

BMW I - Verbundvorhaben



## **MEGADESIGN**

### **Aerodynamische Simulation und Optimierung in der Flugzeugentwicklung**

#### **Abschlussbericht**

für das Teilvorhaben des

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik

Zuwendungsempfänger	DLR, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
Förderkennzeichen	20A0302A
Vorhabensbeschreibung	Koordination von und Beiträge zur Weiterentwicklung von Simulations- und Optimierungsverfahren für den aerodynamischen Flugzeugentwurf
Laufzeit des Vorhabens	01.06.2003 bis 31.05.2007
Berichtszeitraum	01.06.2003 bis 31.05.2007
Verantwortlich	Prof. Dr. Norbert Kroll

November 2007



<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
1. Einleitung .....	3
2. Aufgabenstellung .....	3
3. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	4
4. Planung und Ablauf des Vorhaben .....	4
5. Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn.....	8
6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	9
7. Erzielte Ergebnisse .....	10
7.1 Arbeitspaket 1000 Projektmanagement .....	10
7.1.1 AP 1100 Steuerung .....	10
7.1.2 AP 1200 Administration, Sekretariat.....	10
7.2 Arbeitspaket 3000 Effizienzsteigerung des Navier-Stokes-Lösers .....	11
7.2.1 AP 3100 Algorithmen.....	12
7.2.2 AP 3200 Adaption.....	16
7.3 Arbeitspaket 4000 Numerische Optimierung.....	19
7.3.1 AP 4300 Navier-Stokes-Adjungierte .....	19
7.4 Arbeitspaket 5000 Industrielle Anwendungen .....	25
7.4.1 AP 5100 Softwareintegration und Versionsmanagement .....	25
7.4.2 AP 5400 Validierung und Anwendungen .....	27
7.4.3 AP 5500 Best Practice .....	35
8. Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	35
9. Relevante Veröffentlichungen und Tagungsberichte .....	35
10. Erfindungen und Schutzrechte .....	36
11. Literatur .....	36



## 1. Einleitung

Aerodynamische Simulation und Optimierung ist ein essentielles Werkzeug für alle aerodynamischen Entwicklungsarbeiten am Flugzeug. Nur mit Hilfe entsprechend genauer, effizienter, flexibler und zuverlässiger Methoden und Verfahren lassen sich die Herausforderungen der Zukunft meistern: Umweltschonung, höhere Sicherheit, größere Wirtschaftlichkeit und bessere Wertschöpfung.

Im Rahmen des dritten Programms der Bundesregierung zur Förderung der Luftfahrtforschung und -technologie (Lufo III) wurde das Verbundvorhaben MEGADESIGN zur aerodynamischen Simulation und Optimierung in der Flugzeugentwicklung durchgeführt. Ziel dieses Vorhabens [1] war es, die Leistungsfähigkeit der in der Industrie eingesetzten Verfahren zur numerischen Strömungssimulation deutlich zu steigern und ihre Fähigkeiten hinsichtlich der numerischen Optimierung und multidisziplinären Simulation signifikant auszubauen. Aufbauend auf dem MEGAFLOW-Verbund (Lufo I und II) sollte MEGADESIGN einen entscheidenden Schritt dazu beitragen, das volle Potential der numerischen Simulation in der Flugzeugentwicklung auszuschöpfen.

An dem Vorhaben waren die Flugzeugfirmen Airbus und EADS-MAS, die Kleinunternehmen Synaps, FastOPT und CLE, das Forschungszentrum DLR sowie die Universitäten Aachen, Berlin, Braunschweig, Darmstadt und Trier beteiligt.

Die Aufgaben des DLR im Rahmen des MEGADESIGN Vorhabens umfassten die Gesamtkoordination des Verbundvorhabens, die Übertragung der Partner-Entwicklungen in die zentrale MEGAFLOW Simulationssoftware sowie spezifische Weiterentwicklungen und Verbesserungen der numerischen Verfahren.

Die Laufzeit des Projektes betrug vier Jahre und lief vom 1.6.2003 bis zum 31.05.2007.

## 2. Aufgabenstellung

Die zukünftigen Anforderungen der Luftfahrtindustrie hinsichtlich umweltfreundlicherer, sichererer und wirtschaftlicherer Flugzeuge erfordern numerische Simulations- und Optimierungsverfahren höchster Qualität, Effizienz und Zuverlässigkeit. In diesem Teilvorhaben sollten im Verbund mit den Partnern die bereits in der Industrie verwendeten MEGAFLOW-Verfahren (DLR Verfahren FLOWer und TAU) entsprechend den industriellen Anforderungen weiterentwickelt und neuartige Entwurfs- und Optimierungsverfahren bereitgestellt werden. Das DLR war für die Koordination des Gesamtvorhabens verantwortlich und nahm so eine wichtige Brückenfunktion zwischen den verschiedenen Industriepartnern sowie zwischen Industrie und Forschung ein. Mit dem DLR Teilvorhaben [2] sollte sichergestellt werden, dass die Forschungsaktivitäten der Verbundpartner untereinander abgestimmt und die erzielten Ergebnisse in Form einer zentralen Software allen Beteiligten zur Verfügung gestellt werden, um neue Forschungsergebnisse unmittelbar in die industrielle Anwendung zu überführen. Darüber hinaus war das DLR im Rahmen dieses Vorhabens an der Entwicklung und Erprobung innovativer Lösungsansätze für die Qualitätssteigerung der MEGAFLOW-Software beteiligt.

Im Einzelnen wurden folgende Ziele verfolgt:

- Koordination des Gesamtvorhabens,
- Integration der dezentral entwickelten Algorithmen und Modelle in die zentralen MEGAFLOW-Versionen, Softwarequalitätssicherung und halbjährliche Auslieferung zentraler Versionen an die Partner,
- Unterstützung der Partner bei der Weiterentwicklung und Validierung der MEGAFLOW-Software,



- Entwicklung von fortschrittlichen Methoden zur Effizienzsteigerung des unstrukturierten Navier-Stokes-Verfahrens TAU,
- Entwicklung und Erprobung einer TAU-Adjungierten für die effiziente Berechnung von Sensitivitäten im Rahmen einer numerischen Optimierung,
- Demonstration und Bewertung der neuentwickelten Algorithmen und Methoden an industrierelevante Problemstellungen.

### **3. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Durchführung des Vorhabens waren als sehr positiv zu bewerten. Das Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik des DLR nimmt seit Jahren eine führende Rolle in der Entwicklung und Validierung von numerischen Verfahren zur Strömungssimulation und Optimierung ein. Die dem Verbundvorhaben MEGADESIGN zugrunde liegenden Verfahren FLOWer und TAU (MEGAFLOW-Software) wurden im Institut entwickelt. Die wissenschaftlich-technischen Aktivitäten des DLR Teilvorhabens wurden durch ein DLR-internes Projekt ergänzt. Die Zielsetzungen des Lufo IV-Vorhabens und des DLR-internen Forschungsprojektes waren aufeinander abgestimmt und eng miteinander verzahnt, so dass Synergieeffekte zu erwarten waren.

Hinsichtlich der Koordination von Forschungsverbänden hat das Institut für Aerodynamik und Strömungsmechanik des DLR umfassende Erfahrungen. Das Vorgängervorhaben MEGAFLOW im Rahmen von Lufo I und Lufo II wurde auch vom DLR koordiniert. Die dabei entwickelten Vorgehensweisen konnten direkt für das Vorhaben MEGADESIGN übernommen werden.

Ein weiterer positiver Aspekt war die Tatsache, dass sich der MEGADESIGN-Verbund im Wesentlichen aus den Partnern des Vorgängervorhabens MEGAFLOW zusammensetzte. Es konnte somit von einer effizienten, offenen und engen Zusammenarbeit ausgegangen werden.

### **4. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Verbundvorhaben MEGADESIGN hat neben dem Projektmanagement vier Arbeitsschwerpunkte, die auch die Säulen des Projektstrukturplans bilden (Bild 1):

- Projektmanagement (AP 1000)
- Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit der Navier-Stokes-Verfahren (AP 2000)
- Effizienzsteigerung der Navier-Stokes-Verfahren (AP 3000)
- Numerische Optimierung (AP 4000)
- Einbindung der Software in industrielle Entwicklungsprozesse (AP 5000)

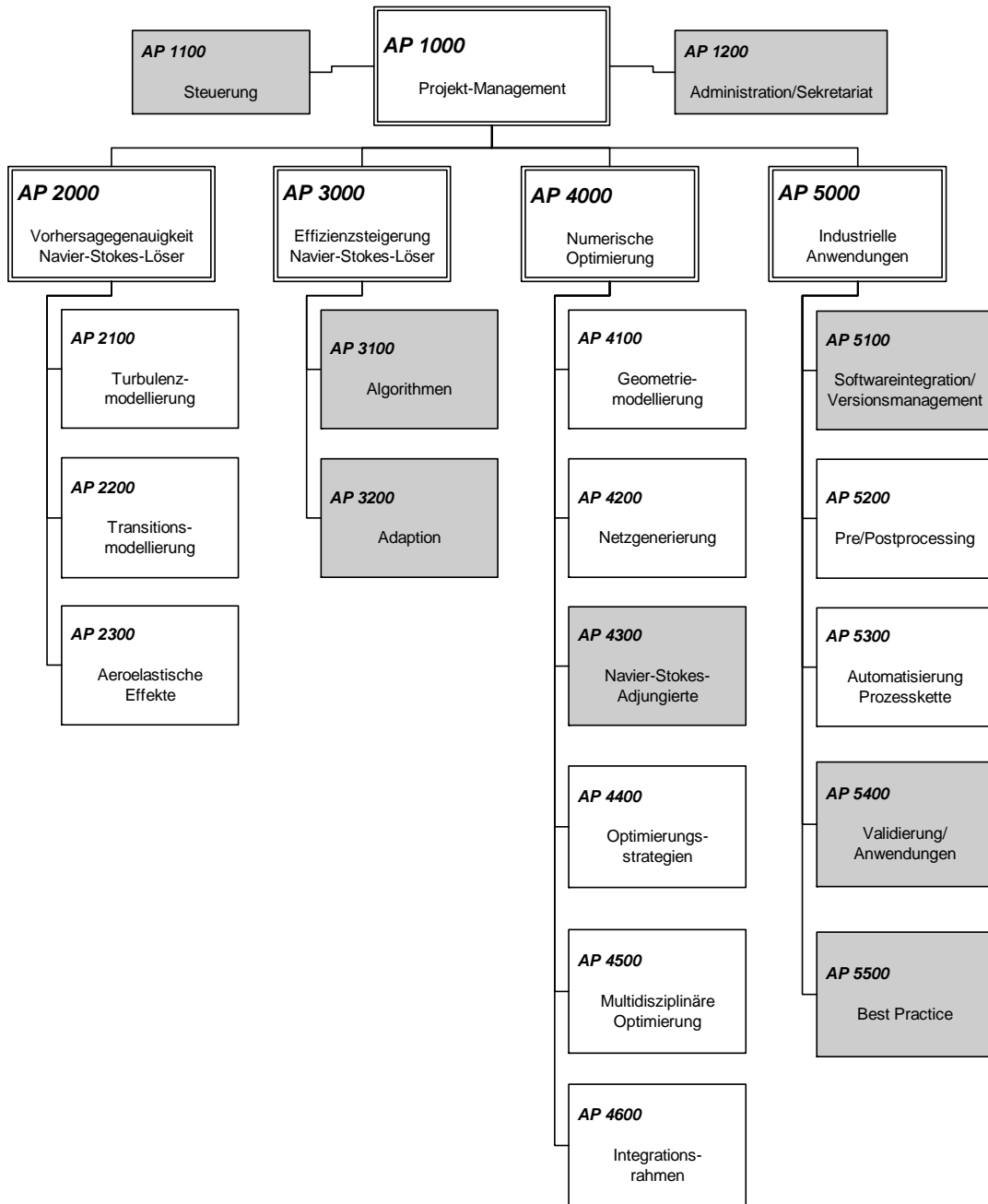


Bild 1: Strukturplan des Gesamtvorhabens MEGADESIGN, DLR-Beteiligung bei grau hinterlegten Arbeitspaketen

Die Aktivitäten des DLR-Teilvorhabens [2] sind ein integraler Bestandteil des Verbundvorhabens MEGADESIGN [1] und sind eng mit den Arbeiten der Partner abgestimmt. Das DLR ist an den grau hinterlegten Arbeitspaketen beteiligt.

In den einzelnen Arbeitspaketen waren im Wesentlichen folgende Arbeiten vorgesehen:

#### Arbeitspaket 1000 Projekt-Management

##### *AP 1100 Steuerung*

- Maßnahmen zur Koordination und Kontrolle des Gesamtprojektes



- Sicherstellung der Umsetzung der strategischen Planung
- Vertretung des Gesamtvorhabens gegenüber Projektträger und Zuwendungsgeber

#### *AP 1200 Administration, Sekretariat*

- Technische und terminliche Koordination der Aufgaben der einzelnen Partner
- Verfolgung der Hauptmeilensteine des Verbundprojektes und Überwachung des kritischen Pfades
- Sicherstellung der Kommunikation zwischen Partnern und Projektträger
- Erledigung aller administrativen Aufgaben des Verbundprojektes
- Außendarstellung

#### *Arbeitspaket 3000 Effizienzsteigerung der Navier-Stokes-Verfahren*

##### *AP 3100 Algorithmen*

- Erweiterung des TAU-Codes auf implizite Lösungsverfahren
- Untersuchung und Bewertung unterschiedlicher impliziter Verfahren

##### *AP 3200 Adaption*

- Entwicklung und Erprobung von zielorientierten Adaptionstechniken auf Basis der Lösung der Adjungierten-Gleichungen
- Bewertung der neuen Technik im Vergleich zu den im TAU-Code bereits verfügbaren gradientenbasierten Adaptionkriterien

#### *Arbeitspaket 4000 Numerische Optimierung*

##### *AP 4300 Navier-Stokes-Adjungierte*

- Entwicklung eines Euler- und Navier-Stokes Adjungierten-Verfahrens auf der Basis des unstrukturierten TAU-Codes
- Untersuchung unterschiedlicher Verfahren zur Lösung der adjungierten Gleichungen hinsichtlich Effizienz, Robustheit und paralleler Ablauffähigkeit
- Demonstration der Neuentwicklungen anhand praxisrelevanter reibungsloser und reibungsbehafteter Strömungen
- Unterstützung des Partners FastOpt bei der automatischen Differentiation des blockstrukturierten FLOWer-Codes

#### *Arbeitspaket 5000 Einbindung der Software in industrielle Entwicklungsprozesse*

##### *AP 5100 Integrationsarbeiten und Versionsmanagement*

- Unterstützung bei der Integration der von den Partnern entwickelten Algorithmen und Modelle in die zentrale MEGAFLOW-Software (FLOWer und TAU)
- Auslieferung von neuen TAU-Versionen über Projektlaufzeit
- Unterstützung der Partner bei Nutzung und Weiterentwicklung von FLOWer und TAU

##### *AP 5400 Validierung und Anwendungen*

- Validierung und Demonstration der neuentwickelten Adjungierten-Verfahren für praxisrelevante Optimierungsprobleme
- Untersuchungen zur Bewertung der Effizienz und Robustheit unterschiedlicher Optimierungsverfahren
- Unterstützung der Partner bei der Durchführung der zur Erreichung der Gesamtmeilensteine notwendigen numerischen Simulationen

##### *AP 5500 Best Practice*



- Entwicklung einer Methodik für Best Practice gemeinsam mit den Partnern
- Erstellung der Best-Practice-Richtlinien für die vom DLR entwickelten Algorithmen, Lösungsverfahren und Optimierungsansätzen

Der geplante zeitliche Ablauf der DLR-Aktivitäten ist Bild 2 zu entnehmen

AP	2003				2004				2005				2006				2007	
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II
1100																		
1200																		
3100																		
3200																		
4300																		
5100																		
5400																		
5500																		
<b>Meilensteine</b>					M1				M2			M3				M4	M5	

Bild 2: Geplanter zeitlicher Ablauf des DLR-Vorhabens

Folgende Meilensteine waren geplant (Tabelle 1):

	<b>Meilensteine</b>	<b>fällig</b>
M1	verbessertes Zeitschrittverfahren für viskose Rechnungen in TAU verfügbar (AP 3100)	02/04
M2	Euler-Adjungierte in TAU verfügbar (AP 4300)	02/05
M3	Navier-Stokes-Adjungierte in TAU verfügbar (AP 4300)	12/05
M4	Lokale Netzverfeinerung auf Basis der Adjungierten-Formulierung in TAU verfügbar (AP3200)	09/06
M5	Best-Practice-Richtlinien für MEGAFLOW-Software verfügbar (5500)	12/06
	Bereitstellung der zentralen, qualitätsgesicherten Versionen der MEGAFLOW-Komponenten (AP 5100)	halbjährlich

Tabelle 1: Geplante Meilensteine



Das Projekt wurde gegenüber der Planung mit einem Monat Verspätung begonnen. Die Laufzeit war vom 1.6.2003 bis 31.5.2007. Der tatsächliche Ablaufplan mit den Verschiebungen der Meilensteine ist Bild 3 zu entnehmen.

AP	2003				2004				2005				2006				2007	
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II
1100																		
1200																		
3100																		
3200																		
4300																		
5100																		
5400																		
5500																		
<b>Meilensteine</b>					M1					M2			M3	M4a		M4b	M5	

Bild 3: Tatsächlicher zeitlicher Ablauf des DLR-Vorhabens

Hinsichtlich der Meilensteine ist festzustellen, dass alle Meilensteine erreicht wurden. Verspätungen sind bei den Meilensteinen M2, M3, M4b und M5 aufgetreten. Der Meilenstein M4 wurde in zwei Untermeilensteine M4a und M4b unterteilt (siehe Tabelle 2)

	<b>Meilensteine</b>	<b>erreicht</b>
M1	Verbessertes Zeitschrittverfahren für viskose Rechnungen in TAU verfügbar (AP 3100)	02/04
M2	Euler-Adjungierte in TAU verfügbar (AP 4300)	08/05
M3	Navier-Stokes-Adjungierte in TAU verfügbar (AP 4300)	06/06
M4a	Lokale Netzverfeinerung auf Basis der Adjungierten-Formulierung in TAU demonstriert an 2D-Fällen (AP 3200)	09/06
M4b	Lokale Netzverfeinerung auf Basis der Adjungierten-Formulierung in TAU demonstriert an 3D-Fällen (AP 3200)	03/07
M5	Best-Practice-Richtlinien für MEGAFLOW-Software verfügbar (5500)	03/07
	Bereitstellung der zentralen, qualitätsgesicherten Versionen der MEGAFLOW-Komponenten (AP 5100)	jährlich

Tabelle 2: Erreichte Meilensteine

## 5. Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn

Die numerische Strömungssimulation hat sich seit Ende der neunziger Jahre neben Windkanal und Flugversuch als unverzichtbares Werkzeug für die Entwicklung neuer bzw. die Verbesserung bestehender Flugzeuge etabliert. Es ist gelungen, auch die vergleichsweise sehr aufwändigen Navier-Stokes-Verfahren für industrielle Fragestellungen nutzbar zu machen. In Deutschland hat das nationale Lufo-Vorhaben MEGAFLOW die Entwicklung und Qualität der numerischen Berechnung komplexer Strömungsprobleme entscheidend vorangebracht [3][4]. Durch die Luftfahrtforschungsprogramme Lufo I und Lufo





II (1996-2002) wurde unter der Federführung des DLR ein Forschungsverbund aus Luftfahrtindustrie, dem DLR und mehreren Hochschulen geschaffen mit dem Ziel, die Entwicklungsaktivitäten zur numerischen Strömungssimulation auf ein zentrales Programmsystem zu konzentrieren. Durch das Vorhaben MEGAFLOW wurden die Navier-Stokes-Verfahren FLOWer und TAU in der Luftfahrtindustrie (Airbus, EADS, ECD) für die Flugzeugentwicklung eingeführt und zu einem Standardwerkzeug für aerodynamische Nachrechnungen ausgebaut. Auch in vielen Hochschulen wurden entsprechende Forschungsarbeiten auf diese Verfahren abgestimmt. Trotz des hohen Reifegrades der MEGAFLOW-Verfahren waren die Anwendungen aber aufgrund der numerischen Komplexität häufig auf einfachere Konfigurationen beschränkt oder beruhten auf vereinfachenden Modellannahmen.

Die hohen und vielfältigen Anforderungen aus der Luftfahrtindustrie erforderten weitere konzentrierte Anstrengungen auf dem Gebiet der numerischen Strömungssimulation. Dies betraf insbesondere die numerische Optimierung und die multidisziplinäre Simulation – zwei Schlüsseldisziplinen der numerischen Simulation für zukünftige Produktentwicklungen in der Luftfahrt. Weitergehende Forschungsaktivitäten waren hier unbedingt notwendig, um mit den insbesondere in den USA fortschreitenden Entwicklungen Schritt halten zu können. Dies betraf neue, innovative Methoden der Optimierung (u.a. Adjungierte, genetische und evolutionäre Methoden, neuronale Netze), der numerischen Lösungsverfahren (u.a. implizite Verfahren, verbesserte Adaptionstechniken), der physikalischen Modellierung (u.a. 3D-Transitionsvorhersage, höherwertige Turbulenzmodelle) und der Strömung/Struktur-Kopplung.

Das MEGADESIGN-Vorhaben zielte daher darauf ab, das volle Potenzial der numerischen Simulation und Optimierung für die aerodynamische und multidisziplinäre Entwicklung von Flugzeugen zu erschließen und industriell nutzbar zu machen. Um die zukünftig typischen Anwendungsfälle mit mehr als 20 Millionen Netzknotenpunkten behandeln zu können, kam der effizienten Ausnutzung von preisgünstigen Parallelrechnern eine besondere Bedeutung zu. Insbesondere bei der numerischen Optimierung und der disziplinübergreifenden, zeitgenauen Simulation zur Überprüfung kritischer Flugzustände bei extremen Fluglagen ist eine durchgängige Parallelisierung der numerischen Prozesskette erforderlich. Die effiziente Parallelisierung großer Simulationen war zu Projektbeginn weltweit Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten.

## **6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Das Partnervorhaben des DLR war ein zentrales Element des MEGADESIGN-Gesamtvorhabens, da das DLR die Forschungsarbeiten des Verbundes koordinierte und somit ein wichtiges Bindeglied zwischen Hochschulen und Industrie darstellte. Ferner wurden die Beiträge der Partner in die zentrale MEGAFLOW-Software übertragen, die vom DLR allen Partnern zur Verfügung gestellt wurde. Damit konnte sichergestellt werden, dass die neuesten Forschungsergebnisse unmittelbar in der Industrie zur Anwendung kamen.



## **7. Erzielte Ergebnisse**

Die Aufgaben des DLR im Rahmen des MEGADSEIGN Vorhabens umfassten die Koordination des Verbundvorhabens, die Übertragung der Partner-Entwicklungen in die zentrale Simulationssoftware MEGAFLOW sowie spezifische Weiterentwicklungen und Verbesserungen der Software. Wie im vorherigen Kapitel näher erläutert, wurden während der Projektlaufzeit die Arbeitspakete AP1100, AP1200, AP3100, AP 3200, AP 4300 und AP5100, AP 5400 und AP 5500 bearbeitet.

### **7.1 Arbeitspaket 1000 Projektmanagement**

#### **7.1.1 AP 1100 Steuerung**

Zur Führung des Verbundvorhabens MEGADESIGN wurde auf dem Kick-Off-Meeting ein Lenkungsausschuss mit zwei Vertretern aus der Industrie (Airbus und EADS-MAS), einem Vertreter des DLR und einem Vertreter der Hochschulen (TU-Berlin) eingesetzt. Die Sprecherfunktion wurde vom DLR wahrgenommen. Um eine möglichst optimale Verzahnung des Vorhabens MEGADESIGN mit dem vom DLR grundfinanzierten Projekt MegaOPT zu gewährleisten, wurde der Projektleiter von MegaOPT als nicht-stimmberechtigtes Mitglied in den Lenkungsausschuss aufgenommen. Dem Lenkungsausschuss oblag die Koordination und Kontrolle des Gesamtvorhabens.

Der Lenkungsausschuss tagte vierteljährlich und wurde vom Sprecher einberufen. Folgende Sitzungen haben stattgefunden:

- 9. September 2003, Braunschweig (Kick-Off Meeting)
- 12. Januar 2004, Braunschweig
- 28. April 2004, Braunschweig
- 21. Juli 2004, Braunschweig
- 3. November 2004, Braunschweig
- 23. Februar 2005, Braunschweig
- 19. Mai 2005, Berlin
- 25. August 2005, Braunschweig
- 29. November 2005, Braunschweig
- 7. März 2006, Braunschweig
- 25. April 2006, Braunschweig
- 12. Juli 2006, Bremen
- 16. November 2006, Braunschweig
- 6. März 2007, Braunschweig
- 7. Mai 2007, Braunschweig

Die Vor- und Nachbereitungen der Sitzungen wurden vom DLR durchgeführt.

#### **7.1.2 AP 1200 Administration, Sekretariat**

Laut dem Kooperationsvertrag zwischen den Partnern war der Sprecher des Lenkungsausschusses für die Administration des Verbundvorhabens verantwortlich. Zur Abwicklung der administrativen Aufgaben richtete das DLR ein Sekretariat ein und stellte einen Projektadministrator bereit. Während der Projektlaufzeit wurden folgende wesentliche Arbeiten durchgeführt

- Einrichtung und Aktualisierung des MEGADESIGN-FTP-Servers für den Informationsaustausch zwischen den Partnern



- Konkretisierung der Projektmeilensteine  
Zur besseren Koordination und Planung des Gesamtvorhabens wurden sämtliche Meilensteine aller Partner in einem Dokument zusammengefasst und die Abhängigkeiten untereinander aufgezeigt. Ferner wurden die Hauptmeilensteine und der kritische Pfad des Gesamtvorhabens spezifiziert. Einige der Partnermeilensteine mussten zeitlich und inhaltlich angepasst werden, um einen reibungslosen Projektablauf und die Erfüllung der Hauptmeilensteine zu gewährleisten. Der vom DLR erstellte Gesamtmeilensteinplan war die Grundlage des Lenkungsausschusses für die Projektsteuerung.
- Vor- und Nachbereitung der Treffen des Lenkungsausschusses, Protokollierung der Treffen, Aktualisierung der Projektpläne und des Gesamtmeilensteinplans
- Erarbeitung einer Projekt-Internetpräsentation
- Koordination und Nachbereitung von Arbeitstreffen zur detaillierteren Abstimmung der Aktivitäten zwischen den Partnern
  - Strömung/Struktur-Kopplung, 17.02.2004, DLR Braunschweig
  - CAD-Anbindung und Geometriemodellierung, 26.02.2004, DLR Braunschweig
  - Turbulenzmodellierung, 26.04.2004, TU Berlin
  - Best-Practice-Richtlinien, 19.05.2004, Airbus Bremen
  - Parametrisierung des SFB-Flügels, 9.06.2004, DLR Braunschweig
  - Transitionsvorhersage, 24.06.2004, DLR Braunschweig
  - Turbulenzmodellierung, 10.05.2005, TU Berlin
  - Adjungierte Verfahren, 30.11.2005, DLR Braunschweig
  - Umsetzung von Optimierungsszenarien, 20.03.2006, DLR Braunschweig
- Erstellung von Halbjahresberichten über das Verbundvorhaben
- Erstellung und Aktualisierung des Testfallkatalogs
- Erstellung von MEGADESIGN Übersichtsartikeln in Zeitschriften [6], für die ECCOMAS-Konferenz [7] in Jevaskyla (Finnland, 2004) und den ICAS-Kongress [8] in Hamburg (2006)
- Vorbereitung und Koordination von jährlichen Projekttreffen im DLR Braunschweig
  - 04. – 05. November 2004
  - 29. – 30. November 2005
  - 15. – 16. November 2006
  - 23. – 24. Mai 2007
- Beantragung des Nachfolge-Verbundprojektes MUNA im Rahmen von Lufo IV

## **7.2 Arbeitspaket 2000 Effizienzsteigerung des DLR-Navier-Stokes-Lösers TAU**

Die algorithmischen Arbeiten konzentrierten sich auf die Verbesserungen und Weiterentwicklungen der Lösungsalgorithmen und der lokalen Netzverfeinerung des hybriden DLR-Navier-Stokes-Verfahrens TAU.

### **7.2.1 AP 3100 Algorithmen**



Der Lösungsalgorithmus des TAU-Codes basiert auf der Mehrgittermethode. Als Glättungsverfahren wird in der Basisversion ein explizites mehrstufiges Zeitschrittverfahren mit einem expliziten Glätten der Residuen verwendet. Aufgrund der Stabilitätsbedingung expliziter Verfahren können mit dieser Vorgehensweise nur kleine CFL-Zahlen ( $CFL \sim 1$ ), und damit nur kleine Zeitschritte, realisiert werden. Dies führt zu einer hohen Anzahl von Iterationsschritten. Um die Effizienz des Verfahrens zu steigern, wurden während der Projektphase zwei unterschiedliche Ansätze für implizite Lösungsverfahren untersucht. Dabei lag stets die zentrale räumliche Diskretisierung mit skalarer künstlicher Dissipation, das Standardverfahren in TAU für viele industrielle Anwendungen, zu Grunde.

Zwei unterschiedliche Entwicklungsrichtungen wurden untersucht. Im ersten Schritt sollte ein speichereffizientes, implizites Verfahren vorgeschlagen werden, welches im Vergleich mit dem expliziten Runge-Kutta Verfahren zwar nicht wesentlich mehr Arbeitsspeicher erfordert aber im Zusammenhang mit dem Mehrgitterverfahren deutlich bessere Glättungseigenschaften bei turbulenten Strömungen mit großen Reynoldszahlen aufweist. Im zweiten Schritt sollten dann speicherintensivere implizite Verfahren untersucht und die Frage geklärt werden, wie viel mehr Speicheraufwand notwendig und akzeptabel für weitere signifikante Effizienzsteigerungen des Lösungsverfahrens ist.

Nach einem umfassenden Literaturstudium wurde zuerst das LU-SGS-Schema in TAU implementiert. Es zeichnet sich durch niedrige Speicheranforderungen, niedrigen Rechenaufwand pro Iterationsschritt und einfache Parallelisierbarkeit aus. Im Vergleich zum Runge-Kutta Verfahren mit explizitem Residuenglätten lässt es aber deutlich höhere CFL-Zahlen zu. Das LU-SGS-Verfahren wurde für alle im TAU-Code verfügbaren räumlichen Diskretisierungen realisiert. Speziell für das zentrale Schema mit künstlicher skalarer Dissipation wurde eine sehr effiziente Variante des Schemas realisiert. Das Verfahren wurde ferner für die Lösung der Turbulenzgleichungen angepasst. Dabei wurden die Hauptströmungsgleichungen vollständig von den Turbulenzgleichungen entkoppelt, um sowohl eine sehr schnelle Auswertung der Matrizen und der Residuen als auch eine separate Behandlung der Gleichungen zu ermöglichen. Das Mehrgitterverfahren kann wie bei dem expliziten Zeitschrittverfahren zur Beschleunigung der Konvergenz genutzt werden. Ferner ist das Verfahren auch auf parallelen Rechnern nutzbar. In den Bildern 1 und 2 sind Ergebnisse für die Berechnung der reibungsbehafteten Strömung um einen Deltaflügel gezeigt. In Bild 1 ist die wirbelbehaftete Strömung bei  $M=0.9$  dargestellt. In Bild 2 ist das Konvergenzverhalten für das explizite Verfahren (Originalverfahren) und für das neue LU-SGS Verfahren zu sehen. Dargestellt sind der Verlauf des Residuums der Kontinuitätsgleichung und des Momentenbeiwertes über die Anzahl der Iterationen. Die Effizienzsteigerung durch das LU-SGS-Verfahren (blaue Kurve) ist deutlich zu erkennen. Neben der Reduktion der Anzahl der zur Konvergenz notwendigen Iterationsschritte ist, wie in Bild 3 zu erkennen, auch der Rechenaufwand pro Iterationsschritt für das implizite LU-SGS-Verfahren geringer als bei dem mehrstufigen expliziten Runge-Kutta Verfahren. Insgesamt ergibt sich ein Rechenzeitgewinn um einen Faktor 2-3. Ein Vergleich der beiden Lösungsverfahren für eine deutlich komplexere Konfiguration ist in den Bildern 4 und 5 gezeigt. Es handelt sich hier um eine generische Flügel-Rumpf-Leitwerkskonfiguration mit etwa 9 Millionen Netzpunkten. Als Turbulenzmodell wurde das Eingleichungsmodell von Spalart-Allmaras verwendet. Auch in diesem industrierelevanten Fall ist ein deutlich besseres Konvergenzverhalten mit dem LU-SGS-Schema im Vergleich zum Runge-Kutta Verfahren zu erkennen.

Das implizite LU-SGS-Verfahren wurde auch für die Nutzung im Rahmen der dualen Zeitschrittverfahren erweitert. Dadurch konnte auch eine deutliche Effizienzsteigerung des TAU-Verfahrens bei zeitgenauen Strömungen erzielt werden.

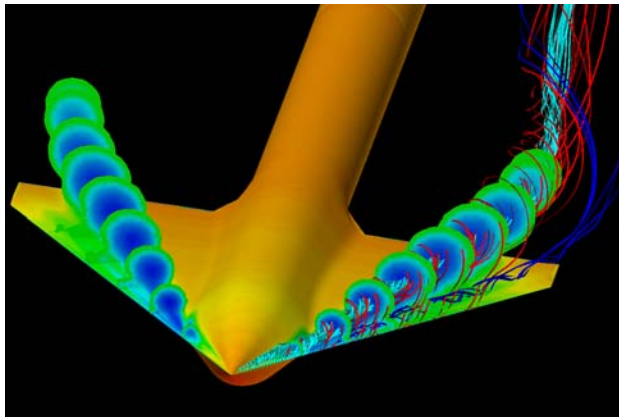


Bild 1: Wirbelbehaftetes Strömungsfeld um Delta-Flügel, reibungsbehaftete Rechnung bei  $Ma=0.5$ ,  $\alpha=9^\circ$

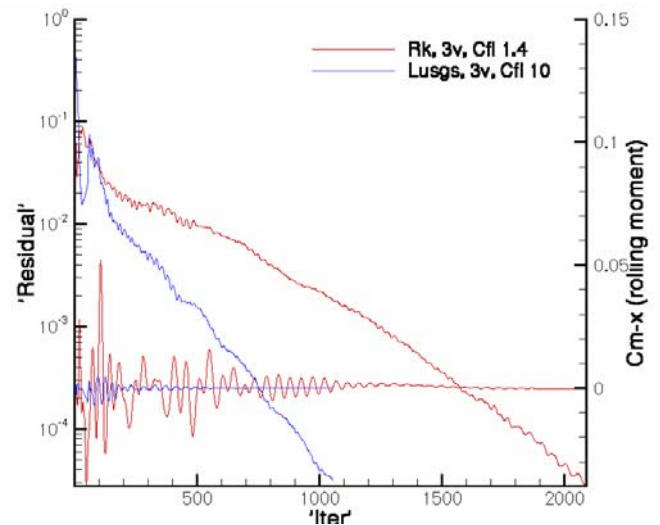


Bild 2: Konvergenzverhalten für die Berechnung der reibungsbehafteten Strömung um Delta-Flügel bei  $Ma=0.5$ ,  $\alpha=9^\circ$ , Vergleich des expliziten (RK) und des impliziten (Lusgs) Zeitschrittverfahrens

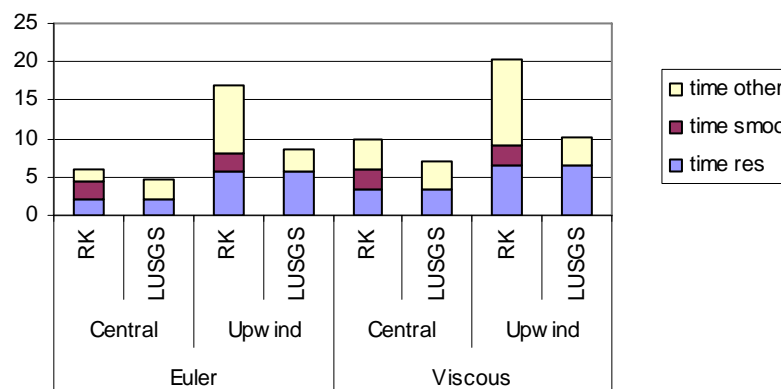


Bild 3: Vergleich des Rechenaufwandes für explizites Runge-Kutta Verfahren und implizites LUSGS-Verfahren

Die Bilder 6 und 7 zeigen Ergebnisse für die Berechnung der reibungslosen Strömung um einen rollenden Delta-Flügel. Bild 6 zeigt den Vergleich des Rollmoments als Funktion des Rollwinkels. Es wird deutlich, dass die Ergebnisse der Berechnungen mit dem expliziten und impliziten Zeitschrittverfahren übereinstimmen. Der Effizienzsteigerung bei dem impliziten Verfahren wird in Bild 7 deutlich. Sowohl das Rollmoment als auch der Widerstand zeigen mit dem impliziten Zeitschrittverfahren in jedem physikalischen Schritt ein besseres Konvergenzverhalten.

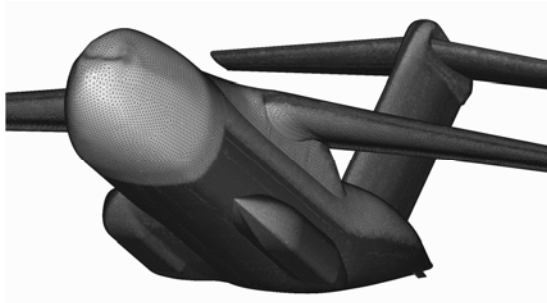


Bild 4: Flügel-Rumpf-Leitwerkskonfiguration, hybride Netz mit 9 Millionen Netzpunkte

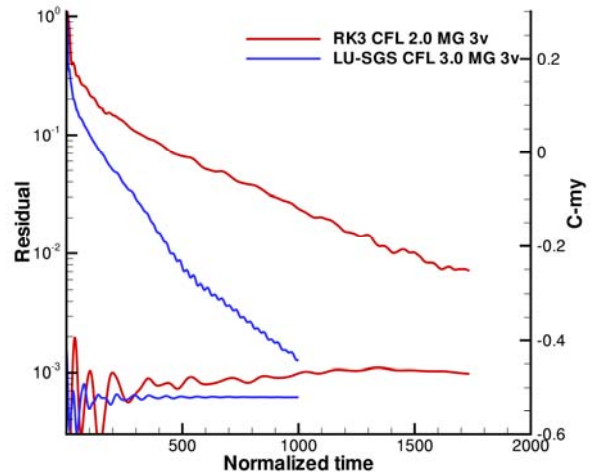


Bild 5: Konvergenzvergleich für explizites Runge-Kutta Verfahren und implizites LU-SGS-Verfahren für turbulente Rechnung um Flügel-Rumpf-Leitwerkskonfiguration,  $M=0,68$ ,  $Re=3 \times 10^6$

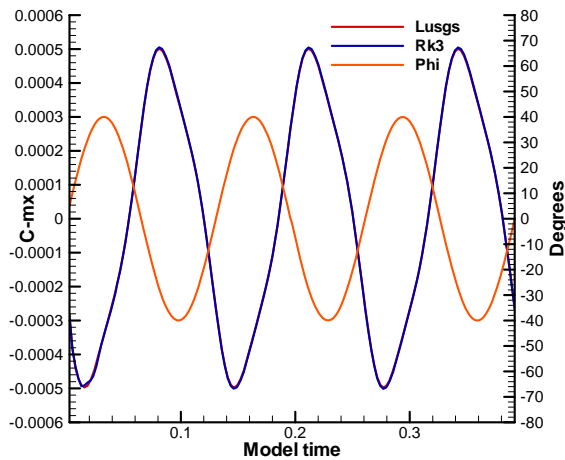


Bild 6: Rollmoment und Rollwinkel bei einer Rollbewegung eines Delta-Flügels bei  $M=0.5$ ,  $\alpha=9^\circ$ , instationäre, reibungslose Rechnung, Vergleich des Rollmomentes berechnet mit dem expliziten (RK3) und dem impliziten Zeitschrittverfahren (LU-SGS)

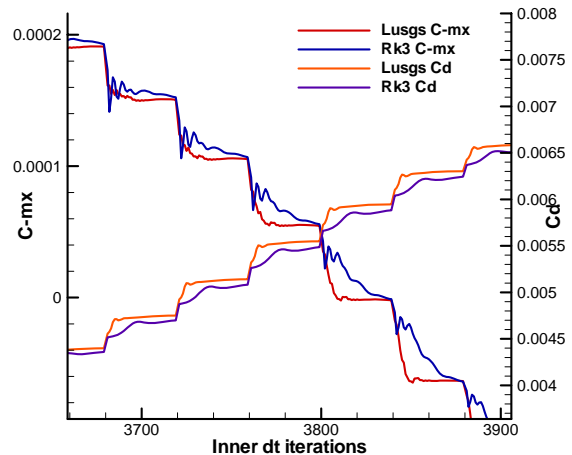


Bild 7: Konvergenzverhalten des Widerstandes und des Rollmomentes bei der instationären Berechnung eines rollenden Delta-Flügels bei  $M=0.5$ ,  $\alpha=9^\circ$ , Vergleich des expliziten (RK3) und des impliziten (LU-SGS) Zeitschrittverfahrens

Neben dem LU-SGS-Verfahren, welches sich mittlerweile als Standardverfahren für die meisten TAU-Anwendungen etabliert hat, wurden auch speicherintensivere implizite Lösungsverfahren untersucht. Ziel der Studie war es, einen möglichst optimalen Kompromiss zwischen Speicheranforderung einerseits und erzielbaren Konvergenz- und Stabilitätseigenschaften andererseits auszuloten. Als Basis wurde ein exaktes Newton-Verfahren in den TAU-Code implementiert. Das Newton-Verfahren diente als Referenz, da

es bei korrekter Implementierung eine quadratische Konvergenz ermöglicht. Bild 8 zeigt das Konvergenzverhalten des Newton-Verfahrens für die Berechnung der turbulenten Strömung um das RAE2822-Profil (Case 9). Das Verfahren startet mit einer bereits teilweise auskonvergierten Lösung, die mit dem LU-SGS-Verfahren erzielt wurde. Mit dem exakten Newton-Verfahren kann innerhalb von 15 Newton-Iterationen eine Lösung bis auf Maschinengenauigkeit erzielt werden. Die linearen Gleichungssysteme werden mit GMRES(30) gelöst, welches mit dem ILU(4) vorkonditioniert wird. Das Newton-Verfahren ist hinsichtlich der Rechenzeit um etwa einen Faktor zwischen 6-8 schneller als das Mehrgitterverfahren mit dem LU-SGS-Schema. Der benötigte sehr hohe Speicheraufwand und die starke Abhängigkeit des Verfahrens von der Startlösung schränken das Newton-Verfahren in der Praxis aber auf einfache zweidimensionale Anwendungen ein. Für komplexe dreidimensionale Anwendungen ist das Verfahren nicht geeignet.

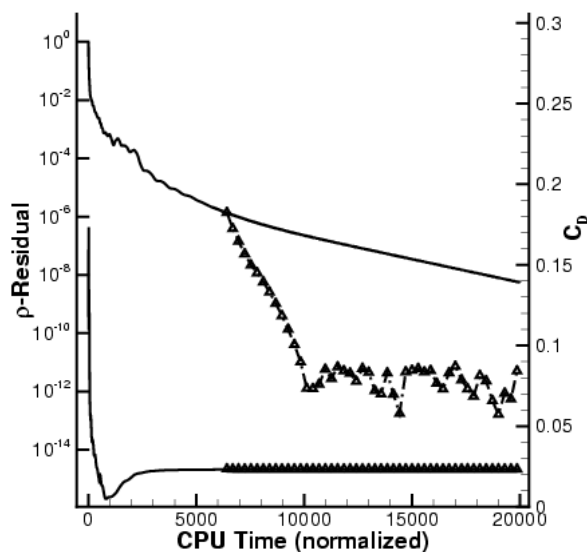


Bild 8: Konvergenzverhalten des exakten Newton-Verfahrens (Symbole) im Vergleich zum LU-SGS Mehrgitterverfahren (durchgezogene Linie), RAE2822,  $M=0,73$ ,  $\alpha=2,8^\circ$ ,  $Re=6,5 \times 10^6$

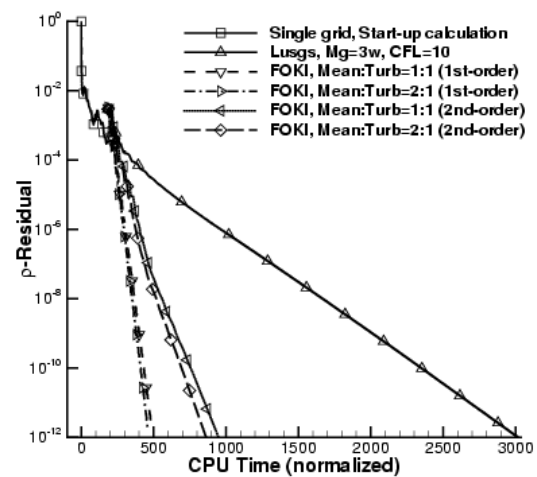


Bild 9: Konvergenzverhalten des FOKI-Schemas im Vergleich zum LU-SGS-Mehrgitterverfahren (durchgezogene Linie), RAE2822,  $M=0,73$ ,  $\alpha=2,8^\circ$ ,  $Re=6,5 \times 10^6$

Aufbauend auf der exakten Jacobi-Matrix wurden durch Vereinfachungen verschiedene Newton-ähnliche Verfahren mit unterschiedlichen Methoden zur Lösung der entstehenden linearen Gleichungssysteme untersucht. Als eine vielversprechende Variante hat sich das sogenannte FOKI-Schema erwiesen. Diese Entwicklung basiert auf einer exakten Jacobi-Matrix für eine räumliche Diskretisierung von erster Ordnung einschließlich der Randbedingungen und der viskosen Flüsse. Die linearen Gleichungssysteme werden mit einem GMRES-Verfahren mit ILU(0) als Vorkonditionierer gelöst. Für die Turbulenzgleichungen wird eine exakte Linearisierung verwendet. Sie werden unabhängig von den Hauptströmungsgleichungen behandelt. Bild 9 zeigt Ergebnisse mit dem FOKI-Verfahren für den turbulenten RAE2822-Fall (Case 9). Im Vergleich mit dem LU-SGS-Verfahren kann in diesem Fall mit dem FOKI-Schema je nach Behandlung der Turbulenzgleichungen eine Rechenzeitminderung um den Faktor 3-5 erzielt werden. Die Rechnungen wurden alle mit dem Eingleichungsturbulenzmodell von Spalart-Allmaras durchgeführt. Das im Rahmen von MEGADESIGN entwickelte FOKI-Verfahren wird zukünftig an komplexeren Problemstellungen erprobt.



Hinsichtlich der Meilensteine ist festzustellen, dass der Meilenstein M1 (02/04) „Verbessertes Zeitschrittverfahren für viskose Rechnungen in TAU verfügbar“ mit der Etablierung des LU-SGS-Schemas als Standardverfahren in TAU erreicht wurde.

### 7.2.2 AP 3200 Adaption

Die lokale Netzverfeinerung ist eine effiziente Vorgehensweise, komplexe Strömungsvorgänge mit möglichst geringem numerischem Aufwand vorherzusagen. Die Grundidee der lokalen Netzadaption besteht darin, dass nur in den Strömungsbereichen, in denen eine höhere Auflösung vonnöten ist, zusätzliche Netzpunkte in das Ausgangsrechnetz eingefügt werden. Dies ermöglicht eine genauere Berechnung kritischer Strömungsbereiche, ohne dafür das gesamte Rechnetz global verfeinern zu müssen. Die lokale Netzadaption besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten: dem Adaptionssindikator, der die lokale Qualität des Ausgangsnetzes bewertet, und der Netzadaption selbst, die ein gegebenes Netz anhand des Adaptionssindikators lokal verfeinert.

Die lokale Netzverfeinerung ist eine wesentliche Verfahrenskomponente des DLR-TAU-Codes. Der Code verfügt über eine Vielzahl von Verfeinerungskriterien, die alle auf der Information der Gradienten der Strömungsgrößen aufbauen. Diese Vorgehensweise wird häufig als „feature-based“ Adaption bezeichnet. Obwohl sich diese Technik in vielfältigen Anwendungen bewährt hat, sind Verbesserungen speziell hinsichtlich der Verlässlichkeit der Adaptionsskriterien notwendig.

Im MEGADESIGN-Vorhaben wurde ein alternativer Zugang für die Netzadaption untersucht. Dabei wird eine Beziehung zwischen der lokalen Netzauflösung und dem auftretenden Fehler in einer aerodynamischen Kenngröße der untersuchten Konfiguration, wie beispielsweise Auftrieb oder Widerstand, aufgestellt. Dieser Ansatz, häufig in der Literatur als zielorientierte Netzadaption bezeichnet, verwendet Informationen, die durch Lösung des dualen (adjungierten) Problems bereitgestellt werden, welches durch die gewählte aerodynamische Zielgröße definiert ist. Die Entwicklung effizienter Lösungsverfahren für das adjungierte Strömungsproblem war während der Projektlaufzeit Gegenstand der Aktivitäten im Arbeitspaket AP4300. Den Arbeiten von Venditti und Darmofal [9] folgend, wird das Verfeinerungskriterium der zielorientierten Netzadaption durch das lokale Residuum der Strömungsgleichungen, gewichtet mit der Lösung des dualen Problems, definiert. Bild 10 zeigt Ergebnisse für eine reibungslose Überschallströmung ( $M=1,5$ ,  $\alpha=1^\circ$ ) um das NACA0012 Profil. Als Zielfunktional wurde der Druck an der Profilnase gewählt. Bild 10a zeigt das Adjungiertenfeld (1. Komponente des Adjungiertenvektors), Bild 10b stellt das Residuum der Strömungslösung (1. Komponente des Residuumvektors) dar. In den beiden unteren Bildern ist der Adaptionssensor (Bild 10c) und das lokal adaptierte Netz in der Nähe der Profilnase (Bild 10d) zu sehen. Man erkennt deutlich, dass die Verfeinerung nur dort durchgeführt wird, wo das Produkt aus Adjungiertenwert und Residuenwert einen gewissen Schwellenwert überschreitet.

Die vorgestellte Strategie wurde im DLR-TAU Code implementiert [10] und läuft nach dem in Bild 11 dargestellten Prozess ab. Es konnte größtenteils auf die in TAU bereits vorhandene Infrastruktur der „feature-based“ Adaption aufgebaut werden. Diese konnte bereits eine Gewichtung der einzelnen Lösungskomponenten vornehmen und so den Adaptionssensor an den gegebenen Fall anpassen. Die geometrische Netzverfeinerung an sich basiert auf der Teilung der Kanten, an deren Endpunkten der Indikator einen zuvor ermittelten Grenzwert überschreitet. Dieser Grenzwert wird auf Basis der vorgegebenen Anzahl erwünschter neuer Netzpunkte ermittelt. Es musste eine neue Datenstruktur in die Netzverarbeitungs- und Adaptionsskomponente hinzugefügt werden, die bei der Entfeinerung eine korrekte Zuordnung der Eltern-Knoten ermöglicht. Die Auswertung des Sensors selbst wurde in ein separates Python-Skript mit NetCDF-Anbindung ausgelagert und nutzt hierfür die optimierte



Python-Numeric Suite.

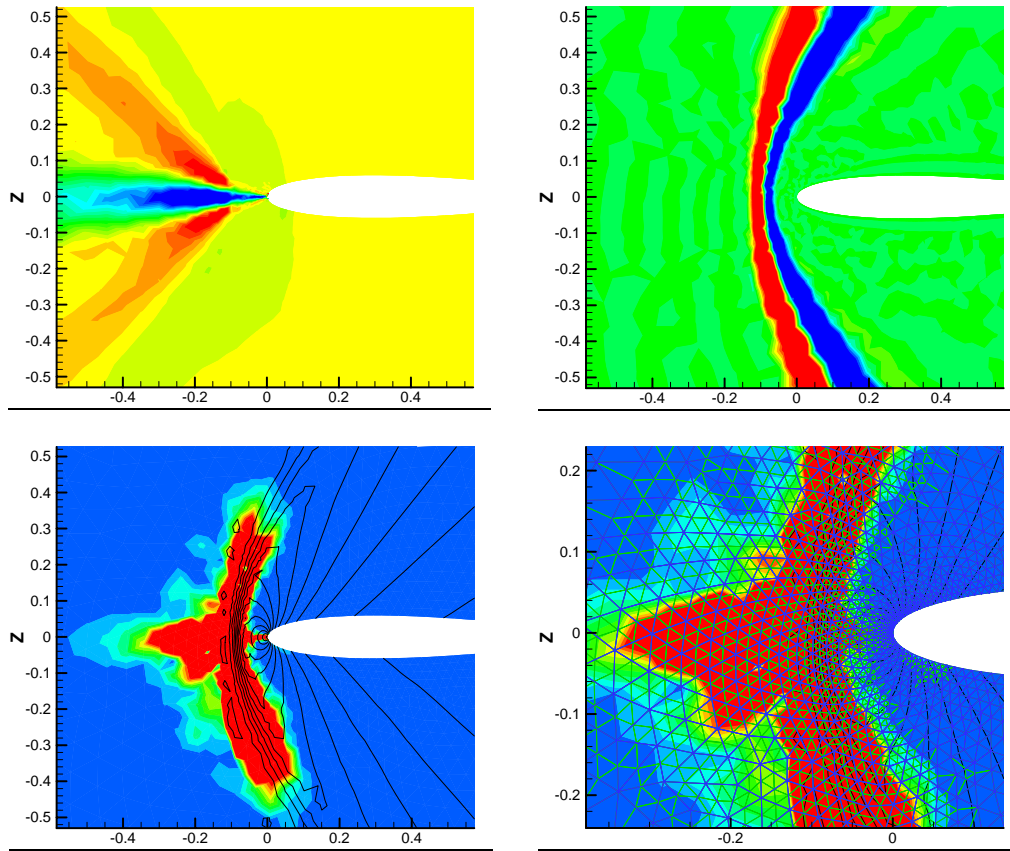


Bild 10: Zielorientierte Netzadaption, reibungslose Überschallprofilumströmung ( $M=1,5$ ,  $\alpha=1^\circ$ ), (a): Adjungiertensfeld, (b): Residuum der Strömungsgleichungen, (c): Sensor, (d): lokale Netzadaption

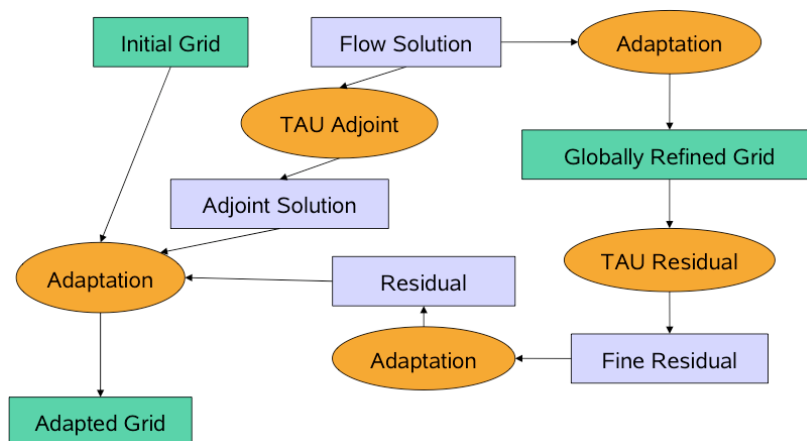


Bild 11: Flussdiagramm der zielgerichteten Netzadaption im DLR-TAU Code

Die zielorientierte Netzadaption wurde im TAU-Code für reibungslose und reibungsbehaftete Strömungen untersucht. Für eine reibungslose, subsonische Profilströmung (Bilder 12 und 13) zeigt sich für das Zielfunktional Widerstand (theoretisch exakt 0), dass alle Adaptionstrategien (globale Verfeinerung, gradienten-basierte Adaption als auch

zielgerichtete Adaption für unterschiedliche Restfehlervorgaben) zum richtigen Wert konvergieren. Sobald der für die zielgerichtete Adaption verfügbare Funktionalkorrekturterm aufgeschlagen wird, liefert dieser Adaptionsansatz deutlich bessere Ergebnisse als die „feature-based“ Adaption.

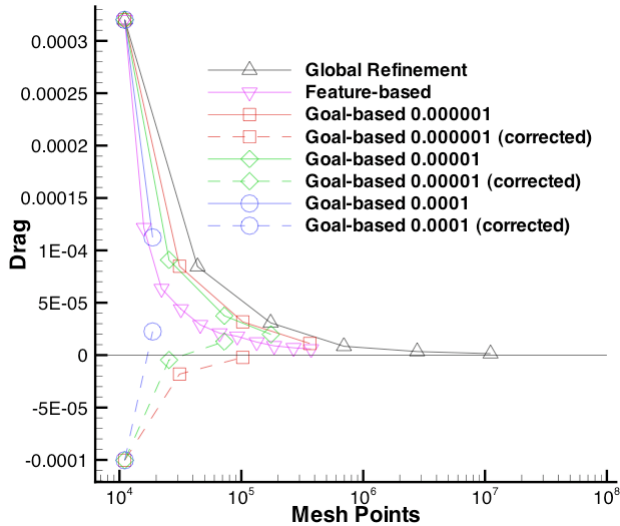


Bild 12: Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit der Netzauflösung für verschiedene Adaptionstrategien, reibungslose Strömung um das NACA0012-Profil,  $M=0.5$ ,  $\alpha=0^\circ$

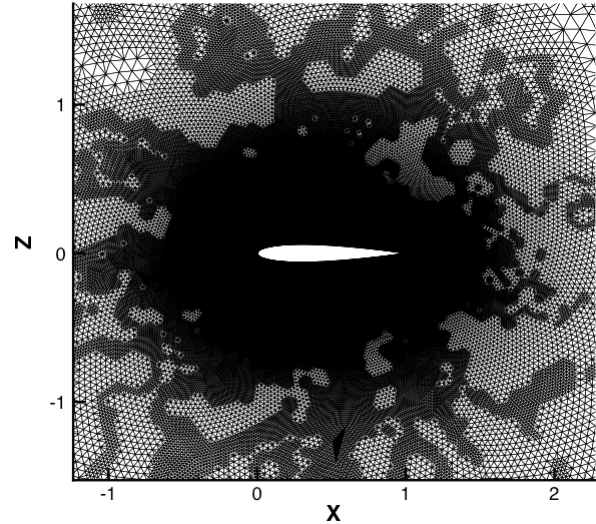


Bild 13: Beispielnetz für die zielgerichtete Adaption

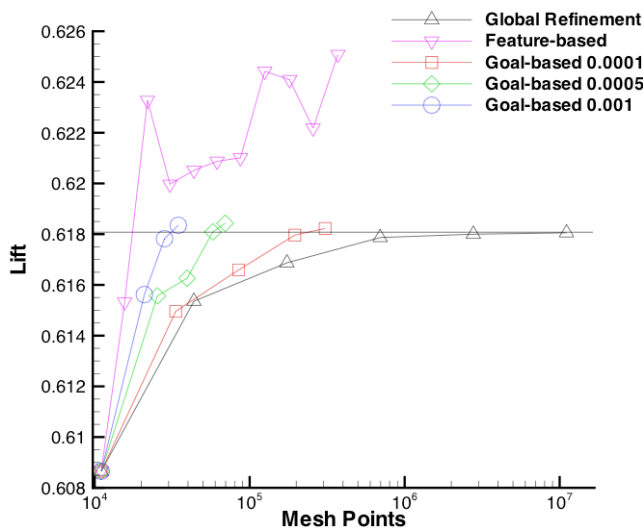


Bild 14: Auftriebsbeiwert in Abhängigkeit der Netzauflösung für verschiedene Adaptionstrategien, reibungslose Strömung um das NACA0012-Profil,  $M=0.85$ ,  $\alpha=2^\circ$

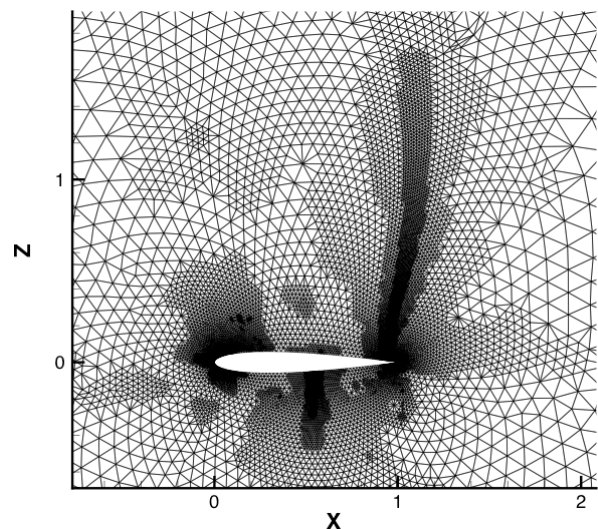


Bild 15: Netz nach 3 zielgerichteten Adaptionen

Für den transsonischen Strömungsfall (Bilder 14 und 15) zeigt sich aber, dass die normale „feature-based“ Adaption zu falschen Ergebnissen führen kann, wohingegen die zielgerichtete Netzadaption sehr wohl zu dem korrekten (durch wiederholte globale Verfeinerung erzeugten) Ergebnis konvergiert. Das inkonsistente Verhalten der „feature-based“ Adaption liegt daran, dass zu viele Punkte im Bereich des Verdichtungsstoßes auf

der Oberseite hinzugefügt werden, dafür aber andere für die Widerstandsberechnung wichtige Strömungsbereiche nicht verfeinert werden.

Die prinzipielle Anwendbarkeit der zielorientierten Netzadaption für reibungsbehaftete Strömungen konnte anhand von Profilrechnungen nachgewiesen werden. Leider ist aufgrund der derzeitigen Einschränkungen des TAU-Adaptionsmoduls in und an strukturierten Netzbereichen (keine Verfeinerung in den strukturierten Netzbereichen parallel zur Wand) keine abschließende Bewertung des Ansatzes möglich. Bild 16 zeigt dennoch deutliche Vorteile der zielorientierten Adaption gegenüber der „feature-based“ Adaption (default).

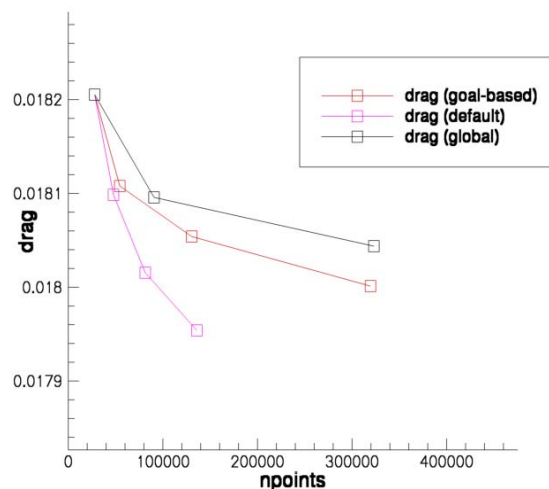


Bild 16: Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit der Netzauflösung für verschiedene Netzadaptionsstrategien, turbulente Strömung um das RAE 2822-Profil,  $M=0.734$ ,  $\alpha=2.79^\circ$ ,  $Re=6.5 \times 10^6$

Hinsichtlich der Meilensteine in AP3200 ist festzustellen, dass die beiden Meilensteine M4a „Lokale Netzverfeinerung auf Basis der Adjungierten-Formulierung in TAU demonstriert an 2D-Fällen“ und M4b „Lokale Netzverfeinerung auf Basis der Adjungierten-Formulierung in TAU demonstriert an 3D-Fällen“ erfüllt wurden. Es konnte gezeigt werden, dass die zielgerichtete Adaption insbesondere in Hinsicht auf die Verlässlichkeit der Ergebnisse eine merkliche Verbesserung gegenüber der in TAU primär genutzten „feature“-basierten Adaption darstellt. Für komplexe Anwendungsfälle unter industriellen Randbedingungen sind aber Verbesserungen hinsichtlich der Effizienz und Robustheit des Adjungiertenlösers und Weiterentwicklungen des Adaptionsmoduls notwendig. Entsprechende Arbeiten sind im Nachfolgevorhaben MUNA (Lufo 4) vorgesehen.

### 7.3 Arbeitspaket 4000 Numerische Optimierung

#### 7.3.1 AP 4300 Navier-Stokes-Adjungierte

Im Rahmen deterministischer Optimierungsstrategien bietet die Nutzung von Adjungierten-Verfahren zur Bestimmung von Gradienteninformationen ein sehr hohes Potential für effiziente dreidimensionale Geometrieoptimierungen mit vielen Entwurfsparametern. Der entscheidende Vorteil der Adjungierten liegt darin, dass im Gegensatz zum klassischen Finite-Differenzen-Verfahren der numerische Aufwand zur Auswertung des Zielfunktionalen unabhängig von der Anzahl der Entwurfsparameter ist.

Aufbauend auf den Erfahrungen, die bei der Entwicklung der adjungierten Euler- und Navier-Stokes-Verfahren auf der Basis des strukturierten Strömungslösers FLOWer erzielt wurden,

wurde im Vorhaben MEGADESIGN ein Adjungierten-Verfahren für den unstrukturierten Navier-Stokes-Code TAU entwickelt und implementiert. Wie der Strömungscode TAU soll auch das Adjungierten-Verfahren hybride Netze mit beliebigen Kontrollvolumina verwenden können und ein ähnliches Konvergenzverhalten aufweisen. Im Projekt wurden sowohl der kontinuierliche als auch der diskrete Adjungierten-Ansatz verfolgt.

### Kontinuierliche Adjungierte

Die Entwicklung eines kontinuierlichen Adjungierten-Verfahrens beschränkte sich auf reibungslose Strömungen. Sie basiert auf der im blockstrukturierten Verfahren FLOWER realisierten Vorgehensweise. Die Grundlage bildet ein zentrales Verfahren mit skalarer Dissipation. Die Entwicklung beinhaltet die Herleitung der adjungierten Flussberechnung einschließlich der künstlichen Dissipation und der entsprechenden Randbedingungen. Die neue Funktionalität ist als Option im TAU-Löser integriert und steht in der zentralen TAU-Version zur Verfügung.

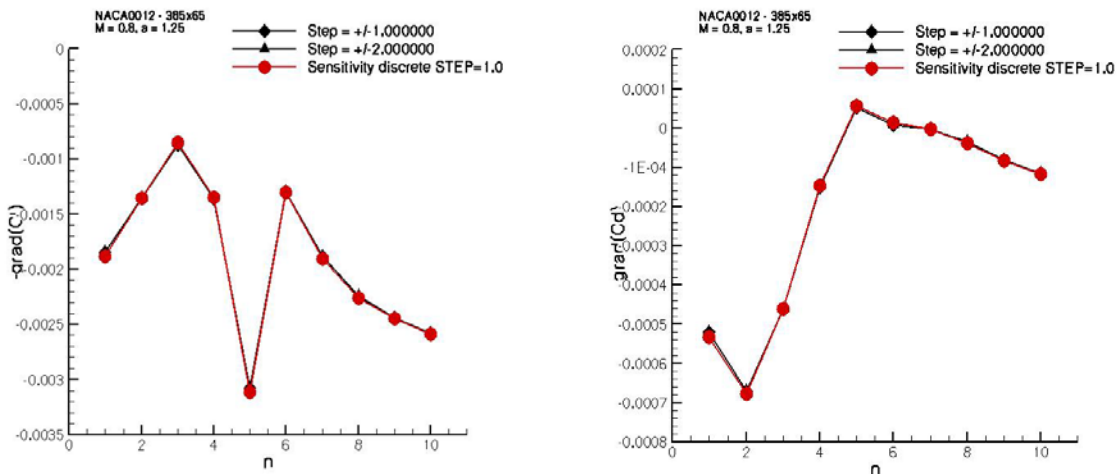


Bild 17: Gradient des Auftriebs- und Widerstandsbeiwert bezüglich einer Geometriemodifikation, reibungsloses Strömung um das NACA0012-Profil,  $M=0.8$ ,  $\alpha=1.25^\circ$

Die korrekte Implementierung des Adjungierten-Verfahrens zur Bestimmung von Sensitivitäten aerodynamischer Größen bezüglich der Geometrieparameter wurde anhand von Vergleichsrechnungen mit dem Finite-Differenzen-Verfahren verifiziert. Bild 17 zeigt den Widerstands- und Auftriebsgradienten für das NACA0012-Profil bei  $M=0.18$  und  $\alpha=1.25^\circ$ . Das Profil wurde mit Hicks-Henne Funktionen und zehn Entwurfparametern realisiert. Die Übereinstimmung zwischen den mit dem Adjungierten-Verfahren und dem Finite-Differenzen-Verfahren erzielten Sensitivitäten ist sehr gut. Durch die Nutzung des Adjungierten-Ansatzes beschränkt sich der Aufwand zur Berechnung der Sensitivitäten auf eine Strömungslösung und eine Lösung der Adjungierten-Gleichungen. Ähnliche Verifikationsrechnungen wurden anhand des ONERA-M6-Flügels auch für dreidimensionale Strömungen durchgeführt.

Die kontinuierliche Adjungierte wurde erfolgreich in verschiedenen Optimierungsaufgaben angewendet (siehe auch AP5400). Die gesammelten Erfahrungen zeigen bei der Euler-Adjungierten ein besonders robustes und effizientes Konvergenzverhalten, insbesondere bei der Verwendung des impliziten LU-SGS-Schemas. Bild 18 zeigt, dass für die Widerstandsoptimierung des RAE 2822-Profiles ähnliche Konvergenzraten für die Lösung der Strömungsgleichungen und der Adjungierten-Gleichungen erzielt wurden. Darüber hinaus ist in beiden Fällen die Effizienzsteigerung durch das implizite LU-SGS-Schema zu erkennen.

Der Speicherbedarf des adjungierten Löser ist nur geringfügig größer als der Speicherbedarf des Strömungslöser und die Rechenzeit ist pro Iteration etwa um 25% geringer.

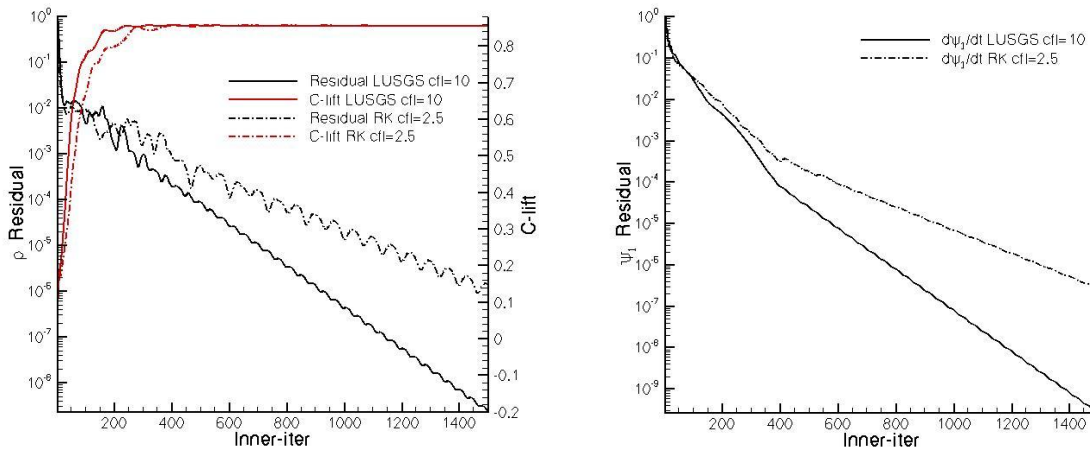


Bild 18: Konvergenzverhalten des Strömungslöser (links) und des Adjungierten-Löser (rechts) für die Widerstandsoptimierung des RAE2822-Profiles in reibungsloser Strömung, Vergleich Runge-Kutta und LU-SGS-Verfahren

#### Diskrete Adjungierte

Im Rahmen des MEGADESIGN-Vorhabens wurde eine exakte, diskrete Adjungierte des unstrukturierten TAU-Codes zur Lösung der Euler- und Navier-Stokes-Gleichungen entwickelt. Die diskrete Adjungierte ist in dem Sinne exakt, als dass sie auf einer vollständigen Linearisierung aller Terme des Lösungsverfahrens einschließlich der Randbedingungen und der Turbulenzgleichungen basiert. Die Linearisierung wurde durch eine sehr aufwändige Differentiation per Hand durch wiederholtes Anwenden der Kettenregel durchgeführt.

Anfänglich wurde für zweidimensionale Strömungen die exakte Adjungierte durch die explizite Speicherung der Jacobi-Matrix realisiert. Zur Lösung des linearen Adjungierten-Gleichungssystems wurde GMRES mit ILU(4) als Vorkonditionierer verwendet. Mit dieser Vorgehensweise benötigt die Lösung der Adjungierten-Gleichungen nur etwa 5% der Rechenzeit, die für die Lösung der nichtlinearen Strömungsgleichungen erforderlich ist. Der erforderliche Speicherplatz ist aber um den Faktor 11 höher als beim Strömungslöser. Wie Tabelle 3 (4. Spalte) zeigt, ist dieser Ansatz aufgrund der enormen Speicheranforderungen für praktische dreidimensionale Anwendungen nicht brauchbar. Die in Tabelle 3 gezeigten Daten wurden durch Rechnungen für prototypische zwei- und dreidimensionale turbulente Strömungen generiert. Der für den linearen Löser (GMRES mit ILU) zusätzlich benötigte Speicherplatz wurde nicht berücksichtigt.

		Standard TAU	Adjoint, Full Jacobian	Adjoint, Reduced Jacob.
2D	Speicher (Bytes)	12 M	100 M	44 M
	Faktor	x 1.0	x 8.3	x 3.7
	Netzpunktzahl	$2.3 \times 10^6$	$280 \times 10^3$	$640 \times 10^3$
	Laufzeit Evaluierung Residuen	x 1.0	x 1.3	x 0.7

	Laufzeit Evaluierung Jacobi-Matrix	-	x 26.2	x 2.6
3D	Speicher	100 M	1350 M	400 M
	Faktor	x 1.0	x 13.5	x 4.0
	Netzpunktzahl	$1.2 \times 10^6$	$89 \times 10^3$	$300 \times 10^3$
	Laufzeit Evaluierung Residuen	x 1.0	x 1.7	x 0.6
	Laufzeit Evaluierung Jacobi-Matrix	-	x 28.0	x 3.0

Tabelle 3: Vergleich der Speicheranforderung und Laufzeiten für den Standard-TAU-Code und Adjungierten-Verfahren mit unterschiedlichen Approximationen der Jacobi-Matrix

Ein Schwerpunkt der Forschungsarbeiten lag daher auf der Untersuchung von speicher- und laufzeiteffizienten Verfahren zur Lösung der diskreten adjungierten Navier-Stokes-Gleichungen für praktische Anwendungsfälle. Es wurden verschiedene, speichereffizientere Approximationen der Jacobi-Matrix für die adjungierten Gleichungen entwickelt, implementiert und der Einfluss der Näherungen auf die Sensitivitätenberechnung in der Geometrieoptimierung untersucht [11]. Für das zentrale Diskretisierungsschema mit künstlicher Dissipation lässt sich ein effizientes Adjungierten-Verfahren konstruieren, wenn hinsichtlich der Differentiation eine vereinfachte Diskretisierung der viskosen Flüsse verwendet wird und die Dissipationskoeffizienten als konstant angenommen werden. Wie aus Tabelle 3 (5. Spalte) zu entnehmen ist, steigen bei diesem Ansatz die Speicherplatzanforderungen nur um etwa den Faktor 3-4 gegenüber dem Standard-TAU-Code.

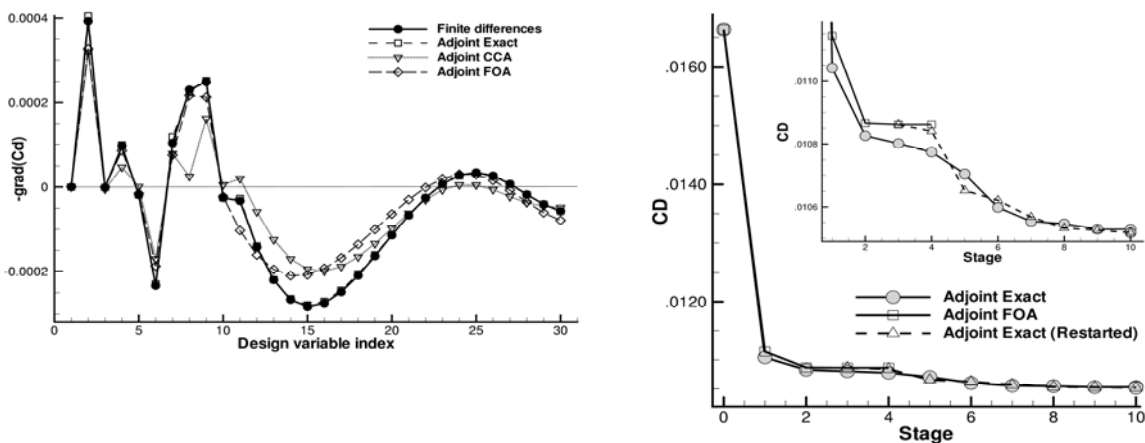


Bild 19: Einfluss der Approximation der Jacobi-Matrix auf den Gradienten des Widerstandsbeiwertes bezüglich der Geometrieparametrisierung des RAE2822-Profiles (links) und der Widerstandsoptimierung (rechts)

Der Einfluss der unterschiedlichen Approximationen der Jacobi-Matrix auf die Berechnung von Geometriesensitivitäten ist in Bild 19 (links) zu sehen. Man erkennt, dass die Ergebnisse des Adjungierten-Verfahrens mit der exakten Jacobi-Matrix wie erwartet mit denen des Finiten-Differenzen-Verfahrens übereinstimmen. Für die unterschiedlichen Jacobi-Approximationen (konstante Dissipationskoeffizienten (CAA) bzw erster Ordnung Jacobi-Matrix (FOA)) sind dagegen Unterschiede erkennbar. Der Einfluss auf die Optimierungsergebnisse (Bild 19 rechts) ist aber vernachlässigbar gering. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass für das zentrale Diskretisierungsschema die näherungsweise Berechnung der Adjungierten auf Basis der konstanten Dissipationskoeffizienten ein guter Kompromiss zwischen Genauigkeit und numerischem

Aufwand ist. Diese Vorgehensweise wurde für die in AP5400 gezeigten dreidimensionalen Optimierungsanwendungen genutzt.

Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt im Arbeitspaket AP4300 war die Entwicklung von effizienten und robusten Verfahren zur Lösung der linearen Adjungierten-Gleichungen [12]. Es wurde ein geeignetes Iterationsverfahren entwickelt und implementiert, welches im wesentlichen auf einer Adjungierung des zur Lösung der nichtlinearen Navier-Stokes-Gleichungen verwendeten Fixpunkt-Iterationsverfahren (LU-SGS- bzw. Runge-Kutta-Verfahren in Verbindung mit Mehrgitter) basiert. Es konnte theoretisch gezeigt werden [12], dass mit dieser Vorgehensweise die Adjungierten-Gleichungen mit der gleichen Konvergenzrate wie das nichtlineare Strömungsproblem gelöst werden können. Wenn also das Strömungsproblem asymptotisch gut konvergiert, ist auch eine robuste und effiziente Lösung der adjungierten Gleichungen sichergestellt. Dieser Sachverhalt konnte in der Praxis durch entsprechende Rechnungen verifiziert werden. Bild 20 zeigt das Konvergenzverhalten des Verfahrens zur Lösung der nichtlinearen RANS-Gleichungen für eine turbulente, transsonische Profilumströmung. Ferner ist die Konvergenz des adjungierten Problems über die Anzahl der verwendeten Mehrgitterzyklen dargestellt. Es wurde das LU-SGS-Schema in Kombination mit einem 3W-Mehrgitterverfahren verwendet. Es ist klar zu erkennen, dass beide Lösungsalgorithmen die gleiche Konvergenzrate aufweisen.

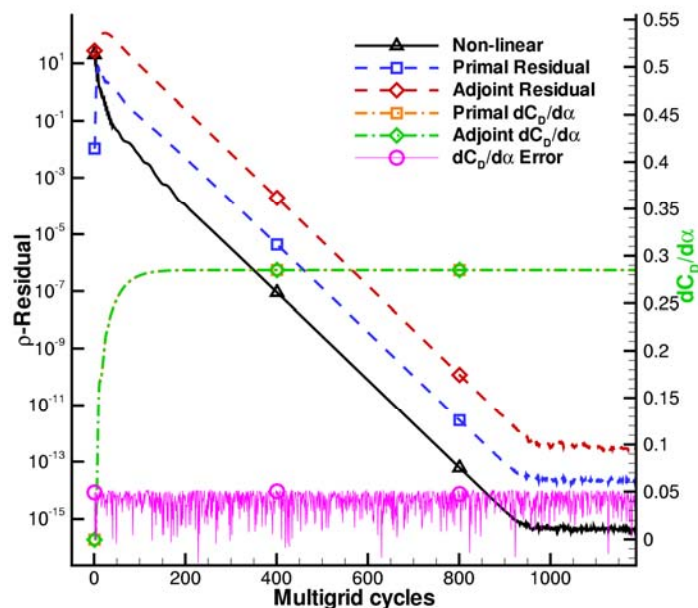


Bild 20: Konvergenzverhalten für die nichtlineare Strömungsberechnung (Non-linear) und das lineare Adjungierten-Verfahren (Adjoint Residual) für das NACA0012-Profil in transsonischer, reibungsbehafteter Strömung

In einigen Anwendungsfällen hat sich aber gezeigt, dass das adjungierte Fixpunktverfahren zur Lösung der Adjungierten-Gleichungen zu Problemen führt, wenn die Konvergenz des nichtlinearen Verfahrens nach einer gewissen Größenordnung stagniert. Dies tritt häufig bei stationären Berechnungen von Strömungen mit Ablösegebieten auf. Für diese Fälle wurde eine Stabilisierungsmethode auf Basis von Krylov-Methoden in TAU implementiert. Es wurde hier der Ansatz der rekursiven Projektionsmethode (Recursive Projection Method) verfolgt. Mit diesem Verfahren werden die instabilen Eigenmoden des verwendeten adjungierten Fixpunktverfahrens besonders behandelt. Die Stabilisierungsmethode wurde für eine Reihe von Anwendungen erfolgreich eingesetzt. Bild 21 zeigt Ergebnisse der Berechnung einer

turbulenten Strömung um die DLR-F6-Flügel/Rumpf-Konfiguration. Diese Geometrie weist unter gewissen Strömungsbedingungen im Reiseflug ein Ablösegebiet an der Flügelhinterkante im Bereich des Flügel/Rumpf-Übergangs auf. Bild 21 zeigt das instabile Verhalten des adjungierte Fixpunktverfahrens (LU-SGS mit Mehrgitter) zur Lösung der adjungierten Gleichungen. Durch Anwendung der rekursive Projektionsmethode (RPM) konnte aber ein konvergentes Verfahren zur Lösung des adjungierten Problems erhalten werden. Dieses Adjungierten-Verfahren wurde erfolgreich für die Optimierung der DLR-F6-Flügel/Rumpf-Konfiguration eingesetzt [12][13] (siehe AP5400).

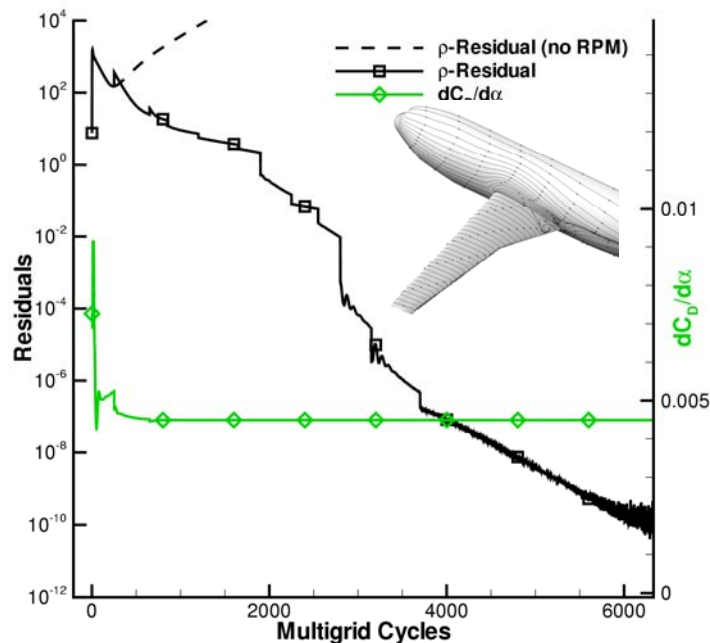


Bild 21: Stabilisierung des viskosen Adjungierten-Verfahrens durch die rekursive Projektionsmethode (RPM) für die DLR-F6 Flügel-Rumpf-Konfiguration

Da sich die Parallelisierung der rekursiven Projektionsmethode (RPM) als sehr schwierig und aufwändig herausstellte, wurde alternativ ein GMRES-Krylov Lösungsverfahren implementiert. Das LU-SGS- bzw. das Runge-Kutta-Verfahren in Verbindung mit Mehrgitter dienen als Vorkonditionierer. Diese Vorgehensweise wurde für die effiziente Nutzung von Parallelrechnern erweitert. In den meisten Anwendungsfällen zeigt sie ähnliche Stabilitätseigenschaften wie das RPM.

Die diskrete Adjungierte wurde für viele Problemstellungen in der Optimierung erfolgreich eingesetzt. Einige der erzielten Ergebnisse werden im Arbeitspaket AP5400 beschrieben.

#### *Adjungierten-Verfahren zur Bestimmung der Netzsensitivitäten*

Der Gradient für die jeweilige Zielfunktion einer Optimierung errechnet sich in der Regel aus zwei Einzelschritten. Der erste Schritt ist die Berechnung der Adjungierten-Variablen aus der Strömungssimulation und ist wie oben beschrieben unabhängig von der Anzahl der Entwurfparameter. Der zweite Schritt umfasst den Einfluss der Netzdeformation auf den Gradienten und wird typischerweise mit einem Finiten-Differenzen-Verfahren ermittelt. Die inkrementelle Ermittlung des Finiten-Differenzen-Schrittes und die Skalierung mit der Anzahl der Parameter wird bei einer großen Anzahl sehr zeitintensiv. Es liegt daher nahe, auch für die Bestimmung der Netzsensitivitäten den Adjungierten-Ansatz auszunutzen.

Obwohl im Projektplan nicht vorgesehen, wurden Aktivitäten zur Entwicklung und Erprobung



eines Adjungierten-Verfahrens zur Ermittlung der Netzsensitivitäten durchgeführt. Zur Berechnung der entsprechenden Adjungierten-Variablen mussten große Teile des Strömungslösers, des Preprocessors und der auf der elastischen Elastizität beruhenden Netzdeformation händisch nach den Gitterpunkten abgeleitet werden. Bild 22 zeigt für das RAE2822-Profil die Gradienten für die Zielfunktionen Auftrieb und Nickmoment, die unter Nutzung des adjungierten Strömungsverfahrens und der adjungierten Netzdeformation ermittelt wurden. Als Vergleich sind die durch die Finite-Differenzen-Methode berechneten Sensitivitäten angegeben. Die Übereinstimmung der Ergebnisse ist sehr gut. Der Vorteil der adjungierten Netzdeformation besteht darin, dass die Netzsensitivitäten für jeden Oberflächenpunkt eines Netzes in einem Schritt unabhängig von der Anzahl der Entwurfsparameter ermittelt werden können.

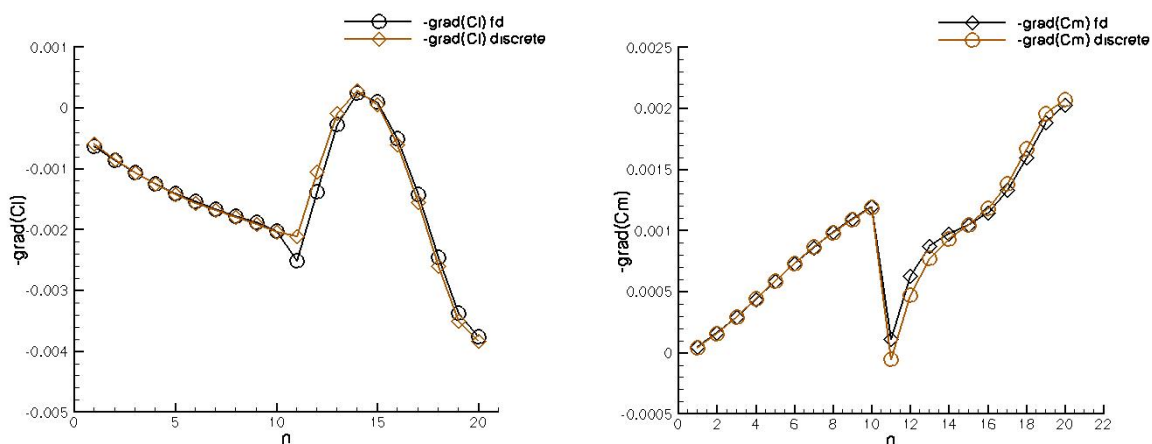


Bild 22: Auftriebs- und Nickmomentengradienten für das RAE2822-Profil ( $M=0.734$ ,  $\alpha=2^\circ$ ) unter Verwendung der adjungierten Netzdeformation im Vergleich zu Finiten Differenzen

Hinsichtlich der Meilensteine in AP4300 ist festzustellen, dass die beiden Meilensteine M2 „Euler-Adjungierte in TAU verfügbar“ und M3 „Navier-Stokes Adjungierte in TAU verfügbar“ erst zeitlich deutlich verspätet erreicht wurden (siehe Kapitel 4). Der Hauptgrund lag in der algorithmischen Komplexität der Adjungierten-Verfahren, die bei der Projektplanung erheblich unterschätzt wurde. Letztlich wurden beide Meilensteine aber noch rechtzeitig vor Durchführung der Rechnungen für die Optimierungshauptmeilensteine des Vorhabens im vollen Umfang erfüllt.

## 7.4 Arbeitspaket 5000 Industrielle Anwendungen

### 7.4.1 AP 5100 Softwareintegration und Versionsmanagement

Während der Projektlaufzeit leistete das DLR Unterstützungsarbeiten für die MEGADDESIGN-Verbundpartner bei der Nutzung und Weiterentwicklung der MEGAFLOW-Verfahren FLOWer und TAU.

#### *Turbulenzmodellierung*

Die Partner TU Berlin und TU Darmstadt wurden in der Weiterentwicklung des FLOWer-Codes hinsichtlich der Turbulenzmodellierung unterstützt. Diese Arbeiten betrafen die



Implementierung einer hybrid-adaptiven Wandfunktion für  $k-\omega$ -Modelle (TU Berlin) und eines fortschrittlichen Reynolds-Spannungsmodells (TU Darmstadt).

Bei der hybrid-adaptiven Wandfunktion für  $k-\omega$ -Modelle handelt es sich um eine neue Randbedingung, die alternativ zu den bestehenden Randbedingungen angewählt werden kann. Hier wurde die TU Berlin bei der Erstellung des softwaretechnischen Konzeptes unterstützt und Hilfestellung bei der Identifikation der zu ändernden Codeteile sowie in speziellen Fällen bei der Fehlersuche gegeben. Die von der TU Berlin entwickelten Softwarekomponenten wurden vom DLR übernommen, aber noch nicht in die zentrale FLOWer-Version integriert.

Das von der TU Darmstadt entwickelte fortschrittliche Reynolds-Spannungsmodell unterscheidet sich von den bisher in FLOWer verfügbaren Modellen hinsichtlich des Umverteilungsterms und des Dissipationsterms, deren Koeffizienten keine Konstanten, sondern nichtlineare Funktionen von Tensorinvarianten darstellen. Außerdem enthält das Modell einen zusätzlichen Wandreflexionsterm, der bei den bisherigen Modellen nicht vorgesehen war. Der TU Darmstadt wurde Hilfestellung bei der Einarbeitung in den FLOWer-Code und bei der Identifizierung der Schnittstellen zu den neu zu erstellenden Komponenten gegeben. Zur Validierung der Implementierung wurden Testfälle und Ergebnisse mit den bisher implementierten Reynolds-Spannungsmodellen bereitgestellt. Die Arbeiten wurden in einem gemeinsamen Konferenzbeitrag [14] und einem daraus abgeleiteten Fachartikel [15] dokumentiert. Von der TU Darmstadt wurde bisher der anisotrope Dissipationsterm des Modells in die zentrale FLOWer-Version übernommen.

#### *Optimierungsverfahren*

Als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines One-Shot-Optimierungsverfahrens wurde der Universität Trier der blockstrukturierte Strömungslöser FLOWer und das darauf aufbauende kontinuierliche Euler-Adjungierten-Verfahren ausgeliefert. Zur Einarbeitung in diese Verfahren führte ein Mitarbeiter der Universität Trier einen einwöchigen Arbeitsbesuch am DLR durch. Ferner wurden vom DLR zwei- und dreidimensionale Testfälle spezifiziert und entsprechende Referenzergebnisse bereit gestellt, anhand derer spätere Validierungen des One-Shot-Verfahrens durchgeführt wurden. Um im Rahmen der One-Shot-Methode eine simultane Konvergenz von Zustands-, adjungierter Zustands- und Entwurfsgleichung zu ermöglichen, musste seitens des DLR die Adjungierten-Option von FLOWer auf Mehrgitter erweitert werden. Für die Optimierungsanwendungen im Hochauftrieb wurde die diskrete Navier-Stokes-Adjungierte in TAU verwendet. Auch diese Verfahren wurden samt Testfällen in einem mehrtägigen Arbeitstreffen seitens des DLR an die Universität Trier ausgeliefert. Im Rahmen der engen Zusammenarbeit zwischen der Universität Trier und dem DLR sind mehrere gemeinsame Veröffentlichungen entstanden [16][17][18].

Der Partner FastOpt wurde bei den Arbeiten bezüglich der automatischen Differentiation des FLOWer-Codes unterstützt. Ursprünglich war vorgesehen, die mit der FastOpt-Software TAF automatisch generierten adjungierten Turbulenzschemata mit dem in FLOWer bestehenden, per Hand erzeugten, kontinuierlichen Adjungierten-Löser (bei eingefrorener turbulenter Viskosität) zu koppeln. Nach einem mehrtägigen gemeinsamen Arbeitstreffen wurde aber entschieden, aufgrund der mannigfaltigen Schnittstellen den gesamten FLOWer Code automatisch mit TAF zu differenzieren. Als erster Testfall wurde die effiziente Berechnung der Sensitivitäten des Auftriebsbeiwertes bzgl. der Variation des Anstellwinkels gewählt. Hierfür wurden seitens des DLR die erforderlichen unabhängigen und abhängigen Variablen in den entsprechenden Routinen von FLOWer deklariert. Für die Optimierung waren schließlich die Ableitungen der aerodynamischen Beiwerte nach allen Netzpunkten erforderlich. Hierfür galt es seitens des DLR einige Routinen in FLOWer vorzubereiten und neue Variablen für die Netzpunktvariationen einzuführen.

### 7.4.2 AP 5400 Validierung und Anwendung

Während der Projektlaufzeit wurden sowohl die kontinuierliche als auch die diskrete Adjungierten-Formulierung für numerische Optimierungsanwendungen verwendet.

#### *Kontinuierliche Adjungierte*

Die kontinuierliche Euler-Adjungierte des TAU-Codes wurde für die Widerstandsoptimierung einer Nurflüglerkonfiguration eingesetzt [19]. Dabei handelte es sich um eine Grundrissoptimierung in reibungsloser Strömung für Vorentwurfsstudien. Die Planform ist durch fünf Profilschnitte vorgegeben. Die Geometrievariation wurde durch die Freiform-Deformation realisiert. Die Ausgangsgeometrie der Konfiguration und die Boxen der Freiform-Deformation sind in Bild 23 zu sehen. Die roten Punkte stellen die Kontrollpunkte der Freiform-Deformation und somit die Entwurfparameter dar. Über diese Parameter wird die Deformation des Oberflächennetzes und somit der Oberflächengeometrie gesteuert. Die schwarzen Punkte bleiben bei der Optimierung konstant. Dadurch kann eine vorgegebene, minimale Dicke der Konfiguration sicher gestellt werden. Weiterhin sind Nebenbedingungen hinsichtlich des Passagierraumes, des Laderaumes und des Fahrwerksraumes zu berücksichtigen. Bild 24 zeigt die erreichte Widerstandsreduktion von 10.5 drag counts.

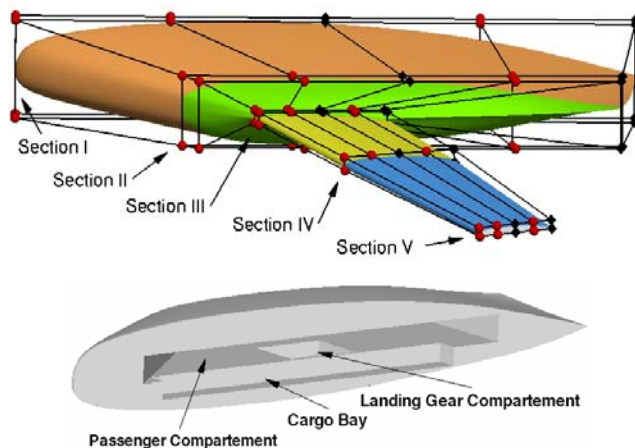


Bild 23: VELA Nurflüglerkonfiguration mit Boxen der Freiform-Deformation und Entwurfparametern (rote Punkte)

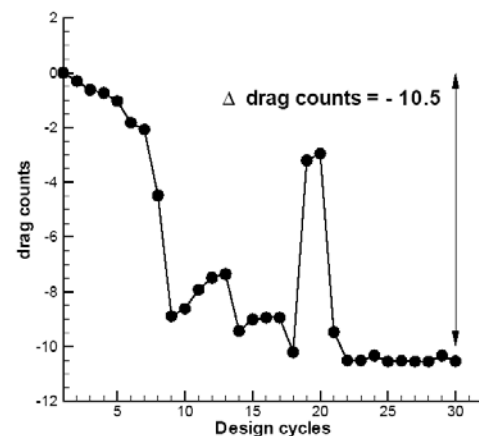


Bild 24: Widerstandsreduktion durch Grundrissoptimierung in reibungsloser Strömung, VELA-Konfiguration,  $M=0.85$ ,  $\alpha=1.8^\circ$

Bild 25 vergleicht die Oberflächendruckverteilungen der Ausgangskonfiguration und der optimierten Konfiguration in vier Profilschnitten. Es ist deutlich zu erkennen, dass die optimierte Version abgeschwächte Verdichtungsstöße aufweist.

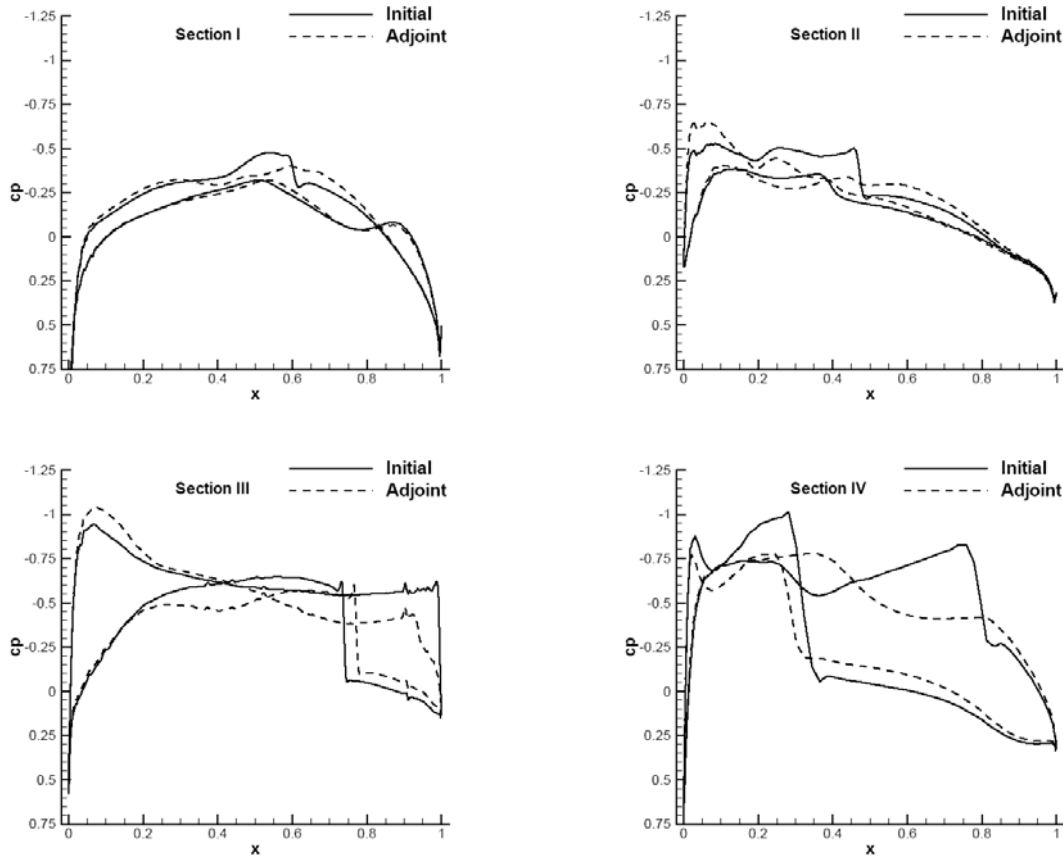


Bild 25: Widerstandsoptimierung der VELA-Konfiguration in reibungsloser Strömung,  $M=0.85$ ,  $\alpha=1.8^\circ$ , Druckverteilung vor und nach der Optimierung in Profilschnitten

Bild 26 zeigt den Vergleich der Machzahlverteilung auf der Ober- und Unterseite der Nurfüglерkonfiguration. Auch hier ist die deutliche Verringerung des Verdichtungsstoßes bei der optimierten Konfiguration zu erkennen.

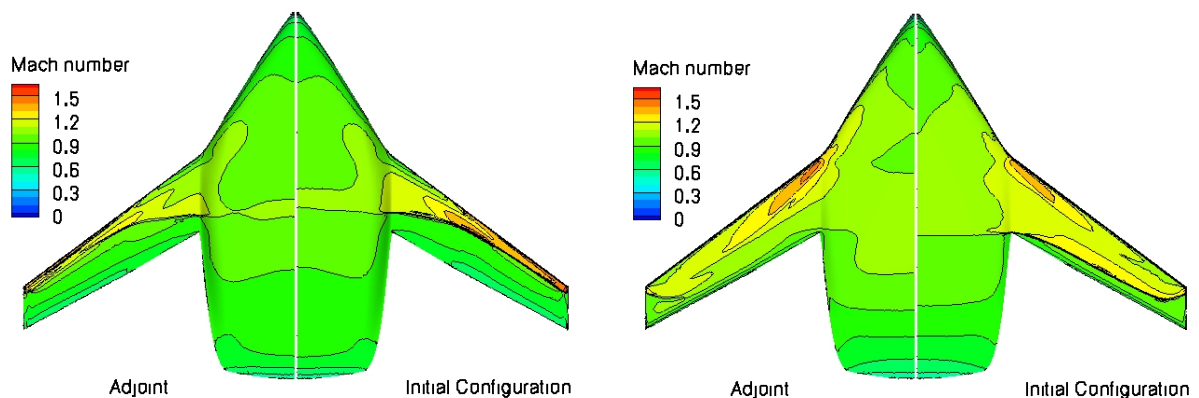


Bild 26: Widerstandsoptimierung der VELA-Konfiguration in reibungsloser Strömung,  $M=0.85$ ,  $\alpha=1.8^\circ$ , Machzahlverteilung vor und nach der Optimierung, Unterseite (links), Oberseite (rechts)

Die Optimierung mit 30 Entwurfparametern wurde auf einem Linux-Cluster mit jeweils 4 Prozessoren für die Strömungsberechnung und für die Sensitivitätenberechnung mittels des

Adjungierten-Verfahrens durchgeführt. Die Rechenzeit für eine Strömungs- und Adjungierten-Berechnung betrug etwa 1 Stunde. Insgesamt benötigte die Optimierung etwa 26 Stunden.

### *Diskrete Adjungierte*

Um die Fähigkeiten und Grenzen des diskreten TAU-Adjungierten-Verfahrens für die aerodynamische Geometrieoptimierung in reibungsbehafteten Strömungen bewerten zu können, wurden mehrere Problemstellungen mit steigender Komplexität untersucht. Die Studien umfassten die Widerstandsoptimierung von Profilen in transsonischer Strömung, den Entwurf einer Hinterkantenklappe einer 2D Hochauftriebskonfiguration, die Widerstandsoptimierung eines Flügels und einer Flügel-Rumpfkombination und die Positionsoptimierung von Vorder- und Hinterkantenklappe einer 3D Hochauftriebskonfiguration. In allen Fällen wurde die Strömungsauswertung mit dem hybriden RANS-Code TAU durchgeführt, wobei zur Turbulenzmodellierung das Eingleichungsmodell von Spalart/Allmaras/Edwards verwendet wurde. Die Berechnung der Sensitivitäten erfolgte auf der Basis der Lösung der diskreten Navier-Stokes-Adjungierten-Gleichungen. Für die zweidimensionalen Fälle wurde die exakte diskrete Adjungierte verwendet, während für die dreidimensionalen Strömungen die in AP4300 beschriebene Approximation genutzt wurde. Insbesondere ist hier anzumerken, dass die Wirbelviskosität als konstant angenommen wird. Dadurch wird die Differentiation der Turbulenzgleichungen hinfällig. Die Netzsensitivitäten wurden in allen Fällen mit Finiten Differenzen ermittelt.

Als erster Testfall wird die Widerstandsminimierung für das RAE2822-Profil in transsonischer Strömung bei konstantem Auftrieb untersucht. Der gewünschte Auftrieb wird automatisch im TAU-Code durch Anpassung des Anstellwinkels konstant gehalten. Die Wölbungslinie der Profilgeometrie wurde mit 20 Hicks-Henne Funktionen parametrisiert. Die maximale Profildicke wird während der Optimierung konstant gehalten. Das hybride Ausgangsnetz wurde mit dem Netzgenerator Centaur erzeugt, während die Netzmodifikationen im Rahmen der Optimierung mit dem TAU-Netzdeformationsmodul durchgeführt wurden. Das Deformationsmodul ist sehr effizient und ermöglicht Netze von gleicher Netztopologie. Dies ist von essentieller Bedeutung, wenn die Netzsensitivitäten auf Basis von Finiten Differenzen ermittelt werden. Bild 27 zeigt das hybride Ausgangsnetz um das RAE2822-Profil.

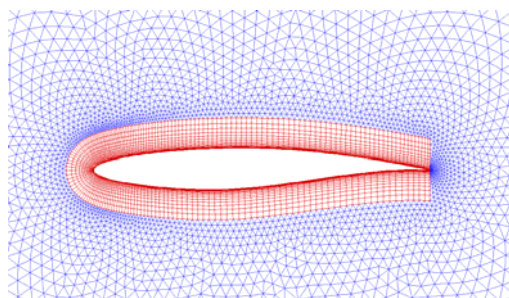


Bild 27: Hybrides Netz um das RAE2822-Profil

Im Rahmen der Profilloptimierung wurde der Einfluss von Optimierungsalgorithmen mit unterschiedlicher Effizienz untersucht. Diese umfassten das Verfahren des steilsten Abstiegs (steepest decent, CD), das konjugierte Gradientenverfahren (conjugate gradient, CG) und ein Newton-ähnliches Verfahren (Quasi-Newton Trust Region, QNTR). Die Konvergenz der verschiedenen Optimierungen ist in Bild 28 gezeigt. Die oberen Bilder zeigen den Verlauf des Widerstandsbeiwertes, die unteren Bilder den Verlauf des Anstellwinkels. Auf der horizontalen Achse ist die Anzahl der Strömungsauswertungen bzw. der Adjungierten-Berechnungen aufgetragen. Dabei wird angenommen, dass die Berechnungen der Strömung

und der Adjungierten etwa gleich aufwändig sind. In allen Fällen wird der Widerstand um mehr als 60 drag counts reduziert, während der Auftrieb konstant gehalten wird. Der QNTR-Algorithmus erweist sich wie erwartet als effizientestes Verfahren. Im Vergleich zu den anderen Verfahren findet es ein besseres Optimum mit deutlich weniger Strömungsauswertungen. Die höhere Anzahl der Sensitivitäten-berechnungen fällt kaum ins Gewicht, da diese sehr effizient mit dem Adjungierten-Verfahren bestimmt werden können. Die Optimierung auf Basis von Finiten Differenzen würde je nach Optimierungsstrategie etwa um den Faktor 3 -8 aufwändiger.

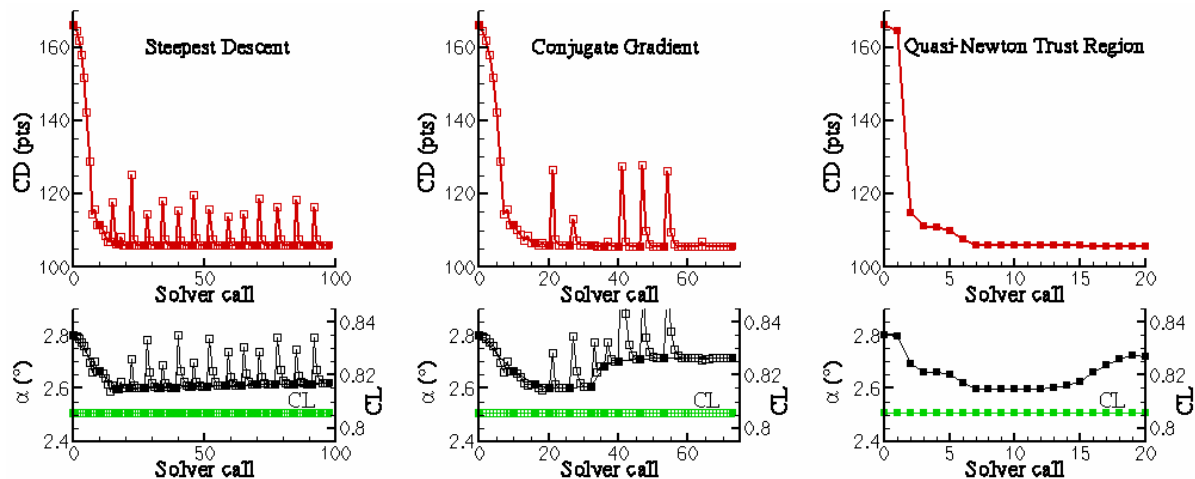


Bild 28: Widerstandsoptimierung für das das RAE 2822-Profil in transsonischer, reibungsbehafteter Strömung, Verläufe des Widerstandsbeiwertes und des Anstellwinkels in Abhängigkeit der Optimierungsschritte, Vergleich unterschiedlicher Optimierungsschritte

Bild 29 zeigt den Vergleich der Geometrie, Druckverteilung und Reibungskoeffizienten für die Startgeometrie und die optimierten Geometrien. Wie erwartet liefert die Optimierung ein stoßfreies Profil. Es sind nur minimale Unterschiede in den Ergebnissen der verschiedenen Optimierungsstrategien zu erkennen.

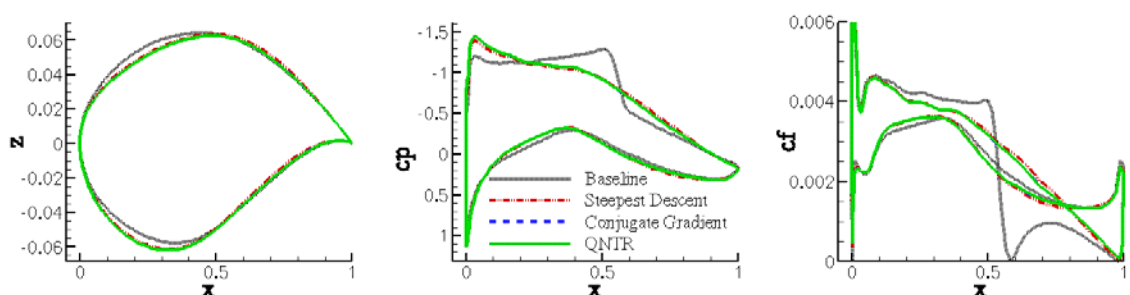


Bild 29: Vergleich von Geometrie, Druckverteilung und Reibungskoeffizienten für Startgeometrie und optimierte Geometrien, Widerstandsoptimierung des RA2822-Profiles in transsonischer Strömung, Vergleich unterschiedlicher Optimierungsstrategien

Der zweite Testfall betrifft die Optimierung einer zweidimensionalen Hochauftriebskonfiguration im Startfall mit Nebenbedingungen an den Auftriebs- und Momentenbeiwert. Die Startgeometrie ist eine 3-Element-Konfiguration, die aus dem EU-Projekt ERUOLIFT II abgeleitet wurde [20]. Die Strömungsbedingungen sind  $M=0.1715$  und  $Re=14.7 \times 10^6$ . Das hybride Rechenetz ist in Bild 30 gezeigt. Bei der durchgeführten Optimierung waren nur Modifikationen an der Hinterkante vorgesehen. Die Geometrie des Vor- und Hauptflügels war fest. Als Entwurfsparameter wurden die Position und der Winkel der Hinterkantenklappe

relativ zum Hauptprofil, die Nasengeometrie der Klappe sowie der Teil der Oberseitegeometrie, der in eingefahrener Situation vom Hauptflügel überdeckt ist, gewählt. Insgesamt standen 10 Parameter zur Verfügung. Als Optimierungsstrategie wurde das NLPQLP Verfahren von Schittkowski gewählt. Diese Strategie erfordert die Bestimmung von Gradienten zur Erfüllung der Nebenbedingungen. Daher waren für die Optimierung Adjungierten-Berechnungen jeweils für Widerstand, Auftrieb und Moment erforderlich.

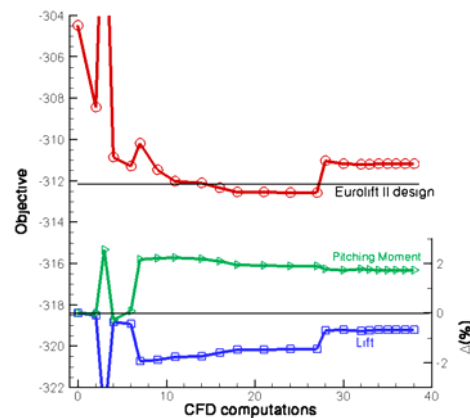
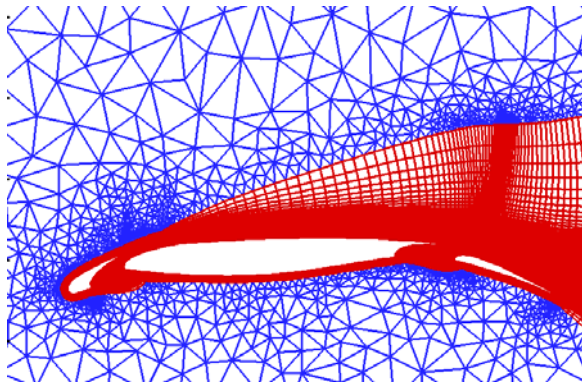


Bild 30: Hybrides Netz für ein Hochauftriebsprofil

Bild 31: Verlauf der aerodynamischen Größen bei Optimierung der Hinterkantenklappe

Die vollständige Optimierung benötigte etwa 24 Gradientenberechnungen (siehe Bild 31). Die optimierte Geometrie weist im Vergleich zur Startgeometrie den gleichen Auftrieb und ein etwas höheres Moment auf. Der erzielte Momentenbeiwert lag aber noch im zulässigen Bereich. Für die Optimierung wurden auf einem einzelnen Pentiumprozessor (3.4 GHz) 20 Stunden benötigt. Das hier erzielte Ergebnis ist sehr ähnlich zu dem im EU-Projekt EUROLIFT II erreichten Optimum. Das EUROLIFT-Ergebnis wurde mit einem evolutionären Optimierungsalgorithmus nach etwa 2 Wochen Rechenzeit auf 5 Pentiumprozessoren erzielt. Dies verdeutlicht das hohe Potential und die Effizienz der Adjungierten-basierten Geometrieoptimierung.

Als erste dreidimensionale Anwendung wurde die Optimierung eines Flügels in viskoser Strömung durchgeführt. Die Anströmparameter waren  $M=0.84$  und  $Re=7.9 \times 10^6$ . Als Zielfunktion wurde minimaler Widerstand bei konstant gehaltenem Auftrieb von  $C_L=0.3$  gewählt. Grundriss und Flügeldicke wurden während der Optimierung festgehalten und entsprechen dem ONERA-M6-Flügel. Verwindung und Wölbung wurden in 6 Flügelschnitten freigegeben. Als Parametrisierung wurde die Freiform-Deformation mit 18 Entwurfsvariablen verwendet. Für die Strömungsberechnung wurde der hybride TAU-Code genutzt. Der Auftrieb wurde durch Anpassung des Anstellwinkels konstant gehalten. Die turbulente Strömung wurde mit dem Eingleichungsturbulenzmodell von Spalart/Allmares modelliert. Als Optimierungsstrategie wurde die konjugierte Gradientenmethode eingesetzt. Die dabei notwendigen Sensitivitäten der Zielfunktion hinsichtlich der Strömungsgrößen wurden mit dem diskreten Adjungierten-Verfahren für viskose Strömungen bestimmt.

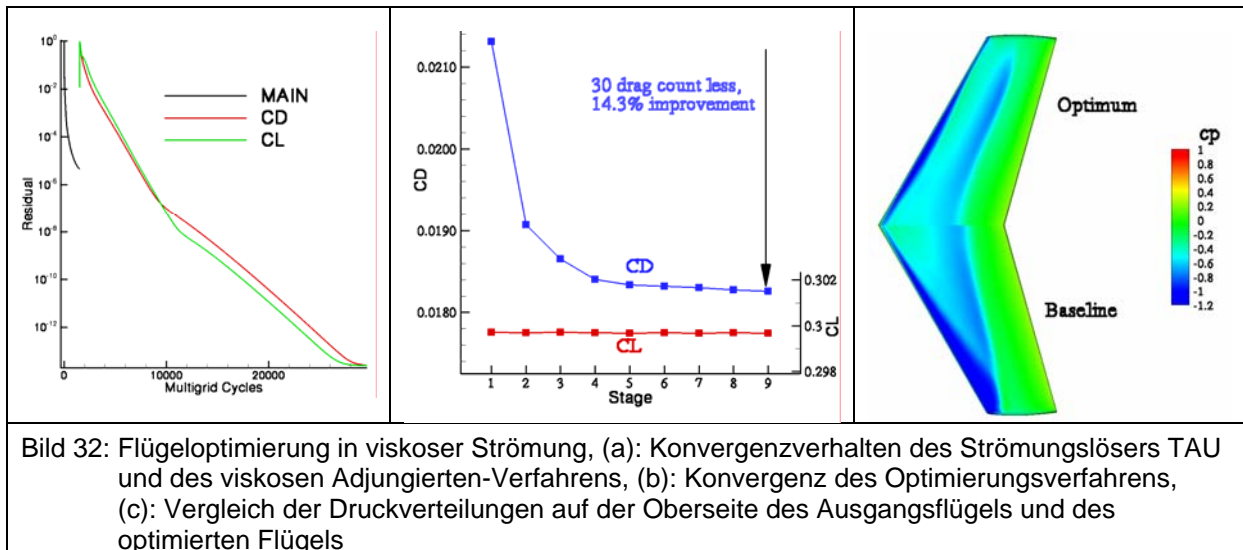


Bild 32: Flügeloptimierung in viskoser Strömung, (a): Konvergenzverhalten des Strömungslösers TAU und des viskosen Adjungierten-Verfahrens, (b): Konvergenz des Optimierungsverfahrens, (c): Vergleich der Druckverteilungen auf der Oberseite des Ausgangsflügels und des optimierten Flügels

Bild 32a zeigt das Konvergenzverhalten der Strömungsberechnung (MAIN) und der Adjungierten-Rechnung (CL, CD). In Bild 32b ist die Konvergenz der Optimierung dargestellt. Man erkennt, dass der Widerstand in 9 Optimierungsschritten um mehr als 14% reduziert wurde, während der Auftrieb wie gefordert konstant gehalten wurde. In Bild 33c sind die Druckverteilungen auf der Oberseite des Ausgangsflügels und des optimierten Flügels gezeigt. Bei dem optimierten Flügel ist deutlich die Schwächung des Lambda-Stoßsystems zu erkennen, welches bei den gewählten Anströmbedingungen beim M6-Flügel auftritt. Bei den 9 Optimierungsschritten wurden 40 Strömungsauswertungen und 8x2 Gradientenbestimmungen durchgeführt. Die Optimierung auf der Basis des Adjungierten-Verfahren ist insgesamt mehr als dreimal so schnell wie eine entsprechende gradientenbasierte Optimierung mit Finiten Differenzen. Es ist wichtig zu erwähnen, dass der Rechenzeitgewinn deutlich mit der Anzahl der Entwurfsparameter steigt.

Um die Tauglichkeit der Adjungierten-Methode auch für industrielle Problemstellungen zu demonstrieren wurde eine Optimierung der DLR-F6 Flügel/Rumpf-Konfiguration bei der Anströmmachzahl von  $M=0.75$  und der Reynoldszahl von  $Re=3 \times 10^6$  durchgeführt. Als Zielfunktion diente die Reduktion des Widerstands bei konstant gehaltenem Auftrieb von  $C_L=0.5$ . Unter diesen Bedingungen tritt bekanntermaßen ein großes Ablösegebiet im Hinterkantenbereich des Flügel/Rumpf-Übergangs auf. Für diesen schwierigen Fall erwies sich das adjungierte LU-SGS-Verfahren in Verbindung mit dem Mehrgitteralgorithmus als instabil. Das Adjungierten-Verfahren konnte aber mit Hilfe der rekursiven Projektionsmethode (RPM) stabilisiert werden (siehe AP4300) [13]. Es wurde ein gemischt strukturiert/unstrukturiertes Rechennetz (Bild 33) verwendet. Als Turbulenzmodell wurde das Eingleichungsmodell von Spalart/Allmaras genutzt. Zur Parametrisierung des Flügels wurde die Freiform-Deformation mit 84 Entwurfsparametern genutzt, sowie zusätzliche 12 Variablen für die Verwindung des Flügels (siehe Bild 34). Mit einer derart hohen Anzahl von Entwurfsparametern lässt sich eine Optimierung effizient nur gradientenbasiert durchführen, wobei das Adjungierten-Verfahren die benötigten Gradienteninformationen bereitstellen muss. Bei der Geometriebeschreibung und beim Netzgenerierungsprozess wurde berücksichtigt, dass die Flügel/Rumpf-Verschneidung sich während des Optimierungsprozesses ändern kann. Zur Optimierung wurde der konjugierte Gradientenalgorithmus (CG) verwandt, wobei der Anstellwinkel variiert wurde, um den Auftrieb konstant zu halten. Die Konvergenz der Optimierung ist in Bild 35 gezeigt. Die Symbole bezeichnen Gradientenberechnungen. Nach 32 Optimierungsschritten wurde mit 96



Entwurfsvariablen eine Widerstandsreduktion von etwa 10 drag counts erreicht. Eine Optimierung mit 42 Entwurfsparametern konvergierte nach 22 Zyklen, erzielte aber nur 8 drag counts. Die gesamte Rechenzeit betrug 18 Stunden auf 16 CPUs eines PC-Clusters.

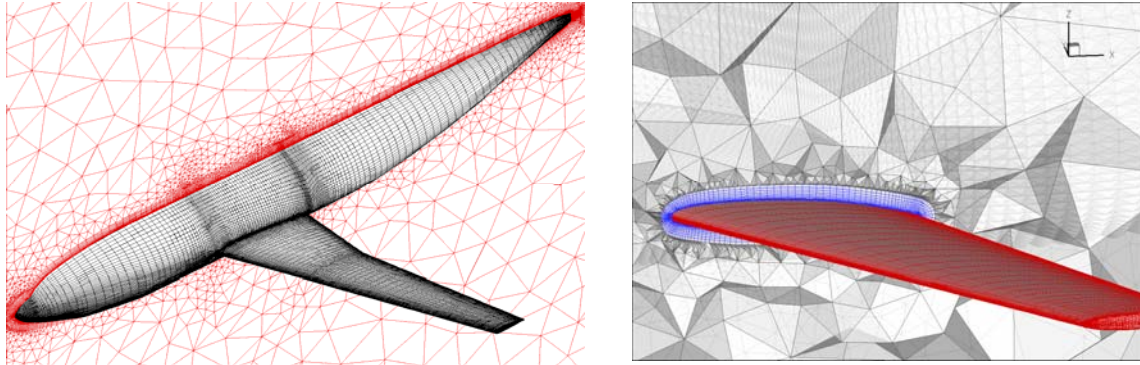


Bild 33: Gemischt strukturiertes/unstrukturiertes Navier-Stokes-Netz für die DLR-F6-Flügel/Rumpfkonfiguration

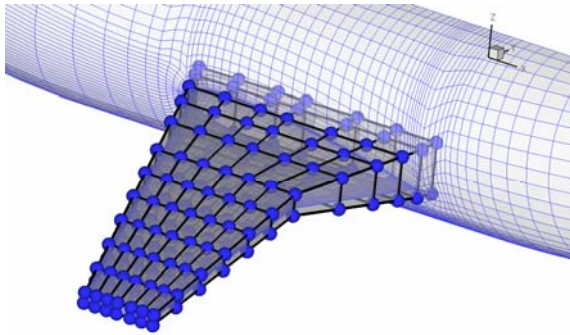


Bild 34: Parametrisierung des F6-Flügels mittels Freiformdeformation, Box mit 84 Knotenpaaren

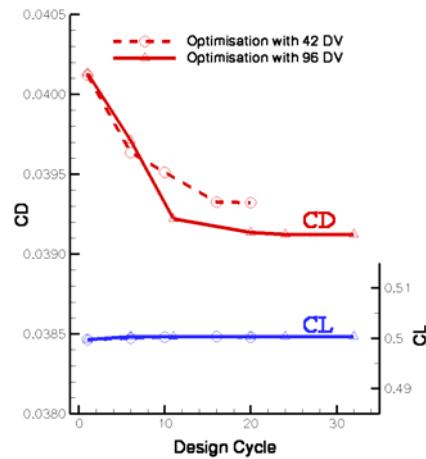


Bild 35: Widerstandsoptimierung, DLR-F6-Flügel-Rumpf-Konfiguration

Als Ergebnis der Optimierung konnte gezeigt werden, dass mit der optimierten Geometrie im Vergleich zur Ausgangsgeometrie die Ablösung am Flügel-Rumpf-Übergang erheblich reduziert wurde (Bild 36).

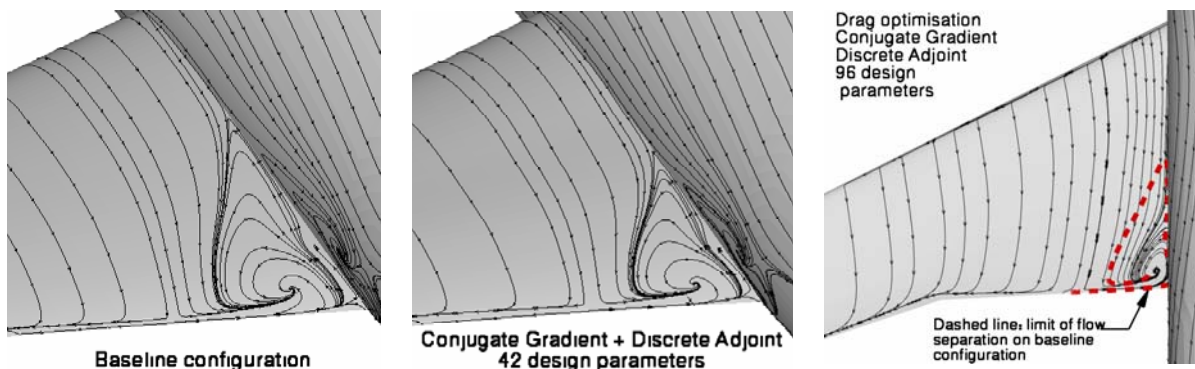


Bild 36: Ablösegebiete vor und nach der Optimierung mit 42 bzw. 96 Entwurfsparametern

Um den Einfluss der Anzahl der Entwurfparameter zu untersuchen, wurde zusätzlich eine ähnliche Optimierung mit nur 9 Entwurfparametern durchgeführt. Als Optimierungsmethode wurde hier die Subplex-Strategie verwendet. Mit der geringen Zahl der Entwurfparameter war man nicht in der Lage, die Ablösung so stark wie mit 42 bzw. 96 Entwurfparametern zu vermindern. Entsprechend fiel die Widerstandsreduktion deutlich geringer aus (1.4 drag counts).

Der letzte Anwendungsfall betrifft die Positionsoptimierung der Vorder- und Hinterkantenklappe der DLR-F11-Flügel-Rumpf-Hochauftriebskonfiguration im Startfall. Das Ziel der Optimierung ist es, die Startleistung bei vorgegebenem Auftrieb zu maximieren und den Anstellwinkel konstant zu halten. Die Flugbedingungen sind  $M=0.1715$  und  $Re=14.7 \times 10^6$ . Als Entwurfparameter wurden die Positionen und die Winkel der Vorder- und Hinterkantenklappe gewählt, insgesamt also 6 Parameter. Es wurde ein strukturiertes Netz mit etwa 2.5 Millionen Netzpunkten verwendet, welches mit dem Netzgenerator ICEM-CFD erzeugt wurde. Bei der Netzgenerierung wurde insbesondere Wert auf eine hohe Auflösung der Grenzschichten und der Klappen- und Flügelnachläufe bei einer möglichst geringen Punktzahl gelegt. Es wurde ein ICEM-Makro entwickelt, das in jedem Optimierungsschritt die Verschneidungen der Vorder- und Hinterkante mit dem Rumpf aktualisiert und das Rechnetnetz entsprechend der neuen Klappenpositionen modifiziert. Die strukturierten Netze werden dann in ein für den TAU-Code kompatibles Format konvertiert. Bild 38 zeigt den Verlauf der Zielfunktion ( $C_L^3/C_D^2$ ) und des Auftriebsbeiwertes während der Optimierung. Es wurde die NLPQLP Optimierungsstrategie von Schittkowski benutzt. Nach 12 Zyklen liegt ein konvergentes Ergebnis vor. Dies entspricht 13 Strömungsauswertungen und 2x12 Adjungierten-Rechnungen (für Zielfunktion und Auftrieb). Der Auftrieb wird wie gefordert konstant gehalten.

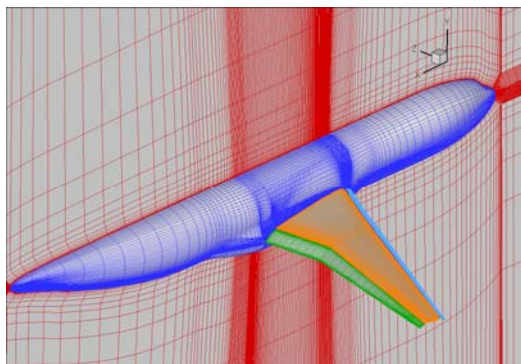


Bild 37: Strukturiertes Netz um die DLR-F11-Start-Konfiguration

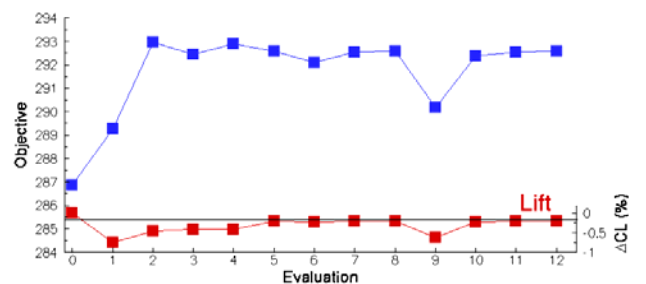


Bild 38: Verlauf der Zielfunktion für die DLR-F11-Start-Konfiguration, Positionsoptimierung der Vorder- und Hinterkantenklappe

Die Optimierung wurde auf einem Linux-Cluster mit 32 Prozessoren (AMD Opteron 2,4 GHz) durchgeführt. Die gesamte Laufzeit betrug ca. 3 Tage. Als Vergleich wurde eine zweite Optimierung auf der Basis eines evolutionären Optimierungsalgorithmus durchgeführt. Der beste Entwurf zeigte etwa die gleiche Leistungssteigerung, aber mit einem um zwei Größenordnungen höheren Aufwand. Dies verdeutlicht die hohe Effizienz des Adjungierten-Verfahrens für dreidimensionale Optimierungen.

Mit der Optimierung der dreidimensionalen Hochauftriebskonfiguration wurde der Hauptmeilenstein M5.1 des Gesamtvorhabens „Demonstration der Optimierung einer 3D-Hochauftriebs-konfiguration innerhalb von 2 Wochen“ erreicht.



### 7.4.3 AP 5500 Best Practice

Das DLR hat für die folgenden Szenarien Best-Practice-Richtlinien erarbeitet:

- Nutzung der zielorientierten Adaption
- Bestimmung einer diskreten adjungierten Lösung in TAU
- Gradientenbasierte Optimierung auf der Basis des Adjungierten-Verfahrens zur Ermittlung der Sensitivitäten

Die Best-Practice-Richtlinien sind in [21] dokumentiert. Der Bericht gibt einen detaillierten Überblick über die Nutzung des Adjungierten-Verfahrens und deren Anwendung bei zielorientierter Netzadaption und numerischen Optimierung.

Der Meilenstein M5 „Best Practice Richtlinien für MEGAFLOW-Software verfügbar“ wurde erreicht.

## 8. Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Verfügbarkeit von leistungsfähigen Simulations- und Entwurfsverfahren nimmt eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung neuer und der Verbesserung bestehender Flugzeuge ein. Das Verbundvorhaben MEGADESIGN hat in entscheidender Weise dazu beigetragen, die Fähigkeiten der deutschen Luftfahrtindustrie auf dem Gebiet der numerischen Strömungssimulation weiter auszubauen und somit mittelfristig eine wesentliche Voraussetzung für ihre Wettbewerbsfähigkeit zu schaffen. Damit geht unmittelbar die Sicherung und Stärkung der darauf bezogenen Forschungsaktivitäten im DLR einher.

Die erzielten Projektergebnisse, aber insbesondere auch die Federführung in einem kompetenten Netzwerk aus Industrie, spezialisierten Softwarehäusern und mehreren Hochschulen, haben die führende Position des DLR in der Verfahrensentwicklung national und international entscheidend gestärkt. So war das MEGADESIGN-Vorhaben ein wesentlicher Baustein für die Einrichtung des vom DLR, Airbus und dem Land Niedersachsen finanzierten Kompetenzzentrums C<sup>2</sup>A<sup>2</sup>S<sup>2</sup>E für multidisziplinäre flugphysikalische Simulationen. Aufgabe dieses Zentrums ist es, Prozesse, Methoden und numerische Verfahren so weit zu entwickeln, dass sie eine hochgenaue Simulation des fliegenden Flugzeugs im gesamten Flugbereich unter Berücksichtigung aller beteiligten Kerndisziplinen im industriellen Entwicklungsalltag ermöglichen. Die Basissoftware wird das in den Lufo-Vorhaben MEGAFLOW und MEGADESIGN entwickelte Strömungsverfahren TAU sein.

Da numerische Optimierungsmethoden mit leistungsstarken Strömungslösern und innovativen Optimierungsstrategien für viele technische Fragestellungen immer mehr an Bedeutung gewinnen, beabsichtigt das DLR mittel- bis langfristig, die durch MEGADESIGN verbesserten numerischen Entwurfs- und Berechnungsverfahren auch auf andere, luftfahrtnahe sowie luftfahrtfremde Problemstellungen zu übertragen.

## 9. Relevante Veröffentlichungen und Tagungsberichte

Im Rahmen der Projektlaufzeit wurden die folgenden Veröffentlichungen und Tagungsberichte angefertigt:

- Übersichtsartikel: [6],[7],[8]
- Fachbeiträge: [10],[11],[12],[13],[14],[15],[16],[17],[18],[19],[20],[21]

Das Projektkonsortium hat beschlossen, unter der Federführung des DLR die technischen Beiträge und Ergebnisse der Partner als Springer-Buch in der Reihe „Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design“ zu veröffentlichen. Die Erstellung der Berichte



ist in Arbeit.

## 10. Erfindungen und Schutzrechte

In Verbindung mit dem MEGADESIGN-Projekt „Koordination von und Beiträge zur Weiterentwicklung von Simulations- und Optimierungsverfahren für den aerodynamischen Flugzeugentwurf“ wurden seitens des DLR weder Erfindungen gemacht noch Schutzrechte angemeldet. Dem DLR wurden keinerlei Schutzrechte erteilt.

## 11. Literatur

- [1] Vorhabensbeschreibung des Verbundvorhabens MEGADESIGN, April 2003
- [2] Vorhabensbeschreibung des DLR-Teilvorhabens MEGADESIGN, April 2003
- [3] Kroll, N., Rossow, C. C., Becker, K., Thiele, F.: The MEGAFLOW Project, Aerospace Science Technology, Vol. 4, pp 223-237, 2000.
- [4] Kroll, N., Rossow, C. C., Schwamborn, D., Becker, K., Heller, G.: MEGAFLOW – A Numerical Flow Simulation Tool for Transport Aircraft Design, 23rd ICAS Congress, paper 2002-1.10.5, Toronto, 2002.
- [5] Kroll, N. Fassbender, J.: MEGAFLOW – An Industrial Flow Simulation Tool for Aircraft Applications. Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Vol 21, 21-28, Springer Verlag, 2001.
- [6] Kroll, N., Gauger, N., et al.: Flow Simulation and Shape Optimization for Aircraft Design, Journal of Computational and Applied Mathematics, 203, pp 397-411, 2007.
- [7] Kroll, N.; Gauger, N.; Brezillon, J.; Becker, K.; Schulz, V.: Ongoing Activities in Shape Optimization within the German Project MEGADESIGN, ECCOMAS, 2004.
- [8] Kroll, N.; Becker, K.; Rieger, H. Tiele, F.: Ongoing Activities in Shape Optimization with the German Project MEGADESIGN, ICAS-2006-3.11.1, 2006.
- [9] Venditti, D.A.; Darmofal, D.L.: Grid Adaptation for Functional Outputs: Application to Two-Dimensional Inviscid Flows, Journal of Computational Physics, Vol 176, pp 40-69, 2002.
- [10] Vollmer, D.: Using the Adjoint Formulation for Target Functional-Based Mesh Adaptation, DLR-IB 124-2007/1, 2007.
- [11] Dwight, R.P., Brezillon, J. “Effect of Various Approximations of the Discrete Adjoint on Gradient-Based Optimization”, AIAA 2006-690, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2006.
- [12] Dwight, R.P., Brezillon, J.; Vollmer, D.: Efficient Algorithms for the Adjoint Compressible Navier-Stokes Equations with Applications, ODAS Conference 2006, Toulouse France, 2006.
- [13] Dwight, R.P., Brezillon, J. Adjoint Algorithms for the Optimization of 3d Turbulent Configurations, In: Tropea, C.; Jakirlic, S. [Hrsg.]: Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 96, Springer, STAB 2006, 2006.
- [14] Jester-Zürker, R., Jakirlic, S., Eisfeld, B.: Near-Wall, Reynolds-Stress Model Calculations of Transonic Flow Configurations Relevant to Aircraft Aerodynamics, In: Lajos, T., Vad, J.: Proceedings of the Conference on Modelling Fluid Flow, Budapest, 6.-9.9.2006, pp. 264 – 271, ISBN 963 420 872 X, 2006.
- [15] Jakirlic, S., Eisfeld, B., Jester-Zürker, R., Kroll, N.: Near-wall, Reynolds-stress model calculations of transonic flow configurations relevant to aircraft aerodynamics, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, pp. 602-615, 2007.



- [16] Gherman, I., Hazra, S., Schulz, V., Brezillon, J., Gauger, N.: Efficient Methods for Aerodynamic Shape Optimization", Workshop on Numerical Techniques for Optimization Problems with PDE Constraints, Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach, Tagungsbericht 11/2006, pp. 608-610, 2006.
- [17] Hazra, S., Schulz, V., Brezillon, J., Gauger, N.: Aerodynamic Shape Optimization Using Simultaneous Pseudo-Timestepping, Journal of Computational Physics, Vol. 204, No. 1, pp. 46-64, 2005.
- [18] Hazra, S., Gauger, N.: Simultaneous Pseudo-Timestepping for Aerodynamic Shape Optimization, Proc. Appl. Math. Mech., Vol. 5, pp. 743-744, 2005.
- [19] Widhalm, M.; Ronzheimer, A.; Hepperle, M.: Comparison between Gradient-free and Adjoint Based Optimization of a Flying Wing Transport Aircraft in the Preliminary Design, AIAA-2007-4060, Miami, USA, 2007.
- [20] Brezillon, J., Wild, J.: Evaluation of different optimization strategies for the design of a high-lift flap device, EUROGEN 2005, Munich, 2005.
- [21] Brezillon, J., Dwight, R., Vollmer, D.: MEGADESIGN Best Practice Guidelines – DLR Contribution, MEGADESIGN Report.