

Abschlußbericht
zum Teilprojekt
Software Architektur und Algorithmen
für gekoppelte
Fluid-Struktur-Simulationen

zum Verbundforschungsvorhaben:
Numerische Lösungsmethoden für
Fluid-Struktur-Wechselwirkungs-Probleme im Schiffbau

FSI-Schiff, 03SX210

Technische Universität Braunschweig
Institut für Wissenschaftliches Rechnen

22. Dezember 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.3.1	Algorithmische Kopplung	4
1.3.2	Software Engineering, Komponententechnologie	5
1.3.3	Kopplung der Diskretisierungen	5
1.3.4	Ablauf des Vorhabens	5
1.3.5	Fachliteratur, Informationsdienste	6
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	6
1.4.1	Das Fluid-Problem	6
1.4.2	Strukturprobleme	8
1.4.3	Wissenschaftliches Rechnen	9
1.4.4	Fluid-Struktur Interaktion	10
1.5	Zusammenarbeit	11
2	Eingehende Darstellung	11
2.1	Ergebnisse	11
2.1.1	Implementierung	11
2.1.2	Testbeispiele	13
2.2	Verwertbarkeit der Ergebnisse	15
2.3	Bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	16
2.4	Workshops, Konferenzen und Veröffentlichungen	16
	Literatur	17
A	Erfolgskontrollbericht	26
A.1	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen	26
A.2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse, Nebenergebnisse und gesammelte Erfahrungen	26
A.3	Fortschreibung des Verwertungsplans	27
A.3.1	Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen, Lizenzen etc.	27
A.3.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten, Vorteile gegenüber anderen Lösungen	28
A.3.3	Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten	28
A.3.4	Anschlussfähigkeit	29
A.4	Arbeiten, die zu keinem Ergebnis geführt haben	29
A.5	Präsentationsmöglichkeiten für potenzielle Nutzer	29
A.6	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	29

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

In diesem Teilvorhaben wurden die Grundvoraussetzungen zu praxisrelevanten Berechnungen von Fluid-Struktur-Wechselwirkungen (FSI-Probleme - fluid-structure interaction) im Bereich der Meeres- und Schiffbautechnik geschaffen. Für die separaten Teile Struktur und Fluid sind robuste, zuverlässige und auch effiziente Simulationsprogramme verfügbar. Ziel dieses Vorhabens ist es, eine ebenso robuste und zuverlässige Simulation des gekoppelten Gesamtsystems für den industriellen Einsatz zu realisieren.

Dafür ist eine Grundvoraussetzung die algorithmische Kopplung, d.h. die robuste und numerisch effiziente Lösung der aus dem gekoppelten System resultierenden groß dimensionierten zeitabhängigen Gesamtgleichungssysteme. Eine weitere wesentliche Vorbedingung zur Realisierung der Simulationsrechnungen liegt im Bereich des Software Engineering. Hier ist die einwandfreie Zusammenarbeit der parallelen Struktur- und Fluidlöser basierend auf der Komponenten-Technologie, auf verteilten Rechnersystemen mit austauschbaren Programm-Komponenten zu gewährleisten.

1.2 Voraussetzungen

Das Institut für Wissenschaftliches Rechnen (WiRe) der TU Braunschweig beschäftigt sich seit vielen Jahren mit gekoppelten Problemen, insbesondere der Fluid-Struktur-Wechselwirkung. Zahlreiche Dissertationen zu diesem Gebiet sind in letzter Zeit erschienen [57, 78, 27, 76], einige davon im DFG geförderten Graduiertenkolleg 432 "Wechselwirkung von Struktur und Fluid" [18]. Die Themen dieses Graduiertenkollegs umfassten Umströmungen elastischer Tragflügel, Windkraftanlagen, Windeinwirkung auf schlanke Tragwerke im Bauwesen, Wellenschlag auf Meeresbauwerke, flüssigkeitsgefüllte Zentrifugen, Lärmemission und -absorption sowie Schalldämmung bei Bauwerken.

Des Weiteren hat das WiRe im Unterauftrag der FhG/SCAI an der Entwicklung des General Coupling Environment (GCE) im COSIWIT-Vorhaben mitgearbeitet. Im Rahmen dieses Unterprojektes wurden eine Löserbibliothek für nichtlineare, stark koppelnde Systeme zur Verfügung gestellt und ein abstraktes Interface für Simulationsprogramme definiert, das zur Anbindung von Simulationsprogrammen an die Löserbibliothek dient.

Ein allgemeines Werkzeug zur Kopplung von Softwareeinheiten (Komponenten) basierend auf der Komponenten-Technologie ist in Form der Component Template Library (CTL) [64] am WiRe entwickelt worden. Hier wird zunächst die Funktionalität einer bestehenden oder zu entwickelnden Programm-Bibliothek in einem abstrakten Interface beschrieben. Die Bibliothek dient nun als eine Implementierung des Interface und bildet mit diesem

zusammen eine Software-Komponente, mit dem andere Komponenten funktional über das Interface zugreifen können.

In den BMBF-Vorhaben GL 18S0025-18S0025B haben die Projektpartner der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) auf dem Gebiet numerischer Lösungen von gekoppelten Fluid-Struktur-Problemen bereits Erfahrungen gesammelt, wenn auch mit einer monolithischen Methode. Weiterhin verfügt die HSVA über verschiedene eigenentwickelte Strömungslöser, wie z. B. Venice, FreSCo und Neptun.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die übergeordneten Arbeitspakete in diesem Teilprojekt sind die algorithmische Kopplung, das Software Engineering, die Komponententechnologie und die Kopplung der Diskretisierungen, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden.

1.3.1 Algorithmische Kopplung

Um ein numerisch stabiles Verfahren für die zu berechnenden stark koppelnden Systeme zu erhalten, wird häufig ein implizites Zeitintegrationsverfahren benötigt. Die Verwendung kommerzieller Programme verbietet eine monolithische Gesamtsimulation, so dass keine Gesamtsystemmatrix im Speicher vorliegt und somit auch nur iterative Löser für das Gesamtsystem in Frage kommen, wobei es verschiedene Möglichkeiten gibt, das nicht-lineare Gleichungssystem iterativ zu lösen. Das einfachste explizite Verfahren ist das gestaffelte Verfahren, bei dem in jedem Zeitschritt lediglich einmal jedes Teilproblem gelöst wird. Dieses Lösungsschema liefert lediglich für kleine Zeitschrittweiten brauchbare Ergebnisse. Eine Erweiterung des gestaffelten Verfahrens führt auf das Block-Jacobi- und das Block-Gauß-Seidel Verfahren, bei dem die Teilprobleme solange in einem Zeitschritt gelöst werden, bis die Gesamtlösung hinreichend genau ist. Allerdings können auch bei diesem Verfahren Instabilitäten auftreten, wenn das Ausgangsproblem stark gekoppelt ist und die Zeitschrittweite zu groß ist. Weitergehende Möglichkeiten bieten das partitionierte Block-Newton-Verfahren und das Quasi-Newton Verfahren. Die Robustheit beider Löserklassen und damit die Zuverlässigkeit der Gesamtsimulation wird durch Line-Search Methoden, die ihrerseits die Residuen verwenden, deutlich verbessert. Bei der Auswahl der verwendeten Simulationsprogramme werden somit Eigenschaften wie Steuerbarkeit der internen Löser, Abrufbarkeit der Residuen und die Möglichkeit zur Einbindung externer Bibliotheken wesentlich sein.

1.3.2 Software Engineering, Komponententechnologie

Die verschiedenen Simulationsprogramme sind mittels einer Interface-Definition möglichst gleichartig handhabbar zu machen, so dass eine Bibliothek von Kopplungslösern genutzt wird, welche ihrerseits über diese Schnittstelle die Teilsimulationen steuert, um die Gesamtlösung zu berechnen. Eine Konsequenz dieser Vorgehensweise ist, dass einmal angepasste Simulationscodes (zumindest aus softwaretechnischer Sicht) beliebig paarweise miteinander gekoppelt werden können. Diese Umwandlung der einzelnen Simulationsprogramme (OpenSource - ParaFEP und OpenFOAM) in Softwarekomponenten geschieht unter Verwendung der Component Template Library (CTL). Dies ermöglicht die Zusammenarbeit der Komponenten sowohl remote (mittels Kommunikation) als auch lokal (durch Linken als dynamische Bibliothek).

1.3.3 Kopplung der Diskretisierungen

Insbesondere auch bei der Verwendung einer Arbitrary-Lagrangean Eulerian (ALE) Formulierung für das Fluid muss eine korrekte und konsistente Übertragung der Drücke, Kräfte, Geschwindigkeiten und Verschiebungen sichergestellt werden. Um den Transfer von physikalischen Größen zwischen nicht-kompatiblen Netzen durchzuführen, kann als eine Möglichkeit ein sogenannter Interpolator in Form einer weiteren Software-Komponente verwendet werden, da in dieser Bibliothek alle benötigten Interpolationsoperatoren zu Verfügung stehen.

1.3.4 Ablauf des Vorhabens

Es war geplant, die oben genannten Aufgaben in einem Zweistufenplan zu realisieren. In der ersten Projektphase sollten mit OpenSource Codes Software Komponenten erstellt und damit eine FSI-Simulation durchgeführt werden. OpenSource Programme haben den Vorteil, dass bei ihnen beliebige Anpassungen möglich sind, da auf den Programm-Quelltext zugegriffen werden kann. In dieser Phase wurden Modellprobleme moderater Dimension mit konformen Netzen stationär/linear, dann instationär/linear und zuletzt instationär/nicht-linear gerechnet.

Für die Kopplung der nicht passenden Fluid- und Strukturgitter sollte das Kopplungswerkzeug MpCCI eingesetzt werden. Obwohl MpCCI mit öffentlichen Geldern entwickelt worden ist, wird es heute kommerziell vertrieben und ist deshalb auch kein Open-Source Code. Zudem ist MpCCI so ausgelegt, dass es bei einer FSI-Simulation auch die gesamte Kommunikation zwischen den Lösern übernehmen möchte, weshalb es inkompaktibel mit Software-Komponenten ist. Aus diesem Grund wurde im Vorhaben nur mit kompatiblen Netzen gerechnet.

In der zweiten Stufe sollten die Arbeiten mit kommerziellen Codes durchgeführt werden. Allerdings wurde in Zusammenarbeit mit der HSVA entschieden, keine weiteren kommerziellen Codes zu verwenden, d.h. OpenFOAM wurde als Fluidlöser eingesetzt und ParaFEP als Strukturlöser.

Somit stand am Ende des Projektes eine Software bestehend aus Open-Source Komponenten zur Verfügung.

Der Ablauf des Projekts gestaltete sich wie folgt. Am Anfang wurden OpenFOAM als Fluid-Löser und ParaFEP als Strukturlöser ausgewählt. Beide Programme sind OpenSource und es konnte somit auf den Quellcode zugegriffen werden. Im ersten Schritt wurden beide Programme als sogenannte Software-Komponenten realisiert, um sie schließlich in die FSI-Gesamtsimulation einzubinden.

1.3.5 Fachliteratur, Informationsdienste

Die verwendete Fachliteratur ist am Ende von Kapitel 2 aufgeführt. Die Literatur wurde über die Universitätsbibliothek der TU Braunschweig bezogen, die über diverse Landeslizenzen verfügt, so dass auf zahlreiche Journale zugegriffen werden konnte.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

1.4.1 Das Fluid-Problem

Die Bewegung einer inkompressiblen Flüssigkeit wird mit Hilfe der inkompressiblen Navier-Stokes Gleichungen beschrieben (vgl. [4, 50, 41, 31, 68]) - hier der Einfachheit halber ohne Turbulenzmodell -, die in dimensionsloser Form durch

$$\begin{aligned} \dot{u} - Re^{-1}\Delta u + (u \cdot \nabla)u + \nabla p &= f & \text{in } (0, T] \times \Omega, \\ \nabla \cdot u &= 0 & \text{in } [0, T] \times \Omega, \\ u &= g & \text{on } [0, T] \times \partial\Omega, \\ u(0, \cdot) &= u_0 & \text{in } \Omega, \end{aligned} \quad (1.1)$$

gegeben sind. Hierbei ist u die Geschwindigkeit, u_0 die Anfangsgeschwindigkeit, p der Druck, f eine Kraft, g gegebene Dirichlet-Randbedingungen, $[0, T]$ ein Zeitintervall und $\Omega \subset \mathbb{R}^d$, $d \in \{2, 3\}$, ein Gebiet. Mit Re wird die sogenannte Reynolds Zahl bezeichnet. In Abhängigkeit von Re können verschiedene Fließvorgänge durch (1.1) beschrieben werden. Für größere Werte von Re treten turbulente Fließvorgänge auf [71, 37, 20]. Üblicherweise muss dann ein Turbulenzmodell hinzugefügt werden. Anwendungen finden sich zum Beispiel im Bereich der Schiffshydrodynamik und der Aerodynamik [3].

Die numerische Lösung der zeit-abhängigen Navier-Stokes Gleichungen erfordert sowohl die Diskretisierung im Raum als auch in der Zeit (vgl. [29, 30, 9, 10, 16, 28, 14]). Die Ortsdiskretisierung kann u. a. mit finiten Volumen

oder finiten Elementen durchgeführt werden und führt auf eine DAE vom Index 2 (siehe [12, 72]), d. h. explizite Löser können numerisch instabile Lösungen liefern. Deshalb werden i. Allg. linear-implizite, teil-implizite bzw. implizite Verfahren verwendet (siehe [30, Kapitel 3.16] und [22, Kapitel 4.1]).

Das Crank-Nicolson und das Zwischenschritt- θ -Verfahren [28] sind in der numerischen Simulation der inkompressiblen Navier-Stokes Gleichungen weit verbreitet [82, 36]. Das Crank-Nicolson Verfahren wurde von Temam [80], Heywood und Rannacher [33] sowie Bause [8] für eine mit finiten Elementen semi-diskretisierte Navier-Stokes Gleichung analysiert. Falls die Daten hinreichend glatt sind, kann bewiesen werden, dass sich der numerische Fehler zwischen zeit-diskreter und zeit-kontinuierlicher finite-Elemente-Geschwindigkeit in $L^\infty(0, T; L^2(\Omega))$ wie $(\tau)^2$ für äquidistante Zeitschritte τ verhält. Die Zwischenschritt- θ -Methode wurde von Klouček und Rys [40] sowie Müller-Urbaniak [60] untersucht. Eine Fehlerabschätzung von zweiter Ordnung wie für das Verfahren von Crank Nicolson konnte in [60] bewiesen werden. Das Crank-Nicolson Verfahren ist A-stabil, während das Zwischenschritt- θ -Verfahren stark A-stabil ist. Dies bedeutet, dass das Crank-Nicolson Verfahren zu numerischen Oszillationen neigt, wenn das Problem nicht glatte Anfangs- oder Randbedingungen hat. Diese Oszillationen können allerdings durch kleinere Zeitschritte gedämpft werden.

Bei der Fluid-Struktur Interaktion ändert sich wegen der Bewegung der Struktur das Strömungsgebiet im Laufe der Zeit, und der Rand des Gebietes bewegt sich. Während bei der Eulerschen Betrachtungsweise der Strömungsgleichungen ein festes Referenzsystem verwendet wird, wird bei der Lagrangeschen Formulierung das Referenzsystem mit der Fluidgeschwindigkeit mitbewegt. Der Vorteil der Eulerschen Formulierung liegt darin begründet, dass auf einem räumlichen Referenzgebiet gearbeitet wird. Dafür läßt sich der bewegte Rand nicht gut darstellen. Für die Lagrangesche Betrachtungsweise spricht, dass ein bewegter Rand gut dargestellt werden kann. Allerdings ergeben sich Probleme bei Fließvorgängen mit starken Deformationen.

Um die Vorteile beider Betrachtungsweisen zu kombinieren, wird eine gemischte Formulierung, die sogenannte ALE-Formulierung ("Arbitrary Lagrangian Eulerian") gewählt [19, 35]. Bei der ALE-Formulierung wird ein beliebiges Referenzsystem bestimmt, das sich mit einer beliebigen Geschwindigkeit bewegt. Eine Transformation zwischen dem Strömungsgebiet und dem Referenzsystem kann leicht gefunden werden.

Das Zeitschrittverfahren, mit welchem die Navier-Stokes Gleichungen gelöst werden, und der Algorithmus zur Netzbewegung stehen in enger Beziehung zueinander. Die Netzbewegung muss bei der Berechnung der Gittergeschwindigkeiten mit berücksichtigt werden.

Ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Strömungen auf sich verformenden Gittern soll eine gleichförmige Bewegung auf einem sich verformenden Gitter exakt berechnen können. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn

das numerische Integrationsverfahren, welches für die Strömung gewählt wurde, und das Verfahren zur Bewegung des Strömungsnetzes eine diskrete geometrische Bilanzgleichung ("Geometric Conservation Law", kurz GCL) erfüllen.

Diese geometrische Bilanzgleichung ist im Prinzip gleichwertig zu der GCL-Bedingung, die zuerst in [81] für strukturierte Gitter und finite Differenzen Schemata hergeleitet wurde. Entscheidende Arbeiten zu dieser Thematik stammen von Farhat et al. [25], Lesoinne und Farhat [47], Guillard und Farhat [32], LeTallec und Mani [45]. Allerdings befassen sich die meisten Arbeiten zu dieser Thematik nur mit dem einfacheren Fall von nicht-viskosen Strömungen oder untersuchen nur Zeitschrittverfahren, die von erster Ordnung sind. Verfahren höherer Ordnung werden z. B. in [56] hergeleitet. Die Diskussion zu dem geometrischen Erhaltungsgesetz ist bei weitem noch nicht abgeschlossen, und es existieren keine einheitlichen Ergebnisse.

1.4.2 Strukturprobleme

Die Strukturgleichungen werden bei Problemen der Fluid-Struktur Interaktion so formuliert, dass große Verformungen der Struktur möglich sind. Bei den Problemen, die in diesem Projekt bearbeitet werden sollen, werden nur kleine Verzerrungen und elastische Verformungen der Struktur erwartet. Deshalb werden die Bewegungsgleichungen einer geometrisch nichtlinearen und materiell linearen Elastodynamik als Modell für die Strukturmechanik verwendet. Die Gleichungen werden in einer Lagrangeschen Formulierung dargestellt (vgl. [Wri01]). Die Bewegungsgleichungen für einen elastischen Körper sind durch die Gleichung

$$\rho_s \ddot{u} - \nabla \cdot S = f \quad \text{in } (0, T] \times \Omega_s \quad (1.2)$$

gegeben, wobei Ω_s das Stukturgebiet, $(0, T]$ ein Zeitintervall, ρ_s die Dichte des Körpers, u die Verschiebung und f die angreifenden Volumenkräfte sind. Mit S wird der 2. Piola-Kirchhoff'sche Spannungstensor bezeichnet, der für ein homogenes und isotropes Material durch

$$S = \lambda(\text{tr } E)I + 2\mu E, \quad E = \frac{1}{2}(F^\top \cdot F - I)$$

definiert ist. Hierbei sind E der Green-Lagrangeschen Verzerrungstensor, λ und μ sind die Lamé-Konstanten und F ist der unsymmetrische materielle Deformationsgradient. In einem kartesischen Koordinatensystem kann der Verzerrungstensor E komponentenweise durch

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial \xi_j} + \frac{\partial u_j}{\partial \xi_i} + \sum_{k=1}^3 \frac{\partial u_k}{\partial \xi_i} \frac{\partial u_k}{\partial \xi_j} \right)$$

ausgedrückt werden. Aufgrund der nichtlinearen Beziehung zwischen dem Verzerrungstensor E und den Verschiebungen u können somit große Verformungen der Struktur beschrieben werden. Außerdem kann mit Hilfe des materiellen Deformationsgradienten F und des 2. Piola-Kirchhoff'schen Spannungstensors S der Cauchy'sche Spannungstensor σ_s mit

$$\sigma_s = \frac{1}{\det F} F \cdot S \cdot F^\top$$

beschrieben werden. Als Anfangsbedingungen für das Problem (1.2) werden

$$u(0, \xi) = u_0(\xi), \quad \frac{\partial u}{\partial t}(0, \xi) = w_0 \quad \text{für } \xi \in \Omega_0$$

gewählt. Die Randbedingungen werden durch

$$u = u_\Gamma \quad \text{auf } \Gamma_{s,1} \quad \text{und} \quad S \cdot n = \tilde{S} \quad \text{auf } \Gamma_{s,2}$$

beschrieben, wobei n die äußere Normale ist. Außerdem gilt $\Gamma_{s,1} \cup \Gamma_{s,2} = \bar{\Omega}_s$ und $\Gamma_{s,1} \cap \Gamma_{s,2} = \emptyset$. Die Diskretisierung der Strukturgleichungen erfolgt mit speziellen finiten Elementen [87], wobei Adaptivität sehr wichtig ist (vgl. [77]).

Die Zeitintegration wird mittels eines verallgemeinerten- α -Verfahrens durchgeführt, das auf Newmark [61], Hilbert, Hughes und Taylor [34] und Chung und Hulbert [15] zurückgeht. Bei Erlicher et al. [23] kann ein Überblick über die Eigenschaften gewonnen werden, und Anwendungen finden sich bei [49].

1.4.3 Wissenschaftliches Rechnen

Bei der numerischen Lösung der Fluid- und Strukturprobleme treten jeweils ähnliche Fragestellungen und Probleme bei der numerischen Berechnung der Lösung auf. Das wissenschaftliche Rechnen ist ein recht junges Forschungsgebiet, bei dem es darum geht, komplexe Probleme wie hier das Fluid- und Strukturproblem bzw. das gekoppelte Fluid-Struktur-Interaktionsproblem zu lösen [11, 42].

Eine sehr wichtige Fragestellung bei der Lösung partieller Differentialgleichungen ist die Diskretisierung im Ort, die oft mit Finiten Elementen gemacht wird [24, 16]. Neben ParaFep, das bei unserer Realisierung verwendet wurden, gibt es zahlreiche weitere Software-Tools, z. B. ALBERTA [75].

Wichtige Fragen im Bereich des High-Performance Computing sind Adaptivität, Parallelität und das schnelle und genaue Lösen der nicht-linearen Gleichungen. Bei der Adaptivität ist es wichtig, den numerischen Fehler im Raum zu approximieren und an den Stellen zu verfeinern, an denen dieser besonders groß ist. An Stellen mit relativ kleinen Fehlern kann hingegen vergrößert werden (siehe auch [77]). Bei der Parallelität ist eine Schwierigkeit,

das Gebiet so aufzuteilen, dass alle Knoten eines Clusters ungefähr gleich große Probleme haben und der Kommunikationsaufwand zwischen den Knoten nicht zu groß wird [13, 43].

Das Lösen von nicht-linearen Gleichungen kann z. B. mit einem vereinfachten Newton-Verfahren gelöst werden [38], wobei das nicht-lineare Problem auf ein lineares System zurückgeführt wird. Dieses System muss meist iterativ gelöst werden, da die Dimension des Systems sehr groß ist [83, 21]. Fragen zur Analysis solcher Systeme werden bei [84] beantwortet.

Großer Beliebtheit erfreuen sich z. Z. nicht nur die "herkömmlichen" Finite-Elemente sondern auch diskontinuierliche Galerkin Verfahren und sogenannte meshless FEM [7].

1.4.4 Fluid-Struktur Interaktion

In einer Vielzahl von wissenschaftlich interessanten und technologisch wichtigen Kontexten spielen Fluid-Struktur Interaktionen eine wesentliche Rolle, wobei diese Interaktionen oftmals eine starke Kopplung aufweisen [59, 70, 44]. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, eine gekoppelte Simulation zu realisieren [67, 66, 74]. Eine Herangehensweise ist, neue Software und Lösungsmethoden für das spezifische gekoppelte System zu entwickeln. Dies ist der sogenannte monolithische oder auch direkte Ansatz [74]. Eine alternative Möglichkeit bieten die als partitioniert oder iterativ bezeichneten Methoden [74, 26, 58, 70, 54, 51, 78]. Bei diesen Methoden wird vorausgesetzt, dass für die zu koppelnenden Komponenten bereits Simulationsprogramme existieren, das bedeutet hier einen Struktur- und einen Fluidlöser, die in einem iterativen Prozess dazu genutzt werden können, das gekoppelte Gesamtproblem zu lösen [26, 70, 51].

In [48, 69, 46] kann man Beschreibungen verschiedener expliziter Verfahren finden, die in [69] bezüglich ihrer Ordnung und Konsistenz untersucht werden. Diese Verfahren können seriell oder parallel formuliert werden [69, 79].

In [78, 55] wird das FSI-Problem als ein differential algebraisches Gleichungssystem (DAE), gekoppelt durch algebraische Gleichungen, formuliert. Das Wort algebraisch besagt hier, dass die Kopplung keine zeitabhängigen Terme enthält. Aus Stabilitätsgründen muss oft ein implizites Verfahren verwendet werden [48, 74, 44]. In diesem Fall muss ein großes nichtlineares Gleichungssystem, vorzugsweise unter Verwendung der Löser der Teilsimulationen, gelöst werden. Meistens geschieht dies mit Block-Jacobi-, Block-Gauss-Seidel- oder Relaxationsmethoden [17, 48].

Diese vergleichsweise einfachen Methoden können insbesondere bei vorliegender starker Kopplung fehlschlagen [66, 78, 5, 79, 52, 53, 55]. In [6, 79, 52, 53, 78] werden dem Newton-Verfahren ähnliche und robuste Methoden beschrieben, die auf der Software-Ebene als partitioniert zu bezeichnen sind.

Zahlreiche Kopplungen auch von nicht-konformen Diskretisierungen wurden mit dem Kopplungswerkzeug MPCCI realisiert. Diese MPI basierte Kommunikations- und Interpolationsbibliothek unterstützt in der heutigen Form jedoch nicht die Komponententechnik.

1.5 Zusammenarbeit

Die Software zur Implementierung der Komponentenarchitektur und zur Kopplung der Fluid- und Strukturdiskretisierungen wurde am WiRe entwickelt und bei der HSVA installiert. Das WiRe unterstützte die HSVA bei der Auswahl der Simulationscodes und bei der Einbindung dieser Codes als Software-Komponenten in die Gesamt-FSI-Simulation. Die Testbeispiele wurden gemeinsam vom WiRe und von der HSVA ausgewählt.

Die HSVA stellte die Gitter für die Berechnungen zur Verfügung und berechnete auch die meisten FSI Simulationen.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Ergebnisse

2.1.1 Implementierung

Als Fluid-Löser wurde OpenFOAM [65] ausgewählt. OpenFOAM ist ein in C++ geschriebener OpenSource Code, dessen Hauptanwendungsgebiet Probleme aus dem Bereich der Computational Fluid Dynamics (CFD) sind. Als Ortsdiskretisierung werden Finite Volumen verwendet, als Zeitdiskretisierung kann wahlweise eine implizite Euler Methode oder die Trapezregel verwendet werden. Sowohl Orts- als auch Zeitdiskretisierung sind maximal von zweiter Ordnung. Gitterbewegungen und bewegte Ränder können ebenfalls beschrieben werden. Deshalb wurden die Löserbibliotheken *icoAutoMotion* (Version 1.2) *icoDymFoam* (ab Version 1.3) verwendet und entsprechend geändert. OpenFOAM verfügt über die Möglichkeit, parallele Simulationen durchzuführen, ohne dass Anpassungen am Code durchgeführt werden müssen. Es muss lediglich das Programm *lam* gestartet und das Gitter partitioniert werden, was OpenFOAM ebenfalls übernimmt.

Außerdem beinhaltet OpenFOAM einen Preprocessor (FoamX) und einen Postprocessor (paraFoam), der auf Paraview aufgesetzt ist. Eine Dokumentation ist verfügbar, leider wurde sie nicht immer den Versionen angepasst. Hilfreicher ist das User-Forum von OpenFOAM.

Die Installation von OpenFOAM ist immer ein recht zeitintensiver Prozess, da sehr viele Bibliotheken zu kompilieren sind. Zudem stellt die Installation von Paraview immer eine große Herausforderung dar. Ein weiterer Nachteil von OpenFOAM besteht darin, dass sich die Versionen doch stark voneinander unterscheiden. Als Beispiel kann die Gebietszerlegung dienen.

Zum Rekonstruieren der numerischen Lösung und des Gitters kann das Programm *reconstructPar* verwendet werden. Bei Version 1.2 konnten lediglich die Simulationsergebnisse zusammengeführt werden, nicht das Gitter. Bei Version 1.3 war beides möglich, und bei 1.4.1 kann mit *reconstructParMesh* das Gitter wieder rekonstruiert werden.

Zunächst wurden die Löser *icoFoamAutoMotion* (Version 1.2) *icoDyM-Foam* (ab Version 1.3) so abgeändert, dass die Randdrücke explizit herausgeschrieben werden. Standardmäßig schreibt OpenFOAM keine Randdrücke heraus, wenn als Randbedingung *zeroGradient* ausgewählt wurde. Anschließend wurde eine Software Komponente erstellt, so dass OpenFOAM von außen gesteuert werden kann. Dieser Wrapper musste wegen der unterschiedlichen Versionen während des Projektes immer wieder angepasst werden. Der Wrapper wurde so geschrieben, dass OpenFOAM wahlweise sequentiell oder parallel gestartet werden kann. Außerdem löscht der Wrapper zunächst alle alten Simulationsergebnisse.

Für die Struktur wurde ParaFEP (paralleles Finite Elemente Programm) [62, 39, 63] ausgewählt. Es wurde von Rainer Niekamp am Institut für Baumechanik und numerische Mechanik an der Uni Hannover entwickelt. Es ist ursprünglich für stationäre Probleme aus dem Bereich der Strukturmechanik konzipiert worden, d. h. es können insbesondere Probleme der Elastodynamik gerechnet werden. Das Programm verfügt über adaptive Algorithmen und kann ebenfalls parallel ausgeführt werden.

Im Rahmen dieses Projektes wurde ParaFEP als Software-Komponente umgeschrieben. Zudem wurde ein Zeitintegrationsverfahren implementiert. Die Wahl fiel auf das generalised- α -Verfahren [15, 23], das sich im Bereich der Strukturmechanik großer Beliebtheit erfreut.

Für die Kommunikation zwischen den Codes steht die am Institut entwickelte Component Template Library (CTL) [64] zur Verfügung. Die CTL ist ein Werkzeug, welches erlaubt, dass Software Komponenten miteinander kommunizieren können. Eine Software Komponente hat ein explizit definiertes Interface, über das sie angesprochen werden kann. Als Kommunikationskanal kann z. B. TCP/IP, ssh oder MPI gewählt werden.

Als nächstes wurde ein Löser geschrieben, der OpenFOAM und ParaFep koppelt. Die Lösung des finalen nicht-linearen Gleichungssystems kann wahlweise mit einem einfachen geschachtelten Verfahren (explizit) oder einem Block-Gauß-Seidel Verfahren (implizit) gelöst werden. Um eine Übertragung der Interface Informationen vom Fluid auf die Struktur zu übertragen bzw. umgekehrt, waren einige Implementierungsarbeiten zu leisten. Während bei OpenFOAM die Randknoten auf dem gemeinsamen Rand bekannt sind, sind diese bei ParaFep unbekannt und müssen dem System explizit zur Verfügung gestellt werden. Ebenfalls schwierig war die Umwandlung der Drücke aus dem Fluid in Kräfte für die Struktur. In diesen Schritt gehen die Flächennormale und der Flächeninhalt der Elemente ein. Letzteres kann ParaFep

ebenfalls nicht zur Verfügung stellen. Deshalb mussten diese Berechnungen in OpenFOAM durchgeführt werden.

Für die Kopplung der nicht passenden Fluid- und Strukturgitter sollte das Kopplungswerkzeug MpCCI eingesetzt werden. Obwohl MpCCI mit öffentlichen Geldern entwickelt worden ist, wird es heute kommerziell vertrieben und ist deshalb auch kein open-source code. Zudem ist MpCCI so ausgelegt, dass es bei einer FSI-Simulation auch die gesamte Kommunikation zwischen den Lösern übernehmen möchte, weshalb inkompaktibel mit Software-Komponenten ist. Aus diesem Grund wurde im Vorhaben nur mit kompaktilen Netzen gerechnet.

Allerdings wurde in Zusammenarbeit mit der HSVA entschieden, keine weiteren kommerziellen Codes zu verwenden, d.h. OpenFOAM wurde als Fluidlöser eingesetzt und ParaFep als Strukturlöser.

2.1.2 Testbeispiele

Am Institut für Wissenschaftliches Rechnen wurde die Implementation am Beispiel einer elastischen Struktur getestet [86, 85]. Die elastische Struktur ist an einem quadratischen Starrkörper befestigt, von dem bei bestimmten Strömungsgeschwindigkeiten und Reynoldszahlen Wirbel abreißen (vgl. Abbildung 2.1). Durch diese Wirbel wird die Struktur zu Schwingungen angeregt. Ein Nachteil dieses Problems ist, dass es schlecht dokumentiert ist und dass es keine Vergleichsmöglichkeit mit Experimenten gibt. In zahlreichen Veröffentlichungen wurde auf Massangaben und Randbedingungen grundsätzlich verzichtet.

Als Parameter für die Simulation werden für die Struktur das Elastizitätsmodul $E = 2,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, die Poissonzahl $\nu_s = 0.35$ und die Dichte $\rho_s = 0.1 \text{ kg/m}^3$ und für das Fluid die Dichte $\rho_f = 1.18 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, die Viskosität $\nu_f = 1.82 \cdot 10^4 \text{ Ns/m}^2$ und die Einströmgeschwindigkeit $v_x = 51.3 \text{ m/s}$, $v_y = 0 \text{ m/s}$ gewählt. Die Ausgangsgeometrie ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Die Breite der elastischen Struktur beträgt $d = 0.06 \text{ m}$. Für unsere numerischen Berechnungen haben wir das Gitter von Abbildung 2.2 dreimal verfeinert. Dies führt zu 96896 Freiheitsgraden für die Geschwindigkeit und 48448 für den Druck.

In Abbildung 2.3 sind die numerischen Resultate nach 14,8 und nach 15 Sekunden zu sehen. Die elastische Struktur zeigte große Verformungen, und die Amplitude der Bewegung beträgt ca. 0,9cm.

Unser Projektpartner von der HSVA hat zahlreiche Testrechnungen mit dem System durchgeführt. Es wurden folgende Beispiele gerechnet:

- Ein zwei-dimensionaler Auslegerbalken, der senkrecht zu einer Strömung montiert ist [2, 1]. Das Beispiel ist sehr gut dokumentiert und es gibt Experimente, mit denen die Simulationsergebnisse verglichen werden können.

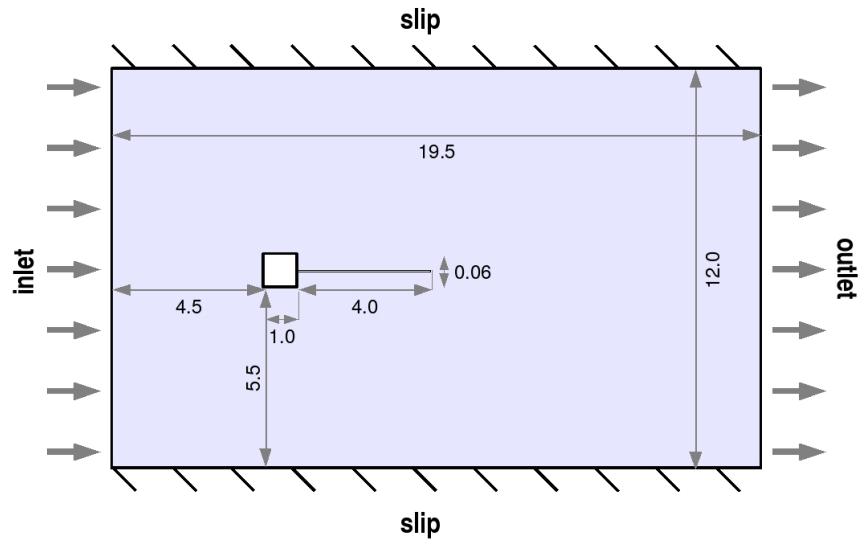


Abbildung 2.1: Wirbelerregte elastische Struktur (alle Angaben in cm)

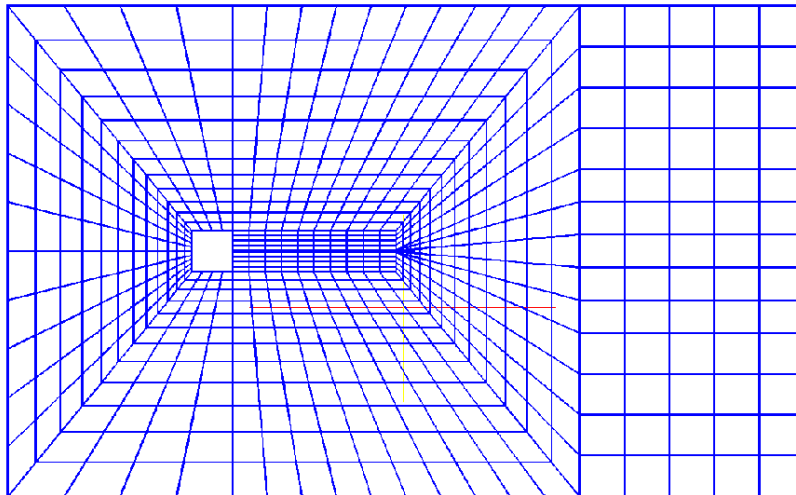


Abbildung 2.2: Wirbelerregte elastische Struktur: Grobgitter

- Ein rechteckiger, frei stehender Pfeiler, der von der Seite angeströmt ist. Es sollte hierbei lediglich getestet werden, ob die Software auch 3D Rechnungen durchführen kann.
- Eine elastische Stabilisatorflosse auf einem Schiff

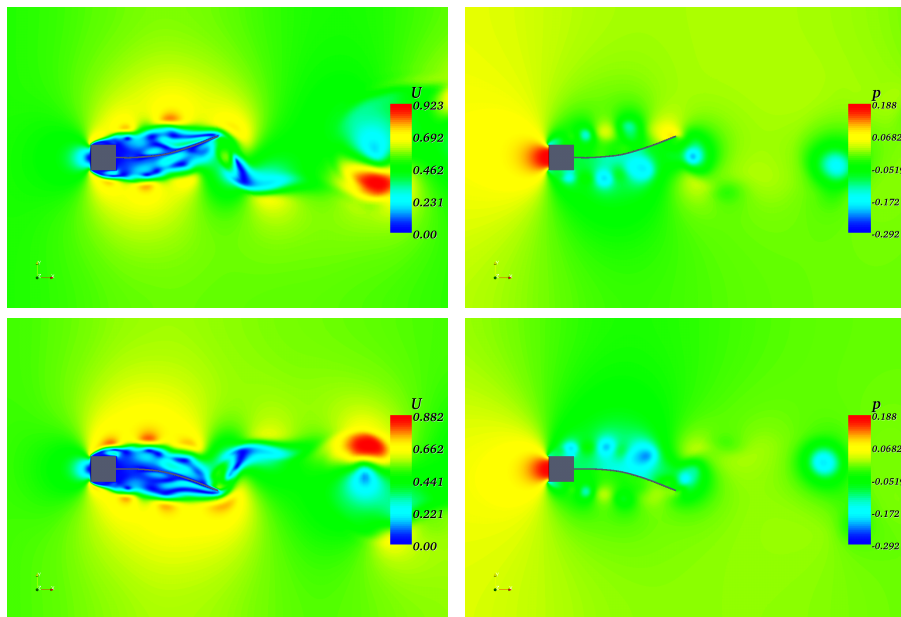


Abbildung 2.3: Numerische Resultate für die wirbelerregte elastische Struktur nach 14.8 und 15.0s (links: Geschwindigkeit, rechts: Druck)

2.2 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse sowie das erstellte Bildmaterial wurden in geeignete Vorlesungen an der TU Braunschweig eingebracht, um die praktische Bedeutung der vorgestellten numerischen Verfahren zu verdeutlichen.

Insgesamt ist ein wesentlicher Beitrag zur Aufklärung des Problemfeldes Fluid-Struktur-Wechselwirkung und zu dessen numerischer Modellierung und Handhabung geleistet worden.

Es steht nun eine vielseitig verwendbare Simulationsumgebung mit austauschbaren Komponenten zur softwaretechnischen Kopplung zur Verfügung. Diese hat schon gezeigt, dass die Komponententechnologie geeignet ist, hochgradig heterogene Softwareeinheiten zu einer effizienten, robusten und verteilten Gesamtanwendung zusammenzuführen.

OpenFOAM stellt für Fluid Probleme die Löser *icoAutoMotionMod* bzw. *icoDymFoam* zur Verfügung. Für die Gitterbewegung (ALE Formulierung) wird der PISO-Algorithmus (pressure implicit split-operator) verwendet. Dies hat zur Folge, dass die Strömung nicht mehr als ein Gitterelement pro Zeitschritt durchfließen darf. Für sehr feine Diskretisierungen bedeutet dies, dass nur sehr kleine Zeitschritte verwendet werden können.

Zum zweiten beinhalten die Löser kein Turbulenzmodell. Dies ist allerdings kein gravierender Nachteil, denn der Löser *icoTurbFoam* simuliert

turbulente Strömungen, allerdings auf festen Gittern.

Langfristig wird dieses Projekt die Forschungen des WiRe, insbesondere im Bereich der Kopplungsproblematik, deutlich voranbringen. Die bestehende Kompetenz bezüglich Kopplungslösern wird anhand realitätsnahen Simulationen ausgebaut sowie die vorhandene Kopplungssoftware (CTL) weiter verifiziert und für den industriellen Einsatz tauglich gemacht

Die erworbenen Kenntnisse und Softwarelösungen wurden unmittelbar den Mitgliedern des Graduierten-Kollegs Fluid-Struktur-Wechselwirkung sowie den Bearbeitern weiterer Forschungsprojekte der TU-Braunschweig und anderen Kooperationen verfügbar gemacht. Insbesondere durch die leichte Austauschbarkeit der beteiligten Softwareeinheiten wird das in diesem Teilprojekt erstellte Simulationswerkzeug auch von Forschungsprojekten, die andersartige physikalische Kopplungen behandeln, sinnvoll einsetzbar sein.

Die im Rahmen dieses Teilprojektes in Komponenten umgewandelten Softwareeinheiten (Löser, Kopplungsbibliothek, Simulationscodes) sind auch in anderen Kontexten weiter verwendbar. Gegebenenfalls ist eine Kooperation mit dem jeweiligen Software-Anbieter möglich.

2.3 Bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Auch bei kommerziellen Codes ist Fluid-Struktur Interaktion ein Thema. So hat zum Beispiel CFX Ansys aufgekauft, damit sowohl Fluid als auch Strukturprobleme gelöst werden können. Die Kopplung beider Probleme erfolgt durch die Kopplungssoftware MpCCI, wobei die Vertreter von MpCCI die Möglichkeit nutzen, im Quellcode der kommerziellen Programme ihre Kommunikationspunkte einzubauen. Als Fazit bei kommerziellen Codes läßt sich also sagen, dass partitionierte Löser an der Tagesordnung sind. Eine monolithische Lösung wird z. Z. von keinem Anbieter vertrieben.

FSI ist aber auch im akademischen Sektor ein aktives Forschungsgebiet. Zahlreiche Arbeitsgruppen arbeiten an diesem Thema, und die DFG unterstützt u.a. einen Sonderforschungsbereich in Kassel, Dortmund und Paderborn sowie eine Forschergruppe in München. Ein beliebtes Forschungsthema ist die Kopplung der Löser beim partitionierten Ansatz. Monolithische Ansätze sind i. Allg. in der Minderheit, gewinnen aber mehr und mehr an Bedeutung. Das Problem im universitären Bereich ist aber, dass eine Simulationssoftware meist nur für eines der beiden Probleme geschrieben ist: Fluid oder Struktur.

2.4 Workshops, Konferenzen und Veröffentlichungen

Mitarbeiter des WiRe haben das Projekt auf zahlreichen nationalen und internationalen Workshops und Konferenzen vorgestellt.

- Im Februar 2007 wurde das Projekt auf dem MpCCI UserForum in St. Augustin vorgestellt. Eine Veröffentlichung des Projektes findet sich in den Proceedings [73].
- Im Juli 2007 wurde ein Vortrag auf der USCCM-9 im Minisymposium "Fluid-Struktur Interaktion" über das Projekt gegeben.
- Das WiRe bekam eine Einladung, das Projekt auf der "Fifth International Conference of Applied and Numerical Mathematics" in Plovdiv (Bulgarien) vorzustellen.
- Für die ENUMATH07 in Graz bekam das WiRe ebenfalls eine Einladung, um im Minisymposium "Fluid-Struktur-Interaktion" über das Projekt zu erzählen.
- Im Rahmen des Graduiertenkollegs 432 "Wechselwirkung von Struktur und Fluid" [18] wurde das Projekt z. B. im Doktorandenkolloquium im Oktober 2007 in Warberg vorgestellt.
- Ein Mitarbeiter des WiRe hat das Projekt auf der Jahrestagung 2008 der Gesellschaft für angewandte Mathematik und Mechanik (GAMM) in Bremen vorgestellt. Zudem soll Ende des Jahres 2008 ein Beitrag in den Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics (PAMM) erscheinen.
- Im September 2008 haben zwei Mitarbeiter des WiRe das Projekt auf dem internationalen Workshop FSI in Herrsching am Ammersee vorgestellt. Ein Beitrag in den Proceedings zum Workshop ist vorgesehen.

Weitere Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Journalen sind geplant.

Literatur

- [1] Silas Alben and Michael Shelley. How flexibility induces streamlining in a two-dimensional flow. *Physics of Fluids*, 16(5):1694–1713, May 2004.
- [2] Silas Alben, Michael Shelley, and Jun Zhang. Drag reduction through self-similar bending of a flexible body. *Nature*, 420:479–481, December 2002.
- [3] John D. Anderson. *Fundamentals of Aerodynamics*. Mcgraw-Hill Professional, 2006.
- [4] Rainer Ansorge. *Mathematical models of fluid dynamics. Modelling, theory, basic numerical facts – an introduction*. Wiley-VCH, Weinheim, 2002.

-
- [5] M. Arnold and M. Günther. Preconditioned dynamic iteration for coupled differential-algebraic systems. *BIT Numerical Mathematics*, 41:1–25, 2001.
- [6] S. Artlich and W. Mackens. Newton-coupling of fixed point iterations. In G. Wittum W. Hackbusch, editor, *Numerical Treatment of Coupled Systems*. Vieweg, Braunschweig, 1995.
- [7] Satya N. Atluri. *The meshless method (MLPG) for domain & BIE discretizations*. CREST. Contemporary Research on Emerging Sciences and Technology. Tech Science Press, Forsyth, GA, 2004.
- [8] M. Bause. *Optimale Konvergenzraten für voll diskretisierte Navier-Stokes-Approximationen höherer Ordnung in Gebieten mit Lipschitz-Rand*. PhD thesis, Universität-Gesamthochschule Paderborn, 1997.
- [9] J. Blasco, R. Codina, and A. Huerta. *Analysis of fractional step finite element methods for the incompressible Navier-Stokes equations*. Barcelona: CIMNE, 1997.
- [10] J. Blazek. *Computational fluid dynamics: Principles and applications. Incl. 1 CD-ROM*. Elsevier, Amsterdam, 2001.
- [11] Anne Bourlioux, Martin J. Gander, and Gert Sabidussi, editors. *Modern methods in scientific computing and applications. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute and Séminaire de Mathématiques Supérieures on modern methods in scientific computing and applications, Montréal, Québec, Canada, July 9–20, 2001.*, volume 75 of *NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.
- [12] K.E. Brenan, S.L. Campbell, and L.R. Petzold. *Numerical solution of initial-value problems in differential-algebraic equations*, volume 14 of *Classics in Applied Mathematics*. SIAM, Philadelphia, 1996.
- [13] Are Magnus Bruaset and Aslak Tveito, editors. *Numerical solution of partial differential equations on parallel computers.*, volume 51 of *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*. Springer, Berlin, 2006.
- [14] Tuncer Cebeci, Jian P. Shao, Fassi Kafyeke, and Eric Laurendeau. *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2005.
- [15] J. Chung and G.M. Hulbert. A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: The generalized- α method. *J. Appl. Mech.*, 60(2):371–375, 1993.

-
- [16] P.G. Ciarlet and J.L. Lions, editors. *Handbook of numerical analysis. Volume IV: Finite element methods (part 2), numerical methods for solids (part 2)*. North-Holland, Amsterdam, 1995.
- [17] R. Codina and M. Cervera. Block-iterative algorithms for nonlinear coupled problems. *Advanced Computational Methods in Structural mechanics*, 1996.
- [18] D. Dinkler and J. Rang, editors. *Wechselwirkung von Struktur und Fluid - Abschlussbericht eines Graduiertenkollegs*. Wolfram Schmidt Buchbinderei & Druckerei, Braunschweig, 2008.
- [19] Jean Donea. Arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element methods. In T. Belytschko and T. J. R. Hughes, editors, *Computational methods for transient analysis*, volume 1 of *Comput. Methods Mech.*, pages 473–516. North-Holland, Amsterdam, 1983.
- [20] Paul A. Durbin and B.A. Pettersson Reif. *Statistical theory and modeling for turbulent flows*. Wiley, Chichester, 2001.
- [21] Howard C. Elman, David J. Silvester, and Andrew J. Wathen. *Finite elements and fast iterative solvers: with applications in incompressible fluid dynamics*. Numerical Mathematics and Scientific Computation. Oxford University Press, Oxford, 2005.
- [22] E. Emmrich. *Analysis von Zeiddiskretisierungen des inkompressiblen Navier-Stokes-Problems*. PhD thesis, Technische Universität Berlin, 2001. appeared also as book from Cuvillier Verlag Göttingen.
- [23] S. Erlicher, L. Bonaventura, and O. S. Bursi. The analysis of the generalized- α method for non-linear dynamic problems. *Comput. Mech.*, 28(2):83–104, 2002.
- [24] Alexandre Ern and Jean-Luc Guermond. *Theory and practice of finite elements.*, volume 159 of *Applied Mathematical Sciences*. Springer, New York, 2004.
- [25] C. Farhat, M. Lesoinne, and N. Maman. Mixed explicit/implicit time integration of coupled aeroelastic problems: Three-field formulation, geometric conservation and distributed solution. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 21(10):807–835, 1995.
- [26] C. A. Felippa and K. C. Park. Staggered transient analysis procedures for coupled mechanical systems: Formulation. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 24:61–111, 1980.
- [27] Th.-P. Fries. *A Stabilized and Coupled Meshfree/Meshbased Method for Fluid-Structure Interaction Problems*. PhD thesis, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2005.

-
- [28] Roland Glowinski. Finite element methods for incompressible viscous flow. In P. G. Ciarlet and J.L. Lions, editors, *Numerical methods for fluids (Part 3)*, volume 9 of *Handb. Numer. Anal.* North-Holland, Amsterdam, 2003.
- [29] Roland Glowinski, Tsorng-Whay Pan, Lorenzo Hector Juarez V., and Edward Dean. Numerical methods for the simulation of incompressible viscous flow: an introduction. In Vincenzo Capasso and Jacques Périaux, editors, *Multidisciplinary methods for analysis optimization and control of complex systems. Lectures of the summer school Jacques Louis Lions, Montecatini, Italy, March 17–22, 2003*, Mathematics in Industry 6. The European Consortium for Mathematics in Industry, pages 49–150. Springer, Berlin, 2004.
- [30] P.M. Gresho and R.L. Sani. *Incompressible Flow and the Finite Element Method*. Wiley, Chichester, 2000.
- [31] Clinton Groth and David W. Zingg, editors. *Computational fluid dynamics 2004. Proceedings of the third international conference on computational fluid dynamics, ICCFD₃, Toronto, Canada, July 12–16, 2004*. Springer, Berlin, 2006.
- [32] Hervé Guillard and Charbel Farhat. On the significance of the geometric conservation law for flow computations on moving meshes. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 190(11-12):1467–1482, 2000.
- [33] J.G. Heywood and R. Rannacher. Finite element approximation of the nonstationary Navier-Stokes problem IV: Error analysis for second order time discretizations. *SIAM J. Num. Anal.*, 27:353 – 384, 1990.
- [34] H. Hilber, T. Hughes, and R. Taylor. Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 5:283–292, 1977.
- [35] Thomas J. R. Hughes, Wing Kam Liu, and Thomas K. Zimmermann. Lagrangian-Eulerian finite element formulation for incompressible viscous flows. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 29:329–349, 1981.
- [36] V. John. *Large Eddy Simulation of Turbulent Incompressible Flows. Analytical and Numerical Results for a Class of LES Models*, volume 34 of *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2004.
- [37] Jovan Jovanović. *The statistical dynamics of turbulence*. Springer, Berlin, 2004.

-
- [38] C.T. Kelley. *Solving nonlinear equations with Newton's method*. Fundamentals of Algorithms 1. Philadelphia, PA: SIAM Society for Industrial and Applied Mathematics. xiii, 104 p. \$ 39.00 , 2003.
- [39] O. Klaas, R. Niekamp, and E. Stein. Algorithms for the calculation of limit and bifurcation points using Lanczos methods. *Computational Mechanics*, 20:221–228, 1997.
- [40] P. Klouček and F.S. Rys. Stability of the fractional step θ -scheme for the nonstationary Navier-Stokes equations. *SIAM J. Num. Anal.*, 31:1312 – 1335, 1994.
- [41] Egon Krause. *Fluid Mechanics, With problems and Solutions, and an Aerodynamics Laboratory*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2005.
- [42] Yurii I. Krause, Egonand Shokin, Michael Resch, and Nina Shokina, editors. *Computational science and high performance computing II. The 2nd Russian-German advanced research workshop, Stuttgart, Germany, March 14–16, 2005.*, volume 91 of *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design (NNFM)*. Springer, Berlin, 2006.
- [43] John E. Lagnese and Günter Leugering. *Domain decomposition methods in optimal control of partial differential equations.*, volume 148 of *ISNM. International Series of Numerical Mathematics*. Birkhäuser, Basel, 2004.
- [44] P. Le Tallec and J. Mouro. Fluid-structure interaction with large structural displacements. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 190(24-25):3039–3067, 2001.
- [45] Patrick Le Tallec and Saloua Mani. Numerical analysis of a linearised fluid-structure interaction problem. *Numer. Math.*, 87(2):317–354, 2000.
- [46] E. Lefrançois, G. Dhatt, and D. Vandromme. Numerical study of the aeroelastic stability of an overexpanded rocket-nozzle. *Revue Européenne des Éléments Finis*, 9:727–762, 2000.
- [47] Michel Lesoinne and Charbel Farhat. Geometric conservation laws for flow problems with moving boundaries and deformable meshes, and their impact on aeroelastic computations. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 134(1-2):71–90, 1996.
- [48] P. Leyland, V. Carstens, F. Blom, and T. Tefy. Fully coupled fluid-structure algorithms for aeroelasticity and forced vibration induced flutter. Application to a compressor cascade. *Revue Européenne des Éléments Finis*, 9(763-803), 2000.

-
- [49] Christoph Lunk and Bernd. Simeon. Solving constrained mechanical systems by the family of Newmark and α -methods. *ZAMM, Z. Angew. Math. Mech.*, 86(10):772–784, 2006.
- [50] Andrew J. Majda and Andrea L. Bertozzi. *Vorticity and incompressible flow*. Cambridge Texts in Applied Mathematics. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- [51] H. G. Matthies, R. Niekamp, and J. Steindorf. Strong coupling methods. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 195:2028–2049, 2006.
- [52] H. G. Matthies and J. Steindorf. How to make weak couplings strong. *Computational Fluid and Solid Mechanics*, 2001.
- [53] H. G. Matthies and J. Steindorf. Fully coupled fluid-structure interaction using weak coupling. *Proc. in Appl. Math. and Mech.*, 1:37–38, 2002.
- [54] H. G. Matthies and J. Steindorf. Partitioned but strongly coupled iteration schemes for nonlinear fluid-structure interaction. *Comput. Struct.*, 80:1991–1999, 2002.
- [55] H. G. Matthies and J. Steindorf. Partitioned strong coupling algorithms for fluid-structure-interaction. *Computers & Structures*, 81:1277–1286, 2003.
- [56] Dimitri J. Mavriplis and Zhi Yang. Construction of the discrete geometric conservation law for high-order time-accurate simulations on dynamic meshes. *J. Comput. Phys.*, 213(2):557–573, 2006.
- [57] M. Meyer. *Reduktionsmethoden zur Simulation der aeroelastischen Wechselwirkung von Windkraftanlagen*. Dissertation, TU Braunschweig, Braunschweig, 2002.
- [58] D. P. Mok and W. A. Wall. Partitioned analysis schemes for the transient interaction of incompressible flows and nonlinear flexible structures. In W. A. Wall, K.-U. Bletzinger, and K. Schweizerhof, editors, *Trends in Computational Structural Mechanics*, pages 689–698. CIMNE, Barcelona, 2001.
- [59] H. Morand and R. Ohayon. *Fluid-Structure Interaction*. John Wiley & Sohn, Chichester, 1995.
- [60] S. Müller-Urbaniak. Eine Analyse des Zwischenschritt- θ -Verfahrens zur Lösung der instationären Navier-Stokes-Gleichungen. Preprint 94-01, Universität Heidelberg, Interdisziplinäres Zentrum für wissenschaftliches Rechnen, 1994.

- [61] N. Newmark. A method of computation for structural dynamics. *ASCE J. Eng. Mech. Div.*, 85:67–94, 1959.
- [62] R. Niekamp. *Verteilte Algorithmen für adaptive Berechnungen in der Mechanik*. PhD thesis, Universität Hanover, Hanover, 2001.
- [63] R. Niekamp and E. Stein. An object-oriented approach for parallel two- and three-dimensional adaptive finite element computations. *Computers & Structures*, 80:317–328, 2002.
- [64] Rainer Niekamp. CTL Manual for Linux/Unix. 2005. <http://www.wire.tu-bs.de/forschung/projekte/ctl/files/manual.pdf>.
- [65] <http://www.openfoam.org>.
- [66] K. C. Park and C. A. Felippa. Partitioned analysis of coupled systems. In T. Belytschko and T. J. R. Hughes, editors, *Computational Methods in Transient Analysis*, pages 157–219. North-Holland, Amsterdam, 1983.
- [67] K.C. Park, Carlos A. Felippa, and Roger Ohayon. Partitioned formulation of internal fluid-structure interaction problems by localized Lagrange multipliers. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 190(24-25):2989–3007, 2001.
- [68] Roger Peyret, editor. *Handbook of computational fluid mechanics. Repr. as pbk. with corr.* Academic Press, San Diego, CA, 2000.
- [69] S. Piperno and C. Farhat. Design of efficient partitioned procedures for the transient solution of aeroelastic problems. *Revue Européenne des Éléments Finis*, 9:655–680, 2000.
- [70] S. Piperno, C. Farhat, and B. Larrouturou. Partitioned procedures for the transient solution of coupled aeroelastic problems. I: Model problem, theory and two-dimensional application. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 124(1-2):79–112, 1995.
- [71] Stephen B. Pope. *Turbulent flows*. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [72] J. Rang. *Stability estimates and numerical methods for degenerate parabolic differential equations*. PhD thesis, Institut für Mathematik, TU Clausthal, 2004. appeared also as book from Papierflieger Verlag Clausthal-Zellerfeld.
- [73] J. Rang, M. Krosche, R. Niekamp, and H. G. Matthies. Solving fluid-structure interaction problems using MpCCI and the Component Template Library (CTL). In K. Wolf, editor, *Proceedings of the 8th MpCCI User Forum 2007*, 2007.

-
- [74] S. Rugonyi and K.-J. Bathe. On the analysis of fully-coupled fluid flows with structural interactions — a coupling and condensation procedure. *Int. J. of Comp. Civil and Struct. Eng.*, 1:29–41, 2000.
- [75] Alfred Schmidt and Kunibert G. Siebert. *Design of adaptive finite element software. The finite element toolbox ALBERTA.*, volume 42 of *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*. Springer, Berlin, 2005.
- [76] T. Srisupattarawanit. *Computational Multi-Physics for Simulation of Offshore Wind Turbines*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, accepted 2006.
- [77] Erwin Stein, editor. *Adaptive finite elements in linear and nonlinear solid and structural mechanics. Lecture held at CISM, Udine, Italy.*, volume 416 of *CISM Courses and Lectures*. Springer, Wien, 2005.
- [78] J. Steindorf. *Partitionierte Verfahren für Probleme der Fluid-Struktur Wechselwirkung*. Dissertation, TU Braunschweig, Braunschweig, 2002.
- [79] J. Steindorf and H. G. Matthies. Efficient partitioned methods for the computation of fluid-structure interaction on parallel computers. *Proceedings of the Third Euro-Conference on Parallel and Distributed Computing for Computational Mechanics*, 1999.
- [80] R. Temam. *Navier-Stokes Equations. Theory and Numerical Analysis*, volume 2 of *Studies in Mathematics and Its Applications*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, 1977.
- [81] P.D. Thomas and C.K. Lombard. Geometric conservation law and its application to flow computations on moving grids. *AIAA J.*, 17:1030–1037, 1979.
- [82] S. Turek. *Efficient Solvers for Incompressible Flow Problems: An Algorithmic and Computational Approach*, volume 6 of *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*. Springer, 1999.
- [83] Henk A. van der Vorst. *Iterative Krylov methods for large linear systems.*, volume 13. Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
- [84] M. Vidyasagar. *Nonlinear systems analysis. Reprint of the 2nd ed. of the 1993 original.*, volume 42 of *Classics in Applied Mathematics*. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia, PA, 2002.
- [85] Wolfgang Wall. *Fluid-Struktur-Interaktion mit stabilisierten Finiten Elementen*. PhD thesis, Universität Stuttgart, 1999.

-
- [86] Wolfgang Wall and Ekkehard Ramm. Fluid-structure interaction based upon a stabilized (ale) finite element method. Bericht 98/16, SFB 404, Universität Stuttgart, 1998.
- [87] O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor. *Finite element method. Vol. 3: Fluid dynamics. 5th ed.* Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.

A Erfolgskontrollbericht

A.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Dieses Projekt unterstützt die Förderprogramme "Schiffbau und Meerestechnik für das 21. Jahrhundert" und "Innovativer Schiffbau sichert wettbewerbsfähige Arbeitsplätze" mit Hilfe einer industrietauglichen FSI-Software. Die in diesem Projekt entstandene Software simuliert zwar FSI-Probleme aus dem Bereich des Schiffbaus, allerdings nur mit Hilfe von OpenSource Programmen und nicht mit kommerziellen Programmen. Prinzipiell können mit der Software auch industrielle FSI-Probleme gerechnet werden. Allerdings müssen wir an dieser Stelle sagen, dass wir keine realen FSI-Probleme gerechnet haben. Deshalb können auch keine Aussagen über Schnelligkeit und Genauigkeit bei realen FSI-Problemen getroffen werden.

A.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse, Nebenergebnisse und gesammelte Erfahrungen

Während des Projektes wurden zwei wegweisende Entscheidungen getroffen. Zu einem wurde entschieden mit den beiden OpenSource Programmen OpenFOAM und ParaFEP während der gesamten Projektlaufzeit zu arbeiten, d.h. es wurde auf den Einsatz von kommerziellen Codes verzichtet. Zum anderen scheiterte der Einsatz von MpCCI daran, dass es nicht in eine Komponentenumgebung eingebunden werden kann, so dass z. Z. nur auf konformen Gittern gerechnet werden kann. Durch diese Änderung ist es natürlich nicht möglich gewesen, eine Software bestehend aus zwei kommerziellen Lösertools zu erstellen.

Dafür steht z. Z. ein Werkzeug zur Verfügung, das zwei OpenSource Codes miteinander koppelt und das in der Lage ist, FSI-Probleme in 2D und 3D sequentiell und parallel zu lösen.

Als Nebenergebnisse konnten folgende Fachkenntnisse aller beim WiRe beteiligten Projektarbeiter verbessert werden:

- **Komponententechnologie und CTL**

Um die Komponententechnologie verwenden zu können, war zunächst eine Einarbeitung in die Idee der Software Komponenten nötig. Dazu gehören folgende Fragestellungen. Was muss eine Komponente leisten? Wie wird sie angesprochen? Zudem muss der Quelltext der Komponente modifiziert werden, um sie sinnvoll nutzen zu können. Außerdem wurden Software Komponenten analysiert und die Component Template Library (CTL) weiter entwickelt.

- **OpenFOAM**

OpenFOAM ist eine OpenSource C++-Bibliothek für die Lösung von partiellen Differentialgleichungen, wobei der Schwerpunkt auf Fluidproblemen liegt. Es wurden zahlreiche Strömungssimulationen gestartet, und damit verbunden war die genau Kenntnis der Löserbibliotheken *icoFoamAutoMotion* bzw. *icoDymFoam*. Desweiteren wurden Kenntnisse erworben, wie ein großes Finite-Volumen Paket als Komponente realisiert werden kann, d.h. insbesondere wie das diskretisierte Gebiet ablegt wird und wie es für eine Fluid-Struktur Interaktion wieder zu verwenden ist.

- **COMET**

COMET ist ein Strömungslöser, bei dem versucht wurde, es in eine Komponente umzuschreiben. Zudem wurde COMET in der Lehre eingesetzt, z.B. in der Vorlesung "Visualisierung wissenschaftlicher Daten".

- **ParaFep**

ParaFep ist ein Strukturlöser, bei dem ebenfalls die Umsetzung als Komponente erlernt wurde, so wie die Weiterentwicklung. In diesem Fall z. B. die Implementierung der Zeitdiskretisierung.

- **Fluid-Struktur Interaktion**

Im Rahmen des Projektes wurde erlernt wie man eine Steuerkomponente für eine FSI-Simulation erstellt. Desweiteren wurde tiefergehendes Fachwissen angeeignet (z.B. durch den Besuch von Konferenzen) und es konnten weitere wissenschaftliche Kooperationen geschlossen werden.

A.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

A.3.1 Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen, Lizenzen etc.

Das Teilvorhaben des WiRe bestand darin, dass mit Hilfe eines externen Fluid- und Strukturlösers eine FSI-Software implementiert wurde. Die Software, die am WiRe entstand, ist eine OpenSource Software, d. h. es werden keine Lizenzen verkauft. Ebenfalls gab es keine neuen Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen o. Ä. Das war auch nicht geplant bzw. zu erwarten gewesen.

Allerdings konnten Interessenten für die OpenFOAM Komponente gewonnen werden. An der ENS Cachan in Frankreich werden in einem anderen Kooperationsprojekt FSI-Simulationen mit OpenFOAM und FEAP durchgeführt. Dies ist ein Beleg für die leichte Austauschbarkeit von Software-Komponenten beim Komponentenansatz.

A.3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten, Vorteile gegenüber anderen Lösungen

In diesem Projekt wurden OpenSource Codes miteinander verkoppelt. OpenSource Programme haben gegenüber kommerziellen Programmen einige Vorteile. Zum einen können diese Programme auf die jeweilige Bedürfnisse individuell zugeschnitten werden, zum anderen werden keine Lizenzgebühren fällig.

Unser Rahmenwerk mit Software Komponenten und der Component Template Library (CTL) bietet den Vorteil, dass die Komponenten sehr leicht austauschbar sind. Die im Rahmen dieses Teilprojektes in Komponenten umgewandelten Softwareeinheiten (Löser, Kopplungsbibliothek, Simulationscodes) sind auch in anderen Kontexten weiter verwendbar.

Andere Projekte, z.B. mit der ENS Cachan oder Universität Kassel zeigen, dass der Lösungsansatz wirtschaftliche Erfolgsaussichten haben kann.

A.3.3 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Die erworbenen Kenntnisse und Softwarelösungen wurden unmittelbar den Mitgliedern des Graduiertenkollegs Wechselwirkung von Struktur und Fluid sowie den Bearbeitern weiterer Forschungsprojekte der TU Braunschweig und anderen Kooperationen verfügbar gemacht. Im Rahmen des Graduiertenkolleg entstanden zahlreiche Dissertationen, die Fluid-Struktur-Wechselwirkung ebenfalls auf Komponentenbasis bearbeiteten. Auch aufgrund unserer Kooperation mit der ENS Cachan geht das WiRe davon aus, dass der Komponentenansatz wenigstens im wissenschaftlichen Kreis gute Erfolgsaussichten hat. Zur Zeit beschäftigen sich viele Arbeitsgruppen sowohl in Deutschland als auch im Ausland mit FSI. Die meisten Gruppen verfolgen ebenso wie das WiRe einen gekoppelten Ansatz, wobei der Ansatz des WiRe den Vorteil hat, dass der Fluid- und der Strukturlöser leicht ersetzt werden können. Außerdem behalten die Löser ihre natürliche Eigenschaften, z. B. Parallelität. Auch können Ideen zum partionierten Lösen leicht implementiert werden. Insbesondere durch die leichte Austauschbarkeit der beteiligten Softwareeinheiten wird das in diesem Teilprojekt erstellte Simulationstool auch von Forschungsprojekten, die andersartige physikalische Kopplungen behandeln, sinnvoll einsetzbar sein.

Mit Hilfe dieses Projekts entstand eine vielseitig verwendbare Simulationsumgebung mit austauschbaren Komponenten zur softwaretechnischen Kopplung. Dies wird mittelfristig auch aufzeigen, dass die Komponententechnologie geeignet ist, hochgradig heterogene Softwareeinheiten zu einer effizienten, robusten und verteilten Gesamtanwendung zusammenzuführen.

Langfristig wird dieses Projekt die Forschungen des WiRe, insbesondere im Bereich der Kopplungsproblematik, deutlich voranbringen. Die bestehende Kompetenz bezüglich Kopplungslösungen wird anhand realitätsnaher Simu-

lationen ausgebaut sowie die vorhandene Kopplungssoftware (CTL) weiter verifiziert und für den industriellen Einsatz tauglich gemacht

A.3.4 Anschlussfähigkeit

An dieses Projekt kann ein Nachfolgeprojekt anschließen, bei dem konkrete FSI-Probleme aus dem Schiffsbau gerechnet werden. Allerdings muss dazu die Benutzerfreundlichkeit verbessert werden und die Verwendung inkompatibler Netze möglich sein. Dazu kann MpCCI wie oben erwähnt nicht verwendet werden. An der Behebung dieser Probleme arbeitet das WiRe.

A.4 Arbeiten, die zu keinem Ergebnis geführt haben

Da MpCCI nicht als Software Komponente umgeschrieben werden kann, war es leider nicht möglich die Punkte 3 und 5 erfolgreich zu arbeiten. Da beim Meilensteintreffen beschlossen wurde, lediglich OpenSource Codes einzusetzen, wurde die Phase 2 lediglich mit OpenSource Codes durchgeführt. Einzige Ausnahme war der Versuch COMET in eine Software-Komponente umzuwandeln.

A.5 Präsentationsmöglichkeiten für potenzielle Nutzer

Potentielle Nutzer können am WiRe eingearbeitet werden und ihre wissenschaftlichen Ergebnisse auf den entsprechenden internationalen Tagungen vorstellen.

A.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die laufenden Ausgaben- und Zeitpläne konnten eingehalten werden, wobei der Zeitplan des WiRes einmal geändert werden musste.