

# UNTERSUCHUNG EINES FLUID-STRUKTUR-INTERAKTION REFERENZFALLS MITTELS OPENFOAM® EXTEND

B. Fischer, L. Beermann, C. Höfler und H.-J. Bauer,  
Institut für Thermische Strömungsmaschinen  
Karlsruher Institut für Technologie  
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Deutschland

## Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, einen in OpenFOAM® extend implementierten Fluid-Struktur-Interaktions-Löser (FSI-Löser) zu validieren. Zur Validierung des Löser wurde ein aus der Literatur bekannter Referenzfall simuliert, für welchen es experimentelle Vergleichsdaten gibt. Bei diesem Referenzfall handelt es sich um einen starren Zylinder in einem Strömungskanal, an dessen Rückseite eine flexible Kunststoffplatte angebracht ist. Diese Struktur wird von Wasser umströmt, wodurch die Kunststoffplatte in Schwingung versetzt wird.

Die Berechnungen in OpenFOAM® wurden zweidimensional durchgeführt. Änderungen entlang der Zylinderachse wurden vernachlässigt. Für die Strömungsberechnung wurde das k-ε-Turbulenzmodell verwendet, wobei die Wände mit Wandfunktionen modelliert wurden. Der verwendete partitionierte FSI-Löser greift zur Berechnung der Teilgebiete Strömung und Struktur auf bereits vorhandene Löser in OpenFOAM® zurück. Daher wurden in einem ersten Schritt die beiden Teillöser separat, ohne Kopplung validiert. Zur Validierung der Teillöser wurden ebenfalls Referenzfälle aus der Literatur mit ähnlichen Geometrien und Randbedingungen wie im FSI-Fall herangezogen. Der Strukturlöser lieferte sehr gut übereinstimmende Ergebnisse, die Verschiebungen und die Schwingungsfrequenz wichen nur um etwa 1 % von den gegebenen Referenzwerten ab.

Der Strömungslöser bildet das Geschwindigkeitsfeld des Referenzfalls sehr gut ab. Der Strömungswiderstand (+4,2 %), der Auftriebsbeiwert (+20 %) und die Strouhalzahl (+6,9 %) waren alle etwas erhöht.

Daraufhin wurde der gekoppelte Fall betrachtet. Es wurde das Geschwindigkeitsprofil, die Plattenauslenkung und die Frequenz der Plattenschwingung mit den experimentellen Daten verglichen. Das Geschwindigkeitsprofil im Inneren des Strömungsgebietes wurde gut getroffen. Die Amplitude der Plattenauslenkung ist um 16,7 % erhöht. Die Plattenschwingungsfrequenz wurde um 2,4 % zu schnell vorhergesagt. Diese erhöhten Werte liegen an den bereits im reinen Strömungsfall zu hoch vorhergesagten Werten von Auftriebsbeiwert und Strouhalzahl. Der Kopplungsprozess des FSI-Löser funktioniert sehr gut und bei einer Verbesserung der reinen Strömungsberechnung durch einen anderen Löser, würde sich vermutlich auch das Ergebnis im gekoppelten Fall verbessern.

Die Ergebnisse stimmen trotz kleiner Abweichungen gut mit den experimentellen Daten überein. Insbesondere da aus Rechenzeitgründen das k-ε-Modell mit einer Wandmodellierung verwendet wurde. Der FSI-Löser liefert mit den verwendeten Einstellungen genaue Ergebnisse und kann als validiert betrachtet werden.

## NOMENKLATUR

$c$	-	CFL-Zahl	$\nu$	-	Querkontraktionszahl
$c_d$	-	Strömungswiderstand	$\nu_f$	m <sup>2</sup> /s	Kinematische Viskosität
$c_l$	-	Auftriebsbeiwert	$p$	kg/(ms <sup>2</sup> )	Druck
$C_\mu$	-	Konstante des k-ε-Modells	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$d_h$	m	Hydraulischer Durchmesser	$Re$	-	Reynolds-Zahl
$D$	m	Durchmesser	$St$	-	Strouhal-Zahl
$\Delta$	-	Differenz/Schrittweite	$t$	s	Zeit
$E$	kg/(ms <sup>2</sup> )	Elastizitätsmodul	$u$	m	Verschiebung
$\varepsilon$	m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>	Turbulente Dissipation	$v$	m/s	Geschwindigkeit
$F_x, F_y$	kgm/s <sup>2</sup>	Kraft in x, y Richtung	$y^+$	-	Dimensionsloser Wandabstand
$f$	1/s	Frequenz			
$f_g$	m/s <sup>2</sup>	Massenkraftdichte			
$l$	-	Turbulente Intensität			
$k$	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Turbulente kinetische Energie			
$\mu_f$	kg/(ms)	Dynamische Viskosität			

## 1. EINLEITUNG

Die Wechselwirkung zwischen strömenden Fluiden und deformierbaren Strukturen ist ein bedeutender Effekt, der in sehr vielen Bereichen in der Natur und Technik auftritt. Ein Beispiel aus dem Bereich der

Turbomaschinen sind dynamische Dichtsysteme. Verbesserungen der Dichtungen in Sekundärluftsystem spielen bei der Steigerung der Effizienz von thermischen Turbomaschinen eine große Rolle. Daher werden die vorherrschenden Labyrinthdichtungen immer mehr durch neuartige Dichtsysteme ersetzt. Flexible Dichtsysteme spielen dabei bei der Reduzierung des Verschleißes bei gleichbleibend geringer Leckage eine große Rolle. Bei diesen Systemen wird die Bewegung der flexiblen Dichtung stark durch die Strömung beeinflusst. Umgekehrt ist die Strömung wiederum stark von der Stellung der Dichtung abhängig.

Die Simulation solcher gekoppelten Systeme durch eine Fluid-Struktur-Interaktion ist numerisch eine große Herausforderung, da die Teilgebiete Strömung und Struktur stark unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Dank zunehmender Rechenkapazitäten und sich stetig verbessernden Berechnungsmethoden ist es heutzutage jedoch möglich solche komplexen Systeme zu simulieren. Dabei existieren verschiedene Möglichkeiten zur Lösung dieser Problemstellungen. Um verlässliche Ergebnisse zu gewährleisten, muss jeder genutzter Löser jedoch zuerst validiert werden. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, einen in OpenFOAM® extend implementierten Fluid-Struktur-Interaktions-Löser zu validieren.

**2. KOPPLUNGSMETHODIK**

Im Rahmen dieser Arbeit wird der partitionierte Löser *fsiFoam* verwendet. Partitioniert bedeutet, dass die Teilgebiete Strömung und Struktur getrennt voneinander gelöst werden. Hierfür wird der *pisoFoam*-Löser auf Strömungsseite und der *stressFoam*-Löser auf Strukturseite verwendet.

Der *pisoFoam*-Löser ist ein transienter Löser für turbulente, inkompressible Strömungen. Es wird dabei keine Unterrelaxation verwendet. Als Turbulenzmodell wird das  $k-\epsilon$ -Turbulenzmodell mit Wandfunktionen verwendet. Der Löser beruht auf dem PISO-Algorithmus (Pressure-Implicit with Splitting of Operators).

Der *stressFoam*-Löser ist ebenfalls ein transienter Löser und ist für linear-elastische Materialien geeignet.

Die Aufgabe des *fsiFoam*-Lösers besteht in der Kopplung der Teilsysteme und in der Übertragung der Kopplungsgrößen Druck, Verschiebung und Geschwindigkeit an den Grenzflächen. Außerdem vernetzt der Löser das Fluidnetz in jedem Zeitschritt neu, da dieses aufgrund der Verschiebung der Struktur angepasst werden muss. Die Kopplung erfolgt nach der impliziten Kopplungsmethode. Dabei werden die Teilgebiete Strömung und Struktur für jeden Zeitschritt wiederholt gelöst bis das Residuum

unterschritten ist. In BILD 1 ist das Schema einer solchen Iterationsschleife in einem Zeitschritt dargestellt.

Die Iterationsschleife beginnt zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t$ . Zu diesem Zeitpunkt ist die Verformung der Struktur  $u_i$  und damit auch die daraus entstehende Verformung des Fluidnetzes aus dem vorherigen Zeitpunkt bekannt. Auf Grundlage dieses Netzes werden die Strömungsgleichungen gelöst, woraus sich das Druckfeld  $p_i$  sowie das Geschwindigkeitsfeld  $v_i$  ergibt. Daraus werden die Druck- und Scherkräfte bestimmt, welche an der Grenzfläche auf die Struktur wirken. Diese werden mittels einer Interpolation auf die Strukturseite übertragen.

Aus den übertragenen Kräften bestimmt der Strukturlöser eine neue Verschiebung  $\hat{u}_i$ . Mit dieser wird das Abbruchkriterium überprüft. Dieses ist erfüllt, wenn die Änderung zwischen alter und neuer Verschiebung das Residuum  $\epsilon$  unterschreitet. Für  $\epsilon$  wird in dieser Arbeit der Wert  $10^{-5}$  gewählt. Ist das Abbruchkriterium nicht erfüllt, so wird der Zähler  $i$  erhöht und die Struktur sowie das Fluidnetz werden bewegt. Dies geschieht im Rahmen einer Unterrelaxation. Der Unterrelaxationsfaktor  $\omega$  wird dynamisch so angepasst, dass die Rechnung möglichst stabil bleibt. Dafür wird die sogenannte Aitken-Methode verwendet [1].

Dies wiederholt sich bis das Abbruchkriterium erfüllt ist. In dem Fall ist für den aktuell betrachteten Zeitpunkt  $t$  eine Lösung der Feldgrößen  $u$ ,  $p$  und  $v$  erhalten und es kann zum nächsten Zeitpunkt  $t + \Delta t$  übergegangen werden.

Es ist ersichtlich, dass diese Kopplung einen hohen Berechnungsaufwand zur Folge hat, da zusätzlich zu der hier betrachteten Iterationsschleife, die Einzellöser von Strömung und Struktur auch interne Iterationsschleifen pro Zeitschritt durchlaufen. Allerdings ist dieses Verfahren stabiler und genauer als andere Ansätze.

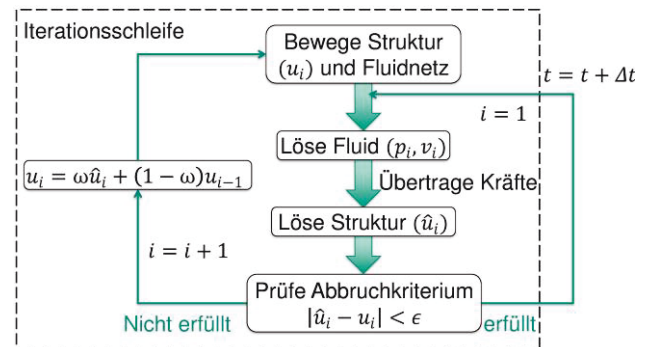


BILD 1: Iterationsschleife der impliziten Kopplung

### 3. BESCHREIBUNG DER NUMERISCHEN MODELLE

Im folgenden Abschnitt werden die für die Validierung des FSI-Lösers verwendeten Testfälle, sowie die Modellbildung beschrieben. Es wird auf die Geometrie und Vernetzung, sowie auf die verwendeten Rand- und Anfangsbedingungen eingegangen. Die Berechnungen werden alle zweidimensional durchgeführt, wobei die Netze zur Berechnung in OpenFOAM® eine Zelle in z-Richtung besitzen.

Es wurden zur Validierung des FSI-Lösers zuerst der Strukturlöser und der Strömungslöser einzeln an dafür passenden Testfällen aus der Literatur validiert.

#### 3.1 Aufbau des Strukturreferenzfalls

Zur Validierung des Strukturlösers wurde der Testfall von Turek [2] herangezogen, da bei diesem die Struktur eine vergleichbare Geometrie besitzt und ähnlichen Verformungen unterliegt wie im zu untersuchenden FSI-Fall. Die graue Platte mit den Maßen  $l = 0,35\text{ m}$  und  $h = 0,02\text{ m}$  wird dabei wie in BILD 2 gezeigt, auf der linken Seite fest eingespannt. Die Platte erfährt eine äußere Belastung durch die Massenkraftdichte  $f_g$ , welche in negative y-Richtung wirkt. Diese Massenkraftdichte wird zum Zeitpunkt  $t = 0$  auf die unverformte Platte aufgebracht, wodurch sich die Platte verformt. Sie hat einen konstanten Wert von  $f_g = 2\text{ m/s}^2$  und ist somit geringer als die Erdbeschleunigung. Der Fall wird zweidimensional berechnet. Die Verformung wird mit den Ergebnissen aus der Literatur verglichen. Die Vergleichsdaten wurden mit der Finiten-Elemente-Methode erhalten.

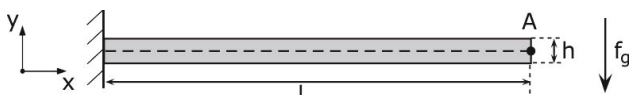


BILD 2: Geometrie des Struktur-Testfalls

Die Verformung der Platte wird anhand der Verschiebung des Punktes A quantifiziert. Dieser Punkt befindet sich auf halber Höhe  $h/2$ , ganz am Ende der Platte im Abstand  $l$  zum Zylinder. Da die Platte nach dem Aufbringen der Massenkraftdichte zunächst schwingt und sich erst mit der Zeit ein stationärer Endwert einstellt, werden sowohl die Schwingungsfrequenz als auch der Endwert der Verschiebung mit den Referenzwerten verglichen.

Die verwendeten Materialeigenschaften sind in TAB 1 dargestellt. Es werden zwei Fälle verglichen welche sich nur durch den Elastizitätsmodul unterscheiden. Diese werden CSM1 und CSM2 genannt. Der Elastizitätsmodul im später betrachteten FSI-Fall liegt mit  $E = 16\text{ MPa}$  über den hier verwendeten Werten.

TAB 1: Materialeigenschaften des Struktur-Falls

	CSM1	CSM2
Elastizitätsmodul $E$ [MPa]	1,4	5,6
Dichte $\rho$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	1000	1000
Querkontraktionszahl $\nu$	0,4	0,4

Es wurden Netze mit unterschiedlicher Zellenanzahl zwischen 200 und 2000 Zellen verwendet. Aus dem Vergleich mit den Referenzdaten können dadurch Rückschlüsse auf eine geeignete Zellenanzahl der Platte im später betrachteten FSI-Fall gezogen werden.

#### 3.2 Aufbau des Fluidreferenzfalls

Zur Validierung des Strömungslösers wurde der Testfall von Breuer [3] verwendet. Dieser besitzt ähnliche Geometrien und Strömungsbedingungen wie der FSI-Fall. Die Abmessungen sind beim hier verwendeten Fall größer und die Reynoldszahl kleiner als im FSI-Fall. Die Geometrie des Fluid-Falls ist in BILD 3 dargestellt. Die Zeichnung ist dabei nicht maßstabsgerecht. Es handelt sich hierbei um einen rechteckigen Strömungskanal, in dessen Mitte sich ein Zylinder mit einer angehängten Platte befindet. Die Platte hat dieselben Abmessungen wie im zuvor beschriebenen Struktur-Fall, wird jedoch als starr modelliert, da ein reiner Strömungsfall betrachtet wird. Durch den Strömungskanal fließt eine turbulente Strömung. Dadurch werden periodische Kräfte auf Zylinder und Platte ausgeübt. Die Kräfte werden mit den Daten der Literatur verglichen. Die Vergleichsdaten von Breuer [3] wurden durch eine LES-Simulation mit 17 Millionen Zellen erhalten.

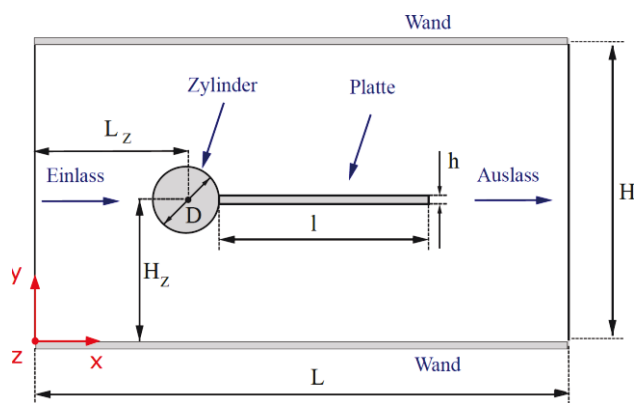


BILD 3: Geometrie des Fluid-Testfalls

Die Abmessungen der Geometrie sind in TAB 2 aufgelistet. Der Zylinder ist bei diesem Testfall leicht exzentrisch angebracht.

TAB 2: Geometrieabmessungen des Fluid-Testfalls in m

$L$	$H$	$D$	$L_z$	$H_z$	$l$	$h$
2,5	0,41	0,1	0,2	0,2	0,35	0,02

Das verwendete, strukturierte Netz besitzt 9.000 Zellen. Die  $y^+$ -Werte liegen zwischen 20 und 200. Der kleinste auftretende Winkel der Zellen beträgt  $54^\circ$ . Die Determinante ist größer als 0,75 und das Seitenverhältnis ist kleiner als 5.

Am Einlass wird ein konstantes Rechteck-Geschwindigkeitsprofil  $v_{\text{ein}} = 1 \text{ m/s}$  in  $x$ -Richtung vorgegeben. Die obere und untere Wand werden als reibungslos betrachtet. Die Platte und der Zylinder werden mit der Haftbedingung  $v = 0$  simuliert. Der Druck am Auslass wird auf den relativen Wert 0 festgelegt. Für die Größen  $k$  und  $\varepsilon$  werden an allen Wänden Wandfunktionen vorgegeben, auch an den reibungslosen Wänden.

Der Einlasswerte für  $k$  und  $\varepsilon$  werden wie folgt berechnet [4].

$$(1) \quad k = \frac{3}{2} (I v_{\text{ein}})^2$$

$$(2) \quad \varepsilon = C_\mu \frac{k^{\frac{3}{2}}}{0,038 d_h}$$

Da im Referenzfall [3] keine turbulenten Schwankungen vorgegeben wurden beträgt die turbulente Intensität am Einlass  $I = 0$  null. Der Wert 0 führt allerdings zu Konvergenzproblemen bei der Berechnung, weshalb im Fluid-Fall, wie auch später im FSI-Fall, der sehr kleine Wert  $I = 0,5\%$  verwendet wurde. Daraus ergibt sich der Einlasswert  $k_{\text{ein}} = 3,75 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$  für die turbulente kinetische Energie.

Bei der Berechnung von  $\varepsilon_{\text{ein}}$  wird für den hydraulischen Durchmesser  $d_h$  die Kanalhöhe  $H$  eingesetzt.  $C_\mu$  ist eine empirische Konstante mit dem Wert  $C_\mu = 0,09$ . Mit dem daraus berechneten Einlasswert traten allerdings keine Schwingungen auf. Der Auftriebsbeiwert hatte den annähernd konstanten Wert 0 und das Geschwindigkeitsprofil glich einer stationären Lösung ohne Wirbelablösungen.

Dieses Problem konnte dadurch behoben werden, dass ein höherer Einlasswert  $\varepsilon_{\text{ein}}$  gewählt wurde. Es wurden mehrere Simulationen durchgeführt, bei denen dieser sukzessive erhöht wurde. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Strömung ab einem bestimmten Wert umschlägt und es zur Ausbildung einer Wirbelstraße kommt. Dieser liegt etwa bei dem drei- bis sechsfachen Wert des berechneten

Einlasswertes. Für die Strömungsberechnung in dieser Arbeit wurde daher ein 10 Mal höherer Einlasswert  $\varepsilon_{\text{ein}}$  gewählt, um sicher über dem Bereich zu liegen, in dem die Strömung umschlägt. Im Fluid-Fall beträgt der Einlasswert somit  $\varepsilon_{\text{ein}} = 1,33 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$ . In [5] werden geeignete turbulente Einlassbedingungen empfohlen. In dem dort betrachteten Beispiel wurde ebenfalls ein 10 Mal höherer Wert für  $\varepsilon$  empfohlen, was die getroffene Annahme unterstützt.

Der Kanal wird von einem inkompressiblen Newton'schen Fluid mit den in TAB 3 aufgelisteten Eigenschaften durchströmt. Es ergibt sich, bezogen auf den Zylinderdurchmesser und die Einlassgeschwindigkeit die Reynoldszahl  $Re = 10.000$ . Für die Zeitschrittweite wurde  $\Delta t = 2 \times 10^{-4} \text{ s}$  gewählt. Daraus ergibt sich die maximale CFL-Zahl von  $C_{\text{max}} = 0,09$ .

TAB 3: Fluideigenschaften der Strömungvalidierung

Dichte $\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1000
Kinematische Viskosität $\nu_f$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	$10^{-5}$

### 3.3 Aufbau des FSI-Testfalls

Für die Validierung des FSI-Lösers wird der Testfall von Nayer [6] nachgebildet. Wie im zuvor betrachteten Fluid-Fall handelt es sich hierbei um einen Strömungskanal, in dessen Mitte ein Zylinder mit einer rechteckigen Platte angebracht wird. Im Gegensatz zum reinen Fluid-Fall wird die Platte hier allerdings als flexibel betrachtet und kann sich durch die Kräfte des strömenden Fluides verformen. Diese Verformungen werden mit den Referenzwerten verglichen. Zusätzlich wird das Geschwindigkeitsprofil zum Vergleich herangezogen. Nayer [6] liefert hierfür sowohl Vergleichsdaten aus Experimenten, als auch Vergleichsdaten einer hochauflösenden LES-Simulation, die mit 13,5 Millionen Zellen durchgeführt wurde.

#### 3.3.1 Geometrie und Vernetzung

Die Geometrie des FSI-Testfalls unterscheidet sich nur durch ihre Abmessungen von der Geometrie des Fluid-Falls in BILD 3. Die Abmessungen beim FSI-Testfall sind kleiner. Sie stehen auch nicht im gleichen Verhältnis zueinander wie beim Fluid-Testfall. Die Platte im FSI-Fall ist beispielsweise dünner, bezogen auf den Zylinderdurchmesser. Die Abmessungen sind in TAB 4 aufgelistet.



TAB 4: Geometrieabmessungen des FSI-Testfalls in m

$L$	$H$	$D$	$L_z$	$H_z$	$l$	$h$
0,388	0,24	0,022	0,077	0,12	0,06	0,0021

Um die Verformungen der Platte quantitativ mit den experimentellen Daten vergleichen zu können, wird die Verschiebung eines Punktes betrachtet, welcher mittig 9 mm vom hinteren Ende der Platte entfernt ist.

Für die Vernetzung vom Strömungsgebiet und der Platte wurden strukturierte Netze verwendet. Das Fluidnetz ist in BILD 4 dargestellt. Es wird zweidimensional mit nur einer Zelle in z-Richtung gerechnet. Das Netz besitzt 15.000 Zellen. Die  $y^+$ -Werte liegen zwischen 20 und 120. Der kleinste Winkel der Zellen beträgt etwa  $40^\circ$  und die Determinante ist größer als 0,8. Das maximale Seitenverhältnis beträgt 90. Es wurde ein C-Netz verwendet um die Zellen um den Zylinder herum zu führen. Dementsprechend muss die Geometrie hier leicht geändert werden. In der LES-Vergleichsrechnung zum Experiment aus [6] wurde ebenfalls ein solches C-Netz verwendet. Für das Netz der flexiblen Platte wurden 400 Zellen verwendet.

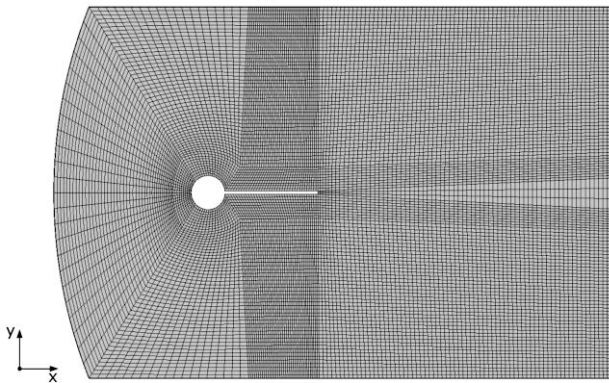


BILD 4: FSI-Netz

### 3.3.2 Anfangs- und Randbedingungen

Zusätzlich zu den Feldgrößen Geschwindigkeit  $v$ , Druck  $p$ , Turbulente kinetische Energie  $k$  und Turbulente Dissipation  $\epsilon$  müssen im gekoppelten Fall noch die Plattenverschiebung  $u$  und die Verschiebung der Knoten des Fluidnetzes „pointMotionU“ berechnet werden. Die Größe pointMotionU erhält an allen äußeren Begrenzungen des Strömungsfalles den fixen Wert 0. Die Verschiebung der flexiblen Platte  $u$  erhält an der linken, fest eingespannten Seite den Wert 0. Über die drei übrigen Flächen können im Laufe der Rechnung Druck- und Scherspannungen auf die Platte aufgebracht werden. Am Einlass wird für die Geschwindigkeit ein Rechteckprofil mit

$v_{\text{ein}} = 1,385 \text{ m/s}$  in x-Richtung vorgegeben. An der bewegten Platte wird eine no-slip Bedingung festgelegt.

Der Einlasswert für  $k$  wird wie im Fluid-Fall mit einer turbulenten Intensität von  $I = 0,5\%$  berechnet. Damit ergibt sich der Einlasswert  $k_{\text{ein}} = 7,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$  für die turbulente kinetische Energie. Auch im FSI-Fall kam es zu den zuvor erwähnten Problemen mit dem Einlasswert der turbulenten Dissipation  $\epsilon$ . Deshalb wurde wie im Fluid-Fall der zehnfache Einlasswert für  $\epsilon$  gewählt. Dieser beträgt somit  $\epsilon_{\text{ein}} = 6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$ .

Als Anfangsbedingung für die Strömung wird eine eingelaufene Strömung mit unverformtem Netz verwendet. Als Anfangsbedingung auf Strukturseite wird eine unverformte Platte verwendet.

Als Fluid wurde in den Experimenten Wasser verwendet mit den in TAB 5 dargestellten Eigenschaften. Die Platte wurde aus einem Kunststoff hergestellt und besitzt die in TAB 6 dargestellten Eigenschaften.

TAB 5: Fluideigenschaften des FSI-Falls

Dichte $\rho_f$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000
Dynamische Viskosität $\mu_f$ [kg/(ms)]	$10^{-3}$

TAB 6: Struktureigenschaften des FSI-Falls

Elastizitätsmodul $E$ [MPa]	16
Dichte $\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$10^{-3}$
Querkontraktionszahl $\nu$	0,48

Bezogen auf den Zylinderdurchmesser  $D$  und die Einlassgeschwindigkeit  $v_{\text{ein}}$  ergibt sich die Reynoldszahl  $Re = 30470$ . Als Zeitschrittweite wurde  $\Delta t = 10^{-4} \text{ s}$  verwendet. Damit trat die maximale CFL-Zahl  $C_{\text{max}} = 0,24$  auf.

Für alle Strömungs-Feldgrößen und für die FSI-Iterationsschleife wird der Wert  $10^{-5}$  als Residuum gewählt. Für die Verschiebung wird das Residuum  $10^{-9}$  festgelegt.

## 4. ERGEBNISSE DER SIMULATION

Nachfolgend werden die Simulationsergebnisse mit den vorhandenen Referenzwerten verglichen. Zunächst werden die Ergebnisse des Struktur- und des Fluidfalls betrachtet. Anschließend werden die Ergebnisse des gekoppelten FSI-Falls, sowie die auftretenden Rechenzeiten besprochen.

### 4.1 Ergebnisse des Strukturreferenzfalls

Im Struktur-Fall wurde zunächst der Endwert der Plattenauslenkung für die beiden Fälle CSM1 und

CSM2 verglichen. Die Simulationen wurden mit unterschiedlichen Zellenanzahlen durchgeführt.

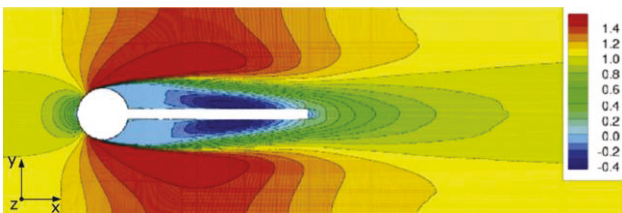
Die Ergebnisse wurden mit steigender Zellenanzahl genauer. Ab einer Zellenanzahl von etwa 400 Zellen hat sich das Ergebnis nicht mehr signifikant verändert. Die Abweichung der Verschiebung des Punktes A zum Referenzwert betrug hier etwa 1%. Daher wurde für den späteren FSI-Fall eine Zellenanzahl von 400 Zellen verwendet.

Zusätzlich wurde die Schwingungsfrequenz der Platte im Falle CSM1 mit den Referenzwerten verglichen. Die Frequenz der Schwingung im Fall CSM1 betrug  $f = 1,1$  Hz. Dies stimmt sehr genau mit den Referenzwerten überein. Die Abweichung beträgt auch hierbei weniger als 1%.

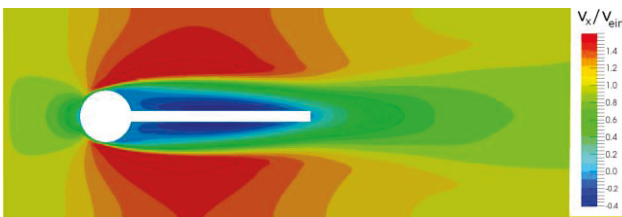
Damit ist der Strukturlöser in der Lage die im FSI-Fall auftretenden Verformungen sehr genau wiederzugeben und es sind keine Änderungen im Aufbau der Netze nötig.

#### 4.2 Ergebnisse des Fluidreferenzfalls

In diesem Fall wird zunächst das Geschwindigkeitsprofil der Strömung mit dem Referenzfall verglichen. In BILD 5 ist hierfür das zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsprofil in x-Richtung normiert mit der Einlassgeschwindigkeit in x-Richtung dargestellt. BILD 5 (a) zeigt das Profil des Referenzfalls und BILD 5 (b) zeigt das Ergebnis der Simulation.



(a) Referenzwert nach Breuer [3]  $v_x / v_{\text{ein}}$



(b) Simulation  $v_x / v_{\text{ein}}$

BILD 5: Vergleich der zeitlich gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten in x-Richtung

Das Geschwindigkeitsprofil um den Zylinder stimmt sehr gut mit den Referenzwerten überein und die charakteristischen Bereiche der Geschwindigkeit werden gut getroffen. Nur der Bereich in unmittelbarer Nähe der Zylinder- und Plattenwand weicht etwas vom Referenzwert ab. Dies liegt an den

hier verwendeten Wandfunktionen. Diese können die Geschwindigkeit in der Grenzschicht nicht so gut abbilden.

Als Nächstes werden die dimensionslosen Kräfte verglichen, die von dem strömenden Fluid auf die feste Platte und den festen Zylinder wirken. Es wird der Strömungswiderstand  $c_d$  in x-Richtung und der Auftriebsbeiwert  $c_l$  in y-Richtung verglichen.

$$(3) \quad c_d = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho v_{\text{ein}}^2 D b}$$

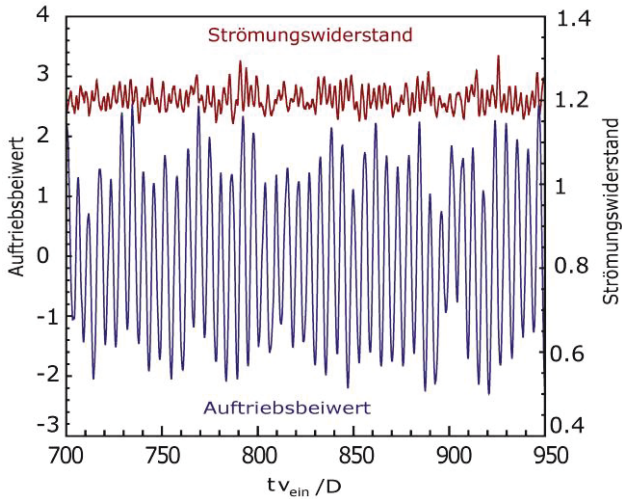
$$(4) \quad c_l = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho v_{\text{ein}}^2 D b}$$

Dabei ist  $F$  die auf die Struktur wirkende Kraft in x- und in y-Richtung,  $\rho$  ist die Dichte des Fluids,  $v_{\text{ein}}$  die Einlassgeschwindigkeit des Fluids,  $D$  der Zylinderdurchmesser und  $b$  ist die Länge des Zylinders in z-Richtung. Diese wird benötigt, da OpenFOAM® semi-zweidimensional rechnet und das Netz eine Zelle in z-Richtung besitzt.

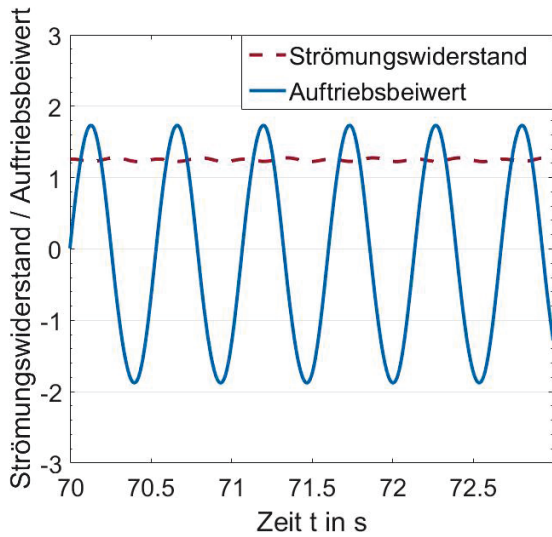
In BILD 6 werden die Ergebnisse der Simulation den Referenzwerten der LES-Rechnung von [3] gegenübergestellt. Auf der Ordinate sind jeweils Auftriebsbeiwert und Strömungswiderstand dargestellt. Auf der Abszisse in BILD 6 (a) ist die normierte Zeit dargestellt. Auf der Abszisse in BILD 6 (b) ist die Zeit aufgetragen. Es ist zu beachten, dass im Diagramm der Referenzwerte BILD 6 (a), im Gegensatz zu (b), der Auftriebsbeiwert und der Strömungswiderstand unterschiedliche Skalierungen besitzen.

Der Strömungswiderstand des Referenzfalles schwingt um einen positiven Wert von etwa 1,2. Dieser wird durch das in x-Richtung strömende Fluid induziert. Der Auftriebsbeiwert oszilliert hingegen um den Nullpunkt mit Amplituden zwischen 1 und 2,5. Diese Schwankungen entstehen durch die Wirbel, die beim Ablösen von der Struktur periodische Kräfte ausüben. Der Auftriebsbeiwert schwingt nicht exakt um den Nullpunkt, sondern um einen leicht negativen Wert, da der Zylinder im reinen Fluid-Fall exzentrisch angebracht ist.

Es ist ersichtlich, dass die Schwingungsamplituden des Strömungswiderstandes und des Auftriebsbeiwertes bei den Ergebnissen der hier durchgeführten Simulation in BILD 6 (b) viel gleichmäßiger ausfallen als bei den Referenzwerten der LES in BILD 6 (a). Das liegt an der unterschiedlichen Turbulenzmodellierung der verschiedenen Simulationen. Bei der hier durchgeführten URANS-Simulation werden im Gegensatz zur LES-Simulation im Referenzfall die turbulenten Schwankungen eliminiert und somit auch die Schwankungen der Amplituden.



(a) Referenzwerte nach Breuer [3]



(b) Simulation

BILD 6: Vergleich von Auftriebsbeiwert und Strömungswiderstand

Die mittlere Amplitude des Auftriebsbeiwertes  $c_l$  fällt bei der Simulation in dieser Arbeit um 20 % höher aus als im Referenzfall. In TAB 7 ist die mittlere Amplitude des Auftriebsbeiwertes, sowie die relative Abweichung vom Referenzwert angegeben.

Im Gegensatz zum Auftriebsbeiwert besitzt der Strömungswiderstand  $c_d$  sehr kleine Amplituden. Daher wird hier der Mittelwert verglichen. Dieser ist ebenfalls in TAB 7 zusammen mit der relativen Abweichung vom Referenzwert dargestellt. Auch der Strömungswiderstand wird durch die Simulation etwas überhöht (+4,2 %) vorhergesagt.

Als weitere Vergleichsgröße wird die Frequenz der Wirbelablösung verglichen. Diese ist identisch mit der Frequenz der Schwingung des Auftriebsbeiwertes. Sie kann durch die Strouhalzahl  $St$  als dimensionslose Größe dargestellt werden.

$$(5) \quad St = \frac{fD}{v_{\text{ein}}}$$

Mit der Frequenz  $f$ , dem Zylinderdurchmesser  $D$  und der Einlassgeschwindigkeit  $v_{\text{ein}}$ . Die Strouhalzahl ist ebenfalls in TAB 7 zusammen mit der relativen Abweichung vom Referenzwert dargestellt. Auch diese ist in der Simulation leicht erhöht (+6,9 %).

TAB 7: Vergleich der Amplituden des Auftriebsbeiwertes  $c_l$ , der Mittelwerte des Strömungswiderstandes  $c_d$  und der Strouhalzahl  $St$

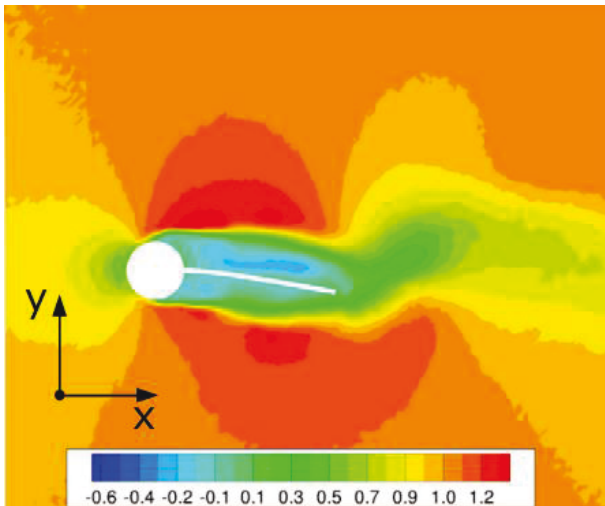
	$c_l$ Amplitude	$c_d$ Mittelwert	$St$
Referenzwert	1,5	1,2	0,175
Simulation	1,8 (+20 %)	1,25 (+4,2 %)	0,187 (+6,9 %)

Trotz der Abweichungen von Strömungswiderstand (+4,2 %), Auftriebsbeiwert (+20 %) und Strouhalzahl (+6,9 %) liefert der Strömungslöser gute Ergebnisse. Er ist somit in der Lage die Strömung, mit den hier verwendeten Einstellungen, ausreichend genau zu simulieren. Als Nächstes wird daher der gekoppelte Fall betrachtet.

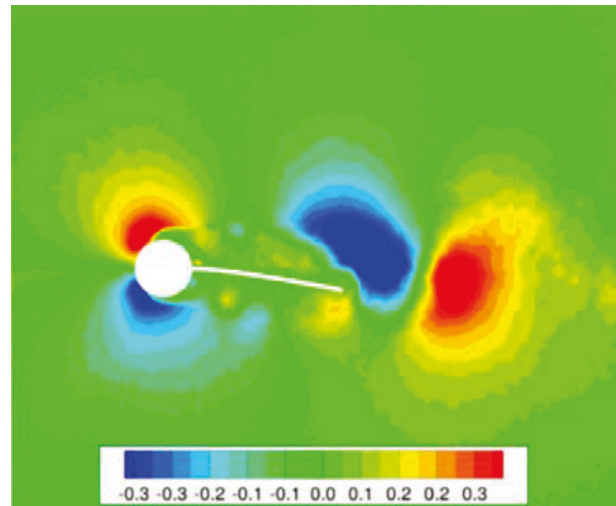
### 4.3 Ergebnisse des FSI-Referenzfalls

Zunächst wird das Geschwindigkeitsprofil der nun gekoppelten Simulation mit den Ergebnissen des Experiments verglichen. Dafür sind in BILD 7 zwei Geschwindigkeitsverläufe der Simulation, denen des Experiments nach [6] gegenübergestellt. Es sind die Geschwindigkeitsprofile der Strömung in x- und y-Richtung zum Zeitpunkt der maximalen Plattenauslenkung in negativer y-Richtung zu sehen. Die Geschwindigkeiten sind jeweils mit der Einlassgeschwindigkeit  $v_{\text{ein}}$  normiert. BILD 7 (a) und (c) zeigen die normierten Strömungsgeschwindigkeiten in x- Richtung. BILD 7 (b) und (d) zeigen die normierten Geschwindigkeiten in y-Richtung.

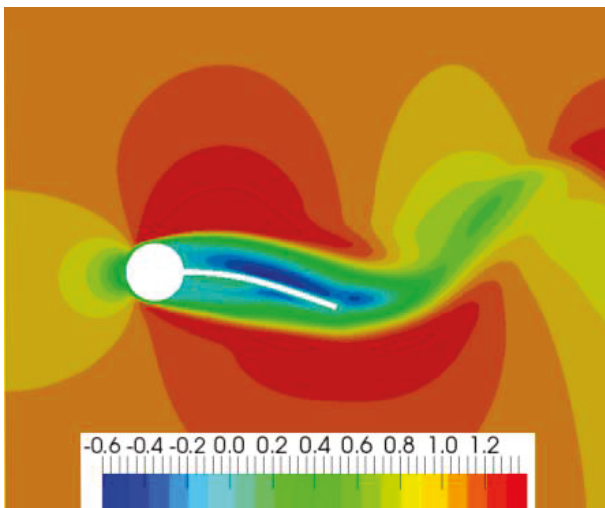




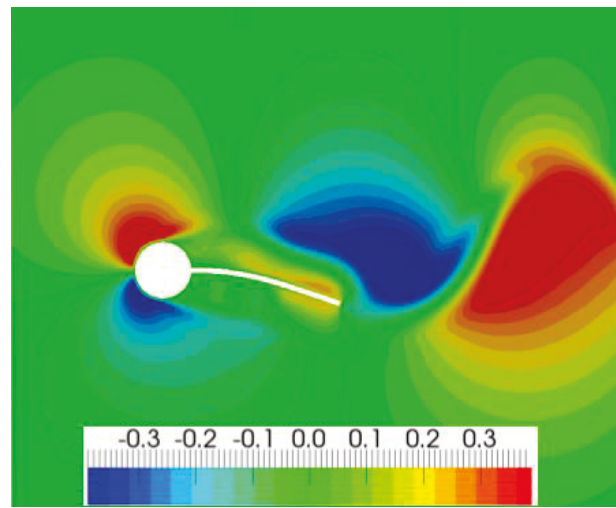
(a) Experiment [6],  $v_x/V_{ein}$



(b) Experiment [6],  $v_y/V_{ein}$



(c) Simulation,  $v_x/V_{ein}$



(d) Simulation,  $v_y/V_{ein}$

BILD 7: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten mit dem Experiment [6]

Es ist auffällig, dass die Gebiete beschleunigter beziehungsweise verzögerter Geschwindigkeiten bei den Ergebnissen der Simulation etwas größer ausfallen als bei den Ergebnissen des Experiments. Die Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung werden leicht erhöht vorhergesagt. Diese Tendenz besteht zu allen Zeitpunkten. Insgesamt wird das Geschwindigkeitsprofil im Inneren des Strömungsgebiets sehr genau getroffen und alle charakteristischen Bereiche des Geschwindigkeitsfeldes stimmen gut mit den experimentellen Ergebnissen überein. In unmittelbarer Wandnähe kann die Simulation die experimentellen Ergebnisse allerdings aufgrund der verwendeten Wandfunktionen nicht sehr genau nachbilden. Diese

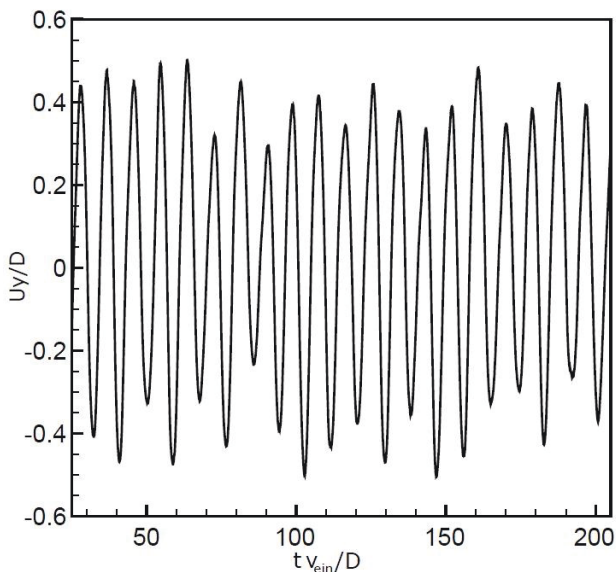
Abweichungen waren schon im Referenzfall der Strömung zu erkennen und sind kein Resultat der Kopplung. Aus dem Vergleich von BILD 7 (b) und (d) wird ersichtlich, dass sich der Ablösepunkt der Strömung am Zylinder in der Simulation etwas weiter stromabwärts befindet als beim Experiment. Der Ablösepunkt wurde im Strömungsreferenzfall nicht verglichen, da dort nur die Geschwindigkeit in x-Richtung zum Vergleich stand.

Nachdem die Geschwindigkeitsprofile verglichen wurden, wird die Plattenverschiebung den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt. Zum Vergleich wird die Verschiebung eines Punktes  $P$  auf der Platte betrachtet, welcher in der Mittelfläche

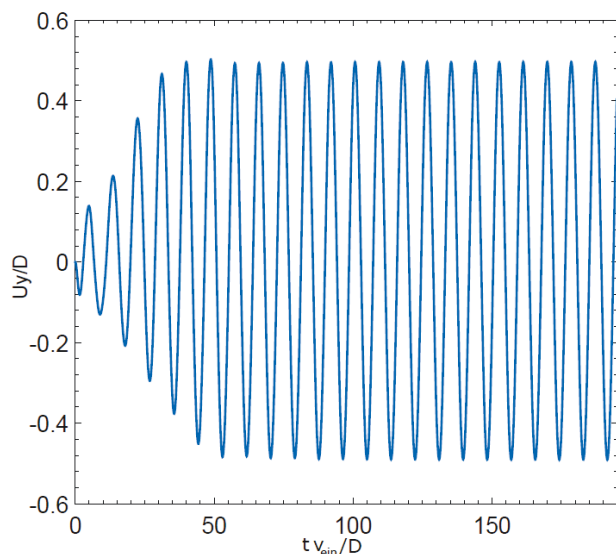


liegt und 9 mm vom hinteren Ende der Platte entfernt ist. Dieser führt periodische Bewegungen durch, was in BILD 8 abgebildet ist. BILD 8 (a) zeigt das Ergebnis des Experiments [6] und BILD 8 (b) zeigt das Ergebnis der Simulation. Auf der Ordinate ist die Verschiebung  $u_y$  des Punktes  $P$  in  $y$ -Richtung, normiert mit dem Zylinderdurchmesser  $D$ , aufgetragen. Die Abszisse entspricht der dimensionslosen Zeit, die mit der Einlassgeschwindigkeit  $v_{\text{ein}}$  und dem Zylinderdurchmesser  $D$  normiert wurde.

Die Plattenschwingung bei der Simulation fällt viel gleichmäßiger aus als dies in Realität beim Experiment der Fall ist. Die Amplituden sind bei der Simulation annähernd konstant. Das ist vergleichbar



(a) Experiment [6]



(b) Simulation

BILD 8: Vergleich der Verschiebung von Punkt  $P$

mit der gleichmäßigen Schwingung der Strömungssimulation im vorherigen Kapitel. Die Amplituden des Auftriebsbeiwertes waren dabei schon viel gleichmäßiger als im Referenzfall. Dies liegt an den fehlenden turbulenten Schwankungen des  $k$ - $\epsilon$ -Modells.

Des Weiteren fällt auf, dass die Amplitude der Simulation etwas erhöht ist. Um dies zu verdeutlichen, ist in BILD 9 die Verschiebung für eine einzige Schwingung dargestellt. Es ist die Verschiebung in  $y$ -Richtung  $u_y$  normiert mit dem Zylinderdurchmesser  $D$  über einer Phase von 0 bis  $2\pi$  dargestellt. Dies verdeutlicht noch einmal die erhöhte Amplitude, sowie die Regelmäßigkeit der Schwingung bei der Simulation. Die durchschnittliche Amplitude beträgt beim Experiment etwa 0,42. Bei der Simulation hat sie hingegen den annähernd konstanten Wert 0,49. Sie ist damit um 16,7 % erhöht. Diese Erhöhung liegt wahrscheinlich an der Lösung der Strömungsgleichungen durch den Strömungslöser. Dieser hat, wie im vorherigen Abschnitt beim reinen Fluidreferenzfall gesehen, einen zu hohen Auftriebsbeiwert vorhersagt. Der erhöhte Auftrieb erklärt eine größere Amplitude.

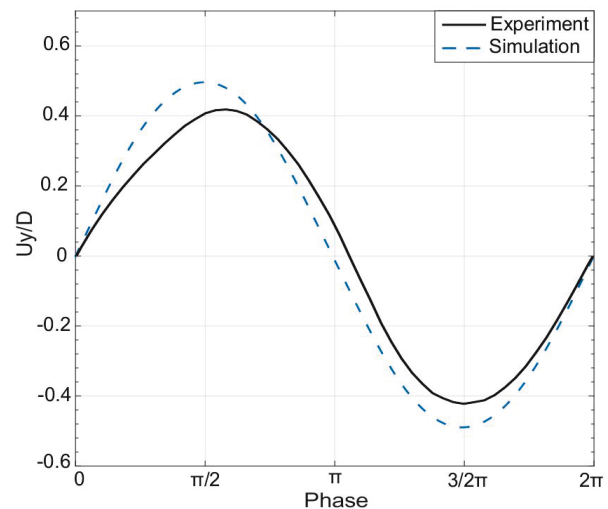


BILD 9: Vergleich der Phase der Verschiebung von Punkt  $P$  mit dem Experiment [6]

In BILD 9 ist weiterhin zu erkennen, dass die mittlere Schwingung beim Experiment nicht exakt harmonisch ist. Dies könnte laut [6] mit Asymmetrien im Versuchsaufbau oder im Material der Platte zusammenhängen und ist daher nicht Teil des Referenzfalles.

Trotz der um 16,7 % erhöhten Amplitude wird die Verschiebung sehr gut vorhergesagt. Als weitere Vergleichsgröße wird die Frequenz der Plattenschwingung betrachtet. Diese ist dimensionslos durch die Strouhalzahl  $St$  angegeben

und ist in TAB 8 zusammen mit der relativen Abweichung vom Referenzwert dargestellt.

TAB 8: Vergleich der Strouhalzahl der Plattenschwingung

	Strouhalzahl $St$
Referenzwert	0,1128
Simulation	0,1155 (+2,4%)

Auch im FSI-Fall wird die Strouhalzahl durch die Simulation leicht erhöht um +2,4% vorhergesagt. Eine höhere Frequenz passt nicht zu einer größeren Amplitude. Hier würde durch die Trägheit der Platte eher eine kleinere Frequenz erwartet werden. Jedoch war die Frequenz des Auftriebsbeiwertes bei der reinen Strömungssimulation sogar um 6,9% erhöht. Verglichen damit ist die Erhöhung gesunken, was zu der größeren Amplitude passt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Geschwindigkeiten, die Plattenauslenkungen und die Plattenschwingungsfrequenz leicht erhöht waren. Trotz dieser leichten Erhöhung stimmen die Ergebnisse jedoch sehr genau mit den Experimenten überein. Insbesondere da für die Simulation eine Turbulenzmodellierung mit Wandfunktionen verwendet wurde.

Die erhöhte Plattenauslenkung und Frequenz liegen im Strömungslöser begründet, da bei der reinen Fluidsimulation bereits der Auftriebsbeiwert und die Frequenz erhöht waren. Der Fehler liegt somit nicht bei der Kopplung des FSI-Löser. Bei einer Verbesserung der reinen Strömungsberechnung durch einen anderen Löser oder eine aufwendigere Berechnung ohne Wandfunktionen, würde sich vermutlich auch das Ergebnis im gekoppelten Fall verbessern.

#### 4.4 Rechenzeiten

Im reinen Strömungs-Fall betrug die Rechenzeit für eine Sekunde Simulationszeit mit der Zeitschrittweite  $\Delta t = 2 \times 10^{-4}$  s etwa 0,09 CPU-Stunden. Das Netz im reinen Strömungs-Fall hatte 9.000 Zellen.

In TAB 9 ist die erforderliche Rechenzeit des FSI-Falls für eine physikalische Sekunde Simulationszeit angegeben. Innerhalb dieser einen Sekunde durchläuft die Platte etwa 7 Schwingungszyklen. Das Fluidnetz im FSI-Fall hatte 15.000 Zellen. Die Rechnung ohne Kopplung entspricht einer reinen Strömungssimulation. Als Zeitschrittweite wurde  $\Delta t = 10^{-4}$  s verwendet.

TAB 9: Rechenzeit der FSI-Simulation für  $t = 1$  s

	CPU-Stunden
Ohne Kopplung	0,5
Mit Kopplung	174

Mit aktivierter Kopplung benötigte die Rechnung etwa 350 Mal länger. Diese Erhöhung liegt nicht nur an der pro Zeitschritt mehrmaligen Lösung der FSI-Iterationsschleife. Der Strömungslöser an sich benötigte im gekoppelten Fall auch etwa 5 Mal mehr Iterationen, bis die Residuen von  $10^{-5}$  für den Druck erreicht wurden.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der Arbeit war es, einen in OpenFOAM® extend vorhandenen Fluid-Struktur-Interaktions-Löser zu validieren. Da dieser zur Berechnung der Teilgebiete Strömung und Struktur auf bereits vorhandene Löser zurückgreift, wurden in einem ersten Schritt die beiden Teillöser separat validiert. Zunächst wurde der Strukturlöser überprüft. Es wurden die Verschiebungen, sowie die Schwingungsfrequenz berechnet und mit den Referenzwerten verglichen. Beide Größen stimmten mit Abweichungen von weniger als einem Prozent sehr gut mit den Vergleichsdaten überein.

Im nächsten Schritt wurde der Strömungslöser geprüft. Es wurden der Strömungswiderstand, der Auftriebsbeiwert, die Strouhalzahl und der Geschwindigkeitsverlauf mit Referenzwerten aus der Literatur verglichen. Alle Größen waren leicht erhöht, stimmten aber dennoch gut überein.

Nachdem die Teillöser validiert wurden, wurde der eigentliche Fluid-Struktur-Interaktionsfall betrachtet. Es wurde das Geschwindigkeitsprofil, die Verschiebung der Platte und die Frequenz der Plattenschwingung mit den experimentellen Ergebnissen verglichen. Alle drei Größen wurden durch die Simulation etwas zu hoch vorhergesagt. Diese erhöhten Werte liegen an den bereits im reinen Strömungsfall zu hoch vorhergesagten Werten von Auftriebsbeiwert und Strouhalzahl. Der Kopplungsprozess des FSI-Lösers funktioniert sehr gut.

Insgesamt waren die Übereinstimmungen mit den experimentellen Ergebnissen sehr gut. Besonders da aus Rechenzeitgründen zur Turbulenzmodellierung nur das einfache k- $\epsilon$ -Modell mit Wandmodellierung verwendet wurde. Die Qualität der Ergebnisse steht in einem sehr effizienten Verhältnis zum Aufwand. Der Löser liefert mit den verwendeten Einstellungen genaue Ergebnisse und kann als validiert betrachtet werden.

## 6. LITERATURANGABEN

[1] Ulrich Küttler, Wolfgang A. Wall (2008): Fixed-point fluid- structure interaction solvers with dynamic relaxation. Computational Mechanics, Bd. 43, S. 61–72.

[2] Stefan Turek, Jaroslav Hron (2006): Proposal for numerical benchmarking of fluid-structure interaction between an elastic object and laminar incompressible flow. Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Bd. 53, S. 371–385.

[3] M. Breuer, G.De Nayer, M. Münsch T. Gallinger R. Wüchner (2012): Fluid- structure interaction using a partitioned semi-implicit predictor- corrector coupling scheme for the application of large-eddy simulation. Journals of Fluids and Structures, Bd. 29, S. 107 – 130

[4] Wilcox, David C. (2006): Turbulence Modelling for CFD. DCW Industries, Inc.

[5] Philippe R. Spalart, Christopher L. Rumsey (2007): Effective Inflow Conditions for Turbulence Models in Aerodynamic Calculations. AIAA Journal, Bd. 45, S. 2544–2553.

[6] G. De Nayer, A. Kalmbach, M. Breuer S. Sicklinger R. Wüchner (2014): Flow past a cylinder with a flexible splitter plate: A complementary experimental-numerical investigation and a new FSI test case (FSI-PfS- 1a). Computers & Fluids, Bd. 99, S. 18 – 43.