

**Antrag auf Einrichtung  
eines Graduiertenkollegs**

**Algorithmische Synthese  
reaktiver und diskret-kontinuierlicher Systeme**

**(AlgoSyn)**



**Aachen, Januar 2005**

## **Inhalt**

1. Allgemeine Angaben	1
1.1 Thema	1
1.2 Antragstellende Hochschule	1
1.3 Antragstellende Wissenschaftler	1
1.4 Zusammenfassung	4
1.5 Voraussichtliche Laufzeit	4
1.6 Antragszeitraum	4
1.7 Angestrebter Förderungsbeginn	4
1.8 Angestrebte Zahl der Doktoranden-, Postdoktoranden- und Qualifizierungsstipendien	4
2. Profil des Graduiertenkollegs	4
2.1 Zentrale Forschungsidee und innovative Fragestellungen	4
2.2 Internationalität	5
2.3 Strukturelle Aspekte Graduate School	6
3. Forschungsprogramm	7
3.1 Themenbereiche	8
3.2 Promotionsprojekte	22
4. Studienprogramm	33
4.1 Komponenten des Studienprogramms	33
4.2 Betreuungskonzept	37
5. Gastwissenschaftlerprogramm	39
6. Organisationsstruktur des Graduiertenkollegs	40
7. Umfeld des Graduiertenkollegs	41
8. Mittel/ Kostenarten	42
9. Erklärungen	44
10. Verpflichtungen	44
11. Veröffentlichung von Antragsteller- und Kollegdaten	44
12. Unterschriften	44
Anhänge:	
A. Forschungsprofile der beteiligten Wissenschaftler	
B. Ausführliche Beschreibung der Promotionsthemen	
C. Erklärungen	
D. Stellungnahmen	

# 1. Allgemeine Angaben

## 1.1 Thema

Algorithmische Synthese reaktiver und diskret-kontinuierlicher Systeme (AlgoSyn)

(Algorithmic synthesis of reactive and discrete-continuous systems)

## 1.2 Antragstellende Hochschule

RWTH Aachen (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen)

Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften (FB 1)

Fakultät für Bauingenieurwesen (FB 3)

Fakultät für Maschinenwesen (FB 4)

Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik (FB 5)

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik (FB 6)

## 1.3 Antragstellende Wissenschaftler

### Sprecher

Prof. Dr. W. Thomas                      Lehrstuhl für Informatik VII  
(Logik und Theorie diskreter Systeme)  
Ahornstr. 55, 52074 Aachen  
www-i7.informatik.rwth-aachen.de  
[thomas@informatik.rwth-aachen.de](mailto:thomas@informatik.rwth-aachen.de)  
Tel. 0241-8021700

### Tragende Hochschullehrer

Prof. Dr.-Ing. D. Abel                      Lehrstuhl und Institut für Regelungstechnik  
Steinbachstr. 54, 52074 Aachen  
[www.irt.rwth-aachen.de/irtframe.html](http://www.irt.rwth-aachen.de/irtframe.html)  
[D.Abel@irt.rwth-aachen.de](mailto:D.Abel@irt.rwth-aachen.de)  
Tel. 0241-8027501

Prof. Dr.-Ing. U. Epple                      Lehrstuhl für Prozessleittechnik  
Turmstr. 46, 52064 Aachen  
[www.plt.rwth-aachen.de](http://www.plt.rwth-aachen.de)

[epple@plt.rwth-aachen.de](mailto:epple@plt.rwth-aachen.de)

Tel. 0241-8097737

Prof. Dr. J. Giesl

Lehr- und Forschungsgebiet Informatik II  
(Programmiersprachen und Verifikation)  
Ahornstr. 55, 52074 Aachen  
[www-i2.informatik.rwth-aachen.de/lufgi2](http://www-i2.informatik.rwth-aachen.de/lufgi2)  
[giesl@informatik.rwth-aachen.de](mailto:giesl@informatik.rwth-aachen.de)  
Tel. 0241-8021230

Prof. Dr. E. Grädel

Lehr- und Forschungsgebiet Mathematische Grundlagen  
der Informatik  
Ahornstr. 55, 52074 Aachen  
[www-mgi.informatik.rwth-aachen.de](http://www-mgi.informatik.rwth-aachen.de)  
[graedel@informatik.rwth-aachen.de](mailto:graedel@informatik.rwth-aachen.de)  
Tel. 0241-8021730

Prof. Dr. J.P. Katoen

Lehrstuhl für Informatik II  
(Programmiersprachen und Software-Validierung)  
Ahornstr. 55, 52074 Aachen  
<http://www-i2.informatik.rwth-aachen.de/>  
[katoen@informatik.rwth-aachen.de](mailto:katoen@informatik.rwth-aachen.de)  
0241-8021201

Prof. Dr. S. Kowalewski

Lehrstuhl für Informatik XI (Software für Eingebettete Systeme)  
Ahornstr. 55, 52074 Aachen  
[www-i11.informatik.rwth-aachen.de](http://www-i11.informatik.rwth-aachen.de)  
[kowalewski@informatik.rwth-aachen.de](mailto:kowalewski@informatik.rwth-aachen.de)  
Tel. 0241-8021150

Prof. Dr. R. Leupers

Lehr- und Forschungsgebiet Software für Systeme auf Silizium  
Sommerfeldstr. 24, 52074 Aachen  
[www.iss.rwth-aachen.de](http://www.iss.rwth-aachen.de)  
[leupers@iss.rwth-aachen.de](mailto:leupers@iss.rwth-aachen.de)  
Tel. 0241-8028301

Prof. Dr. B. Vöcking

Lehrstuhl für Informatik I (Algorithmen und Komplexität)  
Ahornstr. 55, 52074 Aachen  
[www-i1.rwth-aachen.de](http://www-i1.rwth-aachen.de)  
[voecking@informatik.rwth-aachen.de](mailto:voecking@informatik.rwth-aachen.de)  
0241-8021100

Prof. Dr. E. Wendler

Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft  
Verkehrswissenschaftliches Institut  
Mies-van-der-Rohe Str. 1, 52074 Aachen  
www.via.rwth-aachen.de  
wendler@via.rwth-aachen.de  
Tel. 0241-8025190

### **Assoziierte Nachwuchswissenschaftler**

Dr. M. Westermann, Nachwuchsgruppe im DFG-Aktionsplan Informatik,  
Lehrstuhl für Informatik I  
PD Dr. Th. Noll, Lehrstuhl für Informatik II

### **Assoziierte Industrieunternehmen**

1. Ericsson Deutschland GmbH Herzogenrath
2. Philips Forschungslabor Eindhoven
3. Siemens Transportation Systems
4. Siemens Automation and Drives
5. Deutsche Bahn AG
6. DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

### **1.4 Zusammenfassung**

Während Methoden der Softwarevalidierung und –verifikation inzwischen gut etabliert sind, abgesichert durch adäquate formale Modelle und auch erprobt in der praktischen Anwendung, ist der Ansatz der automatischen Synthese von Software (und Hardware) erst rudimentär entwickelt. Doch bildet sich sowohl in der theoretischen Informatik als auch in der Praxis der Ingenieur-disziplinen derzeit ein schnell wachsendes Instrumentarium für die Entwicklung von algorithmisch realisierbaren Syntheseverfahren heraus, vor allem getrieben durch die Notwendigkeit, durch den Einsatz von in formalen Modellen abgestützter Algorithmik die Entwicklungskosten zu senken. Der Ansatz der Programmsynthese ist allerdings nur in eingeschränkten Szenarien realistisch, vor allem in reaktiven (Multi-Agenten-) Systemen mit eingeschränkter Datenkomplexität sowie in Leit- und Steuerungssystemen. Zentrale Forschungsprobleme in diesem Feld sind einerseits die Etablierung von System-Modellen, die algorithmische Lösungen des Syntheseproblems erlauben, andererseits (ähnlich wie in der Verifikation) die Kombination von diskreten und kontinuierlichen Parametern (hybride Systeme) und schließlich die Erforschung des möglichen Anwendungspotenzials. Ziel des Graduiertenkollegs ist es, diese Forschungen durch Bündelung der Expertise aus Informatik, Mathematik und vier Ingenieurdisziplinen (Prozessorarchitekturen, Regelungstechnik, Prozessleittechnik sowie Schienenverkehrswesen) voranzutreiben und zu der notwendigen Methodenintegration beizutragen. Die Forschungen erfolgen in vier Themen-bereichen: Algorithmik für agentenbasierte, probabilistische und hybride Systeme, Formale Modelle reaktiver Systeme und spieltheoretische Methoden, Softwaretechnische Einbettung und Modellierungssprachen, Anwendungen und Demonstratoren.

## **Abstract**

While methods of software validation and verification are by now well established, based on adequate formal models and tested in practical applications, the approach of automatic synthesis of software (and hardware) is as yet only developed in quite rudimentary form. On the other hand, in theoretical computer science as well as in engineering disciplines a rapidly increasing stock of techniques for the development of algorithmic synthesis procedures is emerging, triggered by the demand to decrease development costs by invoking algorithmics in formal modelling frameworks. However, the approach of program synthesis is only applicable in restricted scenarios, in particular in reactive (multi-agent-)systems with low data complexity and in control systems. Central issues in the area are the establishment of system models which allow an algorithmic solution of the synthesis problem, the combination of discrete and continuous parameters in hybrid systems (as this is also familiar from verification), and the exploration of the potential of applications. The aim of the Graduate School is to unify the expertise from Computer science, mathematics, and four engineering disciplines (processor architectures, automatic control, process control engineering, train traffic systems) and to push forward the desired integration of methods. The research will be carried out in four subject areas: Algorithmics for agent-based probabilistic and hybrid systems, formal methods of reactive systems and game-theoretic methods, software development and modelling languages, and finally applications and demonstrators.

### **1.5 Voraussichtliche Laufzeit**

9 Jahre

### **1.6 Antragszeitraum**

4,5 Jahre

### **1.7 Angestrebter Förderungsbeginn**

1. Januar 2006

### **1.8 Angestrebte Zahl der Doktoranden- und Postdoktorandenstipendien**

Es werden 15 Doktorandenstipendien und ein Postdoktorandenstipendium beantragt.

Weitere Kollegiaten werden aus dem Kreis der Doktoranden an den beteiligten Lehrstühlen mit Blick auf das Thema des Graduiertenkollegs ausgewählt. Die Zahl soll etwa die Zahl der Stipendiaten erreichen. Kollegiaten gehören zum Teilnehmerkreis für alle kollegspezifischen Veranstaltungen und sollen das Kolleg (z.B. als Koautoren mit Stipendiaten) bereichern und auch für ihre eigenen Promotionsprojekte aus der Kollegarbeit Gewinn ziehen.

## 2. Profil des Graduiertenkollegs

### 2.1 Zentrale Forschungs idee und innovative Fragestellungen

Die Konstruktion korrekter und effizienter Hardware- und Softwaresysteme ist eine der zentralen Herausforderungen für die Informatik. Es treffen sich hier nach wie vor massive Interessen der Anwender (in den Ingenieurdisziplinen und in der Softwareindustrie) mit offenen Forschungsfragen der Informatik.

Der Zugang zu diesem Problem über „formale Methoden“ hat bereits eine lange Tradition, mit beachtlichen Teilerfolgen. In der DFG gab und gibt es eine ganze Reihe einschlägiger Projekte (von denen beispielhaft der SFB Transregio AVACS erwähnt sei). Im Zentrum dieser Forschungen stehen ausdrucksstarke Spezifikationssprachen und der Versuch, Techniken der Programmverifikation (durch Model-Checking oder Theorembeweisen) zur Validierung auch großer Softwaresysteme zu nutzen.

Das hier vorgeschlagene Graduiertenkolleg verfolgt einen Ansatz, das Paradigma der a posteriori Verifikation zu überwinden, der aber erst rudimentär entwickelt ist: Verfahren der algorithmischen Synthese von Hardware oder Software aus vorliegenden Spezifikationen. Diese anspruchsvollere Zielsetzung gegenüber der Verifikation bedeutet eine erhöhte algorithmische Komplexität (und zuweilen sogar den Verlust eines automatisierbaren Vorgehens). Doch ist dieser Ansatz in eingeschränkten, aus praktischer Sicht höchst relevanten Szenarien anwendbar, vor allem in der Erzeugung von Hardware oder Software, bei der Aspekte des Kontrollflusses im Vordergrund stehen (Steuerungs- und Leitsysteme). Die rein algorithmische Sicht muss hierbei integriert werden mit anderen Methodiken, vor allem mit dem Ansatz der hierarchischen Problemgliederung und der schrittweisen Verfeinerung und mit Verfahren der Programmverifikation. Ein wesentliches Merkmal der genannten Anwendungsszenarien ist die Integration von diskreten mit kontinuierlichen Modellkomponenten (hybride Systeme). Hierbei kann der kontinuierliche Anteil in verschiedenartiger Gestalt einfließen: durch probabilistische Verhaltenseigenschaften, durch Bedingungen an die kontinuierliche Zeit, oder durch analytische Modellierung mittels Differentialgleichungen. Damit erhält die Aufgabe der algorithmischen Systemkonstruktion häufig den Charakter eines Optimierungsproblems (bei dem das System Wahrscheinlichkeitswerte, Zeitwerte oder andere Parameter minimieren oder maximieren soll).

Das für die Bearbeitung dieser Forschungsaufgaben nötige Gebietsspektrum umfasst Gebiete der theoretischen Informatik (insbesondere Algorithmik über reaktiven Systemmodellen wie Mehragentensystemen, Algorithmik probabilistischer und hybrider Systeme, Synthese-Algorithmen aus Logik-Spezifikationen), der formal-gestützten Softwarekonstruktion sowie der Anwendungen in Ingenieurdisziplinen (hardwarenahe Compilierung von Software, Regelungstechnik, Prozessleittechnik, Verkehrsleittechnik).

Die Antragsteller (5 Informatiker, 1 Mathematiker und 4 Ingenieure) decken dieses weite Kompetenzspektrum ziemlich vollständig ab. Durch die thematische Fokussierung ist eine starke Kohärenz gegeben. Ziel der Forschungsarbeiten ist ein wesentlicher Fortschritt bei der Weiterentwicklung der grundlegenden algorithmischen Resultate mit Blick auf die Nutzung in den hier betrachteten Anwendungsdomänen.

## 2.2 Internationalität

Alle beteiligten Hochschullehrer sind in internationale Kooperationen eingebunden. Einige Kooperationen sind von besonderer Bedeutung; nur hierauf wird im folgenden eingegangen.

Ein Kern des beantragten Kollegs sind Forschungsaktivitäten im *EU Research Training Network GAMES* („*Games and Automata for Synthesis and Validation*“). Diese nunmehr drei Jahre laufende intensive Kooperation bindet die einschlägigen Forschungsgruppen der RWTH Aachen (Koordinator) und der Universitäten Bordeaux 1, Edinburgh, Paris 7, Uppsala, Warschau, Wien sowie als US-Partner die Rice University (M. Vardi) zusammen und ist in diesem Forschungsbereich führend. Die Kontakte haben auf Predoc- und Postdoc-Level zu zahlreichen gemeinsamen Promotionsprojekten und gemeinsamen Forschungsarbeiten geführt (ausgezeichnet u.a. mit dem GI-Dissertationspreis für S. Kreuzer, RWTH Aachen, und mehreren Best Paper Awards). Beteiligt von Seiten der RWTH Aachen sind E. Grädel und W. Thomas.

Hinzu treten weitere internationale Kooperationen, die in das Graduiertenkolleg einfließen. Es seien die folgenden aufgeführt:

- VOSS 2 - Validation of Stochastic Systems 2 - ein bilaterales DFG-NWO Projekt zwischen Deutschland und den Niederlanden mit Beteiligung von Forschungsgruppen aus Twente, Nimwegen, Aachen, Bonn, Saarbrücken und der Universität der Bundeswehr München (von Seiten der RWTH Aachen beteiligt: J.-P. Katoen)
- EU Network of Excellence ARTIST2 - Embedded System Design (von Seiten der RWTH Aachen beteiligt: S. Kowalewski, R. Leupers)
- EU Network of Excellence HYCON – Hybrid Control (von Seiten der RWTH Aachen beteiligt: S. Kowalewski)
- EU Integrated Project DELIS - Dynamically Evolving Large Scale Information Systems (von Seiten der RWTH Aachen beteiligt: B. Vöcking)

Es besteht ferner eine enge Kooperation mit einigen europäischen Exzellenzzentren, so im Rahmen der IDEA-League (Imperial College London, TU Delft, ETH Zürich und RWTH Aachen). Hier werden vorwiegend curriculare Planungen abgestimmt, sowohl hinsichtlich übergeordneter Strukturen (Quality Management) als auch fachlicher Standards für Curricula. Auf diese Weise wird eine forschungsnahе Ausgestaltung der zur Zeit konzipierten Masterstudiengänge gesichert, als Voraussetzung für eine erfolgreiche Arbeit von Doktoranden. Im gleichen Zusammenhang ist eine in Planung befindliche Kooperation mit Pariser Grandes Ecoles zu erwähnen, in Form eines integrierten Informatik-Masterstudiums zwischen der RWTH Aachen und den vier Pariser Hochschulen Ecole Normale Supérieure, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Ecole Polytechnique und Université Paris 7 (die einen „Parisian Master of Research in Computer Science“ gemeinsam anbieten).

## 2.3 Strukturelle Aspekte, Graduate School

Das beantragte Graduiertenkolleg ist im Bereich der Informatik thematisch und personell strikt komplementär zum bestehenden Informatik-Kolleg „Software für Kommunikationssysteme“. Wie oben ausge-

führt, bindet es Informatiker, Mathematiker sowie Ingenieurwissenschaftler aus vier Fakultäten ein.

Innerhalb der Informatik nutzt das Kolleg die Clusterbildung mit den in 2003/2004 erfolgten Berufungen der Lehrstuhlinhaber Vöcking (Algorithmik), Katoen (Programmiersprachen und Software-Validierung) und Kowalewski (Software für Eingebettete Systeme). Alle drei vertreten zentrale Themenstellungen im beantragten Graduiertenkolleg, mit einem Schwerpunkt im Bereich der probabilistischen bzw. hybriden Systeme. Die weiteren Vertreter der Informatik (Giesl, Thomas) ebenso wie der Vertreter der Fachgruppe Mathematik (Grädel) tragen hierzu mehr Logik-orientierte Kompetenzen in der Verifikation und Synthese bei. Die Professoren aus den Ingenieurdisziplinen (Wendler, Abel, Epple, Leupers aus den Fachbereichen 3, 4, 5, 6 der RWTH Aachen) vertreten verschiedenartige, aber dennoch spezifische Anwendungsfelder der algorithmischen Synthese; alle haben intensive Erfahrungen mit mathematischen („formalen“) Systemmodellen und -spezifikationen, so dass eine sehr gute Basis für die Forschungsarbeiten zur Verfügung steht. Da in Aachen zahlreiche in den einschlägigen Grundlagen sehr gut ausgebildete Absolventen zur Verfügung stehen, sind die Chancen, qualifizierte Stipendiaten bereits am Ort zu gewinnen, besonders gut; ausländische Stipendiaten können sowohl aus den eigenen internationalen Masterstudiengängen (s.u.) als auch aus ausländischen Hochschulen rekrutiert werden.

Wie die Ausführungen im Abschnitt über das Studienprogramm genauer belegen, ist das Kolleg im Kontext der Etablierung einer *Graduate School for Doctoral Studies* im Bereich der Ingenieurwissenschaften an der RWTH zu sehen. Kernidee der Graduate School ist die strukturelle Abstützung eines breiter verstandenen Promotionsstudiums. Das beantragte Graduiertenkolleg kann hier auf der Basis der unten im Studienprogramm genannten Punkte eine Vorreiterrolle übernehmen.

Die RWTH Graduate School for Doctoral Studies baut auf den zur Zeit laufenden Diplomstudiengängen, bestehenden internationalen Masterstudiengängen (u.a. „Software Systems Engineering“) und zukünftig auch auf den derzeit konzipierten neuen Masterstudiengängen auf. Für das beantragte Kolleg wird der in Gründung befindliche, ab 2006 angebotene fakultätsübergreifende *Masterstudiengang „Automatisierungstechnik“* von besonderer Bedeutung sein; drei der vier Initiatoren dieses Studiengangs (Abel, Epple, Kowalewski) sind am Graduiertenkolleg beteiligt.

### 3. Forschungsprogramm

Das Problem der Programmsynthese ist eine fundamentale Fragestellung der Informatik, deren Schwierigkeit bereits in jahrzehntelanger Forschung dokumentiert ist. Das Syntheseproblem tritt in vielen Formen auf, von denen im beantragten Graduiertenkolleg nur ein Teilbereich erfasst wird.

Betrachtet man den klassischen Fall der Eingabe-Ausgabe-Programme, mit Spezifikation durch eine Eingabe-Ausgabe-Relation  $R(x,y)$ , so besteht das Syntheseproblem darin, ein Berechnungsverfahren  $B$  zu finden, mit dem Ergebnis  $B(x)$  bei Eingabe  $x$ , so dass für alle  $x$  die Bedingung  $R(x, B(x))$  erfüllt ist. Ein Ansatz (die Methode der „Proofs as Programs“) besteht darin, aus einem formalen Beweis der Aussage „für jedes  $x$  existiert ein  $y$  mit  $R(x,y)$ “ ein entsprechendes Verfahren  $B$  zu extrahieren. Die Ein- und Ausgabewerte kommen hier üblicherweise aus einem unendlichen Datenbereich und werden als Ganzes gegeben bzw. produziert.

Kernthema des beantragten Graduiertenkollegs ist eine dazu duale Situation, wie sie in reaktiven Systemen auftritt. Typischerweise repräsentieren hier die Parameter  $x$  und  $y$  die sukzessiv aufgebauten Beiträge zweier Agenten zur Erzeugung eines „Systemlaufs“, wobei fortwährende Interaktion besteht. Die Objekte  $x$  und  $y$  sind also zwei Ströme (unendliche Wörter über einem endlichen Alphabet), die gemeinsam einer Bedingung  $R(x,y)$  zu genügen haben. Aufgabe der Synthese ist es, ein Verfahren anzugeben, mit dem während der sukzessiven Erzeugung eines beliebigen Stromes  $x$  ein Strom  $y$  (ebenfalls sukzessiv) generiert werden kann, so dass  $R(x,y)$  garantiert ist. In diesem Rahmen sind viele reaktive Systeme modellierbar, wobei in die Beschreibung der Relation  $R$  z.B. temporale Logiken benutzt werden. Die Literatur bietet für eingeschränkte Definitionen der Spezifikationen von  $R$  (insbesondere im Feld der sog. omega-Automaten, der temporalen Logiken und der ereignisdiskreten Systeme) starke algorithmische Resultate zur Lösung des Syntheseproblems.

Dieser Fall der diskreten reaktiven Systeme ist jedoch in der Praxis unzureichend, weil in den typischen Anwendungsbereichen doch unendliche Wertebereiche (Zeit, Temperatur oder andere physikalische Größen, Wahrscheinlichkeiten) berücksichtigt werden müssen. Hier ist eine Verschmelzung der diskreten Modelle mit kontinuierlichen Parametern erforderlich (zeitbehaftete Systeme, hybride Systeme), also eine Integration mit dem Szenarium der Regelungstechnik, in der das Syntheseproblem als Konstruktion von Regelkreisen studiert wird. Zahlreiche Modelle und Ansätze sind für diesen Bereich bereits entwickelt worden, auch in Projekten der DFG (vgl. etwa die Proceedings des DFG-Symposiums „Modelle, Werkzeuge und Infrastrukturen zur Unterstützung von Entwicklungsprozessen“, Wiley-VCH 2003). Dennoch besteht gerade im Hinblick auf das Potenzial von Synthesealgorithmen eine Lücke.

Das Forschungsprogramm des Graduiertenkollegs geht diese Problemstellung aus vier Sichten an, die sich in den Themenfeldern

- Algorithmik für agentenbasierte, probabilistische und hybride Systeme
- Formale Modelle, spieltheoretische Methoden
- Softwaretechnische Einbettung und Modellierungssprachen
- Anwendungen und Demonstratoren

umreißen lassen. Angesichts der Heterogenität dieser Bereiche ist es nicht die primäre Absicht, eine „durchgängige Entwurfsmethodik“ anzustreben - vielmehr sollen, wie die unten angeführten Promotionsthemen zeigen, zahlreiche Beispiele „lokaler“ Integration zu einem insgesamt geschlosseneren Bild beitragen.

Im folgenden wird jeder der vier Themenbereiche mit dem Profil der ihn tragenden Hochschul-lehrer des Kollegs vorgestellt. Der nachfolgende Abschnitt stellt die Promotionsthemen vor (deren Langfassung in Anhang B bereitgestellt wird).

### **3.1 Themenbereiche**

Die Forschungen werden in vier Themenbereiche gegliedert.

A. Algorithmik für agentenbasierte, probabilistische und hybride Systeme  
(primär beteiligt: D. Abel, E. Grädel, J.P. Katoen, S. Kowalewski, B. Vöcking)

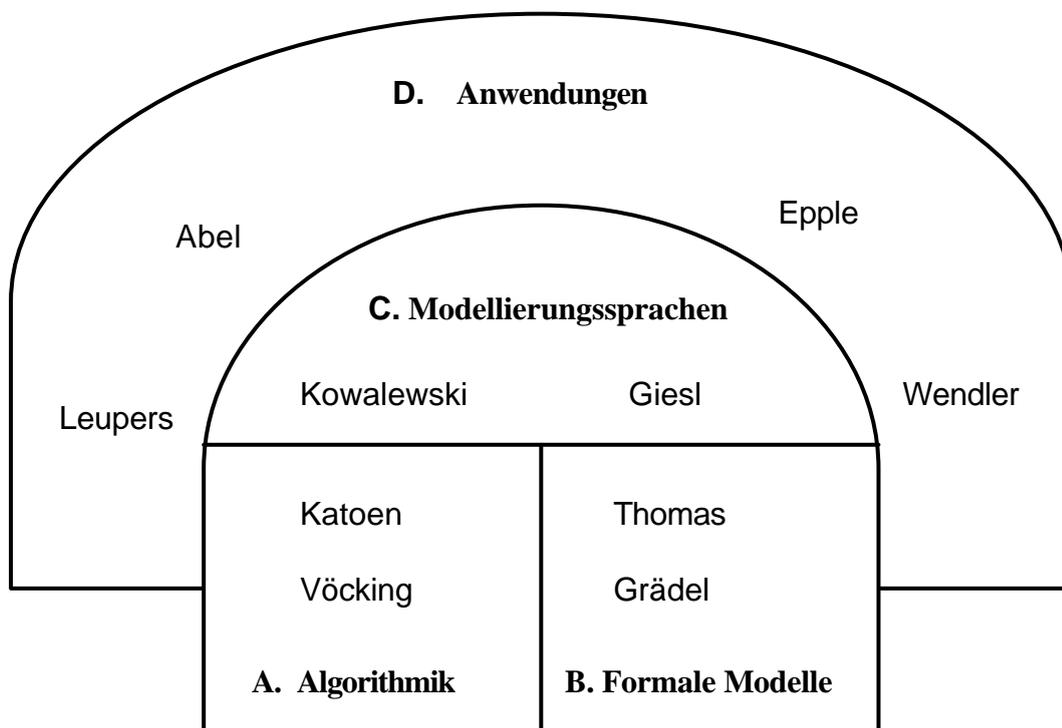
B. Formale Modelle, spieltheoretische Methoden  
(primär beteiligt: J. Giesl, E. Grädel, W. Thomas, B. Vöcking)

C. Softwaretechnische Einbettung und Modellierungssprachen  
(primär beteiligt: D. Abel, U. Epple, J. Giesl, J.P. Katoen, S. Kowalewski, R. Leupers, W. Thomas, E. Wendler )

D. Anwendungen und Demonstratoren  
(primär beteiligt: D. Abel, U. Epple, S. Kowalewski, R. Leupers, E. Wendler)

Jeder Antragsteller arbeitet in jeweils mindestens zwei Themenbereichen. Eine Promotionsarbeit soll von Referenten aus zwei verschiedenen Themenbereichen betreut werden.

Die folgende Figur zeigt einen groben Überblick über die Themenbereiche und zentrale Forschungsgebiete der beteiligten Hochschullehrer. Allerdings sind die Forschungsinteressen jeweils weiter gefasst als in der Figur angedeutet: So überschneiden sich alle Vertreter des Gebiets D auch mit dem Bereich C, ebenso wie das für die Professoren Katoen und Thomas aus den Bereichen A und B der Fall ist.



**A. Algorithmik für agentenbasierte, probabilistische und hybride Systeme**

Die Anforderungen an die Algorithmik für die Synthese von Steuerungen in technischen Systemen spiegeln die unvollständige oder unsichere Kenntnis über das Verhalten des gesteuerten Prozesses sowie eine gemischt diskret-kontinuierliche Dynamik des Gesamtsystems wider. Vorhandene Ansätze zur algorithmischen Synthese gehen von vereinfachten Bedingungen aus (z.B. stark vereinfachende deterministische Prozessmodelle, einfachste stochastische Modelle sowie entweder rein kontinuierliche oder rein diskrete Dynamiken) und sind für realistische Aufgabenstellungen nicht einsetzbar. Forschungsfeld A zielt daher auf eine realistischere Modellierung komplexer Systemmodelle in Form von gegnerischen, stochastischen und hybriden Modellen..

Im Einzelnen ist die Weiterentwicklung und Integration verschiedener algorithmischer Design- und Analysekonzepte erforderlich, z.B. spieltheoretische Ansätze zur agentenbasierten Optimierung [2,3], primal-duale Algorithmen [4], Verifikations- und Abstraktionsalgorithmen für Markovketten [7] und Markoventscheidungsprozesse [8,9], stochastische Automaten, und gegnerische Warteschlangensysteme [1,5]. Die betrachteten Anwendungen reichen von der verteilten Ressourcenverwaltung über Job-Shop-Scheduling bis hin zu Routing in Netzwerken und dynamisches Energiemanagement in eingebettete Systeme. Zu den Lösungskonzepten gehören zum Beispiel einfache und damit zumindest konzeptuell verifizierbare Protokolle, die in Form von Mehragentensystemen oder auch kommunizierenden Automaten umgesetzt werden sollen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Modellierung der Umgebung, in der die Algorithmen eingesetzt werden: die technischen Systeme, die die Eingaben für die Algorithmen generieren, werden durch verschiedene nicht-deterministische, gegnerische und probabilistische (möglicherweise erweitert mit Kostenaspekten [10]) Prozesse beschrieben. Zentrale Forschungsthemen sind:

- die Berechnung approximativer Lösungen für komplexe Optimierungsprobleme
- die effiziente Synthese einfacher verifizierbarer Prozesse
- die Synthese kosten-optimaler Scheduling-Strategien
- die Einbeziehung externer Parameter durch gegnerische und probabilistische Modelle

Besondere Herausforderungen liegen in der algorithmischen Synthese hybrider Systeme und in der rechen-technischen Behandelbarkeit der entsprechenden Systemmodelle. Während die rein diskrete Steuerungssynthese auf endlichen Zustandsräumen abläuft und die rein kontinuierliche Regelungssynthese analytisch behandelbare Klassen von dynamischen Systemen verwendet, verlässt man bei hybriden Systemen schnell dieses gut verstandene Terrain. Aufgabe ist es daher, behandelbare Systemklassen zu identifizieren und durch Weiterentwicklung und Integration verschiedener algorithmischer Konzepte (z.B. Erreichbarkeitsanalyse mit Abstraktion [6]) zu anwendbaren Ansätzen zu kommen.

### *Referenzen*

- [1] A. Borodin, J. Kleinberg, P. Raghavan, M. Sudan, D. Williamson. Adversarial queueing theory. *Journal of the ACM* 48(1), 13-38, 2001.
- [2] A. Czumaj, B. Vöcking. Tight bounds for worst-case equilibria. *Proc. of the 13th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA)*, 413-420, 2002.
- [3] S. Fischer, B. Vöcking. On the Evolution of Selfish Routing. In the *Proc. of the 12th European Symposium on Algorithms (ESA)*, 323-334, 2004.
- [4] N. Garg, J. Könemann. Faster and simpler algorithms for multicommodity flow and other frac-

- tional packing problems. In the Proc. of the 39th IEEE Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS), 1998.
- [5] C. Scheideler, B. Vöcking. From static to dynamic routing: efficient transformations of store-and-forward protocols. *SIAM Journal on Computing*, 30(4), 1126-1155, 2000.
  - [6] C. Baier, J.-P. Katoen, H. Hermanns, B. Haverkort. Simulation for Markov chains. In the Proc. of the Conf. on Concurrency Theory (CONCUR), LNCS 2421, 338-354, 2002.
  - [7] C. Baier, B. Haverkort, H. Hermanns, J.-P. Katoen. Model-checking algorithms for continuous-time Markov chains. *IEEE Trans. on Software Engineering*, 29(6), 524-541, 2003.
  - [8] L. de Alfaro. How to specify and verify the long-run average behaviour of probabilistic systems? In Proc. IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS), 174-183, 1998.
  - [9] C. Baier, B. Haverkort, H. Hermanns, J.-P. Katoen. Efficient computation of time-bounded reachability probabilities in uniform continuous-time Markov decision processes. In Proc. of the Conf. on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems (TACAS), LNCS 2988, 61-74, 2004.
  - [10] S. Andova, H. Hermanns, J.-P. Katoen. Discrete-time rewards model-checked. In Proc. Conf. on Formal Methods for Real-Time Systems (FORMATS), LNCS 2791, 88-104, 2003

## B. Formale Modelle reaktiver Systeme, spieltheoretische Methoden

Ein zentrales Merkmal reaktiver Systeme ist die fortwährende Interaktion mehrerer Systemkomponenten. Im einfachsten Fall unterscheidet man die Komponenten „Steuerprogramm“ und „Umgebung“, und eine Spezifikation legt fest, welche Systemläufe, die durch die beteiligten Komponenten aufgebaut werden, „korrekt“ sind bzw. wie ein solcher Systemlauf bewertet wird. Ein adäquates abstraktes Modell für diese Situation sind die unendlichen Zweipersonenspiele, deren Partien als unendliche Wörter interpretiert werden und deren Gewinnbedingung (für den Spieler „Steuerprogramm“) durch eine Menge  $G$  unendlicher Wörter beschrieben wird. Das Syntheseproblem für solch ein „offenes System“ ist die Frage nach einer Gewinnstrategie für das Steuerungsprogramm, möglichst realisierbar durch eine einfache Vorschrift, die etwa durch einen (nichtterminierenden) endlichen Automaten mit Ausgabe implementierbar sein sollte.

Bereits 1969 haben Büchi und Landweber [3] dieses Problem für den Fall von omega-regulären Bedingungen  $G$  prinzipiell gelöst (ein Fall, der für viele Anwendungen genügt), doch dauerte es Jahrzehnte, bis die Komplexitäten der Konstruktion reduziert und Einsichten in die Möglichkeit praktischer Anwendungen gewonnen waren. Stationen dieser Forschung sind in den Überblicks-artikeln [8, 9] dokumentiert. In den letzten Jahren hat es große Fortschritte gegeben, sowohl zur algorithmischen Lösbarkeit auch über unendlichen Zustandsräumen [10, 4] als auch zur Integration mit ereignis-diskreten Modellen. Einen aktualisierten Überblick bietet der Band [6]. Das inzwischen gut abgestimmte begriffliche Fundament, das durch diese Forschungen entstand, hat jedoch zwei wesentliche Schwächen:

- Die algorithmische Komplexität der Verfahren ist noch so hoch, dass selbst gut erprobte Techniken zur Effizienzsteigerung (wie die symbolische Systemrepräsentation durch OBDD's) noch keine realistischen Fallstudien erlauben.
- Die spieltheoretischen Modelle sind für praktische Anwendungen zu grob, so dass allgemeinere und verfeinerte Versionen von unendlichen Spielen betrachtet werden müssen.

Damit ist die Forschungsaufgabe des Themenbereichs B umrissen, nämlich verfeinerte formale Modelle zu entwickeln, die algorithmisch handhabbar sind, zugleich aber die Repräsentation interessanter Anwendungsszenarien erlauben. Hier kann auf die Forschungen des EU Research Training Network GAMES aufgesetzt werden. Spezifische Forschungsfragen sind z.B.:

- Ausdehnung der algorithmischen Spieltheorie auf Mehragentensysteme und andere verteilte Modelle (wie Petrinetze), als Vorarbeit vgl. [7],
- Ausdrucksstarke Sprachen für die Formulierung von Gewinnbedingungen,
- Optimierungsfragen in der Strategiekonstruktion (Speicherbedarf, Synthese von Strategien für optimale Erfüllung von Realzeitbedingungen [1], etc.) ,
- Strategiekonstruktion in hierarchischen Modellen (vgl. [2])
- Verzahnung von Verifikation und der Synthese („Model-Checking Games“ [5]).

### Referenzen

- [1] R. Alur, M. Bernadsky, and P. Madhusudan. Optimal reachability for weighted timed games, Proc 31<sup>st</sup> ICALP, Springer LNCS 3142 (2004.), 122-131.
- [2] R. Alur, S. La Torre, and P. Madhusudan. Modular strategies for infinite games on recursive game graphs, 15th Conf. Computer-Aided Verification, Springer LNCS 2725 (2003), 67-79.
- [3] J.R. Büchi, L.H. Landweber, Solving sequential conditions by finite-state strategies, Trans. Amer. Math. Soc. 138 (1969), 295-311.
- [4] Th. Cachat, Games on pushdown graphs and extensions, Dissertation, RWTH Aachen 2002.
- [5] E. Grädel, Model-Checking Games in *Proc. WOLLIC 02*, vol. 67 of *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, Elsevier, 2002.
- [6] E. Grädel, W. Thomas, Th. Wilke, Automata, logics, and infinite games, vol. 2500 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2002.
- [7] S. Mohalik, I. Walukiewicz, Distributed games, Proc. FSTTCS'03, Springer LNCS 2914, pp. 338-351,
- [8] W. Thomas, Automata on infinite objects. In J. van Leeuwen, editor, *Handbook of Theoretical Computer Science*, volume B: Formal Models and Semantics, pages 133-192. Elsevier Science, Amsterdam, 1990.
- [9] W. Thomas, Languages, automata, and logic. In G. Rozenberg and A. Salomaa; Eds., *Handbook of Formal Languages*, volume III, pages 389-455. Springer-Verlag 1997.
- [10] I. Walukiewicz, Pushdown processes: games and model checking, *Information and Computation* 164(2001) pp. 234-263

### C. Softwaretechnische Einbettung und Modellierungssprachen

Das Graduiertenkolleg ist strukturiert und ausgerichtet auf eine Verzahnung von grundlegender Algorithmenentwicklung und Methodikverbesserung bei der ingenieurmäßigen Entwicklung technischer Systeme. Das kann nur gelingen, wenn die Schnittstelle zwischen den beiden Bereichen und Disziplinen als eigenständige Aufgabe wahrgenommen wird. Diese Rolle übernimmt der Themenbereich C, der damit

die Brücke zwischen den theoretischen und den anwendungsorientierten Untersuchungen im Kolleg bildet.

Aus dem Bereich der algorithmischen Verifikation von Steuerungssoftware ist bekannt, dass die Anwendung der schon seit vielen Jahren zur Verfügung stehenden Algorithmen in der Praxis im wesentlichen aus zwei Gründen auf sich warten lässt. Beide Gründe sind auch für die algorithmische Synthese relevant und werden die Arbeiten in diesem Themenbereich bestimmen.

Der erste Grund besteht in der mangelnden methodischen Einbettung der Verfahren in den softwaretechnischen Entwicklungsprozess. Bei der algorithmischen Verifikation wurde in der Vergangenheit bei den potenziellen Anwendern in der Industrie teilweise der falsche Eindruck erweckt, dass man am Ende des Entwurfsprozesses den entstandenen Code quasi als Testersatz „en bloc“ verifizieren könnte. Die Komplexität der Algorithmen lässt dies aber nicht zu. Es fehlt offensichtlich eine brauchbare Prozesseinbindung, die zum Beispiel die Anwendung in früheren Phasen und eine entsprechende Strukturierung der Software beinhalten müsste. Für die algorithmische Synthese soll die Fragestellung der softwaretechnischen Einbettung in diesem Kolleg von Anfang an und im Zusammenhang mit der Algorithmenentwicklung betrachtet werden.

Der zweite Grund ist die Diskrepanz zwischen den Modellen, auf denen die Verfahren in der theoretischen Informatik begründet sind (z.B. Transitionssysteme, Temporale Logik), und den im Ingenieurbereich gebräuchlichen Entwicklungssprachen (z.B. Signalflussdiagramme mit kontinuierlichen dynamischen Übertragungsgliedern und Zustandsgraphen). Die semantischen Unterschiede sorgen dafür, dass eine Übersetzung von den letzteren in die ersteren zurzeit nur für sehr eingeschränkte Modellklassen mit geringer praktischer Relevanz möglich ist. Und eine Neumodellierung eines Systementwurfs mit den Modellen der theoretischen Informatik scheidet aus ökonomischen Gründen von vorne herein aus. Es fehlt eine reibungslosere Anbindung der Algorithmik an die Beschreibungsformen aus der Praxis. Für die algorithmische Synthese soll diese im Rahmen dieses Themenbereichs erarbeitet werden. Wesentlich ist, dass dies in einem gemeinsamen Ansatz von Theorie und Anwendung geschieht und nicht – wie sonst – a posteriori eine Übersetzung zwischen den Entwicklungssprachen und den abstrakten Modellen entwickelt werden muss.

Die Herausforderung besteht dabei nicht nur in dem Unterschied zwischen den Modellen aus der Theorie und den in der industriellen Entwicklung eingesetzten Modellen, sondern auch in der Vielfalt auf beiden Seiten. Bei den abstrakten Modellen gibt es zahlreiche Ansätze, die sich in Struktur- und Verhaltenseigenschaften unterscheiden. Beispiele sind Logiken, endliche Automaten oder Transitionssysteme mit asynchroner Kommunikation, synchrone Sprachen oder nebenläufige Modelle wie Petrinetze. Es gibt Möglichkeiten der hierarchischen Strukturierung und Unterschiede in der Quantifizierung von Dynamik, zum Beispiel durch Zeitbedingungen, hybride Systeme oder stochastische Angaben. Zu den meisten dieser Modelle existieren auch Ansätze einer algorithmischen Synthese, z.B. für endliche Automaten [1], formale Sprachen [2], Temporale Logik [3], Petrinetze und Zeit-Petrinetze [4, 5, 6], Timed Automata [7] und Hybrid Automata [8], siehe [9] für einen Überblick. Einen Weg in die Praxis hat noch keiner dieser Ansätze gefunden.

Bei den industriellen Entwicklungssprachen ist die Vielfalt noch größer, da sich hier nur wenige Modelle und Werkzeuge in mehreren Anwendungsgebieten durchgesetzt haben (z.B. Statecharts, Petrinetze,

Teile von UML oder synchrone Sprachen wie Esterel). In den meisten Fällen werden branchenspezifische Beschreibungsformalismen eingesetzt (z.B. Sequential Function Charts und Wirkungspläne in der Automatisierungstechnik oder VHDL und SystemC im Elektronikdesign). Es wird also darauf ankommen, die in einer bestimmte Anwendungsdomäne gebräuchlichen Modelle zu analysieren und eine dazu passende abstrakte Modellform zu finden, auf deren Basis die Synthesgorithmen so entwickelt werden können, dass ein Transfer in die Anwendung möglichst reibungslos vonstatten geht.

In dieser Hinsicht betritt das Graduiertenkolleg Neuland. Ein Beispiel für eine Anbindung von Synthesgorithmen an etablierte Entwicklungssprachen und –werkzeuge ist den Antragstellern nicht bekannt. In den wenigen Fällen, wo über Anwendungen im industriellen Umfeld berichtet wird [z.B. 10, 11], handelt es sich um wissenschaftliche Einzelprojekte, in denen die Forscherseite die Modellierung direkt mit abstrakten Formalismen durchführte.

Die durchgängige Forschungsaufgabe in diesem Feld ist daher die Integration von vier Ebenen:

1. Theoretische Kernkonzepte (wie „Gewinnstrategie“), Basisalgorithmen
2. Formulierung in abstrakten Systemmodellen
3. Umsetzung in höhere Modellierungssprachen, Einbettung in den Entwicklungsprozess
4. Erprobung im Anwendungskontext (Demonstratoren)

Diese Integration erfolgt in beiden Richtungen (1. nach 4. und umgekehrt). In der umgekehrten Richtung werden Anforderungen aus der Erprobung und der Analyse der Modellierungssprachen an die Eigenschaften der abstrakten Modelle und der Algorithmik weitergeleitet.

Allgemeines Ziel ist es, die verfügbare abstrakte Algorithmik zu verstärken und möglichst bruchlos in die Anwendungen zu transportieren. Hier liegt erheblicher Forschungsbedarf und ein großes bisher nicht ausgeschöpftes Potential. Die Forschungsarbeiten in diesem zentralen Feld sind hier nur zu leisten in Kooperation zwischen Forschern mit Theorie-, System- und Anwendungsorientierung.

### Referenzen

- [1] P.J. Ramadge, W.M. Wonham: The control of discrete event systems. *Proc. of the IEEE*, Vol. 77, No. 1, pp. 81-89, January 1989.
- [2] P.J. Ramadge, W.M. Wonham: Supervisory control of a class of discrete event processes. *SIAM J. Contr. Optimization*, Vol. 25, No. 5, pp. 206-230, January 1987.
- [3] J.G. Thistle, W.M. Wonham: Control problems in a temporal logic framework. *Int. Journal Contr.*, Vol 44., No. 4, pp. 943-976, 1986.
- [4] L.E. Holloway, B.H. Krogh: Synthesis of Feedback Control Logic for a Class of Controlled Petri Nets. *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 35, No. 5, pp. 514-523, May 1990.
- [5] A.S. Sathaye, B.H. Krogh: Synthesis of Real-Time Supervisors for Controlled Time Petri Nets. *Proc. 32nd IEEE Conf. on Decision and Control*, San Antonio, Texas, USA. 1993.
- [6] L.E. Holloway, B.H. Krogh, A. Giua: A survey of Petri net methods for controlled discrete event systems. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, Vol. 7, pp. 151-190, Kluwer, 1997.

- [7] E. Asarin, O. Maler, A. Pnueli, J. Sifakis: Controller Synthesis for Timed Automata. *Proc. IFAC Symposium on System Structure and Control*. pp. 469-474, Elsevier, 1998.
- [8] H. Wong-Toi: The Synthesis of Controllers for Linear Hybrid Automata. *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*, December 1997.
- [9] L.E. Pinzon, H.-M. Hanisch, M.A. Jafari, T. Boucher: A Comparative Study of Synthesis Methods for Discrete Event Controllers. *Formal Methods in System Design*, Volume 15. Issue 2, pages 123-167. Kluwer Academic Publishers, September 1999
- [10] B.A. Brandin, F.E. Charbonnier: The supervisory control of the automated manufacturing system of the AIP. *Proc. Rensselaer's 4<sup>th</sup> Int. Conf. CIMAT*, Troy, pp. 319-324, IEEE Computer Society Press, 1994.
- [11] M. Seidl, B. Plannerer: Systematic controller design to drive high-load call centers. to appear in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005.

## **D. Anwendungen und Demonstratoren**

Im Graduiertenkolleg sind vier unterschiedliche, aber für die zentralen Fragestellungen einschlägige Anwendungsbereiche vertreten:

- D1. Entwurfswerkzeuge für Eingebettete Systeme
- D2. Prozessleittechnik
- D3. Steuerungs- und Regelungstechnik, Automatisierungstechnik
- D4. Eisenbahnleit- und sicherungstechnik

Als Demonstrator soll neben einer eisenbahnsicherungstechnischen Versuchsanlage (Prof. Wendler) insbesondere ein kontinuierlich/ereignisdiskreter Modellprozess eingesetzt werden (genehmigter HBFG-Antrag von Prof. Abel). Auf diese produktions- und verfahrenstechnische Anlage wird in unten Abschnitt D3 sowie im Anhang C. genauer eingegangen.

### **D.1 Entwurfswerkzeuge für Eingebettete Systeme**

#### *Anwendungsspezifische Prozessorarchitekturen*

Im Bereich des Hardware-Entwurfs von Multimedia/Consumer-Elektronik-Geräten sowie Systemen der Telekommunikation vollzieht sich z.Zt ein Wandel in der Chip-Architektur. Während früher kundenspezifische Entwürfe (ASICs) üblich waren, werden heute vielfach anwendungsspezifische programmierbare Prozessoren (ASIPs) eingesetzt. ASIPs weisen Architekturen und Befehlssätze auf, welche speziell auf die Bedürfnisse eines bestimmten Anwendungsbereiches abgestimmt sind. Wie in der folgenden Abbildung verdeutlicht, ermöglichen ASIPs einen optimalen Kompromiss zwischen Flexibilität und Effizienz.

Die heute vorherrschende Methodik zum ASIP-Entwurf ist die Architektur-Exploration. Ausgehend von einer Spezifikation der Applikation (z.B. als C/C++-Quellcode) und einer initialen Prozessorarchitektur wird der ASIP Schritt für Schritt auf die gegebene Anwendung hin optimiert, u.a. durch Hinzufü-

gen spezieller Maschinenbefehle und Funktionseinheiten sowie Feinabstimmung der Mikroarchitektur. Obwohl inzwischen eine Reihe von Software-Werkzeugen zur Unterstützung des ASIP-Entwurfs existiert, ist die Methodik z.Zt. größtenteils immer noch „trial-and-error“-basiert: Die Ausführung der Applikation auf der jeweils aktuellen ASIP-Konfiguration wird modellbasiert simuliert, und mittels Profiling werden Optimierungsmöglichkeiten analysiert. Die Auswahl geeigneter Architekturoptimierungen auf Basis der Profiling-Resultate ist jedoch ein zeitaufwendiger manueller Prozess. Aufgrund gegebener enger Randbedingungen (z.B. Flächen- oder Energieverbrauch) und unvorhersagbarer Seiteneffekte einzelner Architekturmodifikationen ist es teilweise schwierig, Konvergenz zu erreichen. Es wird daher als notwendig erachtet, vom analysebasierten, manuellen ASIP-Entwurf auf einen automatisierten, synthesebasierten Ansatz zu wechseln. Insbesondere betrifft dies die Auswahl von komplexen Spezial-Maschineninstruktionen, welche sich aus der Verkettung einer Reihe von Einzeloperationen ergeben. Solche komplexen Instruktionen können für bestimmte Anwendungen (z.B. Kryptographie-Algorithmen in der Netzwerk-Protokollverarbeitung) einen erheblichen Speedup bewirken. Der Suchraum ist jedoch so groß, dass die manuelle Bestimmung des optimalen Befehlssatzes nicht in vernünftiger Zeit zu bewältigen ist. Ein neuer Forschungszeitweig im Bereich Electronic Design Automation beschäftigt sich daher mit der automatischen Optimierung und Synthese von ASIP-Befehlssätzen unter gegebenen Randbedingungen wie Kosten, max. Anzahl von Befehlen oder max. I/O-Anzahl eines Befehls. Es ist zu erwarten, dass hierbei ein Rückgriff auf bewährte Optimierungsverfahren wie Integer Linear Programming oder Genetische Algorithmen der vielversprechendste Ansatz ist.

### *Multiprozessor-Systeme*

Eine weitere Neuerung in der Chip-Architektur wird durch die Steigerung der Silizium-Integrationsdichte (gemäß „Moore's Law“) und die steigende Komplexität zukünftiger Embedded-Anwendungen (z.B. Multimedia-Terminals mit Schnittstellen für verschiedene Funkstandards) vorgegeben. Zum Erreichen der notwendigen hohen Rechenleistung und Energieeffizienz (speziell für mobile Systeme) sind monolithische Prozessorsysteme, wie sie im Desktop-Computer-Bereich vorherrschend sind, ungeeignet. Bereits in heutigen Handys sind zumindest zwei Prozessoren (getrennt für Kontrolle und Signalverarbeitung) vorhanden. Zukünftig werden heterogene Systeme (Multiprocessor System-on-Chip, MPSoC, siehe Abb.) mit Dutzenden von Prozessoren entworfen werden.

Durch diesen Trend stellen sich zahlreiche neue Forschungsprobleme. Da die optimale Zuordnung von Systemkomponenten zu den einzelnen Bausteinen (Hardware-Realisierung auf ASIC oder Software-Realisierung auf Prozessor/ASIP) zu Anfang des Entwurfsprozesses i.a. noch nicht bekannt ist, sind neue Spezifikationssprachen (wie z.B. SystemC) notwendig, welche eine effiziente gemeinsame HW/SW-Modellierung und –Simulation zur Bewertung möglicher Architekturen erlauben. Des Weiteren steht beim MPSoC-Entwurf die Wahl einer optimalen Kommunikationsarchitektur immer mehr im Vordergrund. Zur Zeit finden Forschungsarbeiten mit dem Ziel statt, anwendungsspezifische Netzwerk-Architekturen (Network-on-Chip, NoC) zu entwerfen und im MPSoC zu integrieren. Ein weiteres Problem ist die Steigerung der Simulationgeschwindigkeit, da die Korrektheit und Performance eines MPSoC vor der Fertigung zu validieren sind. Hierzu werden neue Modellierungsstile (z.B. Transaction-Level Modeling, TLM) entwickelt und standardisiert, welche einen flexiblen Austausch zwischen Simulationgeschwindigkeit und –genauigkeit gestatten. Ähnlich zum o.g. ASIP-Entwurf beruht der MPSoC-Entwurf heute auf Simulation, Profiling/Analyse und manueller Abstimmung durch den Entwerfer. Auf

grund der Zunahme der Komplexität bei gleichzeitig immer kürzer werdender time-to-market ist eine weitergehende Automatisierung durch neue Synthesewerkzeuge dringend notwendig. Dies betrifft bspw. die optimale Zuordnung von Prozessen zu MPSoC-Komponenten unter Beachtung von Kostenrestriktionen, Abhängigkeiten und Echtzeitanforderungen.

### Referenzen

- [1] A. Hoffmann, H. Meyr, R. Leupers: Architecture Exploration for Embedded Processors with LISA, Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-7338-0, 2002
- [2] A. Oraioğlu, A. Veidenbaum: Application Specific Microprocessors (Guest Editors' Introduction), IEEE Design & Test Magazine, Jan/Feb 2003
- [3] K. Atasu, L. Pozzi, P. Ienne: Automatic Application-Specific Instruction-Set Extensions under Microarchitectural Constraints, Design Automation Conference, 2003
- [4] H. Scharwaechter, D. Kammler, A. Wieferink et al.: ASIP Architecture Exploration for Efficient IPsec Encryption, Int. Workshop on Software and Compilers for Embedded Systems (SCOPEs), 2004
- [5] K. Keutzer, S. Malik, A. R. Newton, J. Rabaey and A. Sangiovanni-Vincentelli. System Level Design: Orthogonalization of Concerns and Platform-Based Design. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 19(12), December 2000
- [6] Open SystemC Initiative (OSCI): [www.systemc.org](http://www.systemc.org)
- [7] J. Henkel: Closing the SoC Design Gap, IEEE Computer, Sep 2003
- [8] B. Vanthournout: Transactions raise the bar for faster verification, IEE Electronics Systems and Software, Feb/Mar 2004
- [9] R. Leupers, M. Dörper, A. Wieferink: Chips mit System, c't Magazin für Computertechnik, Nr. 20, Heise Verlag, Sep 2004
- [10] T. Kempf, M. Doerper, R. Leupers, G. Ascheid, H. Meyr, T. Kogel, B. Vanthournout: A Modular Simulation Framework for Spatial and Temporal Task Mapping onto Multi-Processor SoC Platforms, Design Automation & Test in Europe (DATE), Munich (Germany), Mar 2005

## D2. Prozessleittechnik

Kernaufgabe der Prozessleittechnik ist die Führung des verfahrenstechnischen Prozesses gemäß der produktionstechnischen Aufgabenstellung. Die dafür erforderliche Führungsfunktionalität wird in der Prozessleittechnik typischerweise als ein Netzwerk aus einzelnen Steuer- und Regelfunktionen realisiert. Diese werden für jede Anlage und jeden Prozess entworfen, implementiert und im Betrieb zur Ausführung gebracht. Im Fokus der leittechnischen Entwicklung stehen zur Zeit:

- die Integration der digitalen Feldgeräte mit ihrer steigenden Funktionalität
- die Durchdringung der überlagerten Systeme der Betriebsleitebene mit den Systemdiensten der Prozessleittechnik
- die Weiterentwicklung der regelungs- und steuerungstechnischen Funktionen zu qualitativ hochwertigen, robusten selbstkonfigurierenden Komponenten,
- die Konzeptionierung von Software-Serviceagenten zur flexiblen Unterstützung des Betriebes bei der Durchführung der umfangreichen Prüf- und Diagnoseaufgaben
- die Erfassung der Eigenschaften sowohl der Hardware- als auch der Softwarekomponente

- in Produktdatensystemen zur elektronischen Verwaltung und zum elektronischen Handel und,
- die Formalisierung und Automatisierung des Entwurfs- und Realisierungsprozesses selbst.

Aus diesen Zielsetzungen lassen sich eine Reihe von Anforderungen an die Weiterentwicklung der leittechnischen Methoden und Konzepte ableiten. Diese beziehen sich einmal auf die Weiterentwicklung der Art und Weise wie leittechnische Software selbst organisiert wird. So müssen z.B. die Konzepte zur Integration der Baustein- und der Ablaufbeschreibung (Continuous Function Charts (CFC) bzw. Sequential Function Charts (SFC)) weiter vorangetrieben werden. Dies erfordert sowohl eine Erweiterung der Kommunikations-möglichkeiten, z.B. die Einführung von transaktionsgesteuerten Übertragungen, als auch die Einführung von modernen Strukturierungsmethoden innerhalb der Funktionseinheiten wie z.B. eine Erweiterung des Blocksystems zu einem allgemeinen Komponentenkonzept. Neben solchen Anforderungen an die Weiterentwicklung der Strukturen der Automatisierungssoftware selbst ergeben sich aus den oben genannten Zielsetzungen jedoch auch Anforderungen an die Art und Weise der Verwaltung der leittechnischen Systeme und ihrer Handhabungsprozesse.

### *Beschreibung von Handhabungsprozessen*

Um Handhabungsprozesse transparent und nachvollziehbar zu machen, müssen sie in ihrem Ablauf und mit ihrem Informationsfluss explizit beschrieben werden. Dazu bedarf es eines formalen Rahmens. Bei Handhabungsprozessen kann man zwei unterschiedliche Arten der Ausführungsvorgabe unterscheiden: Ablauforientierte Vorgaben geben dem Ausführenden Schritt für Schritt vor was zu tun ist. Zur Beschreibung solcher Strukturen stehen in der Leittechnik eine Reihe von Ansätzen zur Verfügung so z.B. Petri-Netze, Sequential Function Charts, Zustandsautomaten oder das Phasenmodell der Produktion. Ablauforientierte Vorgaben sind typisch für die eigentlichen Produktionsprozesse (Rezeptabläufe) oder für die Ausführung von Instandhaltungsmaßnahmen. Neben diesen ablauforientierten Vorgaben gibt es jedoch auch die zielorientierte Vorgabe. Bei dieser Vorgabe wird der Prozess durch ein vorgegebenes Ziel, einzuhaltende Randbedingungen und einen Satz anwendbarer Regeln getrieben. Der Weg wie dieses Ziel zu erreichen ist bleibt offen und wird erst in der Ausführung dynamisch festgelegt. Zielorientierte Vorgaben sind typisch für Forschung, Entwicklung, Engineering und komplexe Diagnoseprozesse. Zur Formulierung solcher Prozessumgebungen bestehen in der Leittechnik heute noch deutliche methodische Defizite. Zur Zeit sind keine Methoden eingeführt wie Ziele, Regeln oder einzuhaltende Randbedingungen formuliert und in der leittechnischen Systemumgebung operativ umgesetzt werden könnten. Natürlich besteht immer die Möglichkeit zielorientierte Prozessbeschreibungen auf eine ablauforientierte Prozessbeschreibung abzubilden, dies wird jedoch den Aufgabenstellungen in der Praxis nicht gerecht.

### *Automation der Automation*

In der Leittechnik sind heute viele Ausführungsvorgaben für Handhabungsprozesse nicht explizit beschrieben sondern gehören zum Erfahrungsschatz des Mitarbeiters. Dies gilt insbesondere für zielorientierte Ausführungsvorgaben. Gelingt es, diese impliziten Ausführungsvorgaben nicht nur zu erfassen und explizit zu beschreiben, sondern auch die in ihr steckende Information strukturell darzustellen und operativ als Strukturwissen maschinenlesbar verfügbar zu machen, dann erscheint es durchaus möglich einfache informationsverarbeitende Prozesse (mechanische Prozesse sollen hier nicht betrachtet werden) durch Automaten ausführen zu lassen. So kann z.B. die Erstellung von Automatisierungssoftware durch

einen zumindest partiell automatisierten Engineeringprozess erfolgen. Aus dieser Sicht wird die Bedeutung der Behebung der methodischen Defizite bei der Formulierung von maschinenles- und -interpretierbaren Regeln und Randbedingungen in der Leittechnik deutlich.

Insgesamt kann man feststellen, dass die sogenannten "Handhabungsprozesse" sowohl aus Kosten- als aus Qualitätsgründen immer mehr in den Blickpunkt des Interesses rücken. Dies gilt insbesondere für die Engineeringprozesse. Man beachte, dass diese Engineeringprozesse in Zukunft nicht mit der Inbetriebnahme der Anlage abgeschlossen sein werden. Sowohl in der Prozess- als auch in der Betriebsleitebene werden im laufenden Betrieb ständig umfangreiche Nachrüstungen stattfinden, z.B. durch Hinzufügen von Diagnose- und Auswertefunktionen oder durch den laufenden Ersatz von veralteten Bibliotheksversionen. In bestimmten strategischen Überlegungen geht man heute sogar von der Situation aus, dass eine Anlage zunächst nur mit minimalster Automatisierungsfunktionalität in Betrieb genommen wird und erst in der Betriebsphase eine bedarfsgerechte Nachrüstung mit gehobenen Funktionen erfolgt. Die Sicherstellung von qualitativ hochwertigen, flexiblen, nachvollziehbaren und kostengünstigen Entwurfs- und Implementierungsprozessen ist für die Leittechnik ein entscheidender Beitrag zum wirtschaftlichen Erfolg der Produktionsbetriebe. Die Verfahren der algorithmischen Synthese werden für diese Entwicklung wichtige methodische Grundlagen bereitstellen.

### *Referenzen*

- [1] M. Polke: Prozessleittechnik. Oldenbourg Verlag. 1994
- [2] M. Felleisen: Prozessleittechnik für die Verfahrensindustrie. Oldenbourg Verlag 2001
- [3] S. Engell, G. Frehse, E. Schnieder : Modelling, Analysis, and Design of Hybrid Systems. Springer Verlag. 2002.
- [4] U. Enste : Generische Entwurfsmuster in der Funktionsbausteintechnik und deren Anwendung in der operativen Prozessführung. VDI-Verlag, Fortschrittsberichte, VDI-Reihe 8, Nr. 884. 2001.
- [5] D. Meyer: Objektverwaltungskonzept für die operative Prozessleittechnik. VDI-Verlag, Fortschrittsberichte, VDI-Reihe 8, Nr. 940. 2002.
- [6] E. Schnieder: Prozessinformatik. Verlag Vieweg. 1993.
- [7] R. Lauber, P. Göhner: Prozessautomatisierung. Springer Verlag, Berlin. 1999.
- [8] H. Albrecht: On Meta-Modeling for Communication in Operational Process Control Engineering. VDI-Verlag, Fortschrittsberichte, VDI-Reihe 8, Nr. 975. 2003
- [9] J. Lunze: Automatisierungstechnik. Oldenbourg Verlag München Wien. 2003.
- [10] U. Epple: Agentensysteme in der Leittechnik. atp - Automatisierungstechnische Praxis 42 (8) 2000.
- [11] U. Epple: Austausch von Anlagenplanungsdaten auf der Grundlage von Metamodellen. atp - Automatisierungstechnische Praxis 45 (7) 2003
- [12] U. Epple: Offene Systeme - Anspruch, Wirklichkeit und Trends. etz - Elektrotechnik und Automation, 120(19):20-22, 1999.
- [13] U. Epple: Automatisierte Erstellung von Diagnoseinformationen. stahl und eisen (11) 2003.

### **D3. Steuerungs- und Regelungstechnik, Automatisierungstechnik**

Komplexe technische Systeme sind häufig durch ein Zusammenwirken einer Vielzahl kontinuierlich und ereignisdiskret wirkender Komponenten geprägt, unabhängig davon, ob es sich bei den komplexen Systemen um hoch automatisierte Einzelobjekte (wie z.B. ein moderner PKW) oder um räumlich ausgedehnte Anlagen (wie z.B. ein verfahrenstechnischer Produktionsprozess) handelt. Üblicherweise werden heute Entwurfsverfahren für die erforderlichen

- Steuerungen der ereignisdiskreten Komponenten und
- Regelungen der kontinuierlichen Komponenten

getrennt, d.h. nacheinander durchgeführt, ohne die dabei auftretenden Rück- und Wechselwirkungen hinreichend zu beachten. Ziel der Forschung im Bereich der Automatisierungstechnik ist daher zunehmend die integrierte Betrachtung der Steuerung und Regelung beim Systementwurf und somit eine Optimierung des dynamischen Gesamtverhaltens.

Im Bereich der Entwurfsmethoden sind dazu Weiterentwicklungen erforderlich, welche

- die Dekomposition des Gesamtprozesses,
- die Behandlung der Schnittstellen zwischen den Teilsystemen und
- den Entwurf verteilter Steuerungs- und Regelungssysteme

ganzheitlich betrachten. Es wird deutlich, dass die klassische, in den Grundzügen für lineares Übertragungsverhalten und einschleifige Regelkreisstrukturen ausgelegte und auf der Beschreibung mit Differentialgleichungen aufbauende Entwurfsmethodik der Regelungstechnik an ihre Grenzen stößt. Die Eigenart der diskreten Systemkomponenten, die die Verwendung von Automatenmodellen o.ä. verlangen, aber auch die Kommunikationsaufgaben zwischen den unterschiedlich gearteten Systemkomponenten sowie innerhalb des verteilten Steuerungs- und Regelungssystems erfordern eine enge Verbindung klassischer Entwurfsmethoden mit einschlägigen Disziplinen der Informatik und Informationstechnik.

In Hinblick auf das übergeordnet zu verfolgende Ziel, den optimalen Betrieb des Gesamtsystems sicherzustellen, welches von dem Zusammenspiel der einzelnen Komponenten abhängt, gewinnen Begriffe wie z.B. Ausfallstrategien, agentenbasierte Teilsteuerungen, Struktur-umschaltungen, lernende Systeme und Validierung eines sicheren Betriebs an Bedeutung.

Eine Modellbildung für solche Systeme ermöglicht z.B. das Petri-Netz-Zustandsraummodell (PNZRM) oder auch die Darstellung nach IEC 61499. Das PNZRM erlaubt auch eine Untersuchung der hybriden Systemdynamik, da es Algorithmen zur Analyse zugänglich ist. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms KONDISK wurde ein Modell entworfen und es wurden Verfahren und Werkzeuge entwickelt, um PNZRM-Systeme mit diskreten Steuerungen graphentheoretisch zu beschreiben und Korrekturen am steuernden System zu synthetisieren. Darauf aufbauend wird die Synthese von Supervisoren für gemischt kontinuierlich-ereignisdiskrete Prozesse untersucht, die von der Steuerung nicht in allen Einzelheiten beeinflusst werden können, wobei Teilprozesse eventuell ohne Rückmeldung an die Steuerung ausfallen. Treten diese Erschwernisse erst während des Betriebs durch Ausfall von Aktoren oder Sensoren auf, ist eine sukzessive Umkonfiguration der Automatisierungseinrichtung vonnöten (Selbstkonfiguration). Insbesondere der genaue Vorgang einer solchen Rekonfigura-

tion ist hierbei von Interesse.

Viele zu untersuchende Verfahren sind speziell für gekoppelte Mehrgrößenprozesse geeignet, die in der industriellen Anwendung ein hohes Optimierungspotenzial beinhalten. Zwar lassen sich solche Prozesse auch durch aufwändige Simulationen abbilden und die entwickelten Verfahren untersuchen, doch ergeben sich durch die Umsetzung in die praktische Anwendung Rahmenbedingungen wie Echtzeitforderung und Prozesskommunikation, die wichtige zu beachtende Randbedingungen und damit weitergehende Herausforderungen darstellen.

Bei den zuvor skizzierten Vorhaben soll eine Überprüfung der erarbeiteten Verfahren an einem realistischen Prozess erfolgen bzw. sollen an diesem realitätsnahe Anforderungen für die Entwurfsaufgabe erkannt werden. Die über HFBG zu beschaffende Modellanlage bildet zu diesem Zweck realitätsnahe Aufgaben der Automatisierungstechnik in den Anwendungsgebieten Produktions- und Prozesstechnik im vorgenannten Sinn durch Einsatz industrieüblicher Komponenten und einer ebenfalls in Industriestandard ausgeführten Leittechnik ab. Für die Stipendiaten steht somit ein realistischer, anspruchsvoller und im Besonderen auch modularer hybrider Prozess zur Verfügung, der von mehreren Automatisierungsggeräten im Verbund einer Leitstruktur oder unabhängig voneinander beeinflusst werden kann.

### *Referenzen*

1. Litz, L., Lunze, J.: Grundausbildung in der Automatisierungstechnik. at – Automa-tisierungstechnik 52 (2004) 2, S. 69-74, Oldenbourg Wissenschaftsverlag München
2. Schloßer, A.; Bollig, A., Abel, D.: Rapid Control Prototyping in der Lehre. at - Automatisierungstechnik, at - Automatisierungstechnik 52 (2004) 2, S. 75-80, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
3. Abel, D., Schmid, Chr. (Gast-Hrsg.), et.al.: Ausbildung in der Automatisierungstechnik, Schwerpunkttheft der at - Automatisierungstechnik 52 (2004) 2, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
4. Abel, D., Schmid, Chr. (Gast-Hrsg.), et.al.: Internet-basierte Ausbildung in der Automatisierungstechnik, Schwerpunkttheft der at - Automatisierungstechnik 51 (2003) 11, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
5. Allgöwer, F., Engell, S., Piwonka, F., Scherer, C., Schlacher, K., Schuler, H.: Methodische Perspektiven in der Automatisierungstechnik. at - Automatisierungstechnik 49 (2001) 1, S. 7-9, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
6. Kowalewski, S., Neumann, B., Reißerweber, B., Schmidt, G., Terwiesch, P.: Automatisierungstechnik im Umfeld der Informatik und anderer Nachbardisziplinen. at - Automatisierungstechnik 49 (2001) 1, S. 10-12, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
7. Abel, D., Bretthauer, G., Epple, U., Kiendl, H., Lunze, J.: Sind die Grundlagen der Regelungstechnik noch zeitgemäß?. at - Automatisierungstechnik 49 (2001) 1, S. 13-14, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
8. Lunze, J.: Automatisierungstechnik. Oldenbourg Verlag, München 2003.
9. Litz, L.: Grundlagen der Automatisierungstechnik, Oldenbourg Verlag, München 2004.
10. Zimmermann, A., Freiheit, J., Hommel, G.: Fertigungssysteme Modellieren, Bewerten und Steuern mit TimeNETMS. Entwicklung und Betrieb komplexer Automatisierungssysteme (EKA'99), Braunschweig, 1999.

11. Müller, Ch.; Rake, H.: Modellbildung und Analyse hybrider Systeme mit Petri-Netzen und geschalteten Differentialgleichungen. Entwicklung und Betrieb komplexer Automatisierungssysteme (EKA '99), Braunschweig, 1999.
12. Orth, Ph., Abel, D.: Hybrid System Analysis Using a Parameterised Evolution Graph . IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems, June 16-18, 2003, Saint-Malo, Brittany, France; Tagungsband (Preprints), S. Engell, H. Guéguen, J. Zaytoon (Hrsg.), S. 343-348.
13. Müller, C., Orth, P., Abel, D., and Rake, H.: Synthesis of a discrete control for hybrid systems by means of a petri-net-state-model. In Engell, S., Frehse, G., and Schnieder, E., editors, Modelling, Analysis, and Design of Hybrid Systems, Lecture Notes in Control and Inf. Sc. 279, ISBN 3-540-43812-2, S. 295-310. Springer, Berlin.

#### **D.4 Eisenbahnleit- und sicherungstechnik**

Die Besonderheiten bei der Abstandshaltung von Eisenbahnen erlauben es, sowohl bei der Kapazitätsberechnung von Bahnanlagen, als auch bei der Risikoermittlung eisenbahnsicherungstechnischer Einrichtungen ereignisdiskrete Modelle einzusetzen. Seit vielen Jahren kommen derartige Modelle im Zusammenspiel mit algorithmischen Methoden bei der Kapazitäts-Analyse, seit kurzem auch verstärkt bei der Sicherheitsanalyse von Bahnsystemen bzw. Teilsystemen zum Einsatz. Wenngleich auch die Anwendung der Methoden der algorithmischen Analyse des Bahnsystems für betriebliche und sicherungstechnische Fragestellungen durchaus erweiterbar ist, liegen bislang faktisch noch keinerlei Erfahrungen zur Anwendung der algorithmischen Synthese für den Anwendungsbereich der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik vor. Ziel der beiden anwendungsorientierten Themen des GK auf dem Gebiet der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik soll es daher sein, basierend auf den vorliegenden Erfahrungen der algorithmischen Analyse auch Entwurfsprozesse, die mit Optimierungszielen verbunden sind mit Hilfe von Methoden der algorithmischen Synthese zu unterstützen.

Auf dem Gebiet der Eisenbahnbetriebswissenschaft besteht im Rahmen des Graduiertenkollegs das Ziel, die bisher getrennt betrachteten Gebiete der Kapazitätsberechnung großer Knoten bzw. Teilnetze mit Hilfe stochastischer Modelle einerseits und der Fahrplanoptimierung andererseits miteinander zu verknüpfen. Die derzeit verwendeten Verfahren zur Fahrplanoptimierung vernachlässigen gerade in den Eisenbahnknoten die vorhandenen kapazitiven Restriktionen. Demgegenüber unterstellen die Modelle zur Kapazitätsberechnung bei hohen Belegungsgraden meist nicht-optimale Trassenallokationsstrategien.

Auf dem Gebiet der Eisenbahnsicherungstechnik, welches auf der Methodenebene eng mit dem Gebiet der Eisenbahnbetriebswissenschaft verknüpft werden kann, besteht das Ziel, eine Kostenminimierung beim Entwurf signaltechnisch sicherer Systeme zu unterstützen, wenn als Risikoakzeptanzkriterium das Risiko eines Referenzsystems (meist des bereits operablen Ist-Systems) verwendet wird. Für diese Aufgabe werden die Stellwerke in der Eisenbahntechnischen Lehr- und Versuchsanlage (ELVA) des Verkehrswissenschaftlichen Instituts als Untersuchungsobjekte zur Verfügung stehen.

#### *Referenzen*

- [1] Bär, M., Fischer, K., Hertel, G.: Leistungsfähigkeit, Qualität, Zuverlässigkeit. - Transpress,

- Berlin (1988).
- [2] Fischer, K., Hertel, G.: Bedienungsprozesse im Transportwesen. - Transpress Berlin (1990).
  - [3] Braband, J.: "Erfahrungen mit Risikoanalysen in der Eisenbahnsignaltechnik." – In: Eisenbahntechnische Rundschau 51 (2002) 9, S. 575-584.
  - [4] Braband, J.: Risikoakzeptanzkriterien und -bewertungsmethoden. Ein systematischer Vergleich.- In: Signal+Draht 96(2004)4, S. 6-9.
  - [5] Meyer zu Hörste, M.: Methodische Analyse und generische Modellbildung von Eisenbahnleit- und -sicherungssystemen. - VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 571, Düsseldorf (2004).
  - [6] Wendler, E.: "Stand der Methoden zur Leistungsfähigkeitsberechnung großer Eisenbahnknoten." – In: Eisenbahntechnische Rundschau 51 (2002), 7+8, S. 418-424.

### **3.2 Promotionsprojekte**

Es werden im folgenden 20 beispielhafte Promotionsthemen aufgeführt, wobei jeder beteiligte Hochschullehrer zwei Themen als Erstbetreuer vertritt. Die Themen sind nach Zuordnung zu den Themenbereichen (A – D) nummeriert. Hierbei gehören zu den Themenbereichen A, B, C jeweils zwei Hochschullehrer, zum Themenbereich D vier Hochschullehrer; entsprechend gibt es Themen A1 – A4, B1 – B4, C1 – C4 und D1 - D8. Bei jedem Thema ist als weiterer Betreuer ein Vertreter aus einem anderen Themenbereich vorgesehen; besonders wurde darauf geachtet, dass der Bereich D mit den Bereichen A – C in diesem Sinne gut vernetzt ist.

Die Themenzahl ist höher als die Anzahl der beantragten Stipendien (15), um den Stipendiaten nach Aufnahme in das Kolleg Freiheit zur Auswahl eines geeigneten Themas zu geben. Im Laufe der Kolleglaufzeit werden neue Themen konzipiert; neue Themen werden auch in Zuge der Kooperation zwischen den beteiligten Hochschullehrern entwickelt.

Im Antragstext werden jeweils nur kurze Einführungen in die Themenstellung gegeben; volle Themenbeschreibungen folgen in Anhang B.

#### **A1. Agentenbasierte Ressourcenverwaltung**

*(Betreuer: B. Vöcking, R. Leupers)*

Gegenstand dieses Projektes sind der Entwurf und die Analyse von interagierenden Agentenprozessen für die effiziente Zuteilung von Ressourcen zu Tasks. Die Tasks werden dabei durch Agenten verwaltet, die ausgehend von einer beliebigen (möglicherweise partiell unzulässigen) Allokation, durch lokale Verbesserungsschritte zu einer besseren Ressourcenverteilung gelangen. Durch den agentenbasierten Ansatz soll eine adaptive Ressourcenverwaltung ermöglicht werden, die sich dynamisch an sich verändernde Randbedingungen - wie etwa dem Ausfall von Ressourcen oder dem Hinzukommen neuer Tasks - anpassen kann. Einerseits sollen die Agentenprozesse durch Protokolle beschrieben werden, die einfach genug sind, um zumindest konzeptuell verifiziert und synthetisiert werden zu können. Andererseits soll die Interaktion dieser einfachen Agentenprotokolle dennoch Lösungen für anspruchsvolle Ressourcenallokationsprobleme generieren und dabei beweisbare, globale Effizienzkriterien erfüllen.

#### **A2. Synthetisierbare Komponenten für Kommunikations- und Transportnetzwerke**

*(Betreuer: B. Vöcking, E. Wendler)*

Große Kommunikations- und Transportnetzwerke entstehen aus der Synthese einzelner Netzwerkknoten, die miteinander verbunden werden. Der klassische Ansatz zur theoretischen Analyse derartiger Netzwerke geht weitgehend von stochastischen Verkehrsmustern aus. Das wohl am weitesten verbreitete Modell sind sogenannte Jackson-Netzwerke, die aus M/M/1-Warteschlangen bestehen. Dieses Modell geht von Verkehrsströmen mit Poisson- bzw Markov-Ankunftsrate für Datenpakete bzw. Transportgüter aus. Neuere, robustere Modelle der sogenannten Adversarial-Queueing-Theory gehen hingegen von gegnerischen statt stochastischen Verkehrsmustern aus. Bisherige Untersuchungen beschränken sich weitgehend darauf, Netzwerke zu analysieren, die aus einzelnen Warteschlangen mit vorgegebenen Queueingdisziplinen zusammengesetzt sind. Die Routingwege in diesen Netzwerken sind typischerweise dabei extern vorgegeben. In diesem Projekt sollen Netzwerke untersucht werden, die aus komplexeren Queueing- und Routingkomponenten zusammengesetzt werden. Der neue Aspekt ist die Einbeziehung von lokalen Routingentscheidungen in die Stabilitäts- und Effizienzanalyse.

### **A3. Synthese kostenoptimaler Scheduling-Strategien**

*(Betreuer: J.-P. Katoen, W. Thomas)*

Model-checking Verfahren werden seit einigen Jahren eingesetzt, um Schedules zu synthetisieren. Die Grundidee dabei ist, verschiedene einzelne Aufgaben (Tasks), die zu verwalten sind, sowie die gesamten Ressourcen im Detail zu modellieren - zusammen mit ihren Zeitbedingungen - durch zeitbehafte Automaten (timed automata). Die Frage, ob es einen Schedule gibt, der alle Anforderungen (wie Reihenfolge, Zeitbedingungen und Deadlines) erfüllt, lässt sich dann als zeitbedingte Erreichbarkeitsfrage formulieren und lösen mit Werkzeugen wie UPPAAL [1]. Mittels einfacher Heuristiken wird der enorme Zustandsraum eingeschränkt, womit sich die Laufzeit der Algorithmen signifikant verbessert. Anwendungen dieser Methode in verschiedenen industriellen Fallstudien [3] zeigen das enorme Potential dieses Ansatzes. Einige experimentelle Ergebnisse weisen darauf hin, dass solche Verfahren manchmal größere Problem-Instanzen erfassen können als üblicherweise mittels Standardverfahren wie z.B. Mixed-Integer Linear Programming [4]. Eine wichtige Einschränkung jedoch ist, dass angenommen wird, dass alle Ressourcen 100%ig korrekt funktionieren, z.B. niemals ausfallen und niemals ein fehlerhaftes Produkt produzieren. In diesem Projekt soll untersucht werden, ob und wie man solche Verfahren erweitern kann, damit auch stochastische Phänomene (wie Ausfall von Geräten) berücksichtigt werden können. Einzelne detaillierte Ziele dieses Promotionsthemas sind:

- Erweiterung von "priced timed automaten" [7] mit Wahrscheinlichkeiten
- Entwicklung einer region- und zonen-basierte Semantik;
- Untersuchung der Beziehung zu Markov-Reward Modellen;
- Entwicklung von Algorithmen zur Bestimmung kosten-optimaler Schedules für probabilistische kosten-erweiterte Timed Automaten;
- Realisierung der Algorithmen;
- Anwendungen auf praktische kosten-optimale Schedulingprobleme.

## **A4. Konstruktion zeitkontinuierlicher Markov-Entscheidungsprozesse**

*(Betreuer: J.-P. Katoen, S. Kowalewski)*

Traditionelle Verifikationsverfahren sind fokussiert auf absolute Korrektheit, wobei in der Praxis solche strengen Konzepte kaum, manchmal auch überhaupt nicht garantiert werden können. Phänomene stochastischer Art wie Fehler, unbekannte Kontexte, und zufällige Verzögerungen spielen jedoch häufig eine prominente Rolle. Korrektheit hat deswegen nicht so eine absolute Natur. Stochastisches Model-Checking ist eine Technik, die dazu geeignet ist, statt qualitativer Aussagen wie "das System verklemmt sich niemals", quantitative Eigenschaften wie "die Wahrscheinlichkeit, dass das System sich innerhalb der nächsten 12 Stunden verklemmt, ist niedriger als 0.0001" automatisch zu überprüfen. Die derzeit verfügbaren Software-Tools und Algorithmen konzentrieren sich auf diskret- oder zeit-kontinuierliche Prozesse. Für eingebettete Systeme aber sind Einhaltung von Zeitschranken und Interaktion mit der (unzuverlässigen) Umgebung wesentlich. Stochastische Modelle für solche Systeme sollten deswegen sowohl zeit-kontinuierlich sein als offen, d.h. das Verhalten der Umgebung soll nicht vollständig spezifiziert sein. Nichtdeterminismus ist die Modellierungstechnik „par excellence“ dafür. Wir werden uns konzentrieren auf zeit-kontinuierliche Markov Entscheidungsprozesse (CTMDPs). Diese Prozesse haben einen breiten Anwendungsbereich wie z.B. stochastic scheduling und dynamisches Energieverbrauchsmanagement. Wichtige Ziele in diesem Promotionsthema sind:

- die Entwicklung von Algorithmen für die Synthese optimaler Strategien für Erreichbarkeit in Zeit (gegeben verschiedene Klassen von Schemulern);
- die Identifizierung von Klassen von Schemulern, für die es übereinstimmende uniformisierte Modelle gibt;
- die Entwicklung eines Verifikationsverfahrens für die Logik CSL;
- die Realisierung eines Prototyp-Model-Checkers;
- Anwendung auf Fallstudien aus den Bereichen Eingebettete Systeme und Eisenbahntechnik.

## **B1. Algorithmische Theorie von Mehrpersonenspielen**

*(Betreuer: E. Grädel, B. Vöcking)*

Die Theorie unendlicher Spiele wurde im Hinblick auf Anwendungen im Bereich reaktiver Systeme in den letzten Jahren intensiv studiert. Die Forschung konzentrierte sich dabei auf Nullsummen-Zweipersonen-Spiele.

Die wesentlichen Themen wie Algorithmen für Strategiesynthese, Komplexität von Gewinnstrategien, Berechnung von Gewinnregionen etc. stellen sich auch für Mehrpersonenspiele, welche z.B. im Bereich von Multi-Agenten-Systemen auftreten. Allerdings sind die Probleme hier ungleich schwieriger.

Bei Mehrpersonenspielen treten auch neue Phänomene auf welche konzeptionell noch nicht befriedigend gelöst sind. Insbesondere greift der Begriff der Gewinnstrategie oft zu kurz um optimiertes rationales Verhalten zu beschreiben. Hier ist noch viel Arbeit an den konzeptionellen und mathematischen Grundlagen zu leisten. Hauptaufgabe wäre die Entwicklung einer Theorie rationalen Verhaltens in Mehrpersonenspielen, zugeschnitten auf die in der Informatik auftretenden Probleme, und die Lösung fundamentaler algorithmischer Probleme bei der Strategiekonstruktion.

## **B2. Strategiesynthese für endlich präsentierte Spiele**

*(Betreuer: E. Grädel, W. Thomas)*

Ausgangspunkt dieses Vorhabens sind ungelöste Grundlagenprobleme bei Zweipersonenspielen mit unendlichen Zustandsräumen und infinitären Gewinnbedingungen. Wir nennen eine Gewinnbedingung infinitär, wenn sie auf Parametern beruht welche unendlich viele Werte annehmen können. Die bisher in der algorithmischen Spieltheorie untersuchten Gewinnbedingungen beruhen auf logisch oder automaten-theoretisch formulierten Spezifikationen und sind, auch auf unendlichen Arenen, nur von Parametern mit endlichen Wertebereichen abhängig. Infinitäre Gewinnbedingungen treten insbesondere bei der Modellierung von Systemen mit unendlichen Datenstrukturen auf. Zu untersuchen sind hier die logische und algorithmische Komplexität der Gewinnbedingungen, Determiniertheitsfragen (welche Arten von Gewinnstrategien sind notwendig, abhängig von der Komplexität der Gewinnbedingung), und ihre Konsequenzen für die algorithmische Strategiesynthese auf endlich präsentierten Arenen. Zu beachten ist, dass alle wesentlichen Eingaben (der Spielgraph wie die Gewinnbedingungen) unendliche Objekte sind, die daher nicht explizit, sondern auf geeignete Weise symbolisch präsentiert werden müssen.

## **B3. Synthese verteilter Systeme mit Petrinetz-Spezifikationen**

*(Betreuer: W. Thomas, D. Abel)*

Der automatische Synthese verteilter Systeme sind durch die grundlegenden Unentscheidbarkeitsergebnisse von Pnueli/Rosner (1990) sehr enge Grenzen gesetzt, wenn die Spezifikation eine Bedingung an die globalen Systemläufe ist. Im Falle lokaler Spezifikationen sind Entscheidbarkeitsergebnisse für eingeschränkte Szenarien möglich. Die Lösbarkeit des verteilten Syntheseproblems in diesem Sinne ist Gegenstand des Promotionsprojekts. Zusätzlich zum in der Literatur vorherrschenden Modell des kommunizierenden Automaten soll das in der Ingenieurpraxis üblichere Modell des Petrinetzes einbezogen werden. Zuvor stellt sich die grundsätzliche Frage nach der Strukturierung von Netzen, um eine Anbindung an den spieltheoretischen Ansatz zu ermöglichen. Für diesen konzeptionellen vorbereitenden Schritt ist ein Studium von Beispielszenarien aus dem Themenbereich D des Kollegs erforderlich. Im Ergebnis sollten für wohldefinierte eingeschränkte Netzklassen Syntheseverfahren zur Verfügung stehen, begleitet durch eine Komplexitätsanalyse für die Syntheseverfahren. Eine ergänzende Studie würde Netze mit Zeitbedingungen einbeziehen und eine Brücke zum Modell der "timed automata" schlagen.

## **B4. Prozesskonstruktion und –optimierung für Request-Response-Spezifikationen**

*(Betreuer: W. Thomas, J.-P. Katoen)*

In der klassischen Theorie der Synthese nichtterminierender Automaten begnügt man sich mit der Angabe einer Gewinnstrategie, die gegen beliebige Aktionen der Umgebung sicherstellt, dass der jeweils erzeugte Systemlauf eine reguläre Gewinnbedingung erfüllt (präsentiert etwa durch einen Büchi-Automaten). Hiermit sind sowohl Sicherheits- als auch Lebendigkeitsforderungen erfasst. In den Anwendungen sind die Anforderungen jedoch schärfer: Eine Bedingung, dass etwa jede Request-Aktion irgendwann durch eine entsprechende Response-Aktion "abgelöst" wird, sollte üblicherweise mit "mög-

lichst geringer Wartezeit" erfüllt werden. Damit wird in der Synthese eine "optimale" Gewinnstrategie verlangt. Die klassischen Syntheseverfahren sollen mit dieser Zielrichtung verschärft werden. Vorbereitend sind begriffliche Probleme zu lösen, etwa bei der Definition von (Durchschnitts-) Wartezeit-Parametern in unendlichen Systemläufen und beim Abgleich kollidierender Optimalitätsforderungen (etwa dann, wenn mehrere Request-Response-Bedingungen zugleich zu erfüllen sind). Das Promotions-thema kombiniert somit Aspekte aus den Bereichen B und A des Kollegs.

### **C1. Termersetzungstechniken zur Synthese, Simulation, Transformation und Analyse von Prozessen**

*(Betreuer: J. Giesl, E. Grädel)*

Das Ziel des Promotionsvorhabens ist die Entwicklung eines formalen Rahmens zur Synthese, Simulation, Transformation und Analyse von Steuerungen und Prozessen. Dabei ist zu untersuchen, inwiefern sich hier Sprachen und Techniken aus dem Bereich der Termersetzungssysteme erfolgreich einsetzen lassen.

Das Vorhaben gliedert sich in drei Aufgaben: Zunächst ist eine geeignete (ausführbare) formale Sprache zur Beschreibung und Modellierung von Systemen festzulegen. Die zweite Aufgabe besteht in der Entwicklung von Techniken, um die Beschreibungen in der Modellierungssprache geeignet in effiziente Algorithmen zu transformieren. Als dritte Aufgabe sind Verfahren zu entwickeln, um synthetisierte Steuerungen und Prozesse auf bestimmte Eigenschaften zu überprüfen. Die erzielten Resultate sollen schließlich im Rahmen eines Verifikationssystems implementiert und experimentell evaluiert werden. Hierbei ist eine Anwendung der entwickelten Verfahren für Steuerungen und Systeme aus dem Eisenbahnwesen vorgesehen.

### **C2. Automatische Beweisverfahren für angewandte Modellierungssprachen**

*(Betreuer: J. Giesl, U. Epple)*

In diesem Vorhaben sollen Ansätze des automatischen Beweisens auf Modellierungssprachen und Syntheseprobleme aus ingenieurwissenschaftlichen Anwendungen übertragen werden. Konkret ist dabei ein Einsatz für Sprachen der Prozessleittechnik geplant.

Um einen hohen Grad an Automatisierung zu erreichen, sind als erste Aufgabe des Vorhabens geeignete Entscheidungsverfahren zu entwerfen, die bestimmte Arten von Beweisen vollautomatisch durchführen können. Die zweite Aufgabe besteht im Einsatz der entwickelten Techniken in praktischen Anwendungen wie der Prozessleittechnik. Hierbei sollen z.B. Konsistenzanforderungen und Sicherheitseigenschaften von Steuerprogrammen in funktional orientierten Sprachen untersucht werden. Weitere Einsatzmöglichkeiten ergeben sich im Rahmen der Synthese intelligenter Prozessführungsfunktionen bei Verwendung einer geeigneten regelbasierten Sprache. Hier können automatische Beweisverfahren beispielsweise benutzt werden, um die Einhaltung bestimmter Constraints durch die Steuerungsregeln zu überprüfen oder um optimale Ausführungsstrategien zur Abarbeitung von Regeln zu generieren.

### **C3. Algorithmische Synthese hybrider Steuerungssysteme**

(Betreuer: S. Kowalewski, J.-P. Katoen)

Methoden zur algorithmischen Synthese von Steuerungen entstanden zuerst für rein kontinuierliche Systeme (in der kontinuierlichen Regelungstheorie) und für rein diskrete Systeme (auf spieltheoretischer Basis und als Wiederentdeckung im Rahmen der so genannten *Supervisory Control Theory*). Reale Steuerungssysteme sind aber häufig *hybrid*, das heißt, zu ihrer Beschreibung muss eine Mischung von diskreter und kontinuierlicher Dynamik betrachtet werden. Beispiele sind modus-umschaltende kontinuierliche Regler oder diskrete Steuerungen von ansonsten kontinuierlichen Prozessen. Als abstrakte Modelle für solche Systeme genügt in vielen Fällen die Zusammenschaltung von diskreten Transitionsystemen mit umschaltbaren, stückweise linearen kontinuierlichen Übertragungsgliedern. Synthesealgorithmen für diese Klasse von Systemen existieren zurzeit nur in Ansätzen.

Die Regelungs- bzw. Steuerungsalgorithmen für hybride Systeme werden in der Praxis mit Hilfe von regelungstechnischen Entwurfswerkzeugen (z.B. *Matlab/Simulink/Stateflow* von *Mathworks* oder *ASCET SD* von der *ETAS GmbH*) oder Entwurfsumgebungen für Steuerungen nach dem Standard *EN IEC 61131* (z.B. *STEP7* von *Siemens* oder *Codesys* von *3S*) entworfen. Diese Werkzeuge erlauben die Spezifikation von diskreten und kontinuierlichen Anteilen und bieten Simulatoren zur Validierung des modellierten Verhaltens an. Möchte man einen Synthesealgorithmus für hybride Steuerungssysteme in die industrielle Anwendung bringen, so ist eine Anbindung an diese Werkzeuge Bedingung. Das Ziel des Promotionsvorhabens ist daher die Erarbeitung eines Synthese-Ansatzes für die oben genannte, praktisch relevante Klasse von hybriden Steuerungssystemen und seine Einbettung in Vertreter der genannten Entwurfswerkzeuge. Als Erprobungsbeispiel wird dabei der kontinuierlich/ereignisdiskrete Modellprozess aus dem Themenbereich D dienen.

#### **C4. Algorithmische Synthese als Bestandteil modellbasierter Softwareentwicklung**

(Betreuer: S. Kowalewski, U. Epple)

In der aktuellen Diskussion über das Software-Engineering für eingebettete Systeme wird ein „modellbasierter“ Ansatz favorisiert. Die Grundidee besteht darin, schon sehr frühzeitig in der Entwicklung, möglichst in der Anforderungsanalyse, so genannte „ausführbare Modelle“ zu erstellen und mit ihrer Hilfe die richtigen Anforderungen besser erfassen zu können. Zum Beispiel möchte man ein solches ausführbares Modell mit dem Kunden zusammen simulieren, damit dieser dann das Verhalten mit seinen Vorstellungen vergleichen kann. Im weiteren Verlauf der Entwicklung wird das Modell dann als Referenzmodelle für die folgenden Entwurfsschritte verwendet. Das Hauptproblem des Ansatzes ist, dass so früh in der Entwicklung häufig nur sehr grobe Vorstellungen über das Verhalten der Software bestehen. Im Falle von eingebetteten Systemen existieren zu diesem Zeitpunkt allerdings wesentlich konkretere Spezifikationen für das Verhalten des „einbettenden“ Systems, also des geschlossenen Kreises aus Steuerung und Strecke. Dies liegt daran, dass die Softwareentwicklung meistens als letztes Teilprojekt einer Systementwicklung gestartet wird. Es liegt daher nahe, ein „ausführbares“ Modell der Steuerung einfach aus dem Wissen über Strecke und Spezifikation des geschlossenen Kreises zu synthetisieren. Auf diese Weise erhielte man ein relativ detailliertes, simulierbares Modell der zu entwerfenden Steuerung ohne explizite Software-Requirements zu benötigen. Dieses Modell kann dann zur Anforderungsanalyse und als Referenzmodell für spätere Entwurfsschritte verwendet werden. Das Ziel des Promotionsvorhabens ist es, den skizzierten Ansatz auszuarbeiten, prototypisch zu implementieren, mit dem

herkömmlichen Vorgehen durch kontrollierte Experimente mit Probanden zu vergleichen und zu bewerten. Auch hier wird die Steuerungsentwicklung für den ereignisdiskret/kontinuierlichen Modellprozess aus Themenbereich D als Erprobungsgegenstand dienen.

## **D1. ASIP-Synthese**

*(Betreuer: R. Leupers, J.-P. Katoen)*

Dieses Vorhaben befasst sich mit der automatischen Synthese anwendungsspezifischer Prozessoren (ASIPs), wie sie vielfach in eingebetteten Systemen (z.B. in den Bereichen Multimedia und Telekommunikation) eingesetzt werden. ASIPs bieten einen idealen Kompromiss zwischen den gegenläufigen Zielen hoher Flexibilität und Effizienz. Gegenüber der Verwendung von Standardprozessoren muss jedoch ein höherer Entwurfsaufwand in Kauf genommen werden. Ziel des Projektes ist die Erstellung einer ASIP-Entwurfsumgebung, welche durch neuartige Analyse- und Syntheseverfahren die Lücke von der Applikation zur optimalen Architektur schließt. Dies umfasst u.a. die Entwicklung einer neuen Klasse von Profiling-Werkzeugen für C-Code, welcher die bekannten Nachteile klassischer Profiler (z.B. unzureichende Genauigkeit bei Anwendung auf den Hardwareentwurf) behebt und gleichzeitig eine wesentlich höhere Geschwindigkeit als Simulation/Profiling auf Assemblerebene ermöglicht. Der Profiler soll u.a. genaue Daten über die dynamische Ausführungshäufigkeit aller Operationen sowie der benötigten Wortbreiten in der Applikation liefern. Basierend auf den Analyseresultaten sollen komplexe, anwendungsspezifische Befehlsmuster synthetisiert und der hierdurch erzielte Performancegewinn abgeschätzt werden. Aufgrund der Kosten-Randbedingungen handelt es sich hierbei um ein komplexes Optimierungsproblem. Ein weiteres Arbeitsgebiet ist die Compilerunterstützung für anwendungsspezifische Befehlsmuster.

## **D2. Optimierende Compiler für heterogene Multiprozessorsysteme**

*(Betreuer: R. Leupers, B. Vöcking)*

Die zunehmende Integrationsdichte erlaubt bereits heute die Implementierung komplexer Multiprozessorsysteme auf einem Chip (Multiprocessor System-on-Chip, MPSoC). Zukünftig werden MPSoCs für neue komplexe Anwendungen Dutzende oder sogar Hunderte von spezialisierten programmierbaren Prozessoren umfassen. Die effiziente, optimale Abbildung und Verteilung von Applikationen auf eine heterogene MPSoC-Plattform ist ein noch weitgehend offenes Problem, welches in diesem Projekt behandelt werden soll. Ziel ist die Schaffung einer neuen MPSoC-Programmierungsumgebung, welche - basierend auf fortgeschrittenen Optimierungsverfahren - eine automatisierte räumliche und zeitliche Partitionierung von Task-Graphen (gegeben in Form von C-Code) auf Prozessoren unter den gegebenen Randbedingungen (Kosten, Task-Deadlines und -Perioden) vornehmen kann. Durch einen interaktiven Ansatz soll es ermöglicht werden, anwendungsspezifisches Wissen des Benutzers jederzeit einfließen zu lassen. Die zugehörigen C-Compiler als Teil dieser Programmierungsumgebung sind so anzupassen, dass die Kommunikations- und Synchronisationsprimitiven der MPSoC-Plattform (realisiert durch spezielle Hardwaremaßnahmen oder Betriebssystemroutinen), welche durch die Partitionierung automatisch in den Quellcode eingefügt werden sollen, unterstützt werden. Das Zusammenspiel zwischen C-Compiler, (verteilt) Betriebssystem und evtl. vorhandener Multithreading-Hardware ist dabei in Be-

tracht zu ziehen. Ein weiteres Optimierungskriterium ist die Lokalität der Speicherzugriffe zur Minimierung des globalen Kommunikationsbedarfs und damit des Energieverbrauchs.

### **D3. Steuerungssynthese mit Dualen und Hybriden Petrinetzen**

*(Betreuer: D. Abel, W. Thomas)*

Auf dem Gebiet der Modellbildung, Simulation, Analyse und Synthese von Steuerungen und gesteuerten Prozessen sind Petrinetze sehr vorteilhaft einzusetzen. Die Theorie der Petrinetze bildet unter anderem das Fundament der Ablaufsprache (AS/SFC) in DIN/EN 61131 (IEC1131), deren Verbreitung mit der Durchsetzung von grafischen Programmieroberflächen für speicherprogrammierbare Steuerungen und mit der Einführung IPC-basierter Steuerungssoftware zunimmt. Die Beschreibungsform zeichnet sich durch hohe Übersichtlichkeit und die bessere nutzerunabhängige Dokumentation des Ablaufprogramms aus.

Das von K. Lautenbach vorgeschlagene Prinzip der Dualität von Netzen ist bisher nur sehr wenig untersucht worden, obwohl hiermit eine Diagnose vorliegender Fehlerzustände möglich ist. Das Dualitätsprinzip ermöglicht, einen in einem (Teil-) System aufgetretenen Fehlerfall auf Basis einer Petrinetzbeschreibung nur anhand des aktuellen Systemzustands auf seine Ursachen hin zu untersuchen. Hierdurch können zusätzliche Vorgaben für die Synthese einer Steuerung z.B. nach der Supervisor-Theorie abgeleitet werden. Das Prinzip ist in der Praxis sehr vorteilhaft einzusetzen, da es nicht auf einer vollständigen Betrachtung aller möglichen Systemzustände und Fehlerfälle mit dem Problem der Explosion des Zustandsraumes beruht. Zur Berücksichtigung eines Fehlers muss lediglich der Zustand eines Simulationsmodells oder einer realen Anlage zum Fehlerzeitpunkt erfasst werden. Etwa während einer Anlageninbetriebnahme auftretende Fehler können hierdurch bei der Steuerungssynthese berücksichtigt werden. Hierzu soll die duale Modellierung von hierarchisch aufgebauten Steuerungen untersucht werden, so dass der Modellzustand im Fehlerfall zu neuen Vorgaben für die Supervisorsynthese führt. Dieses Vorgehen soll exemplarisch in einem Softwarewerkzeug umgesetzt werden. Zur Berücksichtigung gemischt ereignisdiskreter/kontinuierlicher Modellformen insbesondere bei der Modellierung der Steuerstrecke soll die am Institut für Regelungstechnik verfolgte Modellierungsform der Petrinetz/Zustandsraumdarstellung sowie die programmtechnische Umsetzung in NETLAB und deren Anbindung an MATLAB/SIMULINK weiterverfolgt werden.

### **D4. Rapid Control Prototyping für diskrete Steuerungen**

*(Betreuer: D. Abel, S. Kowalewski)*

Für die Entwicklung von Steuergeräten ist, wie bei allen Produkten mit Software-Logik, die Wichtigkeit von durchgängigen Entwicklungsketten anerkannt. Dennoch sind auch hier häufig Strukturen im Einsatz, die paralleles Arbeiten, spätere Änderungen sowie Qualitätssicherungsschleifen erschweren. Zusätzlich wird der Entwicklungsprozess häufig mit Inbetriebnahme des ersten Serien-Elementes als abgeschlossen betrachtet. Betrachtet man den Produktionsanlauf von modernen Produkten, die üblicherweise mechanische, elektrische und software-basierte Komponenten enthalten, so stellt man fest, dass zunehmend die ersten Erfahrungen mit den in Betrieb genommenen Produkten eine Fortentwicklung erfordern. Insbesondere der Software-Bereich ist hiervon betroffen, da hier stattfindende Änderungen am kostengünstigsten auch Schwächen im mechanischen oder elektrischen Bereich kompensieren können. Um

solche Erfahrungen schnell und reibungslos in den erweiterten Entwicklungszyklus mit einbringen zu können, sind Werkzeuge, Arbeitsabläufe und Schnittstellen zu optimieren. Zielsetzung ist die Schaffung von durchgehenden Werkzeugketten bzw. Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Softwarewerkzeugen zur schnellen Steuerungsentwicklung (Rapid Control Prototyping, RCP) und ihr Einsatz in parallelsierbaren Arbeitsabläufen.

Beispiele für einen erfolgreichen Einsatz dieser Methode finden sich in der Automobilindustrie, in der u. a. MATLAB/SIMULINK als Entwicklungsumgebung für Steuergeräte eingesetzt wird. Die Modellierung kontinuierlicher Prozesse und Steuerungen erfolgt dort in einer wirkungsplanähnlichen Darstellung. In dieser Umgebung können auch Zustandsautomaten wie etwa Statecharts zur Beschreibung von Abläufen und ebenso Hochsprachen wie z. B. C-Code eingebunden werden. Aus der grafischen Programmierumgebung kann C-Code für das Modell der Automatisierung erzeugt werden, der auf den unterschiedlichsten Zielplattformen wie PCs, DSPs oder Mikroprozessoren lauffähig ist. Vielfach werden kritische Teile des maschinell generierten C-Codes und sogar des Assembler-Codes auf Fehler kontrolliert, diese Schritte können allerdings zukünftig mit einer entsprechenden Zertifizierung von Code-Generator bzw. Compiler entfallen. Mehrere namhafte Automobilhersteller und –Zulieferer betreiben mittlerweile auch die Versionspflege von Automatisierungsfunktionen für einige Entwicklungsbereiche auf der Basis von SIMULINK-Modellen.

Um die Methode des RCP beim Entwurf industrieller Steuerungen anwenden zu können, muss als großer Unterschied zum bisherigen Vorgehen ein Modell des ungesteuerten Prozesses vorliegen. Im Grunde ist die RCP-Methode die konsequente Weiterentwicklung eines modellbasierten Testens, in der Aspekte der Simulation mit denen von Codegenerierung, Analyse und Synthese vereint werden. Hierzu muss eine Entwicklungsumgebung geschaffen werden, in der es möglich ist, den nicht automatisierten Prozess und die Automatisierungslösung separat zu modellieren und teilweise oder als Gesamtes zu simulieren, auch in Echtzeit in Verbindung mit analogen und digitalen Ein- und Ausgängen. Eine Unterstützung durch Analyse- und Syntheseverfahren beim Entwurf ist äußerst sinnvoll, aber nicht zwingend notwendig. Auch eine Konvertierung der Anzeige der grafischen Beschreibungsmittel untereinander – wie einige Werkzeuge die Wahl der Anzeige bei Sprachen nach IEC 61131 ermöglichen – ist nicht erforderlich, aber wünschenswert.

## **D5. Begleitende, iterative Verifikation der Programmkonstruktion in prozessleittechnischen Systemen**

*(Betreuer: U. Epple, J. Giesl)*

Die Realisierung einer konkreten automatisierungstechnischen Anwendung umfasst die Projektierung (Engineering) einer Vielzahl von vernetzten Teilfunktionalitäten in den unterschiedlichen Systemen der Betriebs- und Prozessleittechnik. Die Funktionen der Basisautomatisierung innerhalb der SPS (speicherprogrammierbare Steuerung), die Visualisierung auf den Bedienstationen, die Rezeptabläufe im MES-System (Manufacturing Execution System), externe Simulations-, Diagnose- und weitere Zusatzwerkzeuge müssen mit ihren jeweiligen Programmier- bzw. Projektierungssprachen realisiert werden. Aufgrund der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Systemen müssen bei den jeweiligen Konstruktionsvorgängen eine Vielzahl von impliziten Beschränkungen eingehalten werden. Um eine derartige komplexe Programmkonstruktion effizienter und sicherer zu gestalten, bietet

es sich an, den Entwurfsvorgang iterativ mit automatisierten Verifikationsmechanismen zu begleiten.

## **D6. Regelbasierte Synthese intelligenter Prozessführungsfunktionen im automatisierungstechnischen Umfeld**

*(Betreuer: U. Epple, J. Giesl)*

Die zunehmende Komplexität automatisierungstechnischer Applikationen und die gleichzeitig gestiegenen Anforderungen bezüglich Optimalität der Prozessführung erfordern „intelligente“ Prozessführungsfunktionen, die ihre jeweilige Führungsaufgabe selbstständig und möglichst projektierungsfrei wahrnehmen. Die Zunahme der Komplexität ergibt sich aus der vertikalen Integration der Prozessleittechnik, die die Interaktion des klassischen Leitsystems mit einer Vielzahl von Softwaresystemen aus der Betriebsleitebene erfordert. So benötigt beispielsweise eine prädiktive Regelung für Batch-Prozesse sowohl Informationen über die zukünftigen Sollwertvorgaben aus dem aktuellen Rezeptverlauf als auch die an den Sensoren und Aktoren projektierten Messbereichs- und Stellwertgrenzen. Wie diese Informationen zu beschaffen sind und wie die Prozessführungsfunktion auf Fehlen oder Änderung dieser Informationen reagieren soll wird üblicherweise im Rahmen einer textuellen Funktionsbeschreibung hinterlegt. Im konkreten Einzelfall geschieht die manuelle Projektierung der Funktion statisch mit den speziellen Wertevorgaben. Um „intelligente“ Prozessführungsfunktionen zu gestalten, müssen sowohl diese Regeln, die die informationelle Abhängigkeit zu der Umgebung beschreiben, als auch die möglichen situationspezifischen Handlungsweisen eines Bedieners in Form von Regeln explizit definiert werden. Über eine geeignete Handlungssynthese könnte die Prozessführungsfunktion aus diesen Regeln dann mit gewissen Freiheitsgraden eine geeignete Vorgehensstrategie generieren.

## **D7. Modelle zur Kapazitätsberechnung großer Eisenbahnknoten und -netze**

*(Betreuer: E. Wendler, B. Vöcking)*

Zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Eisenbahnstrecken und -knoten werden seit vielen Jahren Warteschlangenmodelle eingesetzt, die es erlauben, einen funktionalen (stochastischen) Zusammenhang zwischen der Auslastung einer Bahnanlage und einem auslastungsabhängigen Qualitätsparameter (planmäßige Wartezeit bzw. Folgeverspätung) herzustellen. Die Besonderheiten bei der Abstandshaltung von Eisenbahnen erlauben es dabei, Modelle mit diskretem Zustandsraum einzusetzen. Insbesondere in Knoten, in denen vielfältige Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Fahrten und Infrastrukturelementen bestehen (sog. Verkettungen), lassen sich genauere Aussagen über die Leistungsfähigkeit derzeit nur für Teilelemente, insbesondere für den sog. Teilfahrstraßenknoten, ableiten, der durch eine geeignete Dekomposition größerer Weichenzonen entsteht.

Ziel der Arbeit ist es, die heute für die Kapazitätsberechnung von Eisenbahnstrecken und -knoten eingesetzten Warteschlangenmodelle um Optimierungsaspekte zu erweitern. Bislang werden insbesondere bei der Kapazitätsbetrachtung großer, hochverketteter Bahnknoten beim Auftreten hoher Belegungsgrade entweder zu pessimistische Trassenallokationsregeln (und damit eine Verschwendung von Trassenkapazität) bzw. zu optimistische Trassenallokationen (die wegen einer nur unvollständigen Berücksichtigung von Verkettungen in dem Fahrstraßenknoten praktisch nicht fahrbar wären) unterstellt. Die klassische Kapazitätsberechnung von Bahnanlagen wird damit mit dem bislang getrennt betrachteten

Gebiet der Fahrplanoptimierung verknüpft.

## **D8. Signaltechnisch sichere Systeme im Eisenbahnwesen**

*(Betreuer: E. Wendler, S. Kowalewski)*

Im Eisenbahnwesen in Europa findet derzeit ein Paradigmenwechsel bei der Erstellung von Sicherheitsnachweisen für sog. signaltechnische sichere Systeme (z. B. Stellwerke) statt. Während bislang das *Fail-safe*-Prinzip Anwendung gefunden hat, muss heute das Ausfallverhalten von elektronischen Bauteilen und von Software mit Hilfe probabilistischer Modelle beschrieben werden. Wenngleich auch die Anwendung der Methoden der algorithmischen Analyse für Sicherheitsnachweise im Bahnbereich insbesondere bei der Anwendung auf große Systeme durchaus noch erweiterbar ist, liegen bislang faktisch noch keinerlei Erfahrungen zur Anwendung der algorithmischen Synthese für den Anwendungsbereich der Eisenbahnsicherungstechnik vor.

Neben der quantitativen Berechnung der Sicherheit erfordert die probabilistische Risikobetrachtung auch die Festlegung sog. Risikoakzeptanzkriterien. Man kann davon ausgehen, dass in Deutschland auch langfristig als Risikoakzeptanzkriterium der sog. "Nachweis der mindestens gleichen Sicherheit" Anwendung finden wird. Aus wissenschaftlicher Sicht stellt ein solches Risikoakzeptanzkriterium einen besonders hohen Anspruch dar, da es sowohl eine vollständig quantitative Betrachtung der neuen Technologie erfordert, als auch eine retrospektive Anwendung für die Referenztechnologie (Ist-System) notwendig macht.

Eine im Eisenbahnwesen für Sicherheitsnachweise generell zulässige Methode ist die Modellierung und Berechnung des Systems mit Hilfe von Markov-Ketten. Für die zu erwartende extreme Größe des Zustandsraumes müssen geeignete Methoden zur Komplexitätsreduzierung verwendet werden, die sich allerdings nur "zur sicheren Seite hin" auswirken dürfen (pessimistische Schätzung für neue Systeme, optimistische Schätzung für herkömmliche Systeme). Der Fehler zwischen pessimistischer/optimistischer Schätzung und dem (unbekannten) exakten Wert muss ebenfalls abgeschätzt werden können, da eine zu starke Abweichung zur sicheren Seite die Einführung neuer Technologien aus wirtschaftlicher Sicht erschweren oder verhindern würde. Ziel des Vorhabens ist es, neben der Analyse bestehender Systeme insbesondere den Entwurf neuer Systeme dahingehend zu unterstützen, dass die aus der Komplexitätsreduzierung entstehenden pessimistischen Schätzungen der Sicherheit möglichst nicht zu extremen Kostensteigerungen führen, die die Einführung der neuen Technologie aus wirtschaftlicher Sicht unmöglich machen würden.

Als Untersuchungsgegenstand stehen die Stellwerke in der Eisenbahntechnischen Lehr- und Versuchsanlage (ELVA) des Verkehrswissenschaftlichen Instituts zur Verfügung, die auch entsprechende Experimente über das Ausfallverhalten einzelner Komponenten bzw. Subsysteme ermöglichen.

## **4. Studienprogramm**

Das Studienprogramm hat mehrere Ziele:

1. die Vermittlung vertiefter Kenntnisse in den Forschungsbereichen des Graduiertenkollegs in Er-

- gänzung zur Betreuung durch die jeweiligen Hochschullehrer,
2. die Erarbeitung einer breiteren Grundlage an Expertise in Bereichen, die zur Dissertation komplementär liegen, aber auch Gegenstand in der mündlichen Promotionsprüfung sind,
  3. die Vermittlung von (vorwiegend fachbezogenen) Schlüsselqualifikationen,
  4. die Heranführung an internationale Forschungskooperationen.

Die Veranstaltungen sind ganz unterschiedlicher Art und werden unten genauer beschrieben. Sie dienen zugleich auch der Zusammenführung der Kollegiaten, der Herausbildung eines Gemeinschaftsgefühls bei der Bewältigung der Forschungsaufgaben und parallel dazu der aktiven Kooperation der beteiligten Hochschullehrer.

Die Konzeption des Studienprogramms entspricht dem Anliegen, das die zur Zeit in der Gründung befindliche *Graduate School der RWTH* im Bereich der Ingenieurwissenschaften verfolgt. Es baut auf der Idee auf, die individuellen Forschungen durch ein spezifisches Curriculum zu ergänzen. Diese Pflicht, ein Promotionsstudium zu betreiben, ist bereits in der gültigen Promotionsordnung realisiert. Im Rahmen der Graduate School werden erworbene Qualifikationen (Vorlesungs- und Seminarbesuche, besondere Schlüsselqualifikationen) in den Abschlussdokumenten begleitend zur Doktorurkunde dokumentiert.

## **4.1 Komponenten des Studienprogramms**

### **4.1.1 Kollegspezifische Veranstaltungen**

#### *Wöchentliches Seminar*

In dieser Veranstaltung tragen Stipendiaten und Kollegiaten über ihre Forschungsfortschritte vor, und beteiligte Hochschullehrer referieren über ihre Forschungsergebnisse. Auch über weitere Resultate, die für das Kolleg besonders relevant sind, wird (von Stipendiaten, Kollegiaten oder Hochschullehrern) referiert. Vortragssprache ist Englisch, um die Geläufigkeit im Austausch auf internationaler Ebene zu entwickeln und eine der zentralen „Soft Skills“ zu trainieren. Das Seminar (wie auch alle anderen kollegspezifischen Veranstaltungen) steht auf Einladung auch ausgesuchten Diplomanden offen; hierdurch soll ein Hineinwachsen der nachrückenden Generation in das Kolleg erleichtert werden.

#### *Tutorials zur Präsentation und Literaturrecherche*

Diese Veranstaltung findet in der Regel im kleinen Kreise statt, mit jeweils wenigstens einem Betreuer und einigen wenigen Stipendiaten und Kollegiaten. Es geht hier um die Vermittlung von Schlüsselqualifikationen im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Präsentationen, durch eine Professionalisierung der üblichen „Probenvorträge“. Hinzu treten auch Einzelvorträge durch beteiligte Betreuer („How to give a talk?“, „How to write a conference paper?“ etc.).

In einem regelmäßig stattfindenden (und obligatorischen) Tutorium der Informatik-Bibliothek werden die Stipendiaten eingeführt in die Fachliteratur-Recherche, die Benutzung von lokalen und überregionalen wissenschaftlichen Datenbanken sowie die zahlreichen Dienste, die zur Literaturbeschaffung angeboten werden.

### *Ausrichtung von Arbeitstreffen und kleinen Tagungen*

Die Stipendiaten und Kollegiaten werden dazu ermuntert, unter Anleitung Arbeitstreffen und kleine Tagungen selbst zu konzipieren und zu organisieren. Die Einzelschritte (Themenbeschreibung, Call for Papers, Referierung der eingereichten Arbeiten, Zusammenstellung des Programms) werden durch betreuende Hochschullehrer überprüft, aber nicht gesteuert. Ein besonderes Augenmerk liegt auf dem Punkt der Referierung von Arbeiten; hier werden durch die Betreuer Kurzvorträge („How to referee a paper?“) zur Einführung, mit anonymisiertem Beispielmateriale, gegeben.

### *Kompaktkurse*

Dieses Programm besteht aus konzentrierten Einführungen in Schlüsselgebiete des Graduiertenkollegs, ähnlich den Tutorien, wie sie teilweise auf Sommerschulen angeboten werden. Es handelt sich um Kurse in der Größenordnung von 15 Stunden, entsprechend einer Vorlesung von 1 SWS (2 ECTS Kreditpunkte), üblicherweise angeboten innerhalb einer Woche. Auf diese Weise soll insbesondere die Divergenz der Vorbildung von Kollegiaten aus dem Bereich der Informatik einerseits und den Ingenieurdisziplinen andererseits überbrückt werden. Es sollen jeweils in den Semesterferien zwei Mini-Courses angeboten werden. Referenten sind entweder beteiligte Hochschullehrer, Gastwissenschaftler oder Postdoktoranden.

Die beteiligten Hochschullehrer haben eine ausgeprägte Erfahrung mit solchen konzentrierten Tutorials. Aus diesen Aktivitäten sind mehrere Tutorialbände (auch auf internationaler Ebene) entstanden:

- D. Abel, K. Lemmer: Theorie ereignis-diskreter Systeme, Tutorium des GMA-Fach-ausschusses 1.8 „Methoden der Steuerungstechnik“ (beteiligt auch S. Kowalewski)
- E. Grädel, W. Thomas, Th. Wilke: Automata, Logics, and Infinite Games, A Guide to Current Research, Springer LNCS vol. 2500, 2003.
- C. Baier, B. Haverkort, H. Hermanns, J.-P. Katoen, M. Siegle: Validation of Stochastic Systems, A Guide to Current Research. Springer LNCS vol. 2925, 2004.
- E. Brinksma, H. Hermanns and J.-P. Katoen: Lectures on Formal Methods and Performance Analysis. Revised lectures of the 1st EEF/Euro Summer School on Trends in Computer Science. Springer LNCS vol. 2090, 2001.

Das Programm der Kompaktkurse soll auch durch das beantragte Stipendium für einen Postdoktoranden bereichert werden. In der Regel soll ein Postdoktorand (für ein halbes Jahr oder für ein Jahr Mitglied des Kollegs) pro Halbjahr eine Serie von Spezialvorträgen oder einen Kompaktkurs zum Programm des Kollegs beisteuern.

### *Vorlesungen*

Die Kollegiaten müssen im Rahmen ihres Promotionsstudiums Vorlesungen besuchen; Kenntnisse hieraus sind für die Promotionsprüfung erforderlich. Hierbei wird teils auf das bestehende Vorlesungsangebot für Fortgeschrittene zurückgegriffen, teils werden Vorlesungen für das Kolleg neu eingeführt bzw.

neu konzipiert (die dann umgekehrt auch für Diplom- oder Masterstudierende geöffnet sind). Die Vorlesungen der zweiten Kategorie sind im folgenden durch \* gekennzeichnet. Da in der Promotionsprüfung auch Kenntnisse aus wenigstens einem der Dissertation komplementären Gebiet unter Beweis gestellt werden sollen, müssen auch Vorlesungen besucht werden, die nicht in der folgenden Liste aufgeführt sind.

- Vöcking: Probabilistische Analyse\* (V2,Ü1)
- Vöcking: Algorithmische Spieltheorie (V2,Ü1)
- Thomas: Angewandte Automatentheorie (V4,Ü2)
- Thomas: Automaten und reaktive Systeme (V4,Ü2)
- Thomas: Model-Checking (V2,Ü2)
- Grädel: Theorien, Spiele, Algorithmen (V2,Ü1)
- Katoen: Spezifikation probabilistischer Systeme (V3,Ü1)
- Katoen: Verifikation probabilistischer Systeme (V3,Ü1)
- Katoen, Kowalewski: Hybride Systeme\* (V2,Ü1)
- Giesl: Automatisierte Programmverifikation (V4,Ü2)
- Kowalewski: Einführung in eingebettete Systeme (V2,Ü1)
- Kowalewski: Entwurf eingebetteter Software (V2,Ü1)
- Kowalewski: Dynamische Systeme (für Informatiker) (V2,Ü1)
- Kowalewski: Formale Methoden für Eingebettete Systeme (V2,Ü1)
- Leupers: DSP Design Methodology and Tools (V2,Ü1)
- Leupers: Rechnergestützter VLSI-Entwurf (V2,Ü1)
- Leupers: Compiler für Eingebettete Systeme\* (Kompaktkurs)
- Leupers: Retargetable Compilers (Kompaktkurs)
- Epple: Process Control Engineering I, II (V2,Ü1)
- Epple: Dynamik technischer Systeme (V2,Ü1)
- Epple: Leittechnisches Engineering I, II (je V2,Ü1)
- Abel: Mess- und Regelungstechnik (V3,Ü2)
- Abel: Steuerungsentwurf mit Petrinetzen\* (V2,Ü1)
- Abel: Rapid Control Prototyping (V2,Ü2)
- Abel: Prozessleittechnik und Anlagenautomatisierung (V2,Ü2)
- Wendler: Eisenbahnsicherungstechnik (V/Ü 1)
- Wendler: Transportmanagement (V1)
- Wendler: European Rail Traffic Management System ERTMS (V1)

*Vorträge von Gastwissenschaftlern*

Hierzu erfolgen Ausführungen unter Abschnitt 5.

#### **4.1.2 Ergänzendes Programm**

*Ringvorlesungen*

Es ist bereits eine Tradition Aachener Graduiertenkollegs, gegebenenfalls gemeinsam mit anderen Institutionen (etwa dem „Forum Informatik der RWTH“) Ringvorlesungen zu veranstalten. Bei einschlägigen

Ringvorlesungen ist der Besuch für die Stipendiaten verpflichtend. Weitere Ringvorlesungen werden in den einzelnen Fachbereichen organisiert, etwa in der Fachgruppe Informatik die Vorlesung „Ideengeschichte der Informatik“.

### *E-Learning*

Eine Aachener Besonderheit ist das elektronische Angebot einiger Vorlesungen, erstellt im Rahmen des bundesweiten Projekts ULI (Universitärer Lehrverbund Informatik). Zur Zeit können Aufzeichnungen von insgesamt vier Vorlesungen aus dem Bereich des Kollegs heruntergeladen werden (jeweils Audio-Stream mit Folien inklusive Live-Annotationen durch den Dozenten), und zwar unter [www-i7.informatik.rwth-aachen.de/d/projects/uni/ecase.html](http://www-i7.informatik.rwth-aachen.de/d/projects/uni/ecase.html). Das in Aachen entwickelte Aufnahmesystem E-Case (vgl. die genannte Webseite) erlaubt mühelos die Erstellung zusätzlichen Vorlesungsmaterials. Bereits jetzt können Stipendiaten und nachrückende Diplomanden unabhängig von konkreten Vorlesungszeiten die folgenden Vorlesungen „zu Hause besuchen“: „Automaten und Formale Sprachen“, „Angewandte Automatentheorie“, „Automata and Reactive Systems“, sowie „Model-Checking“.

### *Veranstaltungen am Bonn-Aachen Center of Information Technology (B-IT)*

Das Bonn-Aachen Center of Information Technology (B-IT) ist eine gemeinsame Einrichtung der Universität Bonn, der RWTH Aachen und der Fachhochschule Rhein-Sieg mit Sitz in Bonn (ehemalige Landesvertretung der Landes NRW in Bonn). Das B-IT ist als Exzellenzzentrum im Bereich der IT-Hochschulausbildung und -forschung konzipiert unter enger Einbindung von drei Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft (mit Sitz in St. Augustin). Zur Zeit bestehen internationale Masterstudiengänge „Media Informatics“ und „Life Science Informatics“. Hinzu kommen Kompaktkurse für besonders leistungsstarke Studierende der RWTH Aachen und der Universität Bonn zwecks Beschleunigung ihres Studiums. Darüber hinaus dient das B-IT als Tagungsstätte; so findet hier im März 2005 eine Frühlingsschule des EU Network GAMES (organisiert durch die RWTH Aachen) statt. Hinsichtlich der Durchführung von Kompaktkursen und Tagungen soll das B-IT in die Arbeit des Graduiertenkollegs einbezogen werden.

### *Arbeitstreffen von Graduiertenkollegs in Dagstuhl*

Koordiniert durch das Aachener Graduiertenkolleg 643 „Software für Kommunikationssysteme“ fanden in den letzten Jahren mehrfach gemeinsame Tagungen mehrerer Graduiertenkollegs statt. Dieses erfolgreiche Modell soll im beantragten Kolleg aufgegriffen werden, gegebenenfalls mit anderen Partnerkollegs.

## **4.2 Betreuungskonzept**

Das Kolleg verfolgt ein Betreuungskonzept, das Bewährtes und Neues verbindet. Aufgesetzt wird auf die jahrzehntelangen Erfahrungen (und Erfolge) mit Promotionen in Informatik und in den Ingenieurwissenschaften an der RWTH. Eine Kernvoraussetzung, auf die auch im beantragten Kolleg aufgebaut werden muss, besteht in exzellenten Grundlagenkenntnissen aus einem bereits forschungsorientierten Hauptfachstudium, basierend insbesondere auf soliden mathematischen Kenntnissen. Neben die „klassi-

schen“ Promotionsbetreuung (in diesem Kolleg allerdings durch zwei Hochschullehrer) tritt die im Zuge des Promotionsstudiums erforderliche individuelle weiterführende Ausbildung und Betreuung. Hier sollen neue Strukturen etabliert werden, wie sie auch in der *RWTH Graduate School for Doctoral Studies* geplant sind.

Daneben werden auch Anregungen aus der erfolgreichen Praxis des Aachener Graduiertenkollegs „Software für Kommunikationssysteme“ aufgegriffen. Spezifisch ist jedoch, dass die Bewerber nicht nur aus Informatik-orientierten Studiengängen kommen, sondern auch aus einer breiteren Palette von Ingenieurstudiengängen. Ausschreibung und Auswahl erfolgen unter Kontrolle des gesamten Kreises der beteiligten Hochschullehrer. Die Anliegen der Frauenförderung werden besonders berücksichtigt; hier bemüht sich das Kolleg, darauf hinzuwirken, dass die jetzige Regelung, in den Finanzaufweisungen an die Fachbereiche nur die Frauenquote auf Landesstellen zu berücksichtigen, zu Fall kommt; denn auf diese Weise besteht zur Zeit ein Druck, Frauen – wenn möglich – auf Landesstellen und nicht auf Drittmittelstellen zu platzieren.

#### **4.2.1 Ausschreibungsverfahren**

Es erfolgt eine offene Ausschreibung auf den Webseiten des Kollegs, mit Informationen über die wissenschaftliche Mission und die möglichen Promotionsthemen. Auf die Ausschreibung wird in einschlägigen Mailing-Listen hingewiesen; bei Notwendigkeit werden auch Stipendienausschreibungen in Zeitschriften veröffentlicht. Die Ausschreibung wendet sich an Absolventen von Diplom- und Masterabschlüssen (auch von Fachhochschulen) in einem der durch das Kolleg repräsentierten Fächer. Bei persönlicher Eignung kommen auch Absolventen benachbarter Fächer in Frage.

#### **4.2.2 Auswahlverfahren**

Nach Eingang von Bewerbungen auf freie Stipendien erfolgt eine Vorauswahl durch das Gremium der beteiligten Hochschullehrer, nach bestandener Vorauswahl ein Vortrag vor den Betreuern und Stipendiaten. Anschließend wird im Kreis der beteiligten Hochschullehrer über die Aufnahme entschieden. Eine Bindung der Ausschreibung an spezielle Promotionsthemen erfolgt nicht; die Zuordnung von Bewerberinnen und Bewerbern auf bestimmte Promotionsthemen geschieht nach Aufnahme in das Kolleg unter Berücksichtigung der Wünsche des bzw. der Aufgenommenen. Die Kriterien für die Aufnahme in das Kolleg sind primär die Ausgewiesenheit durch bisherige Studien- (und eventuell bereits Forschungs-) Leistungen, auch in dem Kollegthema benachbarten Gebieten, und unter Berücksichtigung des Aspekts der Frauenförderung und der Einbindung ausländischer Stipendiaten. Gemäß den Promotionsordnungen der RWTH können auch Fachhochschul-Absolventen in das Kolleg aufgenommen werden; es werden dann je nach Einzelfall und Notwendigkeit Auflagen zum Programm der zu besuchenden Vorlesungen (mit entsprechenden Kenntnisprüfungen) erteilt.

#### **4.2.3 Betreuung**

Bestandteil des Promotionsstudiums ist eine Studienberatung und –betreuung bei der Ausgestaltung des jeweils individuellen Curriculums, in welches Veranstaltungen aus verschiedenen Teilen des Themenkatalogs des Kollegs einfließen müssen. Die Beratung erfolgt zunächst durch den Sprecher des Graduierten-

tenkollegs, der die Stipendiaten als Gruppe in die Strukturen des Promotionsstudiums einweist und Hinweise zur individuellen Konzeption des Studiums gibt. Jeder Stipendiat ist gehalten, schriftlich einen Plan für sein Promotionsstudium zu entwickeln. Die Rücksprache über die Ausgestaltung des Curriculums erfolgt dann mit den Betreuern des Promotionsprojekts, bei besonderen Fragen wieder mit dem Sprecher. Es wird (im Sekretariat des Kollegs) für jeden Stipendiaten Buch geführt über die besuchten Veranstaltungen; der Sprecher weist die Stipendiaten (auch im Hinblick auf die Durchführung der Promotionsprüfung) gegebenenfalls auf Probleme hin. Er führt mit jedem der Stipendiaten einmal im Semester ein Beratungsgespräch.

Die Betreuung des Promotionsprojekts erfolgt durch die beiden Hochschullehrer, die für die Themenstellung und folglich auch für Referat und Korreferat verantwortlich zeichnen. Erster Ansprechpartner ist der Hochschullehrer, der das Thema formal gemäß Promotionsordnung betreut. Zusätzliche Anregungen werden in den Sitzungen des Wochenseminars gegeben. Je nach Einzelfall kommen auch externe Betreuungskomponenten hinzu, etwa bei Auslandsaufenthalten von Stipendiaten und Projektaufgaben im industriellen Umfeld. Angesichts des straffen Zeitplans bei den Promotionsvorhaben erscheinen nur kurzfristige Auslandsaufenthalte von Stipendiaten sinnvoll; diese sollen – sofern für das jeweilige Vorhaben geeignet – unter Ausnutzung der bestehenden Auslandskontakte realisiert werden und werden bei dem Ansatz der beantragten Reisekosten berücksichtigt.

#### **4.2.4 Leistungskontrolle**

Es erfolgt eine kontinuierliche Leistungskontrolle auf mehreren Ebenen: durch die regelmäßigen Gespräche mit den Betreuern, durch die (in der Regel zweimal jährlichen) Fortschrittsberichte im Wochenseminar des Kollegs und durch das Verfassen von Beiträgen für nationale und internationale Tagungen. Der letzte Punkt gehört zum „Pflichtprogramm“ eines Stipendiaten nach Ablauf des ersten Jahres.

Die Kriterien der Bewertung der Promotionsleistung werden voll gemäß der gültigen Promotionsordnungen der beteiligten Fakultäten angewandt. Die Fakultätsmitgliedschaft des Erstbetreuers legt fest, in welcher Fakultät die Promotion erfolgt. Eine Harmonisierung der (bereits sehr ähnlichen) Promotionsordnungen, auch mit dem Ziel einer umfassenderen Dokumentation des Promotionsstudiums, erfolgt zur Zeit im Rahmen der Gründung der *RWTH Graduate School*.

## **5. Gastwissenschaftlerprogramm**

Die Einladung von Gastwissenschaftlern und die darauf aufbauenden Kontakte der Stipendiaten mit der internationalen Forschung sind ein entscheidender Bestandteil der Promotionsprojekte.

Es wird auf den bereits bestehenden Kooperationen aufgebaut, zum Beispiel im Rahmen des schon erwähnten *EU Research Training Network GAMES*. Der Austausch erfolgt hier auf den drei Ebenen

der etablierten Wissenschaftler, der Postdocs und der Promovenden (z.T. sogar Diplomanden). Zahlreiche Diplom- und Promotionsprojekte werden bereits jetzt im Rahmen dieser Kooperationen realisiert. Diese Kontakte sollen im Graduiertenkolleg genutzt und intensiviert werden, u.a. durch Einbeziehung auswärtiger Wissenschaftler als (weitere) Gutachter von Dissertationen.

Enge Kooperationspartner sind auch die folgenden *Hochschulen im regionalen Umfeld*: Universität Bonn (Prof. C. Baier), Technische Universität Eindhoven (Profs. J. Baeten, H. Zanema), Universität Twente (Profs. E. Brinksma, B. Haverkort), Université de Liège (Prof. P. Wolper). Zwar wurde ein ursprünglicher Plan, in diesem Rahmen ein internationales Kolleg zu konzipieren, nicht weiter verfolgt, doch werden die bestehenden Kooperationen stark in das Gastwissenschaftlerprogramm einfließen.

Auf nationaler Ebene ist geplant, Expertise aus fachlich benachbarten (laufenden oder kürzlich abgeschlossenen) *Graduiertenkollegs, Sonderforschungsbereichen und Schwerpunktprogrammen der DFG* im Vortragsprogramm oder in kurzfristigen Gastwissenschaftleraufenthalten einzubringen. Beispielhaft seien genannt:

- Graduiertenkollegs 236 „Modellierung und modellbasierter Entwurf komplexer technischer Systeme“ (Dortmund) und 621 „Stochastische Modellierung und quantitative Analyse großer Systeme in den Ingenieurwissenschaften“ (Berlin),
- Schwerpunktprogramme 1040 „Entwurf und Entwurfsmethodik eingebetteter Systeme“ und 1126 „Algorithmik komplexer Netzwerke“,
- Transregio 14 „Automatische Analyse und Verifikation komplexer Systeme“ (AVACS).

Als Gastwissenschaftler bzw. Vortragende sind u.a. vorgesehen:

A. Czumaj (New Jersey), B. Maggs und B. Krogh (Carnegie Mellon, Pittsburgh), P. Ienne, Th. Henzinger (EPFL Lausanne), L. de Alfaro (Berkeley), O. Maler (IMAG Grenoble), M. Balakrishnan (IIT Delhi), L. Benini (Bologna), Y. Paek (Seoul), W. Damm (Oldenburg), W. Fengler (Ilmenau), G. Hommel (Berlin).

Aufenthalte von Gastwissenschaftlern aus dem EU Research Training Network GAMES sollen aus Mitteln der EU finanziert werden. Hierunter fallen die als Gastwissenschaftler vorgesehenen I. Walukiewicz, A. Arnold (Bordeaux), B. Jonsson, P. Abdulla (Uppsala), A. Bouajjani, A. Muscholl (Paris).

Eine aktualisierte Liste, insbesondere unter Einbeziehung von externen Nachwuchswissenschaftlern, kann erst bei Bewilligung des Kollegs (für Aufenthalte ab Sommer 2006) erstellt werden.

Pro Jahr sind ca. 10 Besuche von Gastwissenschaftlern vorgesehen, hiervon die Hälfte kurzfristig (2–3 Tage), drei mittelfristig (1–3 Wochen) und zwei längerfristig (1–3 Monate). Als Mittel hierfür werden pro Kurzaufenthalt 700 Euro, pro mittelfristigem Aufenthalt 2000 Euro und pro langfristigen Aufenthalt 5000 Euro veranschlagt, insgesamt also ca. 20000 Euro.

## 6. Organisationsstruktur des Graduiertenkollegs

Die interne Struktur des Graduiertenkollegs ist durch drei Institutionen gegeben:

- Sprecher
- Betreuerkonferenz
- Gesamtkonferenz

Der Sprecher ist für die laufenden Geschäfte verantwortlich, so auch für die Organisation und Ankündigung von Treffen (insbesondere das Wochenseminar) und Vorträgen. In Abschnitt 4 wurde auf die Funktion des Sprechers in der curricularen Betreuung der Stipendiaten hingewiesen; gegebenenfalls gibt es hier auch Treffen zwischen Sprecher, Stipendiat und den zwei jeweils betreuenden Hochschullehrern.

Die Betreuerkonferenz umfasst alle beteiligten Hochschullehrer (und bindet gegebenenfalls auch die assoziierten Nachwuchswissenschaftler ein). Hier werden die Auswahl von Bewerbern, die Fortschreibung und Abstimmung des Lehrprogramms, die Festlegung der Einladung von Gastwissenschaftlern sowie die Planung des Etats behandelt.

Teilnehmer der Gesamtkonferenz sind die beteiligten Hochschullehrer, die assoziierten Nachwuchswissenschaftler, die Stipendiaten, die Kollegiaten und die Forschungsstudenten. Die Gesamtkonferenz findet jeweils zu Semesterbeginn und zu besonderen Anlässen statt.

## 7. Umfeld des Graduiertenkollegs

### 7.1 Wissenschaftliches Umfeld

Die Einbettung des Graduiertenkollegs in die RWTH Aachen ist aufgrund seines fakultätsübergreifenden Zuschnitts vielfältig: Die der Informatik zugeordneten Hochschullehrer des Kollegs haben ihr unmittelbares Umfeld in der *Fachgruppe Informatik*, mit derzeit 19 Professoren in einem weit gefächerten Gebietsspektrum und mit zahlreichen nationalen und internationalen Projekten. Zwischen der Fachgruppe Informatik und der *Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik* besteht eine enge Zusammenarbeit in Lehre und Forschung. Im Rahmen des beantragten Kollegs wird dies ausgedehnt auf die *Fakultät für Bauingenieurwesen*, die *Fakultät für Maschinenwesen* und die *Fakultät für Geowissenschaften und Materialtechnik*.

Die hochschulweite Kooperation im Themenbereich der Informatik, für die das beantragte Kolleg als Musterbeispiel dienen kann, ist im *Forum Informatik* der RWTH institutionalisiert. Es gehören ihm 70 Professoren der RWTH an.

In diesem Feld hat das Graduiertenkolleg sein Hauptpotenzial: Aufgrund seines Zuschnitts mit wesentlicher Beteiligung von Mathematik, theoretischer und praktischer Informatik sowie vier Ingenieurfächern wird ein entscheidender Beitrag zur fachübergreifenden Forschung an der RWTH Aachen erwartet.

Das wissenschaftliche Umfeld wird entscheidend geprägt durch zahlreiche Forschungs-kooperationen mit Industriefirmen. Im Zusammenhang mit dem beantragten Kolleg seien vor allem die folgenden genannt: Ericsson Eurolabs Herzogenrath, Philips Research Laboratories Eindhoven, Siemens Transportation Systems, Siemens Automation and Drives, Deutsche Bahn AG, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, CoWare Inc., Infineon.

## **7.2 Stellung des Kollegs zu anderen wissenschaftlichen Einrichtungen der RWTH und außer-universitärer Forschungseinrichtungen**

Die Lehr- und Forschungsaktivitäten des Graduiertenkollegs sind eingebunden in eine vielfältige Landschaft von fachlich nahen bzw. fachübergreifenden Projekten. Hervorzuheben sind:

- die Graduiertenkollegs 643 „Software für Kommunikationssysteme“ und 775 „Hierarchie und Symmetrie in mathematischen Modellen“
- der Sonderforschungsbereich 476 IMPROVE („Informatische Unterstützung übergreifender Entwicklungsprozesse in der Verfahrenstechnik“)

Zum Graduiertenkolleg 643 und zum Sonderforschungsbereich 476 wird auf die Stellungnahmen der jeweiligen Sprecher in Anhang D verwiesen.

## **7.3 Regionales Umfeld**

Die Informatik-orientierten Lehrstühle der RWTH und die regionale IT-Industrie sind im „Regionalen Industrieclub Informatik Aachen“ (REGINA) zusammengebunden. Hier werden besonders Fragen zur Schnittstelle zwischen Hochschule und Industrie angesprochen, so zum Qualifikationsprofil der Absolventen und Promovierten in Informatik und benachbarten Fächern.

Es besteht, wie schon unter Abschnitt 5 (Gastwissenschaftlerprogramm) ausgeführt, eine intensive Kooperation mit den Hochschulen der Region (Universität Bonn, Technische Universität Eindhoven, Universität Twente, Université de Liège).

## **7.4 Einpassung des Graduiertenkollegs in die bestehende Studienstruktur**

Wie im Abschnitt 4 (Studienprogramm) ausführlich dargelegt, passt sich das Graduiertenkolleg ideal in die Gründung der RWTH Graduate School for Doctoral Studies ein; das Kolleg wird zur Profilierung dieser Graduate School beitragen.

## **7.5 Unterstützung von Seiten der Hochschule**

Die RWTH stellt die nötige Grundausstattung an Räumen, (Rechner-) Infrastruktur sowie an laufenden Kosten (Büromaterial, Bücher) zur Verfügung.

Für die Anfangsphase des Graduiertenkollegs (Januar – September 2006) wird eine Unterstützung des Sprechers durch einen Mitarbeiter mit Hochschulabschluss benötigt, da der Sprecher während dieser

Zeit noch als Dekan seiner Fakultät amtiert. Das Rektorat der RWTH sagt die Finanzierung dieser Stelle für den Fall der Bewilligung des Graduiertenkollegs zu (vgl. hierzu Anlage D).

## **7.6 Vorangegangene Graduiertenkollegs**

Es gibt kein Vorgängerkolleg zu dem hier beantragten Graduiertenkolleg.

## **8. Mittel / Kostenarten**

### **8.1 Doktorandenstipendien**

Es werden 15 Doktorandenstipendien in der Höhe von 1365 Euro (plus Sachkostenzuschuss) für die gesamte Förderperiode) beantragt. Zur Anzahl sei auf die Bemerkungen am Anfang von Abschnitt 3.2 (Promotionsthemen) verwiesen.

### **8.2 Postdoktorandenstipendium**

Es wird ein Postdoktorandenstipendium für die Laufzeit des Kollegs beantragt. Dieses Stipendium wird mit Absicht nicht an ein spezielles Projekt des Kollegs gebunden, um so eine halbjährlich oder jährlich wechselnde Besetzung durch auswärtige Postdocs zu gewährleisten. Es ist beabsichtigt, im Wechsel Vertreter aus allen Themenbereichen des Kollegs zu gewinnen. Damit soll die Interaktion insbesondere mit dem internationalen Umfeld über das gesamte Fächerspektrum des Kollegs hin gefördert werden. Der jeweils zum Kolleg gehörende Postdoktorand sollte auswärtige Expertise in seinem Arbeitsfeld in das Kolleg einbringen, und zwar durch Vorträge, durch Kompaktkurse und durch Gedankenaustausch mit den fachlich einschlägigen Stipendiaten und Kollegiaten.

### **8.3 Qualifizierungsstipendien**

Es werden keine Qualifizierungsstipendien beantragt, da an der RWTH ein eingespieltes Instrumentarium bereitsteht, um z.B. auch Fachhochschul-Absolventen den Einstieg in das Promotionsstudium (und damit in das Kolleg) zu ermöglichen; vgl. Abschnitte 4.2.1 und 4.2.2.

### **8.4 Mittel für Gastwissenschaftler**

Es werden 20000 Euro für die Finanzierung von Gastwissenschaftlern beantragt (vgl. hierzu die Erläuterungen unter Abschnitt 5).

### **8.5 Mittel für Forschungsstudenten**

Es werden Mittel für zehn Forschungsstudierende zu jeweils 10 Std. pro Woche beantragt. Diese Studierenden sollen die Stipendiaten bei ihren Forschungsarbeiten unterstützen; zugleich dienen diese Mittel der Exzellenzförderung und Heranführung von Diplomanden an Themenstellungen des Kollegs.

### **8.6 Sonstige Kostenarten**

**Kleinere Geräte, Verbrauchsmaterial, Ausschreibungen.** Es werden 5000 Euro pro Jahr beantragt.

**Koordination.** Es werden 15339 Euro jährlich für eine Teilzeitstelle beantragt.

**Sommerschulen, Tagungen am B-IT (Bonn), Dagstuhl-Seminare von Graduiertenkollegs.** Für diesen Zweck werden 15000 Euro jährlich beantragt; vgl. hierzu die Ausführungen unter Abschnitt 4.2 (Studienprogramm).

**Reisemittel** Es werden 4000 Euro pro Kollegiat und Jahr beantragt. Dieser Betrag wird vor allem für kurzfristige Forschungsaufenthalte an Partnerhochschulen und für Reisen zu internationalen Konferenzen zwecks Vorstellung der jeweiligen Forschungsergebnisse benötigt. Im Zusammenhang mit dem zweiten Punkt ist die Höhe der Mittel ist geboten angesichts zahlreicher einschlägiger Konferenzen in den USA und in Asien sowie hoher Teilnahmegebühren bei Konferenzen im Themenbereich des Kollegs.

**Aufwandsentschädigung von Probanden in kontrollierten Experimenten** Im Promotionsvorhaben C4 (Algorithmische Synthese als Bestandteil modellbasierter Softwareentwicklung) soll die Qualität der entstehenden Methodik in kontrollierten Experimenten validiert werden. Zur Aufwandsentschädigung der Teilnehmer werden 5000 EUR für den Bewilligungszeitraum beantragt. Geplant sind zwei Experimente über jeweils 10 Tage mit jeweils 25 Probanden. Kalkuliert wird mit einer Aufwandsentschädigung von 10 EUR pro Tag und Proband.

## 9. Erklärungen

### 9.1 Thematische Bezüge zu anderen von der DFG geförderten Gruppen

Es bestehen lose thematische Beziehungen zu:

1. Graduiertenkolleg 643 „Software für Kommunikationssysteme“
2. SFB 476 IMPROVE („Informatische Unterstützung übergreifender Entwicklungsprozesse in der Verfahrenstechnik“)
3. Nachwuchsgruppe Westermann im Rahmen des DFG-Aktionsplans Informatik

Stellungnahmen der Sprecher bzw. des Nachwuchsgruppenleiters sind in Anhang D beigefügt.

### 9.2 Antragstellung

Ein Antrag auf Finanzierung dieses Graduiertenkollegs oder eines vergleichbaren Projekts wurde bei keiner anderen Stelle eingereicht. Sollte ein solcher Antrag gestellt werden, wird die DFG unverzüglich

benachrichtigt.

## **10. Verpflichtungen**

Es sind keine Untersuchungen am Menschen, Untersuchungen mit humanen embryonalen Stammzellen, Tierversuche oder gentechnologische Experimente geplant.

## **11. Veröffentlichung von Antragsteller- und Kollegdaten**

Der Sprecher stimmt der Veröffentlichung der Kollegdaten durch die DFG in der üblichen Form zu.

## **12. Unterschriften**

Aachen, 15.1.2005

(Sprecher)

(Rektorat)