

# Moderne Methoden der Computersimulation zur Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Fluid und Struktur (FSI)

**Projektleiter**  
Prof. Dr.-Ing.  
Marius Geller

**Forschungsschwerpunkt**  
Computersimulation im  
Maschinenbau

**Wiss. Mitarbeiter**  
Markus Bongert  
Norbert Kluck  
Roland Magiera

**Förderung**  
Fachhochschule  
Dortmund  
Forschungsbudget

**Kontakt**  
Prof. Dr. -Ing.  
Marius Geller  
Fachbereich  
Maschinenbau  
Fachhochschule  
Dortmund  
Sonnenstraße 96  
44139 Dortmund  
Tel.: (0231) 9112-256  
E-Mail: geller  
@fh-dortmund.de

**Abstract**  
Bei Entwicklungsprozessen in vielen Bereichen des Maschinenbaus und auch zunehmend in der Medizintechnik sind computergestützte Simulationen sowohl mit der „Finite Elemente“ Methode (FEM) als auch mit der Methode des „Computational Fluid Dynamics“ (CFD) ein integraler Bestandteil. Insbesondere kommt dabei die Kopplung mehrerer physikalischer Effekte im steigenden Maße zum Einsatz. Mit der Methode der gekoppelten Fluid-Struktur-Interaktion können Untersuchungen bzw. Optimierungen bereits in einem frühen Entwicklungsstadium an einem virtuellen Modell flexibel unter Reduktion des Zeit- und Kosteneinsatzes wirtschaftlich durchgeführt werden. Dadurch lässt sich unter anderem detaillierte Informationen über das Verhalten eines technischen bzw. biologischen Systems gewinnen.

Ergebnisse aus Simulationsrechnungen bedürfen stets einer Überprüfung, um sicher zu stellen, dass zum einen die Netzqualität ausreichend ist und zum anderen die Randbedingungen richtig gewählt worden sind. Als Validierungsbeispiel ist die mittels einer Karmann’schen Wirbelstraße induzierte Schwingung eines Stabes sowohl simuliert als auch analytisch berechnet worden. In beiden Fällen ist eine gute Übereinstimmung bezüglich der ersten Resonanzfrequenz nachgewiesen worden.

Nach dieser Bestätigung der generellen Gültigkeit von gekoppelten Simulationen ist das FSI-Verfahren auf unterschiedliche praktische Fragestellungen erfolgreich angewendet worden. Auch hier sind die Simulationsergebnisse mittels analytischer Nachrechnung bzw. durch Messungen validiert worden.

**1. Einleitung**  
Die numerische Untersuchung und Optimierung von technischen Systemen wird in vielen Bereichen der Technik angewendet wie z.B. im Maschinenbau, Raum- und Luftfahrttechnik, Medizintechnik sowie in vielen weiteren Bereichen. Sowohl die „Finite Elemente“ Methode (FEM) als auch die Methode des „Computational Fluid Dynamics“ (CFD) werden mit zunehmender Intensität innerhalb der Entwicklungsprozesse in diesen Bereichen von der Industrie sowie von der Forschung eingesetzt. Sie finden ihre Anwendung in computergestützten Simulationen.

Mit diesen Simulationen können an einem virtuellen Modell vollkommen flexibel Varianten zur Optimierungen, d.h. zur Reduktion des Zeit- und

Materialeinsatzes, untersucht bzw. wirtschaftlich durchgeführt werden. Dadurch lässt sich unter anderem die Anzahl von kostspieligen Prototypen minimieren bzw. detaillierte Informationen über das Verhalten eines technischen Systems gewinnen.

Die numerischen Simulationen reichen von der Kontinuumsmechanik über die Strömungsmechanik und die Wärmetechnik bis zu den elektromagnetischen Feldern. Aufgrund der immer weiter steigenden Rechnerleistung mit gleichzeitig fallenden Kosten, ist es möglich, mehrere physikalische Effekte miteinander zu koppeln, so dass die gegenseitige Beeinflussung untersucht werden kann. Damit wird eine immer bessere Annäherung der Simulationen an die Realität erreicht.

**2. Fluid-Struktur-Interaktion**  
Zur numerischen Simulation der gegenseitigen Beeinflussung von Fluid und Struktur müssen die Randbedingungen sowie die Ergebnisse für den gerade berechneten Zeitschritt zwischen den beiden FEM- und CFD-Solvern (in diesem Fall ANSYS und CFX) ausgetauscht werden. Die strömungsinduzierten Kräfte und Wandschubspannungen werden mittels der Interfaceflächen von der Fluid-Domain auf die Struktur-Domain übertragen. Rufen sie eine Verformung bzw. Verschiebung der Struktur hervor, geht dies im darauffolgenden Berechnungsschritt in Form eines veränderten Netzes als neue Randbedingung in die Strömungssimulation ein. Dieser Prozess wird solange fortgesetzt, bis die Konvergenzkriterien erfüllt sind (Fig. 1).

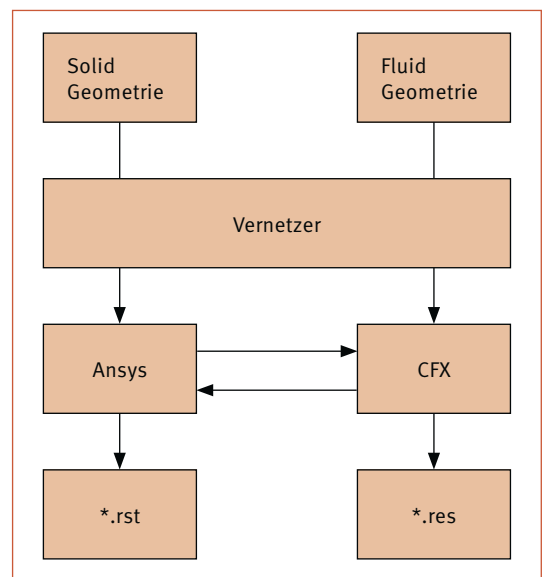


Fig. 1: Gegenseitige Beeinflussung von Fluid und Struktur

Bei der bidirektionalen FSI Methode sind die Strömungs- sowie die Strukturberechnungen derart miteinander gekoppelt, dass der CFX-Solver die auf die Struktur wirkenden Kräfte zu Ansys übergibt, während Ansys die Strukturverformung als „Mesh Displacement“ an CFX wieder zurückleitet. Der MFX-Solver dient dabei als „Koordinator“ für die getrennt – aber voneinander abhängig – durchgeführten Lösungen mit der Aufgabe, den Transfer der Kopplungsdaten zu organisieren.

Bidirektionale Berechnungen werden überwiegend mit einem sequentiellen Kopplungsalgorithmus durchgeführt (Fig. 2). Diese Kopplung garantiert, dass immer die aktuellsten Ergebnisse bzw. Lasten von einem Feld-Solver zum anderen übertragen werden. Mindestens zwei Kopplungsiterationen, sog. „Stagger Loops“, sind notwendig, um eine „Full Implizite“ Lösung für jeden Zeitschritt zu erzielen. Vorteilhaft ist der geringere Speicherbedarf, da die Daten für immer nur einen Solver im Arbeitsspeicher gehalten werden müssen.

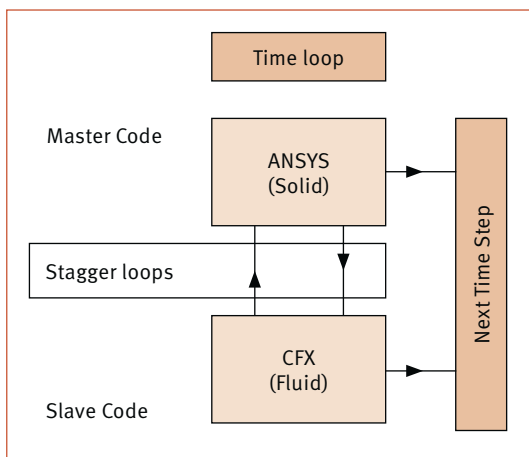


Fig. 2: Prinzip der sequentiellen Kopplung

Nachfolgend wird anhand eines einfachen Modells die Methode der bidirektionalen Fluid-Struktur-Interaktion im Detail beschrieben.

### 2.1 Strömungsinduzierte Stabschwingung

Ein dünner am Boden fixierter Stab wird hinter einer mit konstanter Geschwindigkeit quer angeströmten Platte platziert (Fig. 3). Aufgrund der periodisch veränderlichen Druckverteilung, die durch die Karman'sche Wirbelstrasse im Plattenachlauf erzeugt wird, erfährt der Stab periodisch wirkende Kräfte auf seine Außenfläche. Er wird damit zu Schwingungen angeregt.

In der Simulation kann die Anströmgeschwindigkeit variiert werden. Durch diese Geschwindigkeitsänderung verändert sich die Erregerfrequenz (Wirbelablösefrequenz).

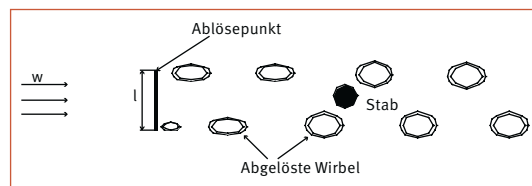


Fig. 3: Stab im Nachlauf einer angeströmten Platte

Dieser Zusammenhang wird durch die Gleichung beschrieben. Nun wird die Anströmgeschwindigkeit derart geändert, dass beim Durchfahren des Frequenzbereiches der Stab mit seiner ersten Eigenfrequenz von 21 Hz zum Schwingen angeregt wird.

#### 2.1.1 Modellierung

Im ersten Schritt müssen die Geometrien für das Solid sowie das Fluid erzeugt werden. Die Solid-Geometrie besteht aus einem einfachen Stab (Fig. 4, li.). Wichtig für die spätere Kraftübertragung

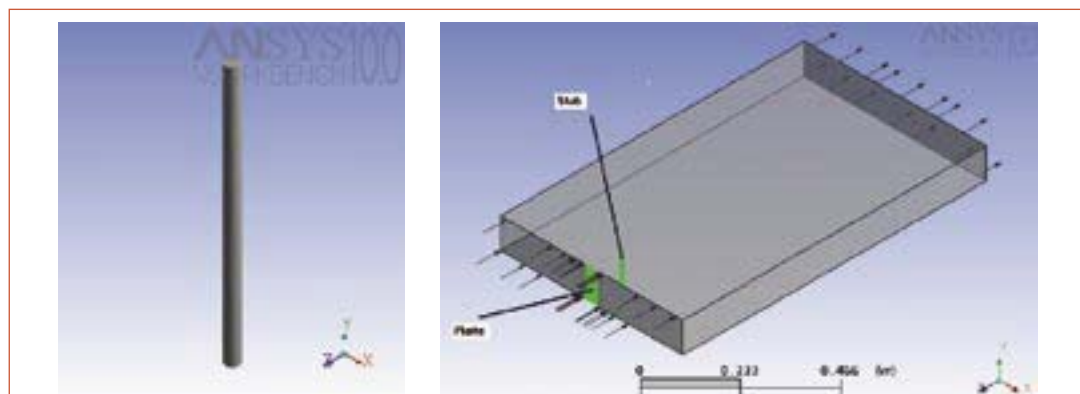


Fig. 4: Geometrien für das Solid (li.) und das Fluid (re.)

ist die Lage der Geometrie im globalen Koordinatensystem. Ihr muss die exakte Lage der Form im Windkanal entsprechen.

Das Fluid Modell entspricht dem virtuellen Windkanal (Fig. 4, re.). Die Geometrie des angeströmten Körpers wird dazu aus dem Windkanal herausgeschnitten.

### 2.1.2 Vernetzung

Das CFD Rechengitter (Fig. 5, li.) ist unter Ansys ICEM CFD generiert worden. Es besteht ausschließlich aus Hexaeder-Elementen und besitzt im Bereich zwischen Platte und Stab eine höhere Dichte (Fig. 5, re.), da die Wirbelpaare genau in diesem Bereich entstehen.

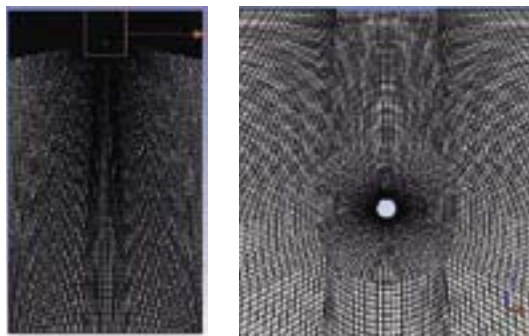


Fig. 5 Hexaedernetz Fluid (li.) und Detailansicht zwischen Platte und Stab (re.)

Ein Vergleich der beiden Netze zeigt ganz deutlich, dass Netze für eine FEM-Simulation weitaus weniger aufwändig sind als solche für eine Strömungssimulation. Aus der Erfordernis einer sehr feinen Vernetzung zur Auflösung der Grenzschicht bei einer CFD-Simulation resultiert der enorme Bedarf an Speicher- sowie CPU-Kapazität.

### 2.1.3 Numerische Berechnung

Die transiente Simulation (Durchfahren des Frequenzbereiches) benötigt zur Initialisierung eine auskonvergierte stationäre CFD Rechnung ohne Kopplung an das Solidmodell. Das Ergebnis der stationären Berechnung ist in Fig. 7 und Fig. 8 visualisiert.

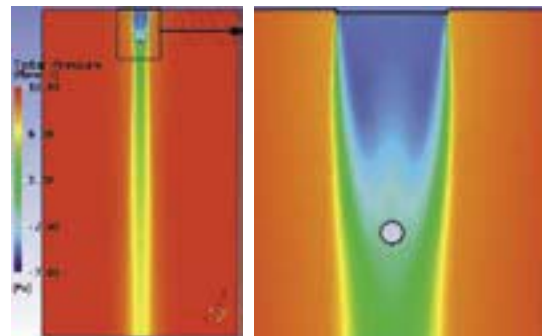


Fig. 7 Totaldruckverteilung im Nachlauf hinter der Platte (li.) und als Detailansicht mit Stab (re.)

Auch bei der Vernetzung des Solids sind Hexaeder-Elemente verwendet worden, deren Anordnung automatisch von der Software ANSYS Workbench vorgenommen worden ist (Fig. 6).

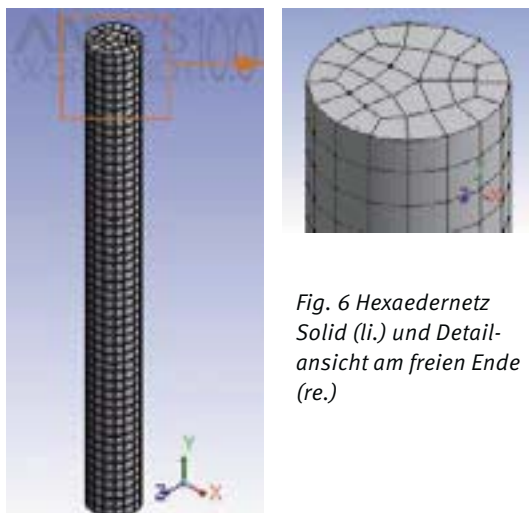


Fig. 6 Hexaedernetz Solid (li.) und Detailansicht am freien Ende (re.)

Der stationäre Zustand zeichnet sich durch die Ausbildung zweier symmetrischer, großer Wirbel direkt hinter der Platte, die gegenläufig sind, als gute Anfangsbedingung für die Karman'sche Wirbelstraße aus.

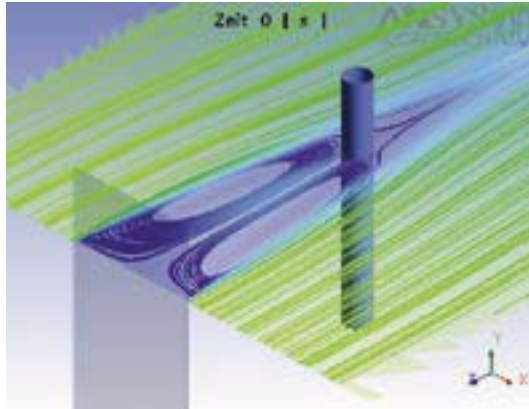


Fig. 8 Geschwindigkeitsverteilung in Form von Stromlinien

Für die transiente Simulation werden unter anderem die nachfolgenden Randbedingungen zusätzlich benötigt. Bei FSI Berechnungen tritt eine Netzbewegung auf, deren Steuerung mittels des Parameters der Netzsteifigkeit (Volume of Finite Volumes) erfolgt. Die Netzsteifigkeit ist damit von dem Volumen der Netzzellen abhängig, d.h. je kleiner das Volumen der Zelle ist, desto größer ihre Steifigkeit. Somit wird die Gefahr der Entstehung von negativen Elementen, die zur Abbruch der Simulation führen würde, minimiert.

Der Stab erhält eine feste mechanische Lagerungsbedingung an seiner Grundfläche (Fig. 9, li).

Als weitere Randbedingung wird allen physischen Grenzen des Rechenvolumens (Flächen) eine Knotenbewegungsart die sogenannte „Mesh Motion“ zugewiesen. In diesem Anwendungsbeispiel ist die Mesh Motion „Ansys Multifield“ gewählt worden. Diese Option stellt sicher, dass die Knotenbewegungen von ANSYS vorgegeben werden. Innerhalb der gekoppelten Rechnung

werden die Knotenverschiebungen unter ANSYS über die Knoten der Kopplungsfläche (Fig. 9, re) in das Fluid Modell übertragen.

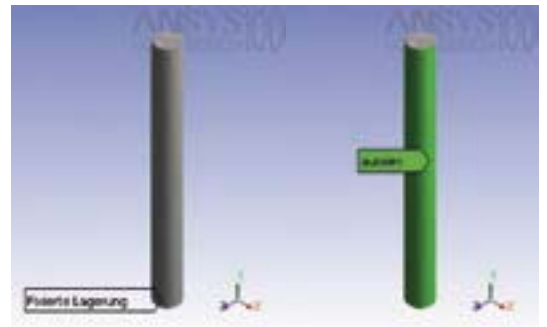


Fig. 9 Lagerung (li.) und Kopplungsfläche (re.) des Stabes

Als Auswerteparameter sind die Vergleichsspannung (von Mises) und die Gesamtverformung berechnet worden. Die Entstehung der Karman'schen Wirbelstraße wird in Fig. 10 und die voll ausgebildete Wirbelstraße in Fig. 11 visualisiert.

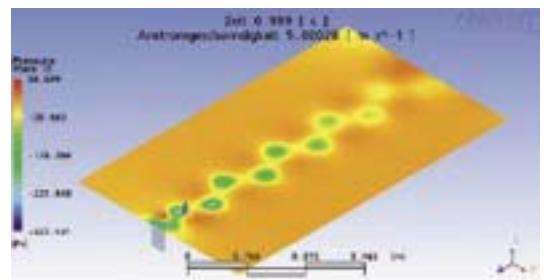


Fig. 11 voll ausgebildete Karman'sche Wirbelstraße

Im Postprocessing erfolgt die Auswertung für die Systemantwort des Stabes auf die Erregung mittels der Karman'schen Wirbelstraße. Dazu wird

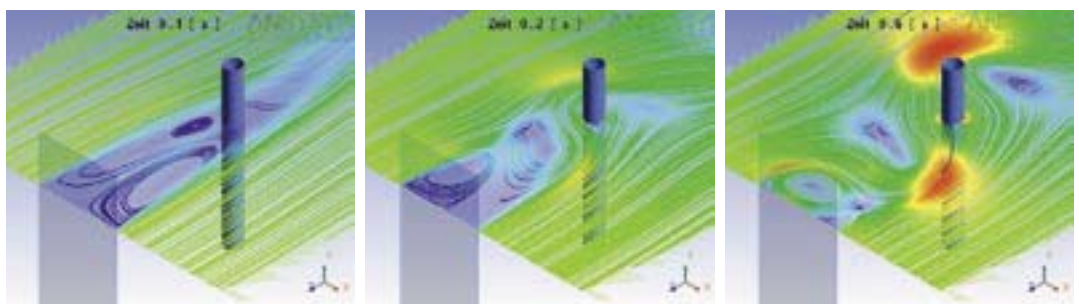


Fig. 10 Entstehungsvorgang der Karman'schen Wirbelstraße

aus der CFD-Berechnung die Erregung in x-Richtung ausgewertet. Die Amplitude und Frequenz der Kraft  $F_x$  steigen linear an. Die Frequenz bewegt sich dabei in dem Bereich von 18Hz bis 25Hz. In Fig. 12 wird der zeitliche Verlauf der Bewegung des oberen Stabendes als Reaktion auf die Fluid-Erregung dargestellt. Dabei zeigt sich, dass im Zeitintervall von 0.6s bis 2s die Amplitude der Auslenkung ansteigt, um bei der Erregerfrequenz von 21.4Hz das Maximum und damit den Resonanzfall zu erreichen.

### 3. Anwendungen

Die Methode der bidirektionalen Fluid-Struktur-Interaktion ist zum einen zur Untersuchung des Wärmeübergangs in einem Turboverdichter und zum anderen auf die medizinische Fragestellung bezüglich des Einflusses der Blutströmung auf die Gefäßwände angewendet worden.

#### 3.1 Wärmeübergang im Turboverdichter (thermisches FSI)

Aufgrund des enormen Zeit- und Speicherplatzbedarfs ist die FSI-Berechnung an dem Turboverdichter (Fig. 13) nur für den stationären Zustand berechnet worden. Dafür sind eine Solid- und

Fluid-Geometrie und anschließend jeweils ein Rechengitter von insgesamt 4,8 Millionen Knoten erzeugt worden. Dabei sind überwiegend Hexaeder-Elemente mit Ausnahme der Spirale im Solid benutzt worden. In Fig. 14 sind die vernetzten Geometrien beispielhaft für die beiden Komponenten Laufrad und Spirale dargestellt. Dabei handelt es sich von links nach rechts um das Laufrad-Solid, Laufrad-Fluid sowie um das Spirale-Fluid als Detailansicht.



Fig. 13 Turboverdichter

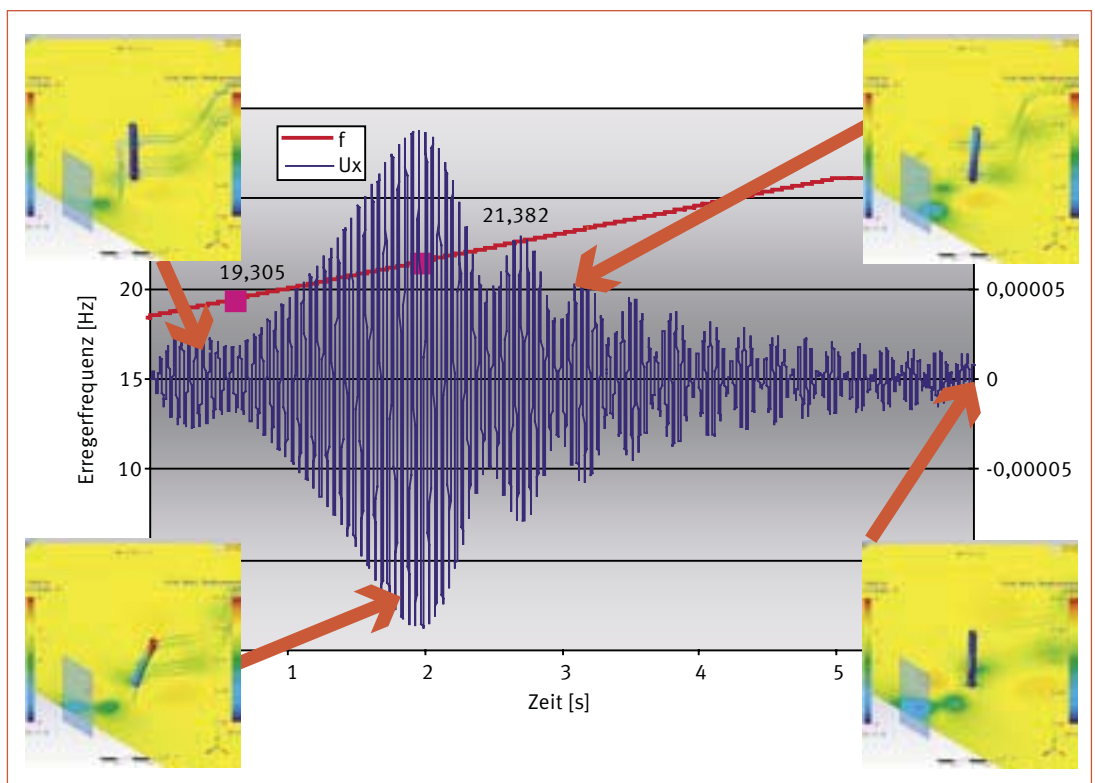


Fig. 12 Zeitliche Verläufe der Erregerfrequenz  $f$  und der Auslenkung  $U_x$



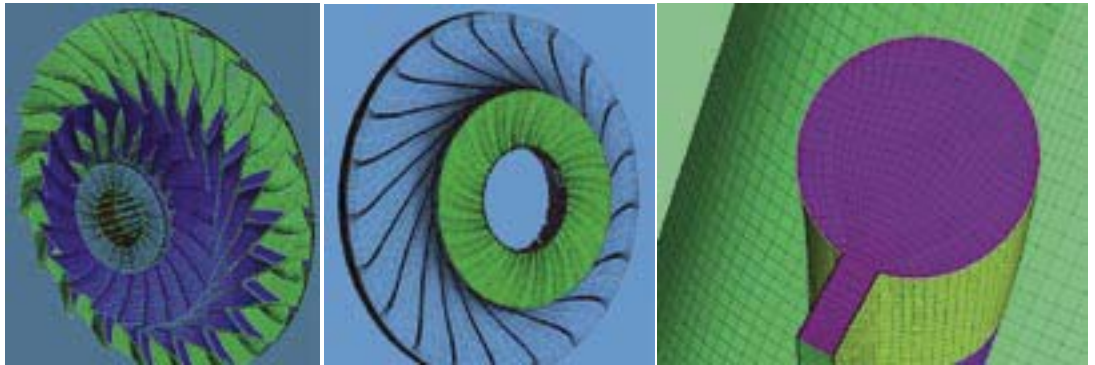


Fig. 14 Vernetzte Geometrien (Laufrad/Solid, Laufrad/Fluid, Spirale/Fluid)

An denjenigen Stellen, an denen der Wärmeübergang nicht durch das FSI selbst simuliert wird, sind die Wärmeübergangskoeffizienten und die dazugehörigen Temperaturen nach Erfahrungswerten ausgelegt und für diesen Turboverdichter vorgegeben worden. Alle weiteren Randbedingungen sind an realistischen Betriebsbedingungen angelehnt.

In der Darstellung der Fig. 15 ist die berechnete Temperaturverteilung für den gesamten Kompressor abgebildet. Sehr gut lassen sich beispielsweise Zonen mit hohen Temperaturgradienten nachweisen.

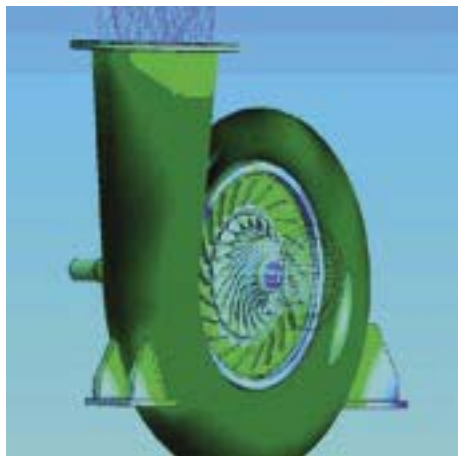


Fig. 15 Temperaturen des Kompressors (Gesamtansicht, Schnitt)

### 3.2 Statische und dynamische Festigkeit im Turboverdichter

(unidirektionales mechanisches FSI)

Das Laufrad eines Radialverdichters wird während des Arbeitsvorganges hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Durch laufende Optimierungen

steigen diese Belastungen aufgrund von veränderten Schaufelgeometrien noch weiter an. Dadurch ist es unerlässlich, die am Laufrad auftretenden Beanspruchungen, welche aus rotations- und strömungserregten Kräften bestehen, mit Hilfe von FEM Simulationen detailliert zu untersuchen. Dazu werden die mittels einer Strömungssimulation ermittelten Kräfte als Randbedingungen für die Festigkeitssimulation verwendet.

Die Auswertung bzgl. den Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  nach von Mises ist zuerst nur unter Berücksichtigung der rotationsbedingten Belastungen erfolgt. Im Filletbereich Schaufelmitte sowie an der Austrittskante im Bereich der Saugseitenmitte treten die höchsten Vergleichsspannungen ( $\sigma_v=178\text{N/mm}^2$  bzw.  $\sigma_v=213\text{N/mm}^2$  auf (Fig. 16).

Aufgrund der durch die Fliehkraft hervorgerufenen Verformungen versucht sich die Schaufel am Austritt aufzurichten. Dabei wird sie aber durch den großen Querschnitt des Schaufelfußes gehindert, so dass sich die Schaufel erst im mittleren Bereich der Austrittskante, aufgrund des dortigen geringeren Querschnittes, verformen kann und somit große Druckspannungen in diesem Bereich auftreten.

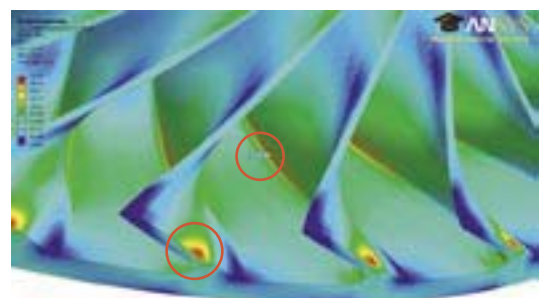


Fig. 16 von Mises Vergleichsspannung ohne FSI (Seitenansicht)

Die Auswertung der FEM Simulationen mit unidirektionaler FSI zeigen an gleicher Stelle die Maximalwerte der Vergleichsspannungen. Deutliche Unterschiede sind dagegen bei den Vergleichsspannungen an der Schaufeleintrittskante zu erkennen (Fig. 17). Die Abweichung beträgt bei den FEM Simulationen mit FSI ungefähr zwischen 10% und 12% zur FEM Simulation ohne FSI. Auch die Gesamtverformung nimmt bei Berücksichtigung der Strömungskräfte um bis zu 3% zu.

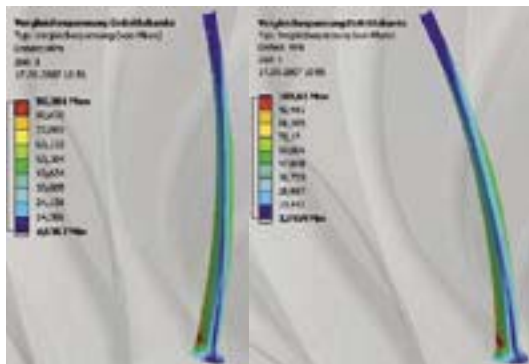


Fig. 17 von Mises Vergleichsspannung an der Eintrittskante (li.: ohne FSI/re.: mit FSI)

Neben den Spannungen und den daraus resultierenden Verformungen interessieren im zunehmenden Maße auch die Schwingungen der einzelnen Bauteile einer Turbomaschine. Verformungen von Welle und Laufrad durch Schwingungen können ein Anstreifen der rotierenden Teile an feststehende Gehäuseteile verursachen. Ebenso kann bei hochbelasteten Laufrädern ein Schaufelbruch durch Materialermüdung infolge von Schaufelschwingungen auftreten. In beiden Fällen führt dies nicht selten zur Zerstörung der Maschine.

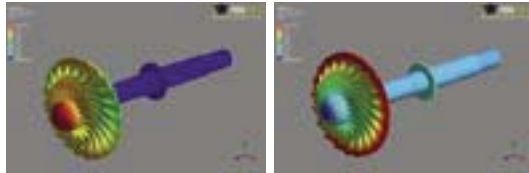
Daher ist es bereits bei der Auslegung der Bauteile immens wichtig, Kenntnis über ihr dynamisches Verhalten zu erlangen. Sollen die Schaufelschwingungen eines Radiallaufrades, unter Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung der Schaufeln, die über die Radscheibe gekoppelt sind, berechnet werden, darf im Gegensatz zur rein statischen Festigkeitsanalyse nur ein 360°-Grad Modell verwendet werden.

Nachfolgend werden die bei den durchgeführten Simulationen ermittelten Eigenfrequenzen und Eigenformen der Baugruppe (Fig. 18), bestehend aus Spinner, Laufrad und Welle des Turboverdichters (Fig. 13) in Fig. 19 und Fig. 20 visualisiert.

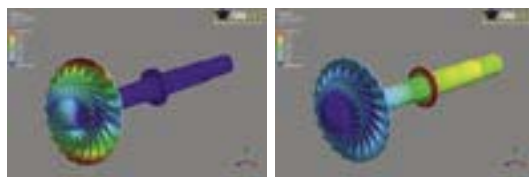
Die 1. Eigenform der Baugruppe zeigt eine Biegeschwingung der ersten Wellenabsätze zusammen mit dem Laufrad in einer Ebene. Dagegen ist die 3. Eigenform eine Torsionsschwingung von Welle und Laufrad. Dabei schwingt das Laufrad stärker als die Welle. Eine Biegeschwingung der vorderen Wellenabsätze und des Laufrades in der Ebene der 1. Eigenform zeigt die 4. Eigenform. Bei dieser Schwingung ist ein Schwingungsknoten auf Höhe des Laufradeintritts vorhanden. Die 6. Eigenform zeigt eine Torsionsschwingung von Laufrad und Welle. Hierbei schwingt die Welle an ihrem Ende stärker als der restliche Teil der Welle und als das Laufrad. Bei der 8. Eigenform stellen sich Schaufelschwingungen ein, die der 1. Eigenform des Laufradsektors ähneln, während sich die übrigen Teile in Ruhe befinden. Die 10. Eigenform der Baugruppe zeigt eine Biegeschwingung des Wellenendes in der Ebene der 1. Eigenform. Die übrigen Wellenabsätze und das Laufrad schwingen dagegen nicht. Diese Schwingung des Wellenendes entspricht der 4. Eigenform der Welle.



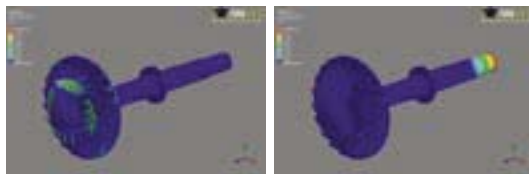
Fig. 18 Baugruppe des Turboverdichters (li. als Detail der Maschine, re. mit Randbedingungen)



Baugruppe m. Rot.: 1. Eigenform (205Hz) (links)  
 Baugruppe m. Rot.: 3. Eigenform (265Hz) (rechts)

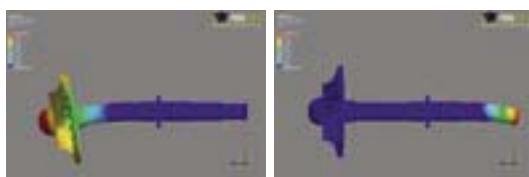


Baugruppe m. Rot.: 4. Eigenform (997Hz) (links)  
 Baugruppe m. Rot.: 6. Eigenform (1067Hz) (rechts)



Baugruppe m. Rot.: 8. Eigenform (1577Hz) (links)  
 Baugruppe m. Rot.: 10. Eigenform (1580Hz) (rechts)

**Fig. 19: Eigenformen und Eigenfrequenzen der Baugruppe des Turboverdichters**



Baugruppe m. Rot.: 1. Eigenform (205Hz) (links)  
 Baugruppe m. Rot.: 10. Eigenform (1580Hz) (rechts)

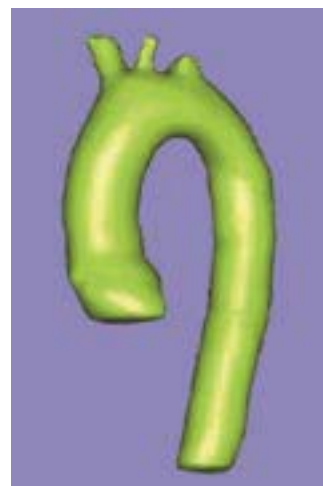
**Fig. 20 Eigenformen und Eigenfrequenzen der Baugruppe des Turboverdichters (Seitenansicht)**

Durch dieses Beispiel kann die Wichtigkeit von solchen Simulationen verdeutlicht werden. Die 3. Eigenfrequenz der Baugruppe liegt mit 265 Hz nur 2 Hz unterhalb der Betriebsfrequenz des Kompressors. Ein Maschinenschaden schon nach kurzer Betriebsdauer des Kompressors wäre die Folge, wenn die Maschine mit diesem Design in Betrieb genommen werden würde.

### 3.3 Blutströmung in der Aorta ascendens (bidirektionales mechanisches FSI)

In dieser Studie dagegen wird statt eines Computertomograph (CT) der Scan eines Kernspintomographen (MRT) verwendet. Für einen festgelegten Zeitpunkt wird ein vollständiger 3D-Datenblock, der das gesamte Herz und die thorakale Aorta beinhaltet, axial akquiriert.

Damit die Informationen über die individuelle Anatomie, die nach dem Scannen in 3D im DICOM-Format vorliegen, für eine weitergehende Nutzung zur Verfügung stehen, müssen sie mittels kommerzieller Software bearbeitet werden. Das so erzeugte geometrische Modell wird in das CAD-Datenformat „STL“ (Stereolithographie Format) exportiert. Dieser patientenspezifische Datensatz bildet die Basis für die weitergehenden CFD (Computational Fluid Dynamics) oder CSM (Computational Structural Mechanics) Untersuchungen (Fig. 21). Aufgrund des STL-Datenformates kann mittels der marktgängigen Rapid Prototyping Systemen ein 3D-Modell der gescannten Anatomie erzeugt werden. In Abhängigkeit von dem verwendeten RP-System sind sogar flexible 3D-Modelle für in vitro – Untersuchungen möglich.



**Fig. 21:**  
 CAD-Modell  
 der Aorta

Auf Basis des CAD-Modells, das gleichzeitig auch das Fluid-Modell (Fig. 22, li.) ist, wird durch das Aufdicken des Solid-Modells erzeugt. Als Wanddicke für die Aorta ascendens ist der durchschnittliche Wert von 1.54 mm gewählt worden (Fig. 22, re.). In Fig. 22, re. ist die Blickrichtung von der Aorta ascendens in Richtung des Aortenbogens. Die innere Fläche des Solid-Modells stellt die Kontaktfläche zwischen Fluid und Solid dar.



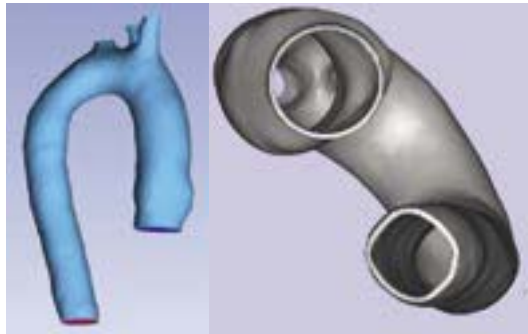


Fig. 22: Fluid-Modell (li.), Solid-Modell (re.)

Ausgehend von einem Oberflächennetz des Fluid-Modells, das aus tetrahedralen Elementen besteht und somit die Kontur der Aorta bestmöglich wiedergibt, ist ein hybrides Volumennetz erzeugt worden. Es besteht aus Hexa-Elementen für die Kernströmung, prismatischen Elementen für die Grenzschicht sowie Tetra-Elementen zwischen den Schichten (Fig. 23, li./mi.). Das Volumennetz für das Solid-Modell besteht aus tetrahedralen Elementen (Fig. 23, re.).

Für die transiente bidirektionale Fluid-Struktur-Interaktion sind physiologische Randbedingungen sowohl für das Fluid- als auch für das Solid-Modell gewählt worden. Damit ist sichergestellt, dass das elastische Verhalten der Aorta (Windkessel effekt) korrekt simuliert wird. Ein Vergleich mit Messungen im Kernspintomographen (MRT) bestätigen die Simulationsergebnisse.

Nachfolgend wird in Fig. 24 zu ausgewählten Zeitpunkten exemplarisch die Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt der Aorta als Ergebnis der transienten Simulation dargestellt. In der oberen Bilderreihe ist der jeweilige Zeitpunkt der Simulation mittels eines roten Punktes im Diagramm, das den zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit innerhalb eines Zyklus des Herzens repräsentiert, kenntlich gemacht. Mit der simulierten Geschwindigkeitsverteilung liegt gleichzeitig eine Vielzahl von weiteren strömungsmechanischen Größen vor. Beispielsweise können hohe Schubspannungen Hinweise auf blutzerstörende Effekte (Hämolyse) liefern. Hohe lokale Drücke stellen eine große Gefahr für die Entstehung von Aussackungen der Arterienwand (Aneurysmen) dar.

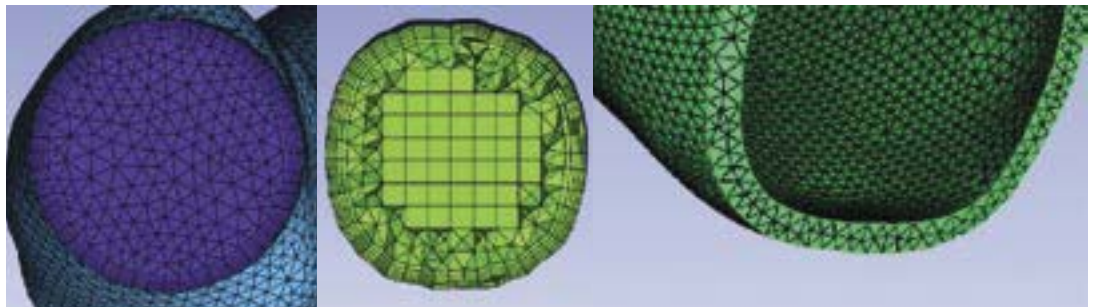


Fig. 23: Netz für das Fluid-Modell (li./mi.) sowie für das Solid-Modell (re.)

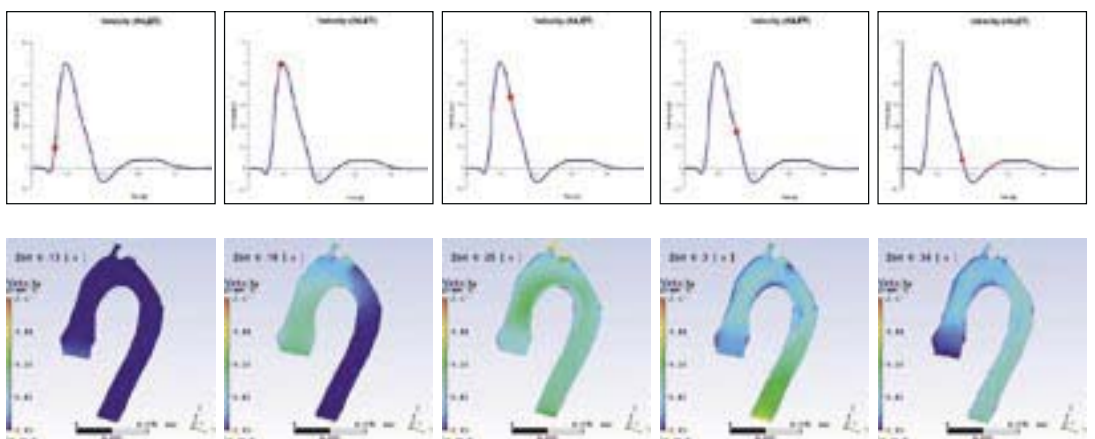


Fig. 24: Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt