

# Forschungsjournal

der Technischen Universität Graz

*Research Journal / Graz University of Technology*



# Inhalt

## Vorwort

- 3 Forschung: Neugier und Notwendigkeit  
*Hans Sünkel*

## EU Projekte

- 4 MOLSPEC-ID: Entwicklung von quantitativen und qualitativen molekularbiologischen Methoden zum Nachweis von Tier- und Pflanzenarten in Lebensmitteln  
*Werner Pfannhauser, Ulrike Mülleider*
- 6 PRESENCIA - Presence Research Encompassing Sensory Enhancement, Neuroscience and Cognition, with Interactive Applications - IST 2001-37027  
*Gert Pfurtscheller*
- 10 Neue rein optische Systeme und Methoden zur präzisen Messung von magnetischen und elektromagnetischen Feldern  
*Laurentius Windholz*

## FWF Projekte

- 13 Biokatalysator Hefe: Ein Modellsystem zum Studium des Fettstoffwechsels  
*Günther Daum*
- 15 Neue Software für die numerische Simulation des Tunnelvortriebes mit der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NATM)  
*Christian Dünser*
- 17 ZYKLON-APEX - Entstaubung von Gasströmen  
*Gernot Staudinger*
- 19 Asymptotic Properties of Random Walks on Graphs  
*Wolfgang Woess*
- 21 „Smart Tracking“: Selbstlokalisierung mit intelligenten Sensoren  
*Axel Pinz*

## BMVIT-Projekt

- 24 Thermisch-hygrisches Verhalten von GlasDoppelFassaden unter solarer Einwirkung - Theorieevaluierung durch Vorort-Messung  
*Peter Kautsch*

## Junge Forscherinnen und Forscher an der TUG

- 28 Enzyme in der Glykobiotechnologie - Struktur, Funktion, und neue Anwendungen in biokatalytischen Prozessen  
*Bernd Nidetzky*
- 29 Quasidimensionale Modellierung des gaseitigen Wandwärmeüberganges in Verbrennungskraftmaschinen  
*Claudia Schubert*
- 30 GPS Slant-Delays niedrigster Elevationen für die numerische Wettervorhersage  
*Thomas Pany*

## Impressum

Eigentümer: Technische Universität Graz

Herausgeber: Vizerektor für Forschung

Redaktion: Büro des Rektors, Referat für Öffentlichkeitsarbeit

Gestaltung und Satz: Ulrike Haring

Wir danken den Autorinnen und Autoren für die Bereitstellung der Texte und Fotos

Geringfügige Änderungen sind der Redaktion vorbehalten

Titelfoto: Mobiles AR-System: Helm, Institut für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung; Blick in eine Hefezelle, Institut für Pflanzenphysiologie, Uni Graz.

Verlag: Verlag der Technischen Universität Graz  
www.fti.tugraz.at/verlag

ISSN: 1682-5675

ISBN: 3-901351-69-8



## Forschung: Neugier und Notwendigkeit

### *Research: Curiosity and Necessity*

„Cui bono?“ – eine oft strapazierte Frage, vor allem in Zeiten budgetärer Engpässe, verordneter Schlankheitskuren und der Redimensionierung von Unternehmen. „Cui bono?“ – eine Provokation für die Grundlagenwissenschaft. „Cui bono?“ – ein legitimes Hinterfragen für die angewandte Forschung. Fragen wie diesen werden sich vermehrt auch die zukünftig autonomen Universitäten stellen müssen, und die Gesellschaft erwartet verständliche Antworten.

Forschung beginnt meist mit Neugier, mit dem Bedürfnis, das Funktionieren der Welt besser verstehen zu lernen und so auch einen kurzen Blick in die Zukunft werfen zu können. Die beobachtete Realität wird mathematisch modelliert, und das Modell aufgrund neuer Beobachtungen durch zyklische Verbesserung sukzessive an die Realität herangeführt. Die Mathematik nennt diesen Prozess Kalman-Filterung, für Normalsterbliche ist es schlicht ein „aus Erfahrung lernen“.

Und nach hinreichendem Durchwandern dieser Zyklen stellt man mitunter fest, dass gewonnene Erkenntnisse auch praktischen Nutzen haben. Ein neues Marktsegment beginnt sich zu entwickeln, neben der wissenschaftlichen Neugier nimmt die wirtschaftliche Notwendigkeit Platz und wird selbst zum treibenden Element weiterer Verbesserungen. Neugier und Notwendigkeit sind die Wegbereiter der Grundlagenforschung einerseits und der angewandten Forschung andererseits.

Eine moderne Universität, die der Lehre und Forschung verpflichtet ist, eine Universität, deren Aufgabe es ist, zukünftige Entwicklungen zu erkennen und auch mitzugestalten, tut gut daran, beiden Elementen Heimat zu bieten: der Neugier und der Notwendigkeit. Und die Politik ist gut beraten, auch Grundlagenforschung in angemessenem Umfang zu fördern. Denn wer nichts grundlegend Neues erforscht, der wird sehr bald auch nichts mehr anzuwenden haben.

Die Komplexität unserer Welt in Verbindung mit höchsten Genauigkeitsansprüchen bedingt ein hohes Maß an interdisziplinärem Arbeiten im gesamten Forschungsbereich. Das komplementäre Zusammenspiel unterschiedlicher Sensoren wird zum „sine qua non“, die Verarbeitung riesiger Datenmengen auf der Basis paralleler Rechnerarchitekturen zur täglichen Übung, und der Handschlag von Experten unterschiedlicher Provenienz zur Selbstverständlichkeit. Und alsbald wird das Rauschen im eigenen Fachbereich als Signal in der benachbarten Disziplin erkannt.

Gerade einer Technischen Universität kommt die Rolle des Brückenbauers zwischen Theorie und Anwendung zu. Und die Tragfähigkeit der Brücke wird durch Lehr- und Forschungsleistungen unter Beweis gestellt. Die jüngsten Forschungsberichte der Technischen Universität Graz geben ein eindrucksvolles Beispiel ihrer Leistungsfähigkeit, und die Beiträge in der vorliegenden Ausgabe dieses Forschungsjournals stehen stellvertretend für das Forschungspotential unserer Universität.

Die gegenwärtige Umgestaltung der universitären Landschaft erfolgt auch durch die stärkere Akzentuierung ihres jeweiligen Forschungsprofils. Unter dem Motto „Stärken stärken“ läuft derzeit auch an unserer Technischen Universität Graz der Prozess der Profilbildung ab. Im Bereich der Forschung werden voraussichtlich acht Forschungsschwerpunkte unser Profil darstellen, das sich selbstverständlich dynamisch entwickeln soll und auch entwickeln wird. Diese Forschungsschwerpunkte werden das zentrale Thema der nächsten Ausgabe des Forschungsjournals sein.

Neben den Forschungsschwerpunkten als thematisch zusammenhängenden Bereichen mit ausgeprägter Kompetenz und Relevanz wird selbstverständlich auch Individualforschung, die nicht notwendigerweise einem Forschungsschwerpunkt zuzuordnen ist, stattfinden. Und an einer stabilen Universität sollten selbst „crazy ideas“ als bereicherndes Element verstanden werden.

In diesem Sinne danke ich allen Mitwirkenden bei der Herstellung dieses Heftes herzlich: unseren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die den Stoff liefern, aus dem die Bücher sind, und dem

Redaktionsteam, das für den appetitanregenden Transport der Nachricht Sorge trägt. Ihnen allen wünsche ich spannende Momente beim interessierten Lesen dieses Forschungsjournals, und uns allen eine weiterhin so prosperierende Forschungskultur.

### *Research: Curiosity and Necessity*

„Cui bono?“ – a frequently asked question, particularly when facing budgetary constraints, imposed slimness treatment, and the re-dimensioning of enterprises. „Cui bono?“ – a provocative question for basic science. „Cui bono?“ – a legitimate question for applied research. Questions such as this one will be increasingly asked to autonomous universities, and the society expects clear answers.

The driving element of research is generally curiosity, and therefore the wish to better understand how the world works, and based on its understanding, to predict future developments. The observed reality is being modelled mathematically, and the model, successively improved by new observations, is brought closer and closer to reality in cyclic steps. In mathematics this process is called Kalman filtering, plane mortals simply call it learning by doing.

And after a sufficient number of cycles have been passed, one realizes that obtained results and perceptions may also become practically useful. A new market segment begins to develop, scientific curiosity is being accompanied by commercial necessity and the latter one finally becomes the driving element for improvement. Curiosity and necessity pave the way for basic and applied research alike.

A modern university which is devoted to research and teaching, a university which aims at recognizing and also shaping future developments, such an institution is well advised to give home to both: to curiosity and to necessity. And politics is equally well advised to provide adequate support to basic research. Because if nothing basically new is invented, there will quickly be not much left to develop.

The complexity of our world combined with highest quality standards requires a high degree of interdisciplinarity in all research segments. Sensor fusion as the complementary functioning of sophisticated dedicated devices becomes a „sine qua non“. The processing of huge data sets using parallel computer architectures becomes the daily practise. And the fair handshake between experts from various disciplines becomes a natural thing. And often the noise in our own field of research is being recognized as a useful signal in a neighboring field.

A University of Technology suggests itself particularly as a bridge-builder between theory and application. And the bridge's carrying-power is being judged on the basis of achievements in research and teaching. The latest research reports of the Graz University of Technology are impressive examples of its performance, and the articles in this journal are representatives for the very research potential at our University.

The ongoing transformation of the Austrian university system is also accompanied by profile shaping. Following the motto „strengthen the strength“, we are currently developing our research profile which will most likely be represented by eight research areas in which our University of Technology has developed particularly pronounced expertise. These research areas will be the focus of attention in the forthcoming issue of this Research Journal.

Apart from these focal areas of research, which represent thematically connected areas of high competence and relevance at our University, there will naturally be ample room for individual research with little or no affinity to one of the focal research areas. And a stable university system should be able to accommodate and should be willing to appreciate even somewhat „crazy ideas“.

In this sense I would like to thank all colleagues who contributed to this issue of our Research Journal: the scientists who kindly provided the intellectual material, and the editorial team that helped to conveniently transport the good news from research. May I wish you interesting moments when reading the articles. And may I furthermore wish all of us a prosperous research culture in the years to come.

O.Univ.-Prof. Dr.phil. Werner Pfannhauser  
Institut für Lebensmittelchemie und -technologie  
E-Mail: werner.pfannhauser@TUGraz.at  
Tel: 0316 873 6470



Dipl.-Ing. Dr.techn. Ursula Mülleder  
Institut für Lebensmittelchemie und -technologie  
E-Mail: ursula.mueller@TUGraz.at  
Tel: 0316 873 6499



## MOLSPEC-ID: Entwicklung von quantitativen und qualitativen molekularbiologischen Methoden zum Nachweis von Tier- und Pflanzenarten in Lebensmitteln

### *MOLSPEC-ID: Development of Quantitative and Qualitative Molecular Biological Methods to Identify Plant and Animal Species in Food*

Das Ziel des MOLSPEC-ID-Projekts ist die Entwicklung von molekularbiologischen Detektionsmethoden zur Identifizierung spezifischer Tier- und Pflanzenarten in Lebensmitteln. Dies ist wichtig für die Aufdeckung des missbräuchlichen Ersatzes von Nahrungsmittel-Komponenten (Täuschung) und der Vermeidung von negativen Reaktionen auf unerwartete Inhaltsstoffe (Allergene).

Ausgehend von der hohen Erwartung, die von den Konsumenten in die Lebensmittelqualität gesetzt wird, ist die eindeutige Identifizierung von Tier- und Pflanzenarten in Lebensmitteln ein wichtiger Schritt in Richtung Transparenz, Information und Sicherheit. Die Lebensmittel werden immer raffinierter verarbeitet, man erkennt nicht mehr auf den ersten Blick, was alles in den Lebensmitteln enthalten ist. Das macht die Lebensmittelkennzeichnung zunehmend wichtiger. Andererseits gibt es große Qualitätsunterschiede bei den einzelnen Inhaltsstoffen und daher auch große Unterschiede bei den Produktionskosten von Lebensmitteln. Das führt zur Versuchung, Lebensmittel, die Inhaltsstoffe minderer Qualität enthalten, höherwertiger zu deklarieren als sie sind. Verfälschungen bzw. Falschdeklarationen von Fleischprodukten stellen im Vergleich zu anderen Lebensmitteln eine seltene, aber seit Jahrhunderten vorkommende Täuschung der Verbraucher dar. Der Hauptgrund für eine Falschdeklaration von Fleisch, welche durch ähnliche Eigenschaften wie Aussehen und Geschmack ermöglicht wird, liegt in der Preisdifferenz der verschiedenen Tierarten. In Zeiten von BSE ist es für viele Verbraucher wichtig zu wissen, dass als rindfleischfrei deklarierte Fleischprodukte tatsächlich kein Rindfleisch enthalten. Auch religiöse und gesellschaftliche Gründe können eine Rolle spielen, warum Konsumenten Fleisch einer bestimmten Tierart meiden. Verbraucher zahlen teilweise hohe Summen, um eine Delikatesse wie z.B. eine Gänseleberpastete zu genießen, und erwarten sich dann auch diese hohe Qualität, die nicht durch die Beimengung von Entenleber verringert sein darf.

Ganz allgemein ist die Möglichkeit der Sortenidentifizierung eine Voraussetzung für die Überprüfung der Kennzeichnung von Lebensmitteln. Damit soll der Konsument vor Betrug und versteckten Lebensmittelbestandteilen, die ein großes Gesundheitsrisiko darstellen (versteckte Allergene), geschützt werden. Gerade auf dem Gebiet der potentiellen Allergene, die dafür bekannt sind, dass sie schwere anaphylaktische Reaktionen bis hin zum Tod auslösen können (Erdnuss, Soja, Sellerie), gibt es bis jetzt noch kaum validierte Nachweismethoden auf PCR (Polymerasenkettenreaktion) – Basis. Diese Methoden würden zu einer Verbesserung der Lebensmittelüberwachung und auch zur Qualitätssicherung von Rohmaterialien in der Produktion von hochqualitativen Produkten führen. Bis jetzt basieren die offiziellen Methoden zur Überprüfung von Tier- und Pflanzenarten hauptsächlich auf Proteinanalytik (z.B. isoelektrische Fokussierung, PAGE, immunologische Verfahren). Bei verarbeiteten Produkten ist das allerdings problematisch, da viele Proteine bei der Verarbeitung verändert oder zerstört werden. Deshalb haben sich in den letzten Jahren in der Lebensmittelanalytik immer mehr Methoden auf Nukleinsäure (DNA) - Basis etabliert.

Neben der hohen Empfindlichkeit und Spezifität ist die exzellente Möglichkeit der Standardisierung einer der größten Vorteile

dieser Methoden. Die DNA ist in allen Zellen einer Spezies gleich. Der Informationsgehalt der DNA ist aufgrund der Degenerierung des genetischen Codes höher als der von Proteinen. DNA ist sehr stabil und übersteht die meisten Verarbeitungsschritte viel besser als Proteine. Immunologische Methoden sind immer abhängig von der hohen Qualität der Antikörper. PCR-Primer können leicht in adäquater Qualität von verschiedenen Herstellern erhalten werden. Außerdem wird zurzeit eine Vielzahl von DNA-Methoden zur Steigerung des Probendurchsatzes entwickelt (multiplex-PCR, PCR-ELISA, Chip-Technologie). Trotz allem ist auch die Proteinanalytik nicht aus dem biochemischen Alltag wegzudenken. Sie ist leicht handhabbar und relativ günstig durchführbar. Bis jetzt gibt es jedoch noch keine systematischen Vergleiche von Proteinmethoden (Limitierungen, Anwendungsbereiche) mit Methoden, die auf DNA-Basis beruhen.

Ein solcher Vergleich im Rahmen des EU-Projektes MOLSPEC-ID soll neue Erfahrungswerte auf diesem Gebiet bringen und auch zu Empfehlungen in der praktischen Anwendung führen, wann z.B. welche Methode bevorzugt werden soll.

Das Hauptziel des Projektes ist die Entwicklung von Methoden, die geeignet sind für die Überwachung von potentiell allergenen Lebensmittelbestandteilen und von Ersatz von Arten und Arten-Zumischung, um eine korrekte Lebensmittelkennzeichnung zu garantieren. Dafür wird eine Reihe von Arten (tierisch und pflanzlich) in Lebensmitteln untersucht, die in dieser Beziehung besonders relevant sind. Das zu untersuchende Material wird in verschiedener Zusammensetzung und Verarbeitungsart von einem Projektpartner (der Bundesanstalt für Fleischforschung in Kulmbach in Deutschland) zur Verfügung gestellt. 14 Projektpartner aus 11 europäischen Ländern entwickeln Nachweissysteme für die verschiedenen Organismen.

Das Projekt beinhaltet zwei Aspekte:

- (1) Die Entwicklung von qualitativen Methoden, die es ermöglichen, eine breite Palette von verschiedenen Tier- und Pflanzenarten (inklusive exotischer Tierarten und Arten von regionalem Interesse) und versteckte potentiell allergene Stoffe nachzuweisen.
- (2) Die Entwicklung von quantitativen Methoden mit besonderem Augenmerk auf die Nachweisgrenze, um die Möglichkeiten der gesetzlichen Überwachung der Lebensmittel zu verbessern.

Zusätzlich wird eine Datenbank entwickelt, in der alle Informationen, die im Rahmen des Projektes erarbeitet werden, gesammelt werden und die nach Projektabschluss dem interessierten Publikum (Lebensmittelkontrolle, Qualitätsmanagement) zur Verfügung stehen soll.

Die Arbeitsgruppe „biochemische Lebensmittelanalytik“ (Leitung Dipl.Ing. Dr. Ursula Mülleder) des Institutes für Lebensmittelchemie und -technologie der TU Graz ist aktiv in vier Arbeitsbereichen dieses EU-Projektes tätig. Im ersten Bereich geht es um die Entwicklung von qualitativen und quantitativen PCR-Methoden zur Detektion von verschiedenen Tier- und Pflanzenarten. Unsere Aufgabe ist dabei die qualitative Detektion von Truthahn, Huhn und Ente und die Entwicklung quantitativer Systeme für Ente und Truthahn. Mit den dabei erstellten Methoden wird in der Folge ein „Multiplex-PCR-

System“ entwickelt. Dabei geht es ganz einfach um die simultane Detektion von mehreren Tierarten in einem Versuchsansatz. Der dritte Arbeitsbereich, in dem unsere Arbeitsgruppe mitwirkt, befasst

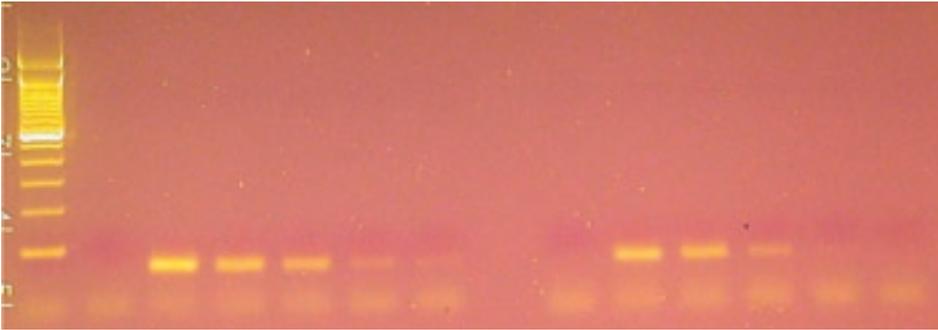


Abb.1: Gefärbtes Agarosegel mit Produkten einer PCR mit „Huhn-spezifischen“ Primern. Ganz links ist der Längenstandard aufgetragen, danach Huhn-DNA in verschiedenen Konzentrationen (im Bereich von 1 ng/µL bis 1 pg/µL)

sich mit dem Vergleich der neu entwickelten PCR-Methoden mit den bisher zum Nachweis von Tierarten üblichen Methoden auf Proteinbasis. Dabei werden von uns kommerziell erhältliche Testkits und Systeme anderer Projektpartner durchgetestet. Am Ende des Projektes werden schließlich einige der von den Projektteilnehmern entwickelten molekularbiologischen Methoden in Ringversuchen validiert.

Alle von uns entwickelten Methoden beruhen auf der Polymerasekettenreaktion (PCR). Diese ermöglicht es, große Mengen an spezifischer DNA mit definierter Länge und Sequenz aus einer kleinen Menge an Ausgangs-DNA herzustellen. Dadurch können auch extrem kleine Mengen der Ziel-DNA nachgewiesen werden. Das Prinzip der PCR ist einfach. Sie umfasst 3 Schritte, wobei nach Hitzedenaturierung der DNA Oligonukleotide (Primer) an die beiden Einzelstränge anlagern und ausgehend von deren 3'-Ende die DNA-Polymerase neue DNA synthetisiert. Diese Schritte werden in

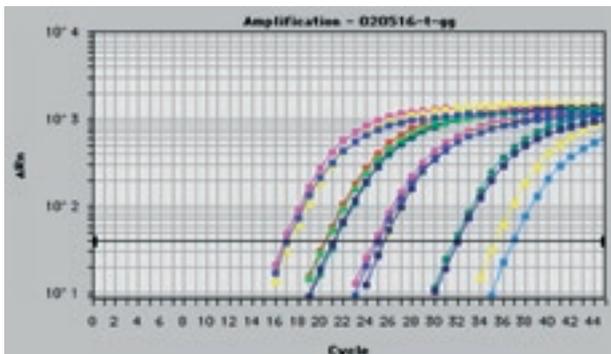


Abb.2: Amplifikation-Plot einer Real-time PCR mit einem Truthahn-spezifischen System. Gezeigt sind Ansätze mit Truthahn-DNA in verschiedenen Konzentrationen

Form eines Zyklus immer wieder durchlaufen, bis genug Produkt vorhanden ist (30 bis 45 Zyklen). Die Primer werden so gewählt, dass exakt nur ein kurzes

DNA-Stück einer ganz bestimmten Tier- oder Pflanzenart vervielfältigt wird. Üblicherweise wird das Produkt dann mittels Agarose-Gelelektrophorese nachgewiesen. Die DNA wandert je nach Molekülgröße eine bestimmte Distanz im elektrischen Feld und kann dann mit verschiedenen Farbstoffen sichtbar gemacht werden. Durch Vergleich mit den Banden eines Größenstandards kann die Fragmentgröße bestimmt werden (Abb. 1). Mit der PCR können qualitative und semi-quantitative Nachweise durchgeführt werden.

Für die quantitative Bestimmung von Truthahn und Ente werden von uns „Real-time PCR“ Methoden entwickelt. Bei der „Real-time

PCR“ können die PCR-Produkte in Echtzeit gleich online durch das Messen eines Fluoreszenzsignals verfolgt werden. Es ist keine Gelelektrophorese der PCR-Produkte mehr notwendig. Je höher die Konzentration der Ziel-DNA in der Lösung ist, desto früher misst man das exponentiell ansteigende Fluoreszenzsignal (Abb.2). Mit dieser Methode können auch exakte quantitative Bestimmungen durchgeführt werden.

Am Ende des Forschungsprojektes sollen alle in diesem Rahmen entwickelten Methoden in einer Datenbank, die von einem der Projektteilnehmer erstellt wird, gesammelt vorliegen. Diese soll eine Anlaufstelle für z.B. Organe der amtlichen Lebensmittelüberwachung und andere interessierte Personen werden und zu einer weiteren Verbesserung der Kontrolle der Lebensmittelkennzeichnung und der Qualitätssicherung führen.

### *MOLSPEC-ID: Development of Quantitative and Qualitative Molecular Biological Methods to Identify Plant and Animal Species in Food*

*The goal of the MOLSPEC-ID-project is the development of detection methods to identify specific plant and animal species in food. 14 partners out of 11 European countries are involved in the MOLSPEC-ID project, organized in 5 work packages.*

*Recent investigations demonstrated that fraudulent replacement of food components, as well as adverse reactions to unexpected food ingredients are quite common problems. Up to now official methods for the detection of plant and animal species in foods are mainly based on protein analysis. The project aims at developing DNA-analytical methods for qualitative and quantitative identification of plant and animal species in foods to monitor product safety and traceability. Main objectives of the project will be the development of methods suited for the monitoring of potential allergenic compounds, fraud and to ensure correct labelling. Thus a panel of species in foodstuffs will be investigated which might play a role in this regard.*

*The project includes two aspects: development of qualitative methods that are useful to identify a broad variety of different species including exotic species, species of regional interest and hidden potential allergenic compounds. Quantitative methods will be developed with respect to threshold values for supporting the surveillance of legal requirements. Research will be performed on the following aspects: enhancing sample throughput and applicability and comparison of DNA with protein analytical methods. A research aspect will be enhancing throughput by introducing multiplex-PCR, PCR-ELISA and chip technology. Four methods for several species will be validated in interlaboratory studies. Furthermore a public database will be established containing information about methods to identify plant and animal species in foods.*

*In the MOLSPEC-ID-project the working group "biochemical food analysis" of the institute of food chemistry and technology will develop PCR systems for the qualitative detection of duck, turkey and chicken and for the quantification of turkey and duck. Based on these systems a multiplex PCR system will be developed and verified with reference materials. Other tasks of our working group will be the testing of commercial protein based methods for several species and the participation in at least three ring trials.*



## PRESENCIA - Presence Research Encompassing Sensory Enhancement, Neuroscience and Cognition, with Interactive Applications – IST 2001-37027

PRESENCIA ist ein Projekt aus dem Bereich "Presence Research" („Gegenwartsforschung"/„Gegenwartserleben") mit einem Gesamtvolumen von 20 Millionen Euro. Es verbindet Neuro- und Kognitionswissenschaften und soll verbesserte Stimulationsmöglichkeiten sensorischer Systeme und interaktive Anwendungen untersuchen. Die TU Graz (Institut für Elektro- und Biomedizinische Technik, Abteilung für Medizinische Informatik) ist für die erstmalige Kopplung von BCI-Technologie mit Virtual Reality (VR)-Technologie verantwortlich. Ziel dabei ist das Navigieren in einer virtuellen Welt mit Hilfe von „Gedanken“.

PRESENCIA is one out of 10 projects of the European Commission initiative on "Presence" research funded altogether with € 20 Million for the years 2002 to 2005.

### Objectives of "Presence" research

The objective of this initiative is to develop a coherent multilevel theory of presence, which explores the cognitive and affective roots of sensory perception. Knowledge in this area should contribute to the design of innovative media systems that offer richer experiences than any current combination of IT-based media and communication technologies.

Reaching the objectives of the presence initiative, requires systematic and interdisciplinary scientific investigations to discover what are the salient parameters and clues that contribute to the experience of presence when human beings participate in a mediated environment. Such an experience can be demonstrated by interactive systems that allow humans to escape the boundaries of space and time for such purposes as communicating, learning, entertainment, commerce, and remote actions.

### What is "Presence"?

Presence, the sense of "being there", is the experience of projecting one's mind through media to other places, people and designed environments. Appropriate presence technologies combine to create an illusion of "non-mediation" – the closest possible approximation to a sense of physical presence, when physical presence there may be none.

The initiative is timely because of two developments: On the one hand, recent discoveries in cognitive neuroscience make it possible to acquire a better understanding of the human aspects of presence. On the other hand, the breakthroughs at the level of the enabling technologies such as broadband access, computing power and displays make it increasingly possible to build systems based on this understanding.

### Background and Analysis of "Presence" Research

There has long been a tendency to increase the fidelity of representations of reality by pushing the limits of established technology. This tendency was reflected in a pixel-pushing, or "resolution" approach to media design, supported by technological advances in the areas of networks, computing power, electronic displays and human-system interfaces. There are lessons from the past that illustrate the limits of the pixel-pushing approach to media design. The RGB color gamut was developed as an add-on to black and white television,

colour tv has not changed much in 30 years and isn't based on a correct theory of human colour perception.

The pixel-pushing approach to increased fidelity and high resolution multimedia led to systems that are increasingly digitized in form and increasingly "sophisticated" but the human cognitive aspects have not been sufficiently taken into account. Taking the lessons of the past, and going for an alternative approach, means that if these perceptual aspects were now taken into account we could have media that were better, or cheaper, or that could generate new experiences.

Sound is very important for presence; the human voice contains in its acoustic structure a wealth of information on the speaker's identity and emotional state. Humans perceive this information with remarkable ease and accuracy. The quality of sound from tv sets and high-end speakers is unconvincing to our ears: the acoustical source signal has been "processed" and re-engineered to fit the available technology channel, and as a result sounds are almost void of the information source content which the human ear would need to be tricked into believing there are really present.

With internet and other forms of digital access, the consumption of media-related information is at a historical all-time high. As a result the enabling technologies are increasingly sophisticated, especially when it comes to compression for the sake of maximising resolution. What pixel-pushing technologies lack in their consideration of human characteristics could serve as an opportunity for an alternative approach to the design of interactive communication systems – less in the sense of maximising throughput and more in providing what the user needs or wants – to be useful to convey a greater sense of presence.

"Presence" research requires systematic scientific investigations to discover what are the salient parameters and clues that contribute to a meaningful experience of presence when human beings interact with a mediated environment. How the brain translates tacit sensory stimuli into symbolic knowing (a coherent and meaningful mental representation of the world outside) is still not understood. The state-of-the-art offers fragmented research findings which give new insights into the specialization and organization of the human visual brain and sensory-motor intelligence.

### "Presence" Research Targets

"Presence" research covers an inherently broad area of interdisciplinary work. Collaboration means combining scattered fragments of knowledge from various disciplines into a field which is only at the very beginning. The background state-of-the-art and vision documents for "Presence" research have been developed in consultation with experts by the EU funded PRESENCE RESEARCH WORKING GROUP.

Some of the research targets that were agreed to be important are provided below (Fig. 1):

- Brain processes & the sensory-motor system  
Can we enhance presence through understanding multisensory integration? How? Can we identify the various brain functions and the user states that modify or determine presence? Rever-

sibly, can we understand consciousness through presence in a virtual environment?

- Cognitive parameters & representation systems for presence  
Can we identify the salient determinants of presence and explain their interaction? What are the salient perceptual cues that facilitate correct semantic recognition for object representation? What are the best metrics for assessing quality of service in presence technologies?
- Designing optimal experiences (e.g. "creative flow")  
Immersive experiences tend to be of short duration, with users having to learn to adjust to the system instead of the reverse. Can we create a rich coherent perceptual experience of presence adapted to the diverse needs of the environment, the user and the application?
- Telepresence  
Can we radically improve the way we convey multisensory information at any time, to anyone, on the move close by or at a distance; time and space becoming irrelevant? Can we design a multimedia system that captures 3D holographic omnipresence, that transmits and reproduces non-verbal communication, group mood and eye contact?
- Haptic presence, moving the sensory-motor system through communication networks  
Is there an implicit "touch language"? Can presence research create sensory rich environments that feel like interacting with "real matter" (using force feedback, and gaining greater degrees of freedom than today's haptic interfaces)?

These challenges need to be addressed through a combination of study and experimental work.

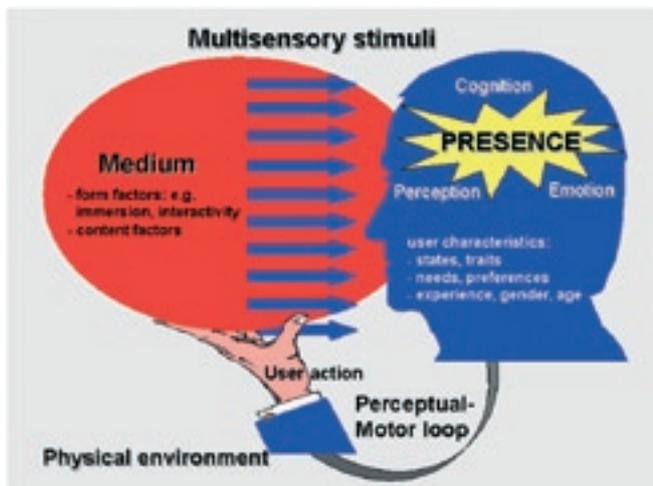


Fig. 1 Components of "Presence" research

#### Objectives of PRESENCIA

- A neural and physiological characterisation of presence: To execute psychophysiological and brain imaging studies that provide a characterisation of the physiological and neuronal signatures associated with switches between different presence states. The

key goal is to implement functional magnetic resonance imaging (fMRI) experiments, using event-related designs, where the presence state (or switches in state of presence) is indexed by (i) phenomenological report from subjects (ii) a change in bodily state indexed by independent psychophysiological markers.

- Neurophysiological and behavioural studies: To execute electro-physiological and behavioural experiments, with the goal of understanding the pattern of electrical brain activity when animals have to choose their behaviour under conditions of changing environmental cues. How does behaviour change, and what pattern of neuron firings are associated with these changes?
- Neurophysiological based interaction methods: To develop a Human-Computer-Interface (HCI) based on a real-time neuro-physiological device to be constructed in the project that participants can consciously control and utilize to navigate through a virtual environment. The same device will be used to portray the neuro-physiological state of a people communicating in a shared virtual reality (VR) environment.
- Measurement techniques for presence: To construct robust measures of presence that can assess presence in relation to many different display and interaction media. The measurement techniques will follow from the theory to be developed during the project.
- A theory of presence: To develop a theory of presence that characterises presence and attempts to explain how and why the presence state changes in response to changes in display and interaction parameters, and across different media, and including the role of perceptual and cognitive factors, including attention. This theory will be elaborated in response to real data accumulated in pursuance of the other and tested against the execution of experiments in different media.

#### Partners of PRESENCIA

Department of Computer Science, University College London, UK  
(Project coordinator: Mel Slater)  
Institute of Neurology, University College London, UK  
(Local coordinator: Ray Dolan)  
Instituto de Neurociencias, Universidad Miguel Hernandez-CSIC, Spain  
(Local coordinator: Maria V. Sanchez Vives)  
Institute for Biomedical Engineering, University of Technology, Graz, Austria  
(Local coordinator: Gert Pfurtscheller)  
g.tec guger technologies, Graz, Austria  
(Local coordinator: Christoph Guger)  
Department of Education in Technology and Science, Technion  
- Israel Institute of Technology, Israel  
(Local coordinator: Miriam Reiner)

#### Contribution of TU Graz to PRESENCIA

The Institute of Biomedical Engineering, Department of Medical Informatics, is responsible for Working Package (WP) 4 with the goal to combine the first time the brain-computer-interface (BCI) technology, developed in Graz, with VR technology (Fig. 2). One goal of WP 4 is to realize the navigation through a virtual environment by mental activity (through thoughts). A partner within this WP 4

is the company "g.tec" in Graz, specialized to design and construct real-time biosignal processing systems (BCI systems). In detail the following has to be investigated:

- Mode of BCI operation: The brain signals can be analysed and classified continuously (asynchronous mode) or in predefined time intervals after a cue-stimulus (synchronous mode). Which mode is more suitable for VR control?
- Feature extraction: Two types of features will be studied. On the one hand adaptive autoregressive parameters (AAR) estimated by a Kalman filter and on the other hand real-time computation of Discrete Wavelet Packages (DWT) calculated by the lifting-scheme. Special effort is given to optimise these features e.g. by use of the Genetic Algorithm. What are the best features for VR control?
- Feature classification: Here a great variety of classifiers will be investigated as e.g. Linear Discriminate Analysis (LDA), Support Vector Machines (SVM), Hidden Markov Models (HMM) etc. Is there an optimal classifier for VR control?
- Dimension of VR control: A two-dimensional control is based on the discrimination of two brain states or two brain patterns, whether a 3, 4 or more-dimensional VR control is feasible has to be investigated. Can we realize a higher dimensional VR control?

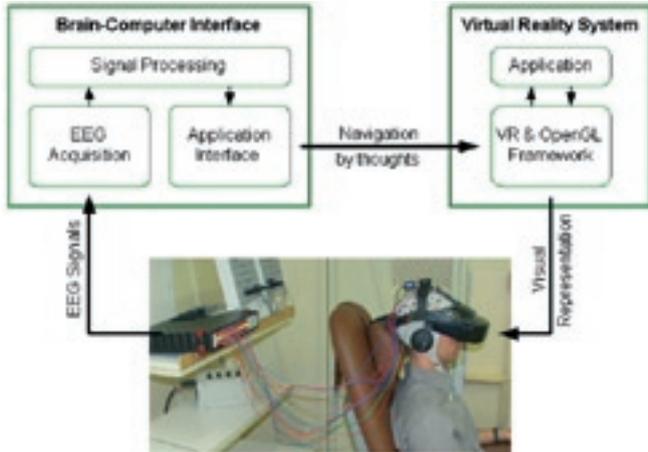


Fig. 2: Control of virtual reality (VR) by a Brain-Computer Interface (BCI)

For the realization of the project the interdisciplinary team at the Department of Medical Informatics consisting of psychologists, biomedical engineers and telematic experts will be responsible. For the experiments a new 64-channel EEG system and several BCI prototype systems are available. In addition, a head-mounted display with a head position tracker will be installed to realize the VR environment.



# spitzenleisTUng.

30 EU-Projekte, Beteiligung an 11 Kompetenzzentren, 8 centers of excellence,  
Leitung von 7 Christian-Doppler-Labors, 6 Startpreisträger, 1 Nobelpreisträger:

Was an den 75 Instituten und 5 Fakultäten der TU Graz geleistet wird,  
würde so mancher „großen“ Universität zur Ehre gereichen. Und uns natürlich um so mehr.



Technische Universität Graz



# Neue rein optische Systeme und Methoden zur präzisen Messung von magnetischen und elektromagnetischen Feldern

## *New All-optical Systems and Methods for Precise Magnetic and Electromagnetic Field Measurements*

Magnetometer werden zur Untersuchung natürlicher oder künstlich erzeugter Magnetfelder verwendet. Typische Kraftflußdichten (in der Einheit „Tesla“, T) sind: Felder von supraleitenden Spulen: ca. 30 T, von starken Dauer- und Elektromagneten 1 T, Erdmagnetfeld ca. 0,03 mT, Magnetfeld der Ströme im menschlichen Herzen ca. 1/50000 des Erdmagnetfeldes, also unter 1 nT.

Zur Messung des Betrages und der Richtung eines magnetischen Feldes können viele bekannte Effekte der Physik (meist der Elektrizitätslehre) ausgenutzt werden: Induktion von Strömen in Spulen, der Hall-Effekt, Sättigung von Flußdichten (Fluxgate-Magnetometer), Quanteneffekte in Supraleitern (SQUID-Magnetometer, squid = superconducting quantum interference device) u.a.

Der Einfluss eines magnetischen Feldes auf die Spektrallinien eines Atoms ist seit 1896 unter dem Namen „Zeeman-Effekt“ bekannt. Das Feld bewirkt eine Aufspaltung in mehrere eng benachbarte Frequenzkomponenten. Um diese analysieren zu können, müssen hochauflösende Methoden der optischen Spektroskopie eingesetzt werden. Als Messmethode für (starke) Magnetfelder wird der Zeeman-Effekt vor allem in der Astronomie eingesetzt, da Informationen über Sternplasmen nur dem auf die Erde gelangenden Licht entnommen werden können.

Die Möglichkeit, mit Hilfe des Zeeman-Effekts der optischen Spektrallinien sehr kleine Magnetfelder messen zu können, wird durch den Umstand begrenzt, dass angeregte atomare Zustände nur eine begrenzte Lebensdauer (in der Größenordnung  $10^{-7}$  Sekunden) besitzen. Dieser Umstand führt dazu, dass die so genannte „natürliche Linienbreite“ einer Spektrallinie (z.B. Wellenlänge 600 nm, d.h. Frequenz  $\nu=5 \cdot 10^{14}$  Hertz) in der Größenordnung von 10 MHz liegt (das ist die Bandbreite, mit der ein ruhendes Atom abstrahlt). Somit müßte eine messbare Frequenzverschiebung der Spektrallinie durch das Magnetfeld in derselben Größenordnung liegen, was einer Feldstärke von ca. 0,1 mT entspricht. Dazu kommt noch der Umstand, dass erst „ruhende“ Atome präpariert werden müßten, da Atome in einer Zelle oder Lampe aufgrund ihrer thermischen Bewegung ein durch den Doppler-Effekt verbreitertes Linienprofil zeigen, dessen Halbwertsbreite etwa 100 mal größer ist als die natürliche Linienbreite.

Weitaus günstiger liegen die Verhältnisse, wenn man Übergänge zwischen den Hyperfeinstrukturkomponenten des atomaren Grundzustandes wählt. Die Lebensdauer derartiger Zustände ist außerordentlich hoch, weshalb die Übergänge natürliche Linienbreiten weit unterhalb von 1 Hz aufweisen. Die Übergangsfrequenz ist wesentlich kleiner als optische Frequenzen und liegt z.B. bei den Alkali-Atomen Na, Rb und Cs zwischen 1,8 und 9,1 GHz. Derartige Frequenzen können im Rahmen der elektrischen Hochfrequenztechnik sehr genau erzeugt werden. Zudem

reduziert sich auch die Doppler-Breite, sodass auch mit bewegten Atomen kleine Halbwertsbreiten beobachtbar sind.

Unterliegen die Atome der Wirkung eines magnetischen Feldes der Kraftflußdichte B, spalten die Hyperfeinniveaus, die durch eine Quantenzahl F gekennzeichnet sind, in jeweils  $2F+1$  magnetische Subniveaus mit den Quantenzahlen  $m_F$  auf. Die Frequenzverschiebung eines Niveaus ist (im Fall, dass die Frequenzänderung durch das Feld klein gegenüber dem Frequenzabstand benachbarter Niveaus mit  $\Delta F=1$  ist) proportional zu  $m_F$  mal B. Niveaus mit  $m_F=0$  verschieben sich im Feld daher nicht. Somit weisen Übergänge zwischen derartigen Niveaus („Uhrenübergänge“) immer dieselbe

Frequenz auf, unabhängig von etwaigen Störfeldern (Abb.1). Derartige Übergänge werden daher in Atomuhren (meist betrieben mit Cäsium) genutzt, um genaueste Zeitmessungen vorzunehmen. Seit 1967 ist sogar die Sekunde mit Hilfe des Übergangs  $F=3$ ,  $m_F=0$  nach  $F=4$ ,  $m_F=0$  im Isotop  $\text{Cs}^{133}$  definiert als das 9.192.631.770-fache der Periodendauer dieses Übergangs.

Bei Rubidium-Atomuhren, die meist als Substandards eingesetzt werden (z.B. in Satelliten), verwendet man das Prinzip des optischen Pumpens, um eine Ungleichgewichtsbesetzung der am Übergang beteiligten Hyperfeinstrukturkomponenten zu erzeugen: Licht

geeigneter Frequenz (erzeugt mit Hilfe einer Rb-Spektrallampe und entsprechender Filterung) bewirkt in einer Absorptionszelle einen optischen Übergang von einem der beteiligten Hyperfein-Niveaus zu einem angeregten Niveau des Atoms. Dieses zerfällt mit etwa gleicher Wahrscheinlichkeit in beide Hyperfein-Grundniveaus. Daher findet man nach kurzer Anregungszeit praktisch die gesamte Popu-

lation im nicht gepumpten Hyperfein-Grundniveau (Herstellung der Ungleichgewichtsbesetzung), und das Pumplicht wird nur zu einem geringen Teil absorbiert (Abb. 2a). Strahlt man nun auf die Zelle eine Mikrowellenfrequenz (bei  $\text{Rb}^{87}$  ca. 6 GHz) ein, die Übergänge zwischen den Hyperfeinniveaus anregt, wird dadurch Gleichgewichtsbesetzung erzeugt (Abb. 2b) und das eingestrahlte Pumplicht wird stärker absorbiert als ohne Mikrowelleneinstrahlung (Abb. 2c). Somit läßt sich durch Detektion der transmittierten Strahlungsintensität in Abhängigkeit von der Frequenz des Mikrowellenfeldes ein Regelsignal für diese Frequenz gewinnen.

Das Prinzip der optisch gepumpten Atomuhr läßt sich auch für Magnetfeldmessungen nutzen: nun müssen nicht Übergänge zwischen Niveaus mit  $m_F=0$ , sondern Übergänge zwischen Niveaus mit  $m_F \geq 1$  benutzt werden, da ihre Lage relativ zu den  $m_F=0$ -Zuständen vom Magnetfeld abhängig ist (Abb.1). Um entsprechenden Frequenzabstand vom Uhrenübergang zu bekommen, wird dem zu messenden Feld meist ein konstantes bekanntes

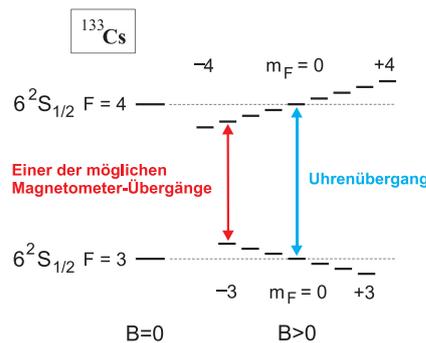


Abb.1. Aufspaltung von Hyperfeinstruktur-Niveaus im Magnetfeld

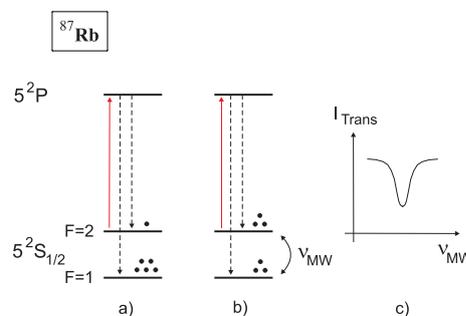


Abb.2. Prinzip des optischen Pumpens. a) Herstellen einer Ungleichgewichtsbesetzung. b) Die Mikrowellenfrequenz stellt wieder Gleichbesetzung her. c) Transmittierte Intensität  $I_{\text{Trans}}$  als Funktion der Mikrowellenfrequenz  $\nu_{\text{MW}}$

Magnetfeld überlagert. In jüngster Zeit ist es gelungen [1], mit derartigen Magnetometern bereits Empfindlichkeiten und Zeitaufösungen zu erreichen, die zur Detektion des Magnetfeldes des Herzens ausreichen. Der Vorteil gegenüber SQUID-Magnetometern liegt in der nicht notwendigen kryostatischen Ausrüstung, da keine tiefen Temperaturen (zum Erreichen eines supraleitenden Zustands) nötig sind.

Nachteil der optisch gepumpten Atomuhren und Magnetometer ist jedoch, dass um die Absorptionszelle ein Mikrowellen-Resonator vorhanden sein muss, da eine genügend hohe Mikrowellen-Intensität zur Herstellung des Ungleichgewichts erforderlich ist.

Mit Hilfe eines quantenmechanischen Effektes lässt sich das Problem der Einstrahlung eines Mikrowellenfeldes jedoch umgehen: Strahlt man zwei optische Frequenzen auf ein Atom ein, die gleichzeitig beide Hyperfein-Grundniveaus zu einem gemeinsamen oberen Niveau anregen, erwartet man zunächst erhöhte Absorption, da nun keine Atome durch optisches Pumpen aus dem Anregungszyklus fallen können. Dies ist auch richtig; wenn jedoch die Differenz der optischen Anregungsfrequenzen exakt der Hyperfein-Aufspaltung des Grundniveaus entspricht ( $\nu_1 - \nu_2 = \nu_{12}$ , vgl. Abb.3), kann das Zwei-Frequenz-Licht nicht mehr absorbiert werden. Man erhält einen charakteristischen Einbruch der Fluoreszenzintensität, eine „Dunkelresonanz“. Durch die Wechselwirkung mit dem Zwei-Frequenz-Lichtfeld gelangt das Atom in einen kohärenten Überlagerungszustand aus beiden Grundniveaus, der nicht mit dem Lichtfeld wechselwirkt. In der Folge kann das Licht nicht mehr von den Atomen absorbiert werden, weshalb man bei Beobachtung des transmittierten Lichts von „elektromagnetisch induzierter Transparenz“ (EIT) spricht. Ein wesentlicher Vorteil der Methode ist, dass der Doppler-Effekt keine Rolle spielt, da die gemeinsame Verstimmung  $\Delta\nu$  relativ zum angeregten Niveau das EIT-Signal nicht beeinflusst. Somit

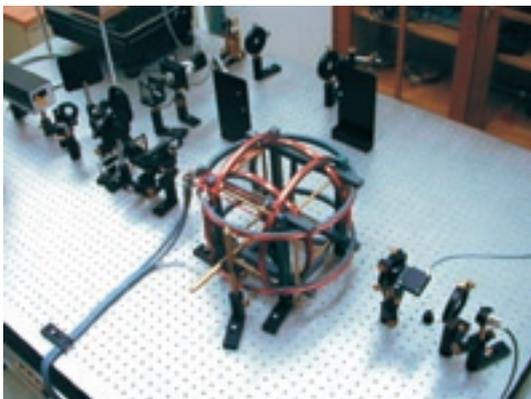


Abb.5. Aufbau zur Untersuchung der Absorption für ein System nach Abb.3a.

können auch in einer Zelle schmalbandige EIT-Signale erzeugt werden. Die erreichbare Linienbreite und der Kontrast der EIT-Signale wird durch verschiedene Relaxationsmechanismen bestimmt. Unsere

Arbeitsgruppe beschäftigt sich seit 1990 mit diesen Quanteneffekten; Übersichten über die geleisteten Arbeiten finden sich in [2].

Gehören die magnetischen Subniveaus zu einem Hyperfeinzustand, so kann sogar mit einer einzigen Lichtfrequenz gearbeitet werden (Abb.3a), die durch eine Zelle mit absorbierenden Atomen transmittiert wird. Die Bedingung zum Erreichen des Dunkelzustands ist eine Frequenzdifferenz gleich Null zwischen den beteiligten Subniveaus ( $\nu_1 = \nu_2 = \nu_0$ ;  $\nu_1 - \nu_2 = 0$ ); diese Bedingung wird beim Nulldurchgang des magnetischen Feldes erreicht. Scannt man also ein äußeres Feld, so beobachtet man ein Absorptionssignal mit einem EIT-Peak (Abb.4). Die erreichbare Signalbreite bei vollständiger Abwesenheit von Magnetfeldern beträgt wenige Hertz, das entspricht Magnetfeldern im Nanotesla-Bereich. Aus der Verbreiterung des EIT-Signals kann auf das Vorhandensein von äußeren, nicht kompensierbaren Magnetfeldern und ihre Stärke geschlossen werden. Eine entsprechende Versuchsanordnung zeigt Abb.5.

Um Dunkelresonanzen zwischen Subniveaus verschiedener Hyperfeinzustände nutzen zu können, muss zunächst kohärentes Zwei-Frequenz-Licht erzeugt werden. Dies kann z.B. durch die Erzeugung von Seitenbändern mit einem elektro- oder akusto-

optischen Modulator geschehen. Die Seitenbänder haben dann einen Frequenzabstand, der der Hyperfeinaufspaltung entspricht. Werden als absorbierende Atome Rb oder Cs verwendet, kann das benötigte Licht mittels Diodenlasern erzeugt werden. Die benötigten Seitenbänder können in Sonderfällen durch direkte Strommodulation erzeugt werden, was aber wegen der hohen Modulationsfrequenzen von 6 bzw. 9 GHz problematisch ist. Eine andere Möglichkeit ist das phasenstarke Koppeln des Lichts zweier Diodenlaser. Die Differenzfrequenz der beiden Lichtwellen wird gescannt, und das durch die Absorptionszelle transmittierte Signal aufgezeichnet. Jedesmal, wenn die Frequenzdifferenz mit dem Abstand zweier Zeeman-Subniveaus übereinstimmt ( $\nu_1 - \nu_2 = \nu_{12}$ ), ergibt sich ein EIT-Peak. Die bisher besten Resultate mit dieser Methode wurden von R. Wynands [3] publiziert; es ergibt sich eine Empfindlichkeit von etwa 1 Picotesla bei einer Mittelungszeit von einer Sekunde.

Gegenüber elektrischen Methoden zur Messung von Magnetfeldern ergibt sich der Vorteil, dass hier Magnetfeldsensoren völlig ohne Metallteile aufgebaut werden können: Der Absorptionszelle werden die Lichtfelder über eine Lichtleitfaser zugeführt, und das transmittierte Licht wird über dieselbe oder eine andere Faser zum Detektor rückgeführt. Bei entsprechender optischer Dichte des absorbierenden Dampfes werden Zellenlängen von nur wenigen Millimetern benötigt, sodass eine hohe räumliche Auflösung zu erwarten ist. Eine mögliche Anordnung zeigt Abb.6.

Die Arbeiten zur Entwicklung rein optischer Magnetfeld-Messme-

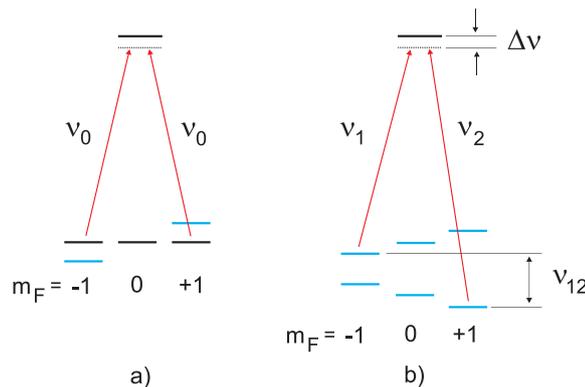


Abb.3. Bedingung für EIT für verschiedene Systeme. a) Subniveaus eines Hyperfeinzustandes. b) Subniveaus verschiedener Hyperfeinzustände

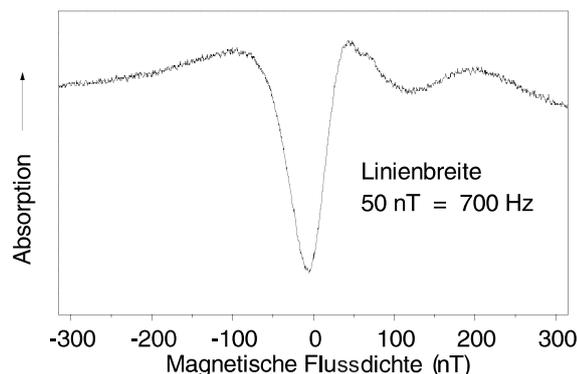


Abb.4. Absorption als Funktion der gescannten Flussdichte für ein System nach Abb.3a. Die Linienbreite von 700 Hz wird durch nicht kompensierte äußere Felder verursacht

thoden werden im Rahmen eines von der Europäischen Union geförderten Projekts (G6RD-CT-2001-00642) durchgeführt. Am Projekt beteiligt sind eine Arbeitsgruppe an der Universität Siena (Prof. Moi, Projektkoordinator), eine Gruppe am Institut für Elektronik der bulgarischen Akademie der Wissenschaften in Sofia (Dr. Cartaleva), und

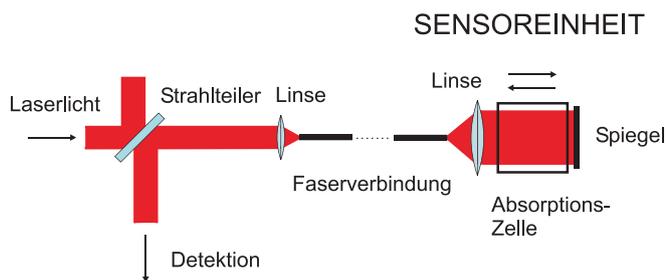


Abb.6. Möglicher Aufbau eines rein optischen Feldsensors

unsere Gruppe in Graz. Zwei bulgarische Firmen sollen später den Bau und Vertrieb der zu entwickelnden Geräte übernehmen. Ziel des Projektes ist es, für den praktischen Einsatz geeignete Methoden zu entwickeln und Prototypen von Magnetfeldmessgeräten aufzubauen. Als Projektlaufzeit sind 3 Jahre vorgesehen; im Jänner 2002 wurde mit den Arbeiten begonnen.

- [1] A.Weis; Department of Physics, University of Fribourg, Switzerland; private communication  
 [2] L.Windholz; Physica Scripta T95, 81, 2001  
 [3] M. Stähler, S. Knappe, C. Affolderbach, W. Kemp, R. Wynands; Europhys. Lett. 53, 323 (2001).

## New All-optical Systems and Methods for Precise Magnetic and Electromagnetic Field Measurements

Magnetometers are widely used to measure the strength and direction of magnetic fields of natural or artificial sources. A large number of physical effects can be used for this purpose.

The influence of a magnetic field on atomic spectral lines is known as Zeeman-effect since 1896 and causes splitting of the original light frequency into several closely neighbouring components. Using the Zeeman effect for the measurement of small magnetic fields is limited by the width of the spectral lines.

The situation changes when considering transitions between hyperfine levels of the atomic ground state, showing natural line widths below 1 Hz. For alkali atoms like Na, Rb and Cs the transition frequencies have values between 1.8 and 9.1 GHz.

Under the influence of an external field with strength  $B$ , the hyperfine levels (characterized by their quantum number  $F$ ) are splitted into  $2F+1$  magnetic sublevels with quantum numbers  $m_F$ . For small fields the frequency shift of the sublevels is proportional  $m_F$  times  $B$ . Levels with  $m_F=0$  are not influenced by  $B$  and are not shifting. Transitions between  $m_F=0$  - levels are not shifting and can be used as „clock transitions“ in atomic clocks (Fig.1). Since 1967 the second is defined as 9,192,631,770 times the period of the transition  $F=3, m_F=0$  to  $F=4, m_F=0$  in the isotope  $Cs^{133}$ .

In case of Rb atomic clocks, used as time standards (e.g. in satellites), optical pumping in a cell filled with Rb vapor is used to establish an imbalance between the populations of the hyperfine levels (Fig.2a). A microwave field tries to reestablish equilibrium population (Fig.2b), and the intensity of the light transmitted through the cell is dependent on the microwave frequency (Fig.2c).

The principle of the optically pumped atomic clock can be used

also for measurements of magnetic fields: now transitions between sublevels with  $m_F > 0$  have to be selected. With such devices, sensitivities large enough to detect the field of the human heart can be reached [1].

Using a quantum interference effect, called coherent population trapping, one needs no microwave field to detect the frequency difference between magnetically shifted hyperfine sublevels of the atomic ground state. „Dark resonances“ are observed when the difference of two optical frequencies fits exactly the splitting frequency. This quantum interference effect appears on each atom, and two-frequency light is less absorbed in a cell when the frequency condition  $\nu_1 - \nu_2 = \nu_{12}$  is fulfilled, and one observes „electromagnetically induced transparency“ (EIT). The Doppler effect of the atoms in the absorption cell is not relevant for this effect. Our group is investigating such quantum interference effects since 1990 (for an overview see ref. [2]).

The ground state sublevels involved may belong to the same hyperfine ground state. In this case, a single light frequency is enough to detect an EIT signal (Fig.3a). This signal appears if the frequency difference between the excited hyperfine sublevels is zero ( $\nu_1 = \nu_2 = \nu_{01}$ ;  $\nu_1 - \nu_2 = 0$ ), so if the external magnetic field is cancelled by a scannable field. The linewidth is a measure for not compensated external fields (Fig.4). The experimental arrangement is shown in Fig.5.

For using dark resonances between substates belonging to different hyperfine ground states (Fig. 3b) one has to produce coherent two-frequency light. The transmission signal through the absorption cell is detected in dependence on the difference of the two light frequencies. Sensitivities up to 1 pico-Tesla with one second integration time were demonstrated [3].

One of the advantages of the method is that a field sensor can be built completely without metallic parts. A possible sensor construction is shown in Fig.6.

Our work to develop all-optical magnetometers is funded by project no. G6RD-CT-2001-00642 of the European Commission.



# Biokatalysator Hefe: Ein Modellsystem zum Studium des Fettstoffwechsels

## *The Biocatalyst Yeast: a Model System to Study Lipid Metabolism*

Lipide (Fette) bilden eine wichtige biochemische Substanzklasse, die einerseits für den Aufbau zellulärer Strukturen (Organellen, biologische Membranen) benötigt wird und andererseits als Reservestoff für einen Organismus dient, der bei Bedarf mobilisiert wird. Die Arbeitsgruppen des Instituts für Biochemie der TU Graz beschäftigen sich seit mehr als zwei Jahrzehnten mit Problemen der Lipidsynthese, des Einbaus von Lipiden in Membranen und den biochemischen, biophysikalischen und zellbiologischen Auswirkungen von Defekten, die durch Abnormitäten im Lipidhaushalt hervorgerufen werden. Meine Arbeitsgruppe studiert seit vielen Jahren unterstützt durch den Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) in Österreich grundlegende Aspekte der Biochemie, Zellbiologie und Molekularbiologie der Lipide am Modellsystem Bäckerhefe (*Saccharomyces cerevisiae*). In den beiden Projekten „Lipidpartikel der Hefe“ (FWF 13669) und „Neutrallipide der Hefe“ (FWF 15141) wurden speziell die Synthese, die Depotbildung und die Mobilisierung von Triglyceriden und Sterolestern, den beiden wichtigsten Lipid-Reservestoffen in Hefe, untersucht.

### Die Problemstellung

Bestimmte Substanzklassen der Lipide (Phospholipide, Sterole, Sphingolipide) spielen als Strukturelemente für biologische Membranen eine wichtige und zum Teil sogar essentielle Rolle. Sie bilden in den meisten Fällen Membrandoppelschichten, die die Zelle einerseits nach außen abgrenzen und andererseits innerhalb der Zelle bestimmte Kompartimente (Organellen) umschließen. Neben den genannten Lipidklassen kennt man zwei Kategorien der sog. Neutrallipide (so bezeichnet, da sie keine freie Ladung besitzen): die Triglyceride (Fettsäureester des Glycerins) und Sterolester (Fettsäureester der Sterole, wie z.B. Cholesterin). Diese Lipide bilden mehr oder weniger erwünschte Energiedepots. Sowohl Triglyceride (TG) als auch Sterolester (STE) gelten als Risikofaktoren, da ihre Akkumulation z.B. beim Menschen zu krankhaften Erscheinungsbildern wie etwa Arteriosklerose führen kann. Andererseits bilden Neutrallipide einen wichtigen Rohstoff für technologische Prozesse. Aus diesen Gründen ist ein grundlegendes Verständnis der Biosynthese dieser Substanzen, des molekularen Hintergrunds ihres Stoffwechsels sowie der Regulation der beteiligten Stoffwechselwege auf enzymatischer und zellulärer Ebene von größtem Interesse.

### Das Modellsystem

Ein biochemisches Modellsystem, das in den letzten beiden Jahrzehnten große Bedeutung in Forschung und praxisorientierter Entwicklung biologischer Prozesse erlangte, ist die Hefe *Saccharomyces cerevisiae*. Dieses experimentelle System eignet sich sehr gut für Untersuchungen zu den oben beschriebenen Fragestellungen. Obwohl die Verwendung dieses Mikroorganismus, den man im täglichen Leben eher mit Bierproduktion oder Brotbacken in Zusammenhang bringt, für wissenschaftliche Untersuchungen banal klingen mag, besitzt er doch ein immenses Potenzial für den Bio-Wissenschaftler. Die Hefe weist nicht nur strukturell und funktionell sehr viele Parallelen zu den Zellen anderer sog. höherer Organismen (Eukaryonten) wie Pflanzen, Tiere und Mensch auf, sondern sie besitzt auch unschätzbare Vorteile im experimentellen Umgang. Einfache Anzucht, rasche Vermehrung, einfache Manipulierbarkeit durch Wachstumsbedingungen und Nährstoffe, sowie die Verfügbarkeit relativ einfacher molekularbiologischer Methoden zur Veränderung des Genoms und der Konstruktion von Mutanten zählen zu den wichtigsten Vorteilen

der Hefe gegenüber anderen zellulären Systemen. Hefe war die erste Eukaryontenzelle, deren Genom vollständig sequenziert worden war. Inzwischen existieren bereits Stammsammlungen, die Mutanten mit Defekten in jedem einzelnen der über 6000 Hefegene beinhalten. Diese Sammlungen, die auch für unsere Untersuchungen in hohem Maße herangezogen wurden, bilden eine wertvolle Grundlage für zellbiologische und biochemische Studien.

### Die Resultate: Lipide, Organellen und Gene

Die beiden Projekte „Lipidpartikel der Hefe“ und „Neutrallipide der Hefe“ beschäftigen sich (i) mit molekularbiologischen, zellbiologischen und biochemischen Strategien zur Identifizierung von Genen und Genprodukten, die an der Biosynthese und dem Metabolismus von TG und STE der Hefe *Saccharomyces cerevisiae* beteiligt sind, sowie (ii) mit der Lokalisierung der entsprechenden Stoffwechselschritte in bestimmten Zellkompartimenten (Organellen). Ziel der Projekte ist es somit, die molekulare Basis der Depotbildung der Neutrallipide und deren Mobilisierung besser verstehen zu lernen.

Ein Organell, das von meiner Arbeitsgruppe in diesem Zusammenhang bereits seit einigen Jahren sehr genau untersucht wurde, ist das sog. Lipidpartikel der Hefe *Saccharomyces cerevisiae* (siehe Abb. 1). Lipidpartikel bestehen aus einem Kern von Neutrallipiden (TG und STE), der von einer Phospholipid-Membran umgeben ist, in welche einige wenige Proteine eingelagert sind. Lipidpartikel wurden bisher immer nur als Depot für TG und STE betrachtet. Im Zuge unserer Arbeiten konnten wir jedoch einige Lipidpartikel-Proteine als Enzyme der Lipid-Biosynthese identifizieren. Es handelt sich dabei vor allem um Enzyme der Biosynthese von Phosphatidsäure, Sterolen und TG. Phosphatidsäure ist ein wichtiges Zwischenprodukt und eine Vorstufe für die Bildung von Phospholipiden und TG. Unsere Studien zeigten, dass bestimmte Enzyme dieses Stoffwechselweges jedoch nicht nur in Lipidpartikeln, sondern auch in anderen Organellen, u.a. im endoplasmatischen Reticulum und in Mitochondrien vorkommen. Außerdem gibt es eine Reihe von Enzymen, sog. Isoenzyme, deren Strukturen zwar nicht identisch sind, die jedoch die gleiche biochemische Reaktion katalysieren. Unserer Arbeitsgruppe gelang es erstmals, ein Enzym der Phosphatidsäure-Biosynthese zu identifizieren, das einen wichtigen Schritt dieses Stoffwechselweges katalysiert, und dem entsprechenden Gen zuzuordnen. Defekte in diesem Stoffwechselschritt können z.B. beim Menschen zu Erbkrankheiten mit fatalen Folgen führen. Weiters konnten wir ein neues Gen bzw. Genprodukt der TG-Synthese identifizieren und charakterisieren. Dieses Enzym ist auch zum Großteil auf Lipidpartikeln lokalisiert und ebenfalls das erste seiner Art, das in Hefe beschrieben wurde. Gleichzeitig mit zwei ausländischen Forschergruppen konnten wir zeigen, dass mehrere Stoffwechselwege zur Bildung von TG führen.

Neben TG bilden STE die Lipiddepots der Hefe-Lipidpartikel. In Zusammenarbeit mit zwei ausländischen und einer Grazer Arbeitsgruppe wurde das Zusammenspiel der Organellen einer Hefezelle bei der Synthese von Sterolen und STE studiert. Die einzelnen Schritte dieser komplexen Biosynthesewege sind auf Lipidpartikel und das endoplasmatische Reticulum aufgeteilt. Offenbar scheint eine Koordination auf der Ebene der Organellen ein wichtiges Mittel zur Regulation der Lipidsynthese darzustellen. Ähnlich wie bei der Synthese von Phosphatidsäure und TG wird die Biosynthese der STE auch durch zwei in ihrer Funktionalität überlappende Enzyme katalysiert. Beide Enzyme sind in diesem Fall jedoch in ein und demselben Organell, dem endoplasmatischen Reticulum, lokalisiert. Die

unterschiedliche Spezifität dieser Enzyme erlaubt die Synthese eines breiten Spektrums an STE.

Wie TG und STE vom Ort ihrer Synthese in ihre Depots, die Lipidpartikel, gelangen, ist noch weitgehend ungeklärt. Eine sehr wahrscheinliche Hypothese besagt, dass die Depotbildung direkt mit der Synthese der beiden Lipidspezies verknüpft ist. TG und STE können bei Bedarf jedoch auch aus ihren Depots mobilisiert werden. Dieser Vorgang erfordert Katalyse durch bestimmte Enzyme (Lipasen, Hydrolasen). Identifizierung der entsprechenden Gene und Genprodukte, Charakterisierung der koordinierten Regulation des TG- und STE-Auf- und Abbaus durch Isoenzyme in verschiedenen Zellkompartimenten, sowie die zellbiologischen Konsequenzen des TG- und/oder STE-Mangels oder deren Überproduktion sind Gegenstand derzeit laufender Untersuchungen.

#### Die Relevanz der Forschungsergebnisse

Oft wird die Frage nach der Anwendbarkeit und der Bedeutung von Ergebnissen der Grundlagenforschung, wie sie meine Arbeitsgruppe hauptsächlich betreibt, gestellt. Unsere Arbeiten sind primär nicht darauf ausgerichtet, Substanzen im großen Maßstab zu produzieren oder technologische Prozesse zu konzipieren. Vielmehr sehe ich die Bedeutung unserer Studien in der Darstellung fundamentaler Erkenntnisse, die eine Basis für die Anwendung, z.B. in biotechnologischer oder medizinischer Hinsicht, bilden. Kann ein Modellsystem wie die Hefe diesen Anforderungen genügen? Können wir mit solchen zellbiologischen Modellen etwas über allgemein gültige Gesichtspunkte eines biologischen Sachverhalts lernen? Beide Fragen können mit ruhigem Gewissen positiv beantwortet werden. Die Querverbindungen zwischen experimentellen biologischen Systemen (Hefe, Pflanze, Tier, Mensch), die durch die rasante Entwicklung der Bioinformatik immer deutlicher werden, bestätigen diese Ansicht. Korrekterweise muss man natürlich feststellen, dass Hefe nicht einfach das getreue Mini-Abbild eines Säugetiers oder des Menschen ist. Trotzdem können unter kritischer Abschätzung der Randbedingungen sehr wohl physiologisch relevante Aussagen mit Untersuchungsergebnissen des Modellsystems Hefe für komplexere Systeme gemacht werden.

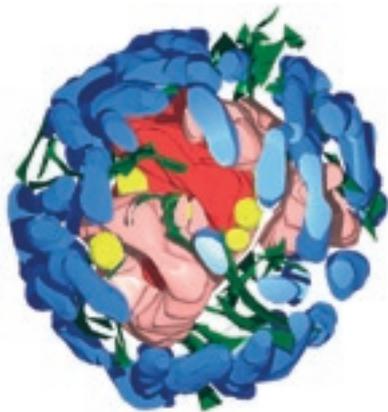


Abb 1.: Ein Blick in eine Hefezelle

Von etwa 40 seriellen Einzel-Ultradünnschnitten durch eine Hefezelle werden elektronenmikroskopische Bilder angefertigt, die durch geeignete Computerprogramme in Form einer 3-dimensionalen Struktur rekonstruiert werden. Nach Abstraktion der Zellwand und Zellmembran durch den Computer werden die einzelnen Organellen im Inneren der Zelle wie z.B. Zellkern, Mitochondrien, Endoplasmatisches Reticulum, Vakuole in verschiedenen Farben sichtbar. Die Depots der Triglyceride und Sterolester, die sog. Lipidpartikel, sind hier in gelber Farbe als kompakte globuläre Strukturen dargestellt. (Mit freundlicher Genehmigung von G. Zellnig und A. Perktold, Institut für Pflanzenphysiologie, KFU Graz).

#### Biocatalyst Yeast: a Model System to Study Lipid Metabolism

*During the last twenty years the yeast *Saccharomyces cerevisiae* has become a well established experimental system for biochemical, cell biological and molecular biological studies. The early availability of the complete sequence of the yeast genome, the ease of manipulation of this microorganism by nutrients and growth conditions, and the standardized methods of yeast genetics and molecular biology contributed to the acceptance of yeast as a reliable model for eukaryotic cells.*

*Our laboratory uses yeast to study certain aspects of lipid metabolism and assembly of lipids into biological membranes. Lipids are an important class of biochemical molecules which are required as structural elements (e.g., phospholipids, sterols, and sphingolipids) for the formation of membranes. Such membranes form the surface of the cell and an osmotic barrier to the environment, but also surround intracellular compartments, the organelles. In addition, certain lipids (triacylglycerols, steryl esters) serve as energy depots which can be mobilized upon requirement.*

*The two projects "Lipid Particles of the Yeast" (FWF13669) and "Neutral Lipids of the Yeast" (FWF15141), which are financially supported by the Austrian Science Foundation, aim at addressing problems of the synthesis of triacylglycerols (TAG) and steryl esters (STE), their storage within the cell, and their mobilization from depots in the yeast. Molecular biological, cell biological and biochemical strategies are employed to (i) identify genes and gene products involved in the biosynthesis and metabolism of TAG and STE, and (ii) to attribute steps of the respective pathways to organelles. Thus, this project aims at a better understanding of formation and mobilization of lipid depots at the molecular level.*

*An organelle which is highly involved in formation and storage of TAG and STE is the so-called lipid particle. These particles harbor a core of TAG and STE surrounded by a membrane monolayer consisting of phospholipids with a small amount of proteins embedded. During our studies we demonstrated that certain enzymes of the TAG biosynthetic pathway, especially enzymes required for the formation of phosphatidic acid, a TAG precursor, are at the surface of lipid particles. Moreover, we were able to show that most of these enzymes exist as duplicates (isoenzymes), sometimes with dual localization in lipid particles and in the endoplasmic reticulum. One gene of the yeast phosphatidic acid biosynthetic pathway was identified as the first enzyme of this kind in all eukaryotic cells. A new gene and the respective gene product, which is involved in the formation of TAG, was also identified and characterized. It was shown that TAG biosynthetic routes are redundant. Most likely three independent pathways exist in the yeast which lead to the formation of TAG.*

*In addition to TAG, STE are the second form of storage lipids in the yeast. In collaboration with three other groups we showed that enzymes of the complex sterol biosynthetic pathway are distributed among lipid particles and the endoplasmic reticulum. Similar to phosphatidic acid, STE are formed by two isoenzymes with overlapping substrate specificity. Both enzymes are at the endoplasmic reticulum. The question remains how TAG and STE migrate from their site(s) of synthesis to their site of storage, the lipid particles. As a hypothesis, biosynthesis of TAG and STE and formation of depots are believed to be tightly linked processes. Mobilization of TAG and STE from lipid particles requires lipases and hydrolases. Work is in progress to identify such genes and gene products and to study the cell biological consequences of TAG and/or STE depletion or over-production.*

*In summary, the model system yeast is a powerful tool to get insight into fundamental processes of the cell biology of lipids. This knowledge may provide a valuable basis for various applications in biotechnology or medicine.*



# Neue Software für die numerische Simulation des Tunnelvortriebes mit der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NATM)

## *New Software for the Numerical Simulation of Tunnel Advance with the New Austrian Tunnelling Method*

Am 1.9.2002 hat am Institut für Baustatik an der TU Graz ein Forschungsprojekt zur Numerischen Simulation des Tunnelvortriebes mit Randelementen begonnen. Die Arbeiten werden durch den Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) gefördert. Der Schwerpunkt liegt in der Entwicklung eines Computerprogramms zur Berechnung des sequentiellen Tunnelvortriebes unter Berücksichtigung von heterogenem, nichtlinearem und anisotropem Materialverhalten (Boden, Fels) und dem Einbau von Stützmitteln wie Spritzbeton und Anker gemäß der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NATM). Am Forschungsprojekt sind gegenwärtig ein Post-Doc, Dr. Marcos Noronha aus Brasilien, beschäftigt, und mit 1. April dieses Jahres wird Tatiana Ribeiro, ebenso aus Brasilien, als Doktorandin das Team vervollständigen. Forschungspartner ist Dr. T. G. Davies von der Universität Glasgow.

### Stand der Technik

Bis dato kommt in den meisten Fällen die Finite Elemente Methode (FEM) für die Berechnung des Tunnelaushubes zur Anwendung. Die Grenzen dieser Methode sind aber, wenn man sich in den dreidimensionalen Bereich vorwagt, bald erreicht. Der Aufwand zur Lösung eines 3-D Systems ist enorm. FE Netze in der Größenordnung von 100.000 Freiheitsgraden sind keine Seltenheit. Um mit der FEM eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen bzw. einen ausreichend langen Tunnelabschnitt berechnen zu können, wäre oft die Lösung von Gleichungssystemen bis zu 1 Million Freiheitsgraden notwendig. Dieser enorme Aufwand betrifft nicht nur die Lösung von Gleichungssystemen in zeitlicher Hinsicht, sondern auch die Speicherung der anfallenden Daten und die Visualisierung dieser riesigen Datenmengen. Dies ist auch der Grund, weshalb oft nur zweidimensionale Berechnungen durchgeführt werden, und auf eine 3-D Analyse vollkommen verzichtet wird. Der Tunnelaushub, im Speziellen im Bereich der Ortsbrust, ist auf jeden Fall ein dreidimensionales Problem. Auftretende Verformungen und Spannungen in diesem Bereich können mit 2-D Berechnungen nicht mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden. An der Baustelle wäre es wünschenswert ein Berechnungswerkzeug zur Verfügung zu haben, um gemessene Verformungen mit berechneten zu vergleichen, Materialparameter zu eichen, um Voraussagen zu treffen oder einen Trend über das Verhalten in der Zukunft abzuleiten.

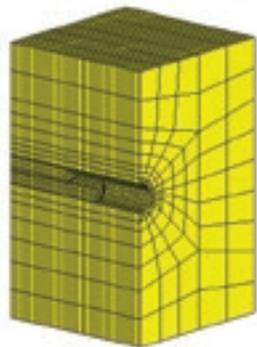


Abb. 1: FE Netz

Im Gegensatz zur FEM, bei welcher das Kontinuum durch eine so genannte "Box" angenähert wird und das gesamte Volumen in kleinere Volumina aufgeteilt werden muss (Diskretisierung), ist bei der Randelementemethode (Boundary Element Method, BEM), wie der Name schon besagt, nur der Rand zu beschreiben. Beim Tunnel bedeutet dies lediglich eine Diskretisierung der Tunneloberfläche.

Der infinite oder semi-infinite Boden/Fels ist in der Lösung implizit enthalten. Dies bedeutet eine Reduzierung des Aufwandes um eine Größenordnung, d.h. Reduzierung auf einige 1000 Freiheitsgrade. Wie sich durch Vergleichsrechnungen gezeigt hat, ist auch die Genauigkeit der Lösung höher als bei der FEM. Bei der FEM werden durch die notwendige Beschränkung des infiniten Kontinuums auf eine "Box" künstliche Randbedingungen eingeführt, welche schließlich das Ergebnis verfälschen.

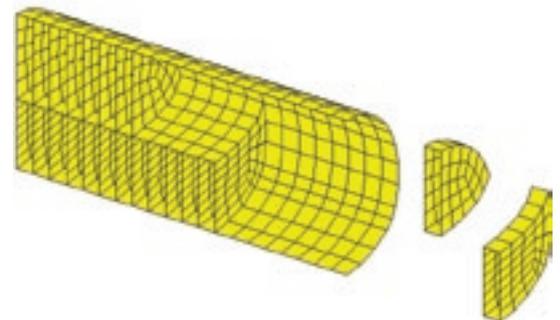


Abb. 2: BE Netz

### Schwerpunkte des Forschungsprojektes

Die Anwendbarkeit der BEM beschränkt sich in ihrer ursprünglichen Formulierung auf homogenes elastisches Material und ist noch nicht geeignet, den sequentiellen Aushub mit mehreren Regionen zu berechnen. Für die Berechnung des sequentiellen Tunnelvortriebes ist die BEM dahingehend zu erweitern, dass jedes Volumen, welches einen Abschlag darstellt, durch eine weitere Region diskretisiert wird. Dabei handelt es sich um die so genannte "Multiple Region Boundary Element Method (MRBEM)". Mit diesem Verfahren werden von den einzelnen Regionen, ähnlich wie bei der FEM, Steifigkeitsmatrizen ermittelt, wobei jede Region ein Superelement darstellt. Diese werden anschließend unter Anwendung von Gleichgewicht und Kompatibilität zu einem globalen Gleichungssystem assembliert.

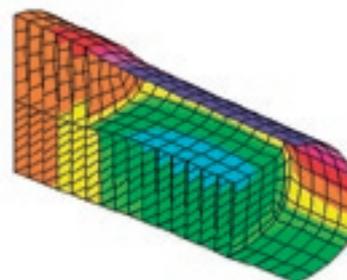


Abb. 3: Verformtes BE Netz

Als Lösung dieses Gleichungssystems erhält man die Verformungen an den Knoten der Kopplungsflächen der Regionen. Das Gleichungssystem ist im Vergleich zur FEM um eine Ordnung kleiner, ebenso der Aufwand zur Speicherung der Ergebnisse. Die beschriebene Methode erlaubt es, auch inhomogenes Material wie verschiedene Bodenschichten oder Klüfte im Fels zu modellieren.

Die Berücksichtigung von nichtlinearem, inelastischen Materialverhalten erfolgt durch die Lösung eines Integrals über das Volumen der entstehenden plastischen Zone. Die Größe dieser Zone ist im

Voraus nicht bekannt. Ein Ziel dieser Forschungsarbeit ist es daher, einen Algorithmus zu entwickeln, welcher die plastische Zone vom Rand des Tunnels sukzessive anwachsen lässt. Bei diesem Algorithmus werden am Rand, nach erfolgter Überprüfung der Fließbedingung, Zellen generiert. In einem iterativen Prozess werden nun diese Zellen in der plastischen Zone automatisch angeordnet. Der Benutzer dieses Rechenprogramms muss sich daher weder im vorhinein Gedanken über die zu erwartende Größe der plastischen Zone machen, noch muss er diese Zone durch Zellen diskretisieren. Durch einen nichtlinearen iterativen Prozess entsteht dann der endgültige plastische Bereich. Durch Lösung des Integrals über das Volumen kommt es zu keiner Änderung der Größe des Gleichungssystems, wodurch der Vorteil des kleinen Gleichungssystems in der BEM gegenüber der FEM erhalten bleibt. Dieser Algorithmus ist einer der Schwerpunkte dieser Forschungsarbeit.

In der NATM sind Stützmittel wie Spritzbeton und Felsanker ein wesentliches Element der Bauabfolge. Sie werden nachlaufend zu den Abschlüssen sequentiell eingebaut. Um die NATM rechnerisch simulieren zu können, müssen diese wesentlichen Konstruktionselemente im Modell inkludiert werden. Es ist vorgesehen, den Einbau von Spritzbeton durch eine Koppelung mit finiten Elementen zu modellieren. Dabei werden Schalenelemente mit der Randelemente-region gekoppelt. Da Schalenelemente in 3-D in der FEM Flächenelemente sind, müssen diese nicht gesondert diskretisiert werden. Es werden die Randelemente, welche die Tunneloberfläche bilden, bezüglich ihrer Geometrie als Schalenelemente verwendet. Die Randelementeregionen sind, wie schon erwähnt, in Form von Steifigkeitsmatrizen vorhanden. Aus diesem Grund ist eine Koppelung mit Finiten Elementen möglich.

Ein weiterer Punkt in diesem Forschungsprojekt ist die Adaptierung von bestehenden Prä- und Postprozessoren auf die oben erwähnten Modellierungsschwerpunkte. Eine Auslegung des Computercodes auf Parallelrechner wird angestrebt.

### **Numerical Simulation of Tunnel Advance using the Boundary Element Method (BEM)**

*In September 2002 the research project "Numerical Simulation of Tunnel Advance using the Boundary element method" has started at the institute for structural analysis, TU Graz. The Project is supported by the Austrian Science Fund (FWF). The aim is the development of a computer program which can deal with the numerical simulation of tunnel advance in heterogeneous, viscoplastic and anisotropic ground using the New Austrian Tunnelling Method (NATM), which involves sequential excavation and the installation of ground support in the form of shotcrete and rock anchors. At present two post-docs are employed and in April a PhD student will join the team. A cooperation with the University of Glasgow (Dr. T. G. Davies) exists.*

#### **State of the art**

*The Finite Element Method (FEM) has been used extensively in the past for the simulation of tunnel advance and has been found to give results which compare well with observation. However, one of the drawbacks of the method especially for the 3-D simulation is that the amount of effort to obtain a solution is considerable. Experience with applying the FEM to NATM tunnels has shown that meshes in the excess of 100 000 degrees of freedom and up to 50 excavation/construction stages have to be used to obtain*

*meaningful results. Even with modern mesh generation methods and solvers the effort in performing such an analysis is still considerable. For more complex tunnel/cavern systems the computing effort is even more pronounced and meshes with 800 000 Elements have been reported. It is appropriate therefore to look for cheaper, more user friendly and effective analysis methods. The reason for the large number of elements that are required is due to the fact, that the domain that has to be modelled, is for all practical purposes of infinite extent. Therefore with the FEM a box of elements has to be generated with artificial boundary conditions applied at the edges (also referred to as mesh truncation). Tests have shown that unless these artificial boundaries are sufficiently far enough away, the results will be influenced by their presence and be in error.*

#### **Aims of the research project**

*The single region BEM using surface discretisation, can only deal with homogeneous, elastic domains and is not suitable for the analysis of sequential tunnel excavation. Extension of the method to multiple regions makes it possible to consider piecewise inhomogeneous domains and also allows the consideration of sequential excavation. This approach utilises a philosophy similar to that used by the finite element method. The idea is to compute a "stiffness matrix" for each region. This stiffness matrices are assembled to a global set of equations and solved for the unknown displacements at the coupled nodes at region interfaces. Geological features such as different rock types can be considered well with the multi-region concept and with not too much effort joints and faults can be modelled also. To be able to use the program for realistic tunnelling simulation, elasto-plastic or visco-plastic material behaviour needs to be implemented. To implement this facility in a multi-region method, plasticity will have to be checked and internal cells generated in each region separately.*

*We therefore propose a novel method for dealing with plasticity in the BEM. We suggest to automatically and adaptively generate a mesh of cells as the plastic zone grows. The premise of this method is that plasticity starts at a boundary where boundary elements exist, for example the excavation surface, and then moves inside regions. From our experience with the numerical simulation of tunnel excavation we believe this to be a reasonable assumption. The cells do not add to the number of unknowns of the system of equations. During the non-linear iterations the mesh of internal cells will grow with the zone of plastic straining. The advantage of the proposed method is therefore a drastic increase in efficiency as compared with conventional methods, because cells are only generated where needed. The method is also more user friendly, because the user of the program need not even be aware of the internal cells and these do not have to be generated prior to the analysis being carried out. This adaptive internal cell generation is the main innovation of this project. The challenge will be to develop a robust algorithm for cell generation that works in all cases. The next objective of the project will be to include the effect of ground support. For modelling the thin shotcrete lining we propose to couple the boundary element regions with shell elements. As mentioned above, this can be easily achieved with the proposed multi-region implementation because the shell elements are treated in the same way as the other regions, i.e. their stiffness matrix is assembled into the global system of equations. Since the boundary elements already exist where shotcrete elements are applied they need not to be generated separately. The final work in the project will be to optimise the program. This includes taking advantage of the fact that regions which are geometrically identical (slice regions) have the same stiffness matrix, which only needs to be calculated once, and the modification of the software to run on hardware with more than one processor.*



# ZYKLON-APEX - Entstaubung von Gasströmen

## Dedusting of Gasflows

„Zyklon“ heißt nicht nur ein Wirbelsturm, sondern auch ein Gerät, das in der Verfahrenstechnik zum Entstauben von Gasströmen z.B. Rauchgas oder Abluft genutzt wird. Ein Zyklon ist ein kreisrunder, unten kegelig eingezogener Behälter, der im Oberteil einen tangentialen Einlass für das staubbeladene Gas, sowie einen zentralen Auslass für das Reingas, das „Tauchrohr“, hat. Der Staub verlässt den Zyklon am unteren, kegelligen Ende.

Der tangentiale Einlass teilt dem Gasstrom eine Umfangsgeschwindigkeit mit, die ihrerseits zur Ausbildung eines Potenzialwirbels führt. Da die Staubpartikel eine größere Dichte besitzen als das Gas, werden sie an die Wand geschleudert. Dieses war der Gedankengang des Zyklonerfinders vor mehr als 100 Jahren - und im Prinzip ist er auch richtig. Die tatsächliche Gasströmung und der tatsächliche Abscheidvorgang sind aber wesentlich komplexer und werden bis heute nicht vollständig verstanden. Die publizierten Berechnungsregeln haben nur für wenige geometrische Formen und Betriebsbedingungen Gültigkeit. Die heutigen mathematischen Werkzeuge verlangen geradezu nach einer Simulation der Strömung und damit der Abscheidung in einem Zyklon.

Ein weiterer Grund sich mit dem Zyklon näher zu befassen, ist eine in unserem Labor mehr oder weniger zufällig gefundene, neue Gestaltung des Staubaustrages; mit solch einem „neuen“ Staubaustrag wird eine entschieden bessere Staubabscheidung erzielt als mit einem konventionell gestalteten Staubaustrag.

In dem Forschungsvorhaben ging und geht es darum herauszufinden, warum diese „neue“ Geometrie besser abscheidet als konventionelle Geometrien. Hierzu wird in drei Stufen vorgegangen:

- 1) Verschiedene Geometrieformen von Staubausträgen werden auf dem Prüfstand hinsichtlich ihrer Abscheideeigenschaften und des Druckverlustes miteinander verglichen.
- 2) Ein Zyklon mit konventioneller Geometrie und ein Zyklon mit der neuen Geometrie werden mit moderner Strömungsmesstechnik, nämlich Laser- Doppler- Anemometer (LDA) und Phasen- Doppler- Anemometer (PDA) vermessen.
- 3) Unter Verwendung des kommerziellen Simulationsprogramms für Strömungen FLUENT wird versucht, die gemessenen Strömungsfelder mit und ohne Partikel nachzubilden.

Nachdem wir uns in einem vorangegangenen Projekt mit dem Oberteil des Zyklons (Einlass und Tauchrohr) befasst hatten, war es in diesem Projekt der Staubaustrag, also der Unterteil des Zyklons. An immer denselben Zyklon wurden Staubaustragsstücke unterschiedlicher Geometrie angebaut und der Abscheidegrad bei immer gleichen Betriebsbedingungen bestimmt. Es zeigte sich, dass die Geometrie A am schlechtesten abscheidet, Geometrien B und E „mit dem Apexkegel“ scheiden deutlich besser ab als A. Die „neuen“ Geometrieformen C und D sind jedoch nochmals entschieden besser als die Geometrien mit Apexkegel. Obendrein sind sie einfacher zu bauen und betriebssicher, da kein Apexkegel den Staubaustrag versperrt.



Abb. 1: Zyklon, Prinzipskizze

Um nun herauszufinden, warum gerade die Geometrie C, „Fallrohr“ den größten Abscheidegrad hat, wurden aufwändige Messungen mit LDA zur Bestimmung des strömungsfreien Gasstromes sowie mit PDA zur Bestimmung der Partikelgeschwindigkeit und der Partikelgröße durchgeführt. Dabei wurde völlig neu erkannt, dass durch den Staub (auch schon bei sehr geringer Beladung) der Potenzialwirbel im Unterteil des Fallrohres zu einem Festkörperwirbel wird. Außerdem konnten wir durch die PDA- Mes-

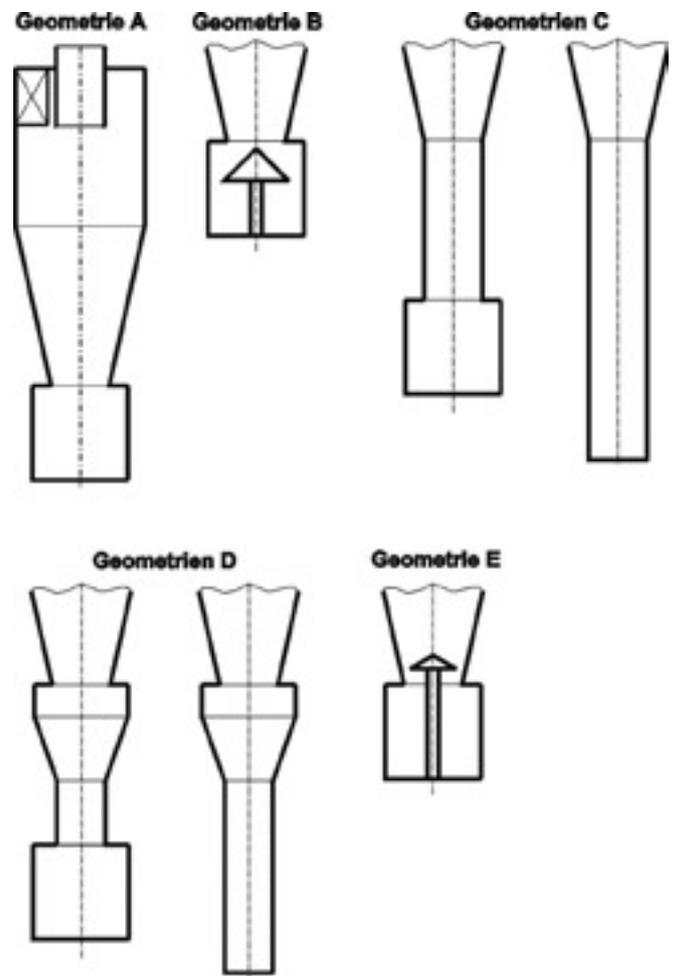


Abb. 2: Untersuchte Staubaustragsgeometrien

sungen erstmals zweifelsfrei nachweisen, dass kleine Staubteilchen, etwa  $<2\mu\text{m}$ , Agglomerate bilden und so abgeschieden werden. Dieser Mechanismus ist noch in keiner Berechnungsregel berücksichtigt. Die Berechnung des staubfreien Strömungsfeldes gelingt uns - wie der Vergleich mit der LDA- Messung zeigt - schon recht gut. Die staubbeladene Gasströmung mit der Agglomerationskinetik zu berechnen ist unser nächstes Ziel.

Wir können heute erklären warum der Zyklon mit dem „Fallrohr“ besser abscheidet:

- 1) Im Zyklon geraten die Partikel in die Grenzschicht an der Wand, die abwärts in das Fallrohr fließt.
- 2) Im Fallrohr ist die Umfangsgeschwindigkeit größer als sonst

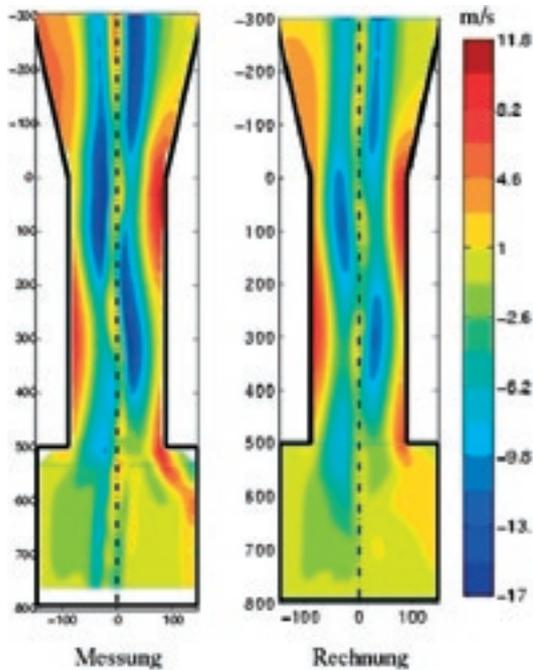


Abb. 3: Axialgeschwindigkeiten der reinen Gasströmung im Fallrohr

wo im Zyklon, darum werden alle Partikel, auch jene die vom Behälterboden aufgewirbelt wurden, sehr effektiv an die Wand gebracht und können das Fallrohr nicht mehr nach oben verlassen.

- 3) Durch die hohe Partikelkonzentration wird im Fallrohr die Agglomeration gefördert.

Die Erkenntnis, warum der Zyklon mit „Fallrohr“ besser abscheidet, ist eine wesentliche Voraussetzung für die Berechnung der relevanten Effekte. Die Berechnung dieser Effekte bleibt als Herausforderung bestehen.

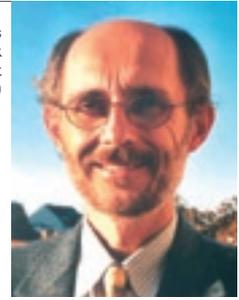
### Dedusting of Gasflows

*A cyclone is an apparatus for the separation of dust particles from a gas flow. The dust-laden gas enters a cylindrical/conical vessel through a tangential inlet which creates a strong swirl of the gas mass in the vessel. Dust particles are centrifuged to the vessel wall, where they get trapped in the boundary layer flow.*

*In our lab we found - rather accidentally - that a cyclone which has a cylindrical extension below the cone will separate more and even smaller particles than a cyclone of conventional design. After having executed an extensive flow measuring program with Laser-Doppler-Anemometry (LDA) and Phase-Doppler-Anemometry (PDA) we can now explain why a cyclone with a „drop tube“ is superior:*

- 1) *The particle-laden boundary layer flows down into the drop tube.*
- 2) *The circumferential velocity is higher in the drop tube than anywhere else in the cyclone.*
- 3) *Particles which get swirled up from the bottom are separated very effectively due to the strong swirl in the drop tube.*
- 4) *The very high particle concentration prevailing in the drop tube serves to promote agglomeration and thus aids the separation of very fine particles.*

*We are presently working on integrating this new-found knowledge into calculation procedures.*



# Asymptotische Eigenschaften von Irrfahrten auf Graphen

## *Asymptotic Properties of Random Walks on Graphs*

Das FWF-Projekt „Asymptotic Properties of Random Walks on Graphs“ sowie das Schrödinger-Rückkehrprojekt „Spektralberechnung und nichtkommutative Wahrscheinlichkeitstheorie“ und das Marie Curie Fellowship „Internal Diffusion Limited Aggregation on Non-homogeneous Structures“ sind in der Arbeitsgruppe C des Instituts für Mathematik C beheimatet. Im weitesten Sinne geht es um Wahrscheinlichkeitstheorie und Analysis auf diskreten Strukturen. „Random Walks“, zu Deutsch „Irrfahrten“, sind Zufallsprozesse, die sich auf Graphen (im Sinne der Kombinatorik), bzw. Gruppen (im Sinne der Algebra) abspielen. Im Mittelpunkt des Interesses steht das Studium und die Theorie des Zusammenhanges zwischen dem probabilistischen Verhalten sowie analytischen Kennzahlen dieser Prozesse und den geometrischen Eigenschaften der zugrundeliegenden Strukturen.

Bei *Irrfahrten* denken manche wohl zuerst an Homer und die Odyssee. Diese schöne Bezeichnung geht auf den berühmten ungarischen Mathematiker Georg Pólya zurück, der 1921 eine Arbeit unter dem Titel „Über eine Aufgabe der Wahrscheinlichkeitstheorie betreffend die Irrfahrt im Straßennetz“ in den *Mathematischen Annalen* veröffentlichte und damit diese Theorie begründete. Sie hat sich vor allem seit den 1950er Jahren in gewissen Wellenbewegungen der Mode entwickelt und seit etwa 1985 einen rasanten Aufstieg erlebt. Die Anwendungen reichen von der theoretischen Physik und Chemie über die Theorie der elektrischen Netzwerke bis zur Modellierung von Börsenspekulationen. Die hier verfolgten Projekte befassen sich mit der mathematischen Theorie.

Worum geht es nun in dieser Theorie? Zum Zweck einer einfachen Einleitung beginnen wir bei Pólya, und stellen uns ein unendliches, ebenes Straßennetz mit quadratischen Häuserblöcken vor (Abb. 1a). Ein Wanderer, bzw. Partikel beginnt in einem Kreuzungspunkt und wählt einen zufälligen unter den 4 benachbarten Kreuzungspunkten, zu dem er nun in einem „Schritt“ geht. Dort angekommen, verfährt er genauso, und zwar ohne sich zu erinnern, woher er gekommen war. Was geschieht auf lange Sicht? Eine einfache Rechnung zeigt, dass der Wanderer mit Sicherheit immer wieder, unendlich oft, zum Ausgangspunkt zurückkommt – die Irrfahrt ist *rekurrent*. Stellen wir uns als nächstes ein dreidimensionales Straßennetz vor, in dem der Wanderer unter 6 Richtungen (N, S, O, W, oben, unten) wählt. Eine etwas kompliziertere Rechnung ergibt, dass in diesem Modell der Wanderer nur einige Male zum Ausgangspunkt zurückkehren wird und sich dann sozusagen in der unendlichen Weite des Raumes verliert, die Irrfahrt ist *transient*. Mathematiker wollen den drastischen Unterschied zwischen dem 2- und dem 3-dimensionalen Modell verstehen: indem sie das – zunächst einfache – Modell aus verschiedenen Blickwinkeln untersuchen und verallgemeinern, um so eine generelle Phänomenologie zu erarbeiten. Man betrachtet anstelle der einfachen quadratischen Straßennetze in 2, 3 oder  $d$  Dimensionen beliebige Straßennetze, sogenannte *Graphen*, die nicht mehr so homogen sein müssen, oder ggf. eine ganz andere Art von Homogenität (Struktur einer algebraischen *Gruppe*) aufweisen. Ein einfaches Beispiel ist der ebene Graph aus Abb. 1b (den man sich in allen Richtungen unendlich fortgesetzt vorstellen muss, wobei nach oben die Größe der Quadrate immer verdoppelt und nach unten immer halbiert wird). Die Irrfahrt auf

diesem Graphen ist in einem viel stärkeren Sinne transient als jene im 3-dimensionalen Straßennetz. Generell will man dann verstehen, welche Struktureigenschaften des Graphen für die Rekurrenz oder Transienz verantwortlich sind.

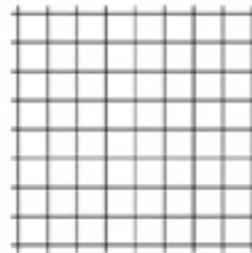


Abb. 1a

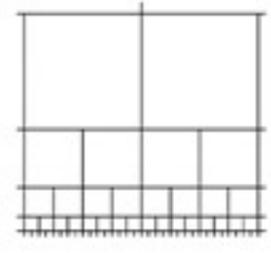


Abb. 1b

Abgesehen von dieser ersten Frage stehen viele andere charakteristische Eigenschaften dieser Zufallsprozesse im letzten Jahrzehnt im Fokus mathematischer Forschung. Es sei hier auf einen Übersichtssartikel von L. Saloff-Coste verwiesen (*Notices Amer. Math. Soc.* 48, No. 9, 2001), siehe [http://www.cis.tugraz.at/mathc/woess/saloff\\_notices.pdf](http://www.cis.tugraz.at/mathc/woess/saloff_notices.pdf)

Im FWF-Forschungsprojekt „Asymptotic Properties of Random Walks on Graphs“ (Dauer: 3 Jahre, Beginn: 1.10.2002) arbeiten – neben dem Leiter – derzeit Herr Dr. Ronald Ortner und Frau Dr. Sara Brofferio. Es werden unter anderem die folgenden Fragestellungen untersucht:

a) Das asymptotische Verhalten von  $n$ -Schritt-Rückkehrwahrscheinlichen hängt unmittelbar von der Geometrie des Graphen ab. Es geht darum, die Art dieser Abhängigkeit besser zu verstehen. Besonders für Graphen von (algebraischen) Gruppen arbeiten verschiedene Forschungsgruppen intensiv an dieser Fragestellung. Zumeist werden Methoden der Funktionalanalysis verwendet, während die Gruppe an der TU Graz auf die Verwendung komplex-analytischer Methoden spezialisiert ist. (In diesem Bereich besteht auch eine Verbindung zum START-Projekt „*Konkrete Mathematik*“, Leiter: Ao.Prof. Dr. Peter Grabner.) Diese Methoden werden hier insbesondere auf freie Produkte mit Amalgamierung angewandt (Dr. Ortner).

b) Das räumliche Verhalten von Irrfahrten: Kann man genauer beschreiben, wie sich im transienten Fall das wandernde Partikel „im Unendlichen verliert“? D.h., man will mögliche „Richtungen“ beschreiben, denen dieses Abdriften folgen kann, und die zugehörigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen bestimmen. Dies ist ein topologisches Problem (man sucht die sogenannte *Martin-Kompaktifizierung*), das direkt mit der Potentialtheorie und dem Studium harmonischer Funktionen zusammenhängt. Dieser Themenbereich wird insbesondere für eine Klasse von Modellen zufällig fluktuierender Konfigurationen im Raum untersucht (Dr. Brofferio, Prof. Woess).

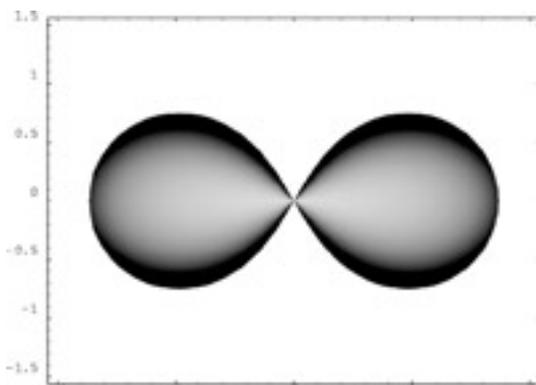
c) *Internal diffusion limited aggregation (IDLA)* ist ein Prozess, in dem immer wieder neue Partikel unabhängig voneinander am gleichen Ausgangspunkt eine Irrfahrt beginnen und sich am ersten noch nicht besetzten Punkt des Graphen festsetzen. Auf diese Art wird eine stetig anwachsende Zufallskonfiguration rund um den Startpunkt gebildet. Dieses Modell hat z.B. eine (besorgniserregende) Anwendung in der Modellierung der Emission radioaktiver

Teilchen aus einem geborstenen Endlagerungsbehälter in die umliegende Sandschicht gefunden. Die primäre mathematische Fragestellung ist hier jene nach der asymptotischen Form der Konfiguration. Dies wurde für die eingangs (Pólya) erwähnten quadratischen Gitter in Ebene und Raum und ähnliche homogene Strukturen untersucht; die Konfiguration ist asymptotisch kugelförmig. Ein Ziel des Projektes ist es, anhand von - zunächst einfachen - Fallstudien ein Verständnis dieses Zufallsprozesses auf nichthomogenen Strukturen zu erzielen. Vorarbeiten hierzu sind Teil einer derzeit laufenden Diplomarbeit (Herr Huss), deren Inhalt eine Computersimulation von IDLA auf verschiedenen Graphen ist, so z.B. der ebene *Comb lattice*, in dem sich die Partikel nur auf der Grundlinie horizontal und sonst nur vertikal bewegen können, siehe hierzu die Abb. 2, aus der ersichtlich wird, dass die agglomerierte Konfiguration nach Emission von 100, 500, bzw. 1000 Partikeln immer mehr „diamantenförmig“ wird. Im Anschluss an diese Vorarbeit sollen deren Resultate im Rahmen des erstgenannten FWF-Projektes genauer und rigoroser mathematisch untersucht werden (Dissertant).



*IDLA on non-homogeneous structures* ist auch der Titel des Marie Curie PostDoc Fellowships, in das Frau Dr. Brofferio ab 1.3.2003 übergewechselt ist.

Teil des FWF-Projektes ist die internationale Kooperation mit Forschern von den Universitäten in Rennes, Lyon und Berkeley, der Technischen Hochschule in Stockholm und der Cornell University in Ithaca (N.Y.). So war im Oktober 2002 im Rahmen des Projektes



Herr Prof. V. A. Kaimanovich aus Rennes zu Gast (Zusammenarbeit im Themenbereich b), und im Jänner/Februar 2003 Herr Prof. L. Sa-

loff-Coste von der Cornell University als Gasprofessor hier (Zusammenarbeit im Themenbereich a).

Chronologisch das älteste unter den drei anfangs genannten Projekten ist das Schrödinger-Rückkehrstipendium von Herrn Dr. Lehner (Beginn: 1.7.2001, Dauer: 3 Jahre). Herr Dr. Lehner hat an der Universität Paris 6 promoviert und ist einer der ersten jüngeren österreichischen Forscher, für den im Rahmen dieses FWF-Rückkehrprogrammes ein Projekt bewilligt wurde. Die nichtkommutative Wahrscheinlichkeitstheorie ist ein Teilgebiet der Funktionalanalysis. Im Rahmen des Projektes befasst sich Herr Dr. Lehner mit der Anwendung dieser Theorie auf die Berechnung des Spektrums von Faltungsoperatoren, also insbesondere jenen Operatoren, die die Übergangswahrscheinlichkeiten von Irrfahrten beschreiben. Die Abb. 3 stellt das Spektrum (und schattiert die Dichte des Spektralmaßes) eines nicht selbstadjungierten Faltungsoperators auf einem freien Produkt zweier Gruppen dar, deren Graph die Form eines unendlichen „Baumes“ hat.

### *Asymptotic Properties of Random Walks on Graphs*

*A random walk on a graph is a stochastic process where a particle makes random moves on the graph's vertex set. The simplest model is the one where at each step the particle chooses with equal probability one among the neighbour vertices of its actual position and performs its next step to that point. The general theme of the three projects at the Institute for Mathematics C is the study of the interplay between the behaviour of the random process and geometric, resp. algebraic structure properties of the underlying graph.*

*The FWF-project "Asymptotic Properties of Random Walks on Graphs" (duration 3 years, start: Oct. 1, 2002). It actually employs two PostDocs, Dr. Sara Brofferio and Dr. Ronald Ortner. Main focus of the actual research is on the following issues:*

- a) asymptotic behaviour of  $n$ -step return probabilities to the starting point, in particular on graphs that are free products with amalgamation (Dr. Ortner);*
- b) the long-range behaviour of random walks in space, i.e., limit points at infinity and the associated potential theory (Dr. Brofferio, Prof. Woess);*
- c) Internal diffusion limited aggregation (IDLA), a process where an increasing configuration is created by successive particles which start a random walk at the same source point and stop when they meet the first unoccupied site (Dr. Brofferio).*

*IDLA on non-homogeneous structures is also the title of the Marie Curie PostDoc Fellowship in which Dr. Brofferio is employed since March 2003.*

*Chronologically the first of the three projects described here is the FWF Schrödinger-follow-up-project „Spectral problems and noncommutative probability theory“ of Dr. Lehner (operating since July 1, 2001, duration 3 years). Noncommutative Probability Theory is part of Functional Analysis. Dr. Lehner studies the applications of this theory for determining spectra of convolution operators, in particular transition operators of random walks on groups.*



## „Smart Tracking“: Selbstlokalisierung mit intelligenten Sensoren

### *Fusion of Stereo Vision and Inertial Sensors*

#### Einleitung

Die Position und Orientierung eines bewegten Objektes im Raum soll in Echtzeit erfasst werden. Dieses Problem des „real-time tracking“ hat viele potenzielle Anwendungen in der Automatisierungstechnik, der Robotik, bei autonomen Fahrzeugen, und in HCI (Mensch-Maschine Kommunikation, beispielsweise in der Virtuellen Realität).

Das Thema „Tracking“ wird in einer von Axel Pinz geleiteten Gruppe am Institut für Elektrische Messtechnik und Mess-Signalverarbeitung (EMT) intensiv im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte betrieben (siehe dazu auch <http://www.emt.tugraz.at/~tracking>). Im Vordergrund steht immer die bildgestützte Messtechnik, also das Erfassen der Trajektorie einer bewegten Kamera aus den Bildern dieser Kamera. Dabei gibt es problematische Konfigurationen – etwa eine rasche Rotation der Kamera – wo Bewegungsunschärfe und sehr rasche Änderungen des Gesichtsfeldes die benötigte Korrespondenzfindung behindern. Dies hat zur Entwicklung von hybriden Systemen geführt, in denen die bildgebenden Sensoren von komplexeren Sensoren unterstützt werden.

Im vorliegenden Bericht wird vor allem das FWF Projekt P15748 „Tracking with Smart Sensors“ vorgestellt. Dieses Projekt wurde im Sommer 2002 begonnen. Es steht unter der Leitung von Axel Pinz und wird zu gleichen Teilen am EMT der TU Graz (Mitarbeiter: DI Ulrich Mühlmann) und am Institut für Automation und Regelungstechnik (ACIN, Partner: Dr. Markus Vincze, DI Stefan Chroust) der TU Wien durchgeführt. Allerdings wäre dieses Projekt ohne grundlegende Vorarbeiten in weiteren Forschungsprojekten nicht möglich gewesen.<sup>1</sup>

#### Problemstellung – „Tracking“ und „Structure and Motion“

Tracking einer bewegten Kamera kann durch die fortgesetzte Lösung des sogenannten „perspective-n-point“ Problems erreicht werden: In jedem Bild der Echtzeit-Video-Sequenz werden n Punkte gesucht, die mit n bekannten „landmarks“ (Referenzpunkten) in der Szene korrespondieren. Dieses Problem ist in der Photogrammetrie und in der Geodäsie als räumlicher Rückwärtsschnitt wohlbekannt. Um Tracking in Echtzeit zu erreichen, ist es notwendig, n möglichst klein zu halten, was allerdings die Genauigkeit und die Robustheit der Lösung gegen grobe Fehler sehr negativ beeinflussen kann. Dafür kann das Verfahren andererseits vereinfacht und beschleunigt werden, wenn man die Zeitachse berücksichtigt, also aus der bereits bekannten Trajektorie die aktuelle Position und den erwarteten Inhalt des nächsten Bildes schätzt.

Bisher sind wir davon ausgegangen, dass die Struktur der Szene, also die von der Kamera beobachteten Referenzpunkte, bekannt sein muss, um die Trajektorie messen zu können. Umgekehrt ist es auch möglich, die 3D Geometrie der Szene aus einer Bildfolge zu rekonstruieren, wenn die Trajektorie bekannt ist. Diese Aufgabe heißt in der Computer Vision „Structure from Motion“. Dazu müssen Punktkorrespondenzen zwischen mehreren Bildern der Bildfolge hergestellt werden („Matching“). Wenn die Trajektorie genügend genau bekannt ist, dann ist diese Problemstellung sehr ähnlich zur Stereo-Rekonstruktion (Matching von zwei Bildern von zwei Kameras mit einer bekannten, festen Basis). Allerdings ist die Echtzeitanforderung auch in diesem Fall ein hoher Anspruch an die Leistungsfähigkeit des Systems.

Das Projekt „Smart Tracking“ hat sich eine Kombination der beiden oben genannten Problemstellungen („Tracking“ und „Structure from Motion“) zum Ziel gesetzt: „Structure and Motion“ in Echtzeit. Es soll also sowohl die Trajektorie bestimmt werden, als auch die 3D Struktur der Szene. Das Konzept der oben beschriebenen bewegten Kamera muss dafür allerdings erweitert werden. Wir wollen ein neues, intelligentes Tracking-System aufbauen, welches aus zwei Kameras (Stereo-Vision) und aus Inertialsensoren besteht.

#### Neue Hardware-Komponenten

Seit einigen Jahren gibt es neuartige Inertialsensoren, welche vorwiegend im Automobil eingesetzt werden (Beschleunigungssensoren für das Auslösen von Airbags, Drehratensensoren zur Erfassung etwa des Neigungswinkels). Aus derartigen „silicon micromachines“ haben wir einen neuen Inertialsensor (Abb.1) bestehend aus drei Beschleunigungssensoren und drei Gyroskopen aufgebaut, welcher alle sechs Freiheitsgrade der Position und Orientierung – drei Richtungen der Translation, und drei Achsen der Rotation – misst. Allerdings ist ein solcher Sensor im Vergleich zu herkömmlichen,



Abb.1: Ein neuer Inertialsensor (Eigenentwicklung) bestehend aus drei Beschleunigungs- und drei Drehratensensoren kann zur Messung aller sechs Freiheitsgrade der Position und Orientierung eingesetzt werden.

wesentlich teureren und größeren INS (Inertial-Navigations-Systemen) viel zu ungenau, um alleine zur verlässlichen Messung einer Trajektorie eingesetzt werden zu können. Es muss ja die Beschleunigung zwei mal und die Drehrate einmal integriert werden, um Position bzw. Orientierung zu erhalten. Vor allem zu hohes Rauschen und hohe Drift

führen dazu, dass die Messwerte schon nach etwa einer Sekunde unbrauchbar werden. Ein derartiger Sensor liefert zwar hohe Datenraten von rund 1kHz, muss aber für einen sinnvollen Einsatz mit einem anderen Verfahren – in unserem Fall der Bildanalyse – kombiniert werden.

Grundsätzlich gibt es mehrere Konfigurationen von Kamerasystemen, welche für Tracking eingesetzt werden können. CCD-Kameras mit Framegrabber oder mit FireWire Interface erreichen Frameraten von 25–60Hz. Derartige Systeme haben den Vorteil, dass jeweils das gesamte Bild im Speicher des Rechners abgelegt wird, also auch im gesamten Bild nach Punktkorrespondenzen gesucht werden kann. Andererseits ist unter Echtzeit-Bedingungen ohnedies nur eine Suche in relativ kleinen „Fenstern“, beispielsweise von 11 x 11 Pixeln je Punkt möglich.

CMOS Kamera Technologie basiert auf dem Prinzip eines „Active Pixel Sensors“, in dem auf jedes Bildelement wahlfrei direkt zugegriffen werden kann. Während die meisten CMOS Kameras für das Auslesen eines gesamten Bildes niedrigere Frameraten erreichen als CCD Kameras, bietet sich hier die Möglichkeit, nur die für das Tracking wirklich benötigten Regionen (also die oben besprochenen kleinen Fenster) auszulesen. Auf diese Weise erreicht man wesentlich höhere Datenraten von mehreren 100 Hz bis zu einigen kHz. Diese hohen Wiederholraten erlauben noch kleinere Fenster, da sich

<sup>1</sup> Grundlagenforschung zu hybridem Tracking im FWF Projekt „Studierstube“ (gemeinsam mit Prof. Gervautz von der TU Wien), und zu mobilem Tracking im FWF Projekt „MCAR – Mobile Collaborative Augmented Reality“ (gemeinsam mit Prof. Schmalstieg, TU Wien). Anwendungen dieser Tracking Technologien im VRVis Kplus Kompetenzzentrum, im CD-Labor für Kraftfahrzeug-Messtechnik (Leitung: Prof. Brasseur, TU Graz) und im EU-IST Projekt „VAMPIRE – Visual Active Memory Processes and Interactive Retrieval“.

ein Punkt im Bild in kürzerer Zeit weniger weit fortbewegt und seine Position im nächsten Fenster besser geschätzt werden kann.

Unser hybrides Tracking-System basiert auf zwei CMOS-Kameras. Da eine solche Kombination, bei der aus beiden Kameras korrespondierende Fenster zeitsynchron ausgelesen werden können, nicht als fertiges Produkt erhältlich ist, wird im ersten Projektjahr des Projektes „Smart Tracking“ eine derartige neue Ansteuerung für ein CMOS-Kamera Stereo Setup entwickelt (Abb.2).

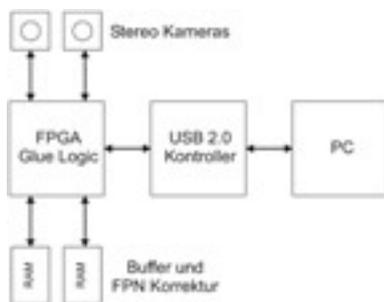


Abb.2: Blockdiagramm für eine neue Ansteuerungslogik für zwei CMOS-Kameras. Zeitsynchrones Stereo von kleinen Fenstern ist möglich. Beide Kameras können kalibriert werden, und die Daten werden über eine USB-2 Schnittstelle übertragen.

Ein derartiger CMOS-Stereo-Sensor erfüllt zwar die meisten Anforderungen an ein bildgestütztes Tracking. Dennoch können Situationen auftreten, wo Punkte zeitweilig nicht detektiert werden können (Bewegungsunschärfe, oder temporäre Verdeckung eines Zieles durch ein anderes Objekt im Vordergrund), oder überhaupt verloren gehen (bei sehr großen, sich plötzlich ändernden Beschleunigungen). Deshalb

muss das bildgestützte Tracking mit einem anderen Verfahren – in unserem Fall Inertialtracking – kombiniert werden.

Insgesamt soll im Rahmen des Projektes ein neuartiger Sensorkopf entwickelt werden, welcher aus einem Stereo-Vision-System und aus dem oben beschriebenen Inertialtracker besteht. Je nach Anwendung muss das Gesamtsystem leicht sein (z.B. am Kopf des Benutzers montiert), und die Stereo-Basis kann variieren (z.B. 20cm für Augmented Reality am Kopf, mehr als 1m im automobilen Einsatz). Alle Komponenten werden in einer fixen Konstellation montiert und kalibriert sein, d.h. die innere und relative Orientierung der Kameras, Linsenverzerrung, sowie weitere Parameter („fixed pattern noise“ der CMOS-Kameras, diverse geometrische und elektrische Parameter der sechs Inertialsensoren, etc.) werden als bekannt vorausgesetzt.

### Neue Algorithmen

Um mit dem oben beschriebenen Sensorkopf letztlich das Projektziel – „Structure and Motion in Real-Time“ zu erreichen, werden zu verschiedenen Teilproblemen neue Algorithmen benötigt und auf der obersten Systemebene zu einem Gesamtsystem für Hybrides Tracking zusammengefügt. Die geplante Funktionsweise einiger dieser Algorithmen wird nachfolgend skizziert<sup>2</sup>. Von einigen Komponenten existieren bereits erste Prototypen. Vieles befindet sich noch in Entwicklung, da das Projekt ja erst ein halbes Jahr „jung“ ist.

### Gesamtsystem

In einer Initialisierungsphase wird mit Hilfe des Stereo Systems die Lage einiger markanter Punkte (erste „Landmarks“) relativ zum Sensorkopf geschätzt. Sobald das System bewegt wird, erfolgt eine erste Schätzung der Trajektorie mit Hilfe der Inertialsensoren. Weitere bildgestützte Messungen aus neuen Blickwinkeln verbessern die Genauigkeit der „Landmarks“, sodass diese bald für bildgestütztes Tracking benutzt werden können. Bewegt sich der Messkopf weiter, so verschwinden die ersten „Landmarks“ aus dem Gesichtsfeld. Daher müssen laufend weitere neue „Landmarks“ bestimmt werden.

### Erkennen von „Landmarks“

In natürlicher Umgebung kommen verschiedene visuelle Merkmale vor, welche als „Landmark“ oder „Target“ für bildgestütztes Tracking verwendet werden können. Unser System verwendet Ecken (sog. „corner-detection“) und kompakte Flecken (z.B. annähernd kreisförmige Objekte, sog. „blobs“). In beiden

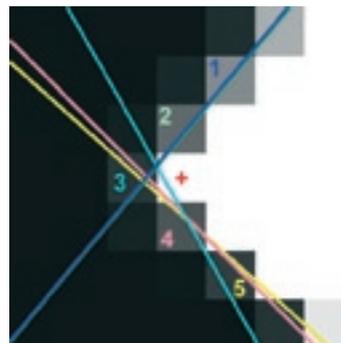


Abb.3: Eine Ecke („corner“) in einem 7x7 Pixel kleinen Bildausschnitt wird subpixel-genau detektiert.

Fällen wird die Position der Merkmale subpixelgenau bestimmt, um die erforderliche Messgenauigkeit zu erreichen. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel eines kleinen Bildausschnittes mit einer Ecke. Diese wird zunächst mit einem herkömmlichen Eckendetektor geschätzt (rotes Kreuz), und nachfolgend als Konsensus der Geraden, welche diese Ecke begrenzen, subpixel-genau gefunden.

### Fusion von bildgestützter und Inertial-Messtechnik

Bildgestütztes Tracking und Inertialtracking sind zwei komplementäre Verfahren, welche einander sehr gut ergänzen. Bei langsamen Bewegungen und bei gut bekannter, relativ statischer Szene (d.h. wenig Verdeckungen von „Landmarks“ durch Objekte im Vordergrund, viel statischer Hintergrund und wenig dynamischer Vordergrund) ist die Bildanalyse sehr gut geeignet. Kommt es zu raschen Bewegungen, insbesondere Rotationen des Sensorkopfes, oder zu temporären Verdeckungen, so soll der Inertialsensor für eine gewisse, kurze Zeit (< 1 Sekunde!) die tragende Rolle übernehmen. Nur durch ein reibungsloses und sehr gut synchronisiertes Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten kann ein stabiles Verhalten des Gesamtsystems erreicht werden. Unser erster Prototyp mit

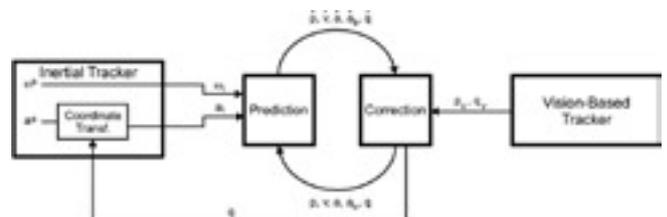


Abb.4: Modifizierter „Extended Kalman Filter“ zur Fusion von Inertialtracking und bildbasiertem Tracking.

Inertialsensor und nur einer Kamera verwendet ein modifiziertes „Extended Kalman Filter“ (Abb.4).

### Anwendungen

#### Mobile „Augmented Reality“

Da unser Sensorkopf (anders als etwa bei herkömmlichem magnetischen oder optischem „outside-in“ Tracking, oder bei GPS-Systemen) keine aktive Information von außen benötigt, kann das System an beliebigen Orten eingesetzt werden. Mit einer geeigneten Stromversorgung ist man also völlig mobil und kann durch den „Structure and Motion“ Ansatz gleichzeitig unbekanntes Terrain betreten und tracken. Dies ist in Innenräumen und außen möglich. Eine sehr attraktive Anwendung ist die mobile „Augmented Reality“ (AR). Einer oder mehrere Benutzer tragen AR-Systeme (siehe Abb.5) bestehend aus einem Subsystem für das Tracking und einem Subsystem

<sup>2</sup> Weitere wichtige Komponenten, welche hier nicht genauer dargestellt werden können sind: Vorhersage-Modul (erwartete Position von „landmarks“ im 2D Bild und in 3D Szenenkoordinaten), Komplexitätsreduktion für Szenen mit vielen „landmarks“, Auswahl von „guten landmarks“, also Merkmalen welche sich für die Tracking-Aufgabe besonders eignen, sowie die eigentliche Schätzung der „Pose“ einer Kamera.



Abb.5: Mobiles AR-System bestehend aus Helm mit Datenbrille und Tracking Sensoren, und Rucksack mit zwei Computersystemen (single-board computer für Tracking, Laptop für 3D Graphik). (a) Gesamtsystem in Verwendung. (b) Rucksack. (c) Helm.

für 3D Graphik Visualisierung. „Augmented Reality“ bedeutet, dass der Benutzer gleichzeitig die reale 3D Szene und die überlagerte virtuelle 3D Graphik wahrnimmt. Diese Wahrnehmung kann nur befriedigend funktionieren, wenn die räumliche Übereinstimmung von Realität und Virtualität (also das Tracking) perfekt funktioniert.

#### Autonome Robot-Navigation, Selbstlokalisierung im RoboCup

Während AR die Hauptanwendung bei den meisten Projekten unserer Gruppe darstellt, betreiben unsere Partner im Projekt „Smart Tracking“ an der TU Wien mobile Roboternavigation. In diesem Bereich kann es sein, dass ein Modell der 3D Szene bereits existiert, „Structure and Motion“ wird aber in vielen Anwendungen dringend benötigt, etwa wenn sich eine an sich bekannte Szene verändert hat, oder beim Navigieren in unbekanntem Terrain.

An dieser Stelle möchte ich noch ein weiteres Projekt erwähnen: Die Teilnahme der TU Graz an der Roboter-Fussball-Weltmeisterschaft RoboCup. Dies ist eine Aktivität, welche von derzeit 12 Instituten aus 3 verschiedenen Fakultäten der TU Graz sowie von diversen Sponsoren aus der Industrie unterstützt wird (siehe: <http://www.robocup.tugraz.at>). In der Middle Size League spielen Teams von jeweils vier autonomen Robotern auf einem Spielfeld von rund 5x9m gegeneinander. Die Roboter messen rund 60cm im Durchmesser und sind 80 cm hoch. Es wird ein normaler Winterfussball (rot) verwendet. Die Robot-Selbstlokalisierung auf dem Spielfeld erfolgt mit Hilfe mehrerer Sensorsysteme (Ultraschall, Laser, und Bildverarbeitung). Unsere Gruppe hat die Entwicklung der bildgestützten Selbstlokalisierung in das RoboCup Projekt eingebracht. Abbildung 6 zeigt einen ersten Prototypen des TU Graz Fussballroboters „Keksi“ und Details zum Bildverarbeitungs-Sensor, welcher ein 360 Grad Panorama des Spielfeldes aufnimmt und analysiert.

#### Zusammenfassung

Dieser Bericht gibt einen Überblick über die Ziele und den aktuellen Stand der Arbeiten im FWF-Projekt „Tracking with Smart Sensors“. Das angestrebte System funktioniert rein „inside-out“, das heißt es wird die eigene Position und Orientierung im Raum über visuelle Stereo-Information und zusätzlich mithilfe von Inertialsensoren bestimmt. Von außen ist keine zusätzliche Information wie etwa GPS oder signalisierte „Landmarks“ nötig (die Szene muss nur visuell wahrnehmbar sein, es darf also nicht völlig dunkel sein). Gleichzeitig nimmt das System die umgebende Szene wahr und erfasst und

verfeinert laufend 3D Strukturinformation über die Szene. Diese Vorgangsweise modelliert sowohl sensorisch (Stereo-Sehen + Gleichgewichtsorgan) als auch algorithmisch (Fusion verschiedener Sinneswahrnehmungen) die menschliche Raumwahrnehmung.

#### Danksagung

Prof. Brasseur hat in den vergangenen Jahren den Aufbau einer Gruppe für Bildgestützte Messtechnik an seinem Institut ermöglicht und stets voll unterstützt. Neben dem FWF Projekt P15748 „Tracking with Smart Sensors“, Mitarbeiter DI Ulrich Mühlmann und Partner DI Stefan Chroust und Dr. Markus Vincze an der TU Wien haben noch folgende Mitarbeiter zu den hier gezeigten Arbeiten beigetragen: DI Brandner, Dr. Ganster, Dr. Ribo, DI Siegl, DI Stock. Der Inertialsensor wurde im Rahmen einer von Prof. Brasseur betreuten Diplomarbeit (DI Lang) entwickelt. Die Arbeiten am Thema „Tracking“ werden auch aus folgenden weiteren Projekten finanziert: FWF-MCAR P14470-INF, EU-VAMPIRE IST-2001-34401, CD-Labor für Kraftfahrzeug-Messtechnik. Die Selbstlokalisierung im RoboCup entstand im Rahmen der Diplomarbeit DI Wolf. Das Gesamtkonzept im RoboCup wurde vom „Scientist in Charge“ DI Gerald Steinbauer, Univ.Ass. bei Prof. Wotawa entwickelt.

#### Smart Tracking: Fusion of Stereo Vision and Inertial Sensors (FWF Project P15748):

*In this project, a new, generic approach to real-time tracking using a combination of „smart sensors“ is searched. We plan to use a sensor suite consisting of a fixed, calibrated stereo rig together with an „inertio-tracker“ based on accelerometers and gyroscopes. These two sensor types provide complimentary characteristics: visual sensing is very accurate at low velocities while inertial sensors can track fast motions but suffer from drift particularly at low velocities. This inside-out tracking system will be subjected to arbitrary motion and shall operate in cluttered multi-object scenes with multiple and independent motion and some static, but 3D background. A typical example might be a person carrying the sensors and walking through a city. The primary goal is a reliable reconstruction of the trajectory of the system itself, as well as the recovery of 3D structure required for successful tracking. Similar to the perceptive capabilities of a human, the system shall operate autonomously, without requiring additional information about its localisation and pose.*

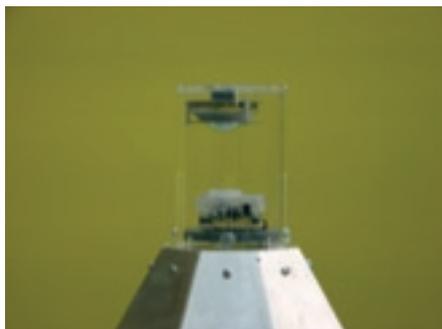


Abb. 6: (a) Autonome Fussballroboter „Keksi“ des Teams der TU Graz für die Roboter-Fussball-Weltmeisterschaft RoboCup. (b) Detail des Bildverarbeitungs-Sensors (360 Grad Panorama). (c) RoboCup Spielfeld im Foyer der Infeldgasse 18.

Dipl.-Ing. Herwig Hengsberger  
Institut für Hochbau für Architekten  
E-Mail: hengsberger@tugraz.at  
Tel: 0316 873 6807



Ao.Univ.-Prof. Mag. Dipl.-Ing. Dr.iur.  
Dr.techn. Peter Kautsch  
Institut für Hoch- und Industriebau  
E-Mail: kautsch@tugraz.at  
Tel: 0316 873 6245



# Thermisch-hygrisches Verhalten von GlasDoppelFassaden unter solarer Einwirkung – Theorieevaluierung durch Vorort-Messung

## *Hygrothermal Behaviour of Double-skin Facades in Solar Irradiation - Theory Evaluation by Means of On-location Measurements*

Unter dem Gesichtspunkt einer umfassenden Bewertung von GlasDoppelFassaden bildet die messtechnische Erfassung der kombinierten Wärmetransportmechanismen im Fassadenzwischenraum und die Untersuchung der Korrelation zwischen den Messergebnissen und thermischen bzw. fluidmechanischen Simulationsberechnungen den Schwerpunkt der gegenständlichen Forschungsarbeit.

### Motivation

Im Zuge des sprunghaften Anstiegs der „Glas-Architektur“ werden seit über 10 Jahren sogenannte GlasDoppelFassaden (GDF) international äußerst kontroversiell diskutiert.

Von den einen als innovative, ökologische und zukunftssträchtige Konzepte gepriesen, werden sie von anderen als unwirtschaftlich, bauphysikalisch problematisch und in unseren Breiten als fehl am Platz bezeichnet.

Grundsätzlich bestehen Glasdoppelfassaden aus einer inneren oder Primärfassade, meist in Form einer Zweischeibenisolierverglasung, einem Fassadenzwischenraum von etwa 20 - 100 cm Tiefe und einer äußeren oder Sekundärfassade aus Einscheibensicherheitsglas. Unterschiede zwischen den zahlreichen Ausführungsvarianten bestehen vor allem in der Unterteilung des Fassadenzwischenraumes und in den Lüftungskonzepten.

In Baden bei Wien wurde 1998 der vom Grazer Architekturbüro Florian Riegler/Roger Riewe geplante Neubau des Bundesinstituts für Sozialpädagogik fertiggestellt. Das fünfgeschossige, allseitig verglaste Gebäude bot die Möglichkeit, zwei Extremfälle einer vorgehängten Glasfassade zu untersuchen: die freie, solar- und windinduzierte Strömung in dem 17 m hohen und 14 cm tiefen, nicht unterteilten Luftspalt zwischen Beton- und Glasfassade und den Fall der komplex turbulenter Strömungsverhältnisse im Bereich der doppelten Glasflächen und der „Fensterkästen“. Eine vorgehängte Glasfassade mit Fensterkästen stellt einen interessanten Sonderfall von GlasDoppelFassaden dar, indem sie die Vorteile einschaliger Fassaden – wie zB die Möglichkeit der direkten Fensterlüftung – mit den wärmetechnischen Vorteilen von „klassischen“ GDF verbindet.

Das vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen der Programmlinie „Haus der Zukunft“ geförderte

Projekt wurde in fakultätsübergreifender Kooperation mit den Instituten für Wärmetechnik (Ao.Univ.-Prof. DI Dr. Wolfgang Streicher) bzw. für Strömungslehre und Wärmeübertragung (Ass.-Prof. DI Dr. Walter Meile) sowie dem Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Abteilung Bauphysik der TU Wien (O.Univ.-Prof. DI Dr. Jürgen Dreyer) durchgeführt und von der Fa. Morocutti Stahlbau unterstützt.

Ein Folgeprojekt, das im Zuge der laufenden Ausschreibung zum 6. EU-Rahmenprogramm für Forschung, technologische Entwicklung und Demonstration von einem Konsortium der TU Graz in Zusammenarbeit mit der Industrie eingereicht wird (Koordinator: Prof. DI Dr. Wolfgang Streicher), soll die Untersuchung der Energiebilanzen sowie der Interaktion von GlasDoppelFassaden mit dem dahinterliegenden Gebäude unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens zum Inhalt haben.

### Die Messfassade

Das 53,7 m lange, 14 m breite und 17 m hohe, Ost-West orientierte, fünfgeschossige Gebäude ist mit einer allseitigen Glasfassade ausgestattet, welche als sogenannte unsegmentierte Vorhangfassade bezeichnet werden kann. Das heißt, es gibt abgesehen von einzelnen Fensterkästen, welche

gegen den Fassadenzwischenraum durch gedämmte Metallpaneele abgeschottet sind, weder horizontale noch vertikale Unterteilungen des Fassadenzwischenraumes.

Die Fensterkästen ermöglichen eine direkte Lüftung der dahinterliegenden Räume unter Umgehung des Fassadenzwischenraumes. Dadurch wird im Sommer ein Hereinlüften von warmer Spaltluft in das Gebäude vermieden. Zudem verhindert diese Konstruktion weitgehend die Schall- und Geruchs- bzw. Brauchübertragung über den Fassadenzwischenraum.

Um die Ausgangssituation für die Simulationsberechnungen möglichst genau nachbilden zu können und Verfälschungen der Messergebnisse durch Querströmungen zu vermeiden, wurden die beiden Messfelder – „Wand“ bzw. „Fenster“ – durch aufblasbare Kunststoff-Schläuche von der übrigen Fassade abgeschottet (Abb. 1).

### Vorort-Messung

Zum Vergleich mit den numerischen Simulationsberechnungen



Abb. 1: Südansicht des Versuchsobjektes mit Messfeldern „Fenster“ und „Wand“

wurden von Ende Oktober 2001 bis September 2002 umfangreiche Messungen der Oberflächen- und der Lufttemperaturen, der Luftfeuchtigkeit und der Strömungsgeschwindigkeiten im Fassadenzwischenraum, der Strahlung im Zwischenraum und außen, des Differenzdruckes zwischen Fassadenzwischenraum und außen, des Außenklimas und des Wärmestroms vom Fassadenzwischenraum nach Innen durchgeführt.

Aufgrund der hohen Kosten der Sensorik wurden die Messungen in jeder Jahreszeit mit jeweils dem gesamten Gerätepark für den Messbereich „Wand“ und unmittelbar anschließend für den Messbereich „Fenster“ getrennt durchgeführt.

#### Thermische Simulation

Das mit dem Programmpaket TRNSYS zu modellierende System umfasst im wesentlichen fünf Komponenten: Außenraum/Außenklima - Sekundärfassade/vorgehängte Glasscheibe - Fassadenzwischenraum - Primärfassade/Betonwand bzw. Isolierglas - Innenraum des Gebäudes.

In den Wintermonaten (Heizperiode) sind bei dem zu untersuchenden Fassadensystem die Lüftungsklappen geschlossen, wodurch der Wärmeaustausch zwischen der Luft im Fassadenzwischenraum und der Außenluft primär über Wärmeleitung durch die Glasscheibe erfolgt. Das Strömungsverhalten der Fassadenluft entspricht jenem eines Fluids in einem geschlossenen vertikalen Spalt, dessen Begrenzungsflächen unterschiedliche Temperaturen aufweisen. An der wärmeren Fläche (Betonwand) steigt die Luft auf, während sie an der kälteren Glasscheibe absinkt.

In den Sommermonaten sind die Ein- und Auslassklappen hingegen geöffnet. Dadurch gelangt Außenluft durch die bodennahen Einlassklappen in den Fassadenzwischenraum und wird dort durch die Begrenzungsflächen erwärmt.

Die sich dadurch einstellende Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Fassadenluft bedingt den thermischen Auftrieb, der durch eine charakteristische, aufwärts gerichtete, mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Fassadenluft (freie Konvektion) quantifiziert wird.

Der Wärmeaustausch zwischen Außen- und Fassadenluft wird also im Sommerfall sowohl über Wärmeleitung an der Glasscheibe als auch über die zu- und abströmende Fassadenluft wirksam.

Die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Temperaturwerten an der vorgehängten Glasfassade, der Betonoberfläche und der Luft an der Austrittsöffnung des Fassadenspalt war für die untersuchten Messreihen als gut zu bewerten, wobei Abweichungen von maximal  $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  auftraten. Die Messreihen umfassen dabei sowohl Tag- als auch Nachtstunden und beinhalten unterschiedlichste klimatische Bedingungen im Bezug auf solare Einstrahlung, Außenlufttemperaturen und Windverhältnisse.

Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten ( $v_m$ ) sind ebenfalls reproduzierbar, wobei allerdings für kleine Strömungsgeschwindigkeiten ( $< 0,3 \text{ m/s}$ ) die berechneten Werte tendenziell größer sind als die gemessenen. Die festgestellten Abweichungen liegen im

Bereich von  $0,05 - 0,1 \text{ m/s}$  und können zum Teil, insbesondere nahe der unteren Messwertgrenze der eingesetzten Hitzdrahtanemometer von  $0,125 \text{ m/s}$  mit der maximalen Messwertgenauigkeit von  $\pm 0,05 \text{ m/s}$  erklärt werden.

Der Vergleich zwischen Simulation und Messung zeigt die Komplexität und Vielfältigkeit der bei dieser Art von Fassadenkonstruktion auftretenden physikalischen Effekte und den damit verbundenen Anforderungen an die Simulation. Der messtechnisch erfasste und simulationstechnisch untersuchte Fassadenabschnitt stellt in diesem Zusammenhang eine relativ einfache Konstruktionsvariante dar. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse können als Grundlage bei der Weiterentwicklung der Rechenmodelle für komplexere Fassadenkonstruktionen mit teiltransparenten Außenwänden (Doppelfassaden) herangezogen werden.

#### Strömungssimulation

Mittels des Programmpaketes FLUENT wurden in einem ersten Schritt aus fluidmechanischen Berechnungen die notwendigen Anhaltspunkte für die Positionierung der Fühler zur messtechnischen Erfassung von Geschwindigkeiten und Temperaturen gewonnen. Den Ausgangspunkt bildeten dabei die thermischen Simulationsberechnungen

der Temperaturen der Betonwand bzw. der vorgesetzten Glasfassade, die als Randbedingungen für die fluidmechanischen Berechnungen verwendet wurden. Die Übereinstimmung der Ergebnisse hinsichtlich Lufttemperatur am Austritt des Spaltes sowie der mittleren Geschwindigkeit mit den Ergebnissen der thermischen Simulation kann als sehr gut bezeichnet werden.

Nach vollständigem Vorliegen der Messergebnisse bzw. nach deren Evaluierung wurden fünf Messfälle - jeweils für Zeitpunkte mit und ohne Strahlungseinfall (Tag bzw. Nacht) - berechnet. Die im Vergleich zum Abschnitt „Wand“ etwas deutlicheren Abweichungen der Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich „Fenster“ können plausibel erklärt werden, indem insbesondere die Geschwindigkeiten in der Umgebung der Messpunkte in allen Richtungen deutliche Gradienten aufweisen.

Weiters konnte festgestellt werden, dass die zum Teil nicht unerheblichen Windbelastungen, die zu einigen Messzeitpunkten auftraten, insbesondere bei geöffneten Lüftungsklappen aber auch infolge von Undichtigkeiten im geschlossenen Zustand, die Strömungssituation im Fassadenspalt gravierend beeinflussen (Ausbildung von gerichteten vertikalen Strömungen anstelle zu erwartender Walzenbildung).

Im Hinblick auf die baupraktische Anwendung zur Auslegung von Doppelfassaden kann festgestellt werden, dass fluidmechanische Simulationen in der hier angewandten Form aufgrund des enormen Bedarfes an Ressourcen (Hardware, Rechenzeit) eher nicht geeignet erscheinen. Zur wissenschaftlichen Bearbeitung in Einzelfällen kann diese Art der Simulation aber mit guter Aussagekraft eingesetzt werden.

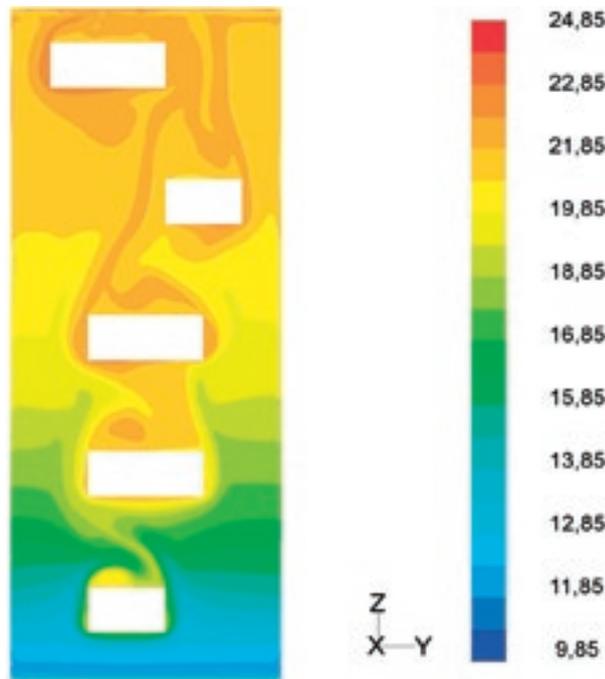


Abb. 2: Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation der Temperaturen [ $^\circ\text{C}$ ] im Fassadenzwischenraum; Winterfall, Zu- und Abluftklappen geschlossen

### *Hygrothermal Behaviour of Double-skin Facades in Solar Irradiation - Theory Evaluation by Means of On-location Measurements*

*In the course of the boom in "glass architecture", double glass facades, as they are called, have been the subject of controversial international discussion for more than ten years.*

*In addition to aesthetic aspects, the discussion also emphasises advantages in terms of energy and, particularly, noise and ventilation related benefits. The possible disadvantages, on the other hand, include increased investment and maintenance costs, potential problems in terms of building physics and, not least, considerable uncertainties regarding planning.*

*The aim of this research project was to evaluate transient thermal and fluid mechanical simulation models by means of on-site measurements in order to obtain information concerning the importance of the various important base parameters of these very complex models of calculation. Extensive literature research revealed that, in recent years, there has been an increasing number of international research projects focussing on this subject – a fact that underlines the significance of the current research task. And yet completely documented measuring results on real, particularly small and medium-sized facades, are few and far between.*

*From October 2001 to September 2002, climate and flow conditions were measured on and in the glass facade of the new Federal Institute of Social Education building completed in 1998 in Baden near Vienna and analysed as to their correlation with the results of parallel numerical simulation calculations. The analysis focussed on two extreme cases of the space between two facade layers: free solar and wind induced flow in the undisturbed gap between the primary and the mounted glass facade, and the case of complex turbulent flow conditions in the double glass surface area and around the window boxes installed between the facade layers.*

*It was shown that the basic version of the TRYNSYS software package lends itself well to describing the thermal situation in the space between the facade layers. The findings may be taken as a base for further development of the calculation model for more complex facade structures with partially transparent outside walls (double facades).*

*The CFD (Computational Fluid Dynamics) calculations performed with the aid of the FLUENT software package also correlated well, in part, with the measurements, although they are more suited for scientific applications than for construction practice due to the considerable hardware requirements and computational effort.*

worüber man auch in wien mit aller hochach **TU** ng spricht.

Sind es unsere Erfolge auf dem Gebiet der Weltraumforschung? Der Elektronenmikroskopie?  
Der Nanotechnologie? Der Medizinischen Informatik? Der Biotechnologie? Der Biomechanik?  
Der Fahrzeugtechnologie? Des Tunnelbaus? Ist es die Tatsache, dass es bei uns zwar  
weniger Studierende, aber vergleichsweise mehr Studienabschlüsse gibt?  
So oder so: Gut so.



**TUG**

Technische Universität Graz



# Enzyme in der Glykobiotechnologie – Struktur, Funktion, und neue Anwendungen in biokatalytischen Prozessen

## *Enzymes in Glycobiotechnology – Powerful Tools for Sweet Solutions*

„Zucker macht das Leben süß“ lautete eine Werbezeile in den Medien vor einigen Jahren und meinte mit dem Rübenzucker Saccharose das wohl traditionellste Süßungsmittel in unseren Haushalten und in heimischen Lebensmitteln allgemein.

Saccharose gehört zur Substanzklasse der Kohlenhydrate, welche wiederum eine der wichtigsten und strukturell vielfältigsten Komponenten der Biosphäre darstellen. Kohlenhydrate sind Nahrungsstoffe und Quellen erneuerbarer Energie. Sie sind aber auch hauptbeteiligt an vielen Prozessen biologischer Erkennung und daher ein bestimmender Faktor für die physiologische, aber auch die pathophysiologische Wechselwirkung von Makromolekülen, Zellen und Geweben. Die Biotechnologie der Kohlenhydrate (Glykobiotechnologie) stellt sich zur Aufgabe, einfache und komplexe Kohlenhydrate in ausreichender Qualität und Quantität für technologische Anwendungen, beispielweise in Nahrungsmitteln, oder zur Erforschung der physiologischen Eigenschaften in Biologie und Medizin verfügbar zu machen. Durch die Selektivität und Spezifität ihrer Werkzeuge, der Enzyme oder Biokatalysatoren („Glycozymes“), lassen sich Synthesen von strukturell komplexen Zielstrukturen in zumeist effizienter Weise realisieren. Die Glykobiotechnologie ist ein stark interdisziplinär ausgelegtes Fachgebiet, und die kohlenhydratbezogenen Forschungsaktivitäten im Bereich Chemie, Biochemie, und Biotechnologie weisen die TU Graz als einen dynamischen Standort von etablierter und international anerkannter Kompetenz in diesem Bereich aus.

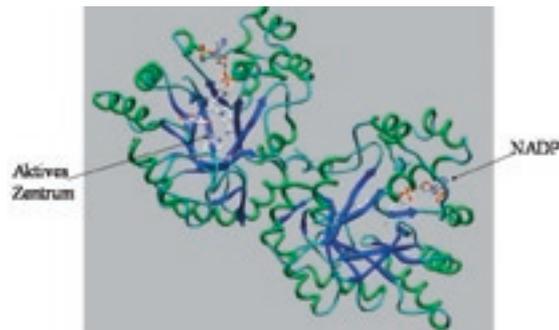
Meine Arbeitsgruppe am Institut für Biotechnologie, an dem ich seit März 2002 als Universitätsprofessor für Biotechnologie tätig bin, beschäftigt sich mit zwei wesentlichen Klassen von mikrobiellen „Glycozymes“, nämlich solchen, die Zuckereinheiten durch neue chemische Bindungen regiospezifisch miteinander verknüpfen (Transferasen), und anderen, die stereospezifische Redoxreaktionen an Kohlenhydraten katalysieren (Oxidoreduktasen). Im Rahmen der Forschungsaktivitäten stehen zwei zentrale Fragen im Vordergrund: Wie arbeiten diese Enzyme, und wie kann auf Basis eines tieferen Verständnisses der Wirkungsweise und der Spezifität das Potenzial für glykobiotechnologische Anwendungen möglichst effektiv realisiert werden? Das Arbeitsgebiet ist an der spannenden Grenzfläche zwischen enzymologischer Grundlagenforschung und Enzymtechnologie lokalisiert und hat sich für mich nach dem Studium der Technischen Chemie an der TU Graz in den letzten 11 Jahren im Rahmen folgender wissenschaftlicher Stationen und Tätigkeiten konkretisiert: Dissertation am Institut für Biotechnologie der TU Graz; Aufbau und Leitung einer eigenständigen Arbeitsgruppe am Institut für Lebensmitteltechnologie der Universität für Bodenkultur in Wien als Universitätsassistent und ab 1999 als Universitätsdozent; Leitung von nationalen und internationalen Forschungsprojekten in den Fachbereichen der Enzymologie und Enzymtechnologie.

Die Arbeiten zur Enzymologie von „Glycozymes“, ein Gebiet für welches ich mich neben Biotechnologie an der Universität für Bodenkultur habilitierte, beschäftigen sich hauptsächlich mit aktuellen

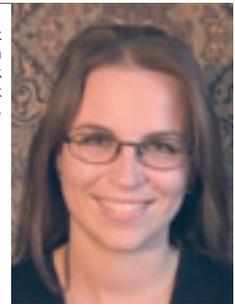
Fragen zu kinetischen und chemischen Mechanismen von Redox- und Transfer-Reaktionen an Kohlenhydraten und zu molekularen Faktoren der Spezifität der untersuchten Kohlenhydrat-aktiven Enzyme. Die angewandten Forschungstätigkeiten der Enzymtechnologie betreffen vor allem die Verbesserung der Enzymstabilität in technischen Prozessen sowie innovatives Design und Optimierung von enzymatischen Transformationen in verschiedenen Bioreaktoren. Ein spezifisches Projekt, welches mit dem Forschungspreis des Landes Steiermark 2002 ausgezeichnet wurde, behandelt die enzymatische Herstellung von Bifidus-aktiven Oligosacchariden aus dem Milchzucker Lactose und anderen erneuerbaren Rohstoffen. Durch positive Effekte auf die Mikroflora des Darmes können diese Oligosaccharide das Wohlbefinden und Gesundheit des Konsumenten vorteilhaft beeinflussen. Ich habe bereits in meiner „Wiener Zeit“ die Kooperation mit Kohlenhydratchemikern der TU Graz schätzen gelernt. Mit dem Verbundprojekt „Kplus - Angewandte Biokatalyse“, an dem ich aktiv und verantwortlich beteiligt bin, wurde ein wesentlicher Impuls zur weiteren Zusammenarbeit und zur Positionierung der TU Graz im Bereich der angewandten Biowissenschaften gesetzt.

### *The sweet secrets of enzyme-catalysed transformations of carbohydrates.*

*Carbohydrates are a structurally diverse group of biomolecules that have numerous biological functions and as many technological applications. The spectrum of the roles of carbohydrates in vivo ranges from serving as nutrients to mediating complex (patho)physiological interactions between proteins or cell types. Carbohydrates are known to a wider public mainly because they provide a major caloric portion of the human diet and sometimes impart a (pleasant) sweet taste to the product. However, the structural complexity of some carbohydrates continues to fascinate chemists and biologists in the effort to understand and engineer fundamental biological processes such as recognition, for example. By virtue of unprecedented specificity, enzyme catalysis is rapidly becoming the key tool for the synthesis of simple sugars and complex carbohydrates. In my group at the Institute of Biotechnology, two classes of carbohydrate-active enzymes (dubbed "glycozymes") are studied with regard to relationships of structure and function, and potential applications in glycobiotechnology: glycosyl transferases, which form linkages between two 'sugar' molecules, and oxidoreductases, which catalyse redox reactions on carbohydrate substrates. We are interested to learn how such enzymes work by exploring kinetic and chemical mechanisms of catalysis and by determining structural factors of specificity. Applied projects focus on stability and stabilisation of 'glycozymes' and the design of bioreactors for efficient biotransformations.*



Dreidimensionale Struktur von Xylose Reduktase aus der Hefe *Candida tenuis* - ein Enzym mit potenziellem Nutzen in der Herstellung des antikariogenen Zuckeraustauschstoffes Xylit und anderen Wertstoffen ausgehend vom Holzzucker Xylose, einem hauptsächlich Kohlenhydratbestandteil nachwachsender (erneuerbarer) Pflanzenbiomasse (FWF Forschungsprojekt P-15208-MOB in Zusammenarbeit mit Dr. David K. Wilson, University of California Davis). In der Abbildung sind erkennbar: die Dimerstruktur des Enzyms, das Faltungsmuster der Untereinheiten, die Bindung des Coenzym NADPH und die Aminosäuren des aktiven Zentrums.



# Quasidimensionale Modellierung des gaseitigen Wandwärmeverganges in Verbrennungskraftmaschinen

## *Quasidimensional Modeling of Wall-Heat Transfer in Internal Combustion Engines*

Der Wunsch den Dingen auf den Grund zu gehen, das Hinterfragen technischer Zusammenhänge, sowie das Interesse für Mathematik haben mich nach dem Gymnasium an die Technische Universität geführt. Ein treffendes Zitat von Prof. List beschreibt ebenfalls meine Beweggründe: „Ich habe mich als Mittelschüler auch einmal für Philosophie interessiert - bis ich draufgekommen bin, dass das eine Wissenschaft ist, die keine Folgen hat, während in der Technik die Richtigkeit der Gedanken und hiermit der Erfolg messbar sind.“

Ich entschied mich für das Studium des Maschinenbaus, da es einen Überblick über die verschiedensten technischen Bereiche bietet und zudem sehr praxisbezogen ist. Im zweiten Abschnitt vertiefte ich mich auf dem Gebiet der Verbrennungskraftmaschinen und verfasste in dieser Sparte auch meine Diplomarbeit mit dem Titel „Drall- u. Tumblemodellierung zur Berechnung des Wandwärmeverganges“ am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mit der ich mein Studium mit Auszeichnung beendete.

Durch diesen Einblick in das wissenschaftliche Arbeiten und die angenehme Atmosphäre am Institut entschloss ich mich nach Beendigung meines Studiums das Angebot, als wissenschaftliche Mitarbeiterin weiterzuarbeiten, anzunehmen. Als Weiterführung meiner Diplomarbeit bin ich derzeit im Rahmen des Christian Doppler Labors für Thermodynamik des Verbrennungsmotors mit dem Projekt „Wärmevergangesberechnung auf Basis quasidimensionaler Modelle und der 3D-CFD (Computational Fluid Dynamics) Simulation“ betraut.

Die realitätsnahe Beschreibung des Wandwärmeverganges ist eine wichtige Voraussetzung für die Simulation des Motorprozesses, da der Wärmevergange unter anderem großen Einfluss auf Wirkungsgrad, Abgasemissionen und Warmlauf hat. Weiters ist für die Optimierung thermisch hoch belasteter Bauteile wie Zylinderkopf, Auslassventile, Zylinderbüchse und Kolben die Kenntnis der thermischen Randbedingungen von entscheidender Bedeutung.

Die Simulation des Motorprozesses bietet in der Folge die Möglichkeit, schon vorab am Rechner Parameterstudien durchzuführen und somit einen Teil der teuren Prüfstandsversuche einzusparen. Damit kommt man der Idee des virtuellen Motors ein wesentliches Stück näher, deren Ziel es ist, durch die letztendlich vollständige Simulation aller motorischen Vorgänge die Entwicklungszeiten erheblich zu verkürzen.

Zur Berechnung des gaseitigen Wärmeverganges im Brennraum kommen zur Zeit hauptsächlich null- aber auch mehrdimensionale Ansätze zur Verwendung. Unter nulldimensionalen Modellen versteht man solche, bei denen eine örtliche Variabilität der Größen nicht berücksichtigt wird, sondern nur deren Zeitabhängigkeit. Diese Modelle sind mit zum Teil relativ großen Unsicherheiten behaftet und für neue Motorkonzepte oft nur bedingt einsetzbar. Im Gegensatz

dazu versteht man unter mehrdimensionalen Modellen solche, die die Abhängigkeit der Variablen von einer bzw. mehreren Ortskoordinaten explizit formulieren. Diese Modelle finden Verwendung in der CFD – Simulation und haben den gravierenden Nachteil, dass sie relativ hohe Rechenleistungen benötigen.

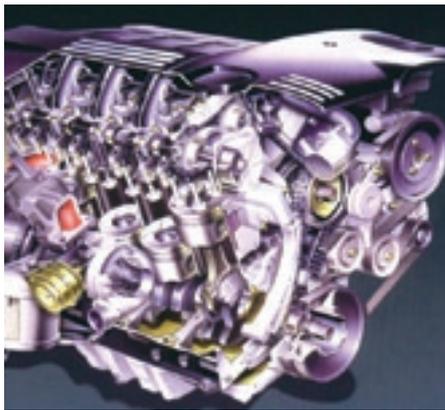
Die quasidimensionale Modellierung soll nun die Vorteile der nulldimensionalen Berechnung mit denen der mehrdimensionalen

verbinden: Ziel ist es, kurze Rechenzeiten mit genügender Genauigkeit zu vereinen. Dabei versteht man unter quasidimensional, dass im Rahmen einer nulldimensionalen Rechnung geometrische Charakteristika (wie z.B. Kolbenmuldengeometrie) und lokale Phänomene Berücksichtigung finden. Der wichtigste Bestandteil der quasidimensionalen Modellierung des Wärmeverganges ist dabei die Berechnung der Zylinderinnenströmung, an welche insbesondere bei Magermotoren hohe Ansprüche gestellt wird, da hier spezielle Formen der Ladungsbewegung (wie Drall- u. Tumbleströmungen) zur Verbesserung der Gemischbildung nötig sind. Zudem

muss die turbulente kinetische Energie der Zylinderladung im Modell berücksichtigt werden. Insbesondere für Dieselmotoren ist weiters eine Berücksichtigung der auftretenden Strahlung durch Russpartikel nötig.

Zur Verifikation des entwickelten Modells werden am Institut in Kooperation mit Industriepartnern umfangreiche Messungen an Forschungs- sowie Serienmotoren durchgeführt.

PKW-DI-Dieselmotor



### *Quasidimensional Modelling of Wall-Heat Transfer in Internal Combustion Engines*

*After attending grammar school in Graz I started studying Mechanical Engineering at Graz University of Technology. During my studies I concentrated on internal combustion engines and therefore chose my diploma thesis with the title: "Swirl- and Tumblemodelling for calculation of quasidimensional wall-heat transfer". After graduating I started as a research assistant at the institute of internal combustion engines. Because of the strong influence of wall-heat transfer on engine cycle simulation and component design and the fact that existing models for wall-heat transfer have drawbacks, I have been focusing on a quasidimensional model that should combine the advantages of the existing models. Central part of the model is the calculation of in-cylinder flow which is especially for lean-mixture engines - which show swirl or tumble motion - important.*

*For the verification of the model several measurements are being performed in cooperation with industrial partners.*

Mag. Dr. techn. Thomas Pary  
Abteilung für Theoretische Geodäsie am  
Institut für Geodäsie, TU Graz  
Derzeit am Institut für Erdmessung und Navigation  
Universität der Bundeswehr München  
E-Mail: Thomas.Pary@unibw-muenchen.de



# GPS Slant-Delays niedrigster Elevationen für die numerische Wettervorhersage

## *Very Low Elevation GPS Slant Delays for Numerical Weather Prediction*

Mein Entschluss für das Studium der theoretischen Physik an der Karl-Franzens Universität Graz nach Abschluss der höheren technischen Lehranstalt für Nachrichtentechnik und Elektronik, entsprach meinem Wunsch, die physikalischen Grundlagen technischer oder naturwissenschaftlicher Phänomene zu verstehen. Dieses fast schon philosophische Streben war allerdings von vornherein mit einer gewissen Brotlosigkeit verbunden, weswegen ich schon während des Studiums bei Grazer Vermessungsbüros einem Broterwerb nachging. Bald wurde mir dabei klar, dass auch in der Geodäsie, im speziellen bei der Positionierung mittels des Globalen Positionierungssystems GPS, äußerst interessante und faszinierende Forschungsbereiche warten und teilweise eine große Verwandtschaft mit der Physik gegeben ist. So ist wohl den wenigsten GPS Anwendern klar, dass für die Positionierung mit Millimetergenauigkeit sowohl die spezielle als auch die allgemeine Relativitätstheorie in Form von Korrekturtermen zur Anwendung kommt.

Daher entschloss ich mich nach Beendigung des Physikstudiums eine Stelle am Institut für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften anzunehmen. Dort war ich für vier Jahre an der Abteilung für Satellitengeodäsie in enger Kooperation mit dem Institut für Geodäsie der TU Graz tätig.

Ich arbeitete dort am Aufbau eines österreichweiten Netzes von GPS Referenzstationen mit, welches einerseits die Grundlage für viele Vermessungsaufgaben der allerhöchsten Präzision liefert und andererseits zur Analyse geophysikalischer Phänomene herangezogen wird. Die horizontalen Koordinaten der Referenzstationen lassen sich mit einer Genauigkeit von 1-2 mm bestimmen und damit ist es möglich, kleinste Verschiebungen der Stationen, z.B. aufgrund der sporadisch in Österreich auftretenden kleineren Erdbeben festzustellen. Damit diese hohen Genauigkeiten erreicht werden können, ist es notwendig, sämtliche Fehlerinflüsse auf das GPS Signal entweder zu eliminieren oder zu modellieren.

Eine dieser Fehlerquellen, nämlich der Einfluss des atmosphärischen Wasserdampfes, hat in den letzten Jahren einen enormen Bedeutungsgewinn erfahren. Der atmosphärische Wasserdampf verzögert GPS Signale um einen winzigen Beitrag, nämlich um bis zu 1,5 ns in Richtung des Zenits. Es wurden Methoden entwickelt, um diese Laufzeitverzögerung möglichst genau zu modellieren und damit zu bestimmen. Die Kenntnis der Position der GPS Referenzstation und der Satellitenorbits ist dafür eine Voraussetzung.

Die Verteilung des atmosphärischen Wasserdampfes ist in der Meteorologie von entscheidender Bedeutung, vor allem wenn man bedenkt, dass Wasser in der Atmosphäre zum größten Teil in gasförmigem Zustand vorliegt. Der Wasserdampf bestimmt nicht nur das Wettergeschehen, man denke an Bewölkungsgrad oder Niederschläge, sondern ist auch das wichtigste Treibhausgas. Die Bestimmung der Verteilung des Wasserdampfes ist damit von entscheidender Bedeutung für die Wettervorhersage und für die Klimatologie. Er kann allerdings über Kontinenten nur sehr mühsam durch so genannte Radiosonden (Ballonaufstiege) bestimmt werden. Hier bietet sich nun GPS als weiteres Sensorsystem an, das die Verteilung indirekt über den Einfluss auf die GPS Signale misst. Das interdisziplinäre Gebiet der GPS-Meteorologie kommt hier zum Einsatz.

Die Verzögerung in Zenitrichtung war bald klar und die Assimilation solcher Daten in numerische Wettermodelle ist zur Zeit Gegenstand der Forschung. Vor allem die kurzfristige Niederschlagsvorhersage oder auch die Vorhersage von extremen Wettersituationen sollen damit verbessert werden. Mein Beitrag zu diesem Thema war es nun, zusätzlich zu der Verzögerung in Zenitrichtung auch die GPS Signale zu analysieren, die von Satelliten in der Nähe des Horizontes kommen. Diese Signale werden im allgemeinen für Positionierungsanwendungen nicht verwendet, da der atmosphärische Einfluss auf sie sehr groß ist und sie eine Positionsbestimmung eher verschlechtern als verbessern. Als Messgröße für GPS-Meteorologie sind sie aber ideal. Während meiner Tätigkeit am Institut für Weltraumforschung und auch später am Institut für Erdmessung und Navigation der Universität der Bundeswehr München habe ich die Charakteristik dieser Signale untersucht. Strahlkrümmung, Brechungseffekte oder troposphärische Mehrwegeeffekte treten auf und müssen entsprechend behandelt werden. In meiner Dissertation, die ich Ende 2002 an der TU Graz mit dem Rigorosum abgeschlossen habe, ist ein Großteil dieser Effekte behandelt. In Zukunft wird die Assimilation solcher Daten in numerische Wettermodelle zu untersuchen sein und die operationelle Bestimmung erfolgen müssen. Dafür werden die neuen Navigationssignale des modernisierten GPS und des zur Zeit in Entwicklung befindlichen europäischen Satellitennavigationssystems Galileo von besonderer Bedeutung sein.

## *Very Low Elevation GPS Slant Delays for Numerical Weather Prediction*

*After studying theoretical physics at the Karl-Franzens University Graz, I decided to work in the field of satellite positioning at the Space Research Institute of the Austrian Academy of Sciences. Working with a network of permanent Global Positioning System (GPS) receivers, I got involved into the field of GPS Meteorology. Via precise time delay measurements, a GPS receiver is able to determine the amount of atmospheric water vapor near the station. This data is expected to have a major impact on the improvement of short-term precipitation forecasts or extreme weather conditions. In my PhD thesis at the TU Graz, I investigated the complex behavior GPS signals near the horizon, to be used for GPS Meteorology, and possible applications to improve weather forecasting. The thesis was finished in 2002.*



Kontaktadresse:  
Technische Universität Graz  
Referat für Öffentlichkeitsarbeit  
Rechbauerstraße 12, 8010 Graz  
Tel: ++43 (0) 316 873 6064  
[info@tugraz.at](mailto:info@tugraz.at)  
<http://www.TUGraz.at>