



Stiftung  
Werner-von-Siemens-Ring

13

Jungwissenschaftler  
2007 – 2009

LISA, SOFIA und  
die Quantenkommunikation –  
Forschungsbeiträge von  
Jungwissenschaftlern der  
Stiftung Werner-von-Siemens-Ring

12

1816







# Jungwissenschaftler 2007 – 2009

## LISA, SOFIA und die Quantenkommunikation – Forschungsbeiträge von Jungwissenschaftlern der Stiftung Werner-von-Siemens-Ring

Schriften der Stiftung Werner-von-Siemens-Ring

Nr. 23/2009

Der Druck wurde gefördert durch den  
Daimler-Fonds – Stiftung zur Förderung von Wissenschaft und Forschung  
sowie Bildung und Erziehung.



# Impressum

Stiftung Werner-von-Siemens-Ring

c/o DVT

WissenschaftsForum

Markgrafenstraße 37 · 10117 Berlin

[www.siemens-ring.de](http://www.siemens-ring.de)

Vorsitzender des Stiftungsrates: Prof. Dr. Ernst O. Göbel

Geschäftsführer: Dipl.-Pol. Jörg Maas

Stiftungsregister Berlin: AZ 3416/208-II.2



## Inhalt

- 6 Vorwort
  - 8 Wegbereiter auf der Suche nach Gravitationswellen: Herausforderungen der Mission LISA Pathfinder *Dipl.-Ing. Nico Brandt*
  - 16 Zwei Kernbereiche industrieller Mathematik – Schnelle Gleichungslöser und innovative Tools zum „Robust Design“ *Dr. Tanja Clees*
  - 22 Das Flugzeugobservatorium SOFIA – Infrarotastronomie von der Stratosphäre aus *Dipl.-Ing. Franziska Harms*
  - 30 Generation of Extreme Wave Sequences – From Capsizing Ships to Offshore Structures in Hurricanes *Dr. Janou Hennig*
  - 42 Statistische Signalverarbeitung für Kommunikationssysteme  
*Dr.-Ing. Michael Joham*
  - 48 Herausforderungen dezentraler Energiebereitstellung in zukünftigen Stromnetzen *Dr.-Ing. Martin Kautz*
  - 57 Neue Methoden der Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen *Dr.-Ing. Thomas Naumann*
  - 62 Quantenkommunikation mit integrierter Optik *PD. Dr. Christine Silberhorn*
  - 70 Integration von Systemmodellen, Organisationsmodellen und Kommunikation in verteilten Softwareentwicklungsprojekten *Dr. Timo Wolf*
  - 80 Lebensläufe
  - 89 Mitglieder des Stiftungsrates
- 



## Vorwort

Die Stiftung Werner-von-Siemens-Ring zeichnet nicht nur herausragende Persönlichkeiten für ihre Leistungen auf technisch-wissenschaftlichem Gebiet aus, sondern sie fühlt sich auch dem wissenschaftlichen Nachwuchs verpflichtet. Die Förderung junger Menschen in einer Zeit, in der sie die Grundlagen für ihre spätere wissenschaftliche Karriere schaffen, ist der Stiftung daher ein besonderes Anliegen.

Alle drei Jahre benennen die im Stiftungsrat vertretenen Mitglieder der Fachgesellschaften, in enger Abstimmung mit ihren Organisationen, junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die Anlass zu der Vermutung geben, dass sie aufgrund ihres Talents und ihrer Begeisterung Außergewöhnliches in ihren Fächern leisten werden. Während ihrer Zeit als „Stipendiaten“ der Stiftung Werner-von-Siemens-Ring dürfen sie nicht nur an den Veranstaltungen der Stiftung teilnehmen, sondern sie werden ermuntert, regelmäßig über sich und die Fortschritte ihrer Forschungsprojekte, z. B. im Rahmen einer Promotion, zu berichten.

Die Diskussionen, welche sich bei den Vorträgen ergeben, tragen nicht nur bei den Stiftungsratsmitgliedern zur Erweiterung des Horizonts bei, sondern vermitteln auch den Jungwissenschaftlern einen Eindruck über die Wahrnehmung ihres Projekts in einer interessierten und vorgebildeten Öffentlichkeit. Auf diese Weise entsteht oft ein vertrauensvolles Verhältnis zwischen Jungwissenschaftler/innen und Stiftungsratsmitgliedern, das gleichermaßen von Respekt und Kollegialität geprägt ist.

Der vorliegende Band vereinigt Beiträge von allen Jungwissenschaftlerinnen und Jungwissenschaftlern, die die Stiftung seit 2007 aufgenommen hat. Die Vorträge wurden teilweise im Rahmen der Stiftungsratssitzung 2008 in Berlin gehalten, andere kamen später hinzu. Sie geben Auskunft über aktuelle Forschungsstände in verschiedenen technischen Disziplinen und dienen den Stipendiaten gleichzeitig zur Dokumentation ihrer Leistungen.

Ich wünsche allen Leserinnen und Lesern eine anregende Lektüre.

Prof. Dr. Ernst O. Göbel  
Vorsitzender des Stiftungsrates

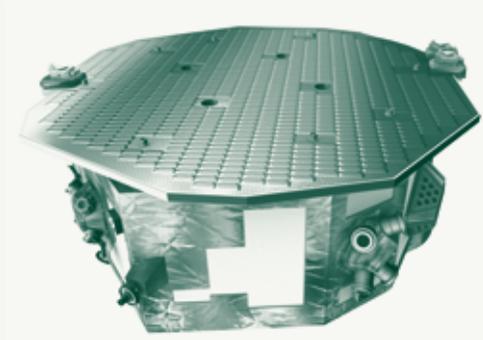


# Wegbereiter auf der Suche nach Gravitationswellen: Herausforderungen der Mission LISA Pathfinder

Dipl.-Ing. Nico Brandt

## Einleitung

LISA Pathfinder (siehe Abbildung 1) ist ein Technologiesatellit der Europäischen Raumfahrtagentur ESA mit Starttermin 2011. Ziel von LISA Pathfinder ist es, die Schlüsseltechnologien der LISA (Laser Interferometer Space Antenna) Mission zu verifizieren. Das Missionsziel von LISA ist die direkte Detektierung von Gravitationswellen und die Charakterisierung der kosmischen Quellen im Millihertz-Bereich. Der folgende Beitrag beginnt mit einem kurzen Einblick in die Theorie der Gravitationswellen. Anschließend werden die besonderen technischen Herausforderungen bei der Entwicklung und Implementierung von LISA Pathfinder dargestellt.



*Abbildung 1: Der Satellit LISA Pathfinder*

## Raumzeit und Gravitationswellen

Gravitation nehmen wir als die Bewegung von Massen in Raum und Zeit wahr. Genauer gesagt, bezeichnet man damit die Bewegung innerhalb der Geometrie der gekrümmten vierdimensionalen Raumzeit. Die Massenverteilung selbst krümmt die Raumzeit, die sich wiederum dynamisch auf die Massenverteilung auswirkt, was schließlich die Geometrie der Raumzeit verändert. Diese Aussagen stammen aus der Allgemeinen Relativitätstheorie, die, von Albert Einstein im Jahr 1915 aufgestellt, die Geometrie der Raumzeit beschreibt. Eine weitere, aus der Allgemeinen Relativitätstheorie abgeleitete Vorhersage Einsteins ist die Folgende: Die beschleunigte Bewegung von Massen führt zu dynamischen Störungen der Raumzeit, die sich wellenförmig ausbreiten – den Gravitationswellen. Wenn zum Beispiel Neutronensterne schnell umeinander kreisen oder Schwarze Löcher kollidieren, werden Fluktuationen der Raumzeit erzeugt, vergleichbar mit Oberflächenwellen im Wasser. Diese Gravitationswellen sind Transversalwellen mit Wellenlängen von einigen Kilometern bis zu mehreren 100 Millionen Kilometern, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Aus Sicht eines lokalen Beobachters scheinen sie die Raumzeit senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung zu stauchen und zu strecken. Die relative Amplitude der Gravitationswellen, das Verhältnis von Längenänderung zu betrachteter Strecke, ist kleiner als  $10^{-21}$ . Dies entspricht auf der Distanz zwischen Sonne und Erde ( $1.5 \cdot 10^{11}$  Meter) einer Längenänderung vergleichbar mit dem Durchmesser eines Wasserstoffatoms ( $10^{-10}$  Meter).

## Detektion von Gravitationswellen

Zur Bestimmung dieser Längenänderungen und somit der direkten Messung von Gravitationswellen benötigt man hochauflösende Messsysteme, bei denen alle nicht-gravitativen Störungen unterdrückt werden. Tatsächlich sind Gravitationswellen bisher nur indirekt durch den Energieverlust des Hulse-Taylor Doppelpulsars

nachgewiesen worden. Die Abnahme der Umlaufzeit der beiden Pulsare deckt sich mit den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Heute werden bodengestützte Laser-Interferometer verwendet, um Gravitationswellen zu detektieren. Hierbei werden die Laserstrahlen zweier rechtwinkliger Arme zur Interferenz gebracht, um relative Längenänderungen zu messen. Aktuelle Gravitationswellendetektoren dieser Art sind GEO600 bei Hannover und LIGO in den USA. Die kurzen Armlängen der bodengestützten Interferometer erlauben nur die Detektion von Gravitationswellen mit kleineren Wellenlängen, im Frequenzband oberhalb von 10 Hertz. Um auch längere Wellenlängen von entsprechend größeren kosmischen Ereignissen und Quellen zu detektieren, werden weltraumgestützte Laser Interferometer wie LISA benötigt. Das Ziel der Detektion von Gravitationswellen ist dabei nicht nur eine weitere Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie, sondern die Begründung eines neuen Zweigs der Astronomie.

### **LISA und die Gravitationswellendetektion im Millihertz Bereich**

Die Laser Interferometer Space Antenna ist eine Gemeinschaftsmission von ESA und NASA mit Starttermin 2020. Das LISA-Raumflugsegment besteht aus drei Satelliten, die in Form eines nahezu gleichseitigen Dreiecks in heliozentrischer Bahn etwa  $20^\circ$  hinter der Erde fliegen. Die Kantenlänge des aufgespannten Dreiecks beträgt 5 Millionen Kilometer. In jedem der drei Satelliten befinden sich je zwei Testmassen, die als störungsfreie – inertial frei fallende – Referenzpunkte dienen. Mittels Laser-Interferometrie wird der Abstand zwischen jeweils zwei Testmassen mit Pikometer-Genauigkeit bestimmt.

Abbildung 2 zeigt die technischen Herausforderungen, die gelöst werden müssen, um Gravitationswellen weltraumgestützt im Millihertz-Bereich zu messen.



Abbildung 2: Gravitationswellendetektion im Millihertz Bereich

Erstens müssen die Testmassen störungsfrei sein, das heißt, nur dem Freien Fall ausgesetzt werden. Zweitens muss der Abstand im Millihertz-Bereich auf Pikometer-Genauigkeit gemessen werden. Die störungsfreie Umgebung führt zu zwei weiteren Problemen. Zum einen müssen alle nicht-gravitativen Störungen unterdrückt werden. Diese sind magnetischer, elektrischer, thermischer oder autogravitativer Natur. Zum anderen müssen der Satellit und die Testmassen stabilisiert, das heißt, geregelt werden. Dies führt wieder zu Störungen. Diese technischen Herausforderungen lassen sich in drei Schlüsseltechnologien der weltraumgestützten Gravitationswellendetektion übertragen: den Instrumentenentwurf, das Regelungssystem und das Messsystem. Aufgrund der Tatsache, dass die Anforderungen an der Grenze des technisch-physikalisch Machbaren sind und die Technologien am Boden nicht getestet werden können, hat die ESA beschlossen, die Schlüsseltechnologien auf einem weltraumgestützten Demonstrator zu testen. Dieser Technologiesatellit heißt LISA Pathfinder. Er soll neben dem Test der notwendigen Technologien im Weltraum auch das Gesamtkonzept von LISA verifizieren.

### LISA Pathfinder

LISA Pathfinder reduziert einen der 5 Millionen Kilometer langen LISA-Interferometer Arme mit den zwei Testmassen auf die Größe

eines Satelliten. Um die für LISA benötigten Schlüsseltechnologien ausreichend zu qualifizieren, gibt es zwei Missionsziele. Erstens soll der Abstand zwischen den beiden Testmassen mittels Heterodyn-Laser-Interferometrie auf  $9 \cdot 10^{-12} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$  im Messband von 1 bis 30 Millihertz bestimmt werden. Heutige bodengestützte Interferometer erreichen schon diese Empfindlichkeiten, aber nicht in diesem niedrigen Frequenzband. Zweitens soll die nicht-gravitativ Restbeschleunigung auf die Testmassen im Messband kleiner sein als  $3 \cdot 10^{-14} \text{ m}/\text{s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$ .

Diese Qualität an Freiem Fall ist bisher unerreicht. Die Restbeschleunigungsanforderungen an die Testmassen bei LISA Pathfinder sind zwei Größenordnungen strenger als bei derzeitig fliegenden oder geplanten Raumflugmissionen, zum Beispiel GRACE, GOCE oder MICROSCOPE. Dementsprechend gibt es hohe Anforderungen an die Störungsunterdrückung und damit an den Instrumentenentwurf und das Regelungssystem, dem sogenannten Drag-Free Control System.

### Drag-Free Control System

Das Konzept der störungsfreien Regelung lässt sich am Beispiel von nur einer Testmasse am einfachsten veranschaulichen. Eine freifliegende Testmasse im All ist nicht störungsfrei, da äußere nicht-gravitativ Störungen, der solare Strahlungsdruck, dominieren. Durch die Platzierung der Testmasse in einen Satelliten wird sie von den äußeren Störungen isoliert. Ein Messsystem bestimmt die relative Position und Lage der Testmasse zum Satelliten. Mit Hilfe eines Reglers wird die Messung in Stellsignale für die außen am Satelliten angebrachten Düsen umgewandelt. Die nun von außen auf den Satelliten wirkenden Störungen ändern die Relativposition und -lage zwischen Satellit und Testmasse. Zusätzlich wirken auf die Testmasse interne Störkräfte, zum Beispiel die Autogravitation des Satelliten, die durch den Instrumentenentwurf in nominaler Testmassenposition und -lage minimal werden. Das Ziel der störungsfreien Regelung ist es, die Testmasse in dieser Nominallage zu

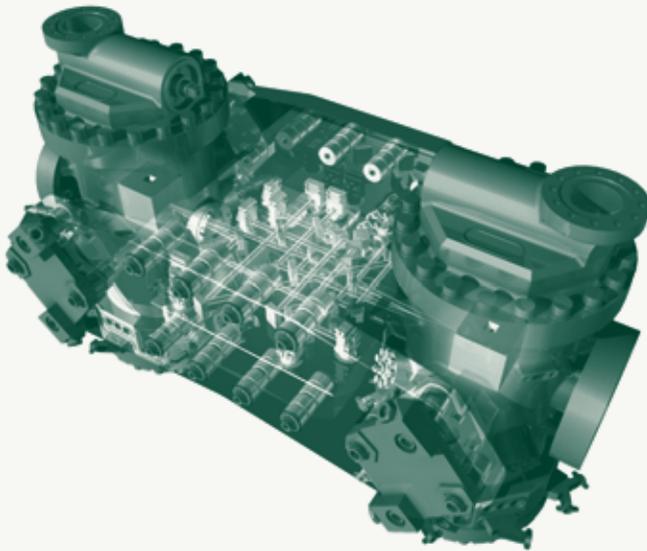
halten. Das Prinzip ist folgendermaßen: Sobald die Relativmessung eine Ablage der Testmasse feststellt, wird mit den Düsen am Satelliten gegengesteuert – der Satellit wird also der Testmasse nachgeführt. Das nennt man Drag-Free Control. Bei LISA Pathfinder werden nach diesem Prinzip 6 von 18 Freiheitsgraden auf Nanometer-Genauigkeit geregelt.

### LISA Technology Package

Der Satellit LISA Pathfinder hat keine Nutzlast im klassischen Sinne. Das wissenschaftliche Experiment ist das Gesamtsystem mit dem Herzstück LTP, dem LISA Technology Package (siehe Abbildung 3). Das LTP besteht aus zwei kubischen Testmassen, die mit 40 cm Abstand voneinander einem geschrumpften LISA-Arm entsprechen. Die Testmassen sollen möglichst schwer und nicht-magnetisch sein. Sie sind daher aus einer speziellen Gold-Platin-Legierung gefertigt, haben eine Kantenlänge von circa 5 Zentimeter und wiegen dabei 2 Kilogramm. Die Testmassen befinden sich jeweils in einem Gehäuse, das die Elektroden zur elektrostatischen Ansteuerung circa Positions- und Lagebestimmung beherbergt. Im Flug wird die Testmasse kontaktlos mit mehreren Millimetern Abstand innerhalb dieses Gehäuses fliegen. Ein so großer Abstand ist ungewöhnlich für klassische Beschleunigungsmesser und stellt daher eine völlige Neuentwicklung des gesamten Subsystems dar. Die durch kosmische Strahlung aufgebrachte Ladung der Testmasse wird mit Hilfe des photoelektrischen Effekts durch UV-Licht entfernt. Dazu wird die Testmassenladung durch das Aufbringen von Testsignalen mittels der Elektroden geschätzt und im geschlossenen Regelkreis mit den UV-Lampen beseitigt. Das Gehäuse befindet sich zusammen mit einer Ausgleichsmasse zur Kompensation des lokalen Gravitationsfeldes des Satelliten in einem Vakuumzylinder. Dieser soll Kontaminationen verhindern und konstante Umgebungsverhältnisse der Testmasse gewährleisten. Der Zylinder beinhaltet ebenfalls den Mechanismus zum Halten, Positionieren und Freilassen der Testmasse. Dies erfordert eine hoch präzise Mechanik, die zum einen Kräfte von mehreren 1000 Newton aufbringen muss und trotzdem mit

Mikrometer Genauigkeit die Testmasse freilässt. Zwischen den Vakuumzylindern befindet sich die optische Bank mit mehreren Mach-Zender-Heterodyn-Interferometern, die den Abstand und die Lage der beiden Testmassen bestimmen. Die zu erreichende Pikometer-Genauigkeit im Millihertz-Bereich stellt eine Neuentwicklung dar. Die optische Bank und ihre Elemente sind aus Zerodur gefertigt, einer Glaskeramik mit minimalem Wärmeausdehnungskoeffizienten.

Das LTP befindet sich im Zentrum des Satelliten LISA Pathfinder und ist umgeben von symmetrisch verteilten Elektronikboxen. Außen am Satelliten befinden sich die Düsen des Mikro-Newton-Schubsystems. Die sogenannten FEEPs (Field Emission Electric Propulsion) sind eine Neuentwicklung, die kontinuierliche Schübe mit entsprechend niedrigem Rauschen im Mikro-Newton-Bereich erzeugen.



*Abbildung 3: Das Lisa Technology Package*

Die zwei Missionsziele von LISA Pathfinder stellen somit Anforderungen an jedes der zahlreichen Subsysteme, die an die physikalisch-technischen Machbarkeitsgrenzen stoßen. LISA Pathfinder und das LISA Technology Package werden von einem internationalen Konsortium aus Firmen und Instituten unter der Führung von Astrium gebaut. Zurzeit befindet sich die Mission in der Implementierungsphase. Der Start ist für 2011 geplant.



## Zwei Kernbereiche industrieller Mathematik – Schnelle Gleichungslöser und innovative Tools zum „Robust Design“ Dr. Tanja Clees

### Schnelle Gleichungslöser

Was haben Handy-Schalen, Halbleiter-Chips, Ölreservoirs und Autos gemeinsam? Tief im Innern von Software-Paketen zur Simulation ihrer Herstellung, Funktionsweise, Ausbeutung bzw. Umströmung arbeiten lineare Gleichungslöser – meist unbemerkt von der Außenwelt, aber von entscheidendem Einfluss auf den Erfolg der Simulationen. Die Simulationen werden nämlich immer aufwändiger, einerseits weil immer mehr physikalische Effekte berücksichtigt werden müssen, und andererseits immer feiner aufgelöste Rechengitter zum Einsatz kommen, um den stetig wachsenden Genauigkeitsanforderungen zu genügen. Lineare Gleichungslöser sind daher der treibende Motor der Pakete: dank immer komplexerer Simulationen geht die Zahl der zu behandelnden Variablen heutzutage schon in die Millionen, eine sehr große Herausforderung für die „Ururenkel“ des Gauß-Verfahrens, wie man es in der Schule lernt.

Moderne Löser arbeiten allerdings nicht wie das Gauß-Verfahren an der „direkten“ Lösung der Gleichungen, sondern schaffen durch eine geschickte sogenannte „iterative“ und „hierarchische“ Vorgehensweise gute Approximationen. Schließlich soll die Lösung sehr großer Systeme nur im Sekundenbereich liegen, während klassische Löser Tage bis hin zu Jahren brauchen würden.

Die unten stehenden Abbildungen 1 und 2 veranschaulichen die beiden grundlegenden Prinzipien – Glättung und Grobgitterkorrektur – der algebraischen Mehrgitterverfahren (AMG), welche zu den hierarchischen Verfahren gehören und Basis für viele effiziente Löser darstellen. Die Gruppe um Dr. Klaus Stüben und Dr. Tanja Clees im Fraunhofer SCAI entwickelt moderne AMG-Verfahren und realisiert diese in der Softwarebibliothek SAMG, welche bereits in vielen praktisch relevanten Softwarepaketen zur Simulation naturwissenschaftlich-technischer Prozesse im Einsatz ist. Beispiele für Anwendungsbereiche sind die Ölreservoirsimulation, die Gießsimulation, die Analyse von mechanischen Spannungen und Verzerrungen, die elektrochemische Simulation, die Halbleiter- und Schaltungssimulation sowie die Simulation der elektromagnetischen Verträglichkeit. Einige Beispiele finden sich in Abbildung 3.

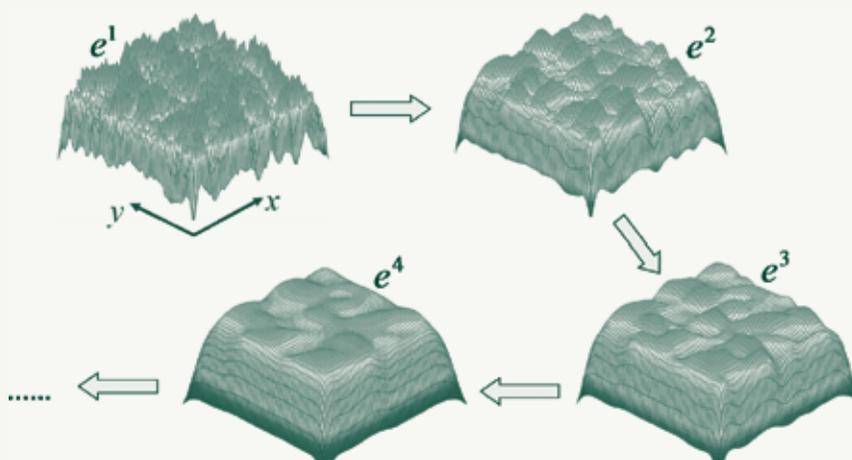


Abbildung 1. Funktionsweise algebraischer Mehrgitterverfahren: Glättung der Fehler, hier ausgehend von einer zufällig gewählten Startlösung und ihrem Fehler  $e_1$  zu glatter (jedoch nicht wesentlich kleiner) werdenden Fehlern  $e_2, e_3, e_4, \dots$

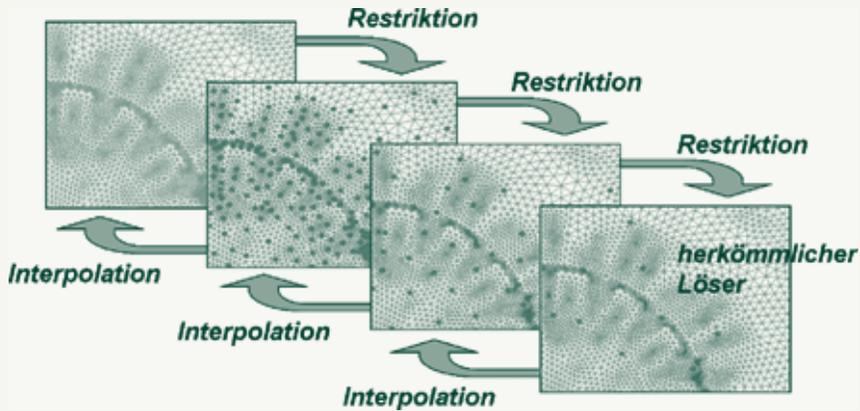


Abbildung 2. Funktionsweise algebraischer Mehrgitterverfahren: Grobgitterkorrektur über eine schrittweise Vergrößerung vom Ausgangsproblem auf dem feinsten Gitter (links oben) zu einem groben Problem mit nur wenigen Punkten (rechts unten), welches mit einem herkömmlichen Löser (Gaußverfahren) behandelt werden kann.

Auf den größeren „Leveln“ wird basierend auf algebraischen Informationen das dort zu lösende Problem automatisch berechnet. Die Transferoperatoren (Restriktion und Interpolation) sind ebenfalls algebraisch bestimmt.

## Robust Design

Ein wesentlicher Vorteil stark beschleunigter Simulationen liegt darin, dass diese die Analyse von Parameterabhängigkeiten und die Optimierung der untersuchten Prozesse und Produkte erlauben. Hierzu sind nämlich eine ganze Reihe von einzelnen Simulationen notwendig, um die sogenannten Design-Parameter analysieren bzw. optimal einstellen zu können. Unter Design-Parametern versteht man hier zum Beispiel Prozessparameter, wie Kräfte, Geschwindigkeiten oder Temperaturen, Materialparameter, wie Dichten oder Mischungsverhältnisse, oder auch Parameter, welche geometrische Verhältnisse beschreiben, wie Dicken, Längen oder Winkel.

Aktuell gewinnt insbesondere das Thema „Robust Design“ rasant an Bedeutung. Hier geht es nicht nur um die „klassische“ Optimierung

von Prozessen und Produkten, sondern um die möglichst effiziente Bestimmung von Designs, welche sich auch dann noch möglichst optimal verhalten, wenn realistische Prozess-, Material- bzw. Geometrieschwankungen einbezogen werden. Eine von Dr. Clees seit 2007 geleitete Gruppe am SCAI beschäftigt sich mit der Entwicklung innovativer Softwarewerkzeuge zum Robust Design und insbesondere den Themenkomplexen

- > Stabilität: Reaktionen von Simulationsmodellen auf kleinste Änderungen (im Modell bzw. der numerischen Lösung) und Rückverfolgung von Instabilitäten zu ihren möglichen Ursachen, insbesondere im Automobilcrash-Bereich.
- > Sensitivität: Reaktionen wichtiger Eigenschaften von Prozessen / Produkten auf Parameteränderungen und Klassifizierung einflussreicher Parameter.
- > effiziente Analyse, Kompression, Interpolation und Visualisierung von Simulationsresultaten auf hochaufgelösten Rechengittern.
- > Metamodellierung und robuste multikriterielle Optimierung, z. B. zum Austarieren von Gewichtseinsparungen gegen Sicherheits- und Komfortaspekte.

Beispielhaft seien hier Anwendungen aus dem Automobilbereich (Crash, Umformen, Gießen, Katalysatoren usw.) und dem Halbleitbereich genannt, siehe auch Abbildungen 3 und 4.

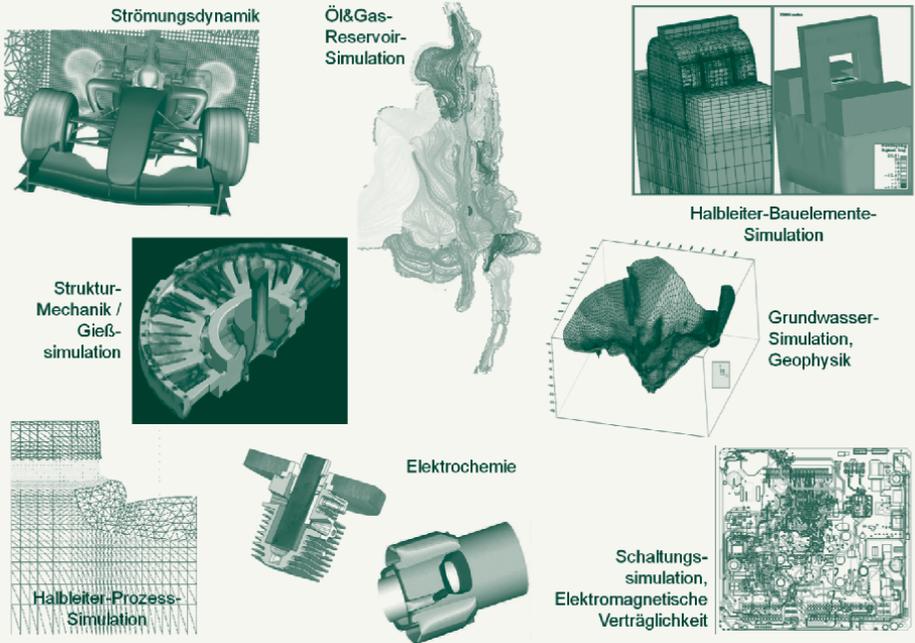


Abbildung 3. Einige Anwendungen in den Bereichen „schnelle Gleichungslöser“ bzw. „Robust Design“.

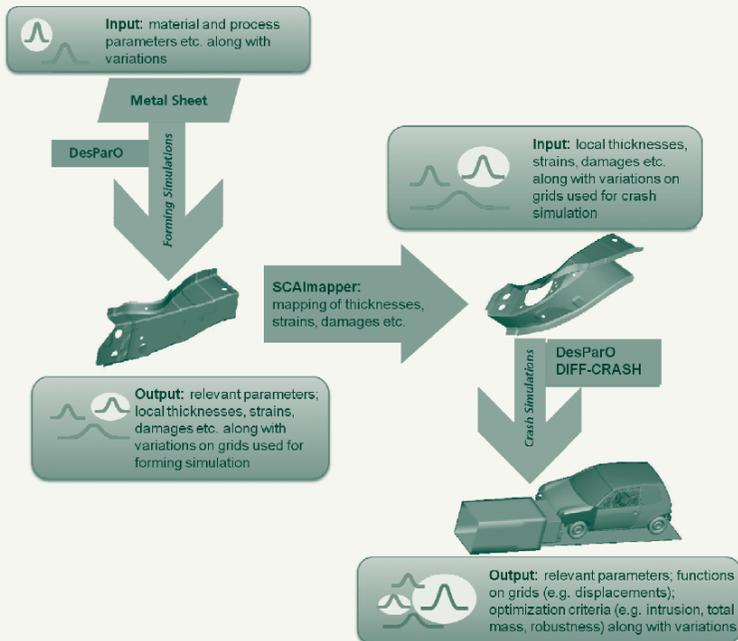


Abbildung 4. Robust Design (angedeutet) am Beispiel der Prozesskette Umformsimulation zur Crashsimulation: die Themenkomplexe Stabilität, Sensitivität und robuste multikriterielle Optimierung werden durch die in der Gruppe „Robust Design“ entwickelten Tools DesParO und DIFF-CRASH behandelt. Der effiziente Umgang mit Simulationsergebnissen auf hochaufgelösten Rechengittern stellt eine besondere Spezialität der Gruppe dar.

## Das Flugzeugobservatorium SOFIA – Infrarotastronomie von der Stratosphäre aus Dipl.-Ing. Franziska Harms

SOFIA, das Stratosphären Observatorium für Infrarot Astronomie, ist ein Flugzeugobservatorium, mit dem das Weltall im Infrarot- und Submillimeter-Wellenlängenbereich erforscht werden soll.

Die Infrarotastronomie ist ein relativ neues Forschungsgebiet, das erst in den letzten 50 Jahren entwickelt wurde. Durch sie erhofft man sich, Gebiete und Objekte des Weltalls zu untersuchen, die im



Quelle: NASA / DLR

sichtbaren Wellenlängenbereich nicht zu beobachten sind. Der infrarote Spektralbereich ist etwa zehnmals größer als der sichtbare Wellenbereich und schließt bei einer Wellenlänge von etwa 700 nm an ihn an. Er wird unterteilt in nahes Infrarot (700 nm – 3  $\mu\text{m}$ ), mittleres Infrarot (3  $\mu\text{m}$  – 30  $\mu\text{m}$ ) und fernes Infrarot (40  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$ ). Der Submillimeterbereich (300  $\mu\text{m}$  – 1 mm) liegt zwischen dem Infraroten und den Radiowellen. Eine große Rolle bei Beobachtungen mit SOFIA spielen vor allem kalte und kühle Objekte, wie

junge Sterne vor dem Zünden der Kernfusion oder protoplanetare Scheiben, in denen sich Exoplaneten entwickeln könnten. Deren Temperatur reicht noch nicht aus, um visuelles Licht abzustrahlen, ihre Emission findet im Infraroten statt. Da die Infrarotstrahlung interstellare Staubwolken beinahe ungehindert durchdringt, können Objekte, die sich hinter oder in Staubwolken befinden, beobachtet werden. Dazu gehören insbesondere kollabierende Systeme wie Schwarze Löcher, Zentren von aktiven Galaxien und Sternentstehungsgebiete. Von besonderer Bedeutung für die Beobachtungen sind außerdem sehr weit entfernte Objekte aus der Frühzeit des Weltalls, deren optische und UV-Spektrallinien aufgrund der Expansion des Universums in den fernen Infrarotbereich „rotverschoben“ sind [1].

Als Beispiel sind in Abbildung 1 Aufnahmen des Pferdekopfnebels im sichtbaren Wellenlängenbereich, im nahen Infraroten und im mittleren Infraroten dargestellt. Eine größere Anzahl von meist kühleren Sternen können im Bild erkannt werden, wenn man von Beobachtungen im Sichtbaren auf nahes Infrarot übergeht, da Staubwolken transparent werden. Beobachtet man im mittleren Infrarot, kann man bereits das Leuchten des kühlen Staubs und damit die Strukturen der Staubwolken wahrnehmen.

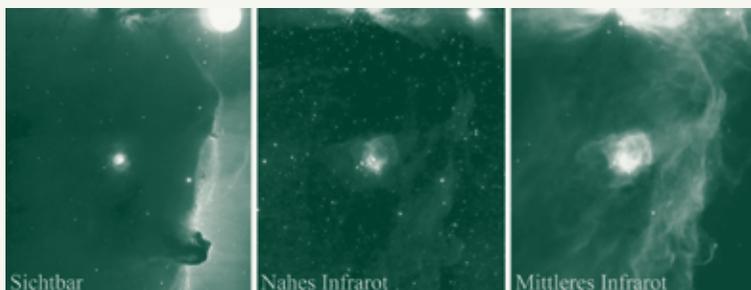


Abbildung 1. Der Pferdekopfnebel aufgenommen im sichtbaren Wellenlängenbereich, im nahen Infraroten und im mittleren Infraroten. Quelle: NASA/Caltech.

Die Schwierigkeit bei Beobachtungen von Infrarotquellen von der Erde aus liegt darin, dass unsere Atmosphäre lediglich einige kleinere Bereiche des infraroten Lichtes durchlässt. Die Infrarotstrahlung wird hauptsächlich von den Wasserdampfmolekülen der Erdatmosphäre absorbiert. Nur in engen Fenstern unter  $20\ \mu\text{m}$ , im Submillimeterbereich und bei sehr guten Wetterbedingungen ist eine Beobachtung möglich. Da sich der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre vor allem auf die Troposphäre konzentriert, sind Infrarotteleskope an sehr hochgelegenen Orten oder in Ballonen, Flugzeugen oder auf Satelliten stationiert. SOFIA wird seine Messungen in der Stratosphäre bei einer Flughöhe zwischen 12 und 14 km durchführen und befindet sich somit oberhalb von 85 % der Atmosphäre und von mehr als 99 % des Wasserdampfs [2]. Abbildung 2 stellt den deutlichen Unterschied der Atmosphärendurchlässigkeit für die Observatorien auf dem Mauna Kea (Hawaii) und an Bord von SOFIA dar.

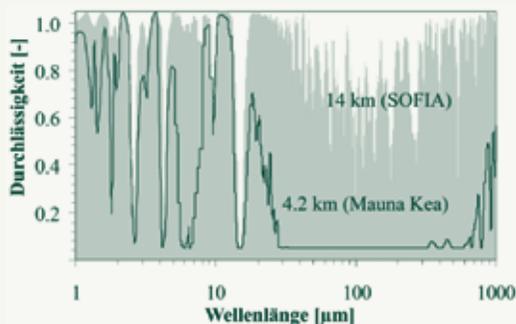


Abbildung 2. Durchlässigkeit der Atmosphäre für die Observatorien auf dem Mauna Kea (Hawaii) und an Bord von SOFIA. Quelle: NASA/Erickson.

Von der Atmosphäre ungestörte Beobachtungen kann man allerdings nur von Satelliten und Raumstationen durchführen. Bei diesen Weltraumteleskopen muss man aber schon viele Jahre vor dem Starttermin das Instrumentenkonzept festlegen. Bei SOFIA können die wissenschaftlichen Instrumente ständig mit den neusten Technologien versehen werden. Zusätzlich lässt sich eine eventuelle Re-

paratur oder Wartung leicht gestalten. Dadurch, dass eine Vielzahl von Instrumenten nacheinander eingesetzt werden kann, ist es möglich, unterschiedliche astronomische Problemstellungen zu bearbeiten. Insgesamt sind bereits neun wissenschaftliche Instrumente für die erste Beobachtungsphase ausgewählt und gebaut worden. Zwei davon kommen von deutschen Institutionen.

Ein weiterer Vorteil der Flugzeugastronomie ist der flexible Einsatz des Teleskops weltweit. SOFIA kann auf jedem größeren Flughafen starten und landen und somit regional auftretende Ereignisse beobachten. Dazu gehören z. B. Sternbedeckungen durch Asteroiden, Planeten, Monde und Objekte im Kuipergürtel. Zur Beobachtung der nördlichen Hemisphäre wird SOFIA, wie schon die beiden Vorgängerflugzeuge Lear Jet und Kuiper Airborne Observatory, von NASA Zentren in Kalifornien betrieben. Um die südliche Hemisphäre zu beobachten, wird das Flugzeug von Neuseeland aus starten.

Das Teleskopsystem ist in den hinteren Teil eines Flugzeugs des Typs Boeing 747SP (verkürzte Version) eingebaut. Oberhalb des Teleskopspiegels ist eine Öffnung in die Außenhaut des Flugzeugs geschnitten, die bis zum Erreichen der Beobachtungsflughöhe mit einer Rolltüre abgedeckt bleibt. Das Teleskop ist nach dem Öffnen den Umgebungsbedingungen ausgesetzt: der relativ niedrigen Temperatur (ca.  $-60^{\circ}\text{C}$ ), dem niedrigen Druck (ca.  $1/5$  bar) und der mechanischen Belastung durch Wind und Strömungsturbulenzen, die durch die Öffnung im Flugzeugrumpf bei Geschwindigkeiten von etwa  $900\text{ km/h}$  entstehen [3].

Ein Druckschott trennt den offenen Bereich von der Passagierkabine, in der die Instrumente, Wissenschaftler und die Missionskontrolle untergebracht sind. Die Wissenschaftler haben während des Beobachtungsfluges permanenten Zugang zum Instrument. Im Rahmen des Programms für Bildungs- und Öffentlichkeitsarbeit ist im vorderen Teil des Flugzeuges Platz für Schüler, Lehrer, Journalisten und Politikern vorgesehen, um Interesse und Begeisterung für Tech-

nologie und Wissenschaft zu vermitteln. In Abbildung 3 ist das Innenleben von SOFIA schematisch dargestellt.

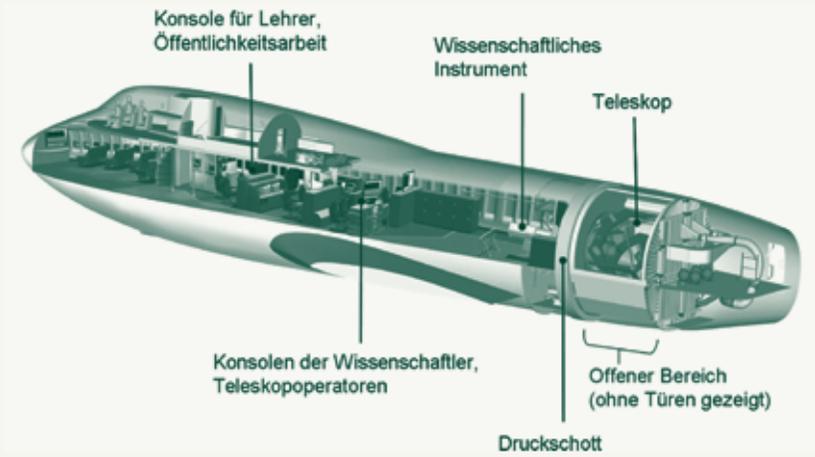


Abbildung 3. Das Innenleben von SOFIA. Quelle: USRA.

Das Teleskop ist ein Cassegrain-System mit Nasmyth-Tubus. Es besteht aus einem parabolischen Primärspiegel (effektiver Durchmesser 2,5 m), einem hyperbolischen Sekundärspiegel (Durchmesser 35 cm) und einem planen Tertiärspiegel, der die eintreffenden Strahlen zu den wissenschaftlichen Instrumenten ins Kabineninnere umleitet. Diese Konfiguration erlaubt eine große Brennweite, d.h. eine hohe Auflösung, trotz der relativ geringen, in den Flugzeugrumpf eingepassten Bauhöhe.

Die optischen Elemente des Teleskops sind in eine Trägerstruktur aus Kohlefaser verstärktem Kunststoff integriert (Abbildung 4). An dieser hantelförmigen Struktur, deren Gesamtgewicht im Druckschott gelagert ist, sind außerdem Gegengewichte, das Antriebssystem des Teleskops und Sensoren zur Ausrichtung untergebracht. Ein spezielles Stoßdämpfersystem mit Luftfedern schützt das Teleskop vor den Flugzeugvibrationen [4].

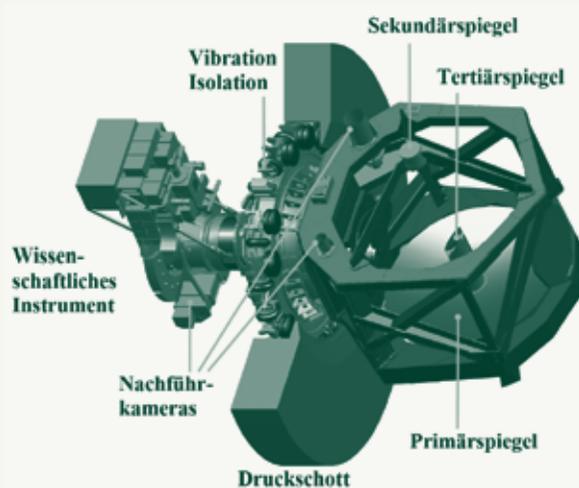


Abbildung 4. Das SOFIA Teleskopsystem. Quelle: DLR.

Das Teleskop ist durch ein hydrostatisches Kugellager von den Drehbewegungen des Flugzeuges entkoppelt und ermöglicht eine hochgenaue, inertielle Ausrichtung und Nachführung des Teleskops in drei Achsen. Die Lageregelung stützt sich dabei auf drei faseroptische Gyroskope und drei Nachführkameras mit unterschiedlichen Gesichtsfeldern. Eine dieser Kameras benutzt einen Teil des optischen Lichtstrahls an der Brennebene des Teleskops, während die beiden anderen Kameras eine eigenständige Optik besitzen.

Trotz der Bemühungen und Vorkehrungen, Störungen weitgehend zu minimieren, treten dennoch Vibrationen und kleine Materialdeformationen an der Teleskopstruktur und -mechanik auf, die die Ausrichtgenauigkeit beeinflussen. Da eine stabile Ausrichtung des Teleskops für die wissenschaftlichen Beobachtungen entscheidend ist, müssen diese Störungen verstanden und ausgeglichen werden. Das theoretische Konzept, welches aufgestellt wurde, um Störungen

zu kompensieren und innerhalb des Regelungskreises zu korrigieren, wird nun während der Inbetriebnahme des Observatoriums in die Praxis umgesetzt. Für den späteren Routinebetrieb ist eine Stabilität von 0,2 Bogensekunden gefordert.

SOFIA ist ein deutsch-amerikanisches Gemeinschaftsprojekt. Es wird zu 80 % von der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA und zu 20 % von der deutschen Raumfahrtagentur DLR finanziert. Die Aufteilung betrifft ebenfalls die Kosten für die Betriebszeit, die auf 20 Jahre angelegt ist, sowie die Beobachtungszeiten des Observatoriums. Der deutsche Beitrag umfasst dabei das komplette Teleskopsystem – das Herz des Observatoriums, für dessen Entwicklung und Herstellung ein Konsortium der Firmen MT Aerospace und Kayser-Threde verantwortlich waren. Der wissenschaftliche Betrieb wird auf deutscher Seite vom Deutschen SOFIA Institut der Universität Stuttgart koordiniert, auf amerikanischer Seite von der Universities Space Research Association.

Der Erstflug von SOFIA wurde nach der Flugzeugmodifikation mit eingebautem Teleskop erfolgreich im April 2007 durchgeführt. In der anschließenden Flugtestserie mit noch geschlossener Türe wurde auch das Teleskop unter realen Flugbedingungen erfolgreich aktiviert. Der Primärspiegel wurde im Juni 2008 erstmals mit Aluminium beschichtet, und mehrere Verifikationstests wurden Ende des Jahres am Boden durchgeführt. Als nächstes steht einer der spannendsten Momente in der Entwicklung des Observatoriums an: die ersten Flugtests mit geöffneter Türe und die ersten wissenschaftlichen Beobachtungen im Flug.

## Ref n

- [1] E.Becklin et al.: Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA), Infrared Spaceborne Remote Sensing and Instrumentation XV, Proc. SPIE 6678, 2007
- [2] R.Titz, H.-P.Röser (Hrsgb.): SOFIA – Astronomie und Technologie im 21. Jahrhundert, Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin, 1998
- [3] H.J.Kärcher: Airborne Environment – a Challenge for Telescope Design, Airborne Telescope Systems, Proc. SPIE 4014, 2000
- [4] E. Sust et al.: Manufacturing and integration of the SOFIA suspension assembly, Airborne Telescope Systems, Proc. SPIE 4857, 2002



# Generation of Extreme Wave Sequences – From Capsizing Ships to Offshore Structures in Hurricanes

Dr. Janou Hennig

## Abstract

Ocean waves are a fascinating subject. They are modeled in wave basins to quantify their effect on all kinds of ships and offshore structures. This modeling requires the consideration of various phenomena such as the non-linear character of real ocean waves, wave groups and short-crestedness. These aspects are described in this paper and their complex of challenges is highlighted by examples.

## Fascinating water waves

Water waves and in particular ocean waves are a fascinating subject which can be probably experienced most directly by surfers riding the very large swells on the shelf of our oceans (Figure 1).



*Figure 1: Ocean waves are fascinating – as experienced most directly by surfers – and are also awaking our respect for their violent nature. The photos were taken in Hawaii (left) and during full scale model testing at the Large Wave Tank in Hanover (Kühnlein (1997)).*

This fascination is also related to the amount of energy manifested when ocean waves strike rocks or human built structures accompanied by wave breaking and the sound of masses of water flooding around the obstacle. Situations such as given in Figure 1 awake also our respect.

In Hurricanes, however, waves might increase to unimaginable size and shape due to very high wind speeds, exciting waves from sometimes almost opposing directions. This lead to massive damages of offshore structures in the Gulf of Mexico as documented after several severe Hurricanes during the recent years (e. g. Rita, Ivan and Katrina). A search in the world wide web reveals numbers of impressive pictures.

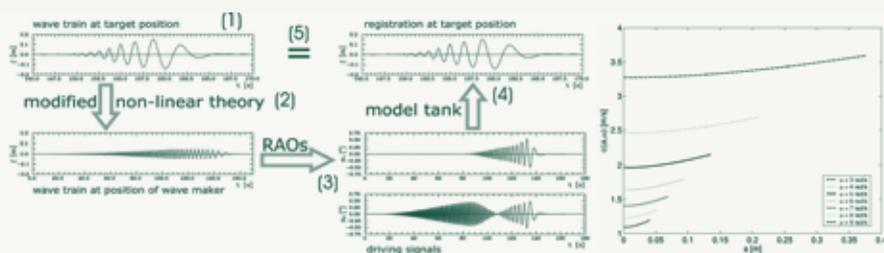


Figure 2: Process of deterministic wave generation. Right hand: Wave celerity as a function of wave "amplitude" according to Stokes Third Order wave theory. The higher the frequency the steeper the wave and the more pronounced is the effect of phase speed increasing with wave amplitude.

### Ocean waves in model testing

Besides the illustrated ambivalent fascination caused by ocean waves, engineers are most interested in the motions and forces waves induce on ships and offshore structures such as FPSO's, mooring systems, platforms and others in order to judge dangers and survivability in rough environments quantitatively. During the years, many theoretical, numerical and experimental approaches

have been developed. In the following, we will focus on model testing techniques where ocean waves are modeled by different means and up to a certain required accuracy.

Waves in a model basin have to be generated to represent their realistic characteristics such as shape, height, period and spectrum (see Hennig (2005)). In general, it is not possible to model all parameters at the same time, as will be seen further below. However, if we aim at generating a wave “deterministically” – i. e. according to required parameters and at a predefined time and position in the basin – we have to follow the approach given in Figure 2 step by step:

1. Definition of the target wave train: The target position in time and space is selected – for example the position where the ship encounters the wave train at a given time. At this location, the target wave train is designed – based on defined parameters or a wave record.
2. Upstream transformation  $\zeta(t, x_{\text{target}}) \rightarrow \zeta(t, x_0)$ : The target wave train is transformed upstream to the position of the wave maker.
3. Calculation of control signals: The corresponding control signals are calculated using adequate transfer functions of the wave generator.
4. Performance of model tests: The control signals are used to generate the specified wave train which is measured at selected positions in the tank. E. g. a ship model arrives at the target position by the corresponding target time (measured from the beginning of wave generation). Registration of the wave sequence at the target position confirms the compliance with the target wave parameters.

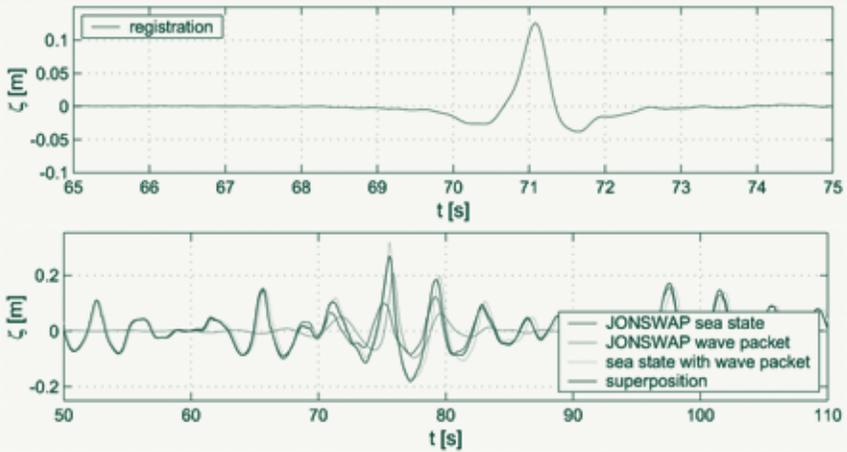


Figure 3: Top: Registration of a transient wave packet with pronounced vertical asymmetry due to wave steepness ( $ak = 0.44$ ). Bottom: Comparison of measured water elevations of superimposed wave groups (water depth  $d = 1.5$  m): The wave maker control signals of an irregular wave sequence and a single high wave group are superimposed. Both signals are measured separately and as result of the superimposed control signals. The result is compared to the superposition of the individual registrations (“superposition” in the legend). Non-linear wave-wave interaction becomes evident as the maximum crest height is larger than the sum of both local crest heights.

The method applied for the upstream transformation of the target wave train to the position of the wave maker is crucial for the entire wave generation process as it models the propagation of the wave. Real ocean waves can be steep, and for steep waves, non-linear methods are required.

### Non-linear characteristics of ocean waves

For steeper wave trains – i. e. ratio of wave height to wave length is greater than 0.05 – application of linear wave theory is not adequate. Examples of non-linear phenomena shown by ocean waves and to be considered during model tests are given in the following:

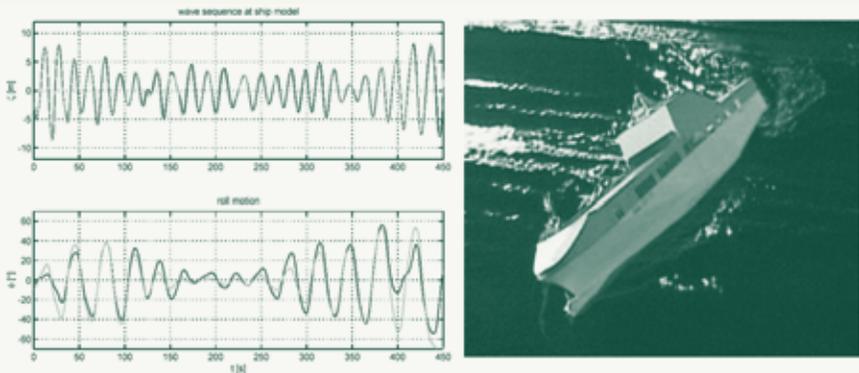
- > Dispersion depending on wave steepness: The propagation velocity increases with wave steepness which is equivalent to an increase of wave length compared to a linear wave of same frequency. Figure 2, right hand side, shows the phase velocity increase vs “amplitude” of a Stokes Third Order (Skjelbreia (1959)) wave which is not only a function of the wave frequency, but also of the wave height (elevation). Thus, the smaller the frequency (=longer the wave), and the steeper the wave, the faster is its propagation.
  
- > Lagrangian mass transport and Eulerian wave induced (reverse) current can be observed in wave tanks and deduced from wave theories: It might happen that surface water apparently flows in direction of wave propagation though a flow meter installed in deeper water indicates a velocity in opposite direction (which is also an explanation for sediment transport). This effect can be directly related to the increase of propagation speed due to wave steepness – from wave theories follows that the wave gets longer if it is superimposed with a current  $u$  in the same direction and shorter against the current:  $L = (c + u)T$ .
  
- > Non-harmonic shape: Crest-trough, crest-front (front slope) and vertical shape asymmetry increase with steepness. Figure 3 gives an example for a measured focusing wave which shows a vertical asymmetry close to the concentration point.
  
- > Wave-wave interaction (in the application sense of Stokes type perturbation expansions)
  - Wave height increases with steepness (see Figure 3) – in particular as the wave focuses it becomes narrower and up to 30 % higher than linear theory would predict which is due to second and third order terms. For uni-directional waves, this extra elevation increases with the input amplitude of the group and decreases with bandwidth.
  - Non-resonant interaction: Energy passes over from one

frequency or wave number to another which is the reason for Benjamin-Feir instabilities (Benjamin and Feir (1967)).

- Asymmetrical focussing and de-focussing of a wave group: Assuming a focus point – the so-called concentration point – a linearly describable wave group has the same – mirror-inverted – xshape at a given distance  $\Delta x$  to that point as it has at the distance  $-\Delta x$ . This is not the case for steep waves.

### Application of deterministic wave sequences for capsizing tests

As an example of the application of deterministic wave sequences, capsizing tests are considered here.



*Figure 4: Comparison of two capsizing test runs in the same deterministic wave sequence from astern inducing parametric roll ( $v = 10.4$  kn,  $\mu = 3^\circ$ ): The encounter of ship and wave train demonstrates the very good reproducibility of capsizing tests with deterministic wave sequences: The wave train is encountered under identical conditions. However, the sensitivity of capsizing processes is obvious – although the conditions and resultant motions are almost identical, the RO-RO vessel ( $GM = 1.27$  m) capsizes during the second test run only (green graph, bottom). Right hand: A RO-RO vessel – model scale 1:34 – in a high wave sequence from astern which finally leads to capsizing.*

As a consequence of parametric excitation, the roll angle increases dangerously due to non-linear processes (disturbances) which cause roll motions at half the frequency of the exciting wave. The ship rolls with twice the period of the pitch motion (which is approximately the encountered wave period). The following factors contribute to parametric roll:

- Encounter period close to one-half of the natural roll period
- Large waves
- Wave length comparable to the ship length
- Wide, flat sterns in combination with pronounced bow flare, as this increases the stability variations as the wave passes along the hull.

Apart from large container ships, also other modern ship designs are susceptible to parametric excitation such as RO-RO, RoPax, ferries and cruise vessels. An example for parametric roll due to a high deterministic wave sequence from astern ( $H_s = 9.36$  m,  $T_p = 11.66$  s) is given in Figure 4. The test conditions for the RO-RO vessel ( $GM=1.27$  m,  $v = 10.4$  kn,  $\mu = 3^\circ$ ) are simulated prior to the test (see Clauss et al. (2005)). In both test runs, the ship encounters the wave train at almost identical conditions (top) and shows a similar roll response. However, in the first test (blue graph) the ship roll motions exceed  $50^\circ$  but the capsizing occurs only in the second run (green graph). This is also an example for both the high reproducibility of capsizing tests with deterministic wave sequences and the sensitivity of the mechanism leading to capsizing. It has to be noted that in reality, a capsizing at a roll angle of more than  $50^\circ$  might have occurred though, eventually due to shift of cargo, vehicles, or engines.

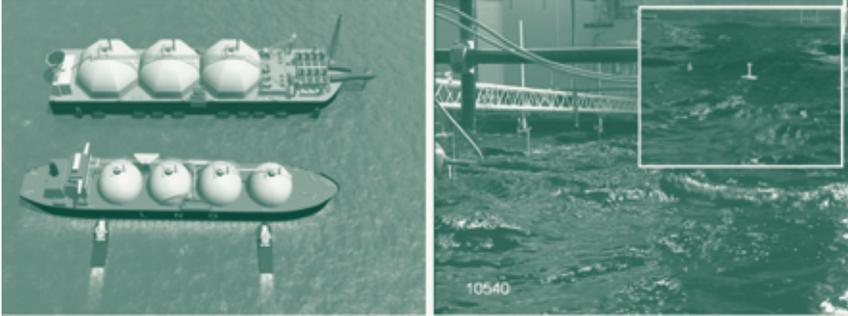


Figure 5: Left: A typical offshore situation (berthing of an LNG carrier to a moored FSRU) in which low frequency motions have to be considered. Courtesy: BHP Billiton. Right: Capsizing of a wave buoy in Hurricane Rita (simulation in MARIN's Offshore Basin).

### Wave groups

As shown in the previous section, waves cause motions of a floating or sailing object. In the example of a ship cruising at some forward speed in waves, the response up to capsizing is based on wave frequency motions.

However, a moored object in waves, such as given in Figure 5, will show combined low frequency and wave frequency motions. The wave frequency motions are related to the wave elevation and wave spectrum, while the low frequency motions are related to the wave groups and group spectrum. The wave group spectrum for a given wave spectrum (energy density or power) can be determined by three different approaches as described in Fernandes et al. (2008). Different wave realizations (different wave seeds) lead to different wave group spectra for the same spectrum, in particular in the area of the resonance frequency of the mooring system of the floater. This phenomenon will be highlighted in the following by an example.

The wave spectrum considered is a JONSWAP spectrum for a peak wave period of  $TP = 8.5$  s, a significant wave height of  $H_s = 2$  m and a peak enhancement factor of  $\gamma = 3.3$ . The spectral density is shown in Figure 6, left hand side.

At a water depth of  $d = 85$  m, this spectrum is calibrated at a refer-

ence position and different wave seeds are applied to the same wave spectrum. The corresponding wave group spectra are determined, and the spectra with the highest, lowest and same results as compared to theoretical values are presented in Figure 6 for  $H_S = 2$  m.

This shows that even for a problem related to linear waves, we have to take care which waves we generate in the basin in order to investigate a specific problem. Generating the wave spectrum with the most neutral or particularly most dangerous wave group characteristics is not an obvious task.

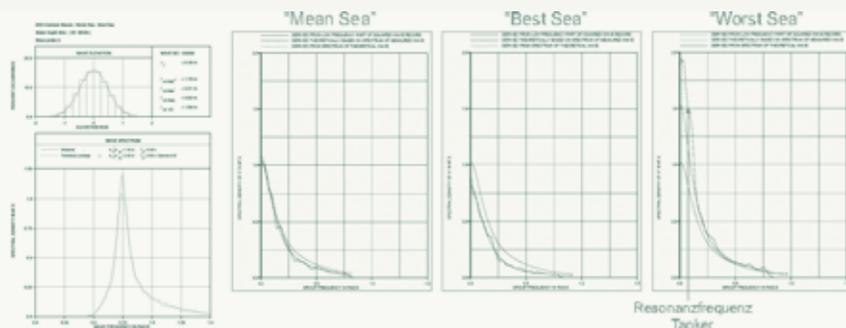


Figure 6: JONSWAP wave spectrum for a peak wave period of  $T_P = 8.5$  s, a significant wave height of  $H_S = 2$  m and a peak enhancement factor of  $\gamma = 3.3$  (same parameters for different seeds). Right hand: Wave group spectra for same spectral density and water depth, but different wave seeds.

### Real Hurricane sea states

Up to now, we have treated some non-linear and low frequency aspects of waves. However, the real world is even more complex as ocean waves use to be short-crested whereas they are often enough considered only long-crested in laboratory analyses. Usually, long-crested ocean waves are interpreted as a summation of regular wave components of different frequency, amplitude and phase (seed). In the case of short-crested waves, each component is additionally as-

signed a direction as indicated in Figure 7.

Modeling of short-crestedness in the wave basin requires many wave flaps as given in the photo in Figure 7 of MARIN's Offshore Basin. In the case of combined wind sea and swell from different directions two adjacent wave makers might be required.

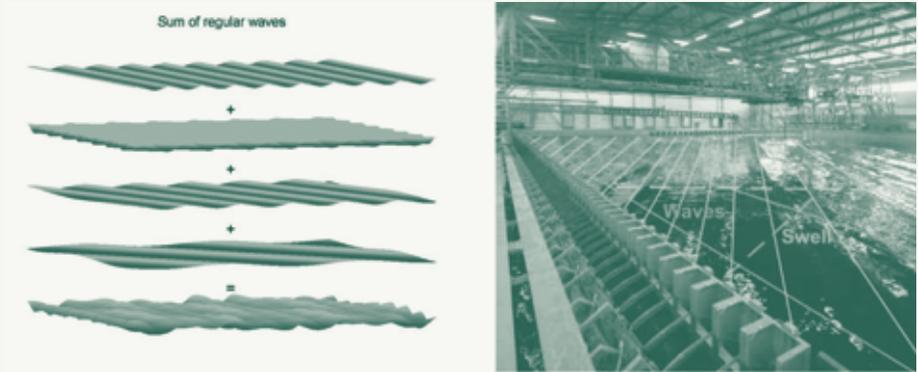
Despite all these means, it might be necessary to generate a spectrum in the basin which is directionally spread in terms of both frequency and direction at the same time (which also allows for the consideration of the fact that high frequencies are more spread). As an example, a 2D wave spectrum of Hurricane Rita is measured in MARIN's Offshore Basin. These extremely steep and spread wave conditions even lead to the capsize of a wave measurement buoy during the model test (Figure 5).

### Conclusions and perspectives

This paper gives a state-of-the-art overview of some aspects on the modeling of ocean waves for model testing in the wave basin. It can be concluded that waves are complex enough to require different advanced techniques to model the waves purposely for the focus of investigation. As examples, the following phenomena are discussed:

- > Non-linear modeling of steep wave sequences for deterministic capsizing tests (wave frequency motions).
- > Dependence of wave group spectra on the wave seed for the same power spectrum (low frequency motions of moored vessels).

Directional spreading of real sea states as extreme Hurricane conditions for the future, a variety of interesting wave problem will wait to be revealed by enthusiastic engineers and researchers.



*Figure 7: Left hand: Model of short-crested random waves in the ocean and basin. Right hand: Generation of long- and short-crested wave systems by means of adjacent multi-flap wave makers in MARIN's Offshore Basin.*

## References

- > T. B. Benjamin and J. E. Feir. The disintegration of wave trains on deep water. *Journal of Fluid Mechanics*, 27(3):417 – 430, 1967.
- > G. F. Clauss, J. Hennig, H. Cramer, and K.-E. Brink. Validation of Numerical Motion Simulations by Direct Comparison with Time Series from Ship Model Tests in Deterministic Wave Sequences. In *OMAE 2005 – 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Halkidiki, Greece, 2005. OMAE2005-67123.
- > Antonio Carlos Fernandes, Janou Hennig, Marcio Domingues Maia, Jr., Hans Cozijn, and Joel Sena Sales, Jr. Worst Sea – Best Sea Wave Group Spectra from Random Sea States. *OMAE*, 2008. OMAE2008-57821.
- > R. S. Gibson, C. Swan, and P. S. Tromans. Fully Nonlinear Statistics of Wave Crest Elevation Calculated Using a Spectral Response Surface Method: Applications to Unidirectional Sea States. *Journal Of Physical Oceanography*, Volume 37, 2007.
- > J. Hennig. Generation and Analysis of Harsh Wave Environments. Dissertation, Technische Universität Berlin (D 83), 2005.
- > W. Kühnlein. Seegangsversuchstechnik mit transientser Systemanregung. Dissertation, Technische Universität Berlin (D 83), 1997.
- > L. Skjelbreia. Gravity Waves – Stokes' Third Order Approximation. California Research Corporation, 1959.



# Statistische Signalverarbeitung für Kommunikationssysteme

Dr.-Ing. Michael Joham

Die moderne Telekommunikation wäre ohne die Methoden der statistischen Signalverarbeitung unmöglich. Die physikalischen Eigenschaften der Datenübertragung (z. B. von Sprachsignalen, Videosignalen, digitalisierte Dokumente) über Kabel, Glasfaser oder Luft führen zu einer Überlagerung von Störsignalen, dem so genannten thermischen Rauschen und den Interferenzsignalen. Insbesondere das thermische Rauschen kann nur statistisch modelliert werden.

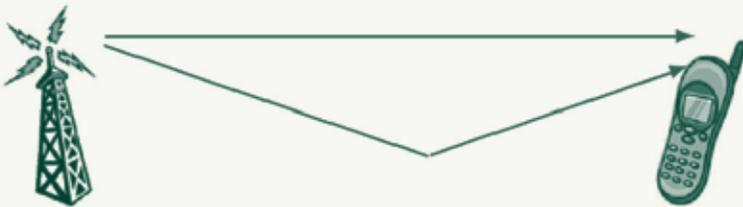


Abbildung 1. Direkter Pfad und Reflexion

In einem Kommunikationssystem mit digitalen Daten (z. B. DSL, Mobilfunk, Digitalradio und GPS) wird die Information zuerst codiert, d.h. es wird ihr Redundanz hinzugefügt. Danach werden die codierten Daten einer hochfrequenten Schwingung aufgeprägt (moduliert) und übertragen. Während dieser Übertragung wird die informationstragende Schwingung in ihren Eigenschaften verändert. Der Empfänger nimmt die stark abgeschwächte Schwingung, aber auch verzögerte Kopien auf (z. B. durch Reflexion wie in Abbildung

1). Das verrauschte Empfangssignal soll nun benutzt werden, die übertragenen Daten am Empfänger wiederzugewinnen. Für die dafür notwendigen Bearbeitungsschritte ist die moderne statistische Signalverarbeitung von essentieller Bedeutung. Erstens muss der Empfänger mit dem Sender synchronisiert werden. Zweitens müssen die Eigenschaften des Übertragungsmediums bestimmt werden, um das Empfangssignal korrekt interpretieren zu können. Abbildung 2 zeigt den Fehler bei ungenügender Modellierung. Nicht nur die Eigenschaften des direkten Pfades sondern auch der Einfluss der empfangenen Replika muss berücksichtigt werden. Drittens muss mithilfe des statischen Modells, den zuvor bestimmten Systemparametern und dem Vorwissen (z. B. Datenformat, Art der Redundanz durch Codierung) die eigentliche Aufgabe der Datendetektion bzw. Decodierung gelöst werden. Diese grundlegenden Problemstellungen der statistischen Signalverarbeitung werden somit etwa in heutigen DSL-Modems und Mobiltelefonen gelöst.

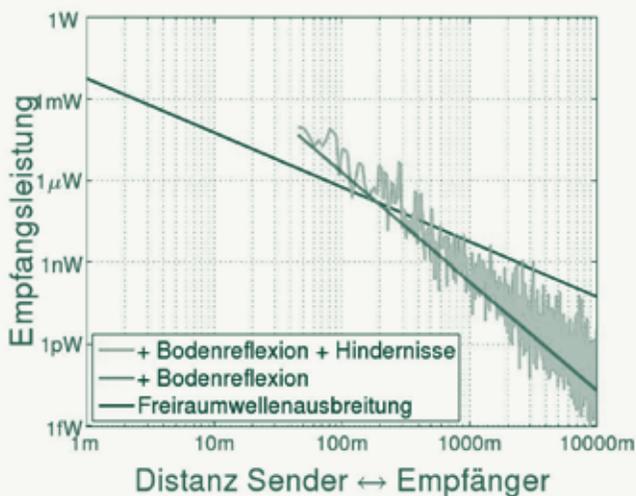


Abbildung 2. Einfluss der Reflexion, Beugung und Abschattung

Klassische Systeme trennen die Daten für unterschiedliche Nutzer über die Zeit oder die Frequenz (siehe Abbildung 3 für Frequenzvielfachzugriff). So kann z. B. beim Zeitvielfachzugriff die Information für den ersten Nutzer in periodischen Zeitblöcken übertragen werden, während die Daten für den zweiten Nutzer in den Pausen gesendet werden.



Abbildung 3. Frequenzvielfachzugriff zur Datentrennung

Zukünftige Kommunikationssysteme werden jedoch auch die Möglichkeit nutzen, die Signale über den Raum zu trennen. Somit kann der Empfänger die Datensignale von unterschiedlichen Sendern schon dadurch trennen, dass er mithilfe mehrerer Antennen raumselektiv empfängt (wie in Abbildung 4). Der entscheidende Vorteil des Raumvielfachzugriffs ist es, dass die unterschiedlichen Sender ihre Daten gleichzeitig im selben Frequenzband übertragen können und dass diese trotzdem vom Empfänger komplett getrennt werden können. Somit erlaubt der Einsatz des Raumvielfachzugriffs eine bedeutende Erhöhung der möglichen Gesamtdatenrate des Systems. Die Verwendung mehrerer Antennen führt zusätzlich zu einer erhöhten Unempfindlichkeit gegenüber dem thermischen Rauschen. Deshalb ist die für eine geforderte Übertragungsqualität notwendige Empfangsleistung geringer als bei klassischen Einantennenempfängern und dementsprechend kann die Sendeleistung reduziert werden. Diese Eigenschaft ist insbesondere unter den Aspekten

Energieverbrauch und Belastung durch elektromagnetische Felder von großem Vorteil.

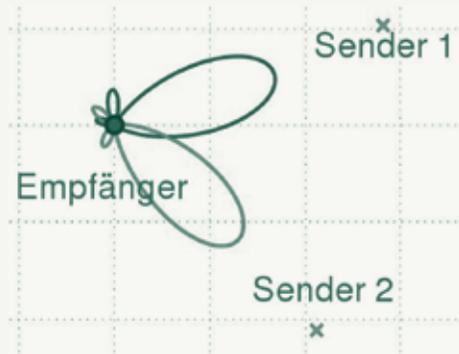


Abbildung 4. Raumvielfachzugriff zur Nutzertrennung

Das Ziel der aktuellen Forschung ist es, den Raumvielfachzugriff auch für Kommunikation von einem Sender zu mehreren Empfängern bzw. von mehreren Sendern zu mehreren Empfängern zu ermöglichen. Da die Bestimmung der Systemparameter an den Sendern schwierig ist, wird über effiziente Verfahren nachgedacht, um die notwendigen Systemparameter von den Empfängern zu den Sendern zu übermitteln. Da die Information über die Parameter aufgrund der endlichen Bandbreite im Rückkanal naturgemäß Fehler beinhaltet, müssen diese Fehler im Entwurf der räumlichen Nutzertrennung des Senders mithilfe der Methoden der statistischen Signalverarbeitung berücksichtigt werden.

In zukünftigen Satellitenkommunikationssystemen sollen hunderte Antennenelemente zum Einsatz kommen. Dadurch wird es möglich sein, die vielen Nutzer europaweit in kleinere lokal begrenzte Gruppen zu unterteilen (siehe Abbildung 5), da die verschiedenen Signalanteile durch die hohe Antennenzahl sehr stark gebündelt werden können. Die Schwierigkeit hierbei wird sein, diese Unterteilung adaptiv zu gestalten, um auf unterschiedliche Nutzerkonzentrationen

nen und -bewegungen derart reagieren zu können, sodass die eingeschränkten Ressourcen des Satelliten (Sendeleistung und Rechenkomplexität) bestmöglich eingesetzt werden. Insbesondere die hohe Dimensionalität der Problemstellung aufgrund der hohen Antennenzahl stellt eine Herausforderung dar.

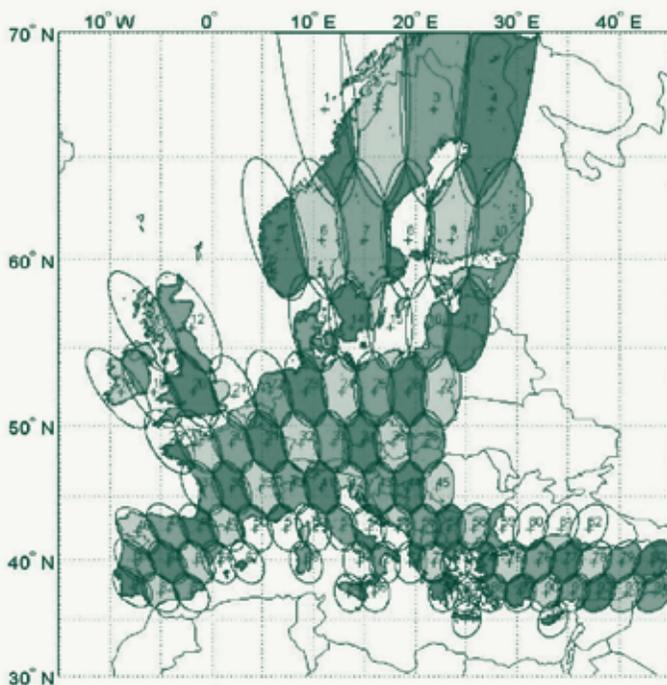
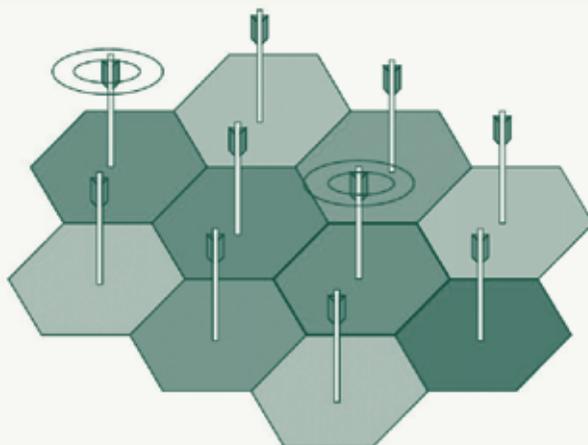


Abbildung 5. Unterteilung Europas durch Raumvielfachzugriff am Satelliten

Derzeitige Mobilfunksysteme (GSM, UMTS) sind in Zellen unterteilt. Die mobilen Nutzer einer Zelle werden von einer unbeweglichen Basisstation bedient. Dabei ist sicherzustellen, dass sich die Nutzer in unterschiedlichen Zellen nicht stören. Ziel der aktuellen Forschung ist eine Kooperation der Basisstationen, um speziell die Bedingungen der Nutzer an den Zellrändern zu verbessern. So könnten z. B. die beiden hervorgehobenen Basisstationen in Abbildung 6 bei der Datenübertragung an die Nutzer der dazwischen liegenden Zelle mithelfen. Diese Aufgabenstellung ist besonders schwierig, da die benachbarten Basisstationen nur eine sehr ungenaue Kenntnis der Systemparameter der zu bedienenden Zelle besitzen.



*Abbildung 6. Kooperation mehrerer Basisstationen*

# Herausforderungen dezentraler Energiebereitstellung in zukünftigen Stromnetzen

## Dr.-Ing. Martin Kautz

### Motivation

Die Diskussion um Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Klimaerwärmung und Treibhauseffekt ist spätestens seit der Verabschiedung des Kyoto-Protokolls in aller Munde. Der Handlungsbedarf ist groß. Deshalb findet der Aufbau von dezentralen Energieerzeugungsstrukturen zunehmend Beachtung in energie- und umweltpolitischen Diskussionen. Die Bundesregierung greift dieses Themenfeld ebenfalls in ihrer aktuellen Förderpolitik auf. Weiterhin wird das Thema durch die Forderung nach höherer Energieeffizienz getrieben. Nicht zuletzt gibt es volkswirtschaftliche Bedürfnisse nach Lösungen. Sollte sich der dezentrale Ansatz durchsetzen, so besteht bei der individuellen Strom-, Wärme- und Kältebereitstellung die Chance, diese mit höchsten Anlagenwirkungsgraden bei niedrigsten Emissionen zu erreichen. Im Vergleich zur derzeitigen zentralen Erzeugung ergeben sich Wertschöpfungsvorteile für regionale Anbieter. Dezentrale Energieerzeugungsstrukturen verlangen aber nicht nur nach der Entwicklung geeigneter Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsmodule, sondern vor allem auch nach Veränderungen im Stromnetz. Auf die damit zusammenhängenden Fragen soll im Folgenden eingegangen werden.

### Stand der Technik

Die Sonne ist für die Erde der Hauptlieferant an Energie. Mit einer mittleren Einstrahlungsdichte von über  $100 \text{ W/m}^2$  bzw. einer mittleren Globalstrahlung von über  $1000 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  wäre für die Strom-

versorgung Deutschlands eine Fläche von ca. 4.000 km<sup>2</sup> ausreichend. Leider ist dieses Angebot nicht direkt nutzbar, es muss umgewandelt werden, dabei treten (Umwandlungs-) Verluste auf. Hinzu kommt das stark fluktuierende Angebot durch Jahreszeit, Tageszeit und Wetterlage.

Diese Probleme gibt es bei der Nutzung fossiler Energieträger nicht. In fossilen Energieträgern (Kohle, Erdöl oder Erdgas) findet man die vor Jahrmillionen gespeicherte Sonnenenergie. Durch den verstärkten Abbau und die anschließende Verbrennung (Oxidation) der fossilen Energieträger seit der Industrialisierung (19. Jh.) gelangt immer mehr CO<sub>2</sub> in die Erdatmosphäre. Seit ca. 500.000 Jahren ist der Kohlendioxidanteil in der Erdatmosphäre etwa konstant und schwankt zwischen 200 und 300 ppmV. Inzwischen werden Kohlendioxidkonzentrationen von über 380 ppmV erreicht (Abb. 1). Mit einem weiteren Anstieg ist zu rechnen. So wertet die International Energy Agency (IEA) im World Energy Outlook 2008 zwei zukünftige Szenarien mit einem CO<sub>2</sub>-Anteil von 450 und 550 ppmV aus [4].

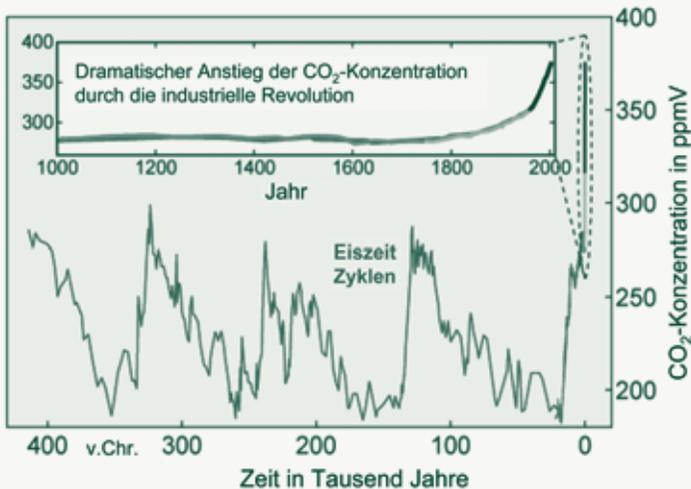


Abb. 1: CO<sub>2</sub>-Anteil in der Erdatmosphäre [3]

Die Stromerzeugung in Deutschland und Europa wird aktuell von zentralen Kraftwerken dominiert. So wurden 2008 57,5 % der Nettostromerzeugung in Deutschland, das sind 345,6 TWh, in konventionellen Kraftwerken durch die Verbrennung von Kohle, Öl und Gas bereitgestellt [1]. Damit gelangten 2008 ca. 764 Mio. t CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre. Hinzu kommt, dass über 50 % der Elektroenergie aus Energieträgern gewonnen wird, deren Reichweite mehr oder weniger begrenzt ist.

Die IEA gibt in ihrem World Energy Outlook 2008 [4] an, dass im Jahr 2020 noch drei Viertel des geplanten Strombedarfs mit bereits heute bestehenden Kraftwerken gedeckt werden. Im Jahr 2030 wird sich dieses Verhältnis auf die Hälfte reduzieren. Das liegt daran, dass der Kraftwerkssektor durch lange Laufzeiten und die damit verbundenen langfristigen Investitionen in die Infrastruktur gekennzeichnet ist. Es besteht sofortiger Handlungsbedarf, um in einem überschaubaren Zeitraum eine spürbare CO<sub>2</sub>-Minderung zu erhalten.

### Maßnahmen

Das Ziel ist damit definiert: die Senkung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen (Abb. 2). Verschiedene Strategien bieten sich an. Durch Substitution lässt sich im Bereich der erneuerbaren Energien sehr viel erreichen. Dazu sind entsprechende Technologien mit den damit verbundenen Investitionen nötig. Vergleichsweise geringere Effekte bei geringeren Investitionen erzielt man durch den Einsatz von Erdgas statt Kohle. Durch das kleinere C:H-Verhältnis erhält man bei Einsatz der gleichen Energiemenge geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen.

*Die Gewinnung fossiler Energieträger wird zunehmend aufwändiger. Gleichzeitig muss die optimale Verwertung des emittierten Kohlendioxids gewährleistet werden. Aus diesen Gründen ist eine Substitution der fossilen Energieträger auf lange Sicht unabdingbar.*

|                 |  |  |                                     |  |   |
|-----------------|--|--|-------------------------------------|--|---|
| Ziel-Ebene      | Senkung der energiebedingten CO <sub>2</sub> -Emissionen |  |                                     |  |   |
| Strategie-Ebene | Substitution   |  | Einsparung                          |  | Lagerung  |
| Maßnahmen-Ebene | verstärkte Nutzung regenerativer Energien                | verstärkter Einsatz von Energieträgern mit günstigem C:H-Verhältnis (Erdgas statt Kohle) | Herabsetzung des Nutzenergiebedarfs | rationelle Energiewandlung und -anwendung; Verbesserung der Anlagenwirkungsgrade | CO <sub>2</sub> -Abtrennung und Speicherung (CCS) |

Abb. 2: Möglichkeiten der Senkung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen

Eine weitere strategische Maßnahme ist die Einsparung. Hier gibt es ein enormes Reduktionspotenzial – vor allem im Bereich der Gebäudetechnik – verbunden mit kurzen Amortisationszeiten [11]. Behindert wird die Umsetzung durch zum Teil hohe Investitionskosten und mangelnde Handlungsbereitschaft in der Bevölkerung.

Die Lagerung wird zurzeit als eine der Möglichkeiten zur Lösung des CO<sub>2</sub>-Problems gesehen. Sollte sie im großen Stil eingesetzt werden können, bietet sich auch hier ein großes Reduktionspotenzial. Das setzt aber die Akzeptanz in der Bevölkerung und das Vorhandensein sicherer Speicherkapazitäten voraus.

Mit der isolierten Betrachtung einer Maßnahme wird das Ziel nicht erreicht werden können. Deshalb wird für einen Lösungsansatz immer ein systemischer Ansatz mit einer Kombination verschiedener Maßnahmen zum Einsatz kommen. In Systembetrachtungen (Lebenszyklusanalyse etc.) sind alle klimarelevanten Emissionen eines Prozesses zu erfassen.

### Lösungsansatz „Dezentrale Energiebereitstellung“

Mit dem Lösungsansatz „Dezentrale Energiebereitstellung“ werden vor allem Maßnahmen aus der Strategieebene „Substitution“ und „Einsparung“ verfolgt. Dezentrale Energieanlagen können mit höchsten Anlagenwirkungsgraden betrieben werden, da prinzipiell

alle anfallende Wärmeenergie genutzt werden kann. Außerdem kann als Energieträger vorzugsweise regenerative Energie eingesetzt werden. Die geringere Energiedichte im Vergleich zu fossilen Energien wirkt sich bei dezentraler Nutzung nicht so negativ aus. Es ergibt sich somit eine besonders rationelle Form der Energiewandlung und -anwendung. Das fluktuierende Angebot kann mit Energiespeichern ausgeglichen werden. Der Aufbau eines Smart Grid ist eine Voraussetzung für diesen Lösungsansatz (siehe Kasten).

Des Weiteren ist denkbar, dass in Zukunft ein großer Teil des Fahrzeugparks auf Hybridtechnik oder reinen Elektroantrieb umgestellt ist. Dann sind Tag und Nacht die Batterien von Millionen Fahrzeugen mit dem Netz verbunden, was einem gigantischen virtuellen Energiespeicher gleichkommt. Dieser Speicher kann überschüssige Energiemengen aus dem Netz zwischenspeichern und bei Bedarf wieder abgeben. Eine zentrale Steuerung dieses Systems wird es nicht geben können. Es wird sich, ähnlich wie das Internet, eigenständig dezentral regeln. In verschiedenen Untersuchungen wurde in Szenarien überprüft, wie viel Autos bzw. Batterien zur Verfügung stehen. Es konnte gezeigt werden, dass in den Industriestaaten über 90 % der Fahrzeuge selbst zur Rushhour nicht bewegt werden und damit für das Laden bzw. Entladen zur Verfügung stehen. Damit ist die Speicherfrage allerdings noch nicht vollständig geklärt. Zwingend erforderlich ist

**Smart Grid:** Ein Smart Grid ist ein intelligentes Netzwerk zur Energieübertragung und -verteilung, das auf wechselseitiger Kommunikation zwischen allen am Energiemarkt beteiligten Einheiten beruht. Es bindet sowohl große, zentrale wie auch kleine, dezentrale Erzeugungseinheiten und Verbraucher in eine Gesamtstruktur ein. Ermöglicht wird dies unter anderem durch die Erweiterung der Automatisierungsstruktur, durch fortschrittliche Sensoren und eine dezentral organisierte Informations- und Kommunikationsstruktur. Smart Grid steigert so die Effizienz, Zuverlässigkeit und Sicherheit der Energieversorgungskette. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist es, dem verbrauchenden Endkunden Möglichkeiten zu eröffnen, aktiv am Energiemarkt teilzunehmen und somit einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. [Siemens AG]

ein Energiemanagement, um die Rückwirkungen der Lade- und Entladevorgänge der Elektrofahrzeuge auf das Netz zu verringern, sowie der konsequente Anschluss der Fahrzeuge an das Netz – auch unter dem Begriff Vehicle to grid (V2G) bekannt. Elektrofahrzeuge gibt es schon seit Jahrzehnten. Die Weiterentwicklung erfolgt mit unterschiedlicher Intensität. Vor der Einführung des Verbrennungsmotors waren Elektrofahrzeuge weit verbreitet. Preiswertere Verbrennungsmotoren verdrängten die leisen Gefährte von der Straße. Aufgrund der derzeit verstärkten Diskussion um knapper werdende bzw. unsicher zu beschaffende fossile Energieträger (Erdöl) und die Einsparung von Emissionen bietet sich die Möglichkeit, Elektrofahrzeuge in den Massenmarkt einzuführen. Das bietet vor allem ein großes Potenzial in Hinsicht auf den mobilen Energiespeicher, der eine erstaunliche Größe aufweisen kann, wenn man die stehenden Fahrzeuge vernetzt. Erste Erfahrungen werden bei Siemens mit einem umgebauten Porsche gesammelt [10]. Aber auch andere Speichertechnologien sind in der Diskussion. Mit einem DEMS (Dezentrales Energiemanagement System) lassen sich „virtuelle“ Speicher bauen, indem Wärme oder andere schaltbare Lasten gezielt angesteuert werden. Die Auswirkungen auf das Netz sind ähnlich wie bei großen Elektroenergiespeichern. Außerdem bieten GuD-Kraftwerke die Möglichkeit, im Minutenbereich als Ausgleich fluktuierender Einspeiser zu reagieren.

### Herausforderungen

In einer Studie des BMU [2] wird davon ausgegangen, dass bis 2020 ca. 27% der Bruttostromerzeugung aus dezentralen (erneuerbaren) Anlagen bereitgestellt werden kann. In verschiedenen Demonstrationsprojekten soll die prinzipielle Möglichkeit und der wirtschaftliche Nachweis erbracht werden, dass die Technologie in Zukunft sicher eingesetzt werden kann. Dabei werden einige offene Punkte zu klären sein.

### Steuerung / Regelung / Software

Wie organisiert sich ein Smart Grid? Wer organisiert die verschiedenen dezentralen Anlagen? Wie werden die dezentralen Anlagen angesteuert? Wer wird als „Master“, wer als „Slave“ geführt?

### Rechte / Pflichten

Was passiert bei einem Ausfall des Netzes? Wer fährt das Netz wieder hoch? Wer kann (!) das Netz wieder hochfahren? Welche (zentralen) Reservekapazitäten sind vorzuhalten? Wer kommt dafür auf? Gibt es Speicher, die das witterungsbedingt fluktuierende Angebot im Netz ausgleichen können? Wer garantiert die Einhaltung der Netzparameter (z. B. Spannungsqualität)?

### Komponenten / Hardware

Welche Netzwerkkomponenten sind neu zu entwickeln, um den veränderten Anforderungen im Netz gerecht zu werden? Wie ist der Entwicklungsstand der dezentralen Erzeugungskomponenten?

Die Beantwortung dieser Fragen liegt im Fokus vieler aktueller Forschungsprojekte. Besonders aktiv ist in Deutschland das ISET Kassel mit dem Projekt eEnergy – Regenerative Modellregion Harz [5], u.a. in Zusammenarbeit mit Siemens [6]. Weitere Aktivitäten gibt es zwischen Siemens und RWE [7], an der TU Clausthal und vielen weiteren Forschungseinrichtungen. Die Europäische Kommission gründete eine europäische Smart-Grids-Technologieplattform, um die Entwicklung und die Installation von intelligenten Stromnetzen voranzubringen.

Der Gesetzgeber unterstützt die Einführung der neuen Technologien in Deutschland, z. B. mit dem Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz und dem Erneuerbare-Energien-Gesetz [8, 9].

Die Automobilfirmen beschäftigen sich intensiv mit Elektroantrieben für Fahrzeuge, lassen aber Betrachtungen der Netzurückwirkungen bei Anschluss vieler Fahrzeuge an das Energieversorgungsnetz

außer acht. Dabei kommt diese Aufgabe letztendlich nicht den großen Netzbetreibern zu, sondern den Betreibern der Verteilnetze, also typischerweise den Stadtwerken. Hier besteht noch akuter Handlungsbedarf.

### Zusammenfassung

Die Verminderung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen ist eines der Hauptziele und Herausforderungen unserer Zeit. In Systembetrachtungen (Lebenszyklusanalyse etc.) sind alle klimarelevanten Emissionen eines Prozesses zu erfassen.

Elektrische Energie wird in Zukunft in einem geringeren Maße als heute in zentralen Großkraftwerken bereitgestellt werden. Dafür wird zunehmend die dezentrale Erzeugung aus regenerativen Energien – verbunden mit Speichertechnologien – bei höchsten Anlagewirkungsgraden zum Einsatz kommen. Damit ändern sich auch die Anforderungen an das Stromnetz. Im Gegensatz zu heute wird es vielfältige Energieflüsse in alle Richtungen geben. Ein Ansatz zur Lösung des Speicherproblems ist die Kopplung der Batterien vieler Elektrofahrzeuge mit dem Stromnetz. Weitere Konzepte werden diskutiert bzw. erprobt. In jedem Fall ist ein Energiemanagement nötig. Realisiert werden kann es mit einem sogenannten Smart Grid.

Die anstehenden Fragen zur Einführung und Umsetzung der Technologie werden in vielen Forschungsprojekten untersucht. Schwerpunkte liegen bei der rechtlichen Situation, bei der Software (Steuerung, Regelung) und bei der Hardware (Netzkomponenten, KWK-Module).

## Literatur

- [1] Staschus, K.; Wegner, B.: Elektrizitätswirtschaft, BWK Bd. 61 (2009) Nr. 4, ISSN 1618-193X
- [2] N.N. Weiterentwicklung der Ausbaustrategie Erneuerbare Energien Leitstudie 2008, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Referat Öffentlichkeitsarbeit 11055 Berlin, Stand Okt. 2008.  
[www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2008.pdf](http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2008.pdf)
- [3] <http://www.globalwarmingart.com>, Aufruf am 24.04.2009
- [4] World energy outlook 2008, Fact sheet, IEA, [www.iea.org](http://www.iea.org), ISBN 978-92-64-04560-6
- [5] Mackensen, R., Rohrig, K., Speckmann, M.; Das Virtuelle Kraftwerk – Kombikraftwerk; 11. Internationale Solarkonferenz Mecklenburg-Vorpommern, Wietow, 4. August 2008.
- [6] Hoffmann, C. et al; Design of transport and storage capacities for a future European power supply system with a high share of renewable energies, Proceedings IRES 2008, Internationale Konferenz zur Speicherung Erneuerbarer Energien, Berlin 2008.
- [7] <http://w1.siemens.com/press/de/pressebilder/innovationnews/in20081203/in20081203-02.htm>
- [8] KWK-Gesetz, Bundesgesetzblatt, Jg. 2008, Teil I Nr. 49, 31.10.2008, S. 2101 ff.
- [9] EEG, Bundesgesetzblatt, Jg. 2008, Teil I Nr. 49, 31.10.2008, S. 2074 ff.
- [10] Schröder, T.; Der Windstrom fährt spazieren, Bild der Wissenschaft 5/2009, S. 92 – 99.
- [11] Sustainable Urban Infrastructure Ausgabe München – Wege in eine CO<sub>2</sub>-freie Zukunft, Siemens AG München, 2009, Bestell-Nr. A19100-F-P135.



## Neue Methoden der Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen

Dr.-Ing. Thomas Naumann

An zentralen Stellen werden in großen Unternehmen der Automobilbranche, ebenso in Unternehmen vergleichbarer Produktkomplexität und Ausrichtung, Geschäftsprozessmodelle zur Beschreibung der Abläufe der Produktentwicklung erstellt. Diese formalisierten Prozessbeschreibungen standardisieren und koordinieren zum einen das Vorgehen und Miteinander der einzelnen, an Produktentwicklung und Produktionsvorbereitung beteiligten Bereiche. Zum anderen geben sie einen Rahmen zur Terminplanung und operativen Projektsteuerung von Fahrzeug- und Aggregatprojekten vor. In Summe sollen sie den Reifegrad und die Qualität neuer Produkte sowie eine termingetreue Produktentwicklung sicherstellen.

Die Beschreibung und Abstimmung von Produktentwicklungsprozessen ist höchst aufwändig, da eine Vielzahl unterschiedlichster Vorgaben und Randbedingungen bezüglich des zu entwickelnden Produkts und der dies realisierenden Organisation zu berücksichtigen sind. Bei der Anwendung der Produktentwicklungsprozesse zur Terminplanung und operativen Projektsteuerung multipliziert sich der Aufwand entsprechend der Anzahl der neu aufgesetzten Projekte, da die Produktentwicklungsprozesse, den dortigen Anforderungen und Randbedingungen gebührend, jedes Mal aufs Neue spezifisch angepasst werden müssen. Um diesen Anpassungsaufwand zu minimieren, wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes der Daimler AG eine Prozessbibliothek konzipiert, mit der es vergleichbar einfach ist, parametrische Prozessbausteine aus in ver-

schiedenen Projekten bewährten Produktentwicklungsprozessen wieder zu verwenden und zu einem neuen Produktentwicklungsprozess zusammenzufügen. Ein wichtiger Teil des Projektes war die Entwicklung einer bidirektionalen Schnittstelle zwischen den Standard Prozess- und Projektmanagementwerkzeugen des Automobilbaus (ARIS® und RPlan®), welche einen tagtäglichen Abgleich zwischen dem geplanten und spezifisch angepassten Produktentwicklungsprozess und dem realen Ablauf im Projektgeschehen, sprich der Instanz des Produktentwicklungsprozesses, ermöglicht. Für das Prozessmanagement der Daimler AG war das ein wichtiger neuer methodischer Ansatz, um den steigenden Anforderungen und der wachsenden Komplexität in der Produktentwicklung gerecht zu werden.

Aufgrund der Gesetzesvorlagen zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung, steigender Rohstoffpreise und Energiekosten, der sich stark verändernden Märkte und dem starken Wettbewerb steht der deutschen Automobilbranche eine Dekade der Veränderungen bevor, die eine bestmögliche Effizienz und Qualität der Abläufe erfordert (Schmückle, COO Mercedes Car Group 2008). Das heißt es werden in Zukunft, um im Wettbewerb zu bestehen, bei nahezu gleichbleibender Organisationsgröße mehr Kooperationen, mehr Fahrzeugtypen mit ausdifferenzierten Antriebstechnologien für verschiedene Märkte entwickelt werden.

Auf das Thema Prozessmanagement bezogen heißt das, dass mehr inhaltlich neue und auch neuartige verteilte Produktentwicklungsprozesse beschrieben und, davon abgeleitet, deutlich mehr Projekte geplant, abgestimmt und gesteuert werden müssen. Allein operativ umsetzen lässt sich diese Prozess- und Projektvielfalt mit den derzeitigen Methoden und Tools dann nicht mehr. Auch der obige Ansatz der neuen Prozessbibliothek reicht dazu dann nicht mehr aus. Immer noch organisatorisch zu zentralisiert und von der abzustimmenden Informationsmenge methodisch zu aufwendig und zu zeitraubend, ist das heute gebräuchliche Vorgehen zu starr und

unflexibel, wenn es darum geht, wertvolles Erfahrungswissen aus erfolgreichen Projekten schnell und übergreifend zu generieren, und anders herum als prozessuale Änderung in andere Projektpläne umzusetzen.

Produktentwicklungsprozesse müssen daher in Zukunft deutlich operativer eingesetzt werden. Sie dürfen nicht nur zum Aufsatz von Projekten und zur zeitlich versetzten Auswertung von Erfahrungswissen benutzt werden, sondern müssen auch zur adaptiven Planung und Steuerung von Fahrzeugprojekten in Echtzeit herangezogen werden. Sie würden dann nicht mehr nur von einigen wenigen Prozessexperten zentral erhoben und beschrieben werden, sondern jeder Projektmanager und jeder Prozessverantwortliche würde integriert in seine individuelle Arbeitsumgebung wissen und dokumentieren, was tagesaktuelle Aufgaben sind, welcher Fortschritt erreicht wurde, woher wichtige Informationen kommen, wer auf die Ergebnisse angewiesen ist und mit welchen Methoden, Vorlagen und Werkzeugen die Aufgaben im Verantwortungsbereich am besten erfüllt werden können. So kann jeder über sogenannte Kooperationsplattformen, welche technisch u. a. auf den heutigen Web2.0-Technologien basieren, von den Erfahrungen anderer Bereiche profitieren und seinerseits sein Produkt- und Prozesswissen anderen automatisch zur Verfügung stellen. Produktentwicklungsprozesse werden sich insgesamt flexibler an den notwendigen Kompetenzen einer Aufgabe, eines Projektes, eines Unternehmens ausrichten und sollen dabei, wie gefordert, noch deutlich effizienter werden.

In diesem Sinne ist hier noch nicht Schluss mit der Entwicklung neuer Ansätze zum Prozessmanagement. In der Regel erreichen die mit den heute vorhandenen Methoden relativ abstrakt beschriebenen Produktentwicklungsprozesse nicht die Arbeitsebene einzelner Teams bzw. einzelner Produktentwickler und die dort ablaufenden Ad hoc Prozesse, welche bis zu 80% der Arbeitszeit ausmachen. Auf dieser Ebene verdeutlicht sich die operative Komplexität durch die Vielzahl von festzulegenden Strukturen und Parametern des Pro-

dukts und die Unmenge an Informationen, die in den nahezu unzähligen spontanen und geplanten Interaktionen tagtäglich bereitgestellt, ausgetauscht, abgestimmt und entschieden werden.

Somit liegt ein weiterer Ansatz zur Steigerung der Effizienz von Produktentwicklungsprozessen in der Betrachtung von Interaktionen und Kommunikation. Allgemein ist Kommunikation die wichtigste menschliche Interaktionsform und der Träger sozialen Handelns. Speziell in der hier vorliegenden Betrachtungsweise soziotechnischer Systeme, in denen ein soziales System ein technisches System entwickelt, produziert oder nutzt, werden alle Systemfunktionen überhaupt erst durch Kommunikation ausgeprägt. Systemfunktionen sind dabei zum einen die Funktionen sozialer Systeme nach Willke, zum anderen alle Handlungsfunktionen zur Synthese des zu entwickelnden Produktes, wie sie von Ropohl skizziert wurden.

Schon heute lässt sich über die statistische Auswertung von Kommunikationsereignissen in den Interaktionen einzelner Teams, wie sie innerhalb von Planspielen beobachtet werden konnten, die Effizienz von Gruppenarbeit messen, bewerten und miteinander vergleichen. In Zukunft soll es dann möglich sein, über die Analyse und statistische Auswertung verschiedenster Kommunikationsereignisse, von geplanten und fortführend auch spontan stattfindenden Interaktionen, ganz konkrete Aussagen über die Effizienz beliebiger Ad hoc Prozesse treffen zu können, unabhängig von der technischen und sozialen Komplexität des betrachteten soziotechnischen Systems. In der Summe wird die Betrachtung von Produktentwicklungsprozessen damit auf eine gänzlich neue Basis gestellt und die Entwicklung völlig neuer Methoden zur Planung und Steuerung ermöglicht.

Denn durch die systemische Betrachtung der Produktentwicklung und das Erkennen signifikanter Interaktions- und Kommunikationsmuster in Bezug auf die Planung und Steuerung beliebiger Strukturen, Prozesse, Funktionen und Ziele lassen sich einfache und direkte

Steuerungsmethoden voraus denken, die mit wenigen Steuerungsgrößen auskommen und trotzdem eine effektive Selbststeuerung des Systems ermöglichen. Dazu werden in einem aktuellen Forschungsvorhaben, unter Berücksichtigung des Datenschutzes, projekty-pisch vorhandene Interaktionen und Kommunikationsereignisse analysiert und statistisch ausgewertet. Mess- und Steuergrößen werden definiert, die im nächsten Schritt allen Beteiligten in Echtzeit einen Überblick über den tatsächlichen Zustand des Systems geben und, wenn nötig, Änderungen im Produktentwicklungsprozess ermöglichen.

Indem wir Interaktion und Kommunikation im Kontext der Analyse, Planung und Steuerung soziotechnischer Systeme betrachten, werden völlig neue Prinzipien der Selbstorganisation möglich und es wird zu einem Paradigmenwechsel im Prozessmanagement kommen, der einen kulturellen Wandel in der Art, wie wir neue Produkte entwickeln, nach sich zieht.



## Quantenkommunikation mit integrierter Optik

PD. Dr. Christine Silberhorn

Licht spielt in unserem alltäglichen Leben eine entscheidende Rolle und bildet die Grundlage für jegliche visuelle Beobachtung. Die Beschreibung des Lichtes selbst ist jedoch nicht einfach, da es sich bei dem Begriff um ein abstraktes Konzept handelt und in den verschiedensten Ausprägungen auftritt. Der Quantencharakter des Lichtes zeigt sich darin, dass je nach Versuchsanordnung sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften zum Vorschein kommen. Es stehen uns heute eine moderne Lasertechnologie und eine Vielzahl integrierter, optischer Komponenten zur Verfügung, die es uns erlauben, Ultrakurz-Zeitpulse mit exakt definierten Energie-Quanten zu erzeugen und in Netzwerken miteinander zu verschalten. Damit ergibt sich heute die Perspektive, neuartige optisch basierte Quantensysteme zu entwickeln und damit sowohl neue Technologien zu etablieren als auch Fragen der Grundlagenphysik experimentell zu erkunden.

Auf dem Gebiet der Quanteninformationsverarbeitung (bzw. Quanten-Kommunikation) ermöglichen quantisierte Licht-Zustände beispielsweise, Information auf neuartige Weise sicherer und leistungsfähiger zu übertragen und zu verarbeiten. Der Begriff der Quanten-Informationsverarbeitung setzt sich hierbei aus zwei Begriffen zusammen, die jeweils für zwei unterschiedliche Forschungsfelder stehen: Quantenphysik und Informationsverarbeitung. In der traditionellen Informationsverarbeitung wird Information in einer Abfolge von binären Zahlenfolgen 01010100... kodiert, wobei mit Hilfe logischer Gatter auf Basis der kleinsten Informationseinheiten,

den Bits, Rechenoperationen verwirklicht werden. Technisch werden Bits durch zwei eindeutig unterscheidbare Signal-Zustände, z.B. AN/AUS eines Schalters, realisiert. Die Quantenphysik erfordert im Gegensatz zur klassischen Datenverarbeitung, dass für zwei eindeutig definierte Signal-Zustände stets auch deren kohärente Überlagerungszustände existieren. In Analogie zum Wellencharakter zweier optischer Felder in der klassischen Beschreibung entsprechen diese Überlagerungszustände keiner statistischen Mischung der Ursprungs-Zustände, sondern müssen als das gleichzeitige Vorhandensein von 1 und 0 aufgefasst werden. Daher lässt sich der Informationsinhalt eines Quanten-Zustandes im Allgemeinen nicht als klassische Information, d.h. als Bit-Folge, repräsentieren. Dies führt zur Einführung des Begriffes der Quanteninformation, wobei als kleinste Quanten-Informationseinheit das Quanten-Bit, oder kürzer QuBit, eingeführt wird. Ein QuBit beschreibt wiederum die Information, die nun durch einen einzelnen Quanten-Zustand repräsentiert werden kann.

Zur Implementierung der Konzepte der Quanteninformation benötigt man Systeme, die es erlauben, möglichst genau definierte Quantenzustände zu erzeugen und diese gezielt zu manipulieren. Die Quantenoptik bietet hierfür einen viel versprechenden Zugang, da hochgradig nicht-klassische Zustände mit hoher Reinheit vergleichsweise einfach erzeugbar sind. Speziell für die Quantenkommunikation können damit schon heute Quantenkryptographie-Systeme implementiert werden, die eine sichere Informationsübertragung gewährleisten, die nachweisbar klassisch nicht möglich ist. In meinen aktuellen Forschungsarbeiten werden neue Ansätze für zukünftige Quantenkommunikations-Systeme verfolgt, um effizientere Präparations-, Charakterisierungs- und Manipulationsmethoden von Quanten-Licht bereit zu stellen. Durch den Einsatz nicht-linearer optischer Wellenleiter sowie linearer Netzwerke auf Wellenleiterchips in Verbindung mit ultraschnellen Laserlichtpulsen be-

steht eine vielversprechende Perspektive, die heutigen Grenzen der Quanten-Zustands-Erzeugung zu überwinden. Die Forschungsarbeiten zielen längerfristig darauf ab, Grundbausteine für moderne Quantenkommunikationssysteme zu entwickeln, die eine sichere Datenübertragung über verschiedene Knotenpunkte (Verstärkerstationen, engl. „quantum repeater“) hinweg gewährleisten zu können. Die Verwirklichung miniaturisierter komplexer Quanten-Netzwerke, die mehrere Quellen und verschiedene Detektionseinheiten einbinden und damit unterschiedliche Zustandsmanipulation mit hoher Perfektion beherrschbar machen, ist derzeit ein Schwerpunkt aktueller Forschung in verschiedenen internationalen Gruppen. In der theoretischen Modellierung entsprechen solche Netzwerke „Quanten-Rechnern“ mit kleinen Registern, d.h. mit wenigen Eingangs-Zuständen, die Quanteninformation kohärent prozessieren können.

Photonische Quanten-Zustände werden bislang meist in zwei getrennten Kontexten betrachtet: Systeme diskreter Variablen sowie kontinuierlicher Variablen. Bei Systemen diskreter Variablen steht direkt die Quantisierung der Energie eines Lichtfelds im Zentrum und man definiert als Signalträger Ein-Photonen-Zustände Lichtpulse mit genau definierter Photonenzahl. Als spezielle Quantencharakteristika, beispielsweise Superpositionen verschiedener Basis-Zustände (die u. a. die QuBits der Quanteninformationskodierung festlegen) werden modale Eigenschaften, d.h. die Polarisation, Frequenz oder Ausbreitungsrichtung der Zustände untersucht. Im Gegensatz dazu korrespondiert der Begriff der Systeme kontinuierlicher mit der Vermessung der Amplitude und Phase eines Lichtfeldes im Phasenraum. Als orthogonale Feldquadraturen entsprechen Amplitude und Phase in der quantenmechanischen Beschreibung einem Paar konjugierter Variablen. Sie gehorchen deshalb der Heisenberg'schen Unschärfe-Relation und sind somit niemals gleichzeitig scharf bestimmbar. Diese Quanteneigenschaft ermöglicht es beispielsweise, durch eine Informationskodierung auf beiden Quadraturen und eine geschickte Selektion der gemessenen

Daten analog zur Quantenkommunikation mit diskreten Variablen eine sichere Informationsübertragung zu bewerkstelligen. Der Vorteil dieses alternativen Zugangs ist es, dass die Präparation der Signal-Zustände wesentlich besser an verfügbare Laserstrahlung angepasst ist, wodurch die Erzeugung der Signalzustände vereinfacht wird. Allerdings haben neuere Entwicklungen des Gebietes wiederum gezeigt, dass bei dem aktuellen Stand der Technik weder Systeme diskreter Variablen noch die kontinuierlicher Variablen alleine ausreichend sind, um lange Distanzen über verschiedene Verstärkerstationen überbrücken zu können. Ein Ausweg für die Übertragung von Quanteninformation über verzweigte Netzwerke hinweg scheint in dem Zusammenspiel zwischen Konzepten diskreter Variablen und kontinuierlicher Variablen zu liegen. Die Entwicklung photonenzahlaufgelöster Detektion und alternativer Zustandscharakterisierungen im Phasenraum stellt eine der Grundlagen für die genauere Erforschung dieses Zwischenbereichs dar. Die Implementierung reiner Photonenzahl-Zustände als ultrakurze Wellenpakete bietet große Vorteile für deren Zusammensetzbarkeit in Netzwerken.

Aus Sicht der Grundlagenforschung sind lineare Netzwerke mit hochgradigen nicht-klassischen Eingangszuständen ein ideales Modellsystem um komplexere Quantensysteme experimentell erkunden zu können. Die Implementierung von Quanten-Verstärkern entspricht der Umkehrung quantenmechanischer Dekohärenzprozesse, sodass die Experimente auch ein genaueres Verständnis des Quanten-Messprozesses sowie der Grenzen zwischen der makroskopischen klassischer Physik und mesoskopischer Quantensysteme liefern. Die Realisierung photonischer Quantenzustände als ultrakurze Wellenpakete ist zudem von grundsätzlichem Interesse. Beispielsweise können sie dazu dienen, die Beziehung zwischen der Energie und Photonenzahl gepulster Systeme oder relativistischer Quantenphänomene genauer zu erforschen. Für die fernere Zukunft haben sie weiterhin das Potenzial, Wechselwirkungen von einzelnen Atomen mit einzelnen Photonen auf völlig neuen Zeitskalen zu beobachten.

## Quellen neuartiger Quanten-Zustände

Eine etablierte Technik zur Erzeugung von Ein-Photonen-Zuständen beruht auf der nicht-linearen Wechselwirkung eines starken Pump-Laserstrahls mit einem nicht-linearen Kristall. Bei der so genannten Zwei-Photonenfluoreszenz (engl.: „parametric down-conversion“) entsteht durch den Zerfall eines Pump-Photons – unter Berücksichtigung der Energie- und Impulserhaltung – jeweils genau ein Photonenpaar. Für geeignete Bedingung können die beiden Photonen leicht mittels linearer Optik getrennt werden, sodass mittels der Detektion eines Photons die Existenz des Partnerphotons angekündigt und konditionierte Einzel-Photonen-Zustände erzeugen werden können.

In den letzten Jahren wurde nun erstmals damit begonnen, nicht-lineare Wellenleiter und spezielle optische Fasern einzusetzen, um die Effizienz dieses Prozesses maßgeblich zu erhöhen. Damit sind zum einen höhere Erzeugungsraten verwirklichtbar, und zum anderen wird eine stark verbesserte Qualität der Reinheit der Ein-Photonen-Zustände erreicht. Werden zudem die integrierten Wellenleiterchips mit ultraschnellen Pumpimpulsen betrieben, so können durch ein speziell gestaltetes Design der dispersiven Eigenschaften der Wellenleiter neuartige Quantenzustände als ultraschnelle Wellenpakete präpariert werden.

Durch die gesteigerte Effizienz wird in diesem Fall nicht nur die Grundlage gelegt, um verbesserte konditionierte Ein-Photonen-Zustände zu erzeugen, sondern es können auch gequetschte Gaußsche Zustände, die die Grundbausteine für Systeme kontinuierlicher Variablen sind, in stark vereinfachten experimentellen Aufbauten realisiert werden. Wendet man nun wiederum konditionierte Zustandspräparation auf diese gequetschten Zustände an, so ergibt sich weiterhin die Möglichkeit, weitaus exotischere Zustände – wie beispielsweise Schrödinger-Katzen-Zustände – „einfach“ zu implementieren. Diese sind für die Quantenkommunikation in Hybrid-Systemen im Zwischenbereich von diskreten und kontinuierlichen

Variablen wichtig. Durch die Verwendung integrierter Optik in Kombination mit dem gepulsten Charakter der photonischen Zustände wird erstmals die Synchronisierung für die Verschaltung in komplexeren Quanten-Netzwerken umsetzbar.

### Photonenzahlaufgelöste Zustandscharakterisierung

Übliche Detektoren, die hinreichend sensitiv für den Nachweis einzelner Photonen sind, können nicht zwischen kleinen Photonenzahlen wie etwa 0, 1, 2 oder 3 unterscheiden. Stattdessen geben binärere Lawinenphoto-Detektoren lediglich Auskunft darüber, ob Licht in einer bestimmten Zeitspanne auftritt. Zum Nachweis der Photonstatistik von gepulsten Lichts kann als rein quantenoptische Lösung eine faseroptische Anordnung zur zeitlichen Aufteilung eines Eingangspulses in mehrere Teilpulse genutzt werden (siehe Abb. 1).

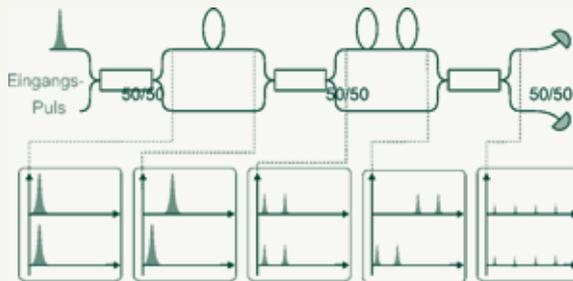


Abb 1: Der Eingangssignalspuls trifft zunächst im Faser-Netzwerk auf einen ersten Strahlteiler mit symmetrischen 50/50 Teilungsverhältnis, d.h. die Wahrscheinlichkeiten für auftretende Photonen nach oben bzw. unten zu streuen, beträgt jeweils 50%. Im oberen Zweig durchläuft der Puls eine Verzögerungsschleife und kommt damit am zweiten Strahlteiler im Vergleich zu Photonen, die im unteren Arm propagieren, verspätet an. Damit werden am zweiten Strahlteiler beide Pulse separat wiederum im Verhältnis 50/50 geteilt. Nach dem gleichen Prinzip durchlaufen die entstehenden Doppelpulse die nächste Stufe, sodass an den beiden Ausgängen der Eingangspuls in acht Detektions-Ausgangspulse aufgeteilt ist. Ein binärer Detektor ist nun ausreichend, um die Photonenzahl des Eingangspulses nachzuweisen.

Für kleine Photonenzahlen kann die Wahrscheinlichkeit, dass mehrere Photonen bei der Aufteilung in einem Puls enden, vernachlässigt werden, d.h. jeder Ausgangspuls enthält entweder genau ein oder kein Photon. Damit reicht die Messung mit binären Detektoren nach dem Faser-Netzwerk aus, um die Anzahl der Photonen abzählen zu können und somit eine photonenzahlauflösende Messung zu verwirklichen.

Diese Nachweismethode bietet im Vergleich zur etablierten Homodyn-Messung, die üblicherweise für die Bestimmung von Amplituden- und Phasenquadraturen eingesetzt wird, eine alternative Methode, um Viel-Photonen-Zustände zu analysieren. Photonenzahl-Messungen besitzen eine andere Signatur als Amplituden und Phasen-Messungen, sodass es überraschenderweise möglich wird, einzelne Punkte der Wigner-Funktion im Phasenraum exakt zu bestimmen. Das heißt, dass scheinbar die Heisenberg'sche Unschärferelation für die Amplitude und Phase eines optischen Feldes verletzt werden kann. Diese Messungen sind damit ebenfalls ein wichtiger Schritt für die Erkundung des Zwischenbereichs für Systeme, die kontinuierliche und diskrete Variablen miteinander verbinden.

### Quantenzustandsmanipulation in Quanten-Netzwerken

Zur Implementierung komplexerer Quanten-Netzwerke bzw. eines Quantenrechners auf Basis photonischer Zustände bieten sich lineare Netzwerke mit konditionierender Zustandspräparation und mehreren hochgradig nicht-klassischen Eingangs-Zuständen an. Das Quellendesign mit integriert optischen Komponenten und gepulsten Quanten-Zuständen stellt hierfür den ersten Ausgangsschritt dar. Integrierte Optik ist dabei eine ideale „Hardware“, um lineare Netzwerke mit hochgradig nicht-klassischen photonischen Zuständen zu realisieren. Längerfristig besteht die Perspektive, Quanten-Netzwerke auf einem einzelnen Chip aufzubauen, die es erlauben, hochgradig nicht-klassische Zustände zu erzeugen und in verschiedenen Kanälen miteinander zu verschalten. Damit kann

eine neue Form der Quantenlogik aufgebaut werden, die für optisch basierte Quanten-Technologien entscheidend sein kann.

Als ein erstes Beispiel für die Möglichkeiten, die sich dadurch in diesem Kontext ergeben, wird derzeit in meiner Arbeitsgruppe in einem integriert optischen Aufbau ein „Quantum Walk“ Experiment durchgeführt. Dieses Experiment dient als Modell für die Untersuchung kohärenter Zustandsmanipulation und demonstriert eindrucksvoll den Unterschied zwischen klassischen und quantenmechanischen Suchalgorithmen.



# Integration von Systemmodellen, Organisationsmodellen und Kommunikation in verteilten Softwareentwicklungsprojekten

Dr. Timo Wolf

## Einleitung

In Softwareentwicklungsprojekten werden die verschiedenen Aktivitäten wie die Erhebung von Anforderungen, die Analyse, das Systemdesign, sowie Implementierung und Test zunehmend von verschiedenen Projektteilnehmern, verschiedenen Abteilungen oder von externen Dienstleistungsfirmen in räumlich verteilter Umgebung durchgeführt. Starke Abhängigkeiten der Aktivitäten und der zu entwickelnden Systemmodelle, sowie das konstante Auftreten von Änderungen erhöhen die Komplexität und erfordern eine intensive Zusammenarbeit der Projektteilnehmer. Änderungen der Systemmodelle einzelner Aktivitäten erfordern eine Analyse, welchen Einfluss diese Änderungen auf abhängige Modelle und Aktivitäten haben. Des Weiteren müssen gegebenenfalls Folgeänderungen umgesetzt werden. Die Durchführung von Änderungen erfordert die Identifikation von und die Diskussion mit relevanten Experten und Entscheidungsträgern. Deren Verfügbarkeit muss in der Projektplanung berücksichtigt und gegebenenfalls angepasst und kommuniziert werden.

Verfolgbarkeit (Traceability) einzelner Systemmodelle und deren Abhängigkeiten, die Kommunikation über die Systemmodelle, Begründungen (Rationale Management), die zur Entwicklung der Systemmodelle geführt haben, und die Kenntnis (Awareness) von Experten, Entscheidungsträgern und Aktivitäten einzelner Teams

sind entscheidende Schlüsselfaktoren für eine erfolgreiche Zusammenarbeit in Softwareentwicklungsprojekten und sollten von modernen Entwicklungswerkzeugen unterstützt werden.

In der Praxis existieren etablierte Werkzeuge, die sich auf einzelne Aktivitäten spezialisiert haben, z.B.

- > zur Erhebung von Anforderungen (z.B. DOORS, Caliber, oder Rational RequisitePro),
- > zur Entwicklung von Systemmodellen (z.B. Together 2006, Rational Rose),
- > zur Unterstützung von Testmanagement (z.B. TestDirector),
- > für das Änderungsmanagement (z.B. ClearQuest, Bugzilla, Jira),
- > für das Projektmanagement (z.B. MS Project) und
- > für die Kommunikation (z.B. E-Mail, Webforen, Wikis, Chat).

Eine wünschenswerte einheitliche Integration aller Werkzeuge ist leider nur unzureichend realisiert. Sie verwenden unterschiedliche Mechanismen und Formate zur persistenten Datenspeicherung. Existierende Integrationen basieren auf Import, Export und Synchronisation der Daten. Dieser Ansatz ist jedoch komplex, zeitaufwändig und fehleranfällig. Ein einheitliches Konzept zur Integration von Projektorganisation, Kommunikation und Systemmodellen ist nur schwer umzusetzen und führt insbesondere in großen und räumlich verteilten Projekten zu folgenden Problemen:

> Redundante Datenrepräsentation: Einzelne Artefakte existieren mehrfach an oftmals verteilten Standorten und in unterschiedlichen Werkzeugen. Wird ein Artefakt geändert, ist die Aktualisierung aller Duplikate schwierig, zeitaufwändig und häufig fehleranfällig. Zum Beispiel werden im Systemdesign UML Werkzeuge zur Modellierung eingesetzt und Systemdesigndokumente teilweise oder ganz generiert. Diese Dokumente dienen dann als Spezifikation in der Implementierung. Modelländerungen müssen in dem Dokument

aktualisiert und an alle relevanten Projektbeteiligten kommuniziert und verteilt werden.

> **Fehlende Verfolgbarkeit:** Unterschiedliche Artefakte existieren in verschiedenen Werkzeugen. Wird ein Artefakt geändert ist der Einfluss auf abhängige Artefakte schwer zu erfassen. Zum Beispiel existieren Anforderungen in speziellen Werkzeugen. Die Systemarchitektur und einzelne Aktivitäten der Entwickler basieren auf den Anforderungen. Bei Änderungen der Anforderungen müssen alle abhängigen Artefakte identifiziert und angepasst werden.

> **Fehlende Transparenz:** Durch den Einsatz verschiedener Werkzeuge an verschiedenen Standorten ist der transparente Zugriff auf alle Projektdaten erschwert.

> **Fehlende projektweite Kenntnis:** Durch eine fehlende zentrale und transparente Organisation aller Aktivitäten ist die Kenntnis über die Tätigkeiten fremder Teams und die Identifikation von Experten stark eingeschränkt. Das projektübergreifende Wissen existiert häufig nur im Management und einzelne Entwickler sind von dessen Kommunikation abhängig. Manager werden zu Informationsbrokern und häufig zu einem Kommunikationsengpass.

> **Implizites und verborgenes Wissen:** Durch direkte Kommunikation zwischen Projektbeteiligten (z. B. per E-Mail oder Telefon) befindet sich projektspezifisches Wissen implizit bei einzelnen Personen und ist nicht für alle zugänglich.

### **Rationale-based Unified Softwareengineering Model**

Unser Lösungsansatz für die beschriebenen Probleme ist eine uniforme Repräsentation eines vereinigten Datenmodells für alle Dokumente, Modelle, Kollaborationselemente und Projektorganisationselemente und wird in der Arbeit „Rationale-based Unified Softwareengineering Model“ [1] aus dem Juli 2007 beschrieben. In existierenden Methoden werden die Kollaborationselemente in der Regel

getrennt von der Entwicklung der Systemmodelle behandelt. Da in unserem Ansatz alle Artefakte in einem einzigen vereinigten Modell existieren, können Artefaktbeziehungen implizit im Modell festgehalten und verwaltet werden. Bei auftretenden Änderungen können diese Beziehungen zur Identifikation von transitiv abhängigen Artefakten verwendet und Mechanismen zur Konsistenzerhaltung unterstützt werden. Informelle Kollaborationselemente, wie zum Beispiel Kommentare und formale Diskussionsmodelle zur Repräsentation von Begründungen, werden festgehalten und sind auch Teil des vereinigten Datenmodells.

Die Arbeit beschreibt ein erweiterbares Metamodell zur uniformen Repräsentation aller Artefakte. Darauf aufbauend wird das RUSE Model beschrieben, das ausgewählte Systemmodelle, Kollaborationsmodelle und Organisationsmodelle aus der Softwaretechnik integriert. Die Modelle können projektspezifischen Anforderungen angepasst werden und sind somit universell einsetzbar.

### Sysiphus

Unser Ansatz ist in dem Werkzeug Sysiphus [2] realisiert. Sysiphus ist eine verteilte Anwendung, bei der das uniforme RUSE Model in einem zentralen Server liegt und von den Nutzern über eine Desktop oder eine Web-basierte Schnittstelle erreicht wird. Zur Evaluierung unseres Konzeptes haben wir Sysiphus in einer Vielzahl von verschiedenen Projekten eingesetzt. Darunter waren sowohl kleine Projekte mit nur vier Projektbeteiligten, als auch große 40-Mann Projekte. Sysiphus wurde in universitären Projektkursen, in unabhängigen studentischen Entwicklungsprojekten, in Industrieprojekten, als auch in der Lehre eingesetzt. Somit wurde Sysiphus sowohl von Anfängern als auch von erfahrenen Softwareentwicklern eingesetzt und evaluiert.

Die Anwendungen von Sysiphus haben gezeigt, dass eine Integration von Systemmodellen, Organisationsmodellen und Kommunikation an einer zentralen Stelle zu einer größeren Transparenz führt.

Projektteilnehmer erlangen gute Kenntnisse über die Aktivitäten anderer Teams. Dies verbessert insbesondere die Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Teams, die an unterschiedlichen, aber voneinander abhängigen Subsystemen arbeiten. Bei kritischen Systemänderungen können relevante Experten schneller identifiziert und nötige Folgetätigkeiten diskutiert und kommuniziert werden.

Seit 2008 wird das Projekt Sysiphus unter dem Namen unicas [3] fortgeführt.

### IBM's Rational Team Concert und die Jazz Plattform

IBM, einer der größten Hersteller für Softwareentwicklungswerkzeuge, versucht inzwischen die beschriebenen Probleme durch einen ähnlichen Ansatz zu lösen. IBM entwickelt die Jazz Plattform [4], um die Elemente der Softwareentwicklung – die Systemmodelle, Projektmodelle und die Kommunikation – einheitlich, eindeutig und integriert in Jazz-basierten Entwicklungswerkzeugen zu implementieren. Im Juni 2008 hat IBM das erste Jazz-basierte Werkzeug Rational Team Concert (RTC) veröffentlicht. RTC integriert eine Software-Entwicklungsumgebung mit der Projektorganisation, dem Entwicklungsprozess, den Projektaktivitäten und den Aufgaben einzelner Teams und Entwicklern. Des Weiteren stellt RTC einen kommentar-basierten Kommunikationsmechanismus und einen Benachrichtigungsmechanismus per RSS-Feed für alle beinhalteten Artefakte bereit. Diese werden in einem zentralen Server gehalten und können über eine Eclipse-basierte Desktop-Anwendung oder über eine Web-basierte Schnittstelle durch eine eindeutige URL transparent von allen Entwicklungsstandorten erreicht werden.

RTC und die Plattform Jazz werden selber in dem räumlich verteilten Projekt Jazz an sieben verschiedenen Standorten in den USA, Kanada und Europa entwickelt. 151 Entwickler sind in 47 verschiedenen Teams tätig, wobei ein Entwickler zu mehreren Teams gehören kann. Jedes Team ist für ein Subsystem oder eine Komponente

verantwortlich. Während der Entwicklung hat das Projekt schon erste RTC Versionen für die eigene Entwicklung von RTC und Jazz verwendet. Dadurch konnten sie das Produkt schon während der Entwicklung evaluieren und Schwachstellen beseitigen.

Im SEGAL Labor der University of Victoria hatten wir die Möglichkeit, auf die Daten des RTC Servers des Jazz Projektes zuzugreifen und sie für wissenschaftliche Studien zu verwenden [5, 6]. Insbesondere waren wir an dem Einfluss des integrierten Konzeptes auf die Kommunikation und Zusammenarbeit von räumlich getrennten Teams interessiert, da vorangegangene Studien eine Verzögerung dieser in räumlich getrennten Projekten feststellen konnten (u.a. Herbsleb und Mockus [7]).

### Antwortzeiten verteilter Kommunikation im Jazz Projekt

Aktivitäten und Aufgaben der Softwareentwicklung werden in RTC einzelnen Entwicklern zugeordnet. Um diese zu realisieren, müssen sie in der Regel mit Entwicklern anderer Teams und anderen Standorten kommunizieren, um den Einfluss ihrer Änderung auf andere Komponenten zu analysieren und abzustimmen. Dazu schreiben die Entwickler Kommentare und hängen sie an die entsprechende Aufgabe. Andere Entwickler antworten durch das Schreiben weiterer Kommentare. Die entstehende Kommunikation steht in Bezug zu der Aufgabe und alle Beteiligten werden per E-Mail benachrichtigt, wenn ein neuer Kommentar geschrieben wird.

In der empirischen Studie [6] haben wir die Zeitintervalle zwischen einzelnen Kommentaren als Antwortzeiten betrachtet und in Relation zu der Anzahl von Standorten der Kommunikationsbeteiligten gesetzt. Abbildung 1 zeigt die Antwortzeiten in Tagen. Findet die Kommunikation mit Personen von nur einem Standort statt, gibt es viele kurze Antwortzeiten, aber auch einige sehr lange. Nimmt die Anzahl der Standorte von den kommunikationsbeteiligten Personen zu, wird die Anzahl der sehr kurzen und langen Antwortzeiten kleiner. Im Gegensatz zu vorangegangenen Studien nehmen die durch-

schnittlichen Antwortzeiten bei einer größeren Anzahl von beteiligten Standorten ab.

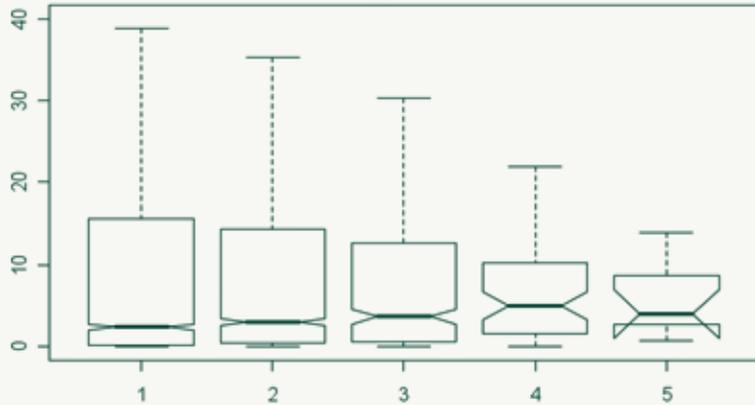
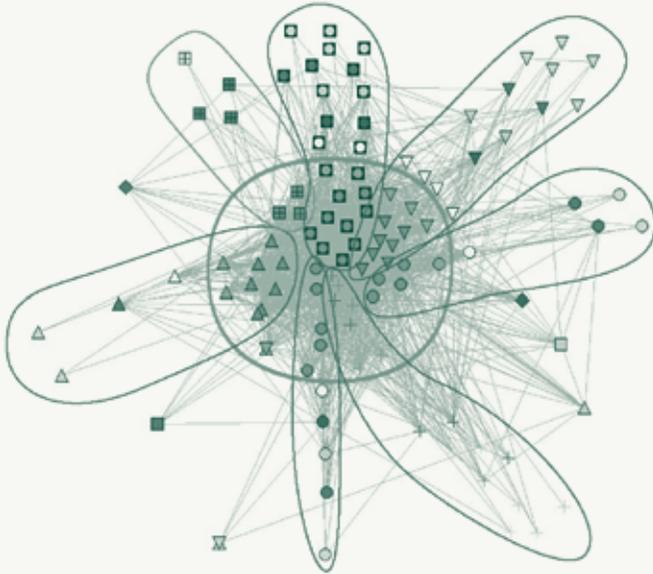


Abbildung 1: Antwortzeiten für die Anzahl von beteiligten Standorten in Tagen.

### Kommunikationsstruktur im Jazz Projekt

Um das Kommunikationsverhalten besser zu verstehen, haben wir Analysetechniken von Sozialen Netzwerken (Social Network Analysis, SNA) eingesetzt. Wir haben ein soziales Kommunikationsnetz mit allen Projektbeteiligten als Knoten erstellt und einzelne Knoten verbunden, wenn die entsprechenden Personen Kommentare zu mindestens einer gleichen Aufgabe geschrieben haben.

Abbildung 2 zeigt das Kommunikationsnetz der Projektbeteiligten. Die Form der Knoten repräsentiert den Standort der entsprechenden Person. Alle Knoten des gleichen Entwicklungsstandortes haben wir durch ein graues Oval hervorgehoben. Die Farbe eines Knotens zeigt die Zentralität der Person in Bezug auf ihr Kommunikationsverhalten. Je mehr Kommunikationsverbindungen eine Person zu anderen hat, desto zentraler liegt ihr Knoten im Kommunikationsnetz.



*Abbildung 2: Kommunikationsnetz der Jazz-Projektbeteiligten.*

Auf dieses Kommunikationsnetz der Projektbeteiligten haben wir verschiedene SNA Metriken angewendet. Bemerkenswert waren die Metriken k-core und Gruppenzentralität. Die k-core Metrik ermittelt bei gegebenen k eine zentrale Gruppe von Knoten, die mit mindestens k anderen Knoten aus der Gruppe verbunden ist. Mit  $k=25$  haben wir 60 Personen ermittelt, die mit mindestens 25 Personen dieser 60 kommunizieren. Durch eine Analyse der Gruppenzentralität konnten wir erkennen, dass alle Entwicklungsstandorte einen ca. gleich großen Anteil an der Kommunikation haben und kein Standort dominiert. Des Weiteren stellte sich heraus, dass ca. 50% der Entwickler eines Standortes in der zentralen k-core Kommunikationsgruppe sind. Diese Metriken zeigen, dass die Kommunikation im Jazz Projekt einen zentralen Kern hat. Keiner der Standorte ist auf einzelne Personen oder Gruppen als Kommunikationsbroker angewiesen. Somit ist die gesamte Kommunikation zwischen den 151 Entwicklern aus den USA, Kanada und Europa aus sieben verschiedenen Standorten sehr balanciert, ein wesentlicher Grund für die

schnellen Antwortzeiten in der verteilten Kommunikation und Grundlage für die effektive Zusammenarbeit im Jazz Projekt.

Im Anschluss an die Studie haben wir einigen Projektbeteiligten unsere Ergebnisse präsentiert und nach Gründen für diese ausgewogene Kommunikationsstruktur gesucht. In der Diskussion ergaben sich zwei Ursachen:

1. Durch den Einsatz von RTC werden die Aufgaben, Probleme und die Kommunikation aller Teams transparent und unabhängig von ihrem Standort in die Entwicklungsumgebung integriert und dargestellt. Einzelne Entwickler kennen die Probleme entfernter Teams und können schnell und effektiv in die Kommunikation eingreifen und helfen.

2. Die Projektbeteiligten kennen die Probleme verteilter Entwicklung und haben dies bezüglich Verhaltensregeln eingeführt. Unter anderem soll auf Anfragen und Kommentare entfernter Projektbeteiligter schnell reagiert werden. In RTC entsteht eine virtuelle Nähe, auch wenn die Kommunikationsbeteiligten sich auf verschiedenen Kontinenten befinden. Hat sich der Kontakt zwischen verteilten Entwicklern etabliert, kann schnell und effektiv auf dringende Probleme eingegangen werden.

### Zusammenfassung

Große verteilte Softwareentwicklungsprojekte haben neben vielen Vorteilen einige Herausforderungen zu bewältigen. Im letzten Jahrzehnt haben zahlreiche Studien diese identifiziert und zusammengetragen. Der Ansatz der Integration von Projektorganisation, Kommunikation und Systemmodellen in einem zentralen Werkzeug hat sich anfangs im akademischen und jetzt auch im industriellen Umfeld bewährt. Jedoch wird eine neue Entwicklungsumgebung alleine noch nicht alle Probleme lösen. Die Projektbeteiligten müssen die Eigenschaften verteilter Entwicklung kennen und durch gezielte Verhaltensregeln den Problemen entgegenwirken.

## Literatur

- [1] T. Wolf. Rationale-based Unified Software Engineering Model. Dissertation, Technische Universität München, July 2007.
- [2] Sysiphus, <http://sysiphus.in.tum.de>
- [3] unicase, <http://unicase.org>
- [4] Jazz, <http://jazz.net>
- [5] T. Wolf, A. Schröter, T. Nguyen, and D. Damian. Predicting Build Failures using Social Network Analysis on Developer Communication. In the Proceedings of the 31st International Conference on Software Engineering (ICSE'09), 2009.
- [6] T. Wolf, T. Nguyen, and D. Damian. Does distance still matter? *Software Process: Improvement and Practice*, 13(6):493 – 510, 2008.
- [7] J. D. Herbsleb and A. Mockus. An Empirical Study of Speed and Communication in Globally Distributed Software Development. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 29(6):481 – 494, June 2003.



## Lebensläufe



### Dipl.-Ing. Nico Brandt

\* 15. Oktober 1975

Die Einladung erfolgt auf Vorschlag der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt Lilienthal-Oberth und der Ringträgerin Frau Prof. Eveline Gottzein in Würdigung seiner Arbeiten im Rahmen des LISA Pathfinder Projekts der Europäischen Weltraumorganisation ESA.

#### Werdegang

- 1995 Abitur
- 1996 – 1998 Studium Maschinenbau, RWTH Aachen
- 1999 – 2002 Studium Luft- und Raumfahrttechnik, Universität Stuttgart
- 2001 – 2002 Reserach Engineer, School of Aerospace engineering, Georgia Institutte of technology, Atlanta, GA, USA
- 2002 Diplom: „Generation of Launch Vehicle Abort Trajectories using a Hybrid Optimization Method.“
- seit 2005 Promotion, Bereich Future Missions and Instruments, EADS Astrium GmbH, Friedrichshafen
- seit 2005 Systemingenieur, Bereich Future Missions and Instruments, EADS Astrium GmbH, Friedrichshafen



## Dr. Tanja Clees

\*04. Januar 1977

Die Einladung erfolgt auf Vorschlag der Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung in Anerkennung ihrer wissenschaftlichen Arbeiten an der Softwarebibliothek SAMG zur Beschleunigung von Simulationen für praktisch relevante naturwissenschaftlich-technische Anwendungen.

### Werdegang

- 1995 Abitur
- 1995 – 1999 Studium der Mathematik und Chemie, Universität zu Köln
- 1999 Diplom: „Mehrgitterverfahren für die zwei- und dreidimensionale Poissongleichung mit periodischen Randbedingungen und eine Anwendung in der Molekulardynamik.“
- 2004 Promotion, Universität zu Köln: „AMG Strategies for PDE Systems with Applications in Industrial Semiconductor simulation.“
- seit 1998 Mitarbeiterin am (jetzigen) Fraunhofer Institut SCAI
- seit 2002 wissenschaftliche Mitarbeiterin, SCAI
- 14.9.2007 Geburt des Sohnes Martin David
- seit 2007 Leitung der Gruppe Robust Design
- seit 2008 Bosch-Stipendiatin im Programm „Fast Track“
- 2008 porträtiert im Buch „Frauen, die forschen“ von Bettina Flitner und Jeanne Rubner und der zugehörigen Wanderausstellung
- seit 2009 Mitglied der Vintage Class der Fraunhofer Gesellschaft



## Dipl.-Ing. Franziska Harms

\*08. Oktober 1977

Die Einladung erfolgt auf Vorschlag der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG und des Ringträgers Herrn Prof. Berthold Leibinger in Anerkennung ihrer Leistungen auf dem Gebiet der Raumfahrttechnik, unter anderem bei der Simulation von Eintrittsmanövern von Raumflugkörpern. Ihre Promotion erweitert diesen Fokus und behandelt das Thema „Verification of the Behaviour of the Optical Sensors and the Science Instruments on the SOFIA Telescope in regard to Airborne Pointing“.

### Werdegang

- 1996 Abitur
- 1996 – 2002 Studium der Luft- und Raumfahrttechnik, Universität Stuttgart
- 2002 Diplom: „Charakterisierung eines induktiv beheizten Plasmagenerators zur Simulation von atmosphärischen Eintrittsmanövern von Raumflugkörpern unter Variation der Betriebsfrequenz.“
- seit 2003 Promotion, Institut für Raumfahrtsysteme, Universität Stuttgart, in Kooperation mit der USRA (Universities Space Research Association) am NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, USA
- seit 2006 wissenschaftliche Mitarbeiterin des Deutschen SOFIA Instituts, Universität Stuttgart + NASA Ames Research Center, Moffett Field, USA



## Dr. Janou Hennig

\* 31. Oktober 1972

Die Einladung erfolgt auf Vorschlag der Schiffbau-technischen Gesellschaft in Anerkennung ihrer Leistungen im Rahmen ihrer Dissertation zum Thema „Generation and Analysis of Harsh Wave Environments“, für die ihr auch der Georg-Weinblum-Preis 2005 zuerkannt wurde.

### Werdegang

|             |  |
|-------------|--|
| 1991        | Abitur   |
| 1991 – 1998 | Studium der Technomathematik, TU Berlin  |
| 1999        | Diplom (Wellenpakete für Modellversuche)   |
| 1999 – 2005 | wissenschaftliche Mitarbeiterin, Fachgebiet Meerestechnik, TU Berlin   |
| 2005        | Promotion, TU Berlin: „Generation and Analysis of Harsh Wave Environments“                                     |
| seit 2005   | Projektmanagerin, Offshore-Abteilung, Maritime Research Institute Netherlands (MARIN), Wageningen, Niederlande |
| seit 2007   | Forschungskoordinatorin „Environmental Modelling“, MARIN, Wageningen, Niederlande                              |



## Dr.-Ing. Michael Joham

\* 15.06.1974

Die Einladung erfolgt auf Vorschlag des VDE Technisch-Wissenschaftlicher Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in Würdigung seiner Forschungstätigkeit auf dem Gebiet optimaler und effizienter Algorithmen für die Datenkommunikation in Mehrnutzer-Kommunikationssystemen.

### Werdegang

- |             |   |
|-------------|---|
| 1993        | Matura an der Höheren Technischen Bundes-Lehr- und Versuchsanstalt für Elektronik in Innsbruck, Österreich  |
| 1994 – 1999 | Studium der Elektrotechnik und Informationstechnik an der Technischen Universität München   |
| 1999 – 2004 | wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Netzwerktheorie und Signalverarbeitung, Technische Universität München; Doktorarbeit „Optimization of Linear and Nonlinear Transmit Processing“ |
| 2000        | Gastwissenschaftler an der Purdue University, USA   |
| Seit 2004   | wissenschaftlicher Assistent am Fachgebiet Methoden der Signalverarbeitung, Technische Universität München  |
| 2008        | Gastprofessor an der Universidad de A Coruña, Spanien   |
| 2009        | Gastdozent an der Leibniz Universität Hannover  |



## Dr.-Ing. Martin Kautz

\*01. April 1973

Die Einladung erfolgt in Anerkennung seiner Arbeit im Rahmen seiner Promotion zum Thema „Auslegung von extern gefeuerten Gasturbinen für dezentrale Energieanlagen im kleinen Leistungsbereich.“

### Werdegang

|             |   |
|-------------|---|
| 1992        | Abitur  |
| 1993        | Gesellenbrief Zentralheizungs- und Lüftungsbauer  |
| 1994 – 2000 | Studium Maschinenbau, Vertiefung Energiemaschinenbau, Universität Rostock   |
| 2000        | Diplom-Ingenieur  |
| 2000 – 2005 | wissenschaftlicher Assistent und Doktorand, Institut für Energie- und Umwelttechnik, Universität Rostock  |
| 2005        | Promotion, Fakultät für Maschinenbau, Universität Rostock: „Auslegung von extern gefeuerten Gasturbinen für dezentrale Energieanlagen im kleinen Leistungsbereich.“ |
| 2005 – 2008 | wissenschaftlicher Assistent, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, TU Bergakademie Freiberg   |
| seit 2008   | Engineer bei der Siemens AG, Corporate Technology, Erlangen   |



## Dr.-Ing. Thomas Naumann

\* 20. September 1973

Die Einladung erfolgt auf Vorschlag des Vereins Deutscher Ingenieure in Würdigung seiner Projektarbeiten zur Modularisierung des Produktentwicklungsprozesses der Mercedes Car Group und seiner Promotion zum Thema „Adaptives Systemmanagement“.

### Werdegang

- 1990 – 1993 Berufsausbildung mit Abitur, Instandhaltungsmechaniker
- 1994 – 1999 Studium Maschinenbau, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- 1999 Diplom
- 2005 Promotion: „Adaptives Systemmanagement“
- 2000 – 2002 Angestellter, Softlab GmbH, München
- 2000 – 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter, Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- seit 2005 Angestellter, Daimler AG, RT Ulm



## Dr. Christine Silberhorn

\* 19. April 1974

Die Einladung erfolgt auf Vorschlag der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Anerkennung ihrer herausragenden Arbeiten auf dem Gebiet der Quantenoptik und Quantenkryptografie.

### Werdegang

- 1993 Abitur
- 1993 – 1999 Studium der Physik und Mathematik, Universität Erlangen Nürnberg
- 1999 Erstes Staatsexamen für das Lehramt an Gymnasien
- 1999 – 2002 Promotion, Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen Nürnberg: „Intensive verschränkte Strahlen und Quantenkryptographie.“
- 2003 – 2004 wissenschaftliche Mitarbeiterin, Universität Oxford, Clarendon Laboratory Junior Research Fellow, Wolfson College, Oxford
- 2005 wissenschaftliche Mitarbeiterin, Max-Planck-Forschergruppe, Erlangen
- seit 2005 Leiterin der selbstständigen Max-Planck-Nachwuchsgruppe „Integrierte Quantenoptik“, Erlangen

### Preise

- 2008 Heinz Maier-Leibnitz-Preis



## Dr. Timo Wolf

\* 07. März 1977

Die Einladung erfolgt auf Vorschlag der Gesellschaft für Informatik in Anerkennung seiner hervorragenden Forschungsergebnisse im Systems- und Software-Engineering Globaler Projekte durch Entwicklung von Modellen für den Einbezug informeller Kommunikation und Verbreitung impliziten Wissens, die sich auch in der industriellen Praxis bewährt haben.

### Werdegang

|             |   |
|-------------|---|
| 1996        | Abitur  |
| 1997 – 2003 | Studium Informatik, TU München  |
| 2003        | Diplom  |
| 2003 – 2007 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Lehrstuhl für Angewandte Softwaretechnik, TU München                                    |
| 2007        | Promotion, Lehrstuhl für Angewandte Softwaretechnik, TU München<br>„Rationale-based Unified Software Engineering Model“ |
| 2007 – 2008 | Wissenschaftler, Software Engineering Interaction Lab (Segal), University of Victoria, Kanada                           |





## Mitglieder des Stiftungsrates (Stand: 3/2009)

### Stimmberechtigte Mitglieder

Die Träger des „Werner-von-Siemens-Ringes“ sowie die Vorsitzenden oder Präsidenten oder nominierten Vertreter nachstehender Institute oder Körperschaften

- > Prof. Dr. E. O. Göbel  
Präsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt  
Geschäftsführender Vorsitzender des Stiftungsrates
- > Frau Prof. Dr.-Ing. E. Gottzein  
Trägerin des „Werner-von-Siemens-Ringes“  
Stellvertretende Vorsitzende des Stiftungsrates
- > Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. H.-J. Bullinger  
Fraunhofer Gesellschaft
- > Prof. Dr.-Ing. H. Christ  
Deutscher Verband techn.-wiss. Vereine
- > Dipl.-Ing. J. Darge  
Verband Deutscher Architekten und Ingenieurvereine
- > Dr. F. Dittmann  
Deutsches Museum
- > Prof. Dr. phil. h.c. Dr.-Ing. E.h. A. Fischer  
Träger des „Werner-von-Siemens-Ringes“
- > Dr. Th. Geelhaar  
Gesellschaft Deutscher Chemiker
- > Prof. Dr. P. Gruss  
Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften
- > Dipl.-Ing. H. Hoffmann  
Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt
- > Prof. Dr.-Ing. H. Keitel  
Bundesverband der Deutschen Industrie
- > Prof. Dr.-Ing. M. Kleiner  
Deutsche Forschungsgemeinschaft

- > Prof. Dr. mult. E. Lehmann  
Schiffbautechnische Gesellschaft
- > Prof. Dr.-Ing. E.h. B. Leibinger  
Träger des „Werner-von-Siemens-Ringes“
- > Prof. Dr.-Ing. W. Merkel  
Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches –  
technisch-wissenschaftlicher Verein
- > Dipl.-Ing. B. Meyer  
Träger des „Werner-von-Siemens-Ringes“
- > Prof. Dr.-Ing. C. Nedeß (2009 – 2013)
- > Prof. Dr.-Ing. E.h. M. Nußbaumer  
Verein Deutscher Ingenieure
- > Prof. Dr. D. Oesterhelt  
Träger des „Werner-von-Siemens-Ringes“  
Max-Planck-Institut für Biochemie
- > Dr. A. Oetker  
Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft
- > Prof. Dr.-Ing. K. P. Petermann (2007 – 2011)  
Technische Universität Berlin
- > Prof. Dr. rer. nat. C. A. Petri  
Träger des „Werner-von-Siemens-Ringes“
- > Prof. Dr. F. P. Schäfer  
Träger des „Werner-von-Siemens-Ringes“
- > Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. mult. J. Schlaich  
Träger des „Werner-von-Siemens-Ringes“
- > Prof. Dr.-Ing. W. Schröppel  
Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik VDE
- > Prof. Dr. H. Schwärtzel  
Gesellschaft für Informatik
- > P. von Siemens  
Siemens AG
- > Prof. Dr. K. Urban  
Deutsche Physikalische Gesellschaft

- > Prof. Dr.-Ing. H. Weule  
Schatzmeister der Stiftung Werner-von-Siemens-Ring
- > Dr.-Ing. C.-D. Wuppermann  
Stahlinstitut VDEh

### Nichtstimmberechtigte Teilnehmer an den Sitzungen des Stiftungsrates

- > Dipl.-Pol. J. Maas  
Geschäftsführer der Stiftung Werner-von-Siemens-Ring
- > Wirtsch.-Ing. A. Schwab  
SIEMENS Aktiengesellschaft, Chief Executive's Office



Stiftung Werner-von-Siemens-Ring  
c/o DVT  
WissenschaftsForum  
Markgrafenstraße 37  
10117 Berlin

[www.siemens-ring.de](http://www.siemens-ring.de)

