

VERGLEICH VON FSI METHODEN KOMMERZIELLER INTEGRATIVER PROGRAMME GEGENÜBER INKONSISTENTEN LÖSUNGEN AM BEISPIEL EINES SCHUBUMKEHRERS IM FLUG-TRIEBWERK

D. Grasselt, Prof. Dr.-Ing. K. Höschler

BTU Cottbus-Senftenberg, Siemens-Halske-Ring 14, 03046 Cottbus, Deutschland

Zusammenfassung

Diese Veröffentlichung gibt einen Überblick zum Stand der Technik hinsichtlich prinzipieller Herangehensweisen zur Lösung eines Fluid-Struktur Interaktion (FSI) Problems. Eine Gliederung in verschiedene Bereiche der FSI sowie der FSI- Parameter werden erklärt. Die Motivation zur Anwendung einer bidirektionalen FSI für Schubumkehrer wird verdeutlicht, dabei spielen vor allem Gewicht und Wirkungsgrad eine wichtige Rolle. Aus Anwendersicht werden verschiedene FSI Methoden und deren Vorteile besprochen und Faktoren zur Entscheidung für eine Methode in einem Projekt, sowie der Qualitätskonflikt angesprochen. Ein kurzer historischer Abriss zur Entwicklung zu den modernen Lösungen gibt Aufschluss über die aktuelle Situation und Entwicklungstendenzen, insbesondere hinsichtlich iterativer und monolithischer Verfahren. Dabei werden Begriffe, Voraussetzungen für bestimmte Methoden und Herangehensweisen besprochen, Schwachstellen und Stärken werden beschrieben. Die Unterschiede und Ähnlichkeiten inkonsistenter zu integrativen Methoden werden aufgezeigt. Insbesondere transiente Problemstellungen empfehlen sich dabei in einer integrativen, besser monolithischen Entwicklungsumgebung umzusetzen. Dabei ist die Stärke der physikalischen FSI Kopplung von entscheidender Bedeutung. Eines der Kernthemen sind die Folgen hinsichtlich Arbeitsaufwand, Flexibilität, Qualität bzw. Genauigkeit der Ergebnisse in Verbindung mit Rechenzeitbedarf, und Anwendbarkeit. Das Schrifttum richtet sich primär an Benutzer und Programmierer, es informiert und motiviert zur aktiven Einflussnahme bei der Auswahl für eine Lösungsstrategie für FSI Probleme mit großen Verformungen. Tendenziell sind, nach Stand der Technik, inkonsistente Methoden aufgrund der Auswahl effizienterer Tools die besseren Lösungen, wengleich die Visualisierung in integrierten Lösungen i.d.R. besser realisiert ist. Haupteinflussgrößen sind hierbei Personalbedarf, Qualität der FSI-Lösung und Anwenderfreundlichkeit sowie Lizenzkosten.

1. MOTIVATION

Die numerische Auflösung physikalischer Analysen steigt zusehends. Motiviert durch immer leistungsfähigere und vor allem skalierbare Hardware drängen auch Softwareentwickler und Wissenschaftler zu neuen Analysemöglichkeiten vor. Wissenschaftler in Forschungseinrichtungen und Unternehmen konzentrieren sich dabei in der Regel auf eine höhere Detailtiefe der physikalischen Abbildung der Realität, wohingegen Softwarehersteller damit konfrontiert werden, die Kundenwünsche so umzusetzen, dass sie effizient und skalierbar sind.

Als Skalierbarkeit wird die Fähigkeit eines Systems bezeichnet, sich wachsenden Ansprüchen an die Leistungsfähigkeit anzupassen. Dabei können Systeme sowohl auf Hardware- als auch auf Softwareebene skaliert werden [1]. Ein System kann zum Beispiel skaliert werden, indem zusätzliche Hardware hinzugefügt oder die vorhandene Hardware aktualisiert wird, ohne dass Änderungen an der Anwendung selbst vorgenommen werden müssen [2].

Die Konsequenz dieser steigenden Auflösung physikalischer Problemstellungen ist unter anderem das Vordringen in das Themenfeld der numerischen Fluid-Struktur Interaktion (FSI) seit der Jahrtausendwende [3][4]. Bei der FSI ist die Hauptintention multiphysikalische Problemstellungen in den Bereichen Strukturmechanik und Strömungsmechanik zu koppeln und zu lösen.

Das Themenfeld FSI wird abhängig von der erforderlichen Kopplungstiefe und -richtung unterteilt in unidirektionalen oder bidirektionalen Anwendungen. Eine unidirektionale FSI liegt vor, wenn entweder

1) strömungsmechanische Kräfte einen Einfluss auf die strukturellen Bauteile nehmen, (z.B. Druckspeicher)

oder

2) strukturelle Bauteile über eine vorgegebene Verstellung Einfluss auf die Strömung nehmen. (z.B. Ventil)

Oft sind FSI Untersuchungen lediglich unidirektional notwendig, da der Einfluss z.B. struktureller Änderungen auf die Strömung so gering ausfällt das andere Faktoren eine wichtigere Rolle einnehmen.

Bei einer bidirektionalen FSI müssen beide Effekte voneinander abhängig sein. Ein Beispiel für ein bidirektionales FSI Problem ist eine druckabhängige Ventilkappenstellung, bei der die Ventilstellung und der daraus folgende Durchfluss von den strömungsmechanischen Kräften, dem Luftdruck der Strömung die durch das Ventil fließt, selbst abhängen.

Weiterhin kann unterschieden werden in Methoden die im Frequenzbereich (z.B. aerodynamische Dämpfung oder Anregung) und Methoden welche im Zeitbereich angewendet werden können (z.B. aero-elastisches Gleichgewicht). Im Frequenzbereich werden oft dynamische Lastanteile mit eher geringen Verformungamplituden ermittelt, wohingegen im Zeitbereich statische Lasten und mäßige bis hohe Verformungen eine Rolle spielen. In der Luftfahrt haben beide Anteile einen hohen Stellenwert z.B. bei der Berechnung der Lebensdauer ermüdungsgefährdeter Bauteile.

In diesem Paper sollen ausschließlich bidirektionale Methoden im Zeitbereich betrachtet werden. Flug-Triebwerke bieten u.a. mit dem Schubumkehrsystem Bauteile die einer solchen Analyse unterzogen werden können.

Eine physikalische Situation, wie sie in einem Schubumkehrer vorkommt, ist in Bild 1 dargestellt. Das Fluid strömt durch den Nebenstromkanal und wird am Ende des Kanals durch Blockadetüren und das Schaufelgitter (Kaskaden) umgelenkt. Die Strömung wird um ca. 130° umgelenkt und erzeugt damit eine Kraft entgegen der Rollrichtung des Flugzeugs.

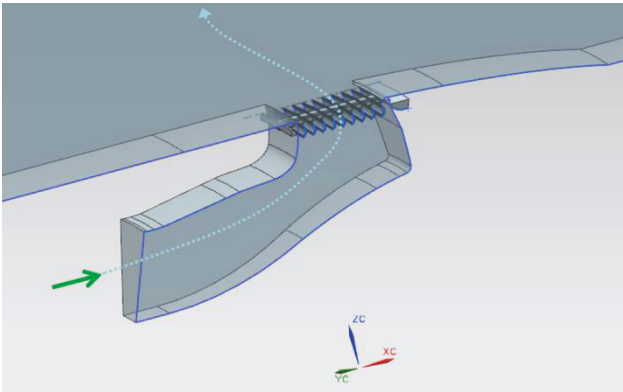


BILD 1. Segment eines Kaskaden Schubumkehrers

Das strömende Fluid wird durch die Blockadetür am Ende des Nebenstromkanals in Richtung Kaskaden gelenkt. Die Kaskaden verbessern den Umlenkgrad und nehmen einen Großteil der aerodynamischen Last auf, siehe Bild 2.

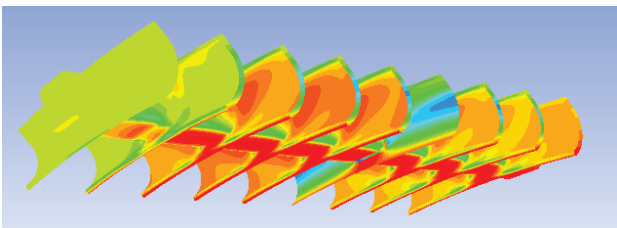


BILD 2. Druckverteilung auf den Kaskaden

Ein Schubumkehrer ist ein aktives, aerodynamisches System zur Verzögerung eines strahlgetriebenen Flugzeugs. Diese zusätzliche Bremsleistung, die durch dieses System zur Verfügung gestellt wird, reduziert die Belastung der mechanischen Bremsen in den Fahrwerken enorm. Ein Schubumkehrer stellt, neben den Bremsklappen, ein inzwischen zum Standard gehörendes System dar – Sie stellen ihre Effizienz vor allem im Geschwindigkeitsbereich oberhalb 60 Knoten unter Beweis, in welchem mechanische Bremsen sonst nur unter erhöhtem Verschleiß eine entsprechende Verzögerung realisieren können [5]. Schubumkehrer liefern – bei einem normalen Landevorgang und in Abhängigkeit von Nebenstromverhältnis, Drehzahl und Umlenkgrad – ca. 25% der gesamten Bremskraft eines Flugzeugs und damit mehr als die Hälfte der Bremskraft der aktiven Systeme (mechanische Bremse und Schubumkehrer) [6].

Ob das Design eines Schubumkehrers effizient ist, hängt maßgeblich vom Umlenkgrad ab. Bei einer solchen Anwendung ist es also wichtig dass die Aerodynamik dieses Systems klar verstanden und zuverlässig ist.

Verformte Leitbleche oder Blockadetüren könnten eine veränderte Strömungsform hervorrufen und die Effizienz als auch die zur Verfügung stehende Bremskraft beeinflussen. Die Belastung dieser Bauteile ist hauptsächlich durch die aerodynamischen Kräfte gegeben. Im Falle der A320-200 mit CFM 56 Triebwerken sind Bremskräfte in der Größenordnung 60kN [6] durch die Schubumkehrer aufzubringen.

Eine mögliche Anwendung einer FSI Berechnungskette wäre die Optimierung der Schubumkehrer Geometrie in Form der Schaufelauslegung. Hier könnte die Form der Schaufeln verbessert aber auch die Masse der Schaufeln verringert werden [7].

In diesem Paper soll aus Anwendersicht darauf eingegangen werden, welche Möglichkeiten existieren um bidirektionale FSI zu realisieren, worin die jeweiligen Vorteile liegen und welche Faktoren zur Entscheidung für eine Methode beitragen können.

2. STRATEGIEN

Bis vor ca. fünf Jahren gab es in gängiger kommerzieller, akademischer oder quelloffener Software keine komplett in sich abgeschlossene Methodik zur Berechnung von uni- oder bidirektional gekoppelten FSI Phänomenen. Die Konsequenz war zunächst die Verwendung eigener, meist inkonsistenter, Lösungen. Das ist eine Kombination von unabhängiger Berechnungssoftware für Finite Elemente Methode (FEM) und numerische Strömungsmechanik (CFD). Von Inkonsistenz wird gesprochen, wenn Programme verwendet werden, die nicht direkt miteinander kommunizieren können und deshalb eines wesentlichen Programmieraufwand hinsichtlich der Kopplung bedürfen. Problematisch ist hier vor allem die Behandlung von Schnittstellen mit meist universellen Formaten, bei denen Informationen verloren gehen können. Die Berechnungsanwendungen werden durch den Benutzer mittels selbst programmierter Kopplungssoftware oder -skripten verknüpft, um eine gekoppelte Lösung erzielen zu können. Darüber hinaus ist dieser Ansatz nur bei Vorhandensein von softwareseitigen Schnittstellen überhaupt möglich.

Bei der Verwendung eines integrierten Ansatzes, bestehen weitere Möglichkeiten zur Lösung zu gelangen. Ein integrierter FSI Ansatz ist möglich, sofern die notwendigen Werkzeuge in einer Arbeitsumgebung vorhanden sind und vor allem die Verknüpfung intuitiv, z.B. per Drag & Drop, ohne größeren Programmieraufwand und entsprechende Kenntnisse, möglich ist. Die Möglichkeiten welche zur Lösung von FSI Problemen in integrativen Ansätzen geboten werden sind zum einen die iterative Kopplung und zum anderen die direkte Lösung. Direkte Ansätze werden in speziellen Fällen auch als monolithisch bezeichnet, sofern das Diskretisierungsschema in beiden Bereichen identisch ist.

Bei einem iterativ integrierten Ansatz ist die Herangehensweise ähnlich der in inkonsistenten Lösungsansätzen: Einzelkomponenten werden separat aufgestellt und die Randbedingungen der einen Komponente (z.B. Kraft auf einer Fläche (FEM)) ermittelt sich aus der Lösung der zweiten Komponente (z.B. Totaldruck der Strömung (CFD)). Unter Iteration ist hier der Zeitraum zwischen zwei Punkten gemeint, an denen

Informationen zwischen den beiden beteiligten Lösern ausgetauscht werden. Zu einer Iteration gehört dabei der Datentransfer in beide Richtungen, d.h. zumeist dass:

- zunächst ein Lösungsalgorithmus konvergieren muss (z.B. CFD),
- dann der Datenaustausch von Löser 1 zu Löser 2 stattfindet,
- womit die Randbedingungen für den Löser 2 vervollständigt und das Problem gelöst werden kann,
- und schließlich die Randbedingungen für Löser 1 aus den Ergebnissen von Löser 2 extrahiert werden können.

Meist ist die Lösung des ersten Teilsystems nur unzureichend, da die physikalisch korrekten Randbedingungen zum Kopplungsstart noch nicht zur Verfügung stehen, siehe hierzu Bild 3 [8], weshalb mindestens zwei Iterationen notwendig sind.

Iteration	Type	Visualization	Variable	Result
0	-		-	$\sigma=0; \epsilon=0$
a ₁) 1	CFD		-	$\sigma=\sigma_i(S_i); \epsilon=0$
b) 1	FEA		Load	$\sigma=\sigma_i; \epsilon=\epsilon_i$
a ₂) 2	CFD		Geometry	$\sigma=\sigma_{i+1}; \epsilon=\epsilon_i$
2	FEA		Load	$\sigma=\sigma_{i+1}; \epsilon=\epsilon_{i+1}$

a:

Transformation: Load from CFD to FE
 $a_1: [CFD_i] \implies [FE_i]$
 $a_2: [CFD_i] \implies [FE_{i+1}]$

b:

Transformation: Displ. from FEA to CFD
 $[FE_i] \implies [CFD_{i+1}]$

BILD 3. Beispielhafter FSI Parameter Austausch [8]

Zu erkennen ist, dass in Iteration 1 (CFD) das Verschiebungsfeld für die erste strömungsmechanische Analyse nicht bekannt ist, da es erst in der strukturellen Analyse ermittelt werden kann. Daher werden in diesem Fall zu hohe resultierende Druckkräfte ermittelt und auf die strukturellen Bauteile übertragen. Die Antwort der strukturellen Analyse wird ebenfalls übermäßig sein. Die Konsequenz dieses Verhaltens lässt sich in Bild 4 erkennen. Eine detaillierte Beschreibung zur Herangehensweise eines inkonsistenten Ansatzes wird in [8] geschildert.

Eine charakteristische Eigenschaft eines schwach gekoppelten Berechnungssystems ist das Einschwingen aus der Ausgangslage in eine Gleichgewichtslage, dem aeroelastischen Gleichgewicht. Dem Gleichgewicht zwischen aerodynamischer Last und elastischer Verformung bzw. der Widerstandsfähigkeit des Materials. Die Last nimmt aufgrund der neuen Lage nach Iteration 1 bzw. in Situation 1 ab, wohingegen die Verformung im Gegensatz zur unbelasteten Situation zunimmt. Da die Last zunächst deutlich höher ist, verursacht durch das aerodynamische Problem in der Ausgangslage, fällt die Verformung erhöht aus. Die nun verformte Struktur verursacht im nächsten Kopplungsschritt eine Last die geringer ist als die Last in der Gleichgewichtslage. Je nach Anwendungsfall kann dieser Vorgang auch ein instabiles Verhalten dieser Methode hervorrufen. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass das Überschwingen der Last verursachen kann, dass die Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber plastischer Verformung bereits in

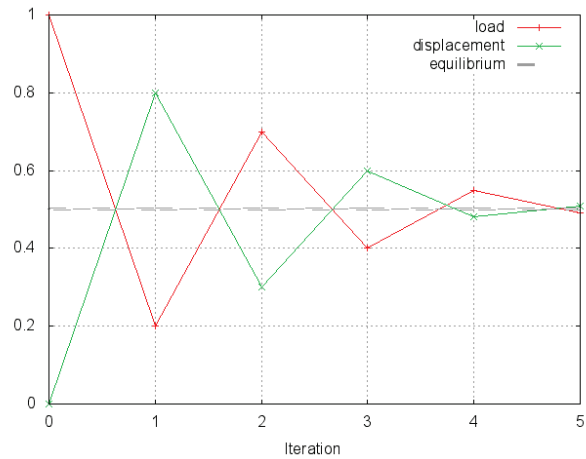


BILD 4. Iteration – Last – Verschiebung – Diagramm für einen iterativen Löser (schwache Kopplung)

der ersten Iteration vollständig aufgebraucht wird. Das Resultat wäre ein plastisch deformiertes Modell das dem eigentlichen physikalischen Problem nicht entspricht. Da die CFD sich aber nicht am Verhalten im inneren des Materials orientiert, sondern allein an der Form der Struktur, kann dies in der Regel in der Folgeiteration ausgeglichen werden. Sollte die Geometrie noch valide sein, also einem realistischen CAD Modell entsprechen und vernetzbar sein, wird in der Folgeiteration die berechnete Last sinken. Mit abnehmender Last wird auch das strukturelle Problem wieder einer mäßigen Verformung unterliegen. Prinzipiell lassen sich hier zwei Möglichkeiten des Modellneuaufbaus realisieren: eine Netz-Adaption oder ein Netzneuaufbau aus einem adaptierten CAD Modell [8]. Bei der ersten Variante stehen die Methode der transfiniten Interpolation bzw. die Pseudo-Struktur Methode zur Verfügung. Bei der Pseudo-Struktur Methode wird das Netz wie eine elastische Struktur behandelt, die Verschiebung der Koppelknoten sind durch die Antwort der physikalischen Struktur vorgegeben [16]. Die Pseudo-Struktur-Methode benötigt dazu bis zu 20% der Rechenzeit der gesamten FSI, wohingegen die Methode der transfiniten Interpolation weniger als ein Prozent benötigt, aber bei sehr großen Verschiebungen unbrauchbare Netze liefert [16].

Zu erkennen ist, dass sich mit einer inkonsistenten Methodik transiente Vorgänge nicht ad hoc korrekt abbilden lassen. Durch das Aufsetzen von kompakteren abgeschlossenen Problemen, also separaten Lösern, lässt sich aber der Berechnungsaufwand durch Reduzierung der Größe der zu lösenden Gleichungssysteme verringern. Es lässt sich innerhalb weniger Iterationen eine Lösung in der Gleichgewichtslage erzielen. Auch ist die Angabe von Zeitschrittweiten im Gegensatz zur transienten Analyse oder direkten Lösung nicht notwendig. Nichtsdestotrotz lassen sich auf diese Weise transiente Probleme lösen: Voraussetzung ist eine möglichst gute Startlösung in jedem Zeitschritt durch Überführung der Lösung aus dem vorhergehenden Zeitschritt.

Bei der direkten Lösung eines bidirektional gekoppelten Problems werden die Gleichungssysteme zusammengeführt und für alle Unbekannten gleichzeitig gelöst. Die Verknüpfung kann implizit über Kopplungsbedingungen integriert werden [9]. Bild 5 zeigt hierzu den prinzipiellen Verlauf der Einflussgrößen analog zu der vorherigen Abbildung.

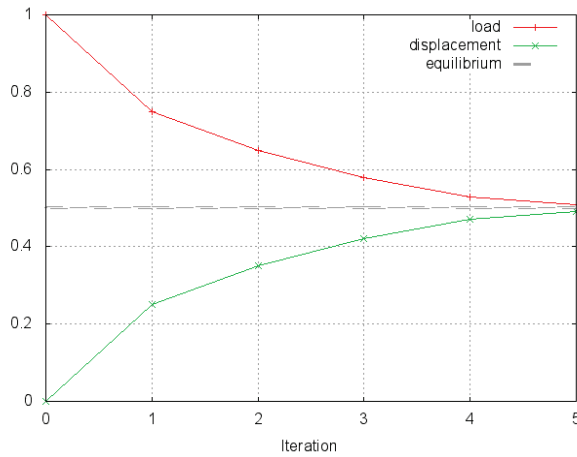


BILD 5. Iteration – Last – Verschiebung – Diagramm für einen direkten Löser (starke Kopplung)

Uni- und bidirektionale Methoden werden seit ca. 6 Jahren durch akademische [8], kommerzielle (ANSYS, COMSOL, MSC) oder quelloffene (OPENFOAM) Produkte integriert angewendet. Dennoch gibt es Gründe, die eine integrierte Gesamtlösung für eine spezielle Anwendung unattraktiv und eine inkonsistente Lösung wünschenswert machen. Prinzipiell haben beide Lösungen ihre Berechtigung.

2.1. Ursachen

Soll man sich nun für eine der Methoden zur Berechnung eines FSI Problems entscheiden, sind unterschiedlichste Einflüssen zu betrachten und zu hinterfragen. Es kann nicht per se eine der Methoden:

- Inkonsistent iterativ
- Integriert iterativ
- Integriert direkt

als die bessere deklariert werden. Mögliche projektbezogene Ursachen sich für eine der Methoden zu entscheiden könnten sein:

- Eigene Interessen,
- Interessen von Projektpartnern,
- Industrielle Standards,
- Rechenkapazitäten und Lizenzkosten,
- Support.

Eigene Interessen, welche die Entscheidungsfindung beeinflussen können, sind das Steuern der kurzfristigen Kosten z.B. durch Personal oder Lizenzkosten; langfristiger Kosten; Aneignung von Know-How; Return-on-Invest; und ein möglicherweise begrenzter zeitlicher oder umfangsbezogener Zugriff auf Soft- und Hardware.

Die Wahrung von Rechten, die Reduzierung der Kosten oder das sichere Erreichen von Zielen könnten beispielsweise Interessen von Projektpartnern sein.

Industrielle Standards sind ebenfalls häufig ausschlaggebend für das Verwenden von speziellen Tools. Dabei ist auf die oftmals zu validierenden Berechnungsmethoden in behördlichen Zulassungsprogrammen und das Entstehen von Kosten bei der Nachweisführung neuer Methoden hinzuweisen.

Der Rechenaufwand kann je nach Herangehensweise (größere Gleichungssysteme bei direkten Lösern) und verwendeten Tools variieren. Abhängig von der Verwendung von z.B. open-source oder kommerziellen Lösern kann auch hinsichtlich der Lizenzkosten ein stattlicher Kostenfaktor entstehen.

Das Bereitstellen von Anwenderhilfen, Anleitungen und Fehlerbeseitigung ist ebenfalls ein zu bedenkender Faktor. Das Erstellen, Verwalten und Weiterentwickeln von Softwarepaketen, Tutorials und Dokumentationen ist personalintensiv und wichtig für eine gute Anwendbarkeit.

Es gibt diverse Einflussgrößen, die die Entscheidung zu einer der Herangehensweisen lenken können. Oft sind die Randbedingungen wichtiger als die Qualität der eigentlichen Berechnungsmethodik [10]. Grund dafür kann sein, dass die Ziele nur kurzfristig gesetzt sind und die Erarbeitung einer Methode nur der Lösung eines Problems, statt einer Reihe von Problemen gewidmet ist. Ein gewisser Spielraum für die Berücksichtigung von Einflussgrößen besteht meist dennoch.

2.2. Folgen

Ist die Entscheidung zu Gunsten einer Methode gefallen müssen die Konsequenzen bezüglich des weiteren Vorgehens beachtet werden. Im nachfolgenden soll zusammengefasst werden, worin die Vorteile der einzelnen Herangehensweisen bestehen. Dabei ist zu beachten, dass eine stete Weiterentwicklung der Methoden stattfindet und die Aussagen, die hier getätigt werden, den Stand der Technik darstellen.

Prinzipiell ist eine Automatisierung in allen der oben genannten Möglichkeiten durchführbar. Der Aufwand ist allerdings im Falle einer inkonsistenten Herangehensweise vielfach größer, da meist alle Schnittstellen-Konvertierungen selbst zur Verfügung gestellt werden müssen. Hingegen sind integrierte Lösungen oft einfacher zusammenzustellen. Moderne kommerzielle Anwendungen bieten die Möglichkeit per Drag & Drop die Einzelsysteme wie Strukturmechanik Tool und Strömungsmechanik Tool zum Projekt hinzuzufügen und zu verknüpfen. Die eigentliche Kopplung erfolgt dann in der Regel vollautomatisiert.

Allerdings führt das auch dazu, dass man die Kenntnis über die tatsächlichen Vorgänge die innerhalb des Programms ablaufen nicht mehr hat. Sollte es zu Problemen im Bereich der Kopplung der Gleichungssysteme kommen, ist oft auch mit der Dokumentation der Theorie hinter der Anwendung nicht geholfen. Abhilfe kann dann meist nur noch der Support des Herstellers leisten. In diesen Fällen ist mehr Arbeits- und Zeitaufwand zu erwarten.

Ein zentraler und oft diskutierter Punkt ist die Flexibilität in der Auswahl der Tools. Dabei ist unter Flexibilität zu verstehen, dass zum einen man nicht an ein bestimmtes Werkzeug gebunden ist und dieses bei Nichtverfügbarkeit austauschen kann. Die Einschränkung durch mangelnde Verfügbarkeit kann durch nur temporäres zur Verfügung stellen durch z.B. den Projektpartner; Verkauf eines Produktes an einen anderen Hersteller und damit verbundene Änderungen am Produkt selbst; oder durch finanzielle Aspekte beeinflusst sein, wobei auch open-source Pakete inzwischen FSI ermöglichen. Weiterhin kann auf ohnehin schon hohe oder steigende Lizenzkosten reagiert werden. Eines der wichtigsten Gründe flexibel zu bleiben ist jedoch die Qualität der

Resultate einer Anwendung im Vergleich zum Aufwand, der investiert werden muss, um gute Ergebnisse zu erhalten. Es wird angestrebt, das optimale Tool für eine Spezialanwendung nutzen zu können.

Heute sind, historisch gewachsen, Tools für Spezialanwendungen auf dem Markt, welche mit weiteren Tools des Herstellers gekoppelt werden. Manchmal sind die Spezialtools selbst schon so speziell, dass sie noch nicht einmal für eine Gruppe von Berechnungsmethoden (z.B. Strukturmechanik allgemein) gültig sind. Dies ist in der Entstehung der Finite-Elemente-Methode und stetigen Verbesserung für bestimmte Anwendungen begründet. Deshalb sind heutzutage nur selten monolithische Ansätze zu finden, wie sie in [10] vorgestellt werden. Der aktuelle Standard sind deshalb gut (aber nicht perfekt) funktionierende Tools, die in einer gemeinsamen Umgebung eingebettet sind oder die Verknüpfung von sehr guten Tools mit hinzugekauften und in der Regel weniger guten Tools. Eine integrierte Lösung zu nutzen scheint daher stets ein Kompromiss zu sein. Bei der Geometriadaption hängt der Erfolg des Aufbaus einer neuen validen strömungsmechanischen Geometrie von einer geringen Verformung oder einem Ansatz hinsichtlich des flexiblen Neuaufbaus des Netzes ab. Integrierte Methoden nutzen meist einen Netzadaptionalgorithmus [16], welcher nur kleine bis moderate Verformungen zulässt. Inkonsistente Methoden können z.B. auch einen kompletten Geometrieneuaufbau beinhalten, was allerdings in puncto Neuvernetzung zeitaufwändiger ist.

In den Publikationen des letzten Jahrzehnts wird daher die Schlussfolgerung gezogen, dass inkonsistente bzw. partitionierte Analyse Techniken sich einer hohen Beliebtheit erfreuen, da sie überlegen gegenüber monolithischen Methoden seien [11]. Sie sollen es erlauben Spezialtools zu verwenden, welche signifikant effizienter sind und zudem besser konditioniert werden können als global aufgestellte Lösungsansätze [12]. Auch sei es schwierig, die Lösungsansätze in jedem Löser aktuell zu halten [13] und seien monolithische Ansätze nicht geeignet für großskalige Probleme [14]. Darüber hinaus bräuchten monolithische Ansätze vereinzelt Programmierungseingriffe und resultieren in weniger modularen Lösungen als es iterative (integrierte oder inkonsistente) Methoden würden [13]. Nachteile von Methoden mit separatem Löser für strukturmechanisches und strömungsmechanisches Problem werden gesehen in der Genauigkeit und der Stabilität [11].

In [10] werden obige Aussagen anhand eines Rechenbeispiels für ein flexibles Rohr teilweise widerlegt. So wird aufgezeigt, dass – für physikalisch schwach gekoppelte Probleme, also bei geringem gegenseitigem Einfluss, sowohl für integrativ direkte als auch inkonsistente oder iterativ integrative Methoden – ein ähnlicher Rechenaufwand benötigt wird. Für Probleme mit starker physikalischer FSI Kopplung wird gezeigt, dass unabhängig von der Größe des zu lösenden Problems, monolithische Löser sogar effizienter seien. Zur Charakterisierung des Einflusses einer physikalischen FSI bzw. der Einschätzung der Relevanz einer numerischen FSI kann dabei der FSI Parameter

$$(1) \quad Q = \frac{\mu U}{E_{eff} a} = \frac{\text{viskose Kräfte der Strömung}}{\text{Steifigkeit der Wand}}$$

hinzugezogen werden. Wobei μ die dynamische Viskosität, U die Strömungsgeschwindigkeit relativ zur Wand, E das Elastizitätsmodul und a die charakteristische

Länge sind. Probleme mit einer schwachen physikalischen FSI weisen dabei Werte auf die gegen Null gehen. Hinsichtlich der Konvergenzkriterien können dabei sowohl globale Residuen (Strömungsmechanik), als auch maximale Änderungen der Verschiebungen (Strukturmechanik) verwendet werden. Außerdem habe ein monolithisch diskretisiertes Problem die Möglichkeit von separaten Lösern behandelt zu werden und somit den Vorteil, sowohl gekoppelt als auch separat angewendet werden zu können, was andersherum nicht möglich sei.

Für transiente Probleme sei der Ansatz mit einem Löser pro physikalischem Teilgebiet fragil und müsse mittels Unter-Relaxation (UR) stark verzögert werden, um ein Versagen bei der Picarditeration, dem Datenaustausch, zu vermeiden. Zu schwache UR könnte Fehler in der Wandform zur Folge haben, wodurch zusätzliche Massenströme und damit große Druckschwankungen den Lösungsprozess instabil machen. Zu starke UR wiederum würde den Lösungsprozess zu stark ausbremsen und den Ansatz ineffizient machen. Selbst variable UR-Faktoren, wie aus der Irons & Tuck Methode bekannt, würden zu früheren oder späteren Zeitschritten versagen [10].

Direkte Löser seien insgesamt effizienter als getrennte iterative Methoden, jedoch sind die meisten Anwendungsfälle so aufwändig, dass sie mit einem monolithischen iterativen Ansatz gelöst werden müssten. In [10] wird daher vorgeschlagen, einen, zwar direkt gekoppelten, aber iterativen Ansatz zu wählen. Für eine iterative Lösung dieses monolithisch diskretisierten Problems könne ein lineares System durch einen Krylov Unterraum Löser mit Dreiecksmatrizen Annäherung der monolithischen Jacobi Matrix als Konditionierer effizient für transiente als auch statische Probleme angewendet werden [15]. Diese Möglichkeit der Verfahrensoptimierung kann dann mit einfach-physikalischen Lösungsmethoden angewendet und als FSI Konditionierung verwendet werden.

Aktuelle Untersuchungen mit kommerziellen, iterativ integrierten Methoden als auch Methoden akademisch inkonsistenten Ansatzes, unter zu Hilfenahme kommerzieller Spezialtools, zeigen, dass allein die Aufgabe des Koppelns der Teilgebiete vereinfacht wird. Wie bereits erwähnt, können Probleme bei der Umsetzung der Kopplung entstehen, die allein durch den Benutzer nicht ad hoc lösbar sind, da kein Zugriff auf den Quellcode vorhanden ist. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Geschwindigkeit der Datenübertragung, für das in der Einleitung geschilderte Problem im inkonsistenten Ansatz [8], ähnlich der im integrierten Ansatz war.

Konkret verglichen wurde die verbrauchte Zeit für den Datentransfer Strömungslöser zu Strukturlöser. Im inkonsistenten Fall wurden für das strömungsmechanische Teilmodell 943k Knoten benötigt und im strukturmechanischen Teilmodell 1.287k Knoten. Die beanspruchte Zeit betrug in diesem Fall 55 Minuten. Im integrativem Fall wurden für das strömungsmechanische Teilmodell 3441k Knoten benötigt und im strukturmechanischen Teilmodell 2797k Knoten. Die beanspruchte Zeit betrug in diesem Fall 420 Minuten. Korreliert man über die Anzahl der Zellen im System, so lässt sich für den zweiten Fall eine verbrauchte Zeit von 52 Minuten errechnen, welche ungefähr gleich auf liegt.

Die Frage warum für den integrativen Fall deutlich mehr Zellen für die jeweiligen Teilgebiete verwendet wurden, lässt sich damit beantworten, dass die verwendeten Löser

und damit ihre Input und Output-Dateien nicht frei gewählt werden konnten. Vielmehr konnten auch nicht unterschiedliche Vernetzer verwendet werden, die bei gleicher oder sogar besserer Qualität der Rechenetze deutlich weniger Knoten verlangt hätten.

Weiterhin konnte beobachtet werden, dass die Auswahl zyklischer Randbedingungen für die jeweiligen Teilgebiete eingeschränkt wurde, sobald von der Einzelsystembetrachtung zu einer FSI Kopplung übergegangen wurde. Dies konnte allerdings durch Zwangsbedingungen ausgeglichen werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der nicht außer Acht gelassen werden sollte, ist der Umgang mit neuen Tools und der Einsatz von Erfahrungen, die man bereits an bekannten Tools gesammelt hat. Die Zeit die beansprucht wird, um mit neuen Tools eine ähnliche Qualität zu erreichen, kann teilweise die Zeit erreichen, die gebraucht wird, um bekannte Tools miteinander zu koppeln. In beiden Fällen ist es i.d.R. notwendig neue Programmiersprachen zu erlernen. Die Erfahrungen, die zu diesem Punkt gesammelt wurden, lassen sich wie folgt zusammenfassen. Der Aufwand zur Programmierung aller Schnittstellen im Falle eines inkonsistenten aber mit bekannten Tools bestückten bidirektionalen FSI Systems umfasst ca. 9 Monate Arbeitszeit. Dabei muss berücksichtigt werden, dass zu lesende und schreibende Formate nicht kompatibel sind und die Genauigkeit gefährdet ist. Es muss versucht werden die Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen, indem die Werte aus der Lösung des einen Systems in ein möglichst kompatibles Format des anderen Systems überführt werden können. Im anderen Fall, bei der Verwendung eines integrierten Ansatzes, umfasst das Erlernen des Umgangs mit vorhandenen aber unbekanntem Schnittstellen ca. 3 Monate Arbeitszeit, hinzu kommt die Einarbeitungszeit für den Umgang mit neuer Software. Bei einem Bekanntheitsgrad der beteiligten Tools von 20%, d.h. zu einem der fünf neuen Tools sind bereits Erfahrungen vorhanden, umfasst die Zeit zur Einarbeitung ca. 4 Monate. Dies resultiert in einem Gesamtaufwand von ca. 7 Monate. Ein kleiner Vorteil auf Seiten der integrierten Lösung ist erkennbar. Der Aufwand zur Erzeugung eines lauffähigen Setups (Randbedingungen, Löseereinstellungen, ...) mit den beteiligten multi-Physik Tools spielt nach der Einarbeitungszeit eine untergeordnete Rolle.

Die Lösung eines stationären Problems ist mit beiden Ansätzen durchführbar. Unter der Voraussetzung, dass für den inkonsistenten Ansatz eine Näherungslösung aus einem vorhergehenden Iterationsschritt der Kopplung zur Verfügung gestellt werden kann, sind auch transiente Lösungen möglich. Integrierte Methoden bieten dies bereits an. Beide iterativen Ansätze haben gegenüber einem monolithischen Ansatz einen erhöhten Aufwand beim Transfer der Daten zwischen den Kopplungspartnern.

Langfristige Kosten bei der Entwicklung einer inkonsistenten Lösung können zum einen Lizenz-, Personal- und Hardwarekosten sein. Es ergibt sich ein Personalbedarf insbesondere bei der Betreuung von Benutzern und der weiteren Qualifizierung oder Anpassung an Änderungen bei den beteiligten Tools. Kurzfristig ergeben sich vor allem Personal und Software-

Kosten während der Entwicklungsphase. Es ist insbesondere zu achten auf

- die Dokumentation,
- die möglichst allgemeine Formulierung von Schnittstellensoftware,
- sowie der Trennung von Schnittstellensoftware selbst und den eigentlichen Daten und zur Automatisierung notwendigen Skripten.

Insbesondere bei den Lizenzkosten kann bei einem inkonsistenten Ansatz gespart werden.

Bei der Verwendung von integrierten Lösungen fallen langfristig und kurzfristig ebenfalls Personal-, Hardware- und Lizenzkosten an. Wobei langfristige Personalkosten lediglich beim tatsächlichen Gebrauch anfallen und nicht bei der Betreuung.

Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt im Wesentlichen von der Genauigkeit der verwendeten Tools ab. Mittels Grenzkriterien können beim Übertragen und Abgleich der Werte zwischen den beteiligten Netzen [8] gute Ergebnisse auf beiden Seiten erzielt werden.

Die Anwendbarkeit eines inkonsistenten Ansatzes ist prinzipiell gleichwertig der eines integrierten Ansatzes. Alle relevanten Größen, welche sich aus physikalischen Überlegungen heraus übertragen lassen müssten (Kräfte, Drücke, Temperaturen, Wärmeübergangskoeffizienten, Wärmeströme auf der einen und Verschiebungen auf der anderen Seite) lassen sich auch übertragen. Die Aufbereitung und Visualisierung der Ergebnisse hingegen werden in den meisten Fällen in kommerziellen Produkten besser umgesetzt sein. Hinsichtlich der Löser Auswahl und der damit verbundenen speziellen Berechnungsmethoden werden in aller Regel inkonsistente Ansätze einen größeren Spielraum bzw. die spezielleren Tools unterstützen. Auch ist es möglich die Kopplungsmethodiken für unterschiedliche Kombinationen von Lösern in Bibliotheken bereitzustellen und bei Bedarf abzurufen womit eine bessere Austauschbarkeit von Spezialtools vollzogen werden kann.

3. STRATEGIEWAHL

Die Auswahl einer Strategie zur Lösung einer FSI kann und wird nur unter Beachtung der unter Abschnitt 2.1 erwähnten und eventuell weiteren Faktoren erfolgen. Diese Faktoren können positiv beeinflusst werden, wenn allen Beteiligten die Folgen, welche in Abschnitt 2.2 erläutert wurden, klar sind. Die Auswahl kann unterstützt werden, indem Projektpläne erstellt werden, die den zeitlichen als auch personellen Aufwand aufzeigen. Dabei sollte möglichst methodisch vorgegangen werden. Eine Risikoliste könnte als erster Schritt eines Risikomanagements aufzeigen an welcher Stelle Probleme auftreten könnten, um rechtzeitig die Strategie in die richtige Richtung zu lenken.

3.1. Umsetzung

Die Umsetzung der Strategiewahl sollte geprägt sein von der Analyse der eigentlichen physikalischen Problemstellung. Die kostengünstigsten Alternativen sind wertlos, wenn das physikalische Problem nicht hinreichend gelöst werden kann. Hierzu wurde in Abschnitt 2.2 näher darauf eingegangen, mit welchen Methoden aktuell welche generellen Möglichkeiten existieren. Darüber hinausgehende Lösungsmöglichkeiten

sind nicht bekannt oder veröffentlicht. Nachdem die prinzipiellen Methodiken zur Lösung des vorliegenden FSI Problems erörtert wurden und noch eine Wahl besteht, lohnt es, eine Kostenanalyse durchzuführen und die Kostendeckung abzusichern. Dazu kann es hilfreich sein, mit den Projekt- oder Teampartnern bzw. Endkunden, eine Bedarfsanalyse durchzuführen. Eine klare Definition und Einordnung der Kriterien sollte offen diskutiert werden, nur so kann allen bewusst gemacht werden, welche Vor- und Nachteile, durch die Auswahl in einem frühen Stadium eines Projektes dieser Art, in Kauf genommen werden. Auch der Bedarf nach Personaldienstleistungen neben der eigentlichen Berechnung und Kopplungstätigkeit sollte klar abgesteckt werden: die Tiefe und Breite der Dokumentation können einen enormen Anteil der eigentlichen Arbeit ausmachen.

3.2. Alternativen

Eine Alternative zu den gewöhnlichen integrativen Ansätzen kann eine hybride Kombination von größeren Softwarepaketen bieten. So bieten namhafte Hersteller oft zu ihren Lösern auch Vernetzer an, was die Anzahl der insgesamt einzusetzenden Softwarepaketen von sechs (Integrator, zweimal Vernetzer, zweimal Löser, CAD) auf drei (Integrator, Strukturmechanik, Strömungsmechanik) reduzieren kann, wobei die CAD Komponente dann auf einer der beiden Seiten – vorzugsweise der strömungsmechanischen – anzusiedeln ist und damit insgesamt den Kopplungsaufwand reduzieren.

Eine weitere Alternative bilden monolithische Ansätze, welche bereits diskutiert wurden. Es stellt sich allerdings die Frage, ob sich aktuell eine moderne, nicht kommerzielle, monolithische Anwendung finden lässt, die sowohl im Bereich der FSI als auch in Einzelgebieten, also nur Strukturmechanik oder nur Strömungsmechanik, konkurrenzfähig ist.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die Auswahl der *richtigen* Lösungsstrategie kann nur erfolgen, wenn sie anwendungsfallabhängig und benutzerbedarfsgerecht ermittelt und Ursachen und Folgen beachtet werden. Methodisches Vorgehen von Anfang an hilft bei der zielorientierten Lösungsfindung. Beide Lösungen, sowohl inkonsistente als auch integrierte Lösungsansätze, haben prinzipiell Ihre Berechtigung. Monolithische Ansätze bieten beste Voraussetzungen sowohl qualitativ als auch bezüglich der Zeit bei FSI Problemen mit großen Verschiebungen eingesetzt zu werden, allerdings sind sie bislang nicht kommerziell erhältlich.

REFERENZEN

[1] Oliver Beren Kaul, „Kurz & Gut: Skalierbarkeit“ <http://www.se.uni-hannover.de/pub/File/kurz-und-gut/ws2011-labor-restlab/REStLab-Skalierbarkeit-Oliver-Beren-Kaul-kurz-und-gut.pdf> abgerufen Q3 2015

[2] Microsoft, „Was ist Skalierbarkeit“, 2013 <https://msdn.microsoft.com/de-de/library/Aa578023.aspx>

[3] H. J. Bungartz; M. Schäfer, „Fluid-structure Interaction: Modelling, Simulation, Optimization“ Springer-Verlag. ISBN 3-540-34595-7, 2006.

[4] H. Matthies; J. Steindorf, „Partitioned strong coupling algorithms for fluid-structure interaction“, *Computers and Structures* 81: 805–812. DOI: 10.1016/S0045-7949(02)00409-1, 2003.

[5] Walter Bislin, „Wie bremsst ein Verkehrsflugzeug“, <http://walter.bislins.ch/blog/index.asp?page=Wie+br+emst+ein+Verkehrsflugzeug+nach+der+Landung%3E>, abgerufen Q3 2015, Schweiz

[6] Angaben aus Walter Bislin, „Simulation der Bremskräfte“, <http://walter.bislins.ch/aviatik/index.asp?page=Simulation+der+Bremskr%E4fte+%28Grafik%29>, abgerufen in Q3 2015, Schweiz

[7] Raghunatan et. al., „Key Aerodynamic Technologies for Aircraft Engine Nacelles“, *The Aeronautical Journal*, 2006, Belfast.

[8] David Grasselt; Prof. Dr.-Ing. Klaus Höschler, Fluid Structure Interaction with inconsistent Software Platforms. WCCM XI, Proceedings TOMO III: p. 2131 – 2137, 2014.

[9] Lutz Ackermann, Heinz Antes, „Simulation der Schalltransmission durch Wände“, Artikel in Pamm, Researchgate, TU Braunschweig, 2002. ISBN 3-920395-42-5

[10] M. Heil, A.L. Hazel, R. Muddle & J. Boyle "Large-Displacement FSI problems: Segregated vs. monolithic solvers in oomph-lib". Oberwolfach Workshop: Theory and Numerics of Fluid-Solid Interaction, 2007.

[11] Neumann et al. Proceedings: Computational Science and High Performance Computing II. The 2nd Russian-German Advanced Research Workshop, 2005 Stuttgart

[12] Förster, Wall & Ramm. CMAME 196 1278–1293 2007

[13] Fernandez, Gerbeau & Grandmont. IJNME 69 794–821 2007

[14] Küttler & Wall. Talk at European PVM/MPI Users' Group Meeting 2006, Bonn.

[15] Heil, CMAME 193, 1-23, 2003

[16] Johannes Einzinger, „Numerische Simulation der Fluid-Struktur Interaktion in Turbomaschinen“, Dissertation, TU München, 2006.