^2,$$

wenn die Membran mit dem Durchmesser d die maximale Auslenkung, also den Membranhub h , erfährt. Bei niedrigen Frequenzen steigt also der erforderliche Membranhub stark an. Wird etwa die Frequenz des Sinussignals um eine Oktave abgesenkt, so muss zur Erreichung der gleichen Schallleistung der Hub um den Faktor 4 zunehmen. Des Weiteren wird deutlich, dass eine Verkleinerung des Membrandurchmessers auch immer eine Auslenkungszunahme zur

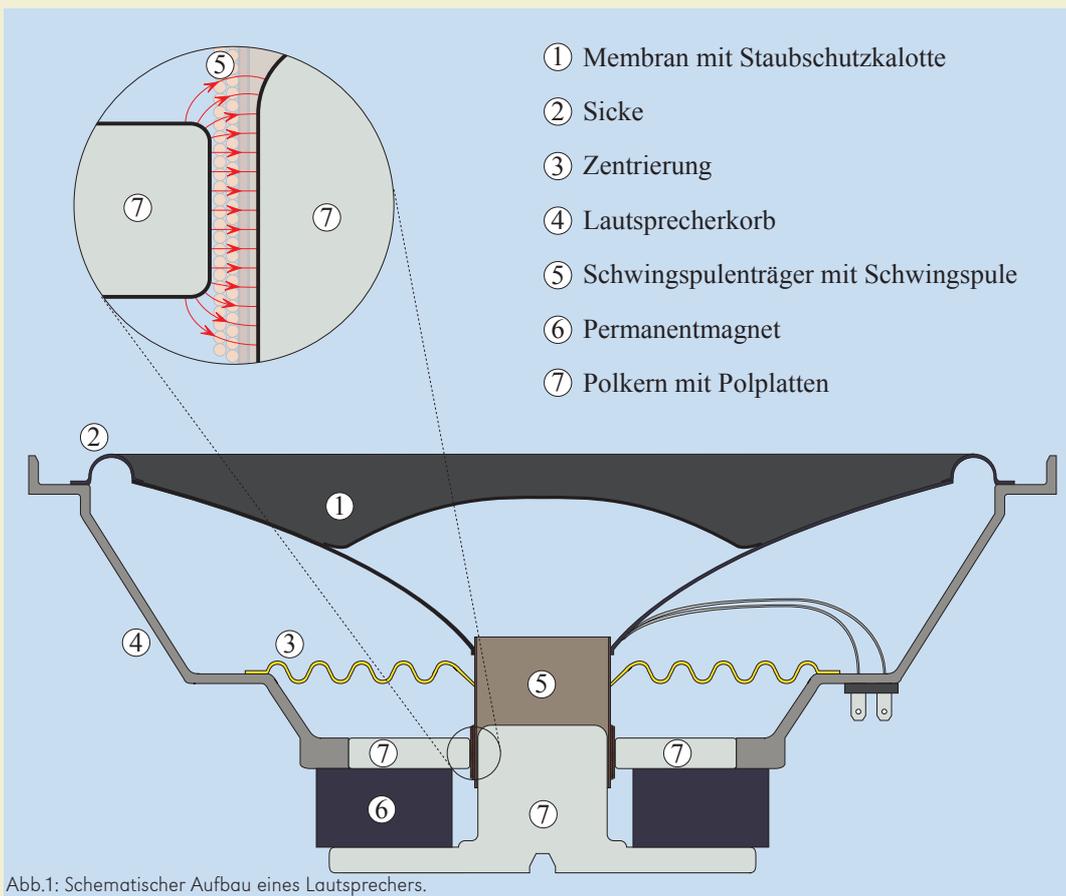


Abb.1: Schematischer Aufbau eines Lautsprechers.

Folge hat, wenn derselbe Schalldruck erzeugt werden soll. Reduziert man also etwa den Durchmesser um die Hälfte, so muss sich der Membranhub für den gleichen Schalldruck vervierfachen. Bei vielen Anwendungen ist man allerdings bestrebt oder gezwungen, geringe geometrische Abmessungen für Lautsprecher und Gehäuse einzuhalten. Im Hi-Fi-Bereich ist man teilweise bestrebt, zur Verringerung von Gehäuseresonanzen und zwecks eines günstigeren Abstrahlverhaltens Gehäuse mit geringen Abmessungen zu entwerfen. In anderen Bereichen, wie z.B. im Kraftfahrzeug oder bei PC-Lautsprechern, sind kleine Abmessungen unerlässlich. Andererseits hat auf all diesen Gebieten auf Grund ständig sinkender Preise und ständig steigender Rechenleistung die digitale Signalverarbeitung Einzug gehalten, zumal die zu verarbeitenden Signale immer häufiger bereits digital vorliegen. Diese Tatsache eröffnet vielfältige Möglichkeiten, auch auf das schwächste Glied der elektroakustischen Übertragungskette, den Lautsprecher, Einfluss zu nehmen.

Nichtlineare Effekte bei Lautsprechern

Wird ein Lautsprecher am niederfrequenten Ende des ihm zugeordneten Übertragungsbereichs betrieben, so ergibt sich grundsätzlich eine Auslenkungszunahme mit sinkender Frequenz. Reduziert man zusätzlich den Membrandurchmesser, kann der gleiche Schalldruck nur mit einer zusätzlichen Auslenkungszunahme erzielt werden. Aus diesem Grunde werden für Subwoofer-Konzepte mit geringen Gehäuseabmessungen häufig Lautsprecher verwendet, die einen besonders großen Hub zulassen. Bei großen Auslenkungen wird aber der eigentlich nichtlineare Charakter der Lautsprecher besonders deutlich. Im Einzelnen haben sich dabei drei wesentliche Faktoren als Ursachen für nichtlineare Verzerrungen herausgestellt:

- Zum einen übt die aus Sicke und Zentrierung bestehende Aufhängung mit zunehmender Auslenkung eine überproportional zunehmende Rückstellkraft auf die Membran aus, woraus sich ein nichtlineares Kraft-Weggesetz ergibt. Dieser Effekt wird durch die in einem Lautsprechergehäuse geringen Volumens eingeschlossene Luft noch verstärkt.
- Des Weiteren lässt sich feststellen, dass das Magnetfeld im Luftspalt nicht als homogen angesehen werden kann. Als Folge ergibt sich ein Abfall des so genannten Kraftkoppelungsfaktors als Verhältnis der Kraft auf die Schwingspule zum Schwingspulenstrom, d.h. für große Auslenkungen nimmt bei gleichem Schwingspulenstrom die Kraft auf die Spule ab.
- Für Verzerrungen bei höheren Frequenzen kann die sich verändernde Induktivität der Schwingspule verantwortlich gemacht werden. Da sich die Spule auf dem Polkern des Magnetsystems bewegt, vermindert sich diese Induktivität, wenn sich die Spule teilweise aus dem Luftspalt herausbewegt.

Einige der vorgenannten Eigenschaften haben allerdings auch einen Schutzcharakter, da sie den Lautsprecher bei allzugroßen Spannungspegeln vor seiner Selbstzerstörung bewahren. Darüber hinaus sind natürlich noch weitere nichtlineare Effekte wirksam (wie z.B. Doppler-Verzerrungen), die jedoch von untergeordneter Bedeutung sind.

Modellierung des Lautsprecherverhaltens

Bei der Entwicklung elektroakustischer Übertragungssysteme ist es wichtig, sowohl das lineare als auch das nichtlineare Übertragungsverhalten des elektroakustischen Wandlers, also des Lautsprechers, zu kennen und es auch modellieren zu können. Zum einen ist diese Modellierung notwendig, um in der Entwurfsphase den Einfluss bestimmter Bauteilparameter simulativ überprüfen zu können. Zum anderen ergibt sich eine weitere Anwendung im Bereich der Echokompensation, wie sie beispielsweise bei Freisprecheinrichtungen oder bei der Sprachsteuerung im Kfz benötigt wird. Hier wird eine effektive Kompensation durch die Verwendung eines rein linearen Lautsprechermodells erschwert. Außerdem kann das Übertragungsverhalten bestehender Lautsprechersysteme nachträglich durch eine Digitalfilterung oder wie im vorliegenden Fall durch eine Vorverzerrung des Ansteuersignals sowohl im Hinblick auf seinen linearen als auch nichtlinearen Charakter verbessert werden. Hier dient insbesondere eine digitale Implementierung des Modells häufig als Zustandsbeobachter. Allen Anwendungen gemeinsam ist der Anspruch an das Modell, den realen Lautsprecher möglichst genau nachzubilden. Nach Festlegung des Modells stellt sich dann das Problem, die für das Modell benötigten Parameter (wie z.B. den Kraftfaktor oder die Steifigkeit) durch Messungen an einem realen Lautsprecher zu gewinnen. Für die vorliegende Anwendung wurde ein äquivalentes elektrisches Netzwerk als Lautsprechermodell entwickelt, in dem die nichtlineare Verzerrungen verursachenden Auslenkungs- und Stromabhängigkeiten mit sogenannten Übertragern nachgebildet werden. Hierdurch lässt sich zeigen, dass das Modell sich „passiv“ verhält, d.h., dass die im Modell gespeicherte Energie niemals größer als die von außen über die elektrischen Klemmen zugeführte Energie werden kann, eine Eigenschaft, die auch der reale Lautsprecher besitzt. Basierend auf diesem Netzwerkmodell wurde ein digitales Modell, ein Wellendigitalmodell, für den Lautsprecher entwickelt. Damit lässt sich zu äquidistanten Zeitpunkten (so liegen auch die von einem CD-Spieler stammenden Musikdaten vor) das Lautsprecherverhalten für ein gegebenes Eingangssignal berechnen. Dies kann entweder simulativ auf einem Universalrechner erfolgen oder aber auch in Echtzeit auf einem Digitalen Signalprozessor (DSP). Damit ist es möglich, zu jedem Zeitpunkt zu ermitteln, welcher Strom durch die Schwingspule fließt, an welchem Ort sich die Membran befindet und mit welcher Geschwindigkeit und Beschleunigung sie sich bewegt. Diese Größen brauchen damit nicht messtechnisch am Lautsprecher erfasst zu werden, was einen hohen messtechnischen Aufwand in Form von Beschleunigungsaufnehmern, Lasermessgeräten o.Ä. bedeuten würde. Erwähnenswert ist auch, dass sich der entwickelte zeitdiskrete Algorithmus ebenfalls „passiv“ verhält, wodurch sich eine numerische Robustheit des Verfahrens garantieren lässt. Diese Robustheit wird auch dann nicht gefährdet, wenn wie im vorliegenden Fall die Parameter zur Berücksichtigung der Auslenkungsabhängigkeiten verändert werden müssen. Aus diesem Grunde kann das entwickelte Modell auch adaptiv betrieben werden, was zur Bestimmung der Modellparameter genutzt wird. Hier konnte insbesondere ein Verfahren entwickelt werden, durch das mit Hilfe einer einfachen Schwingspulenstrommessung die notwendigen Parameter geschätzt werden. Bei bisherigen Verfahren musste hierfür mindestens noch eine Größe

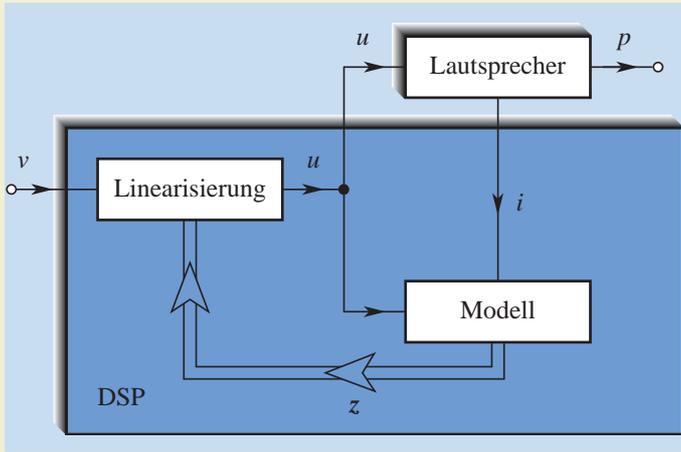


Abb. 2: Das Kompensationsprinzip.

auf der mechanischen bzw. akustischen Seite wie die Membranbeschleunigung oder der Schalldruck bestimmt werden. Damit eignet sich das entwickelte Verfahren günstigerweise dazu, auf einfache Art die Parameter einzelner Lautsprecher zu bestimmen. Es hat sich nämlich gezeigt, dass diese Parameter selbst bei gleichen Exemplaren einer Baureihe produktionstechnisch bedingten Streuungen unterworfen sind. Darüber hinaus verändern sich einige Parameter auch durch Alterung, Temperatureinfluss und Einbau.

Reduktion der nichtlinearen Effekte

Um die nichtlinearen Verzerrungen der Lautsprecher zu reduzieren, sind bereits einige Konzepte entwickelt worden, die über konstruktionstechnische Veränderungen (spezielle Magnetkreise,

Kurzschlussringe) hinausgehen. Diese Konzepte sehen aber (neben z.T. zusätzlichen Sensoren) einen erhöhten elektrischen Schaltungsaufwand vor. Erst im letzten Jahrzehnt wurden Kompensationsverfahren entwickelt, die auf einer digitalen Signalvorverarbeitung des Ansteuersignals beruhen. Im vorliegenden Fall wurde zur Reduktion der Verzerrungen das aus der nichtlinearen Regelungstechnik bekannte Verfahren der „Exakten Linearisierung“ auf das System bestehend aus Lautsprecher und Leistungsverstärker angewandt. Mit diesem Verfahren ist es möglich, durch eine Zustandsrückkopplung dem entstehenden Gesamtsystem eine lineare Eingangs-Ausgangsdynamik aufzuprägen. Die sich ergebende lineare Eingangs-Ausgangsdynamik kann dabei zusätzlich derart verändert werden, dass der Übertragungsbereich zu tiefen Frequenzen hin erweitert wird, wie es etwa auch mit dem bekannten Motional-Feedback-Verfahren ermöglicht wurde. Der Systemzustand, der durch die Größen Schwingpulenstrom, Membranauslenkung und -geschwindigkeit charakterisiert wird, kann dabei mit Hilfe des oben beschriebenen Modells zur Laufzeit berechnet werden, so dass sich eine messtechnische Bestimmung dieser Größen erübrigt. Das gesamte Verfahren (Bestimmung des Systemzustandes durch Lautsprechersimulation und Berechnung des sich aus der Zustandsrückkopplung ergebenden Ansteuersignals) läuft somit als Programm auf einem DSP (Abbildung 2). Diesem wird das eigentliche Signal v (beispielsweise das Musiksignal) zugeführt, um daraus das neue Ansteuersignal u zur Linearisierung zu berechnen. Zur Parameterbestimmung kann dabei der gemessene Schwingpulenstrom i genutzt werden. Würde nur die Membranbeschleunigung zur Rückkopplung genutzt, so ließe sich eine digitale Version des Motional Feedback als Spezialfall des hier vorgestellten Verfahrens erzielen.

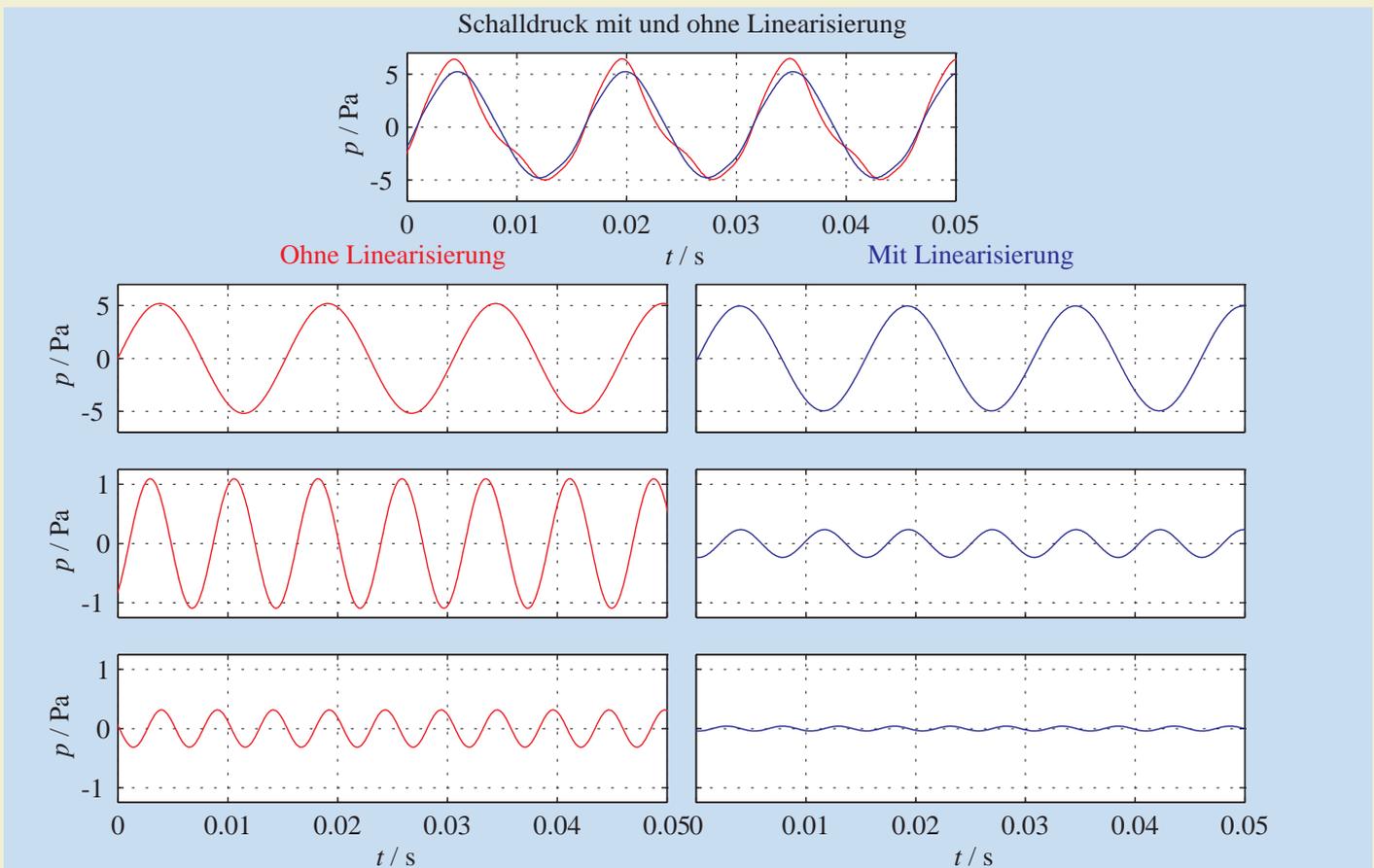


Abb. 3: Schalldruckverlauf mit und ohne Linearisierung bei 65,4 Hz, Aufteilung in das Signal bei der Erregungsfrequenz (zweite Zeile), der doppelten (dritte Zeile) und der dreifachen Frequenz (vierte Zeile).

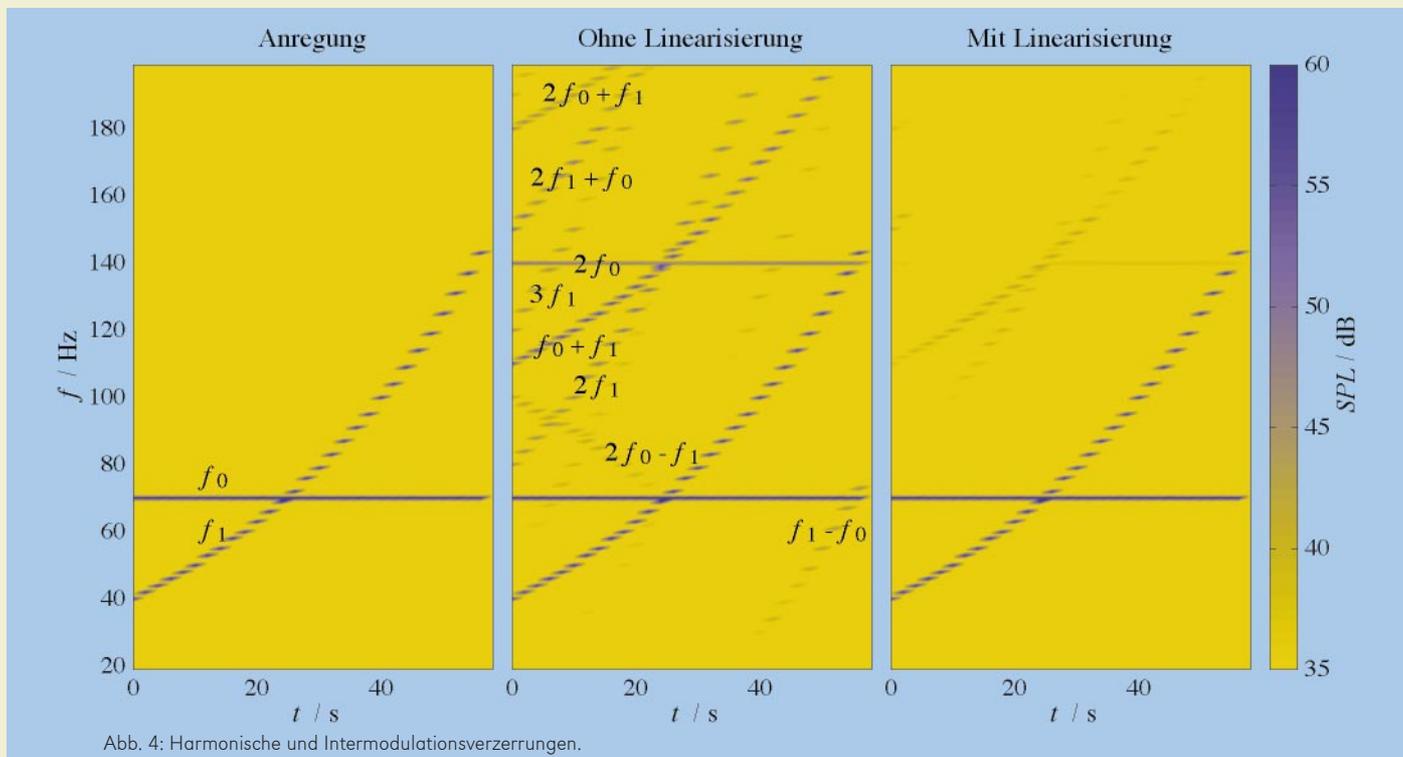


Abb. 4: Harmonische und Intermodulationsverzerrungen.

Leistungsfähigkeit des Verfahrens

Um die tatsächliche Wirkung der Linearisierung abschätzen zu können, sollen zunächst die Auswirkungen der auftretenden nichtlinearen Effekte erläutert werden. Bekanntermaßen setzt sich Musik aus einzelnen Tönen zusammen, wobei ein Ton wiederum als eine Überlagerung von Schwingungen, dem sogenannten Grundton und den zugehörigen Obertönen, dargestellt werden kann. Gerade das Verhältnis von Grundton und Obertönen zueinander bestimmt den Eindruck der Klangfarbe eines Instruments. Eine Auswirkung der nichtlinearen Effekte ist aber das Auftreten von harmonischen Oberschwingungen. Wird ein Lautsprecher an der unteren Grenze seines Übertragungsbereichs mit einem reinen Sinuston von 65,4 Hz (zur Orientierung: Kammerton a¹ liegt bei 440 Hz, das c¹ bei 261,6 Hz und somit entspricht dieser Ton dem C) erregt, so ist in der Form des entstehenden Schalldrucksignals (Abbildung 3, rote Verläufe) diese Sinusschwingung zunächst nicht direkt wieder zu erkennen. Eine harmonische Analyse dieses Signals, also eine Zerlegung in die Grundschwingung und in ganzzahlige Vielfache der Frequenz dieser Grundschwingung, zeigt, dass der Schalldruck neben der Grundschwingung noch beträchtliche Oberwellenteile bei der doppelten und dreifachen Frequenz hat, die im Anregungssignal ursprünglich nicht vorhanden waren und aus dem nichtlinearen Verhalten des Lautsprechers resultieren. Der Lautsprecher mischt dem eigentlichen Signal also nicht vorhandene Oberwellenteile bei, die dem Ohr nicht notwendigerweise sofort unangenehm auffallen müssen, da natürliche Klänge wie erwähnt ohnehin sehr obertonreich sind. Allerdings werden diese Obertöne durch das nichtlineare Verhalten angehoben oder abgesenkt, insgesamt also die Klangfarbe verändert, was einer naturgetreuen Wiedergabe des Klanges widerspricht. Mit Hilfe des erläuterten Linearisierungsverfahrens kommt der tatsächliche Schalldruck (Abbildung 3, blaue Verläufe) dem anregenden Sinussignal schon wesentlich näher. Nachvollziehen lässt sich dieser Effekt auch durch die harmonische Analyse, bei der

deutlich wird, dass die Oberwellenteile zwar nicht beseitigt aber doch wesentlich abgeschwächt werden. Wesentlich störender als die beschriebenen harmonischen Verzerrungen sind die Intermodulationsverzerrungen, die bei Anregung mit mehreren Sinustönen (wie sie beispielsweise bei Zweiklängen vorkommen) auftreten. In Abbildung 4 ist der Schalldruckpegel über einen Zeitraum von einer Minute wiedergegeben, bei der die Anregung aus zwei Sinustönen besteht, von denen der Erste die konstante Frequenz $f_0 = 70$ Hz besitzt. Der zweite Sinuston besitzt für je zwei Sekunden eine feste Frequenz, die von $f_1 = 40$ Hz bis $f_1 = 143$ Hz nach jeweils zwei Sekunden angehoben wird. Der dargestellte Schalldruckpegel ist dabei umso höher (und damit der Ton umso lauter), je „blauer“ die vorhandenen Signalanteile erscheinen (siehe Farbskala rechts). Während in der linken Abbildung die Anregung und damit die gewollten Signalanteile dargestellt sind, findet man in der mittleren Abbildung zahlreiche zusätzliche Signalanteile im Schalldruck. Zum einen findet man die schon oben erwähnten Harmonischen ($2f_0, 2f_1, 3f_1$); noch stärker tritt jedoch ein Anteil bei der Summe der beiden Anregungsfrequenzen ($f_0 + f_1$) hervor. Diese sog. Intermodulationsverzerrung (so werden die Anteile bei Summen und Differenzen der beiden Frequenzen und deren ganzzahligen Vielfachen genannt) kann demnach als ein nicht im Anregungssignal vorhandener Störtön interpretiert und als solcher auch deutlich wahrgenommen werden, da er nur geringfügig leiser als das Nutzsinal ist. Deutlich zu erkennen sind aber auch weitere Intermodulationsverzerrungen, die allesamt als Störtöne betrachtet werden können und besonders dann gut hörbar sind, wenn die sich ergebenden Intervalle dissonant sind. Mit Hilfe der Linearisierung lassen sich drastische Absenkungen beider Verzerrungsarten erzielen, wie die rechte Grafik in Abbildung 4 erkennen lässt.

Die hier vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen eines von der Blaupunkt-Werke GmbH geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojektes.

Literatur

M. Zollner, E. Zwicker: Elektroakustik, Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 1993.

W. Klippel: „The mirror filter – a new basis for reducing nonlinear distortion and equalizing response in woofer systems“, Journal of the Audio Engineering Society, Bd. 40, Nr. 9, September 1992, S. 675-691.

A. Fettweis: „Wave digital filters: Theory and Practice“, Proc. of the IEEE, Bd. 74, Nr. 2, Februar 1986, S. 270-327.

A. Isidori: Nonlinear control systems, Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 1995.

J.A. Klaassen, S.H. de Koning: „Motional feedback with loudspeakers“, Philips Technical Review, Bd. 9, Nr. 5, 1968, S. 148-157.

Symbiose von Hardware und Software

Beispiel eines gelungenen Transfers von Grundlagenforschung in die industrielle Praxis

Ungebremster Fortschritt in der Miniaturisierung elektronischer Schaltungen erlaubt es uns, ganze Systeme mit mehreren Millionen Elementarfunktionen auf einer Fläche in der Größenordnung eines Fingernagels zu integrieren. Der Mensch kann als Entwerfer diese Komplexität nicht beherrschen und benötigt daher zunehmend die Unterstützung von Computerwerkzeugen (CAD – engl. computer-aided design), die den Entwurfsprozess automatisieren. Unglücklicherweise klappt die Schere zwischen der Komplexität von Systemen, die technologisch möglich sind, und dem, was heutige Werkzeuge zu leisten vermögen, in zunehmendem Maße auseinander. Unter dem Schlagwort Hardware/Software-Codesign [1] verbirgt sich das heutige Bestreben, dem Entwurf ganzer Systeme mit Hilfe von CAD-Werkzeugen Herr zu werden. Nach Erläuterung der zentralen Problemstellungen dieses neuen Forschungsgebiets stellen wir einen im Arbeitsgebiet Datentechnik entwickelten Ansatz zur so genannten Hardware/Software-Partitionierung [2] vor. In dieser Fragestellung geht es darum, recht früh im Entwurfsstadium zu entscheiden, ob und welche Teile eines Systems in Hardware und welche in Software realisiert werden sollen. Zur Exploration des Entwurfsraumes möglicher Realisierungen dient ein Evolutionärer Algorithmus.

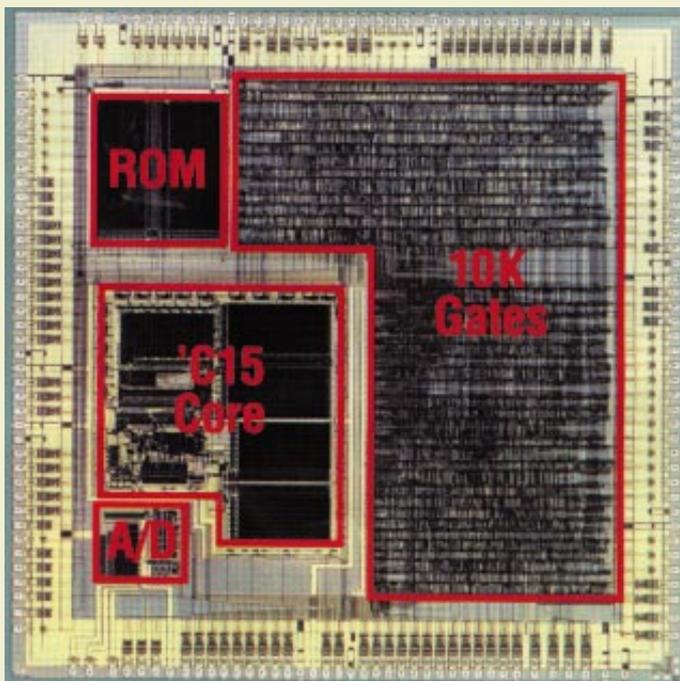
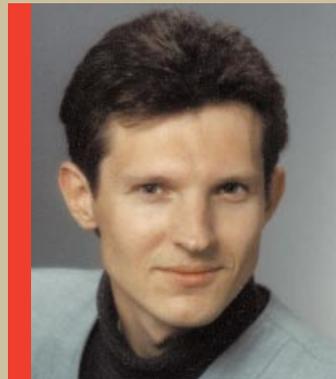


Abb. 1: Physikalische Sicht einer Ein-Chip-Realisierung eines Hardware/Software-Systems. Quelle: Texas Instruments, cDSP.



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Teich ist seit 1998 Professor für Datentechnik im Fachbereich 14/Elektrotechnik der Universität Paderborn. Forschungsschwerpunkte sind der Systementwurf, CAD-Verfahren und massive Parallelität.

Was ist Hardware/Software-Codesign?

Wir betrachten den automatisierten Entwurf und die Optimierung komplexer digitaler Systeme, die aus Hardware- und Softwarekomponenten bestehen, so genannte Hardware/Software-Systeme [1]. Obwohl solche Systeme bereits seit vielen Jahren von Ingenieuren und Technikern konzipiert und gebaut werden, ist man sich heutzutage darüber einig, dass man nur durch den Einsatz rechnergestützter Entwurfsmethoden (engl. computer-aided design) die Komplexität moderner Systeme bewältigen kann und bessere Entwürfe in kürzerer Zeit möglich werden. Dies erklärt das wachsende Interesse der Industrie und der Forschung an rechnergestützten Entwurfsmethoden.

Die Komplexität, so wie sie hier verstanden wird, entsteht nicht nur durch die Anzahl der Einzelkomponenten, aus denen ein System zusammengesetzt ist, sondern vor allem durch Heterogenität. In Zukunft liegen die Anforderungen gerade bei der Beherrschung heterogener technischer Systeme, die sich durch verschiedenartige Komponenten und Interaktionen auszeichnen und die für einen ganz bestimmten Anwendungsbereich zugeschnitten sind. Dazu zählen beispielsweise die Bereiche Medizintechnik, Prozess- und Industriesteuerungen, Digitale Netzwerke, Telekommunikation und Digitale Signal- und Bildverarbeitung. Diese Systeme sind in einen technischen Kontext eingebettet, weshalb man auch von eingebetteten Systemen spricht. Neben dem Heterogenitätsaspekt Hardware/Software treten hier die Aspekte mechanisch/elektrisch (Sensoren, Aktoren) und analog/digital auf.

Abbildung 1 zeigt ein typisches heterogenes Hardware/Software-System, das auf einem einzigen Chip untergebracht ist. Das System besteht aus einem Digitalen Signalprozessor (DSP, C15 Core), anwendungsspezifischer Hardware (10K Gates) und Peripherie, u.a. einem Analog/Digital- (A/D-) Wandler und Speicher (ROM).

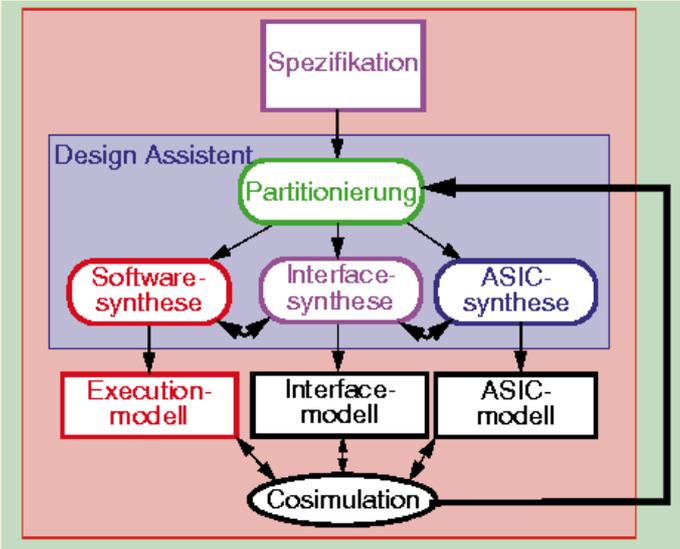


Abb. 2: Typischer Entwurfsablauf von HW/SW-Systemen.

Marktstudien prognostizieren eingebetteten Systemen höhere Wachstumsraten als dem klassischen Computerbereich. Weiterhin repräsentiert gemäß VDE [3] der Bereich Automobil-, Konsum- und Industrieelektronik, sowie Telekommunikation 1997 in Deutschland einen Anteil von 71 Prozent am Markt mikroelektronischer Systeme gegenüber gerade einmal 29 Prozent für den klassischen Computerbereich.

Welche Problemstellungen ergeben sich?

Die Silbe CO im Wort Codesign (deutsch: Co-Entwurf) erlaubt zahlreiche Interpretationen, die zusammen gesehen die wichtigsten Problemstellungen dieses Forschungsgebietes beschreiben:

- COmplexity (Systemkomplexität).
- Wie bereits erwähnt, zeichnet sich die Komplexität hier vor allem durch die Heterogenität der betrachteten Komponenten aus.
- COncurrent Design.
- Hardware/Software-Codesign nutzt die Synergie von Hardware und Software durch ihren gemeinsamen Entwurf aus.
- CO-specification (Systemspezifikation).
- Eine für den Entwurf wichtige Frage besteht darin, ob man das zu entwerfende System in einer einzigen Sprache (bzw. Formalis-

mus) beschreibt oder mehrere Formalismen einsetzt. Beide Paradigmen haben sowohl Vor- als auch Nachteile.

- CO-synthesis.
- Hierunter versteht man das gemeinsame Synthetisieren von Hardware und Software, wobei das Problem der Entwurfsraumexploration von gemischten Lösungsformen sowie die Optimierung bestimmter Systemeigenschaften im Vordergrund stehen.

- Correctness.
- Aufgrund der Heterogenität der Komponenten ist die Validierung eines Entwurfs auf Korrektheit (Simulation, Verifikation) schwierig, da existierende Werkzeuge entweder nur auf Hardware- oder Softwarebereiche zugeschnitten sind. Die Kopplung von Simulatoren und das Beweisen von Systemeigenschaften hängen stark mit der Suche nach geeigneten Spezifikationsformalismen zusammen.

- CO-ordination.
- Schließlich zielt man im Bereich des Hardware/Software-Codesign auf eine Automatisierung der Entwurfsabläufe. Dazu gehört die Kopplung existierender Werkzeuge, die Verwaltung von Versionen sowie die Möglichkeit, den Entwurfsprozess über grafische Benutzeroberflächen zu steuern.

Optimale Hardware/Software-Partitionierung ist notwendig

Auf der Systemebene besteht eine zentrale Aufgabe darin, eine Aufteilung der Funktionalität in Hardware- und Softwarekomponenten vorzunehmen (sog. Hardware/Software-Partitionierung), siehe auch Abbildung 2. Dazu stellen wir ein praktisches Beispiel vor:

In digitalen Video-Anwendungen ist es oft nötig, die geforderten Übertragungsbandbreiten durch eine geeignete Datenkompression zu reduzieren. Unser gewähltes Beispiel ist ein so genannter Hybrid-Kodierer, bei dem der Kompressionsfaktor der Bildkodierung durch ein prädiktives Schema für Bildfolgen verbessert wird. Ein Block innerhalb eines Bildes wird aus einem Block innerhalb des vorangegangenen Bildes geschätzt. Abbildung 3 zeigt eine Darstellung eines solchen Hybrid-Kodierers als Blockdiagramm.

Aus der nun folgenden Beschreibung wird deutlich, dass die einzelnen Blöcke der Darstellung komplexe Teiloperationen beschreiben und die Kommunikation mittels komplexer Daten-

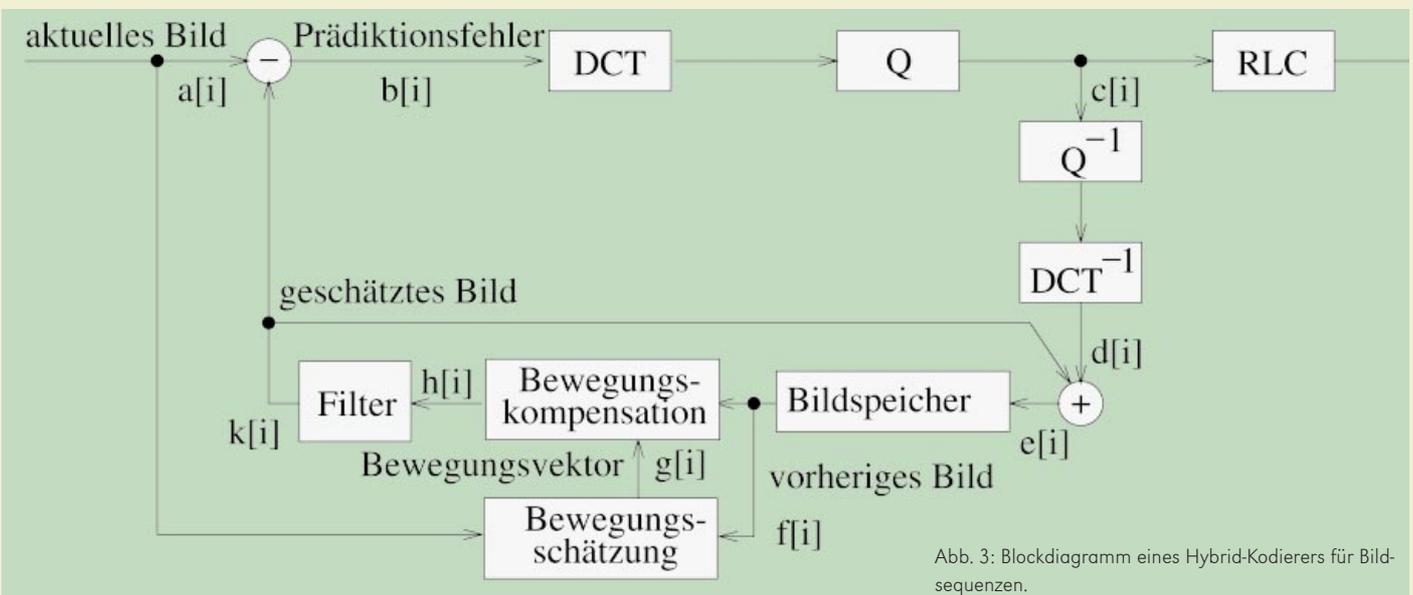


Abb. 3: Blockdiagramm eines Hybrid-Kodierers für Bildsequenzen.

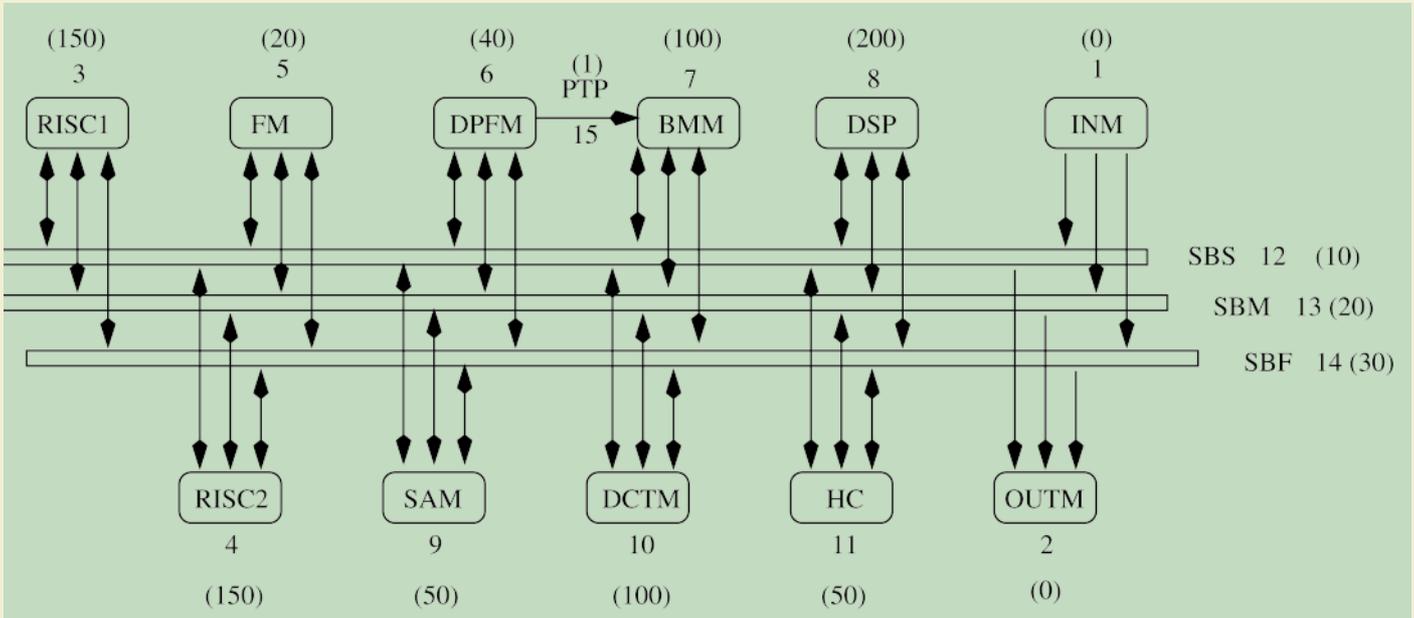


Abb. 4: Beschreibung der Möglichkeiten von Zielarchitekturen und Komponenten zur Realisierung des Video-Kodierers. Die Werte in Klammern geben die Kosten (in Euro) der Komponenten an.

typen erfolgt (hier Bildsequenzen, wobei die Bilder ihrerseits wieder aus Blöcken, Makroblöcken und einzelnen Pixeln zusammengesetzt sind). Die zweidimensionale, diskrete Kosinustransformation (DCT) wird auf nichtüberlappende Blöcke des Prädiktionsfehlerbildes $b[i]$ angewendet. Die transformierten Blöcke repräsentieren den räumlichen Frequenzinhalt des entsprechenden Blocks. Die nachfolgende Quantisierung (Q) benutzt die räumliche Redundanz innerhalb eines Bildes und die abschließende Kodierung (RLC) die Dynamik der zu übertragenden Werte. Die Bewegungsschätzung und Bewegungskompensation werden für die Kodierung zwischen aufeinander folgenden Bildern einer Sequenz benutzt. Ein Block im Bild $a[i]$ wird verglichen mit Nachbarblöcken des vorangegangenen Bildes $f[i]$ und hieraus wird ein Bewegungsvektor bestimmt. Als Resultat der Bewegungskompensation erhält man ein geschätztes Bild

$k[i]$. In der Darstellung nach werden Teilalgorithmen als Blöcke dargestellt. Hier gibt es also noch keine Spezifikation des zeitlichen Ablaufs, der Abbildung auf eine Zielarchitektur, der Speichergrößen, der Partitionierung von Bildern in Blöcke oder Makroblöcke. Abbildung 4 zeigt eine Vielfalt möglicher Systemkomponenten, wobei zunächst noch nicht klar ist, welche der dargestellten Komponenten Bestandteil einer optimalen Systemarchitektur sind.

In den meisten Fällen erfolgt die Hardware/Software-Partitionierung durch Abschätzung von Kosten und Nutzen nach jeweiligem Erfahrungswissen des Entwicklungsingenieurs. Da diese Entwurfsentscheidung aber auf groben Schätzungen beruht, ist keine Gewährleistung gegeben, dass das realisierte, fertige System alle Entwurfsbeschränkungen erfüllt bzw. in einer gewissen Hinsicht optimal ist. Solche Systeme sind üblicherweise in mindestens einer Eigenschaft unter- oder überdimensioniert, wie folgendes Beispiel zeigt:

Abbildung 5 zeigt verschiedene Lösungen zur Realisierung des Video-Kodierers. Die Menge von Entwurfsbeschränkungen kennzeichnet hier einen dreidimensionalen Entwurfsraum mit den Eigenschaften Datenübertragungsperiode T , Kosten K und Leistungsverbrauch P . Ein mit der Entwicklung beauftragter Softwareingenieur würde beispielsweise ein System mit einem Mikroprozessor einsetzen und eine Lösung mit dem durch den Entwurfspunkt P_1 gekennzeichneten Eigenschaften erhalten. Offensichtlich erfüllt diese Lösung zwar die Kostenanforderungen ($K(P_1) \leq K_{max}$), aber nicht die Datenratenbeschränkung ($T(P_1) > T_{max}$). Der Hardwareingenieur würde z.B. eine integrierte Schaltung entwerfen, deren Eigenschaften durch den Punkt P_2 dargestellt sind. Offensichtlich erfüllt diese Realisierung die Geschwindigkeits- und Leistungsverbrauchsanforderungen, nicht aber die Kostenbeschränkung. Die Schaltung wurde überdimensioniert. Der Punkt P_3 entspricht einer gemischten Hardware/Software-Lösung. Leider ist diese Lösung nicht optimal, da der Punkt P_4 in allen Eigenschaften besser oder gleich gut ist. Viele Lösungen, bei denen die Hardware/Software-Partitionierung „ad hoc“ bestimmt worden ist, erfüllen die Entwurfsbeschränkungen nicht oder sind suboptimal.

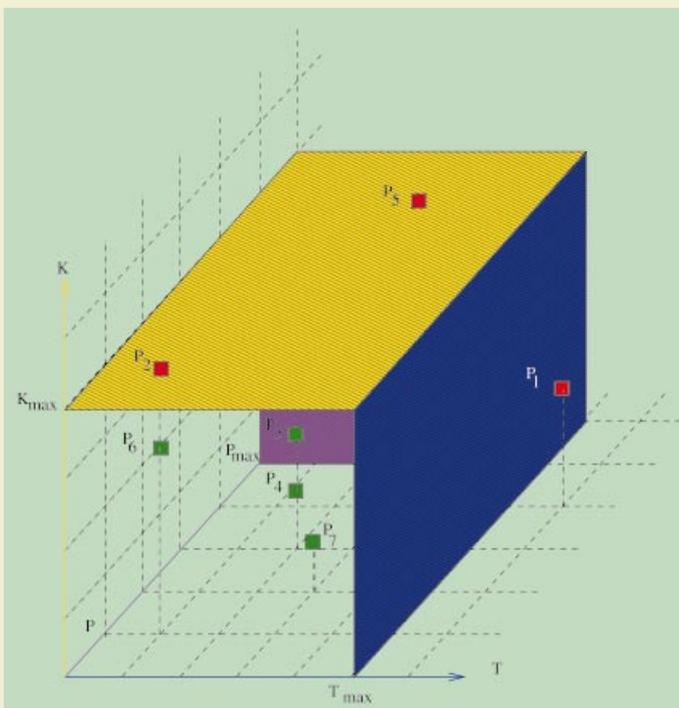


Abb. 5: Eigenschaften unterschiedlicher Realisierungen eines Video-Bildkodierers.

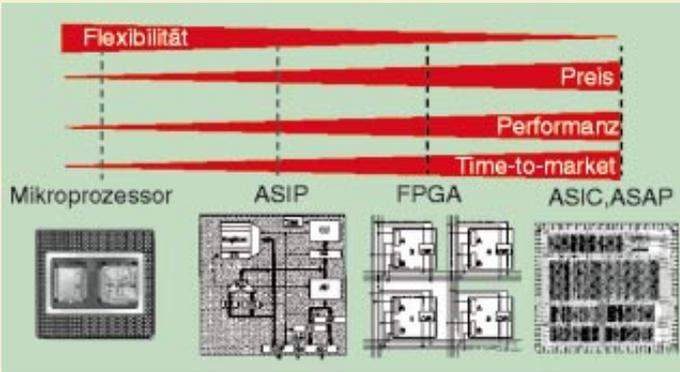


Abb. 6: Spezialisierungsformen und Kriterien für Hardware/Software-Entscheidungen.

Hardware- und Software-Architekturen

Klassifikation von Prozessoren

Prozessoren stellen die Zielkomponenten innerhalb eines Hardware/Software-Systems dar, die durch Software programmiert werden. Für bestimmte Anwendungsgebiete, wie z.B. für die Digitale Signalverarbeitung und den Bereich der Prozesssteuerungen (engl. embedded control), sind anwendungsspezifische Prozessoren (sog. ASIP, engl. application-specific instruction set processors siehe Abbildung 6) nötig, weil nur sie geforderten Leistungsanforderungen oder Kostenbeschränkungen genügen. Bei portablen Geräten, z.B. dem „Handy“, ist beispielsweise der Leistungsverbrauch des Prozessors entscheidend, so dass Standardprozessoren nicht eingesetzt werden können.

Klassifikation von Hardwarekomponenten

Als Hardwarekomponenten betrachtet man zum einen anwendungsspezifische integrierte Schaltungen (ASIC, siehe Abbildung 6). Diese Komponenten können in verschiedenen Technologien ausgeführt sein. Als Realisierungsformen unterscheidet man unter anderem Full Custom (voll kundenspezifisch), Standardzellen und Gate Array-Entwürfe.

Programmierbare Logikbausteine (insb. sog. FPGA, engl. field programmable gate arrays), siehe Abbildung 6, verbinden die Vorteile flexibler Programmierung mit der Geschwindigkeit dedizierter Schaltungen.

Wann sind welche Komponenten sinnvoll?

ASIP stellen offensichtlich bezüglich Flexibilität und Geschwindigkeit die Nahtstelle von der Softwareseite zur Hardwareseite her. Aus Kostengründen ist ein ASIP oft nur ein „abgespeckter“ Prozessor und damit günstiger als ein Vielweckprozessor, aber aufgrund seiner (wenn auch beschränkten) Programmierbarkeit immer noch flexibler als dedizierte Hardware.

Ein ASIC ist oft zu teuer, nicht flexibel genug oder bedarf einer zu hohen Entwicklungszeit. Die Nahtstelle zwischen Softwarewelt und Hardwarewelt bilden von der Hardwareseite her die programmierbaren Logikbausteine (siehe Abbildung 6). Der Anwender denkt dabei an Hardware, obwohl er den FPGA-Baustein selbst programmiert. FPGA als Hardwarerealisierungsvariante besitzen damit auch die Flexibilität von Softwarelösungen bei hoher Geschwindigkeit, jedoch ist diese als auch die Auslastung der Ressourcen lang nicht so hoch wie bei ASIC, insbesondere massiv parallel arbeitenden VLSI-Rechenfeldern (engl. ASAP – application/specific array processors) [4]. Deshalb ist der vornehmliche Anwendungsbereich von programmierbarer

Logik die Realisierung „kleiner Inseln“ eines komplexen Systems, die hohe Flexibilitäts- und Geschwindigkeitsanforderungen erfüllen müssen.

Die Synthese von Hard- und Software

Der Entwurfsablauf ist oftmals typisch

Der typische Entwurfsablauf bei der Entwicklung eines Hardware/Software-Systems ist in Abbildung 2 dargestellt. Ausgehend von der Spezifikation des Systemverhaltens erfolgt die Aufteilung der zu implementierenden Funktionalität in Hardware- und Softwarefunktionalität (Hardware/Software-Partitionierung). Ausgehend von dieser Partitionierung werden die Teilspezifikationen dann durch Synthesewerkzeuge verfeinert. Für die Verhaltensbeschreibung der Software bedeutet dies beispielsweise die Generierung eines Programms (z.B. in C, Pascal, Java, etc.) und Übersetzung in Maschinencode mit Hilfe eines Compilers. Analog wird für die Hardwarekomponenten typischerweise eine Verhaltensbeschreibung in einer „Hardwarebeschreibungssprache“ generiert (z.B. VHDL, Verilog). Mit Hilfe von CAD-Werkzeugen lassen sich auch diese nun verfeinern, z.B. in eine Netzliste von Gattern. Für diese allgemein komplexen Syntheseschritte gibt es ebenfalls wie die Compiler zur Softwaresynthese Werkzeuge, die diese Zwischenschritte übernehmen.

Gleichzeitig muss nach der Hardware/Software-Partitionierung auch die Spezifikation so verfeinert werden, dass die Komponenten miteinander fehlerfrei Daten austauschen können. Die Kommunikation eines Mikroprozessors mit einer Hardwarekomponente (z.B. ASIC, FPGA) kann beispielsweise über einen Prozessorbus, eine serielle Schnittstelle oder über einen speziellen Prozessor-Kommunikationsport erfolgen. Diesen Schritt bezeichnet man als Interfacesynthese. Eine wichtige Anforderung ist hier die Korrektheit des Zusammenspiels zwischen Hardware und Software. Zur Validierung müssen Simulationswerkzeuge miteinander gekoppelt werden.

Hardware/Software-Partitionierung

Heutzutage hat man bereits ein gutes Verständnis für die getrennte Optimierung von Software und Hardware. Hingegen zeigt es sich, dass das mangelnde Erwägen von Hardware/Software-Alternativen häufig zu Entwürfen führt, die entweder zu teuer (überdimensioniert), zu langsam (unterdimensioniert) oder gemäß den Anforderungen nicht flexibel für spätere Änderungen sind (siehe z.B. in Abbildung 5).

Optimierung ist in vielen Bereichen möglich

Typischerweise werden Entwurfsbeschränkungen (z.B. maximale Kosten) vorgegeben, die gültige von ungültigen Entwurfsgebiete

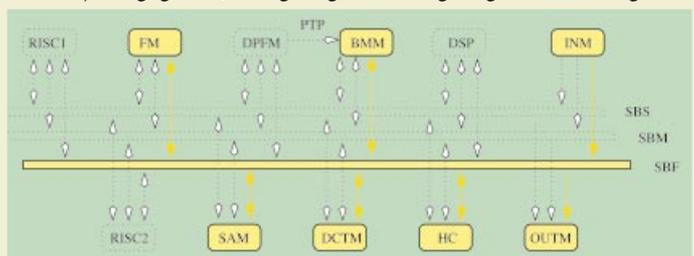


Abb.7: Exemplarische Allokation und Bindungsmöglichkeiten zur Implementierung des Video-Kodierers.

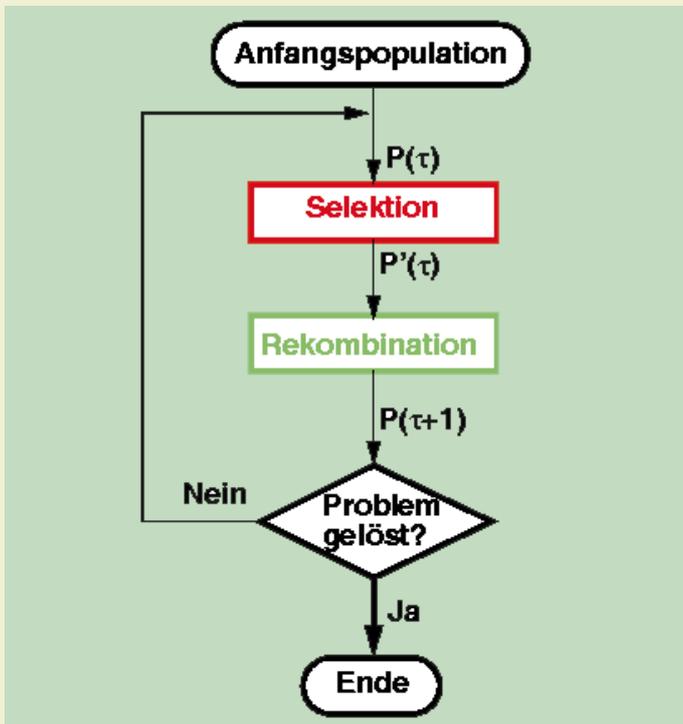


Abb. 8: Typischer Ablauf eines Evolutionären Algorithmus: $P(\tau)$ stellt die aktuelle Population dar.

ten abgrenzen (Abbildung 5).

Man erkennt, dass der Raum von gemischten Hardware/Software-Realisierungen eine breite Basis von Zwischenlösungen bietet. Aus Effizienzgründen lohnt es sich, diesen Raum näher zu untersuchen. Wir stellen dabei fest, dass nicht nur ein Punkt optimal sein kann: So gibt es Lösungen (z.B. Punkt P_7 in Abbildung 5), die kostenoptimal sind und Lösungen, die eine optimale Datenübertragungsrate (z.B. Punkt P_6 in Abbildung 5) aufweisen. Im Allgemeinen sind alle diejenigen Entwurfspunkte interessant, die optimal dahingehend sind, dass sie von keinem anderen Punkt in allen Entwurfskriterien geschlagen werden. Solche Punkte nennt man auch Pareto-Punkte.

Punkt P_4 in Abbildung 5 ist neben P_6 und P_7 ein Pareto-Punkt. P_4 und P_7 sind zwar gleich teuer, jedoch weist P_4 eine niedrigere Datenübertragungszeit auf, während P_7 einen niedrigeren Leistungsverbrauch besitzt. Auch bezüglich der anderen Punkte wird keiner der beiden Punkte in allen Eigenschaften dominiert. Folglich sind beide Punkte Pareto-Punkte. Wenn man die Möglichkeit hat, Entwurfalternativen zu untersuchen, so besteht das Problem der Entwurfsraumexploration darin, dem Entwicklungsingenieur alle, bzw. möglichst viele Pareto-Punkte als Alternativen anzubieten.

Allokation, Bindung und Ablaufplanung

Zur Berechnung eines Entwurfspunktes muss das Werkzeug zur Hardware/Software-Partitionierung drei Aufgaben lösen, die wir als Nächstes beschreiben möchten.

Abbildung 4 zeigt ein Speichermodul (FM), zwei Prozessoren (RISC1 und RISC2), ein dediziertes Hardwaremodul zur Berechnung von DCT/IDCT-Transformationen sowie ein ASIC zur Berechnung der Bewegungsschätzung und -kompensation (BMM). Auf den Prozessoren kann prinzipiell jeder der Blöcke der Spezifikation implementiert werden. Die anderen Hardwaremodule sind nur in der Lage, spezielle Aufgaben zu imple-

mentieren. Solche Möglichkeiten und Eigenschaften der Abbildung von Blöcken der Spezifikation lassen sich in einer Tabelle angeben. Zum Beispiel kann der Block DCT entweder durch einen der beiden Prozessoren oder auf dem Hardwaremodul DCTM implementiert werden, jedoch mit unterschiedlichen Eigenschaften, die man explizit angeben kann.

Zunächst ist eine Zielarchitektur aus der Vielfalt von Komponenten auszuwählen. Diese Aufgabe bezeichnet man als Allokation. Die Kosten eines Entwurfspunktes lassen sich dann einfach aus der Summe der Kosten der allozierten Komponenten berechnen. Abbildung 7 zeigt die Allokation für einen speziellen Entwurfspunkt. Nur die farbigen Komponenten sind alloziert, d.h. gehören zur Implementierung.

Nachfolgend muss festgelegt werden, welche Funktionalität auf welche Komponente abgebildet wird (die sog. Bindung) und wann die Funktionalität (Reihenfolge oder absolute Zeit) auf den Komponenten berechnet wird (sog. Ablaufplanung). Aus Platzgründen können wir hier nicht näher auf die zu lösenden Probleme eingehen.

Hardware/Software-Partitionierung mit Evolutionären Algorithmen

Mit dem beschriebenen Modell ist das Ziel der Entwurfsraumexploration, möglichst viele Implementierungen zu finden, die Pareto-Punkte sind. Im Projekt MEAT setzen wir dazu ein Verfahren ein, das auf dem Prinzip der Evolutionären Algorithmen beruht [2].

Evolutionäre Algorithmen bezeichnen eine Klasse von probabilistischen Optimierungsverfahren, die Konzepte der natürlichen Evolution nutzen. Wegen ihrer Universalität und Robustheit eignen sie sich besonders für komplexe Optimierungsprobleme, bei denen klassische Optimierungsverfahren versagen.

Grundlage dieser Klasse von Verfahren ist eine Menge (Population) von möglichen Lösungen eines Optimierungsproblems (sog. Individuen). Diese Individuen können je nach Aufgabe in unterschiedlicher Form im Rechner dargestellt sein, z.B. als Baum, Bitstrings (Zeichenketten aus Nullen und Einsen) oder Vektoren von reellen Zahlen.

Anfangs wird die Population mit zufällig erzeugten Individuen belebt. Durch eine so genannte Fitnessfunktion wird die Güte des Individuums bezüglich des Optimierungsproblems bestimmt.

Ziel des Evolutionären Algorithmus ist es nun, viele unterschiedliche Individuen mit optimaler Fitness zu finden. Um dies zu erreichen, werden durch Selektion und Rekombination (siehe Abbildung 8) immer wieder neue Populationen von potentiellen Lösungen erzeugt, bis man mit der Qualität der Lösung der besten Individuen zufrieden und das Abbruchkriterium erfüllt ist. Durch das Zusammenspiel von Selektion und Reproduktion erhofft man sich die Verbesserung der Fitnesswerte. Dabei ist es Aufgabe der Selektion, die mittlere Fitness zu verbessern, indem sie durch ein geeignetes Verfahren „gute“ Individuen häufiger für die nächste Population auswählt als schlechte. Die Art und Struktur der Individuen wird dabei nicht verändert; es werden nur identische Kopien erzeugt. Die Selektion führt damit zu einer Konzentration der Population auf untersuchte und gute Gebiete im Lösungsraum.

In unserem Beispiel werden Allokation und Bindung als Zeichenketten aus Nullen und Einsen, so genannte Bitstrings,

kodiert. Als Selektionsmethode wurde die Tournament-Selektion eingesetzt: Jedes Individuum der Nachfolgepopulation bestimmt sich durch einen Wettkampf zwischen einer bestimmten Anzahl von zufällig ausgewählten Individuen. Für ein ausgewähltes Individuum wird für die in ihm kodierte Allokation und Bindung ein Ablaufplan bestimmt. Damit wird die Fitness berechnet.

Die Aufgabe der Rekombination ist es, inhaltlich neue Individuen zu erzeugen, um bessere Lösungen zu finden. Auch hier spielt der Zufall eine Rolle. Möglich sind sowohl ungeschlechtliche (z.B. Mutation des Erbgutes) als auch geschlechtliche Rekombinationen. Bei letzterer werden Teile der Information zweier oder mehrerer Individuen getauscht. Man spricht hier auch von einem Kreuzungsvorgang. Normalerweise ändert man nicht die ganze Population, sondern nur einen gewissen Prozentsatz.

Neben der Repräsentation einer Lösung und der Auswahl der Selektions- und Rekombinationsoperatoren inklusive ihrer Parameter, ist die Wahl der Fitnessfunktion entscheidend dafür, wie gut das Verfahren arbeitet. Sie ist die einzige Art und Weise, auf die der Evolutionäre Algorithmus Informationen über die Qualität seiner momentanen Population erhält. Diese richtig zu wählen, stellt bei der Anwendung oft die größte Schwierigkeit dar. Meist ist es nämlich nicht einfach, alle Informationen über die Qualität einer Lösung in einem einzigen Zahlenwert zu konzentrieren.

Wir haben gesehen, dass unser Problem der Hardware/Software-Partitionierung im Allgemeinen mehrdimensional ist. Es handelt sich daher um ein Mehrzieloptimierungsproblem und eine Lösung, die unter allen Möglichkeiten am schnellsten, wenn auch sehr teuer ist, ist ebenso optimal wie eine Lösung, die am günstigsten, aber nicht die schnellste ist. Damit weder die eine noch die andere unterdrückt wird, wählen wir die Definition der Pareto-Optimalität als Fitnessfunktion: Ein Individuum erhält die optimale Fitness 0, wenn es von keinem anderen Individuum der Population dominiert wird. Dies ist der Fall, wenn es keinen anderen Punkt gibt, der in allen Eigenschaften gleich gut und in

mindestens einer Metrik besser ist. Es bietet sich an, jedem Punkt als Fitness die Anzahl der Punkte zuzuweisen, die ihn dominieren. In jeder neuen Population wird die Menge der optimalen Punkte (Fitness 0) daher aktualisiert. Ferner wird ein spezieller Mechanismus eingesetzt, der verhindert, dass während der Evolution durch Zufall Pareto-optimale Punkte aussterben können (Elitismus).

Um einen Evolutionären Algorithmus weiterhin Erfolg versprechend einzusetzen, sind jedoch weitere Punkte vorsichtig anzupassen. Wie bewertet man zum Beispiel durch Rekombination generierte Lösungen, die gemäß der Natur des Problems ungültig sind bzw. wie verhindert man die Erzeugung solcher Individuen, damit man nicht im Dunkeln sucht? Neben der Addition von Bestrafungstermen auf die Fitness ungültiger Lösungen bieten sich hier Reparaturheuristiken an. Letztere verhindern das Erzeugen ungültiger Lösungen. Wie man sieht, sind für dieses robuste Verfahren einige problemspezifische Anpassungen notwendig, was uns auch das bekannte „There is no free lunch“ - Theorem lehrt.

Unser speziell für die Entwurfsraumexploration von Mehrzieloptimierungsproblemen angepasstes Verfahren zeigt sich als sehr gut geeignet zur Entwurfsraumexploration, da die Komplexität der zu untersuchenden Lösungen (1.9×10^{27} mögliche Bindungen im Beispiel) exakte Methoden als auch enumerative Suchmethoden ausschließt.

Die für das Beispiel des Video-Kodierers gefundenen Pareto-Punkte sind in Tabelle 1 und in Abbildung 9 für einen zweidimensionalen Entwurfsraum (Kosten und Bildperiode) dargestellt.

	Pa ₁	Pa ₂	Pa ₃	Pa ₄	Pa ₅	Pa ₆
Bildperiode P	22	42	54	78	114	166
Kosten c	350	340	330	280	230	180

Tabelle 1: Pareto-Punkte Video-Kodierer.

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle Prof. Lothar Thiele und meinen ehemaligen Kollegen im Projekt CodeSign der ETH Zürich für langjährige Zusammenarbeit danken.

Literatur

- [1] J. Teich. 1997. Digitale Hardware/Software-Systeme: Synthese und Optimierung. Springer-Lehrbuch. Heidelberg, New York, Tokio.
- [2] T. Blickle and J. Teich and L. Thiele. 1998 (January). System-Level Synthesis Using Evolutionary Algorithms. J. Design Automation for Embedded Systems, 3(1), pages 23-58.
- [3] 1997. VDE Mikroelektronik-Studie 1997-2002.
- [4] J. Teich and L. Thiele and L. Zhang. 1997 (September). Scheduling of Partitioned Regular Algorithms on Processor Arrays with Constrained Resources. Int. Journal of VLSI Signal Processing, 17(1), pages 5-20.

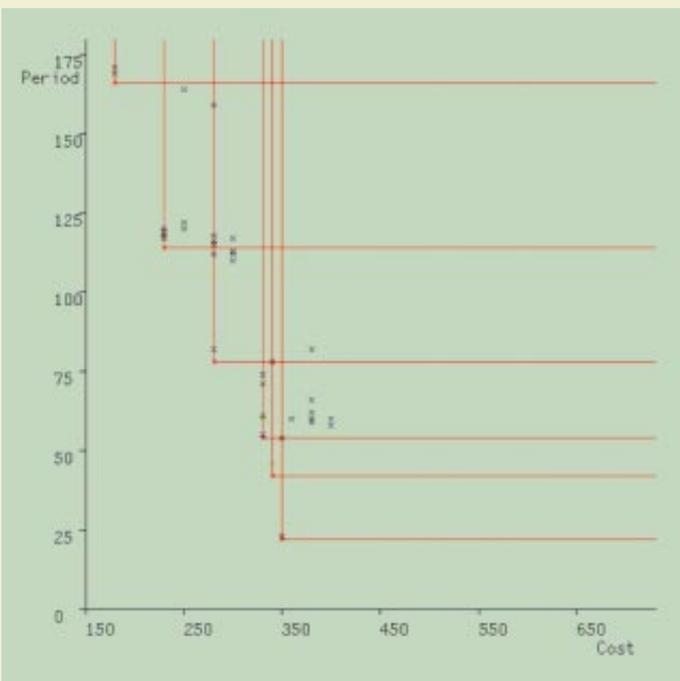


Abb. 9: Entwurfsraumexploration (Video-Kodierer) mit den in Tabelle 1 dargestellten Pareto-Punkten.

Neue Möglichkeiten in der Audiotechnik

31-Band-Equalizer mit einstellbaren Verzögerungszeiten

Im Labor für Digitale Nachrichtentechnik und Digitale Signalverarbeitung wurde ein neuartiger Equalizer zur Audiosignalverarbeitung auf PC-Basis entwickelt. Zusätzlich zur Verstärkungsregelung in 31 Frequenzbändern sind auch die Signalverzögerungen in diesen Bändern einstellbar. Damit ergeben sich interessante Möglichkeiten der Klangbeeinflussung, die bisher nicht realisierbar waren.

In der Audiotechnik werden Equalizer zur Frequenzgangsentzerrung oder auch zur bewussten Klangveränderung verwendet. In der einfachsten Ausführung findet man sie als Höhen- oder Tiefenregler an jeder Stereoanlage, aber auch Versionen mit einer größeren Anzahl von Frequenzbändern sind mittlerweile weit verbreitet.

Für den professionellen Einsatz sind hochwertige Geräte gefordert, die Verstärkungsregelungen in den 31 Frequenzbändern nach der ISO-Norm von 20 Hz bis 22 kHz erlauben, wobei die gewünschten Werte jeweils an den Mittenfrequenzen der Bänder spezifiziert werden. Die Frequenzbänder nach ISO-Norm sind der Struktur des menschlichen Gehörs angepasst [3]. Bei Realisierungen in Analogtechnik ist der Phasenverlauf solcher Equalizer nichtlinear, das bedeutet, dass unterschiedliche Frequenzanteile eine unterschiedlichen Verzögerung erfahren. Dies verfälscht den räumlichen Klangeindruck. Da aber in der Analogtechnik solche Verfälschungen nicht zu vermeiden sind und zudem kleine Abweichungen vom linearen Phasenverlauf durch das menschliche Gehör nicht wahrzunehmen sind, werden sie von jeher als notwendiges Übel hingenommen.

Bei der Realisierung von Equalizern mit digitaler Signalverarbeitung sind Lösungen mit rekursiven Digitalfiltern, die ähnliche

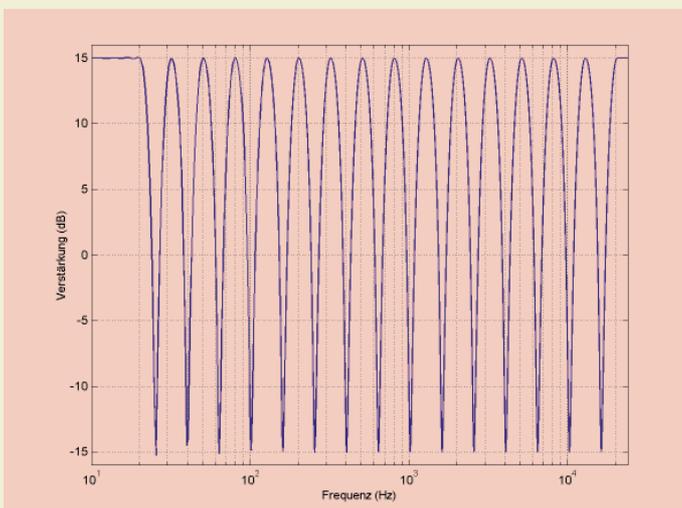


Abb. 1: Frequenzgang des Equalizers unter Maximalanforderung.



Prof. Dr. Sigmar Ries und Dipl.-Ing. Günter Frieling (v.r.), Labor für Digitale Nachrichtentechnik und Digitale Signalverarbeitung der Universität Paderborn, Abteilung Meschede.

Eigenschaften wie Analogfilter besitzen, ebenfalls durch nichtlinearen Phasenverlauf gekennzeichnet. Außerdem wird der eingestellte Frequenzgang, wie auch bei analogen Equalizern, meist nur unvollkommen realisiert. Dies bedeutet für den Anwender, dass er eigentlich immer mit aufwendiger Messtechnik überprüfen muss, ob seine Vorgaben erreicht worden sind.

Solche Geräte besitzen aber andere wichtige Vorteile. Zum einen können sie mit geringerem Aufwand realisiert werden, zum anderen kann die Signalverzögerung bei der Bearbeitung so klein gehalten werden, dass Echtzeitanwendungen, d.h. der Einsatz bei Live-Aufnahmen oder Konzerten, noch möglich sind. Daher wird man für Echtzeitanwendungen immer auf die rekursive Filtertechnik zurückgreifen müssen.

Ein neuartiger Equalizer

Ausgangspunkt unserer Entwicklung war zunächst der Gedanke, einen linearphasigen Equalizer zu entwickeln, um die oben beschriebenen unerwünschten Phasenverzerrungen des Klangmaterials zu vermeiden und damit eine wirklich saubere Verarbeitung von 20 Hz bis 24 kHz zu gewährleisten. Obwohl, wie schon erwähnt, das menschliche Gehör recht tolerant gegenüber dem nichtlinearen Phasenverlauf ist, kommt seitens der Anwender immer häufiger der Wunsch, zumindest Teile der Musikbearbeitung ohne zusätzliche Phasenverzerrung durchführen zu können. Unsere Untersuchungen unter diesen Randbedingungen ergaben eine Realisierungsmöglichkeit mit einer Latenzzeit (Durchlaufzeit des Signals durch das Gerät), die notwendigerweise im Bereich von einigen Zehntelsekunden liegen muss; das ist der Preis für eine linearphasige Verarbeitung bis zu den tiefsten Frequenzen ab 20 Hz.

Zudem sollte dieses Gerät auf preiswerter Hardwarebasis realisiert werden, d.h. möglichst auf PCs mit handelsüblichen hochwertigen

gen Soundkarten lauffähig sein, womit natürlich schon hinsichtlich der Verarbeitungsleistung Grenzen gesetzt sind.

Da die oben erwähnte lange Latenzzeit eine Anwendung im harten Echtzeitbetrieb bereits ausschließt, wurden zwei weitere Ideen gleichzeitig aktuell:

- eine einfacher zu realisierende Signalverarbeitung (mit noch etwas längerer Latenzzeit) zu benutzen
- zusätzlich zur Verstärkung auch die Verzögerungszeiten in den ISO-Frequenzbändern einstellbar zu machen.

Durch einstellbare Verzögerungszeiten ergeben sich für einen solchen Equalizer interessante, neuartige Anwendungen wie die Kompensation von Verzerrungen durch andere Verarbeitungen, zum Beispiel durch analoge Geräte oder die Erzeugung neuartiger Effekte durch bewusst gewählte künstliche Verzögerungen. Man kann zum Beispiel die eigentlich immer vorhandene unnatürliche Verzögerung der Basstöne durch die Analogverstärker wieder korrigieren. Weiterhin liegen durch Verzögerungen im Bereich von ± 1 cm bis ± 15 m akustische Effekte vom allgemein bekannten Stereo-Effekt über speziellere Phänomene wie „early reflections“ und Haas-Effekt bis zu vertrauten Echos im Bereich der Möglichkeiten. Eine genaue Beschreibung dieser Effekte findet sich in [3].

Erfahrungen auf diesem Gebiet sind nach unserer Kenntnis kaum vorhanden, da solche Möglichkeiten bisher nicht zur Verfügung standen.

Als linearphasiger Equalizer kann dieses Gerät natürlich ebenfalls benutzt werden.

Der konkrete Entwicklungsablauf

Technischer Kern des 31-Band-Equalizers ist ein Digitalfilter, das die gewünschten Einstellungen für Verstärkungen und Verzögerungen umsetzt. Da sich gängige Filterentwurfverfahren für die sehr speziellen Anforderungen als nicht geeignet erwiesen, wurde ein neuartiges Verfahren entwickelt, mit dem sich Digitalfilter für Equalizer berechnen lassen. Mit 32 768 Filterkoeffizienten lassen sich dabei mit unserem Verfahren bis zu den tiefsten Frequenzen Verstärkungsregelungen von ± 15 dB und Verzögerungen bis zu ± 15 m sauber erreichen. Die Ergebnisse für diese (sicherlich etwas praxisferne) Maximalanforderung an die Verstärkung sind in Abbildung 1 zu sehen.

Das Ergebnis für eine Verzögerungseinstellung von ± 1.5 m ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die eigentliche Filterung wird durch das in der Signalverarbeitung bekannte Verfahren der schnellen Faltung unter Einsatz der FFT (Fast Fourier Transform) vorgenommen; eine direkte Realisierung der Faltung mit solchen Filterlängen würde die Rechenzeit auf astronomische Werte steigen lassen oder den Einsatz teurer Spezialhardware erfordern.

Der gesamte Filterprozess wurde zuerst in der komfortablen Simulationssprache MATLAB geschrieben. Hier kam es auch zum Feinschliff des Entwurfsalgorithmus. Danach wurde eine Implementierung in C++ unter Windows vorgenommen, wobei der größte Anteil der Arbeit für die Entwicklung der Benutzeroberfläche und die Einbindung von Dateien im Wave-Format, dem üblichen Datenformat für Musik auf dem PC, als Ein- und

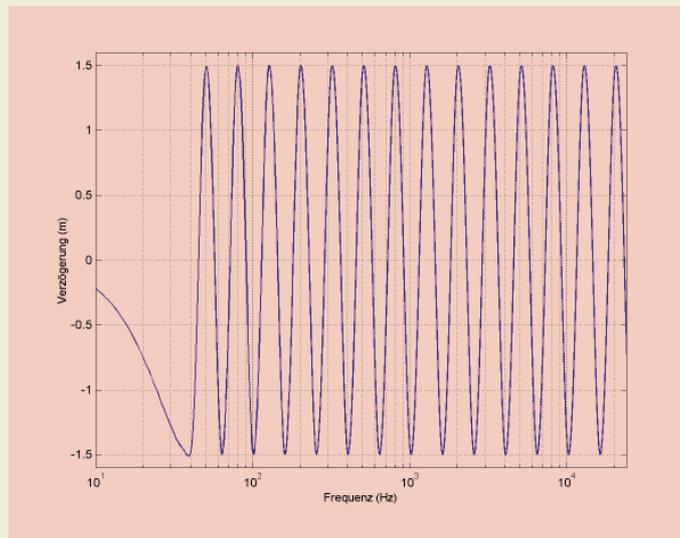


Abb. 2: Erreichte Verzögerungen des Equalizers bei Einstellung ± 1.5 m.

Ausgangsdaten sowie für den direkten Zugriff des Equalizers auf die Soundkarte geleistet werden musste. Als sehr hilfreich erwiesen sich dabei Vorarbeiten aus den Diplomarbeiten [1] und [2]. Quasi nebenbei wurde auch eine Version des Equalizers mit Ansteuerung über PC auf einer Signalprozessorkarte entwickelt, der eine deutlich geringere Latenzzeit aufweist. Dies wäre für eine eigenständige Hardware-Realisierung der richtige Ausgangspunkt, da hier ein handelsüblicher Signalprozessor vom Typ TMS320C31 von Texas Instruments zum Einsatz kommt. Für eine preiswerte Realisierung scheint dieser Weg allerdings momentan nicht geeignet.

Die Ergebnisse im Überblick

Unser 31-Band-Equalizer liegt als Forschungsversion in MATLAB vor. Hier können auch neue Ideen schnell ausgetestet werden. Die für potenzielle Anwender sicher attraktivste Realisierung ist wohl das Offline-/Online-Programm unter Windows 95/98. Es können sowohl alle üblichen Wave-Formate als auch Daten direkt von der Soundkarte verarbeitet werden. Die für professionelle Anwendungen übliche Abtastfrequenz von 48 kHz bei Online-Stereoverarbeitung direkt mit der Soundkarte wird auf einem Pentium-II-333-MHz-Rechner erreicht. Dies wird in Kürze kaum noch als kritisch gelten, zumal eine Weiterentwicklung des Equalizers mit weniger Anforderungen hinsichtlich der Rechenleistung in Arbeit ist. Bei Offline-Verarbeitung von Wave-Daten kann im Grunde jeder PC mit hinreichender Festplattenkapazität als Verarbeitungsplattform dienen. Das äußere Erscheinungsbild des Equalizers ist durch 63 Schieberegler für Verstärkung und Verzögerung geprägt (siehe Abbildung 3). Die Mittenfrequenzen der ISO-Frequenzbänder sind über bzw. unter den zugehörigen Reglern abzulesen.

Bei Hörtests funktioniert der Equalizer für frequenzabhängige Verstärkungsregelung wie gewohnt, also wenig spektakulär. Die Möglichkeiten der frequenzabhängigen Verzögerungseinstellung sind teilweise schwer zu beschreiben, man muss sie hören, um sich einen Eindruck zu verschaffen. Am deutlichsten sind Echoeffekte bei großen und Stereoeffekte bei kleinen Verzögerungen ausgeprägt. Hier besteht noch ein breiter Forschungsbedarf für akustische Experimente.

Dem Menschen abgeschaut – fallbasiertes Lösen von Problemen

Nutzbarmachung eines mächtigen Paradigmas in der Informatik

Der Einsatz fallbasierter Techniken bei der rechnergestützten Lösung von Problemen hat sich bewährt. Insbesondere auf Gebieten, in denen die Vorgehensweise des Menschen nur unzureichend verstanden wird oder nur schlecht nachgebildet werden kann, weisen fallbasierte Ansätze Erfolge auf.

Fallbasiertes Schließen bzw. fallbasiertes Problemlösen ist ein dem Menschen ureigenes, altbewährtes Prinzip. Seine Übertragung auf den Rechner bedeutet die Umsetzung von Konzepten wie *Fallähnlichkeit*, *Fallspeicherung* oder *Fallanpassung*.

Das Prinzip aller fallbasierten Systeme ist gleich – die Herausforderungen bei der Entwicklung eines solchen Systems und die Grenzen seiner Leistungsfähigkeit hängen jedoch ausschließlich davon ab, wie gut die Umsetzung der genannten Konzepte für ein aktuelles Problem gelingt.

Es ist schon eine Weile her, als wir wieder mal vor dem Problem standen, den klemmenden Schraubverschluss einer Saftflasche zu lösen. Kurz bevor wir aufgeben wollten, fiel uns ein, was wir bei jemandem beobachtet hatten, der vor der gleichen Aufgabe stand: Er drehte die Flasche um, schlug mit dem Handballen kurz auf den Boden der umgedrehten Flasche und konnte anschließend mühelos den Deckel abdrehen. Es gab nichts zu verlieren, und so machten wir das nach, was wir beobachtet hatten – es funktionierte.

Obwohl etwas versteckt, handelt es sich bei der geschilderten Situation um ein Beispiel für fallbasiertes Problemlösen. Dabei besteht ein Fall aus einer Problembeschreibung („Schraubverschluss klemmt“) und einer Lösung („auf den Flaschenboden schlagen“).

Die grundsätzliche Annahme hinter jedem fallbasierten Ansatz lautet, dass aus der Ähnlichkeit zweier Probleme auf die Ähnlichkeit ihrer Lösungen geschlossen werden darf: Zu dem offenen Problem wird ein möglichst ähnliches, in der Vergangenheit

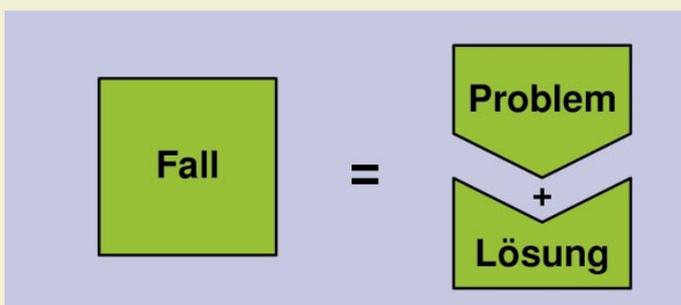


Abb. 1: Beim fallbasierten Schließen besteht jeder Fall aus einer Problembeschreibung mit seiner zugehörigen Lösung.



Prof. Dr. Hans Kleine Büning (l.) ist seit 1991 Professor für Praktische Informatik im Fachbereich 17/Mathematik, Informatik. Sein Arbeitsgebiet sind wissensbasierte Systeme.

Dr. Benno Stein ist wissenschaftlicher Assistent bei Prof. Dr. Hans Kleine Büning. Sein Forschungsgebiet ist die Entwicklung von Methoden für Diagnose-, Konfigurierungs- und Entwurfsprobleme bei technischen Systemen.

bereits gelöstes Problem gesucht. Dessen Lösung wird angepasst und dient als Lösung des offenen Problems (Abbildung 2).

Das Saftflaschenbeispiel illustriert einige Aspekte des fallbasierten Schließens:

- **Erinnerung:** Man erinnert sich an eine vergleichbare Situation.
- **Anpassung:** Wahrscheinlich handelt es sich in der aktuellen Situation um eine andere Saftflasche als im gespeicherten Fall. Durch Fallanpassung (Austausch der Flasche) ist man in der Lage, die gespeicherte Lösung an die neue Situation anzupassen.
- **Anwendung:** Die Lösung kann angewandt werden, auch wenn man nicht verstanden hat, wie sie funktioniert.¹

Geschichte

Die theoretischen Ursprünge des fallbasierten Schließens (engl.: CBR für Case-Based Reasoning) stammen aus der Kognitionswissenschaft: Schank und Abelson verglichen das dem Menschen typische allgemeine Verständnis über Situationen mit einer Art Gedächtnisschema, das sie als Skript bezeichneten. Skripte ermöglichen es uns, stereotype Ereignisse zu beschreiben, bestimmte Erwartungen zu haben oder Schlussfolgerungen zu ziehen [11, 12].

Eine weitere wichtige Wurzel des CBR ist der Bereich des analogen Schließens, das sich mit der Übertragung von Lösungsprinzipien aus einem gut verstandenen Problembereich auf eine neue Situation beschäftigt.

Fallbasiertes Schließen versucht, ungelöste Probleme auf der Basis bereits gelöster Probleme *desselben* Aufgabenbereiches in den Griff zu bekommen. Fallbasiertes Schließen kann also als eine Spezialisierung des analogen Schließens aufgefasst werden [17].

Als erste Realisierung eines fallbasierten Systems wird Janet

on (keine Anpassung) über die Parameteradaption (einfache Werteanpassung) und die modellgestützte Adaption (Rückgriff auf kausale Modelle) bis hin zur Adaption durch Kombination mehrerer Fälle [16, 17]. Hinsichtlich der Formulierung von Adaptionwissen ist die Verwendung von so genannten Reparaturregeln besonderes beliebt; allgemeiner, wenngleich auch schwieriger sind Aufstellung und Lösung eines Constraint-Problems.

Der Retain-Schritt stellt die Lernkomponente eines fallbasierten Systems dar. Der neu gewonnene Fall bzw. eine Überarbeitung dieses Falles wird der Fallbasis hinzugefügt. Sinnvoll ist eine Erweiterung der Fallbasis eventuell dann, wenn die durchgeführten Adaptionen von struktureller Natur oder sehr aufwendig sind. Wann, wie oft oder um welche Fälle eine Fallbasis erweitert werden soll, ist nicht allgemein entscheidbar und stellt ein spannendes Problem der Forschung dar.

Fallbasiertes Schließen kritisch betrachtet

Fallbasierten Systemen, oder allgemeiner: dem fallbasierten Schließen werden eine Reihe von Vorteilen zugesprochen [9, 8]. Folgende Argumente werden häufig genannt:

- Lösungen müssen nicht von Grund auf neu entwickelt werden.
- Lösungen können vorgeschlagen und eingesetzt werden, auch wenn sie nicht vollständig verstanden wurden (siehe Saftflaschenbeispiel).
- Lösungen in Form von Fällen sind nützlich bei der Interpretation unvollständig beschriebener Probleme.
- Durch das Konzept einer Fallbasis werden Erwerb und Integration neuen Wissens vereinfacht.

Doch die scheinbare Einfachheit des fallbasierten Ansatzes birgt ihre Tücken.

Allein die Entwicklung eines sinnvollen Ähnlichkeitsmaßes bedeutet in der Praxis eine große Hürde. So sehr der menschliche Geist talentiert ist, ein Urteil bezüglich der Ähnlichkeit zweier Problemstellungen abzugeben, so problematisch stellt sich die *Quantifizierung* dieser Urteilsfähigkeit in Form eines Ähnlichkeitsmaßes dar.

Auch die Aufstellung einer ausreichend großen Fallsammlung als „Gedächtnis“ eines fallbasierten Systems stellt sich oft schwieriger heraus als erwartet. Zudem möchte man diesem Gedächtnis möglichst wenig Ballast in Form von unnützen oder gar schlecht gelösten Fällen mitgeben. Dabei ist es sehr schwierig, ja oft unmöglich, den Beitrag, den ein neuer Fall zur Verbesserung der Lösungsqualität liefert, zu quantifizieren.

Für die Falladaption gibt es keine allgemeine Theorie (es kann auch keine geben): Die Durchführung von Adaptionen erfordert ein tiefes Verständnis des Anwendungsbereichs, und so stellt die Entwicklung von Adaptionalgorithmen jedes Mal eine neue Herausforderung dar. Folglich sind Problemstellungen, die eine umfangreiche Nachbearbeitung einer existierenden Lösung erfordern für den fallbasierten Ansatz ungeeignet.

Erfordert die Problemstellung die Bestimmung einer optimalen Lösung, so ist ein fallbasierter Lösungsansatz in der Regel zu unflexibel, weil er immer von einer bestehenden und somit festen Lösung ausgeht.

Im Umkehrschluss kann man festhalten: Wenn ausreichendes

Wissen über einen Problembereich vorliegt, die notwendigen Zusammenhänge gut verstanden sind und effizient verarbeitet werden können, sind die Standardtechnologien der Wissensverarbeitung dem fallbasierten Ansatz überlegen.

Auf größere Entwurfsprobleme treffen die genannten Eigenschaften nur eingeschränkt zu; und so tut sich die klassische Wissensverarbeitung schwer mit deren Lösung.

Lösung von Entwurfsproblemen

– eine Domäne des Menschen

Entwerfen bedeutet die Schaffung eines Systems oder einer Systembeschreibung entsprechend einer Menge von Vorgaben. Bei dem System kann es sich um ein technisches Gerät, aber beispielsweise auch um ein Gebäude oder ein Waschmittel handeln. Die entsprechende Systembeschreibung wäre ein Bauplan, eine Zeichnung oder eine Rezeptur. Der Mensch ist besonders leistungsfähig bei der Lösung von Entwurfsproblemen.

Auf dem Rechner werden Entwurfsprobleme durch Suche gelöst, und je mehr Entwurfswissen für einen Bereich vorliegt, umso effizienter kann man diese Suche gestalten. Trotz dieser wissensbasierten Herangehensweise bleiben die Suchräume bei Entwurfsproblemen sehr groß und schwer beherrschbar. Hinzu kommt, dass die menschliche Problemlösefähigkeit hier nur zum Teil erforscht ist, was sich bei vielen Entwurfsproblemen u.a. darin äußert, dass sich die Begriffe „guter Entwurf“ oder „schlechter Entwurf“ einer formalen Definition entziehen. So tritt zu dem Problem des großen Suchraums auch jenes Problem, dass sich nicht exakt spezifizieren lässt, wonach man eigentlich sucht.

Aus Sicht der Informatik stellt sich ein Entwurfsproblem wie in Abbildung 4 skizziert dar: Gegeben ist eine Anforderungsspezifikation D aus der Menge \mathcal{D} aller möglichen Anforderungsspezifikationen. Ziel ist es, D zu einer Systembeschreibung S zu transformieren, die alle Wünsche, Erwartungen und Randbedingungen aus D erfüllt.



Abb. 4: Entwerfen heißt, eine Anforderungsmenge D auf ein System S abzubilden.

Soll z.B. ein neues Auto entworfen werden, könnte D Anforderungen bezüglich des Verbrauchs, des Platzangebots und des Preises enthalten; wäre ein neuer Müsli-Riegel zu entwerfen, so könnte D Vorgaben hinsichtlich Geschmacks, Lagerfähigkeit und Form anbieten.

Jede gelöste Entwurfsaufgabe enthält Entwurfswissen. Der größte Teil dieses Wissens ist lediglich implizit vorhanden: Es liegt versteckt oder komprimiert in der Entwurfslösung an sich vor. Zurzeit ist man nur bedingt in der Lage, dieses Entwurfswissen explizit zu machen und z.B. in Form von „Entwurfsregeln“ zu formalisieren.

An dieser Stelle kommt die Idee des fallbasierten Schließens ins Spiel. Es schafft einen Rahmen, um alte Entwürfe zur Lösung neuer Entwurfsaufgaben wieder zu verwenden, und versucht auf diese Weise, implizites Entwurfswissen nutzbar zu machen.

Fallbasierte Entwurfsautomatisierung am Beispiel hydraulischer Antriebe

Hydraulik kommt überall dort zum Einsatz, wo große Kräfte auf kleinem Raum erzeugt werden müssen. Hydraulische Antriebe verrichten Manipulations- und Fertigungsaufgaben in der Industrie, realisieren Hebearbeiten bei jeder Art von Bühnentechnik und bewegen Roboter und Fahrzeuge. Zylinder sind die Aktuatoren eines hydraulischen Antriebs; Ventile wie Drossel-, Druckbegrenzungs-, Rückschlag- oder Proportionalventile steuern Druck und Fluss des hydraulischen Mediums. Pumpen stellen die hydraulische Energie zur Verfügung.

Die Anforderungsspezifikation D eines zu entwerfenden hydraulischen Antriebs enthält im wesentlichen Fahrprofile für den Verlauf der Wege, Kräfte und Geschwindigkeiten von Zylindern; hinzu kommen Wertebereichsbeschränkungen für physikalische Größen, Toleranzforderungen und andere Vorgaben. Das Ergebnis S des Entwurfsprozesses ist der Schaltplan eines Antriebs, der D erfüllt.

Der Entwurf eines neuen Antriebs, d.h. die Abbildung $D \rightarrow S$, ist ein kreativer Prozess, der von einem Hydraulikingenieur geleitet wird. Die Abbildung gelingt in der Regel nicht in einem Schritt, und so entsteht ein Entwurfszyklus mit den Schritten „Konstruktion“, „Simulation“ und „Anforderungsvergleich“. Insbesondere für den Simulationsschritt existieren Verfahren und Werkzeuge, die den Entwerfer unterstützen [13]. Aufgrund der im Konstruktionsschritt erforderlichen Kreativität ist eine vollständige Automatisierung des Entwurfsprozesses zurzeit noch nicht absehbar.

Natürlich lässt sich die Kreativität des menschlichen Geistes auch nicht mit einem fallbasierten Ansatz nachbilden. Fallbasierte Techniken eröffnen aber die Möglichkeit, schwierigste Teile des Entwurfsprozesses – wie hier den anspruchsvollen Konstruktionsschritt – zu unterstützen oder teilweise zu automatisieren. Wie dies funktionieren kann, ist im Folgenden kurz beschrieben.

Aus Sicht des Entwerfers realisiert jeder hydraulische Antrieb eine komplexe Funktion, die wiederum durch das Zusammenspiel verschiedener Teilfunktionen entsteht. Die baulichen Entsprechungen dieser Teilfunktionen sind Ventil-Zylinder-Kombinationen, so genannte hydraulische Achsen. Abbildung 5 zeigt einige Beispiele. In einem komplexen Antrieb sind mehrere hydraulische Achsen miteinander gekoppelt.

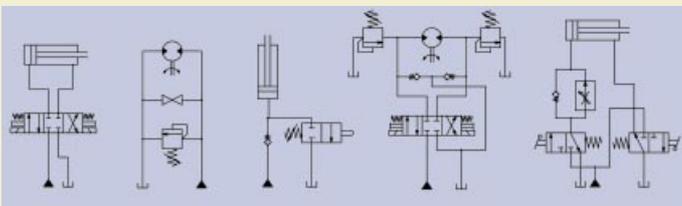


Abb. 5: Beispiele für hydraulische Achsen.

Kernidee des von uns entwickelten Ansatzes zur Automatisierung des Entwurfs bildet das Prinzip der „funktionellen Komposition“ [14]. Es besagt,

1. dass jede Anforderungsspezifikation D in eine Menge von Teilfunktionen $F = \{f_1, \dots, f_n\}$ zerlegt werden kann,
2. dass jeder Teilfunktion $f \in F$ genau eine hydraulische Achse des Antriebs zugeordnet werden kann und
3. dass die Art der Kopplungen der hydraulischen Achsen (seriell, parallel, mit Rückführung etc.) aus D ableitbar ist.

Während der erste Punkt weitestgehend konform mit der Realität ist, unterstellen Punkt 2 und 3, dass keine Teilfunktion f durch die Kombination verschiedener Achsen oder durch spezielle konstruktionstechnische Seiteneffekte realisiert wird.

Das heißt, jede Anforderungsspezifikation D kann zu einem hydraulischen Antrieb S transformiert werden, indem für jede Teilfunktion $f \in D$ eine hydraulische Achse A entworfen wird und, in einem zweiten Schritt, diese Achsen geeignet verschaltet werden.

Das Prinzip der funktionellen Komposition stellt eine Vereinfachung des Entwurfsprozesses dar, weil es die ganzheitliche Sicht des menschlichen Entwerfers vernachlässigt. Zwangsläufig muss dieses Prinzip daher zu suboptimalen Entwurfsergebnissen führen. Andererseits spricht aber einiges für dieses Vorgehen:

1. Auch der menschliche Entwerfer benutzt, wenn auch nicht ausschließlich, das Prinzip der funktionellen Komposition.
2. Das Prinzip der funktionellen Komposition macht eine Automatisierung des Entwurfs möglich.
3. Ob ein automatisch erzeugter Entwurf die Anforderungsspezifikation D realisiert, kann durch eine Simulation automatisch festgestellt werden.
4. Ein automatisch erzeugter Entwurf kann als Ausgangspunkt für Entwurfsüberlegungen des Menschen dienen.

Mit diesen Überlegungen stellt sich der Entwurfsprozess wie in Abbildung 6 dar.

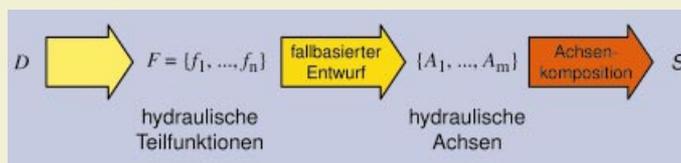


Abb. 6: Automatisches Entwerfen durch funktionelle Komposition: Die Anforderungsspezifikation D wird zerlegt in eine Menge von Teilfunktionen. Für jede Teilfunktion wird fallbasiert eine hydraulische Achse entworfen, die anschließend zu einem Antrieb verschaltet wird.

In dem so modifizierten Entwurfsprozess kann der Schritt $F \rightarrow \{A_1, \dots, A_m\}$ fallbasiert durchgeführt werden – vorausgesetzt, ein Ähnlichkeitsmaß für hydraulische Funktionen sowie Konzepte zur Anpassung ähnlicher hydraulischer Achsen existieren. Für beide Herausforderungen wurden Lösungen in unserer Arbeitsgruppe entwickelt, auf die hier nur illustrativ eingegangen wird [6].

Hydraulische Funktionen werden typischerweise durch Fahrprofile definiert. Ein Ähnlichkeitsmaß für hydraulische Funktionen muss also in der Lage sein, ein gewünschtes Sollfahrprofil mit vorhanden Fahrprofilen aus der Fallbasis zu vergleichen. Hierzu werden die Fahrprofile in Phasen zerlegt, zeitlich skaliert und entsprechend der Anpassbarkeit der Phasen bewertet (Abbildung 7).

Ein Fahrprofil ist anpassbar, wenn die zugrunde liegende hydraulische Achse so modifiziert werden kann, dass sie das Sollfahrprofil realisiert. Idealerweise spiegelt sich der für die Anpassung notwendige Aufwand direkt im Ähnlichkeitsmaß wider.

Die Anpassung von hydraulischen Achsen geschieht mit Hilfe von Skalierungs- und Modifikationsregeln. Sie kodieren Wissen über physikalische Zusammenhänge, Baugrößen und andere Randbedingungen. Das nachfolgende Beispiel zeigt eine Skalierungsregel, die für die geometrische Veränderung des Zylinders verantwortlich ist, falls die Kraft angepasst werden muss.

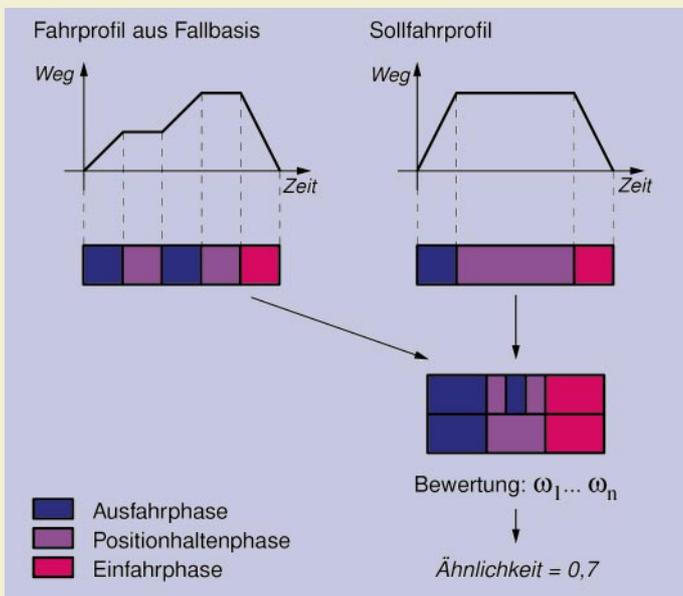


Abb. 7: Ein Ähnlichkeitsmaß für Fahrprofile (Prinzipiskizze).

Name FORCE-SCALING-RULE
 Actions $A_R := (F * A_R) / (A_K * P_{MAX})$
 $A_K := F / P_{MAX}$
 Qualifiers $F > 0$
 $A_K * P_{MAX} < F$

Realisierung und Ausblick

Der hier vorgestellte Ansatz zur Entwurfsautomatisierung hydraulischer Antriebe wurde in Form eines Entwurfsassistenten umgesetzt. Der Entwurfsassistent verfügt über eine Fallbasis mit hydraulischen Achsen und komplexen Antrieben; er realisiert das beschriebene Ähnlichkeitsmaß, die Skalierungs- und Modifikationsregeln und ein Kompositionsschema, um Achsen zu koppeln und zu einem Antrieb zu vervollständigen. Der Entwurfsassistent ist in der Lage, zu einer gegebenen Anforderungsspezifikation automatisch einen Antrieb zu konzipieren und den zugehörigen Schaltplan zu zeichnen.

Ingenieure haben uns bestätigt, dass die automatisch erzeugten Entwürfe sinnvoll sind und vom Menschen als Ausgangspunkt bei der Lösung komplexer Entwurfsprobleme genutzt werden können. Für einen umfangreichen Praxistest ist der Entwurfsassistent zurzeit nicht gerüstet; hierfür müssen in Zusammenarbeit mit Spezialisten die Fallbasis, die Skalierungs- und die Modifikationsregeln für einen konkreten Einsatzbereich zugeschnitten werden.

Entwicklung und Umsetzung des Entwurfsassistenten zeigen,

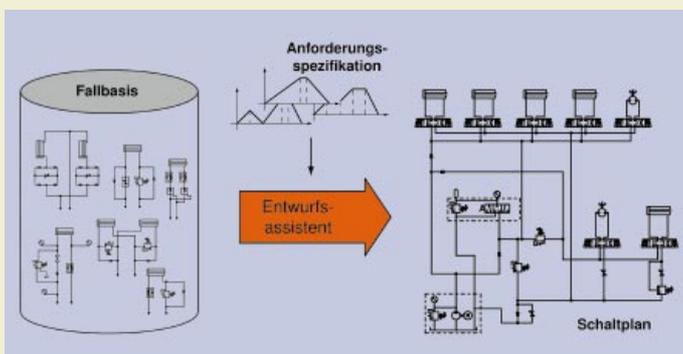


Abb. 8: Der Entwurfsassistent generiert zu einer Anforderungsspezifikation einen Schaltplan.

dass mit fallbasierten Techniken anspruchsvolles Entwurfswissen implementiert werden kann. Es zeigt sich aber auch, dass der fallbasierte Ansatz hierfür kein Patentrezept liefert, sondern mit hohem technischen Sachverstand für die jeweilige Aufgabe spezialisiert werden muss.

Literatur

- [1] Aamodt and E. Plaza. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. AICOM, Seite 39-59, 1994.
- [2] R. Barletta and D. Hennessy. Case Adaptation in Autoclave Layout Design. In K. J. Hammond, Editor, Proceedings: Case-Based Reasoning Workshop, Seite 203-207. Morgan Kaufmann Publishers, 1989.
- [3] J. G. Carbonell. Derivational Analogy: a Theory of Reconstructive Problem Solving and Expertise Acquisition. In R. Michalski, J. Carbonnel, and T. Mitchell, Editoren, Machine Learning: an Artificial Intelligence Approach, Band 2, Seite 371-392, Los Altos, CA, Morgan Kaufmann Publishers, 1996.
- [4] J. S. Gero. Design Prototypes: A Knowledge Representation Scheme for Design. AI Magazine, 11:26-36, 1990.
- [5] T. R. Hinrichs and J. L. Kolodner. The Roles of Adaptation in Case-Based Design. In Proceedings AAAI-91. Cambridge, MA: AAAI Press/MIT Press, 1991.
- [6] M. Hoffmann. Zur Automatisierung des Designprozesses fluidischer Systeme. eingereichte Dissertation, Universität Paderborn, Fachbereich Mathematik und Informatik, 1999.
- [7] J. Kolodner. Maintaining Organization in a Dynamic Long-Term Memory. Cognitive Science, 7(4), 1983.
- [8] J. Kolodner. Case-Based Reasoning. San Mateo, CA, Morgan Kaufmann Publishers, 1993.
- [9] D. B. Leake. Case-Based Reasoning: Issues, Methods, and Technology, 1995.
- [10] M. M. Richter. Introduction to CBR. In M. Lenz, B. Bartsch-Spörl, H.-D. Burkhard, and S. Weß, Editoren, Case-Based Reasoning Technology. From Foundations to Applications, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1400, Seite 1-15. Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [11] R. Schank and R. Abelson. Scripts, Plans, Goals and Understanding. Erlbaum, Hillsdale, New Jersey, 1977.
- [12] R. C. Schank. Dynamic Memory: A Theory of Learning in Computers and People. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1982.
- [13] B. Stein. Functional Models in Configuration Systems. Dissertation, Universität Paderborn, Fachbereich Mathematik und Informatik, 1995.
- [14] B. Stein. Optimized Design of Fluidic Drives – Objectives and Concepts. Technical Report tr-ri-97-189, Universität Paderborn, Fachbereich Mathematik und Informatik, Aug. 1996.
- [15] B. Stein and M. Hoffmann. On Adaptation in Case-Based Design. In Proceedings of the third International ICSC Symposia on Soft Computing (SOCO '99). ICSC Academic Press, 1998.
- [16] I. Watson. Applying Case-Based Reasoning: Techniques for Enterprise Systems. Morgan Kaufmann Publishers, 1997.

- [17] S. Weiß. Fallbasiertes Problemlösen in wissensbasierten Systemen zur Entscheidungsunterstützung und Diagnostik/Grundlagen, Systeme und Entscheidungen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1995.

Fußnote

- ¹ Wie funktioniert der Saftflaschentrick? Durch den Schlag auf

die Flasche erfährt der Saft einen Impuls, der wiederum zu einer Kraft und somit zu einer (elastischen) Verformung des Deckels führt. Durch die entstandene Druckwelle wird etwas Flüssigkeit durch die Dichtung gequetscht, die die potenzielle Verklebung zwischen Deckel und Flasche löst. Eventuell kann zusätzlich durch das kurzzeitige Abheben des Deckels ein (teilweiser) Druckausgleich zwischen Flasche und Umgebung stattfinden.

Berechnung dreidimensionaler Strömungen auf massiv parallelen Computersystemen

Eine Herausforderung für Mathematik und Informatik

Messungen im Windkanal sind nicht nur aufwendig. Sie verursachen gleichzeitig sehr hohe Kosten. Daher tritt an die Stelle der ursprünglichen Messungen immer öfter die Berechnung dreidimensionaler Strömungen mit Hilfe leistungsstarker Rechner. Wie diese in ihrer Bedeutung für den technischen Fortschritt kaum zu überschätzende Entwicklung möglich wurde und wie moderne Computer mit parallelisierten Rechenprogrammen und Visualisierungssoftware Strömungen im Detail sichtbar machen, wird im folgenden kurz berichtet.

Die Navier-Stokesschen Gleichungen:

Der Schlüssel zu moderner Technikentwicklung

ἄεὶ πάντα ῥεῖ – alles strömt allezeit – sagte Heraklit schon vor 2500 Jahren. Aber trotz der altbekannten universellen Bedeutung von Strömungsvorgängen ließ ihr rationales Verständnis lange auf sich warten. Noch vor etwas mehr als 100 Jahren bemerkte ein angesehenes englischer Wissenschaftler: „Fluid dynamicists were divided into hydraulic engineers who observed what could not be explained, and mathematicians who explained things that



Prof. Dr. Reimund Rautmann ist seit 1975 Professor für Mathematik im Fachbereich 17/Mathematik, Informatik an der Universität Paderborn (seit 1996 emeritus). Seine Hauptarbeitsgebiete sind partielle Differentialgleichungen, dynamische Systeme und ihre Anwendungen in der Strömungslehre.



Prof. Dr. Wolfgang Borchers ist seit 1996 Professor für Mathematik am Institut für Angewandte Mathematik an der Universität Erlangen-Nürnberg, war bis Ende 1996 Mitglied im Fachbereich Mathematik, Informatik an der Universität Paderborn und ist beratendes Vorstandsmitglied des PC².

could not be observed” [C. Hinshelwood, aus G. Birkhoff 1960]. Inzwischen kann ein Fluggast, der beim Start die elastischen Tragflügel seines Jumbo-Jets beobachtet, darauf vertrauen, dass Flügelform und -verformung für jede zu erwartende Belastung mit Hilfe von Computerprogrammen vorausberechnet und die Flügel dementsprechend mit großen Sicherheitsfaktoren konstru-

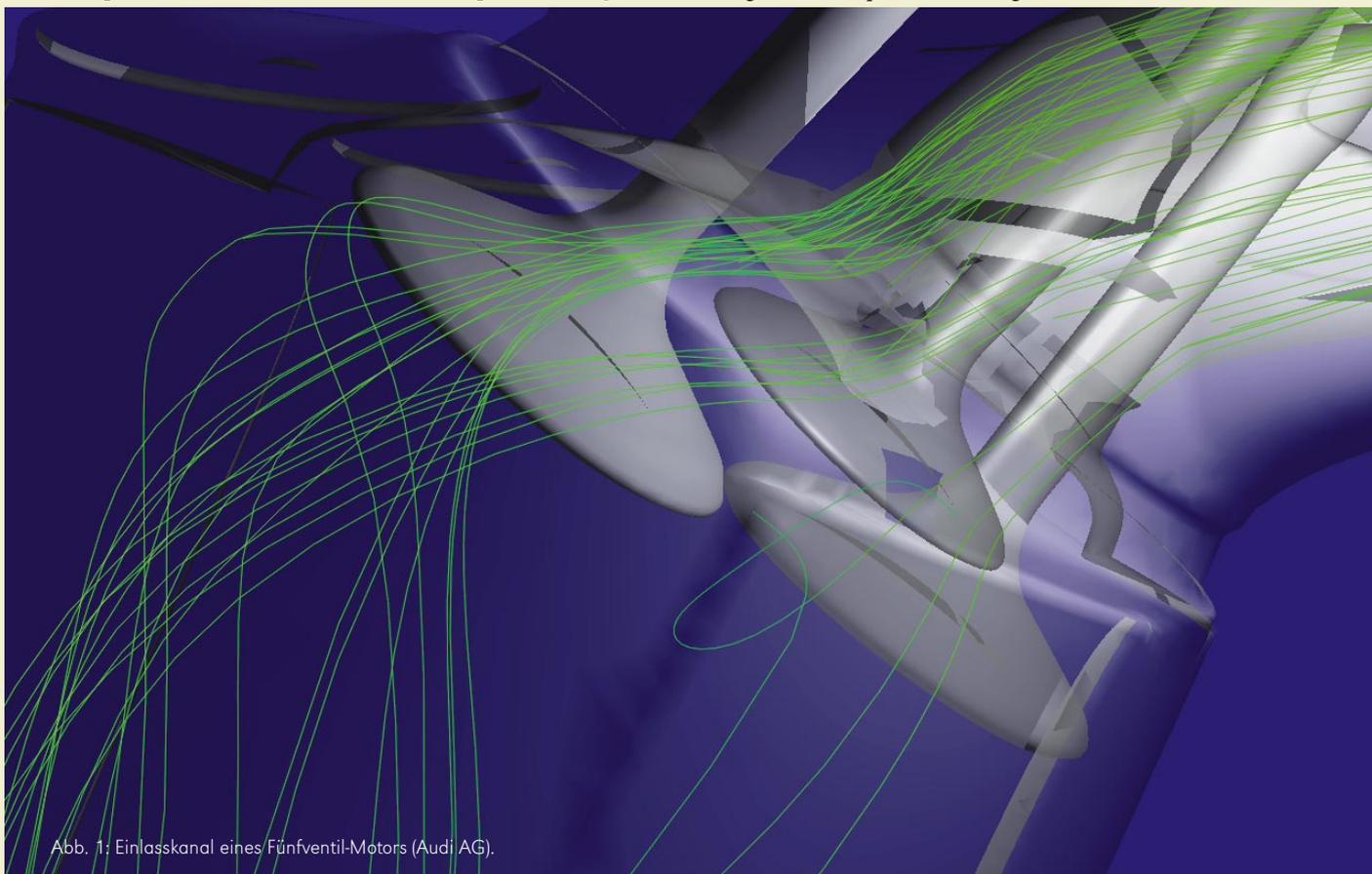


Abb. 1: Einlasskanal eines Fünfventil-Motors (Audi AG).

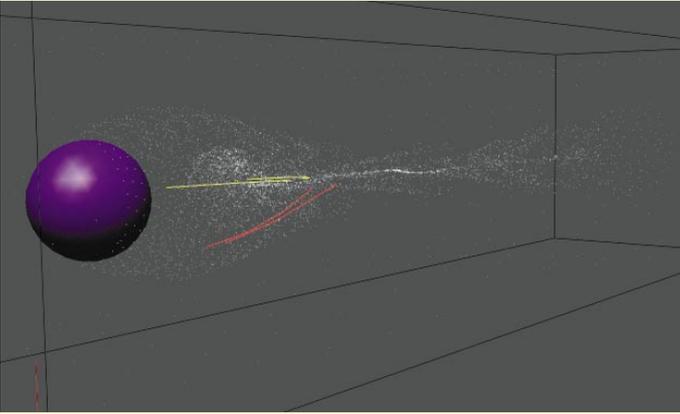


Abb. 2: Partikelbahnen in einer Kugelumströmung, gerechnet mit einem Splitting-Programm (DFG-Projekt).

iert worden sind. Ebenso werden zweckmäßige Formen von Autokarosserien oder Schiffskörpern mit Computerprogrammen ermittelt. Kraftstoffsparende und Schadstoffausstoß reduzierende technische Neuentwicklungen im Motorenbau haben sich aus Computersimulationen der Verbrennungs- und Strömungsvorgänge in einem Motorzylinder ergeben, denn auf diese Weise lassen sich wesentliche Details des zeitlichen Verlaufs vielfach besser und genauer als im Experiment beobachten. Auch Abkühlungsprozesse, die bei der Entwicklung von Computerchips eine Rolle spielen, können mit den zur Strömungsberechnung entwickelten Methoden vorausberechnet werden.

Die inzwischen verfügbare enorme Rechnerkapazität bildete zusammen mit den in Wechselwirkung mit der Hard- und Softwareentwicklung während der letzten Jahrzehnte geschaffenen völlig neuartigen numerischen Methoden natürlich eine unentbehrliche Grundlage dieses erstaunlichen Fortschritts. Seine theoretischen Voraussetzungen waren die grundlegenden Einsichten von Cauchy, Helmholtz, Navier, Prandtl, Reynolds und Stokes (um nur einige bekannte Namen zu nennen) in die Natur reibender, d.h. viskoser Strömungen. Erst mit dem Übergang von den Eulerschen hydrodynamischen Gleichungen (die Impuls- und Massenerhaltung in einer Strömung beschreiben, aber die Reibung vernachlässigen) zu den Navier-Stokeschen Gleichungen konnten so verwirrende Widersprüche wie das in Birkhoffs Buch beschriebene Stokesche Paradoxon überwunden und ein für viele wichtige Formen realer Strömungen gültiges mathematisches Modell geschaffen werden.

Da hilft nur Parallelisierung: Diskretisierungsansätze, die Megabyte-Informationen benötigen

In einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekt entwickeln wir gemeinsam mit einer Arbeitsgruppe in Nizza ein parallelisiertes Computerprogramm für die Navier-Stokesche Anfangs-Randwertaufgabe:

- (1) $\frac{\partial}{\partial t} u + u \cdot \nabla u - \frac{1}{Re} \Delta u + \nabla p = f,$
- (2) $\nabla \cdot u = 0,$
- (3) $u = 0$ auf dem Rand,
- (4) $u = u_0$ zur Anfangszeit $t = 0.$

Die nichtlineare partielle Differentialgleichung (1) beschreibt, wie die Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit u und des kinematischen Druckes p in einer Strömung konstanter Massendichte unter dem Einfluss einer Kraft der Dichte f zusammenhängen. Die Kontinuitätsgleichung (2) drückt die Massenerhaltung aus. Der jeweilige Wert der dimensionslosen Reynoldsschen

Zahl $Re > 0$ beeinflusst maßgeblich den Strömungsverlauf: $Re \approx 0$ lässt eine glatte „laminare“, großes Re eine turbulente Strömung erwarten. In Strömungen um große und schnelle Verkehrsflugzeuge erreicht Re Werte zwischen 10^6 und 10^8 . Am Rand des Strömungsbereichs haftet die Strömung aufgrund der Reibungskräfte (Gleichung (3)), und am Anfang, zur Zeit $t = 0$, ist die Geschwindigkeit $u = u_0$ im ganzen Bereich vorgeschrieben. Explizite Lösungen dieser Aufgabe gibt es nur für wenige spezielle Fälle, z.B. für die Poiseuillesche Strömung zwischen ebenen parallelen Wänden eines Kanals. Im allgemeinen Fall müssen wir mit numerischen Verfahren für Geschwindigkeit und Druck möglichst genaue Zahlenwerte an möglichst vielen Punkten des Strömungsbereiches zu vielen Zeitpunkten berechnen. Dazu überführen wir die Anfangs-Randwertaufgabe durch eine geeignete Diskretisierungsmethode in ein System von N (nichtlinearen) Gleichungen in N Unbekannten: Beim finiten Differenzenverfahren überdecken wir das Strömungsgebiet mit einem Punktgitter und ersetzen alle partiellen Ableitungen in (1) und (2) durch Differenzenquotienten, die jeweils mit den Gitterpunktständen und einer geeigneten Zeitschrittlänge gebildet werden. Die so erhaltenen Differenzgleichungen müssen in jedem einzelnen Gitterpunkt erfüllt werden. Die Anzahl der Gleichungen und Unbekannten ist also proportional zur Anzahl der Gitterpunkte.

Bei der Methode der finiten Elemente wird das Ausgangsproblem näherungsweise mit Methoden der Funktionalanalysis in einer schwachen Formulierung gelöst. Wichtiges Hilfsmittel dazu ist die Aufteilung des Strömungsgebietes in kleine, geometrisch einfache Teilgebiete, die sogenannten finiten Elemente. Beim Tschebyscheff-Spektralverfahren wird die Lösung durch Tschebyscheff-Polynome approximiert, die eine besonders genaue Darstellung der gesuchten Lösung liefern. Diese für die numerische Lösung partieller Differentialgleichungen grundlegenden Verfahren werden z.B. in dem Buch von Schwarz ausführlich dargestellt.

Die Dimension der aus der Diskretisierung der Navier-Stokes-Gleichung resultierenden Systeme ist normalerweise so groß, dass sie effizient nur auf Computersystemen gelöst werden können, in denen auf mehreren miteinander kommunizierenden Prozessoren gleichzeitig („parallel“) verschiedene Teile des Rechenprogramms ablaufen. Wir parallelisieren unsere Rechnungen auf einem kanalähnlichen Gebiet mit einer von W. Borchers entwickelten Gebietszerlegungsmethode. Wir zerlegen dabei das gegebene Gebiet in mehrere Teilgebiete und lösen dann parallel

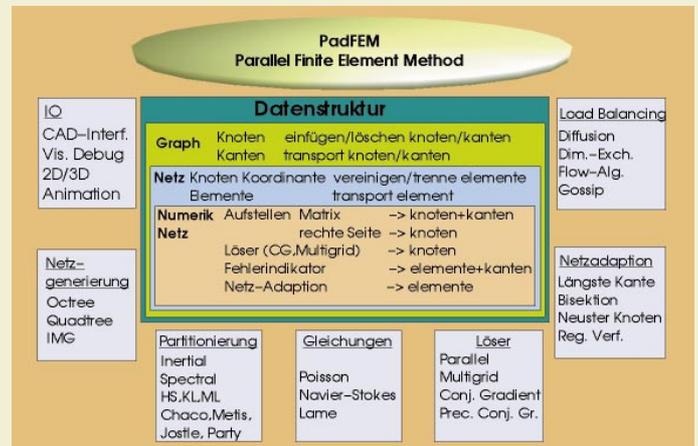


Abb. 3: Struktur der Hauptmodule von PadFEM.

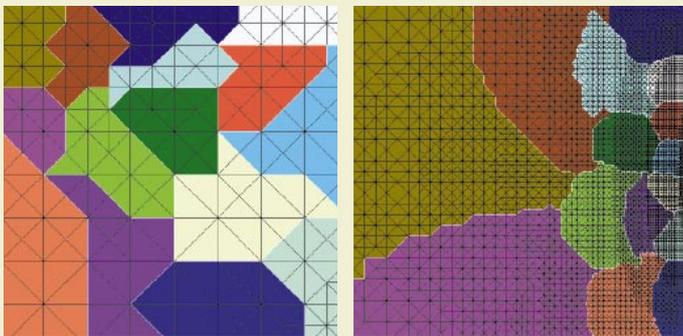


Abb. 4a und 4b: Simulation einer Wärmeverteilung: a) Initialnetz mit einer zufälligen Startpartitionierung, b) Netz nach 10 Verfeinerungen.

lokale Teilprobleme. Als lokale Löser können wir sowohl ein in Nizza entstandenes sehr genaues Spektralverfahren als auch ein in Paderborn entwickeltes Finite-Differenzen-Verfahren auswählen. Ein Finite-Elemente-Programm, mit dem Randwertaufgaben auch in Gebieten komplizierter Geometrie gelöst werden können, ist im Rahmen einer Diplomarbeit in Paderborn entwickelt worden.

**Adaptive Gittererzeugung:
Der Computer liefert Gitter nach Maß**

Ein Blick auf die Strömungsbilder (Abbildungen 2 und 5a) zeigt, dass schon bei recht einfachen geometrischen Konfigurationen mit starken Schwankungen der Lösungen (hier Geschwindigkeiten und Partikelbahnen) zu rechnen ist. Ursache dieser Schwankungen sind Wirbelbildungen und -ablösungen in der Umgebung von festen Wänden, den sogenannten Grenzschichten. Diese Wirbel entsprechen in manchen Fällen lokalen Tiefdruckgebieten. Bei kleiner innerer Reibung bzw. hohen Strömungsgeschwindigkeiten (hohen Reynoldszahlen) der strömenden Flüssigkeit nimmt die Intensität der Wirbelbildung zu, bis in der Regel schlagartig eine turbulente Strömung einsetzt. Für die Technik interessant sind gerade diese „chaotischen Strömungsformen“ und die Bedingungen, unter denen sie (bei höheren Reynoldszahlen) auftreten. Als Beispiel ist die Kugelumströmung (siehe Abbildung 2) zu einer Reynoldszahl von 1 000 gerechnet worden.

Wie müssen nun stabile Rechenverfahren ausgelegt sein, um verlangte Genauigkeiten zuverlässig garantieren zu können? Die

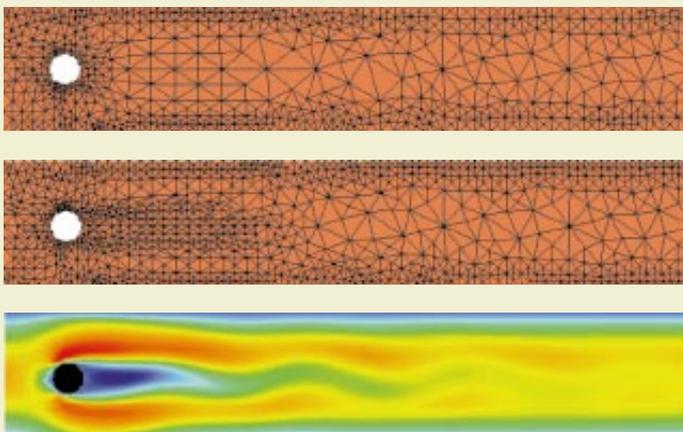


Abb. 5a, b und c:
a) Grobes Gitter im Kanal. b) Feines Gitter im Kanal. c) Karmansche Wirbelstraße im Kanal hinter einem Kreisprofil. Stationäre Anströmung mit Poiseuille-Profil, $Re = 100$. Farbliche Kennzeichnung: Rot = hohe Strömungsgeschwindigkeit → Gelb → Grün → Blau = niedrige Strömungsgeschwindigkeit.

schwierig aufzulösenden, kleinen turbulenten Strukturen sind (siehe Abbildung 5c) keineswegs gleichmäßig verteilt, sondern entstehen und „schwimmen“ in bestimmten Strömungsbereichen. Nur hier benötigt man entsprechend angepasste feinere Maschenweiten. Ein gleichmäßig feines Netz wäre nicht effizient und würde zudem auch bei moderaten Reynoldszahlen die Rechenkapazität von Supercomputern sprengen. Dies erfordert, dass das Rechenverfahren die kritischen Bereiche automatisch erkennt und danach das Rechenetz adaptiert.

An der Universität Paderborn wurde ein Werkzeug zur Behandlung von Problemen aus der Strömungs- und Strukturmechanik im Rahmen des Sonderforschungsbereich 376 „Massive Parallelität“ unter dem Namen PadFEM (Parallel adaptive Finite Element Method) entwickelt, das diese automatische Maschenweitensteuerung enthält (Abbildung 3). Die objektorientierte Umgebung dieses Computerprogramms basiert auf einer allgemeinen Implementierung eines partitionierten Netzes, welches Knoten, Kanten und Elemente (Module) enthält. Sämtliche notwendigen Daten zur parallelen Berechnung einer Simulation werden in dieser Struktur bereit gehalten. PadFEM bietet eine vielseitige Umgebung, in der transparente Funktionalitäten wie Speichermanagement, adaptive Netzverfeinerung und das Bewegen von Objekten berücksichtigt werden. Die bereitgestellten Module umfassen einen 2D-Netzgenerator FEM-It^{2D}, Löser für lineare Gleichungssysteme, Matrixaufstellung, Fehlerindikation, Netzverfeinerung, Lastbalancierung und Visualisierung (XFEM). Weitere Informationen über den Status können unter der WWW-Adresse¹ abgerufen werden. Die Abbildungen 4a und 4b zeigen die Simulation einer Wärmeverteilung, wobei Abbildung 4a das Initialnetz mit einer zufälligen Startpartitionierung und Abbildung 4b das Netz nach 10 Verfeinerungen darstellt. Deutlich erkennbar ist die lösungsabhängige Lastbalancierung bzw. Partitionierung. Beide Darstellungen, Netz wie auch Lösungen, sind interaktiv mit XFEM während der Rechnung möglich, so dass eine grafische Kontrolle gegeben ist. Mathematische Modellprobleme dieser Art dienen allerdings nur zur Verifikation der entwickelten und implementierten Methoden, da hier eine analytische Lösung bereits bekannt ist. Abbildung 5c zeigt aber die Simulation der Karmanschen Wirbelstraße als Lösung der vollen nichtlinearen und instationären Navier-Stokes-Gleichung. Das dreidimensionale Analogon ist in Abbildung 2 zu sehen.



Abb. 6: Powerstream: Arbeitsumgebung mit 3D-Ein- und Ausgabegeräten. Am Computer Dipl.-Math. Ralph Bruckschen.

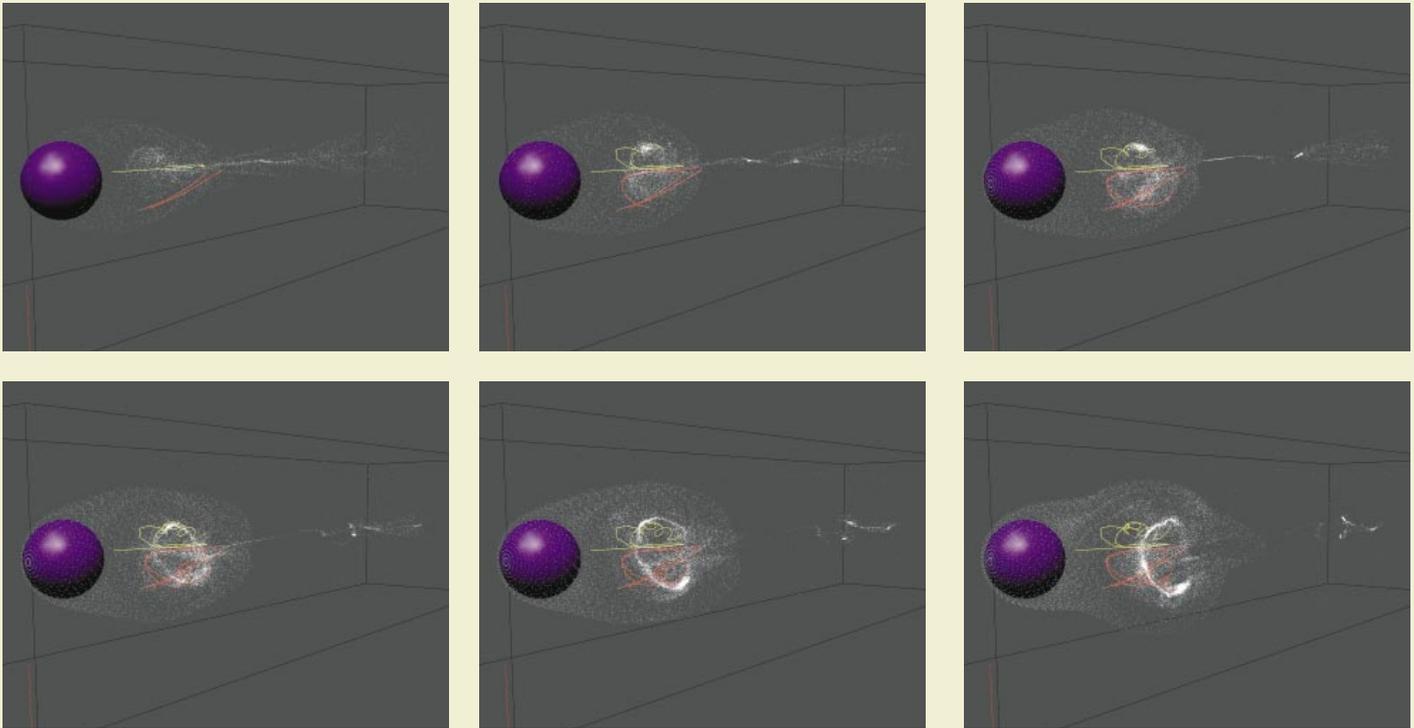


Abb. 7: Partikelbahnen in einer Kugelumströmung, Momentbilder in zeitlicher Folge (DFG-Projekt).

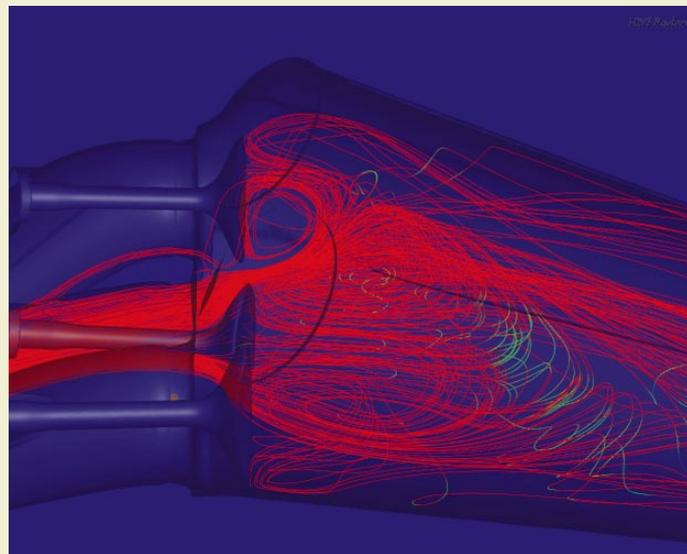
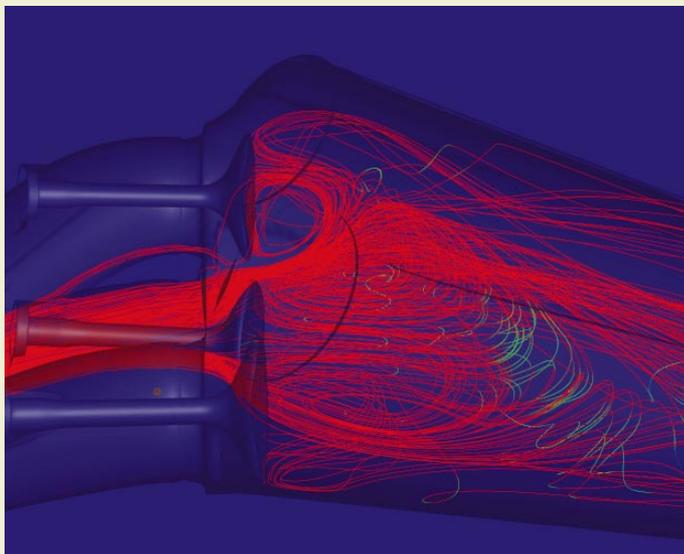
Strömungssimulation und Visualisierung: Wie der Computer Details einer Strömung sichtbar macht

Die Visualisierungs-Software „Powerstream“ erlaubt es, mit Virtual-Reality-Methoden interaktiv Strömungen zu visualisieren. Ähnlich wie in einem virtuellen Windkanal kann der Anwender technische Strömungsprobleme an virtuellen Prototypen betrachten (Abbildung 6). Mit einer virtuellen Nebellanze werden Partikel in die Strömung gestreut, deren Verhalten direkt beobachtet werden kann. Die genaue Lokalisierung der Partikel im Raum wird durch ein stereoskopisches Display ermöglicht. Die zu verarbeitenden Strömungsdaten werden zuvor mit einem der erwähnten Diskretisierungsansätze berechnet. Eine besondere Herausforderung liegt in der Verarbeitung der zum Teil mehrere Gigabyte großen Datensätze. Die rechnergestützte Simulation erlaubt die Analyse und Optimierung von technischen Strömungsproblemen ohne kostspielige Experimente in einem realen Windkanal. Das Projekt „Powerstream“ entstand aus DFG-Projekten im Forschungsschwerpunkt „Strömungssimulation mit Hochleistungsrechnern“ (Arbeitsgruppe Borchers-Rautmann) und im DFG-Sonderforschungsbereich 376. Darauf aufbauend ist in Zusammenarbeit mit dem Heinz-Nixdorf-Institut, der Unity AG (Paderborn) und Vircinity GmbH (Stuttgart) ein vielseitig einsetzbares Toolkit zur Visualisierung von Strömungen auf verteilten Rechnern entstanden. Powerstream wurde in verschiedenen Forschungsk Kooperationen mit der Audi AG und der Volkswagen AG erfolgreich eingesetzt.

Zukunftsperspektiven und offene Forschungsfragen

Ein Ingenieur beurteilt die Ergebnisse einer Strömungsberechnung in erster Linie nach ihrer Übereinstimmung mit Messergebnissen aus entsprechenden Experimenten. Da die Navier-Stokesschen Gleichungen in weiten Bereichen ihrer physikalischen Parameter gültig sind, müsste im Prinzip auf hinreichend feinmaschigen Gittern ein realer Strömungsverlauf beliebig

genau berechnet werden können. Gleichmäßig verfeinerte Gitter, doch letzten Endes auch adaptive Gitter, die nur in kritischen Bereichen sehr feinmaschig sind, führen allerdings bei dreidimensionalen Aufgaben leicht zu Millionen oder Milliarden von Gitterpunkten. Darüber hinaus wachsen die Anforderungen mit der Notwendigkeit, immer komplexer werdende Modelle aus den ingenieurwissenschaftlichen Bereichen zu betrachten. Es gibt nicht wenig Anwendungen, die zusätzlich zu den Strömungsgleichungen noch Hunderte von gekoppelten partiellen Differentialgleichungen zu ihrer Beschreibung erfordern. Die resultierenden nichtlinearen Gleichungssysteme mit einer solchen Zahl von Unbekannten überfordern auch die größten derzeit verfügbaren Supercomputer. Für die Zukunft werden deshalb von der Informatik noch leistungsfähigere Rechnerarchitekturen, von der Angewandten Mathematik entsprechende, noch effizientere Parallel-Rechenverfahren hoher Konvergenzordnung erwartet. Wegen der Rundungsfehler müssen diese numerischen Verfahren unbedingt stabil sein, und da stabile Approximationsverfahren hoher Konvergenzordnung einen hohen Regularitäts- und Stabilitätsgrad der Lösung erfordern, gewinnt die Regularitäts- und Stabilitätstheorie der Navier-Stokesschen Gleichungen zunehmend praktische Bedeutung. Damit stoßen wir auf aktuelle Forschungsfragen: In der Technik besonders wichtig sind instabile Strömungsformen (z.B. instabile Flugzustände). Wie kann man sie zuverlässig, d.h. mit stabilen numerischen Verfahren berechnen? Bei hohen Reynoldszahlen, wie sie typischerweise in Strömungen um große Verkehrsflugzeuge auftreten, herrschen chaotische („turbulente“) Strömungsverhältnisse mit starken, sehr unregelmäßigen, also irregulären Fluktuationen der Strömungsgrößen. Die Theorie dieser Strömungsphänomene und Ansätze zu ihrer numerischen Simulation führen mitten in die faszinierende Welt der chaotischen dynamischen Systeme, die derzeit einen der Schwerpunkte der internationalen Forschung bilden.



Mit freundlicher Genehmigung der UNITY AG, Paderborn.

Abb. 8: Stereoskopisches Paar des Einlasskanals eines Fünfventil-Motors (Audi AG). Anleitung: Zwischen die Bilder ein Blatt halten und versuchen, die beiden Bilder zu einem 3D-Bild zu verschmelzen.

Literatur

Birkhoff, G.: Hydrodynamics, a study in logic, fact, and similitude, Princeton 1950.

St. Blazy; W. Borchers; U. Dralle: Parallelization Methods for a Characteristic's Pressure Correction Scheme, in: Flow simulation with high-performance computers II (E.H. Hirschel, Ed.), Notes on Numerical Fluid Mechanics, Vol. 52, Braunschweig: Vieweg 1996.

W. Borchers; M. Y. Forestier; S. Kräutle; R. Pasquetti; R. Peyret; R. Rautmann; N. Roß; C. Sabbah: A parallel hybrid highly accurate elliptic solver for viscous flow problems, in: Numerical Flow Simulation I, CNRS/DFG collaboratory research program, results 1996-1998, E.H. Hirschel (ed.), Vieweg 1999.
 W. Borchers; G. Domik; D. Kröner; R. Rautmann; D. Saupe (eds.): Visualization Methods in High Performance Computing and Flow Simulation, Proceedings of the International Workshop on Visualization, Paderborn 1994, VSP Utrecht-TEV Vilnius 1996.

Heracleitus, Vorsokratische Denker, Kranz, W., (ed.). Berlin-Frankfurt/Main: Weidmannsche Verlagsbuchhandlung 1949.

R. Rautmann: Navier-Stokes Approximations in High Order Norms, in: Flow simulation with high-performance computers II (E.H. Hirschel, ed.), Notes on Numerical Fluid Mechanics, Vol. 52, Braunschweig: Vieweg 1996.

H. R. Schwarz: Numerische Mathematik, 4. Auflage, Stuttgart: B.G. Teubner 1997.

Fußnoten

¹ <http://www.uni-paderborn.de/fachbereich/AG/monien/SOFTWARE/PADFEM/>



Die Arbeitsgruppe im DFG-Projekt „Strömungsberechnung“ (v.l.): **Dipl.-Math. Serge Kräutle, Dr. Nicole Roß, Prof. Dr. Wolfgang Borchers, Dipl.-Math. Kerstin Wielage, Prof. Dr. Reimund Rautmann.** Es fehlen **Dipl.-Math. Stephan Blazy (PC²) und Dipl.-Math. Ralph Bruckschen.**

Das Stadtspiel

Eine virtuelle Umgebung für den Geometrieunterricht der Primarstufe

„Das Stadtspiel“ ist eine virtuelle Umgebung, die in einem interdisziplinären Projekt zwischen der Mathematik-Didaktik und der Informatik (Prof. Dr. Gitta Domik & Dipl. Inf. Sabine Volbracht) an der Universität Paderborn entwickelt wird. Die Förderung der „räumlichen Orientierung“ ist ein zentraler Inhalt des Geometrieunterrichts der Grundschule. Im „alten Medium“ Schulbuch werden dazu Aufgaben z.B. Orientierung auf Karten und Plänen und zur Bestimmung von Lagebeziehungen u.v.a.m. angeboten. Aufgaben-Typen dieser Art sind nur wirksam in Verbindung mit zeitaufwendigen realen Erkundungen der Umgebung. Die Untersuchung geht davon aus, dass bei geeigneter Gestaltung der Software, Neue Medien eine Mittlerrolle im Unterricht einnehmen können. Dazu wurde die Szenerie einer virtuellen Stadt entwickelt. Kinder der 4. Klasse und Studierende haben verschiedene Aufgabentypen zu diesem Themengebiet erprobt. Das Augenmerk der Untersuchungen richtete sich zum einen auf „Orientierungspunkte“, die von den Probanden ausgewählt wurden, zum anderen auf einen Vergleich zwischen Aufgabentypen, die sowohl in der „virtuellen“ als auch in der „realen“ Umgebung bearbeitet wurden.

Räumliche Orientierung in einer virtuellen Umgebung

Die Diskussion um den Einsatz des Computers als ein neues Medium im Unterricht, auch im Mathematikunterricht der Grundschule, wird seit einigen Jahren lebhaft geführt. Wirft man einen Blick auf den Software-Markt, so erscheint dieser bezüglich arithmetischer Themen geradezu übersättigt, während er für den Geometrieunterricht der Primarstufe bisher allerdings nur spärlich besetzt ist.

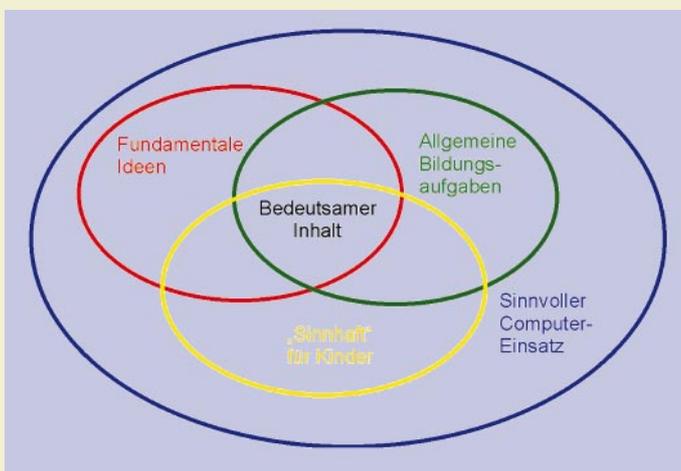
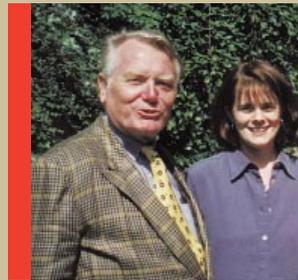


Abb. 1: Kriterien für die Auswahl eines geometrischen Inhalts.



Prof. Dr. Hans-Dieter Rinkens ist seit 1973 Professor für Mathematik und ihre Didaktik im Fachbereich 17/Mathematik, Informatik und seit 1996 Vorsitzender des PLAZ (Paderborner Lehrerausbildungszentrum). **Dorothea Backe-Neuwald** ist wissenschaftliche Angestellte in der Arbeitsgruppe „Mathematik und ihre Didaktik“.

Die vorgestellte Untersuchung ist Teil ihrer Dissertation.

Wie sollte eine Software für den Geometrieunterricht der Grundschule aussehen? Hier stellt sich zunächst die Frage des geometrischen Inhalts (Abbildung 1).

Ein Inhalt,

- der – aus Sicht der Geometrie – auf zentralen, bzw. fundamentalen Ideen basiert (Idee der Symmetrie, Idee des Passens und Idee der Verortung im Raum),
- der sich an den allgemeinen Bildungsaufgaben der Grundschule orientiert und einem Konzept von Geometrieunterricht als eines in erster Linie fächerverbindenden und umweltorientierten Unterrichts Rechnung trägt,
- der für Kinder „sinnhaft“ ist, d.h. Relevanz für ihre aktuelle Lebenssituation hat und ihr Interesse weckt,

ist das Thema „räumliche Orientierung“, das darüber hinaus die medienspezifischen Möglichkeiten des Computers voll ausschöpfen kann und eine dreidimensionale Darstellung einer Szene geradezu erzwingt.

Die Aufgaben-Beispiel in dem „alten Medium“ Schulbuch zum Themenbereich „räumliche Orientierung“, dienen uns als Anregungen zur Entwicklung von Spielformen, die Raumerfahrungen in einer virtuellen Umgebung erlebbar machen sollen.

An diese „Umgebung“ bzw. Szenerie wurden folgende Anforderungen gestellt (Abbildung 2):

- Die virtuelle Umgebung sollte die Einkleidung einer Stadt erhalten, da die Orientierung in einer Stadt und an Stadtplänen zu den Grundschulthemen gehört.
- Die Stadt sollte im Hinblick auf typische Gebäude und Gegenstände sowie im Hinblick auf ihre Struktur möglichst realistisch sein.
- Zudem soll die Stadt voll Leben sein, d.h. nicht nur starre Gebäude und Gegenstände enthalten, sondern auch belebte



Abb. 3: Der Stadtkern.

Objekte wie z.B. andere Fußgänger, Fahrzeuge etc.

- Das Bewegen, das Wandern durch die dreidimensionale Stadt sollte für den Anwender „Grundschulkind“ zum einen möglichst einfach in der Handhabung sein und zum anderen hinsichtlich der Bildfolge möglichst intuitiv den natürlichen Bewegungsfluss des Gehens oder Fahrens wiedergeben.
- Weiterhin sollte die virtuelle Stadt verschiedene Spielformen zum Thema „räumliche Orientierung“ ermöglichen, vor allem solche, die bisher nicht oder nur ansatzweise mittels Schulbuch transportiert werden konnten.
- Zudem sollten verschiedene Orientierungshilfen das Lösen der Aufgaben unterstützen. Zum Beispiel sollen ein Stadtplan als Hard-Copy, sowie eine Draufsicht die Beziehungen zwischen verschiedenen 2D-Darstellungen und der 3D-Stadtscene erfahrbar werden lassen. Darüber hinaus soll auch eine animierte Windrose als Hilfe dienen.

Den Mittelpunkt der virtuellen Stadt bildet – wie kann es bei einem Paderborner Projekt anders sein? – eine Kirche, um die sich ringförmig kleine (Fachwerk-)Häuser, die Grundschule, das Rathaus und ein Klosterkomplex gruppieren (Abbildung 3). Dieser Stadtkern, durch den Kopfsteinpflasterwege führen, wird durch einen äußeren Straßenring erweitert. Hier befinden sich verschiedene öffentliche Gebäude und Geschäfte wie z.B. ein Supermarkt („Lidl“), ein Fastfood-Restaurant („Mc Donald’s“), eine Tankstelle („Aral“), ein Kino und das Museum (Abbildungen 5 und 7). Weiter außerhalb gelangt man zu einer aus Ein- und Mehrfamilienhäusern bestehenden Wohnsiedlung. Diverse Telefonzellen, Plakatwände, Litfaßsäulen, Straßenlampen, Parkbänke, Bäume und Sträucher komplettieren das Stadtbild. Die Stadt-Szenerie wurde mit Hilfe der Modellierungssprache Virtual Reality Modelling Language (VRML) unter Verwendung von verschiedenen Texturen und Farben erstellt. VRML zeichnet

sich vor allem durch seine Plattformunabhängigkeit aus und bietet auch eine vereinfachte Möglichkeit für Multiuser-Welten. Als Entwicklungs-Tools wurden Cosmo-Worlds und 3-D-Studio Max verwendet. Die Stadt wurde durch Echtzeit-Animationen belebt, mit denen wir schnell an die Grenzen der Performance stießen (Abbildung 4).

Es wurde eine eigene Interaktionsleiste implementiert: Mit Hilfe einer Standard-Maus und verschiedener Richtungsbuttons bewegt sich der Besucher durch die virtuelle Stadt. Blickwinkel und Bewegungsgeschwindigkeit können individuell variiert werden.

Zusätzlich lassen sich mittels der Interaktionsleiste die Hilfen „Draufsicht“ und „Windrose“ aktivieren (Abbildung 6).

Die Draufsicht zeigt dem Benutzer seinen aktuellen Standort und zeichnet auf Wunsch auch den bisher zurückgelegten Weg (Sput) ein.

Erprobung mit Kindern und Erwachsenen

Dieser Prototyp des „Stadtspiels“ war Gegenstand zweier erster



Abb. 2: Anforderungs- und Realisierungsaspekte.

Modellierungssprache:	Virtual Reality Modelling Language (VRML)
Entwicklungs-Tool:	Cosmo-Worlds™ und 3D Studio MAX™
Stichwort „Modellierung“:	Geometrische Modellierung von 3D-Körpern; Verwendung von verschiedenen Farben und Texturen zur Oberflächengestaltung
Stichwort „Navigation“:	Implementierung einer eigenen Bewegungskontrolle; Standard-Maus mit Richtungsbutton als Bewegungshilfe
Stichwort „Animation“:	Einbindung von Echtzeit-Animationen

Abb. 4: Einige technische Daten.

Untersuchungen, die im Rahmen von Staatsarbeiten durchgeführt wurden:

- Verhalten in einer virtuellen Umgebung: Kinder und Erwachsene,
- Kinderverhalten im Vergleich: virtuelle und reale Umgebung.

In einer Pilotstudie nahmen zehn Grundschul Kinder eines vierten Schuljahres und zehn Studierende der Universität Paderborn als Probanden teil.

In Einzelversuchen wurden ihnen jeweils fünf Aufgaben gestellt. Stets ging es darum, von einem Start- zu einem Zielpunkt zu gelangen: z.B. mit verschiedenen Hilfen wie etwa der Draufsicht, der Windrose oder des Stadtplans, durch die Beschreibung eines Weges oder die Vorgabe einer Fotoserie.

Die Probanden wurden gebeten, während ihres Problemlöseprozesses ihr Vorgehen und ihre Überlegungen laut zu äußern. Die Interviews wurden mit einer Videokamera aufgezeichnet.

Sowohl bei den Kindern als auch bei den Erwachsenen konnten folgende vier Problemlöse-Strategien beobachtet werden:

- „Drauflosgehen“,
- „andere Personen nach dem Weg fragen“,
- „den Stadtplan benutzen“,
- „die Draufsicht benutzen“.



Abb. 5: Rund um die Kirche.

Bei den Erwachsenen dominierte die Suche nach einem Stadtplan. Nur zwei Erwachsene schlugen vor, andere Personen in der Stadt nach dem Weg zum Museum zu fragen, und erbaten dann einen Stadtplan. Die Draufsicht wurde von sechs Probanden entdeckt. Jedoch bevorzugten fünf dennoch als Strategie den Stadtplan.

Die Kinder hingegen wählten zumeist Strategien, die sie in ihrer eigenen Lebenswirklichkeit zum Ziel führen: „Drauflosgehen“ und „andere Personen fragen“. Dahinter lässt sich vermuten, dass Kinder zuerst einmal voraussetzen und erwarten, dass eine virtuelle Umgebung nach den gleichen Regeln „funktioniert“ wie ihre erlebte Wirklichkeit. Unserer Meinung nach versuchen Kinder stärker als Erwachsene, ihre alltäglichen Erfahrungen auf die virtuelle Stadt zu übertragen.

Die Suche nach personalen Bezügen, die in der Strategie „andere Personen fragen“ zum Ausdruck kommt, offenbart den Wunsch der Kinder nach Interaktion und Kommunikation. Sie möchten in eine Szene eingreifen, diese verändern und auf ihr Tun ein Feedback erhalten. Das zeigen auch die Antworten auf die Frage: „Was fehlt der Stadt noch?“. Die Kinder wünschten sich eine Belebung der Stadt durch andere Fußgänger, Fahrradfahrer und Tiere und die Möglichkeit, im Supermarkt einzukaufen, in die Häuser hineinzugehen und in der Telefonzelle zu telefonieren. Bei Betrachtung der Lösungswege aller Aufgaben zeigte sich, dass vor allem Gebäude Kindern und Erwachsenen als Orientierungsmarken dienen.

Dabei wird ein Gebäude weniger durch seine Form- oder Farbgestaltung charakterisiert („das hohe Haus“, „das rote Haus“), sondern es wird bedeutsam und zum Blickfang durch seine Funktion („Schule“, „Rathaus“, „Kirche“) und seine Benennung mit der damit verbundenen Einzigartigkeit und Nähe zur realen Welt („Lidl“, „Aral“, „Mc Donald’s“).

„Merkdinge“ weisen den Weg

Diese kleine Studie war ein erster Schritt, und die gewonnenen Eindrücke und Ergebnisse sollten durch nachfolgende Untersuchungen erweitert werden. Vor allem interessiert die Frage, inwiefern Kinder die Erfahrungen, die sie mit dem Stadtspiel gewon-



Abb. 6: Draufsicht.

nen haben, auf reale Situationen übertragen können und inwiefern sich ihr Verhalten in der virtuellen Welt von dem in der realen Welt unterscheidet.

An der Folgeuntersuchung nahmen insgesamt 42 Jungen und Mädchen zweier vierter Schuljahre teil. 20 Kinder arbeiteten zuerst am Computer und erprobten in Zweierteams das Stadtspiel. In der Realität arbeiteten die Kinder in Vierergruppen zusammen.

Sowohl in der virtuellen als auch in der realen Welt galt es, die folgenden beiden Aufgabentypen zu bearbeiten:

1. Aufgabentyp: Einen bereits gegangenen Weg merken und ihn zurückfinden.
2. Aufgabentyp: Mit Hilfe eines Stadtplans einen Weg zu einem Ziel gehen, den Zielort auf der Karte eintragen und den gegangenen Weg einzeichnen.

Jeder hat diese Erfahrung gemacht: Wenn man sich zum ersten Mal in einer unbekanntem Stadt befindet, so versucht man, sich seinen Weg anhand bestimmter Objekte, so genannter „Merkmale“ (Stückrath 1955, z.B. S. 36) oder „Weg-Marken“ (z.B. Smyth/Collins/Morris/Levy 1994, S. 312) zu merken. Aufgrund der Fülle der einwirkenden Reize und wegen des begrenzten Gedächtnisspeichers kann der Mensch nur einen Bruchteil bewusst aufnehmen und verarbeiten. Hier gilt es, eine sinnvolle Auswahl zu treffen, also Merkmale zu sammeln.

Solche Merkmale sind in der Regel individuell signifikante, hervorstechende Objekte, die in unmittelbarer Nähe auf dem Weg liegen. Sie dienen als wichtige gedankliche Stützpfiler für den Orientierungsprozess (vgl. z.B. Downs/Stein 1982, S. 170ff u.v.a.).

Welche Merkmale wählten die Kinder für ihre Aufgabe aus, einen vorgegangenen Weg zurückzufinden?

In erster Linie sind es markante Gebäude und Objekte, welche den Kindern nach eigener Aussage geholfen haben, die Wege zurückzufinden. Die Auffälligkeit eines Gebäudes oder Objektes wird durch unterschiedliche Eigenschaften hervorgerufen:

- a) durch die Farbe (Beispiele: „das grün-schwarze Haus“, „die grünen Bänke“, „der gelbe Dinosaurier“);
- b) durch Geometrie und Architektur (Beispiele: sehr große Objekte wie der Supermarkt, das Museum oder der Dinosaurier; herausragende Objekte wie z.B. die Kirche, die man schon von weitem erkennen kann);
- c) durch die Benennung (Beispiele: „Deutsches Museum“, „Grundschule“, „Rathaus“, der Supermarkt „Lidl“, die „Aral-Tankstelle“);
- d) durch den Bezug zur Lebens- und Erlebens-Wirklichkeit der Kinder (Beispiele: die „Aral“-Tankstelle, das Schnellrestaurant „Mc Donald´s“, die Bäckerei „Zarnitz“ und der Supermarkt „Lidl“ mit ihrer bekannten farblichen Gestaltung und den typischen Schriftzügen; auch aktuelle Werbepлакate mit bekannten Produkten, sowie Kinoplakate mit den Ankündigungen aktueller Filme).

Vor allem die zuletzt genannten Dinge lösten bei den Kindern freudige Ausrufe des Wiedererkennens aus („Das ist ja´ne echte Aral-Tankstelle!“), (Abbildung 8) waren der Grund, bekannte Werbeslogan und -lieder anzustimmen („Mc Donald´s ist einfach gut!“) und auch häufig Gesprächsanlass – wie der folgende Gesprächsausschnitt zeigt:

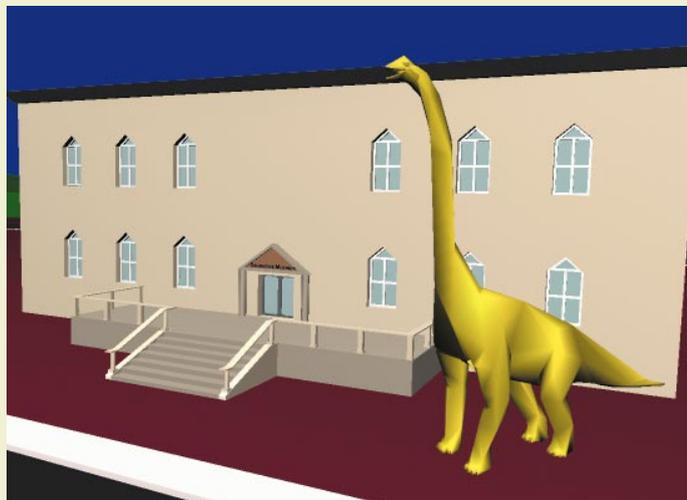


Abb. 7: Museum mit Dinosaurier.

- Renata und Alexander betrachten die Filmwerbung am Kino:
Renata (liest laut): „Men in black, Space-Jam.“
Alexander: „Wollte ich mir noch ausleihen.“
Renata: „Hast du?“
Alexander: „Nee, vergessen, kann ich ja heute noch machen.“

Durch ihre Bezüge zur Lebenswirklichkeit prägten sich die Kinder die Örtlichkeiten und die Lage dieser Objekte schnell ein.

Besonderheiten und Details entscheiden

In der realen Umgebung gibt es stets eine große Anzahl von Objekten, die ihre Besonderheit und Einmaligkeit dadurch erhalten, dass die Kinder sie mit Erlebnissen in Verbindung bringen. Sie werden dadurch nicht nur zu Merkmalen, sondern sind auch ein stichhaltiges Argument, um andere von der Richtigkeit eines Weges zu überzeugen:

Beispiele:

- Renske zu Philipp: „... da bist du doch vor´m Gitter langgegangen, so, mit dem Finger ...“.
- Renske: „... hier bin ich auf den Gulli-Deckel getreten ...“.
- Viktoria: „... da, die Mauer, auf die Diana draufgegangen ist ...“.

Ein unscheinbarer Zigarettenautomat, an dessen Klappe die Kinder gespielt haben und woraus sich ein kurzes Gespräch in der Gruppe entwickelte, wird zu einem einprägsamen Merkmal. Darüber hinaus spielen Begegnungen mit Menschen und Tieren eine besondere Rolle; etwa die Katze im Gras, das Pony auf der Weide, die Hühner auf dem Hühnerhof, die Schnecke auf dem Asphalt, der Postbote auf dem Fahrrad, eine Passantin auf der Straße und zwei Mitarbeiter der Müllabfuhr bei ihrer Arbeit. Vor allem Tiere verursachen stets Ausrufe des Entzückens. Die Kinder ahmen die Tierlaute nach und versuchen, die Tiere anzufassen und zu streicheln. Andere Passanten werden begrüßt und angesprochen oder nehmen von sich aus Kontakt zu den Kindern auf. Dadurch werden die Orte, an denen es zu diesen Begegnungen gekommen ist, unverwechselbar.

Des Weiteren fallen Kindern bestimmte Besonderheiten und Details auf. Allem voran Dinge, die anders sind als gewohnt und erwartet, erwecken das Interesse der Kinder: eine zerbrochene Fensterscheibe, ein Basketballkorb an der Hauswand, Fahnen in



Abb. 8: Die Tankstelle.

einem Vorgarten, ein Fahrrad, das auf einem Balkon steht, eine umgekippte Mülltonne oder Hochzeitsschmuck an einer Haustür.

Bei der Modellierung des Stadtspiels haben wir versucht, den Idealtypus einer Stadt abzubilden. Durch die Untersuchung haben wir gelernt, dass für den Darstellungsrealismus und den damit verbundenen Wirklichkeitsbezug folgende Aspekte eine entscheidene Rolle spielen:

- typische strukturelle Merkmale,
- typische Objekte,
- Abnormitäten, die den idealen Zustand brechen,
- das „Erlebnishafte“.

Unsere virtuelle Welt ist demnach eine eher arme, eine karge Welt. Vor allem das Fehlen von Personen hat die Kinder verwundet, wie Jan Phillipp's Äußerung zeigt:

- "Was sollen wir hier, in dieser Stadt? Wo sind denn die Menschen? Hier gibt 's ja nichts."

Kinder streben nach maximaler Geschwindigkeit

Über ein Additivum von Merkdingen zu verfügen, ist ein erster Schritt, um sich in einer neuen Umgebung zu orientieren. Ein weiterer Schritt besteht darin, räumliche Beziehungen zwischen diesen Merkdingen aufzubauen und so ein Überblickswissen über eine gesamte Szene oder größere Sequenzen zu gewinnen. Es geht also um den Aufbau einer inneren, „kognitiven Karte“ (Downs/Stein 1982, S. 170ff) und damit um die Möglichkeit, sich eine Umgebung mental vor Augen zu führen.

Nach Stückrath (1955) hat der Aufbau solch eines Überblickswissens nicht nur mit der Kenntnis einer Szene, sondern auch mit dem Alter der Kinder zu tun (vgl. Stückrath 1955, S. 35ff). Kinder im Alter von 7 bis 8 Jahren bleiben nach Stückrath's Modell dem Wahrnehmen einzelner Merkdinge verhaftet, während ältere Kinder (9 bis 11 Jahre) diese Merkdinge offenbar zu einem Übersichtswissen, einer Gesamtstruktur verbinden.

Welche Beobachtungen ließen sich bei den von uns untersuchten Kindern machen?

In der virtuellen Umgebung konnten wir nur bei etwa einem Drittel der Kinder beobachten, dass sie über eine Gesamtstruktur (Orientierung an „kognitiven Karten“) der Szene verfügten – in der Realität waren es jedoch mehr als die Hälfte der Kinder.

Bemerkenswert erscheint außerdem, dass sich die von uns untersuchten Kinder eher mit den von Stückrath beschriebenen jüngeren Kindern vergleichen lassen, obwohl sie im Mittel zwei Jahre älter sind.

Für die Schwierigkeit der Kinder, den Weg zu finden, erwiesen sich noch zwei weitere Unterschiede zwischen virtueller und realer Umgebung als ausschlaggebend: das Abschätzen von Entfernungen und die Geschwindigkeit beim Gehen.

Obwohl die Modellierungssprache VRML Maßeinheiten vorgibt, so dass die Stadt maßstabsgerecht bzw. im Hinblick auf die Proportionen stimmig dargestellt ist, konnten die Kinder in der virtuellen Umgebung kein Empfinden für Entfernungen entwickeln. Sehr häufig sagten sie, wenn sie eine Örtlichkeit suchten: „das ist hier ganz in der Nähe“, obwohl das Objekt relativ weit von ihrem Standort entfernt war.

Den Kindern fehlten in der virtuellen Szene die Empfindung für Schrittlängen und die motorische Empfindung der Bodenberührung beim Laufen. Lage-, Berührungs- und Bewegungssinn sind hier also ausgeschaltet, wodurch keine Informationen über Beschleunigung und Drehung aufgenommen werden, die über die zurückgelegte Distanz und die Richtung der Bewegung Aufschluss geben (vgl. Schöne 1980, S. 325ff). Stattdessen erfolgt die Bewegung in einer Art Zeitraffer, so dass auch die für einen Weg gebrauchte Zeit keinen Aufschluss über Länge und Entfernung liefert.

Obwohl der Faktor Zeit für das Wegfinden keine Rolle spielte, waren die Kinder bestrebt, sich möglichst schnell durch die Szene zu bewegen, d.h. sie ließen die Mouse-Taste stets gedrückt, um eine maximale Geschwindigkeit zu erreichen. Das hohe Tempo führte dazu, dass für Richtungsentscheidungen sehr wenig Zeit zur Verfügung stand. Nur wenn die Kinder absolut nicht weiter wussten, stoppten sie ihre Bewegung. Relativ selten veranlasste sie eine Besonderheit am Wegesrand zum Anhalten und Betrachten. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Kinder in der virtuellen Umgebung bewegten, war viel höher als beim Zu-Fuß-Gehen in der Realität und trug dazu bei, dass nur wenige Informationen aufgenommen werden konnten. Das merkten auch die Kinder, wie das folgende Zitat zeigt:

- Philipp: „Wir sind viel zu schnell gegangen und konnten uns die Schilder nicht merken.“

Im Gegensatz zur virtuellen Umgebung lädt die reale Welt eher zum Verweilen ein und führt durch das Zu-Fuß-Gehen zu einer Verlangsamung und einer intensiveren Informationsaufnahme.

Das Ergebnis ist relativ eindeutig

Für die von uns interviewten Kinder war das Arbeiten am Computer nicht neu – neu war für sie, den Computer als Medium in ihrer Schule anzutreffen.

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass es für Kinder möglich und sinnvoll ist, in einer virtuellen Umgebung Probestandlungen zu Wegfindungs-Aufgaben und Kartenarbeit auszuführen. Wenngleich am Computer in 60 Minuten sechs Aufga-



ben bearbeitet werden konnten, während in der Realität in gleicher Zeit nur ein Weg zurückgelegt wurde, so wurde doch die am Computer gewonnene Zeit durch eine schlechtere Informationsverarbeitung erkaufte.

Wir konnten nicht feststellen, dass sich die Vorerfahrungen der Kinder mit der virtuellen Umgebung bei gleichen Aufgabentypen in der Realität positiv auswirkten – wohl aber, dass viele Kinder, auch wenn sie beim Stadtspiel lediglich bei der Ansammlung unverbundener Merkmale stehen blieben, in der Realität durchaus einen größeren Überblick herstellen konnten.

Uns war bewusst, dass das Stadtspiel nicht die Wirklichkeit simuliert, sondern nur einzelne Aspekte. Dennoch mussten wir feststellen, dass unsere virtuelle Umgebung in dieser Version sehr viel weiter von der Realität entfernt ist als erhofft.

Vor allem das Fehlen von personalen Begegnungen und die nichtvorhandenen Möglichkeiten, die virtuelle Umgebung zu verändern und mit ihr in Kontakt zu treten, machen aus ihr eine sterile Welt.

Die Meinungen der Kinder haben uns gezeigt, dass mehr „Leben“ in die virtuelle Stadt einziehen muss. Dieser wünschenswerten Ausgestaltung der Szene stehen jedoch technische Grenzen gegenüber, und so gehen wir weiter auf dem Weg der Annäherung, auf dem immer wieder neu zwischen Anforderung und Realisierung abgewogen werden muss.

Das „Stadtspiel“ entstand als ein interdisziplinäres Projekt der Mathematik-Didaktik und der Informatik. Unsere bisherigen Erfahrungen zeigen, dass für die Erstellung einer Unterrichts-Software das Know-how beider Disziplinen nötig ist, um die Software sowohl für den Benutzer „Kind“ als auch für die Einsatz-Situation „Unterricht“ möglichst optimal zuzuschneiden.

Literatur

Backe-Neuwald, Dorothea/Volbracht, Sabine (1999): Das Stadtspiel – Erprobung einer virtuellen Umgebung für Grundschul Kinder zur Bearbeitung von Aufgaben aus dem Themenbereich „räumliche Orientierung“. In: Beiträge für den Mathematikunterricht. Hildesheim: Franzbecker, S. 69-72.

Backe-Neuwald, Dorothea/Volbracht, Sabine: Computereinsatz im Geometrieunterricht der Primarstufe. Das „Stadtspiel“ – eine virtuelle Umgebung. In: mathematica didactica (im Druck).

Downs, Roger M./Stea, David (1982): Kognitive Karten: Die Welt in unseren Köpfen. New York: Harper&Row.

Smyth, Mary M./Collins, Alan F./Morris, Peter E./Levy, Philip (1994): Cognition in Action. 2. ed. Hove (UK): Lawrence Erlbaum Associates Ltd.

Stückerath, Fritz (1955): Kind und Raum. München: Kösel Verlag.

Volbracht, Sabine/Domik, Gitta/Backe-Neuwald, Dorothea/Rinkens, Hans-Dieter (1998): Teaching Spatial Orientations Using Virtual Worlds. Proceedings of ED-MEDIA, 20.-25. June 1998, Freiburg.

Volbracht, Sabine/Domik, Gitta/Backe-Neuwald, Dorothea/Rinkens, Hans-Dieter (1998): The „City Game“ – an Example of a Virtual Environment for Teaching Spatial Orientation. In: Journal of Universal Computer Science (J. UCS), Vol. 4, No. Springer Science Online.



Die Kooperationspartnerinnen aus der Informatik: **Prof. Dr. Gitta Domik** und **Dipl.-Inform. Sabine Volbracht** (v.l.).

Von der Hollerith-Maschine zum Parallelrechner

Die alltägliche Aufgabe des Sortierens als Fortschrittsmotor für die Informatik

Die Geschichte der Informatik ist eng mit einem vertrauten Problem verknüpft: Riesige Datenmengen liegen vor, aus denen Informationen gewonnen werden sollen. Um den notwendigen Überblick zu erhalten, der z.B. systematisches Suchen in den Daten ermöglicht, müssen die Datensätze nach bestimmten Kriterien sortiert werden (z.B. alphabetisch nach Namen oder numerisch nach Matrikelnummern usw.). Diese, führt man sie „per Hand“ aus, langweilige und fehleranfällige Aufgabe des Sortierens hat schon früh dazu herausgefordert, mechanische und elektronische Maschinen für sie zu konzipieren. Die Entwicklung der Informatik als wissenschaftliche Disziplin ist eng mit der Behandlung des Sortierproblems durch Maschinen verbunden, denn viele entscheidende Neuerungen in der Informatik sind durch die Beschäftigung mit dem Sortieren erfolgt.

Für Schnellzähler: Die Auswertung der Volkszählungen in den USA Ende des 19. Jahrhunderts

Seit 1790 führen die Vereinigten Staaten von Amerika alle zehn Jahre eine Volkszählung durch. Sie sind damit der am gründlichsten statistisch erfasste Staat der Welt. War die Auswertung Mitte des 19. Jahrhunderts noch eine relativ einfache Aufgabe, so stand die mit der Durchführung der Volkszählung beauftragte US-Behörde, das Census Bureau, nach der im Jahr 1880 durchgeführten Zählung vor dem Problem, dass die Bevölkerungszahl



Abb. 1: Hermann Hollerith (1860 - 1929).

Quelle: Library of Congress, Washington



Prof. Dr. Friedhelm Meyer auf der Heide ist seit 1989 Professor für Theoretische Informatik am Heinz Nixdorf Institut und am Fachbereich 17 der Universität Paderborn. Arbeitsgebiete sind algorithmische Aspekte paralleler Systeme wie Routing, Datenverwaltung und Lastbalancierung in Rechnernetzen sowie parallele Algorithmen und Randomisierungstechniken.

Dr. Rolf Wanka (links) hat an der Universität Dortmund Informatik studiert und 1994 an der Universität Paderborn promoviert. 1996/97 arbeitete er als Postdoktorand am International Computer Science Institute in Berkeley, USA. Seine Arbeitsgebiete sind die Analyse von Lastbalancierungsverfahren, der Entwurf von schnellen Sortiernetzwerken und die Analyse universeller Netzwerkarchitekturen.

der USA so stark angewachsen war, dass die Auswertung der Daten bis zur nächsten Zählung gedauert hätte: 50 Millionen Einwohner der USA waren durch die Erhebung von 200 Einzeldaten je Person erfasst worden, 500 Mitarbeiter des Census Bureau waren mit der Auswertung sieben Jahre lang beschäftigt. Diese musste dann abgebrochen werden, um die nächste Zählung vorzubereiten. Das führte dazu, dass die Zahl der unverheirateten Einwohner und als Folge dessen die Zahl der im Jahrzehnt zuvor eingewanderten Familien, eine für die USA sehr wichtige Information, nicht ermittelt wurde, obwohl die dazu benötigten Daten dem Census Bureau de facto vorlagen. Eine Hochrechnung der Behörde für die Volkszählung 1890 ließ eine Auswertungszeit von über 12 Jahren befürchten.¹ Dies diente einem Dozenten für Ingenieurwissenschaften am Massachusetts Institute of Technology (MIT), dem erst 20-jährigen Herman Hollerith (1860-1929, Abbildung 1) als Ansporn: Während einer kurzen Anstellung beim Census Bureau 1880 als, wie man heute sagen würde, studentische Hilfskraft war er mit diesem Problem konfrontiert worden. Er konstruierte eine Maschine (siehe Abbildung 2), mit deren Hilfe die Auswertung der Volkszählung von 1890 vollständig durchgeführt werden konnte, obwohl der Bevölkerungsanstieg in den USA gerade in diesen Jahren einen seiner Höhepunkte erreicht hatte. 43 „Hollerith-Maschinen“ wurden zur Auswertung der Daten der nun rund 65 Millionen US-Bürger eingesetzt. Diesmal war die Auswertung der wichtigsten Daten nach bereits vier Wochen und die aller Informationen nach drei Jahren abgeschlossen. Hollerith gründete 1896 die Firma „Tabulating Machine Company“, die schließlich, nach

Fusionen mit anderen Firmen, in der Firma „International Business Machines Corporation“ (IBM) aufging und heute der größte Computerhersteller der Welt ist. Am 8. Januar 1889 wurde für die Hollerithsche Tabelliermaschine das erste jemals vergebene Patent für ein Gerät der Datenverarbeitung erteilt, und zwar vom deutschen Reichspatentamt in Berlin, das dem US-Patentamt damit zeitlich kurz zuvorkam. Ein weiterer ehemaliger Mitarbeiter des Census Bureau, James Powers, gründete ebenfalls eine Firma, die Tabelliermaschinen herstellte. Nicht Holleriths, sondern sein Unternehmen erhielt den Auftrag für die Volkszählung 1910². Powers' Firma wurde später Teil der Remington Rand Corporation, die heute den Namen UNISYS trägt und sich gleichfalls zu einem bedeutenden Computerhersteller entwickelt hat.



Abb. 2: Hollerith-Maschine, rechts die Sortiereinheit.

Quelle: HNF

Teilaufgabe für eine Spezialmaschine: Sortieren der Lochkarten

Hollerith benutzte zur Speicherung der erhobenen Daten Lochkarten, deren Verwendung er in mechanischen Webstühlen kennen gelernt hatte. (Dass die Größe der Lochkarten genau dem Format der Dollar-Banknoten entspricht, soll, so die Legende, auf Holleriths Sinn für Sparsamkeit zurückgehen: Da es bereits passende Behältnisse für große Mengen an Dollar-Scheinen gab, mussten keine neuen Kisten beschafft werden, um die Lochkarten „wegzulegen“.) Die Komprimierung von Daten war auch schon zu dieser Zeit eine wichtige Aufgabe: Im Laufe der Jahre konnten immer mehr Informationen auf einer Lochkarte abgespeichert werden, was durch Reduktion der Lochgröße und vor allem durch die Änderung der Lochform von runden auf rechteckige Löcher bewerkstelligt wurde. Endgültig durchgesetzt hat sich eine Zahl von 80 Lochspalten je Karte; sie hat sich traditionell bis auf den heutigen Tag als „normale“ Bildschirmbreite erhalten.

Eine Teilaufgabe war Hollerith so wichtig, dass er für sie eine eigene Maschine konstruierte. Sie ist in der Abbildung im rechten Teil zu sehen: Es ist die Sortier-Maschine. Ihre Aufgabe besteht darin, die in sie eingelegten Lochkarten nach einem der Maschine vorzugebenden Kriterium zu sortieren: Z.B. waren die Altersangaben der Personen auf den Lochkarten in 10-Jahres-Schritten abgespeichert worden. Will man nun die Daten der 20-29-jährigen Personen nach speziellen Kriterien auswerten, so funktioniert dies natürlich viel schneller und einfacher, wenn die entsprechenden Karten aus dem großen Stapel bereits herausgeholt worden sind und die Karten mit den nicht benötigten Informationen gar nicht erst durch die Zähl-Maschine laufen. Zu diesem Zweck kann man einen großen, unsortierten Stapel in den Sortierer legen und einstellen, dass die Karten bzgl. einer bestimmten Lochspalte sortiert werden sollen, und schon werden mit für damalige Verhältnisse atemberaubender

Geschwindigkeit die Karten für die unter 10 Jahre alten Amerikaner in das erste Fach, die der Teenager in das zweite Fach usw. gelegt. Mit den Karten des dritten Stapels kann anschließend mit der Hauptmaschine die gewünschte, spezielle Zählanalyse durchgeführt, z.B. die Anzahl der in dieser Altersklasse in die USA eingewanderten verheirateten männlichen weißen Personen bestimmt werden.

Das Verfahren, mit dem die Karten sortiert wurden, ist heute unter dem Fachbegriff Bucket Sort (Sortieren durch Fachverteilung) bekannt. Das Feld eines Datensatzes, in dem das Kriterium steht, bezüglich dessen sortiert werden soll, heißt Schlüssel. Bucket Sort arbeitet allgemein folgendermaßen: Wenn die Schlüssel der n zu sortierenden Objekte lediglich k verschiedene Werte annehmen können, so kann man k Fächer bereithalten und nacheinander die Objekte in das Fach legen, das für den entsprechenden Schlüsselwert zur Verfügung steht. Werden alle Objekte verteilt und in der richtigen Reihenfolge wieder herausgeholt, sind insgesamt nicht mehr als $n+k$ Schritte ausgeführt worden und die Datensätze sortiert. Dieser Ansatz lässt sich schön verallgemeinern, wenn man z.B. Wörter für ein Wörterbuch sortieren muss. Zuerst werden die Wörter mit Hilfe des Verfahrens nach dem Anfangsbuchstaben sortiert. Dann werden jeweils die Inhalte der Fächer mit dem gleichen Verfahren nach dem zweiten Buchstaben sortiert usw. Wenn das längste Wort l Buchstaben hat, braucht dieses neue Verfahren nicht mehr als $l(n+k)$ Schritte. Es kann natürlich auch zum Sortieren für Zahlen eingesetzt werden, indem man es auf deren Ziffern anwendet. Wichtig dabei ist, dass alle Zahlen hierbei aus gleich vielen Ziffern bestehen, also auch führende Nullen aufweisen. Wir können also Zahlen sortieren, ohne einen Kleiner-gleich-Vergleich zwischen zwei Zahlen durchzuführen. Man muss beachten, dass bei großen n und l die Anzahl der Schritte sehr groß werden kann! Im Beispiel der Volkszählung sind $n=65.000.000$ und $l=200$. Zum Glück brauchte dieser Wert für l aber nicht beim Sortieren angewandt zu werden.

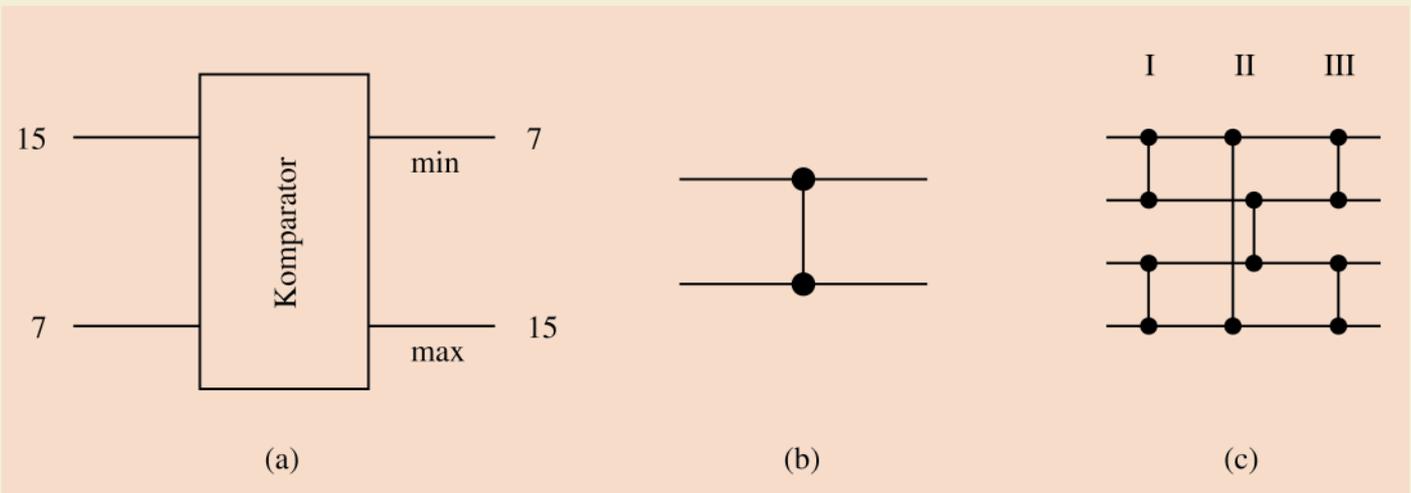


Abb. 3: (a) Komparator; (b) vereinfachte Darstellung; (c) Komparator-Netzwerke mit 3 parallelen Schritten.

Der Siegeszug der Elektronik: Computer übernehmen das Sortieren

Das Sortieren mit Hilfe mechanischer Geräte erreichte in den 1930er-Jahren seinen Höhepunkt. Mit dem Aufkommen der frei programmierbaren und schneller als jede Mechanik arbeitenden Computer war ein neuer Abschnitt der Informationsverarbeitung und das Ende für die Hollerith-Maschinen erreicht. Donald Knuth, der Vater der Informatik als Wissenschaft, schreibt [1], dass es so aussehe, dass das erste jemals für einen Computer

geschriebene Programm ein Sortier-Programm gewesen sei. John von Neumann und Konrad Zuse, beide Pioniere der Entwicklung elektronischer Rechenanlagen, haben sich in den 1940er-Jahren mit der Entwicklung von Sortier-Programmen beschäftigt, um die Leistungsfähigkeit ihrer Konstruktionen unter Beweis zu stellen. Das erste Gerät der berühmten Computer-Baureihe UNIVAC der bereits erwähnten Remington Rand Corporation wurde im Juli 1951 an das Census Bureau ausgeliefert und bei der Auswertung der Daten der Volkszählung von 1950 eingesetzt. Die beim Entwurf der Hardware dieses Computers realisierten Zwischenspeicher sind begründet in den Arbeiten von Frances Holberton³, die effiziente, sog. externe Sortierverfahren entwarf, um den Bedürfnissen des Census Bureaus und anderer Kunden wie z.B. der großen Kreditkartenunternehmen gerecht zu werden. Das Eingehen auf spezielle Kundenwünsche beim Bau dieses Computers muss auch vor dem Hintergrund gesehen werden, dass die elektronischen Rechner sich ihren zivilen Markt erst erkämpfen mussten. Sie waren (noch) erheblich teurer als die mechanischen Tabellier- und Sortier-Maschinen und mussten den Preisunterschied „wert sein“.

Die Veröffentlichung der Dissertation von Howard Demuth an der Stanford University im Jahr 1956 unter dem Titel „Electronic Data Sorting“ gilt wegen ihrer erstmaligen Anwendung abstrakter Modelle und der Analyse verschiedener Verfahren in diesen Modellen als Geburtsstunde der modernen Komplexitätstheorie. Die Entdeckung und Analyse des unter dem Namen Quicksort berühmt gewordenen Verfahrens durch Antony Hoare im Jahre 1962 eröffnete der Informatik den neuen, sehr erfolgreichen Zweig der randomisierten Algorithmen. Hoares klassischer Aufsatz [5] gilt als einer der schönsten jemals geschriebenen wissenschaftlichen Beiträge der Informatik.

Spezialmaschinen im neuen Gewand: Hardware für schnelles paralleles Sortieren

Die Einführung elektronischer Rechenanlagen hatte zur Folge, dass die Basis-Operation des Kleiner-Gleich-Vergleichs zweier Schlüssel nun durchgeführt werden konnte. Diese Operation kann auf sehr kleinem Platz in Hardware realisiert werden, was zur Entwicklung eines Bauteils führte, das „Komparator“ genannt wird. Dieser Komparator hat zwei Ein- und zwei Ausgänge. Die Ausgänge sind mit „min“ und „max“ bezeichnet. Zwei Zahlen werden durch die Eingänge dem Bauteil übergeben,

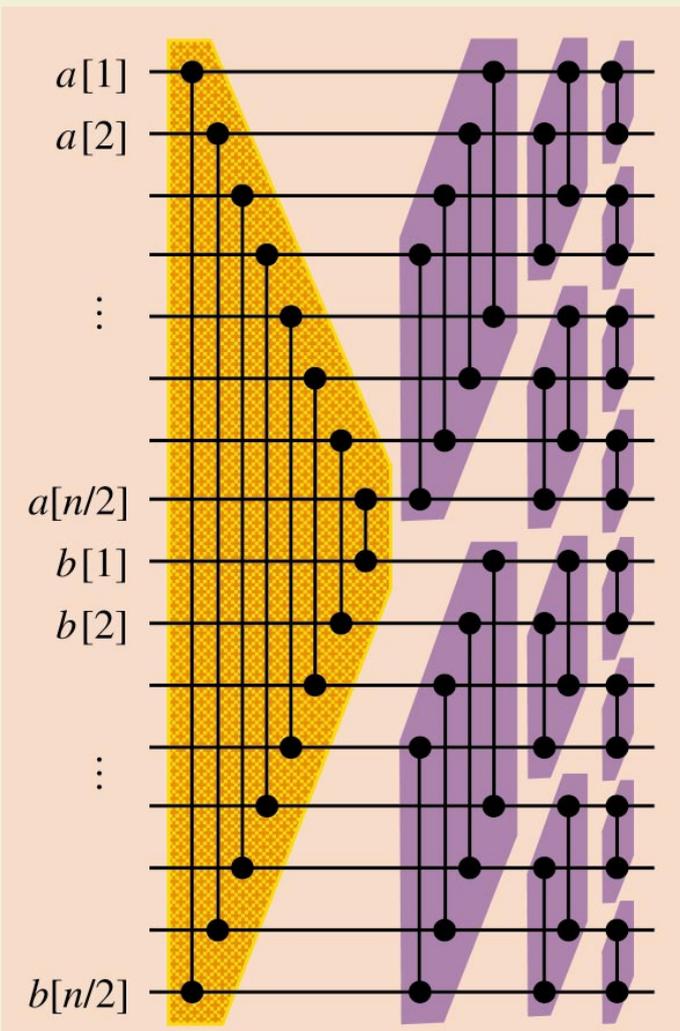


Abb. 4: Konstruktionsprinzip für Batchers Mischer.

und die kleinere der beiden Zahlen verlässt es über den min-Ausgang, die größere über den max-Ausgang (siehe Abbildung 3 (a) und (b)). In einem US-Patent der Wissenschaftler Philip Armstrong, Raymond Nelson und Daniel O'Connor aus dem Jahr 1954 wurden die Komparatoren eingeführt. Die drei hatten als Erste die Idee, durch die Anwendung vieler solcher Komparatoren gleichzeitig die Sortierzeit für bis zu 8 Zahlen erheblich gegenüber einer Lösung durch ein Programm zu senken: Die parallelen Sortiernetzwerke, eine hochspezialisierte Art von Parallelrechnern, waren geboren. Abbildung 3 (c) zeigt ein Sortiernetzwerk für vier Datensätze. Dieses Netzwerk, das seine Eingabe über die linke Seite erhält und nach rechts verarbeitet, besteht aus 6 Komparatoren, die so angeordnet sind, dass jeweils 2 der Komparatoren in der Tat gleichzeitig ausgeführt werden können. Mit anderen Worten: Es vergehen nur 3 Zeiteinheiten, die auch parallele Schritte genannt werden, bis das Netzwerk die sortierte Ausgabe produziert hat.

Die Schwierigkeit besteht nun darin, Netzwerke aus Komparatoren zu entwerfen, die tatsächlich jede Eingabe sortieren und dazu möglichst wenig Zeit benötigen. Anders ausgedrückt: Welche Geschwindigkeit kann man mit dem Einsatz von Komparatoren beim Sortieren von n Objekten erreichen? Ein Durchbruch zur Beantwortung dieser Frage gelang Kenneth Batcher 1968 mit den beiden nach ihm benannten, in [4] veröffentlichten Sortiernetzwerken. Beide Netzwerke sind in der Lage, n Zahlen in $\frac{1}{2} \log_2 n (\log_2 n + 1)$ Schritten zu sortieren. Beträgt n ungefähr 65.000.000 (wie bei der US-Volkszählung 1890), sind dies lediglich 351 parallele Schritte. Dieser enorme Zeitgewinn im Vergleich zum oben beschriebenen Bucket Sort ist durch einen sehr großen Hardware-Aufwands erkauft. Natürlich wird man nicht ein derart großes, sondern ein kleineres Netzwerk als Mikrochip realisieren, und dann in mehreren Durchgängen arbeiten.

Wir wollen hier eines dieser beiden Netzwerke, den Bitonen Sortierer, vorstellen. Dieses Sortierverfahren repräsentiert die Anwendung eines klassischen Prinzips der Informatik: „Teile und Herrsche“. Angenommen, man wüsste bereits, wie Zahlenfolgen der Länge $n/2$ zu sortieren sind, so könnte man die Folge der Länge n in zwei derartig kurze Unterfolgen zerlegen und diese beiden gleichzeitig sortieren (dies entspräche dem „Teile“-Anteil). Dann müsste man natürlich ein Netzwerk entwerfen, das aus zwei sortierten „kurzen“ Folgen ($a[1], a[2], \dots, a[n/2]$) und ($b[1], b[2], \dots, b[n/2]$) eine „lange“ sortierte Folge macht (dies wäre der „Herrsche“-Anteil). Dieser Vorgang wird „Mischen“ genannt, obwohl hier ja eigentlich das Gegenteil dessen erreicht werden soll, was etwa beim Kartenmischen erzielt wird, nämlich Ordnung.⁴ Für dieses Misch-Problem hat Batcher ein Verfahren erfunden, das ebenfalls den Teile-und-Herrsche-Ansatz verfolgt, jedoch auf eine gar nicht offensichtliche, clevere Art und Weise. Er konnte zeigen, dass das in Abbildung 4 dargestellte Komparator-Netzwerk in der Tat aus den beiden sortierten kurzen eine lange sortierte Folge herstellt. Nun benutzen wir dasselbe „Teile-und-Herrsche“-Verfahren, um die kurzen Folgen zu sortieren, nur dass das n durch $n/2$ ersetzt wird. Das können wir so lange wiederholen, bis die kurze Folge die Länge 2 hat. Sie können wir mit Hilfe eines einzelnen Komparators sortieren. Wir haben diese trickreiche Konstruktion in Abbildung 5 für $n=16$ einmal vollständig durchgeführt.

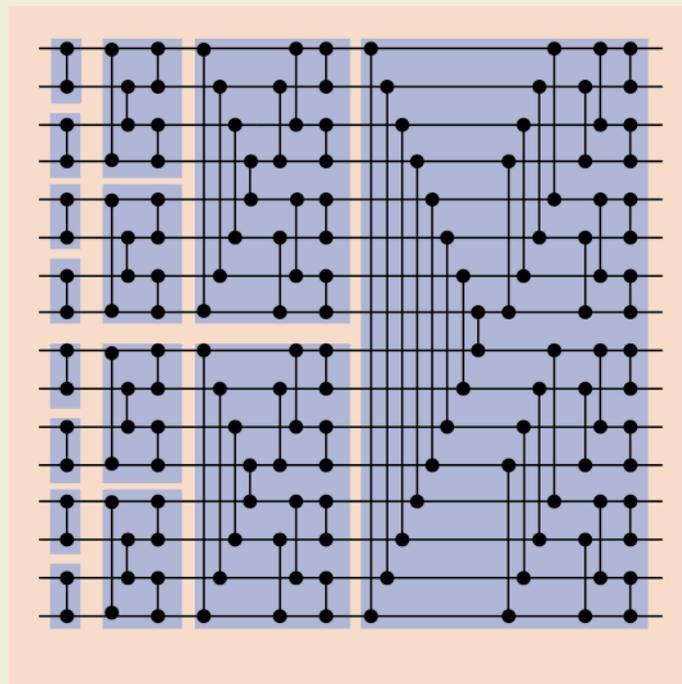


Abb. 5: Der Bitonen Sortierer für $n=16$ mit 10 parallelen Schritten. Jeder blau unterlegter Teil ist ein Mischer.

Der Stand der Forschung bei parallelen Sortiernetzwerken

Lange Zeit glaubte man, dass Batcher's Sortiernetzwerke die bestmöglichen seien. Darum war es eine Sensation, als 1983 drei ungarische Wissenschaftler, Miklós Ajtai, János Komlós und Endre Szemerédi, die Konstruktion eines Netzwerks – von der Fachwelt nach den dreien später AKS-Netzwerk genannt – vorstellten [6], das nur $c \log_2 n$ parallele Schritte zum Sortieren von n Objekten benötigt. Allerdings ist, anders als bei Batcher's Netzwerken, der Faktor c nicht $\frac{1}{2}$, sondern eine geradezu astronomisch große Zahl, so dass die Einsparung des Faktors $\log_2 n$ für alle in Wirklichkeit auftretenden Werte für n kaum ins Gewicht fällt. Das AKS-Netzwerk ist somit zwar das „asymptotisch“ schnellste Sortiernetzwerk, für realistische Eingabegrößen n sind jedoch Batcher's Netzwerke bei weitem vorzuziehen.

Batcher's Bitonen Sortierer besteht aus ungefähr $n (\log_2 n)^{2/4}$ Komparatoren. Doch während eines Sortiervorgangs sind nur $n/2$ davon aktiv. In gewisser Weise ist es also Platzverschwendung, derart viele Komparatoren zu realisieren, wenn nur ein kleiner Anteil davon gleichzeitig benötigt wird. Eine Möglichkeit, die Zahl der Komparatoren zu reduzieren und damit die zur Hardware-Realisierung aufzuwendende Chip-Fläche drastisch zu reduzieren, besteht im folgenden Ansatz: Es sind Verfahren zu entwerfen, die nur eine kurze, geschickte Folge von verschiedenen parallelen Schritten realisiert benötigt, die dann so lange wiederholt werden muss, bis die Eingabe sortiert ist. Derartige Sortierverfahren werden periodisch genannt. Neben der Einsparung an Komparatoren bieten periodische Netzwerke noch einige weitere Vorteile: Man kann die Wiederholungen abbrechen, sobald die Eingabe sortiert ist, und wenn einige Komparatoren ausfallen, kann man häufig dennoch weiterhin sortieren, nur dass dann mehr Wiederholungen notwendig sind. Fällt dagegen ein Komparator in Batcher's Sortierer aus, so sortiert die Maschine nicht mehr. In zwei Dissertationen ([7], [8]) zu diesem Gebiet, die an der Universität Paderborn entstanden sind, konnten erhebliche Fortschritte erzielt werden: Unter anderem wurde

gezeigt, dass jedes Sortiernetzwerk derart „periodifiziert“ werden kann, dass nur 3 verschiedene parallele Schritte wiederholt ausgeführt werden müssen. Die Zeit, also die Anzahl der Wiederholungen dieser Schritte, steigt dabei nur um einen Faktor von $\log_2 n$, während die Anzahl der Komparatoren nicht mehr als $\frac{3}{2}n$ beträgt.

Das Fazit

Komparator-Netzwerke wie der Bitone Sortierer lassen sich mittlerweile auf äußerst geringem Platz realisieren und werden in Datenbankrechnern eingesetzt. So ist auch heute die Situation noch ähnlich, wie zu Herman Holleriths Zeiten: Die Sortiermaschine unterstützt die Hauptmaschine bei der Auswertung komplexer Datenmengen.

Danksagung

Wir möchten uns an dieser Stelle herzlich beim Heinz Nixdorf MuseumsForum (HNF), Paderborn, und bei der Library of Congress, Washington, für das Fotomaterial zu Hermann Hollerith und seiner Maschine (Abb. 1 und 2) bedanken.

Literatur

- [1] Donald E. Knuth. The Art of Computer Programming, vol. 3: Sorting and Searching. 2. Auflage 1998, Addison-Wesley, Reading.
- [2] Geoffrey D. Austrian. Herman Hollerith: Forgotten Giant of Information Processing, 1982, Columbia Press, New York.
- [3] Tilman Driessen. Von Hollerith zu IBM: Zur Frühgeschichte der Datenverarbeitungstechnik von 1880 bis 1990 aus wirtschaftswissenschaftlicher Sicht. Dissertation, Universität Köln, 1986.

- [4] Kenneth E. Batchner. Sorting Networks and Their Applications. In: AFIPS Conference Proceedings 32, 1968, 307-314.
- [5] C. Antony R. Hoare. Quicksort. Computer Journal 5, 1962, 10-15.
- [6] Miklós Ajtai, János Komlós, Endre Szemerédi. Sorting in $c \log n$ Parallel Steps. Combinatorica 3, 1983, 1-19.
- [7] Rolf Wanka. Paralleles Sortieren auf mehrdimensionalen Gittern. Dissertation, Universität Paderborn, 1994.
- [8] Brigitte Oesterdiekhoff. On Periodic Comparator Networks. Dissertation, Universität Paderborn, 1997.

Fußnoten

- ¹ Damit standen die Statistiker des Census Bureau vor einem Problem, mit dem heute die Meteorologen zu kämpfen haben: Sie könnten das Wetter von morgen ziemlich gut vorausbestimmen, bräuchten dabei aber bis übermorgen Zeit zum Rechnen.
- ² Holleriths und Powers' Gründungen bereicherten mit ihrem Konkurrenzkampf, den sie an ihre Nachfolgefirmer IBM und UNISYS „weitervererbten“, den an derartigen Dauerauseinandersetzungen reichen amerikanischen Markt.
- ³ Frances Elisabeth Snyder-Holberton wurde 1997 von der IEEE, einer der großen Ingenieur-Vereinigungen der Welt, mit dem Computer Pioneer Award ausgezeichnet: „for the development of the first sort-merge generator for the Univac“.
- ⁴ In der englischsprachigen Fachliteratur wird der Ausdruck „to merge“ verwendet, was soviel wie „verschmelzen“ oder „einfädeln“ (im Straßenverkehr) bedeutet. Die Verkehrsanalogie ist für unser Problem die nächstliegende. Für das Kartenmischen wird im Englischen der Ausdruck „to shuffle“ gebraucht.