

# Gekoppelte Simulation in der Hydraulik

FRANK RÜDIGER, ANDREAS KLEIN,  
JOCHEN SCHÜTZE

**Die Kopplung unterschiedlicher Simulationswerkzeuge zur Modellierung von Komponenten und Systeme in der Hydraulik gewinnt für die Entwicklung neuer und die Analyse bestehender Produkte immer größere Bedeutung. Mit der Entwicklung eines Kopplungsmoduls zwischen dem ITI-Systemsimulator zur dynamischen Simulation hydraulischer und pneumatischer Systeme und dem CFD-Programm FLUENT wird diesem Trend auf dem Gebiet der Fluidtechnik Rechnung getragen.**

## Motivation

Im Zuge der Bestrebungen, Entwicklungszeiten zu verkürzen und Kosten zu minimieren, findet die numerische Simulation hydraulischer Systeme eine immer breitere Anwendung. Bisher geschieht die Analyse komplexer hydraulischer Systeme meist durch unabhängige Simulation von Teilproblemen aus den unterschiedlichen physikalischen Teilgebieten. Bei dieser Herangehensweise werden Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Bereichen vernachlässigt. Bei der Übertragung der Ergebnisse auf das Gesamtsystem müssen diese Wechselwirkungen durch Abschätzungen oder Erfahrungen berücksichtigt werden. Aufgrund der damit verbundenen Fehler und der zunehmend besseren Möglichkeiten für die Simulation (in Folge steigender Rechnerleistung und der stetigen Verbesserung der physikalischen Modelle) gewinnt die ganzheitliche oder Systemsimulation immer mehr an Bedeutung. Erkennbar ist dies unter anderem an der Vielzahl der in letzter Zeit entwickelten Schnittstellen für die Kopplung unterschiedlicher Programme.

*Dr.-Ing. F. Rüdiger ist Gruppenleiter CFD am Institut für Fluidtechnik, TU Dresden, Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Helduser; Dr.-Ing. A. Klein ist Applikationsingenieur Fluidtechnik bei der ITI GmbH, Dresden und Dr. J. Schütze ist Softwareentwickler und Produktmanager bei der Fluent Deutschland GmbH, Darmstadt*

**1: Motivation für eine gekoppelte System- und CFD-Simulation**

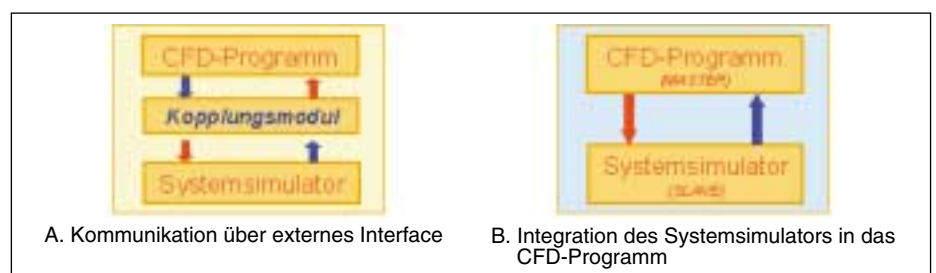


Auf dem Gebiet der Untersuchung hydraulischer Systeme und Bauteile ist die Simulation inzwischen ebenfalls zu einem akzeptierten Werkzeug im Entwicklungsprozess geworden. Für die Systemanalyse werden in der Regel Programme auf der Grundlage konzentrierter Parameter eingesetzt. Für die Detailanalyse signifikanter Bauteile (Pumpen, Ventile) kommt zunehmend die numerische Strömungssimulation (CFD, Computational Fluid Dynamics) zum Einsatz. Bei der CFD-Simulation spielt die konkrete Anordnung des zu untersuchenden Details im Gesamtsystem aus Leitungen, Ventilen, Aktoren und anderen Elementen für die lokale Strömung eine wesentliche Rolle. Besondere Beachtung muss dieser Tatsache bei der Bestimmung von Parametern wie Wirkungsgrad, Strömungskräften oder Kavitationsneigung geschenkt werden, insbesondere dann, wenn es sich um instationäre Vorgänge handelt. Die gekoppelte CFD- und Systemsimulation ist eine Möglichkeit, diesem Sachzwang mit vertretbarem Aufwand zu entsprechen. Gleiches gilt, wenn das Verhalten eines Systems zu untersuchen ist, in dem Elemente enthalten sind, für die eine Parametrierung nur schwer oder nicht möglich ist. Schematisch ist diese Problematik in **Bild 1** dargestellt.

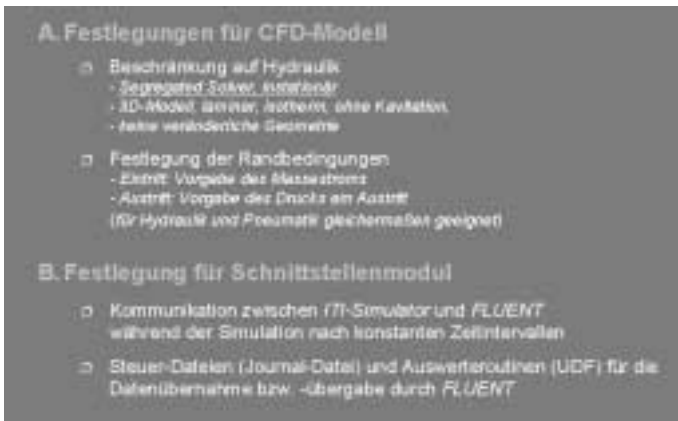
Dieser Tatsache und dem daraus erwachsenden Bedarf an geeigneten Hilfsmitteln Rechnung tragend wurde von der ITI GmbH (ITI) und dem Institut für Fluidtechnik der TU Dresden (IFD) mit Unterstützung der Fluent Deutschland GmbH eine Schnittstelle zur Simulatorkopplung zwischen dem ITI-Systemsimulator und dem CFD-Programm FLUENT erstellt.

## Vorbereitende Arbeiten zur Simulatorkopplung Festlegungen

Die Aufgabe, verschiedene Simulationswerkzeuge in eine Gesamtsimulation zu integrieren, kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Welcher der Möglichkeiten im konkreten Fall der Vorzug zu geben ist, hängt vor allem von der zu behandelnden Problemstellung und den Wünschen in Bezug auf Bedienkomfort und Service ab. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist die Stellung der kommunizierenden Programme zueinander. **Bild 2** zeigt zwei unterschiedliche Möglichkeiten dafür. Bei Variante A laufen beide Simulationen gleichberechtigt nebeneinander. Die Kommunikation zwischen ihnen wird durch ein separates Kopplungsmodul gewährleistet. Dieses Mo-



**2: Möglichkeiten für die Gestaltung der Kopplung zwischen CFD- und Systemsimulation**



3: Festlegungen für die Umsetzung der Kopplung des ITI-Simulators und FLUENT



4: CFD-Modell für die Durchströmung eines Schieberventils

Berechnungsaufwand sowie der gewünschten Genauigkeit abzuwägen.

dul steuert beide Programme und organisiert den Datenaustausch und die Synchronisierung zwischen beiden Programmen. Voraussetzung für diese Variante ist, dass die beteiligten Programme über eine Schnittstelle zur Bereitstellung und Übernahme von Daten verfügen. In der Regel ist kein Eingriff in die Programminterna notwendig, die Realisierung der Kopplung erfordert somit nicht zwingend die Mitarbeit der Programmentwickler. Beide Programme müssen auch nicht zwangsläufig auf dem gleichen Rechner und unter dem gleichen Betriebssystem ausgeführt werden. Dafür ist entsprechender Aufwand in die Gestaltung des externen Kopplungsmoduls zu stecken. Das betrifft auch die Realisierung von Maßnahmen zur Gewährleistung einer stabilen und konvergenten Lösung und die Bedienerfreundlichkeit.

Bei Variante B wird die Systemsimulation in das CFD-Programm integriert. Dies kann zum Beispiel unter Verwendung von Benutzerroutrinen (UDF, User-Defined-Functions) erfolgen. Das Optimum für die Gewährleistung der Stabilität bei der gekoppelten Simulation könnte mit einer Integration der Programme in ein gemeinsames Gesamtsystem und der Abstimmung der Lösungsverfahren erreicht werden. Das erfordert tiefe Eingriffe in die Programminterna und ist somit nur unter Mitarbeit der Programmentwickler möglich. Für den Anwender hätte dies den Vorteil, dass die erforderlichen eigenen Eingriffe und Anpassungen minimiert und die Bedienbarkeit damit optimiert werden könnte.

Für das vorliegende Projekt wurde eine Kopplung nach Variante A bevorzugt, weil diese die größere Flexibilität für zukünftige Anwendungen ermöglicht und einen ver-

treibaren Aufwand in der Entwicklungsphase erfordert.

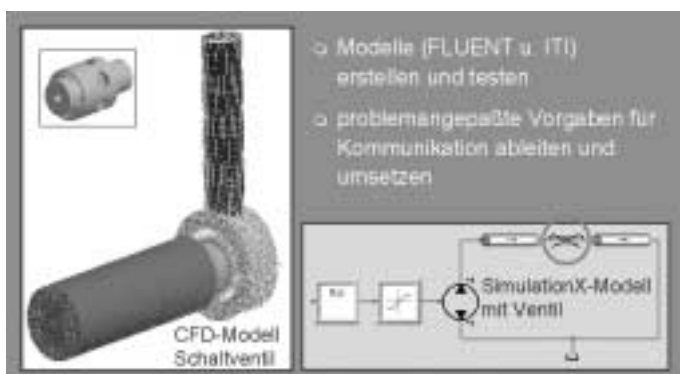
Weitere Festlegungen betreffen die physikalische Komplexität der Modelle während der Testphase und der Entwicklung des Kopplungsmoduls, insbesondere des CFD-Modells. Um den Aufwand überschaubar zu halten und doch die Vorgehensweise und die Problematik bei der Lösung realer Aufgabenstellungen aufzuzeigen, wurden die Untersuchungen auf einfache Strömungen in der Hydraulik beschränkt (Bild 3).

### Tests und Ergebnisse

Mit einem vorhandenen CFD-Modell für die Untersuchung der Strömung in einem Modell eines Schieberventils (Bild 4) wurden zunächst verschiedene Testrechnungen durchgeführt.

Das Hauptaugenmerk galt der Ableitung von Kriterien für die Steuerung der CFD-Simulation in Abhängigkeit von der Änderung der Randbedingungen. Aus diesen Studien konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Für die Beurteilung des Fehlers aus Linearisierung, Diskretisierung und Iterationsabbruch sowie der Konvergenz ist es sinnvoll, zusätzlich zu den in FLUENT bereit gestellten Beurteilungskriterien auf das spezielle Modell und die zugrunde liegende Fragestellung zugeschnittene eigene Indikatoren (sog. „solution monitors“) festzulegen.
- Die Neigung zur Instabilität bzw. der numerische Fehler sind um so größer, je größer die Änderungsgeschwindigkeit der Randbedingung am Eintritt und Austritt bei konstanter Zeitschrittweite ist.
- Aufgrund der hohen Rechenzeiten bei der CFD-Simulation ist sorgfältig zwischen dem



5: CFD-Modell eines Schiebventils im geöffneten Zustand und Simulationsmodell für eine Drossel zwischen Leitungsabschnitten

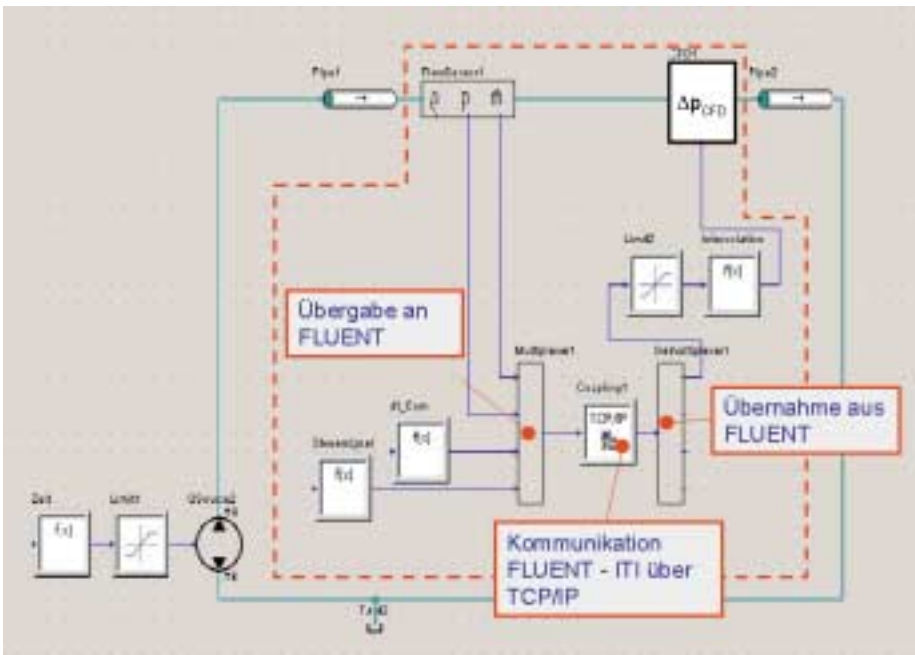
### Umsetzung der Simulatorkopplung Bereitstellung und Übernahme von Daten in der CFD-Simulation

Die Auswertung beliebiger Eingangsdaten für Randbedingungen sowie die Bereitstellung notwendiger Ergebnisgrößen für eine parallel ablaufende dynamische Systemsimulation kann in FLUENT über das Einbinden von User Defined Functions (UDF) erfolgen. Einzulesen und zu verarbeiten bzw. bereit zu stellen sind dabei alle Größen, die an den Ein- und Austrittsflächen des Berechnungsgebietes zwischen den beiden Programmen ausgetauscht werden (z. B. statischer Druck am Auslass, Massestrom und mittlere Temperatur am Einlass. Bei Bauteilen mit thermischen und/oder mechanischen Schnittstellen kommen Wärmeströme oder Kräfte hinzu. Alle ermittelten Größen und weitere, zu Protokollzwecken oder zum Simulationsabgleich erforderliche Daten, werden bei der Abarbeitung der UDF in eine Textdatei geschrieben, wo sie für die Übernahme durch das Kopplungsmodul bereitstehen.

Die Übernahme externer Daten während der FLUENT-Rechnung (aktuelle Randbedingungen, Parameter für die Simulation u.a.) erfolgt durch Einlesen von Anweisungen und Parameter aus einer Textdatei und deren anschließendes Abarbeiten. Diese Textdatei wird im Schnittstellenmodul für jeden Zeitschritt aus vordefinierten Anweisungsfolgen aufgrund von Entscheidungskriterien zusammengestellt, und mit aktuellen Werten aus dem ITI-Systemsimulator versehen, an FLUENT übergeben.

### Einbinden der CFD-Simulation in das ITI-Modell

Mit der Entwicklung des ITI-Systemsimulators wurde dem Anwender eine einfache, universelle Schnittstelle für die Kommunikation mit externen Programmen bereitgestellt [1]. Dieses Modul ermöglicht die Datenübernahme/-übergabe über Datenpakete auf Basis des TCP/IP-Protokolls. Das Zeitintervall für die Kommunikation wird als Parameter vorgegeben. Für die Untersuchungen wurde mit einer für den gesamten Simulationsverlauf festen Kommunikationsschrittweite gearbeitet. Da die CFD-Simulation sehr sensibel auf Änderungen in den Randbedingungen reagiert, müssen in der Regel kleine Zeitschritte zur Abbildung der Gradienten ge-



wählt werden (für typische Strömungen in der Hydraulik  $10^{-6} \dots 10^{-3} \text{ s}$ ).

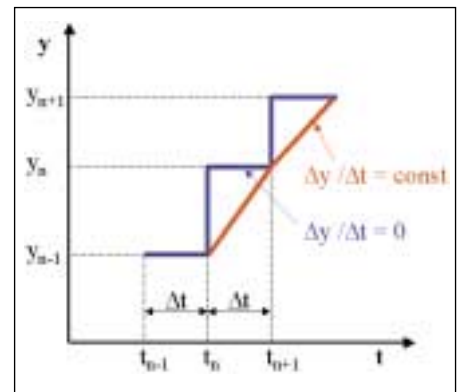
Als Test für die Funktion der gekoppelten Simulation wurde eine instationäre Drosselströmung berechnet. Die dazu gehörigen Modelle zeigt Bild 5. Die Drossel (mit Kreis markiert) stellt dabei das mit CFD zu berechnende Objekt dar, wobei es sich konkret um ein Schaltventil im geöffneten Zustand handelt. Das dargestellte Modell entspricht einer häufig auftretenden Situation, bei der die korrekte Bauteilanalyse mit CFD eine gekoppelte Simulation erforderlich macht. Eine solche Situation ist zum Beispiel dann gegeben, wenn experimentelle Untersuchungen zur instationären Durchströmung eines Bauteils vorliegen und auf dieser Grundlage durch eine CFD-Simulation nähere Aussagen zur lokalen Strömung innerhalb des Bauteils gewonnen werden sollen. Zwischen den im Experiment zur Ermittlung von Zustandsgrößen wie Druck und Temperatur vorhandenen Messstellen und dem in der CFD-Simulation abgebildeten Ventilteil befinden sich meist noch Leitungsabschnitte und Widerstände, die eine Änderung des Zeitsignals bewirken. Oft sind diese Änderungen nicht vernachlässigbar. Im Modell wird ein zeitlicher Verlauf für den Volumenstrom über eine Funktion vorgegeben.

Das ITI-Modell für die gekoppelte Simulation, in dem die Drossel aus 5 durch die für die CFD-Einbindung erforderlichen Modellobjekte ersetzt ist, zeigt Bild 6. Kernstück ist das Modellobjekt für die Simulatorkopplung über TCP/IP. Dieses Modellobjekt übergibt die Daten für die Auswertung im Kopplungsmodul und die Weitergabe an Fluent und übernimmt Daten aus FLUENT über das Kopplungsmodul. Übergeben werden im betrachteten Beispiel der Druck  $p$  und der Massestrom vor dem Ventil, die Kommunikationsschrittweite  $dt_{Com}$  und ein Steuersignal zur Identifikation des Status der Simulation. In die dynamische Simulation erfolgt die Übernahme des mit FLUENT berechneten Druckverlusts.

Vor der Einspeisung des Druckverlusts  $\Delta p_{CFD}$  in den hydraulischen Kreislauf wird eine lineare Interpolation der Werte vorgenommen. Damit werden die Unstetigkeiten zu den Kommunikationszeitpunkten stark reduziert (Bild 7). Durch diese Unstetigkeiten würde das Lösungsverhalten in der Art negativ beeinflusst, dass der Berechnungsaufwand drastisch stiege und unter Umständen sogar keine konvergierte Lösung erreicht werden könnte. Außerdem würden im System physikalisch unsinnige Schwingungen angeregt.

Die korrekte Vorgehensweise, um diese numerisch bedingten Schwingungen zu vermeiden, wäre eine engere Kopplung der beiden Modelle dergestalt, dass bei der Berechnung eines einzelnen Zeitschrittes beide Programme iterativ Daten austauschen und gemeinsam eine physikalisch korrekte Lösung ermitteln. Auf diese Weise wird der Berechnungsaufwand vor allem aufgrund der langen Rechenzeiten für die CFD-Simulation schnell unverträglich hoch. Außerdem wäre für eine effiziente Verarbeitung eine engere Kopplung der beiden Lösungsverfahren notwendig, die also auch tiefe Eingriffe in die Programme voraussetzen.

Bei der linearen Interpolation der Daten innerhalb des Kommunikationsintervalls



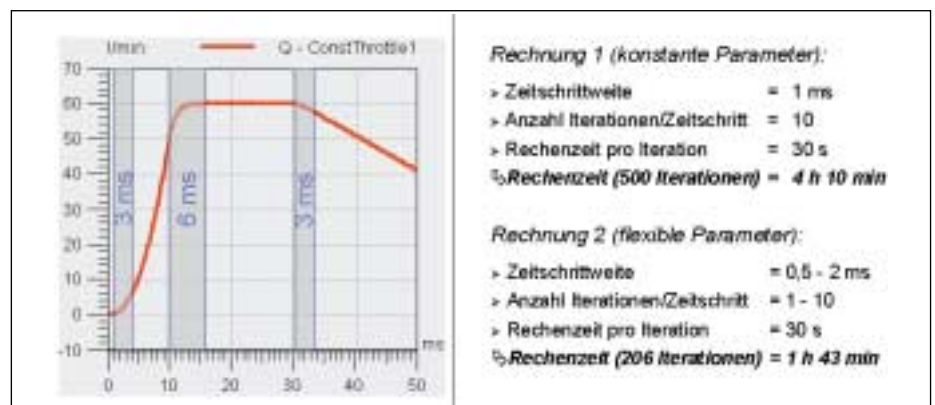
7: Zeitlicher Signalverlauf beim Datenaustausch in Zeitintervallen  $\Delta t$  ohne bzw. mit Signalweiterverarbeitung

6: Modell für die mit CFD gekoppelte Simulation der instationären Drosselströmung

entsteht infolge der sequenziellen Abarbeitung der Programme ein numerischer Fehler, dessen Höhe vom Zeitintervall und vom Anstieg der physikalischen Größe abhängt. Bei geeigneter Parameterwahl kann dieser Fehler aber klein gehalten werden. Das CFD-Modell und die Systemsimulation sind infolge der diskreten Abbildung des Systems und der konkreten Modellierung und Parametrierung ohnehin selbst mit einem Fehler behaftet. Deshalb stellt die gewählte Vorgehensweise einen praktikablen Kompromiss zwischen Aufwand und Genauigkeit dar.

Test und Optimierung der Simulatorkopplung

Mit dem im vorigen Abschnitt vorgestellten Modell wurden Tests zur Cosimulation durchgeführt. Bild 8 zeigt den vorgegebenen zeitlichen Verlauf des Volumenstroms und die Parameter sowie daraus resultierende Rechenzeiten für die gekoppelte Simulation. Aufgrund der Komplexität des CFD-Modells ist die Rechenzeit des CFD-Programms dominant für die Gesamtdauer der Co-Simulation. Rechnung 1 erfolgte mit festen Vorgaben für die instationäre CFD-Rechnung. Bei Rechnung 2 wurden die Zeitschrittweite und die maximale Iterationszahl pro Zeitschritt in Abhängigkeit vom Signalverlauf variiert. Hauptkriterium sind die absolute und die relative Höhe der Massestromänderung. Die entsprechenden Tests und Entscheidungskriterien wurden



8: Zeitlicher Verlauf des Volumenstroms für den Test und Parameter für die CFD-Rechnungen bei der gekoppelten Simulation

im Schnittstellenmodul implementiert. Am Ergebnis ist erkennbar, dass bereits mit einfachen Maßnahmen der Berechnungsaufwand erheblich reduziert werden kann. Gleichzeitig wird damit die numerische Genauigkeit erhöht, weil die wesentlichen Zeitabschnitte (im Bild 8 markiert) feiner aufgelöst werden. Die angegebenen Simulationszeiten beziehen sich auf einen PC PentiumIII/700 MHz.

### Zusammenfassung

Es wurde eine Schnittstelle für die Kopplung der dynamischen Systemsimulation und der numerischen Strömungsberechnung am Beispiel des ITI-Systemsimulators und des CFD-Programms FLUENT geschaffen und an einem einfachen Beispiel getestet. Parameterstudien führten zur Ableitung von Maßnahmen und Kriterien für eine stabile und effiziente Gestaltung der Cosimulation. Als Resultat konn-

te eine akzeptable Rechenzeit bei guter Genauigkeit und Stabilität erreicht werden. Aufgrund des besonders hohen Detaillierungsgrades von CFD-Simulationen sind die Rechenzeiten deutlich länger als bei reinen Systemdynamiksimulationen. Dadurch, dass FLUENT eine Simulation ohne weiteres parallel auf mehrere Prozessoren verteilt rechnen kann, lassen sich diese Rechenzeiten durch Einsatz zusätzlicher Hardware (z.B. kostengünstiger Windows- oder Linux-Systeme auf Basis von Standard-PC-Prozessoren) drastisch reduzieren.

Ein weiteres Ergebnis sind die Erfahrungen, die im Zusammenhang mit der Vorbereitung und Durchführung der Cosimulation gesammelt werden konnten und die sich in einer vorgegebenen Ablauffolge niederschlagen. Bereits mit der Festlegung der zu lösenden Aufgabenstellung werden die Modellkomplexität, der erforderliche Datenaustausch, der Gesamtaufwand und die Ge-

nauigkeit maßgeblich bestimmt. Auf Basis der Aufgabenstellung werden die beiden Modelle (Systemmodell und CFD-Modell) getrennt erstellt und getestet. Das zukünftig mit CFD zu berechnende Teil wird zunächst mit ITI-Modellobjekten abgebildet. Aus diesem Test werden Rückschlüsse über die Wahl der Kommunikationsschrittweite, die notwendige Stabilität und die Genauigkeit der Simulation gezogen. Gegebenenfalls sind Anpassungen und Änderungen im Schnittstellenmodul und in der FLUENT-UDF vom Benutzer programmierte Zusatzfunktion in FLUENT) vorzunehmen. Nach diesen Vorbereitungen kann die gekoppelte Simulation durchgeführt werden.

---

*Literaturhinweis:*

[ITI1] ITI Simulation Workshop, Dresden, November 2002 ([www.iti.de](http://www.iti.de))

---

*Bildnachweis: Verfasser*