

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht
Forschungsvorhaben FKZ:
03ET7020D



COOREFLEX-TURBO

Verbundprojekt:

Vorhaben-Nr.: 4.1.7 D

AUSLEGUNG VON DECKBANDKOPPLUNGEN BEI SELBST- UND
FREMDERREGUNG. TEIL D: SIMULATION UND ANALYSE VON
GRENZZYKLUSCHWINGUNGEN MITTELS NICHTLINEARER
VERFAHREN IM ZEITBEREICH

Zeitraum: 01.10.2013 – 30.11.2017

Projektleitung: Christian Frey

Bearbeiter: Christian Berthold

Forschungsstelle: DLR

Industriepartner: MTU Aero Engines AG

Autor: Christian Berthold

Datum: 19.04.2018

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund
eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim
Autor

Förderkennzeichen: 03ET7020D

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung	3
Stand der Wissenschaft und Technik	3
Vorhabens Ziele	4
Arbeitspakete	4
AP1 Erweiterung des Netzverformungsmoduls	4
AP2 Analyse von Deckbändern.....	6
AP3 Verfahrenskopplung	7
Modales FSI-Modul	8
TRACE + CalculiX FSI-Modul.....	9
AP4 Validierung und Funktionstests	11
Verwertung.....	21
Zusammenfassung.....	21
Literaturverzeichnis	22
Abbildungsverzeichnis.....	23

EINLEITUNG

Deutschland hat mit dem Energiekonzept der Bundesregierung im Herbst 2010 eine Energiewende hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung postuliert. Danach soll der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung von heute 17 Prozent auf 80 Prozent bis 2050 zunehmen. Hinzu kommt der jüngst beschlossene Ausstieg aus der Kernenergie bereits bis zum Jahr 2022. Die Auswirkungen auf die Nachfrage nach klimafreundlichen, zuverlässigen, flexiblen und bezahlbaren Stromerzeugungstechnologien werden dadurch positiv beeinflusst werden. Vor allem moderne konventionelle Kraftwerke werden als Garant einer umweltfreundlichen und kontinuierlich verfügbaren Energieumwandlung zunehmend in der Verantwortung stehen. Die eingesetzten fossil befeuerten Kraftwerke sollten mit hoher Effizienz den Brennstoff verstromen können. Darüber hinaus ergeben sich zusätzliche Anforderungen durch einen flexiblen Betrieb zu erweiterten Betriebsbereichen und verbesserten Teillastwirkungsgraden. Bedingt durch Witterungseinflüsse ändert sich der Anteil der ins Netz eingespeisten Windkraft bzw. der Photovoltaik in der Regel schnell und dadurch müssen Kraftwerke zusätzlich hohe Laständerungsgeschwindigkeiten realisieren können. Dieses Vorhaben ist Teil des Verbundprojektes COOREFLEX-turbo der Arbeitsgemeinschaft Turbomaschinen (AG Turbo). Dieses Projekt liefert Beiträge zur Sicherstellung der erforderlichen aerodynamischen und mechanischen Eigenschaften bei einem hochflexiblen Kraftwerksbetrieb.

Selbsterregte Schwingungen sind im Bereich von Endstufenbeschaufelungen in Form von so genannten Flatter-Schwingungen von großer technischer Bedeutung, die einen limitierenden Faktor bei der Entwicklung effizienter und robuster Beschaufelungen darstellen [1]. Kernziel ist es dabei, zu beurteilen, unter welchen Voraussetzungen die dissipativen Reibkräfte im Deckbandkontakt zu stabilen oder instabilen Grenzyklen führen und die aufklingenden Schwingungsamplituden trotz negativer aerodynamischer Dämpfung begrenzt bleiben. Dabei ist die Bestimmung und Bewertung der sich einstellenden Grenzyklusschwingungen von Interesse wobei nichtlineare Strömungsphänomene in kritischen Betriebspunkten zunehmend von Interesse ist [2].

STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Im industriellen Designprozess werden zur Bewertung des Schwingungsverhaltens von Bauteilen welche von einer Strömung umgeben sind oft Ein-Wege-Kopplungs-Verfahren benutzt. Zur Bewertung der Strömungsantwort wird die Struktur mit einer vorgegebenen Bewegung beaufschlagt und die Antwort der Strömung auf diese Bewegung ausgewertet [2], [3]. Dazu werden oft lineare Methoden [4], benutzt, weil diese oft eine große Zeitersparnis mit sich bringen. Auf der Strukturseite ist wiederum die Strömungseinwirkung fest vorgeschrieben oder unterliegt einer linearen Annahme [5]. Effiziente und robuste Methoden um die Wechselwirkung zwischen Festkörper und Fluid des gekoppelten Systems speziell für das Turbomaschinendesign zu erfassen sind jedoch kaum verfügbar. Außerdem können transiente Vorgänge (wie z.B. ein Pumpstoß im Verdichter) mit den typischen Designmethoden nicht simuliert werden. Des Weiteren ist der aerodynamische Einfluss von Deckbändern mit einer Fügestelle auf des Flatterverhalten von Turbinenschaufeln bis jetzt vernachlässigt.

VORHABENS ZIELE

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens zur nichtlinearen und transienten Simulation von Grenzyklusschwingungen (Limit-Cycle-Oscillations) unter Einbeziehung der Wechselwirkung zwischen Festkörper und umgebendem Fluid. Um dies zu ermöglichen, ist eine Laufzeit-Kopplung des Strömungslösers TRACE [6] mit dem Finite Elemente Programm CalculiX [7] für eine zeitgenau aufgelöste Simulation mit nichtlinearen Strömungsphänomenen und nichtlinearen strukturmechanischen Phänomenen zu realisieren. Hierzu sind entsprechende Schnittstellen und eine Steuerungsschale zu entwickeln, die den Parallelablauf und die Kommunikation zwischen den Verfahren ermöglichen soll. Insbesondere soll mit den entwickelten Verfahren der Einfluss von Deckbändern und nichtlinearen Deckbandkontakten auf das Stabilitätsverhalten von Schaufel analysiert werden. Des Weiteren, um die komplexen Schwingungsformen von Deckbändern abbilden zu können, müssen das Simulationsverfahren TRACE und seine Vorprozesse erweitert werden, um mögliche Unstetigkeit an Kontaktflächen bearbeiten zu können. Ferner soll eine einfache modale Fluid-Struktur-Kopplung innerhalb von TRACE implementiert werden.

Mit dem entwickelten Verfahren soll die numerische Analyse der zuvor genannten Fragestellungen möglich werden. Darüber hinaus soll mit dem gekoppelten Verfahren die Validierung vereinfachter Modelle unterstützt werden. Die Arbeitsziele tragen somit dazu bei, den sicheren Betrieb von Triebwerken durch Transiente und im Teillastbereich zu erhöhen.

ARBEITSPAKETE

AP1 ERWEITERUNG DES NETZVERFORMUNGSMODULS

Motivation, das Netzverformungsmodul zu erweitern ist, den Einfluss von Deckbändern bei Turbinenschaufeln zu quantifizieren. Dieser Einfluss wurde bis jetzt vernachlässigt. Damit dies für alle Umstände möglich ist, muss das Netzverformungsmodul für diskontinuierliche Oberflächenverformungen erweitert werden. In Abbildung 1 sind exemplarisch die Oberfläche des Strukturmodells (rot) und die CFD-Vernetzung von zwei Turbinenschaufeln einer Schaufelreihe dargestellt. Das Strukturmodell hat ein Deckband (obere rote Fläche), welches eine geschwungenen Fügestelle besitzt (dicke schwarze Linie).

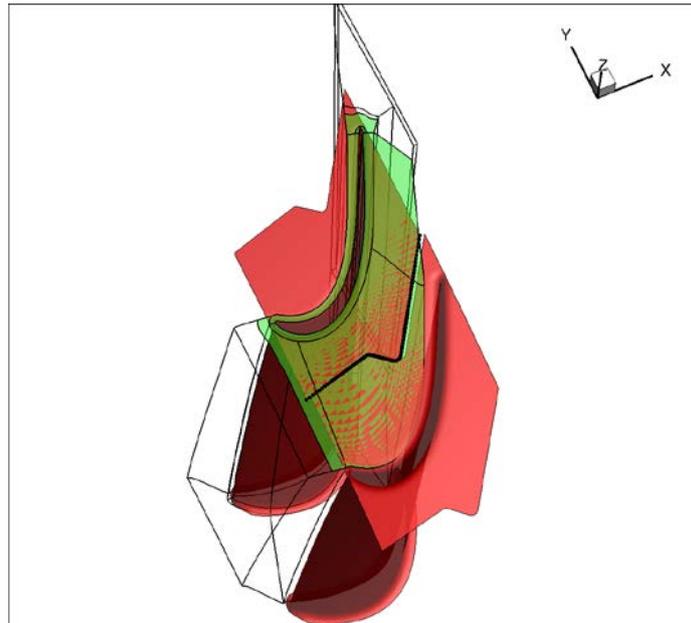


Abbildung 1: FE-Netzoberfläche (rot) und CFD-Vernetzung (dünne schwarze Linien, grüne Oberfläche)

An der Fügestelle kann eine diskontinuierliche Verformung der Struktur stattfinden, welche vor der TRACE Simulation geglättet werden muss damit einzelne Zellen des CFD-Netz nicht degeneriert werden. Dieser generische Turbinentestfall wurde von dem Projektpartner MTU Aeroengines AG zur Verfügung gestellt. Mit den sog. Freien Randbedingungen wurde ein Konzept für die Einbeziehung der Deckbandbewegungen bei Turbinenflattern mit Deckbändern entwickelt. Die für dieses Konzept notwendigen Prozessschritte sind i) eine Markierung der Festkörperflächen als freie Ränder, ii) die Berechnung einer elliptischen Netzdeformation nach [9] mit entsprechender Randbedingung.

Beide Prozessschritte wurden in das Präprozessstool PREP implementiert. Dafür muss ein Strukturmodell einer Schaufel wie in Abbildung 2 um die Rotationsachse entsprechende kopiert und gedreht werden, sodass die gesamte Deckbandfläche des CFD-Netzes abgedeckt wird.

Nachdem die Oberflächendeformation auf das CFD-Netz interpoliert wurde, können mit einem nachfolgenden Schritt entlang der Diskontinuität (siehe Abbildung 3) Zellen nahe der Diskontinuität markiert werden. Für diese Zellen wird eine Neumann Randbedingung zum Berechnen der gesamten 3D-Netzdeformation angewendet (sog. Freie Randbedingungen). Dazu muss die Diskontinuität in Form einer Linie bzw. Punkteabfolge als Datei gespeichert werden. Außerdem kann die maximale Reichweite zwischen dieser Linie und den CFD-Zellen spezifiziert werden (in Abbildung 3 der rote Bereich).

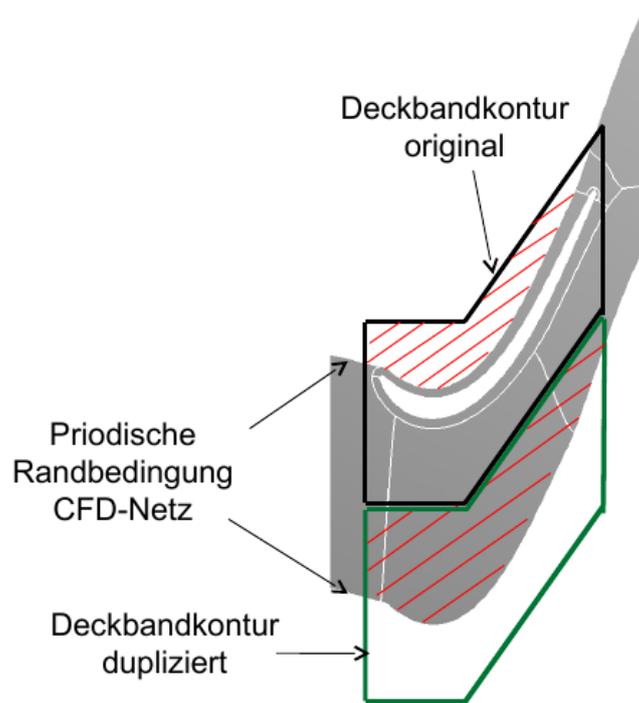


Abbildung 2: Deckbandoberflächen Struktur- und CFD-Netz

Für die Beschleunigung des Netzdeformationslösers (basierend auf einem GMRES-Löser) wurde das Conjugated Gradients-Verfahren (CG) als alternativer Löser implementiert und getestet. Es stellte sich jedoch heraus, dass das CG-Verfahren nicht immer stabil genug läuft und keine entscheidende Effizienzsteigerung mit sich brachte. Aus diesem Grund wurde diese Entwicklung nicht übernommen.



Abbildung 3: Ausgewählte Zellen des CFD-Netzes entlang der Diskontinuität (weiße Linie)

AP2 ANALYSE VON DECKBÄNDERN

In diesem Arbeitspaket soll ein quantitativer Einfluss von Deckbändern auf das Flatterverhalten einer Turbinenschaufelreihe ermittelt werden. Um dies zu erreichen wurde die Flatterkurve des Turbinentestfalls aus AP 1 mit und ohne Einfluss des Deckbandes gerechnet. Abbildung 4 zeigt die Flatterkurve ohne Deckbandeinfluss und mit Deckbandeinfluss. Bei zwei Rechnungen mit Deckbandeinfluss ($r=1\text{mm}$ und $r=2\text{mm}$) wurde der Bereich der Glättung für die Verformung geändert (max. Abstand zwischen spezifizierter Linie und markierten Zellen). Der Einfluss des Deckbands auf die Flatterkurve ist erheblich (Vergleich rote Linie zu den anderen), die Variation des Glättungsbereichs wirkt sich jedoch nicht viel merkbar auf das Ergebnis aus (Vergleiche blaue mit grüner Linie).

Es kann also festgehalten werden, dass der Einfluss von Deckbändern auf das Flatterverhalten von Turbinenstufen nicht vernachlässigt werden sollte und im obigen Testfall zu einer Verschiebung der Flatterkurve in Richtung der Flattergrenze geführt hat.

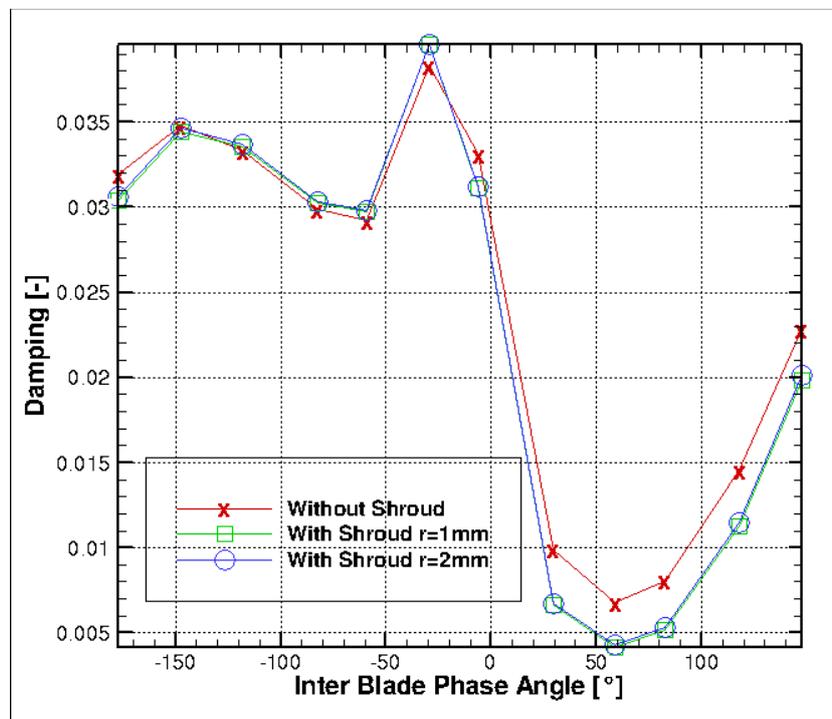


Abbildung 4: Flatterkurve der Turbinenschaufel mit und ohne Deckbandeinfluss

AP3 VERFAHRENSKOPPLUNG

Für den Strömungslöser TRACE wurden zwei Kopplungsverfahren implementiert. Das erste Kopplungsverfahren („modales FSI-Modul“) ist vollständig in TRACE integriert und benötigt keine externe Software für den strukturellen Teil. Dazu werden strukturelle Eigenmoden in TRACE eingelesen (mit Hilfe des Präprozess-Tools PREP) und die modalen Bewegungsgleichungen in TRACE zeitlich gekoppelt integriert. Dies ermöglicht es, einfache

(strukturell lineare) Fluid-Struktur Interaktionsprobleme zu simulieren und kann als Verifizierungswerkzeug benutzt werden.

Das zweite Kopplungsverfahren ist die Kombination des Strömungslösers TRACE und des Strukturlösers CalculiX. Beide Löser können miteinander kommunizieren, indem CalculiX als aufrufbare C-Funktion zusammen mit TRACE kompiliert wird. Dies hat sich als einfacher in der technischen Umsetzung erwiesen, als (wie ursprünglich geplant) eine Kopplungsschale zwischen TRACE und CalculiX basierend auf Python zu entwickeln.

Bei beiden Kopplungsverfahren wird eine serielle Gauß-Seidel Kopplungsmethode [8] eingesetzt, bei der beide Löser nacheinander in einer Schleife ausgeführt werden, um einen physikalischen Zeitschritt zu rechnen. Dazu wird wie in Abbildung 5 angedeutet die Strömungslösung für den neuen Zeitschritt q_{n+1} extrapoliert (1) und an den Strukturlöser weitergegeben, welcher dann die strukturelle Deformation x_{n+1} für den nächsten Zeitschritt löst (2). Anschließend wird die Deformation dem Strömungslöser übergeben (3) welcher den korrigierten Strömungszustand q_{n+1} für den neuen Zeitschritt berechnet. Dieser iterative Algorithmus kann beliebig oft wiederholt werden, bis die physikalische Lösung genügend gut konvergiert ist und sich die Strömungs- und Strukturlösung sich bei aufeinander folgenden Iterationen kaum noch ändert. Die Extrapolation von q_{n+1} muss nur bei der ersten Iteration eines physikalischen Zeitschritts erfolgen, bei den darauf folgenden Iterationen werden die Daten der jeweils letzten Iteration benutzt. Auch ist es möglich, nur eine einzige Iteration pro physikalischen Zeitschritt zu benutzen (in der Literatur: „lose Kopplung“).

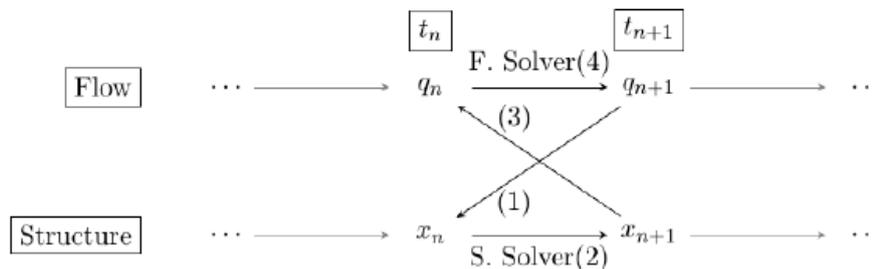


Abbildung 5: Kopplungsschema

MODALES FSI-MODUL

Für das modale FSI-Modul in TRACE ist der obige Kopplungsalgorithmus mit fest eingestellten Parametern in TRACE implementiert was sich als sehr robust erwiesen hat. Für dieses Modul musste in TRACE die numerische Integration der modalen Bewegungsgleichung

$$\ddot{y}m + \dot{y}d + yk = f_{aero}$$

implementiert werden (y modale Koordinate; m, d, k modale Masse/Dämpfung/Steifigkeit; f_{aero} modale aerodynamische Kraft) [9]. Die modale aerodynamische Kraft wird vom Strömungslöser berechnet und die modale Koordinate an den Strömungslöser zurückgegeben, welcher diese dann in eine Oberflächendeformation übersetzt. Die dazu nötigen Funktionen wie z.B. das Berechnen der CFD-Netzdeformation oder das Interpolieren von Eigenmodendaten aus einer Strukturanalyse auf ein TRACE-Setup waren zum großen Teil bereits in PREP und TRACE verfügbar und mussten nur angepasst werden.

TRACE + CALCULIX FSI-MODUL

Für das TRACE + CalculiX FSI-Modul ist der zuvor beschriebene Kopplungsalgorithmus konfigurierbar und es besteht die Möglichkeit einen Relaxations-Parameter zu spezifizieren. Außerdem wurde zusätzlich ein Kopplungsalgorithmus nach Aitken implementiert.

Das Interface zwischen TRACE und CalculiX wurde so implementiert, dass TRACE auf das Oberflächennetz des Strukturnetzes zugreifen und die Oberflächentopologie einlesen kann. Dies wird in TRACE 1.) zur Berechnung der Transformationsmatrix und 2.) zur Berechnung der Interpolationsmatrizen für die Übertragung der Oberflächendaten zwischen Strömungs- und Strukturnetz benötigt. Um diese Funktionalität bereitzustellen wurden viele existierende Routinen aus PREP nach TRACE umgezogen und erweitert. Dies erlaubt es, den FSI-Löser ohne einen Präprozess auszuführen. Das CalculiX-Setup zur Simulation der Strukturmechanik muss einige Eigenschaften erfüllen, welche zuvor z.B. mit dem CalculiX Präprozess-Tool „CalculiX-Graphics („cgx““) erzeugt und eingestellt werden können. An der Fluid-Struktur-Schnittstelle werden auf der Strukturseite Tetra- und Hexaeder-Finite-Elemente 1. und 2. Ordnung unterstützt.

Die Transformationsmatrix wird mit Hilfe der Flächenträgheitsmomente der zwei Oberflächennetze bestimmt und dient zum Transformieren des Strukturnetzes, damit beide Oberflächennetze deckungsgleich übereinander liegen. Alternativ lässt sich die Transformationsmatrix auch extern bestimmen und einlesen.

Zur Berechnung der Matrix für die Interpolation der Verformungen (von Strukturlöser nach Strömungslöser) konnte die bestehende bilineare Interpolationsmethode benutzt werden. Diese ist 2. Ordnung genau und sehr. Zur Interpolation der Drücke (von Strömungslöser nach Strukturlöser) wurden 3 verschiedene Interpolationsmethoden implementiert. Die erste Methode ist eine sehr robuste „Nearest Neighbour“-Suche (NN), bei der der Oberflächendruck eines Strukturelements gleich dem Oberflächendruck des nächsten Strömungselements gesetzt wird (Genauigkeit: 1. Ordnung). Die zweite Methode beruht auf dem Einsatz von Radialen Basisfunktionen (RBF) [10] bei der zur genaueren Interpolation (Ordnung ≥ 2) ein Gleichungssystem gelöst werden muss. Jedoch konnte aufgrund von Zeitmangel diese Methode für große Oberflächennetze nicht effizient genug implementiert werden, sodass diese Methode nur für genügend kleine Fluid-Struktur Oberflächen eingesetzt werden kann. Die dritte Methode bei versucht wird die Oberflächendrücke auf eine möglichst konservative Art zu interpolieren [10], damit die über das Fluid-Struktur Interface übertragene Arbeit bei beiden Lösern möglichst gleich bleibt. Dazu werden die Drücke in diskrete Kräfte umgerechnet und anschließend mit der transponierten Matrix für die Interpolation der Verformungen auf die Strukturoberfläche übertragen. Danach werden aus den diskreten Kräften wieder Oberflächendrücke berechnet. Diese Methode hat den Nachteil, dass abhängig von der Beschaffenheit der Oberflächennetze (Strukturnetz und Strömungsnetz) räumliche Oszillationen im Druck auf der Strukturoberfläche entstehen können.

Um zur Laufzeit der gekoppelten Fluid-Struktur Simulation das Strömungsnetz entsprechende der Deformation der strukturellen Oberfläche zu verformen, wurde das Netzdeformationsmodul aus PREP nach TRACE umgezogen und zur TRACE Laufzeit

aufzurufen gemacht. Mit dieser Lösung ist es nicht erforderlich eine zusätzliche Schnittstelle zwischen TRACE und dem Netzverformungsmodul zu schaffen, da das Netzverformungsmodul in den TRACE Simulationsdaten sehr gut integriert ist. Ein weiterer Vorteil der engen Integration zwischen TRACE und dem Netzdeformationsmodul ist der iterative Lösungsalgorithmus des Netzdeformationslösers. Dieser erlaubt es, dass zuvor errechnete Netzdeformationen als Initialisierung für den Netzdeformationslöser benutzt werden können, was diesen sehr effizient macht. So müssen für folgende FSI-Iterationen in einem Zeitschritt nur noch wenige GMRES-Iterationen des Lösers für ein neues deformiertes Netz ausgeführt werden. Hinzu kommt, dass der Netzdeformationslöser genauso parallelisiert ist wie TRACE, was ein zusätzliches Potential zur Performancesteigerung schafft. Zuvor wurde versucht ein Netzdeformationsmodul basierend auf der Inverse Distance Weighting (IDW) Methode zu implementieren. Diese explizite Methode kommt ohne das Lösen eines Gleichungssystems aus. Jedoch hat sich diese Methode auch mit effizienzsteigernden Maßnahmen wie z.B. Datenreduktion (Greedy-Algorithm) oder Parallelisierung als deutlich langsamer herausgestellt. Außerdem ist bei einem expliziten Verfahren die Möglichkeit zuvor berechnete Netzverformungen als Initialisierung für den Löser zu benutzen nicht gegeben.

Damit eine genaue Flussberechnung der Finiten-Volumen-Flüsse auf bewegten Netzen für den FSI-Löser garantiert werden kann, wurde in TRACE das Geometric Conservation Law (GCL) implementiert. Das GCL basiert auf der Gleichung

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega(t)} dV - \int_{\partial\Omega(t)} v \cdot n dS = 0$$

und ist die Konsequenz aus der Forderung einer konstanten uniformen Strömung bei einem bewegten FVM-Netz. Aus dieser Gleichung lässt sich eine Formulierung zur Berechnung der Geschwindigkeit von FV-Zellflächen ableiten, welche in die Flussberechnung einbezogen werden muss. Dies ist für aeroelastische Analysen mit Eigenmoden nicht nötig, da in diesem Fall genaue Informationen zur Position und Geschwindigkeit der Netzbewegung zur Simulationslaufzeit zur Verfügung stehen. Damit ist eine Genauigkeit der Flussberechnung in der Ordnung des Verfahrens gegeben. Bei dem FSI Modul mit CalculiX fehlt jedoch die Information der Netzgeschwindigkeit, wodurch die Implementierung des GCL im Rahmen dieses Arbeitspakets nötig wurde.

Oft wird im Designprozess von Turbomaschinenkomponenten die Strukturseite in der kalten (stillstehenden, unbelasteten) Geometrie und die Strömungsseite in der heißen (sich drehenden, belasteten) Geometrie vernetzt. Dies bedeutet, dass die berechneten Oberflächenverschiebungen von dem Strukturlöser die Transformation von der kalten zur heißen Geometrie beinhalten. Wenn der Strömungslöser bereits in der heißen Geometrie vernetzt wurde, so ist es nötig die Heiß-Kalt-Transformation von den Oberflächenverschiebungen des Strukturlösers zu subtrahieren, bevor diese an den Strömungslöser weitergereicht werden. Dazu wurde in dem FSI-Modul die Möglichkeit geschaffen, eine statische Vorrechnung von CalculiX ausführen zu lassen, um die Heiß-Kalt-Transformation zu erfassen und zu speichern. Diese wird dann in der folgenden transienten Simulation als Offset benutzt um die Oberflächenverschiebungen zu korrigieren. Eingestellt wird diese statische Vorrechnung in den CalculiX-Simulationseinstellungen sowie in einer Steuerungsdatei von TRACE damit beider Löser aufeinander abgestimmt funktionieren können.

Neben einer statischen Vorrechnung von TRACE und CalculiX besteht die Möglichkeit, CalculiX dynamische Vorrechnungen durchführen zu lassen. Somit ist eine flexible Initialisierung der FSI-Lösers möglich. Als Beispiel könnte die Struktur mit einer genau eingestellten Schwingung (Wanderwelle) initialisiert werden und es bietet sich die Möglichkeit, bestimmte Schwingungsformen gesondert zu analysieren.

AP4 VALIDIERUNG UND FUNKTIONSTESTS

Die Arbeiten aus AP1 wurden an dem zur Verfügung gestellten Testfall verifiziert. In Abbildung 6 ist das deformierte Strömungsnetz an der Hinterkante der Schaufelspitze dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Netzdeformation im inneren des Rechengebiets der Schaufeldeformation folgt und keine Diskontinuität mehr vorhanden ist.

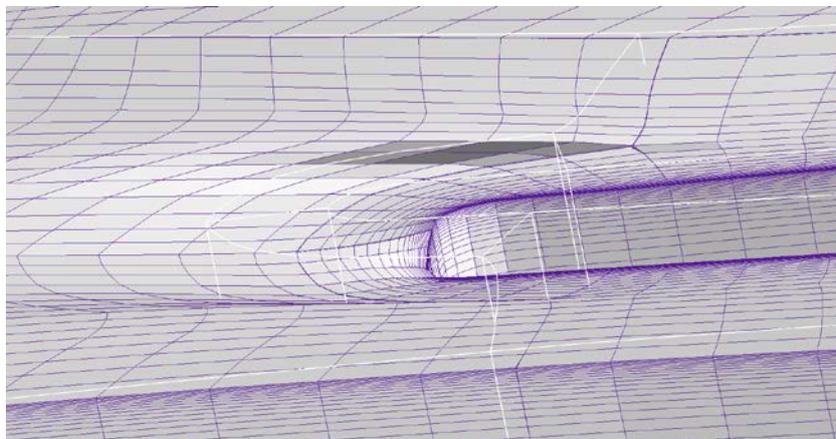


Abbildung 6: Netzdeformation an der Schaufelspitze mit der Free Boundary Option

Für die Verifizierung von AP3 und AP4 wurden von dem Projektpartner MTU Aeroengines AG zwei Testfälle zur Verfügung gestellt. Der erste Testfall ist eine akademische Verdichterkaskade mit einem NACA Schaufelprofil. Die Schaufeloberfläche und die Huboberfläche sind in Abbildung 7 dargestellt.

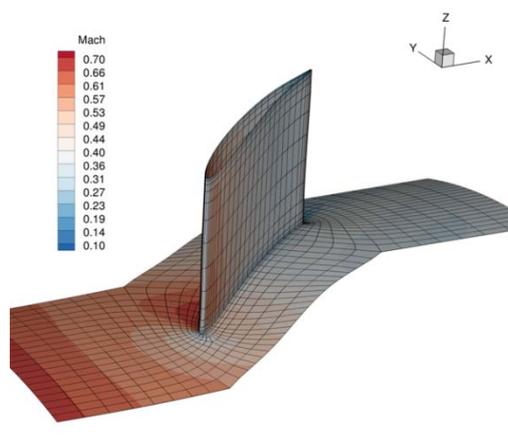


Abbildung 7: NACA Verdichterschaufeltestfall mit Machzahl als Kontur

Der zweite Testfall ist eine Niederdruckturbine mit Deckband bei der die Steifigkeit des Materials (E-Modul) um einen Faktor 10 gesenkt wurde, um einen stark aerodynamisch angefachten Testfall zu erhalten. In Abbildung 8 sind fünf Schaufeln aus den insgesamt 50 Schaufeln der Niederdruckturbine dargestellt.

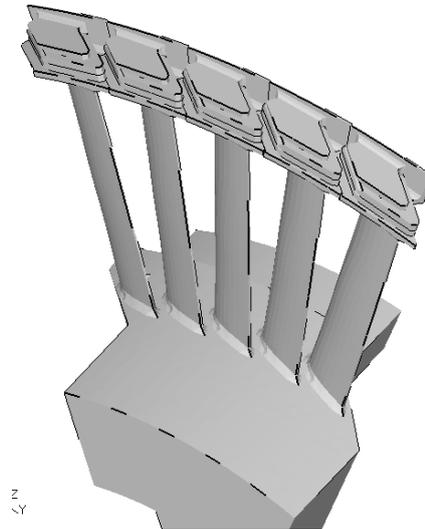


Abbildung 8: Ausschnitt aus dem Niederdruckturbinentestfall

Um die Interpolationsroutinen zu verifizieren wurden diese angewandt und die Ergebnisse auf beiden Netzoberflächen miteinander verglichen. Exemplarisch ist die Interpolation der Drücke mit der RBF Methode in Abbildung 9 dargestellt. Der Oberflächendruck auf der Strukturseite stimmt qualitativ und quantitativ gut mit den Daten auf der Strömungsoberfläche überein.

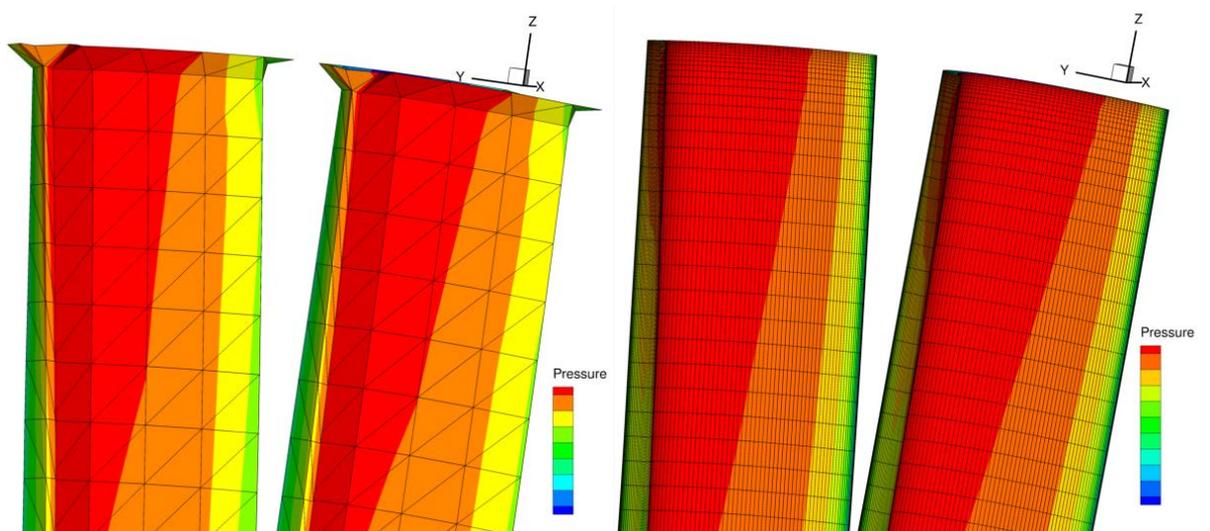


Abbildung 9: Strömungs- (rechts) und Strukturoberfläche (links) mit Oberflächendruck (Niederdruckturbine, ohne Deckband)

Das Netzdeformationsmodul wurde an dem NACA Testfall verifiziert. Dazu wurde der gekoppelte FSI-Löser mit CalculiX ein paar Zeitschritte gerechnet und das verformte Netz an mehreren Zeitschritten herausgeschrieben. In Abbildung 10 ist die Netzdeformation zu einem Zeitpunkt für verschiedene radiale Positionen des Strömungnetzes gezeigt. In allen

Zeitschritten wurde das Strömungsnetz unter Einhaltung einer guten Netzqualität der sich verformenden Strukturfläche angepasst (schwarze Netzlinien). Die nicht verformte Vernetzung ist mit roten Netzlinien dargestellt.

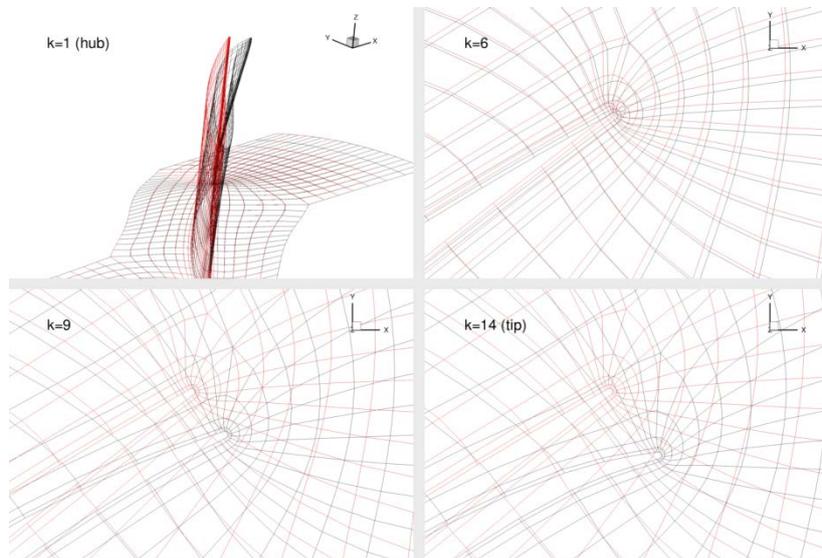


Abbildung 10: Augenblickliche Netzdeformation (NACA Testfall)

Um die Performance des Netzdeformationslösers bei mehreren FSI-Iterationen pro physikalischen Zeitschritt zu untersuchen wurde eine Simulation mit zwei FSI-Iterationen pro physikalischen Zeitschritt untersucht. In Abbildung 11 sind die Konsolenausgaben des Netzdeformationslösers für die Berechnung eines Zeitschritts aufgelistet. Zu erkennen ist, dass der erste Aufruf 21 Löseriterationen des GMRES-Algorithmus benötigt und der zweite Aufruf nur noch 4 Iterationen durchläuft. Diese Ergebnisse zeigen, dass der Netzdeformationslöser erfolgreich und mit einer guten Performance innerhalb von TRACE wiederholt aufgerufen werden kann.

```

||rhs|| = 5.416e+02
ZONE 1: Termination criterion ||rhs||^eps = 5.416042e-04
ZONE 1:
Starting GMRES - Algorithm...
ZONE 1: ...for mesh deformations
ZONE 1: initial ||Ax-b|| = 9.981291500939e+01
ZONE 1: iteration 0 Restart 0 Residual 2.089507824851e+01
ZONE 1: iteration 1 Restart 0 Residual 3.791933871990e+00
ZONE 1: iteration 2 Restart 0 Residual 1.443749797007e+00
ZONE 1: iteration 3 Restart 0 Residual 5.737397124355e-01
ZONE 1: iteration 4 Restart 0 Residual 2.403894533723e-01
ZONE 1: iteration 5 Restart 0 Residual 1.292046128784e-01
ZONE 1: iteration 6 Restart 0 Residual 8.371561472451e-02
ZONE 1: iteration 7 Restart 0 Residual 4.957106897101e-02
ZONE 1: iteration 8 Restart 0 Residual 3.117462079159e-02
ZONE 1: iteration 9 Restart 0 Residual 2.214617045883e-02
ZONE 1: iteration 10 Restart 0 Residual 1.685133198637e-02
ZONE 1: iteration 11 Restart 0 Residual 1.230524675903e-02
ZONE 1: iteration 12 Restart 0 Residual 8.121904508554e-03
ZONE 1: iteration 13 Restart 0 Residual 5.772537101784e-03
ZONE 1: iteration 14 Restart 0 Residual 4.108205620476e-03
ZONE 1: iteration 15 Restart 0 Residual 2.919079878954e-03
ZONE 1: iteration 16 Restart 0 Residual 2.087341759801e-03
ZONE 1: iteration 17 Restart 0 Residual 1.393975527989e-03
ZONE 1: iteration 18 Restart 0 Residual 9.727508648559e-04
ZONE 1: iteration 19 Restart 0 Residual 6.950021492632e-04
ZONE 1: iteration 20 Restart 0 Residual 4.948362500606e-04
ZONE 1: Maximal error of deformation at connectivity [m]: 7.492900e-09
ZONE 1: Calculating new mesh for time step [6] at RK_STEP 0
ZONE 1: Calculating metric at level n+1
[000005] 3.7498e-08 4.4626e-06 10 1 1 11 296.80 6.8.1109e-08
6.0317e-12 2.9743e-09
||rhs|| = 5.416e+02
ZONE 1: Termination criterion ||rhs||^eps = 5.415881e-04
ZONE 1:
Starting GMRES - Algorithm...
ZONE 1: ...for mesh deformations
ZONE 1: initial ||Ax-b|| = 5.121579711547e-02
ZONE 1: iteration 0 Restart 0 Residual 1.350563838554e-02
ZONE 1: iteration 1 Restart 0 Residual 2.518652673734e-03
ZONE 1: iteration 2 Restart 0 Residual 9.908337364802e-04
ZONE 1: iteration 3 Restart 0 Residual 4.508562650415e-04
ZONE 1: Maximal error of deformation at connectivity [m]: 7.491706e-09
ZONE 1: Calculating new mesh for time step [7] at RK_STEP 10
ZONE 1: Calculating metric at level n+1

```

Abbildung 11: Zwei aufeinander folgende Aufrufe (zwei FSI-Iterationen) des Netzdeformationsl6sers innerhalb eines physikalischen Zeitschritts

Für die Verifizierung des GCL wurde ein kleiner Testfall in Form eines rechteckigen Kanals aufgesetzt und eine Netzbewegung des Strömungsnetzes verursacht. Die Netzbewegung führt zu einem Stauchen und Strecken des Netzes in der Kanalmitte. Das Netz in Wandnähe (reibungsfreie Festkörperwände) verformt sich nur in tangentialer Wandrichtung, wodurch sich die Geometrie der Festkörperwände nicht ändert. Damit können die Ergebnisse mit einem bewegten Strömungsnetz direkt mit Ergebnissen aus einer Simulation mit feststehendem Netz Strömungsnetz verglichen werden. Das Netz verformt sich acht Mal periodisch mit einer Frequenz von 1MHz. Dabei läuft von der linken Seite ein Druckstörung in das Rechengebiet hinein. In Abbildung 12 ist der Strömungszustand (Druck) von drei Konfigurationen nach einer Simulationsdauer von acht Perioden dargestellt. Der Referenzströmungszustand (ohne Netzbewegung) ist mit einer (1) markiert. Die Druckstörung für ein bewegtes Netz mit GCL ist mit (2) gekennzeichnet die letzte Zeile (3) zeigt die Störung für ein bewegtes Netz ohne GCL. Bei der Simulation ohne GCL wurde die Zelloberflächengeschwindigkeit für die FV-Methode einfach durch den Mittelwert der Geschwindigkeiten der Netzpunkte berechnet.

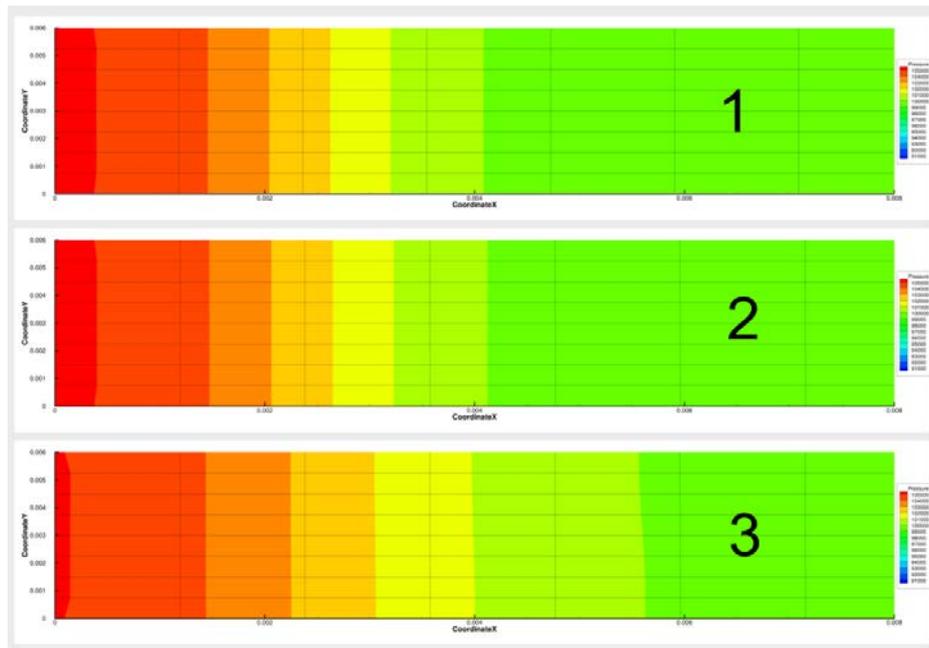


Abbildung 12: Ausgebreitete Drückstörung im Kanal 1.) ohne Netzbewegung, 2.) mit Netzbewegung und GCL, 3.) mit Netzbewegung ohne GCL

Deutlich zu erkennen ist, dass bei Verwendung des GCLs der Strömungszustand nahezu gleich dem Referenzzustand ist. Ohne GCL treten deutliche Abweichungen zum Referenzzustand auf. Damit ist die GCL Implementierung erfolgreich verifiziert.

Löser	TRACE+CalculiX FSI-Modul	Modales FSI-Modul	TRACE linearisiert
Aerodynamische Dämpfung	5,9 %	5,3%	5,3%
Schwingungs-frequenz	73,0Hz	81,1Hz	78,0Hz

Tabelle 1: Gekoppelte Simulationsergebnisse NACA Testfall

Gekoppelte Simulationen wurden mit dem NACA- und dem Niederdruckturbinentestfall durchgeführt. Bei der Simulation des NACA Testfalls mit einer Passage wurde die Schaufel mit einem künstlichen Impuls angeregt und das abklingverhalten analysiert. Als Referenz dient eine lineare Flutterrechnung (im Frequenzbereich). Verglichen werden die Aerodynamische Dämpfung (Logarithmisches Dekrement) und die Schwingungsfrequenz. Dazu wurde bei einer transienten Rechnung die Amplitude von zwei aufeinander folgenden Perioden ausgewertet. Der Strukturlöser wurde im modalen Dynamik Modus mit der ersten Eigenmode betrieben. Die Eigenmode hat eine Vakuumfrequenz von 70.75 Hz. In Abbildung 13 ist die Abklingende Schwingung (rechts) und die Arbeit pro Zeitschritt welche auf der Schaufeloberfläche verrichtet wird (links) einer TRACE+CalculiX Simulation gezeigt. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse des NACA Testfalls präsentiert. Die Dämpfungswerte des Modal-FSI Moduls und der linearen Rechnung sind sehr nahe beieinander. Eine leichte Abweichung in der Frequenzverschiebung zwischen den Beiden Simulationen ist zu bemerken. Der Dämpfungswert berechnet durch das TRACE+CalculiX FSI-Modul mit 2 FSI-Iterationen pro Zeitschritt (Relaxationsfaktor: 0,995) ist etwas höher verglichen mit den übrigen Ergebnissen und auch die Frequenzverschiebung ist sehr viel weniger ausgeprägt. Trotzdem ist die Tendenz auch durch das TRACE+CalculiX FSI-Modul gut wiedergegeben.

Leichte Unterschiede in dem numerischen Setup zwischen dem TRACE+CalculiX FSI-Modul und den übrigen zwei Simulationsvarianten konnten nicht vermieden werden.

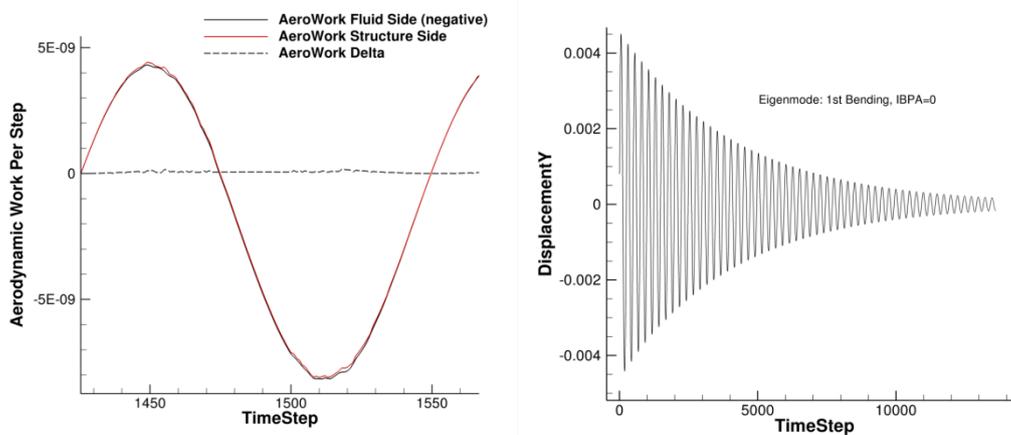


Abbildung 13: Gekoppelte Simulationsdaten einer Abklingenden Schwingung (NACA Testfall)

Des Weiteren wurde die aerodynamische Arbeit pro Zeitschritt, welche an der Schaufeloberfläche von dem Fluid verrichtet wird, verglichen. Dazu ist in TRACE und in CalculiX jeweils eine separate Auswertung dieser Arbeit implementiert. Die Arbeit auf der Strukturseite und der Strömungsseite sollten möglichst gleich groß sein. Diese Arbeit ist in Abbildung 13 (links) gezeigt. Die zwei Kurven liegen gut übereinander und nur an wenigen Stellen sind Abweichungen zu erkennen. Der Absolutwert dieser Abweichung ist als gestrichelte Linie dargestellt. Dies zeigt, dass die Interpolation (in diesem Fall Radiale Basis Funktionen) einen zufriedenstellenden Grad an Konservativität zeigt.

Um den Kopplungsalgorithmus zu verifizieren wurde mit dem NACA Testfall mit einem vollen FEM Modell auf der Strukturseite die Arbeit an der Oberfläche pro Zeitschritt zwischen Struktur- und Strömungslöser für eine verschiedene Anzahl an FSI-Subiterationen untersucht. In Tabelle 2 ist die relative Abweichung für eine variierende Anzahl von FSI-Subiterationen aufgelistet.

FSI-Subiterationen	2	4	8
Relativer Fehler in der Arbeit	12,66%	3,91%	3,87%

Tabelle 2: Relative Abweichung in der Arbeit akkumuliert über 1350 Zeitschritte zwischen Strukturlöser und Strömungslöser

Es wird deutlich, dass nur zwei Subiterationen für diesen Testfall zu einem hohem relativen Fehler führen. Bei einer Erhöhung der FSI-Subiterationen sinkt dieser Fehler merklich, jedoch ist die Reduktion des Fehlers zwischen vier und acht Iterationen sehr gering. Dies zeigt, dass in diesem Fall die Interpolation mit Radialen Basis Funktionen nicht völlig konservativ ist eine weitere Reduktion unmöglich macht.

Mit den gewonnen Erkenntnissen aus dem ersten NACA-Testfall wurde der Niederdruckturbinen-Testfall untersucht. Als erste Validierung wurde ein lineares Strukturmodell mit modaler Dynamik gekoppelt simuliert und die Ergebnisse mit linearen Flatterrechnungen verglichen. In diesem Testfall wurde außerdem die Heiß-Kalt Transformation der Struktur- und Strömungsgeometrie/Vernetzung berücksichtigt. Dazu wurde eine statische Vorrechnung unter stationärer Gaslast durchgeführt und die strukturelle

Verformung für die gekoppelte Simulation als Offset gespeichert. Zwischen der stationären Vorrechnung und der gekoppelten Simulation wurde eine Störung in Form einer Wanderwelle auf die Schaufelreihe aufgeprägt um die gekoppelte Simulation mit einer genau definierten Schwingungsform zu initialisieren. Für die künstliche Störung wird der Phasendifferenzwinkel (Inter-Blade Phase Angle, kurz IBPA) und die Frequenz der zu analysierenden Wanderwelle benutzt.

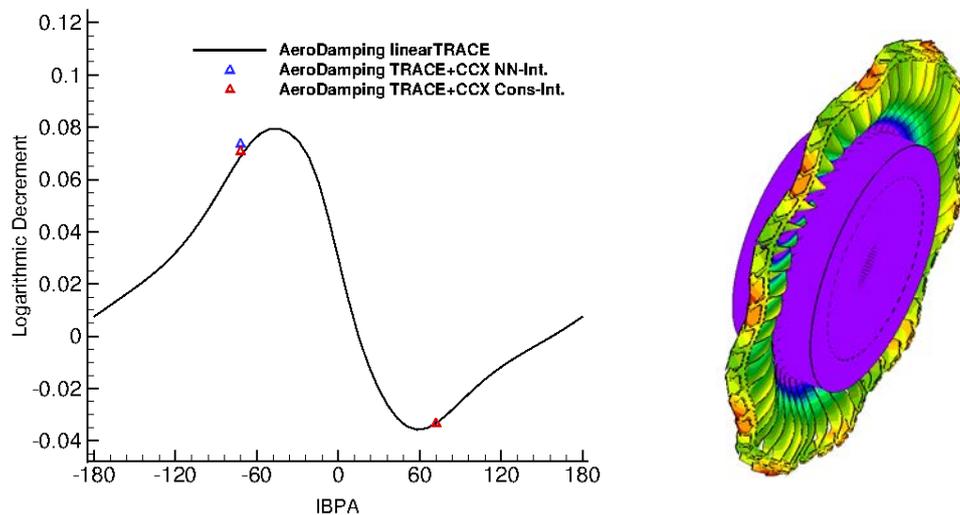


Abbildung 14: Flutterkurve Niederdruckturbinen mit TRACE+CalculiX Ergebnissen (links) und Wanderwellenmode der Schaufelreihe mit IBPA 72° (rechts)

In Abbildung 14 ist die Flutterkurve (links) zu sehen, welche mit linearen Methoden erzeugt wurde. An den Datenpunkten wurde mit dem TRACE+CalculiX FSI-Modul die aerodynamische Dämpfung nachgerechnet. Für die Flattersimulation mit dem FSI-Modul wurden 64 Zeitschritte mit einer expliziten FSI-Kopplung (nur eine FSI-Iteration pro Zeitschritt) eingestellt. Die analysierte Eigenmode (IBPA +/-72°) wurde jeweils mit rechts und links laufender Wanderwellenbewegung simuliert.

IBPA +72°	linearTRACE	TRACE+CCX (NN)	TRACE+CCX (Kons.)
Log. Dec.	-3.335%	-3.361%	-3.330%
Frequenz	315.02 Hz	314.89 Hz	315.10 Hz
IBPA -72°	linearTRACE	TRACE+CCX (NN)	TRACE+CCX (Kons.)
Log. Dec.	6.879%	7.3663%	7.069%
Frequenz	313.58 Hz	313.16 Hz	313.36 Hz

Tabelle 3: Flatterergebnisse der Niederdruckturbinen mit linearisierter Methode und dem TRACE+CalculiX FSI-Modul

In Tabelle 3 sind Details der Flatterergebnisse zusammengefasst. Die Eigenmode hat eine Vakuumfrequenz von 315,03Hz. Die Dämpfungswerte (Log. Dec.) der gekoppelten Simulation sind selbst mit einer Nearest Neighbour (NN) Interpolation sehr nahe beieinander und mit einer konservativen Interpolation (Kons.) noch ähnlicher. Bei einem IBPA von +72° ergibt sich kaum eine Frequenzverschiebung des gekoppelten Systems, was alle Simulationen wiedergeben. Bei umgedrehtem Vorzeichen kommt es laut der linearen Methode zu einer Verschiebung von ca. -1,5Hz was der gekoppelte Löser ebenfalls mit einer sehr geringen Abweichung vorhersagt. Noch anzumerken ist, dass die Simulation

mit einem IBPA von -72° nach sehr kurzer Vorlaufzeit der transienten Simulation das logarithmische Dekrement ausgewertet werden musste, da sonst die aerodynamisch instabile Wanderwelle mit dem IBPA $+72^\circ$ anfängt zu schwingen und die Auswertung der ursprünglich zu analysierenden Schwingungsform nicht mehr möglich war.

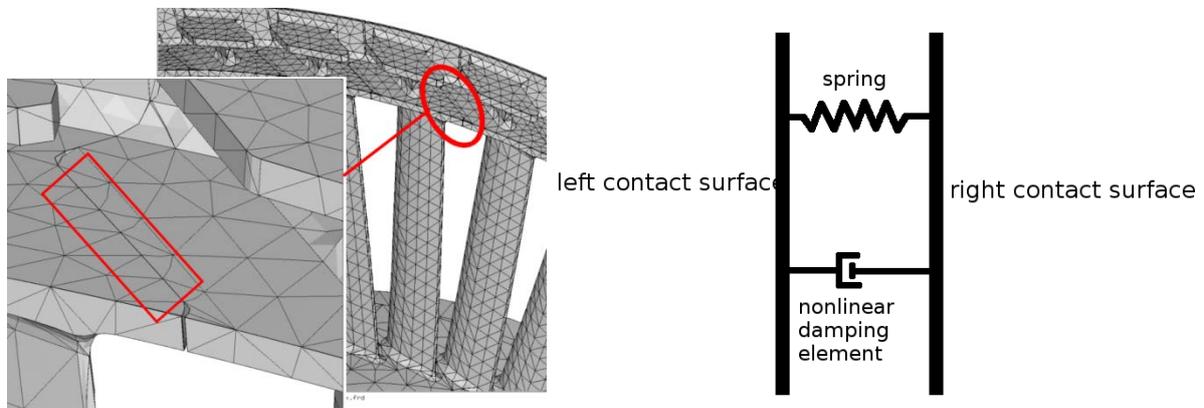


Abbildung 15: Position einer Fügestelle (links) und Schema der Kontaktmodellformulierung (rechts) im Deckband der Niederdruckturbinen

Für die Simulation eines Grenzyklus wird eine einfache nichtlineare Kontaktformulierung an den Fügstellen im Deckband in das Strukturmodell eingebaut (in Abbildung 15: Position einer Fügestelle (links) und Schema der Kontaktmodellformulierung (rechts) im Deckband der Niederdruckturbinen rot markiert). Bei der Berechnung der Eigenmoden wurden an den Fügstellen rutschende Randbedingungen benutzt, sodass die Fügstellen in tangentielle Richtung zur Fügeebene rutschen können. Zwischen diesen zwei Ebenen kommt eine diskrete Kontaktformulierung zum Einsatz (Schemaskizze in Abbildung 15: Position einer Fügestelle (links) und Schema der Kontaktmodellformulierung (rechts) im Deckband der Niederdruckturbinen, rechts). Die Kontaktformulierung wird in jeder Fügestelle (50 Schaufeln in der Schaufelreihe mit 50 Fügstellen im Deckband) angewendet. Die Feder in der Kontaktformulierung verhindert zu große Relativbewegungen der Kontaktflächen und sorgt für eine etwas realistischere Modellierung. Die nichtlineare Kontaktkraft wird nach der Formel

$$\vec{f} = \frac{\Delta\vec{v}}{|\Delta\vec{v}|} F_n \mu \phi(\Delta\vec{v})$$

mit der Regularisierungsfunktion

$$\phi(\Delta\vec{v}) = \frac{|\Delta\vec{v}|^2}{|\Delta\vec{v}|^2 + \epsilon^2}$$

und den Modellkonstanten $F_n = 70N$ (Kontaktnormalkraft), $\mu = 0,2$ (Reibungskoeffizient), $\epsilon = 5,0 m/s$ (Modellierungsparameter) und $\Delta\vec{v}$ (Relativgeschwindigkeit der Kontaktflächen einer Fügestelle). Die Kontaktformulierung kann als regularisierte Form des Coulomb Reibungsgesetzes betrachtet werden, bei dem die Unstetigkeit entfernt wurde. Mit diesem Setup wurde für den aerodynamisch angefachten Fall (IBPA= 72°) ein Grenzyklus mit 128 Zeitschritten pro Periode und einer FSI-Iteration pro Zeitschritt gerechnet.

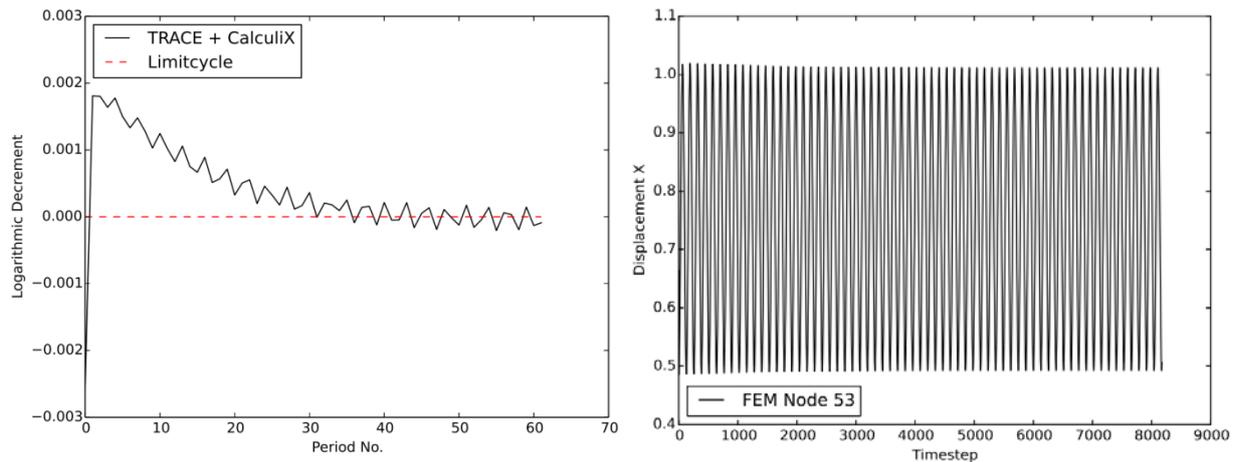


Abbildung 16: Logarithmisches Dekrement pro Periode einer Grenzyklussimulation (links) und X-Verschiebung eines Punktes im Deckband (rechts) der Niederdruckturbine

In Abbildung 16 sind die transienten Simulationsdaten der Grenzyklussimulation gezeigt. Rechts ist die X-Verschiebung eines Punktes im Deckband zu sehen. Die Simulation wurde mit einer Schwingungsamplitude initialisiert, welche bereits nahe der Grenzyklusamplitude (bekannt aus Voruntersuchungen) war. Auf der linken Seite ist das Logarithmische Dekrement pro Periode gezeigt. Zu beobachten ist eine zunächst abklingende Schwingung bis zu Nulllinie, bei der sich nach einiger Simulationszeit ein Grenzyklus einstellt (die Schwingungsamplitude bleibt dann unverändert). Diese Simulation dauerte ca. 41 Stunden mit 24 Prozessorkernen auf einem Cluster.

Die Grenzyklusamplitude wurde mit einer Semianalytischen Arbeitsbilanz Validiert. Dazu wurde für verschieden vorgegebene Amplituden die Arbeit der Strömung auf die Struktur mit der Dissipation in der Fügestelle im Deckband pro Schwingungsperiode verglichen. In Abbildung 17 sind die Arbeitsintergrale als Funktion der vorgegebenen Amplitude gezeigt. Bei dieser Methode wurde die Strömungsantwort als linear angenommen und die Kontaktdissipation numerisch integriert. An dem Schnittpunkt der zwei Kurven sind der Arbeitseintrag durch die Strömung und die Kontaktdissipation im Gleichgewicht, was einem Grenzyklus entspricht. Die abgelesene modale Amplitude von 2,406 entspricht einer X-Verschiebungsamplitude von 0,2591 mm was auch mit der Grenzyklusamplitude ermittelt durch das TRACE+CalculiX FSI-Modul von 0,2592 mm übereinstimmt. Die Tatsache, dass die zwei Amplituden so gut übereinstimmen zeigt, dass sich die Strömung in der Niederdruckturbine überwiegend linear verhält.

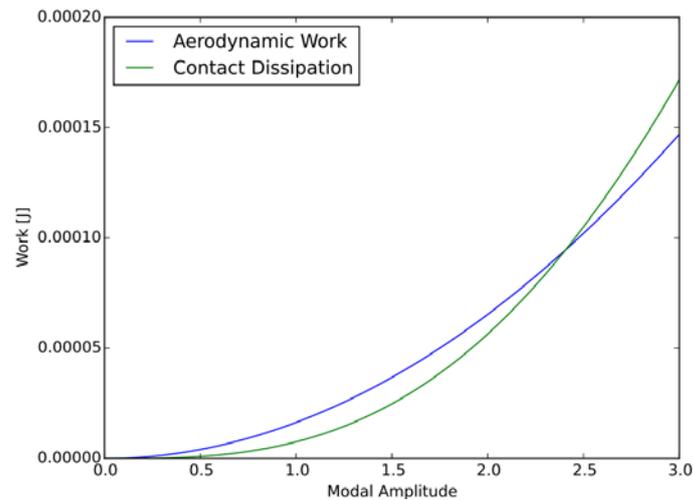


Abbildung 17: Semianalytische Arbeitsbilanz zur Abschätzung einer Grenzyklusamplitude

Damit konnte gezeigt werden, dass der gekoppelte Löser (TRACE+CalculiX) plausible Ergebnisse sowohl für transiente Flutterrechnungen als auch für Grenzyklussimulationen liefert. Der Massenstrom der Grenzyklussimulation (Abbildung 18) zeigt geringe Oszillationen in derselben Frequenz der Schaufelschwingungen. Außerdem ändert sich der Mittelwert leicht während der Simulation und es wird vermutet, dass sich der Betriebspunkt und der transiente Einschwingvorgang gegenseitig beeinflussen.

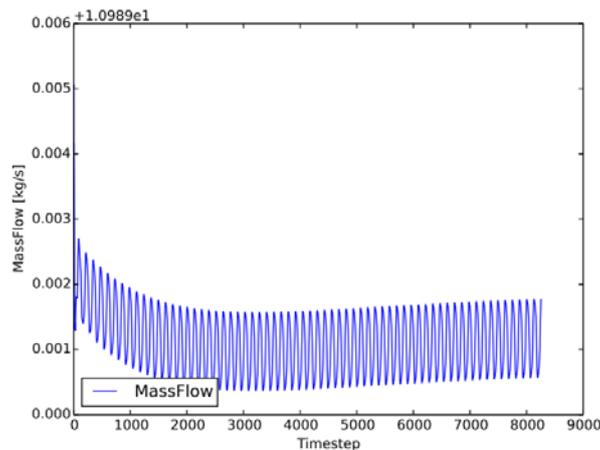


Abbildung 18: Massenstrom Grenzyklussimulation

Das logarithmische Dekrement einer weiteren Simulation mit einer niedrigeren Anfangsamplitude ($0,139\text{ mm}$) ist in Abbildung 19 gezeigt. Der Schaufelschwingung ist nach einer ähnlich langen Simulationszeit nicht konvergiert. Dies zeigt, dass eine gute Initialisierung nahe der Grenzyklusamplitude helfen kann, Simulationszeit einzusparen.

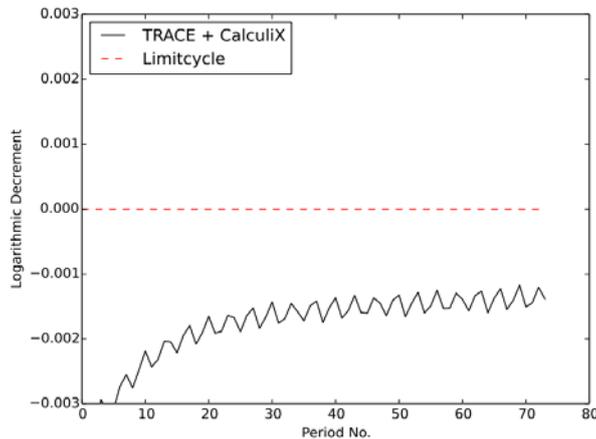


Abbildung 19: Logarithmisches Dekrement einer Grenzyklussimulation mit reduzierter Anfangsamplitude

VERWERTUNG

Im Hinblick auf die Einbeziehung von TRACE in den industriellen Gas- und Dampfturbinenentwurf sowie dem Einsatz im Design von Flugtriebwerken werden weitere Schritte vollzogen, die den Erfolg und die Einsatzmöglichkeiten des sich schon im industriellen Entwurfsprozess befindlichen Code TRACE weiter vorantreiben. Wie bereits nachgewiesen wurde, können die Ergebnisse aus AP1 und AP2 dazu verwendet werden, die Deckbandbewegungen bei der Flatteranalyse mit einzubeziehen. Die nun in TRACE zur Verfügung stehenden Module (Modales FSI-Modul und TRACE+CalculiX FSI-Modul) können zur Untersuchung nicht-linearen Flatterverhaltens verwendet werden.

Die Weiterentwicklung erfolgt im Simulationsverfahren TRACE, das inzwischen in das hausinterne Designsystem des Industriepartners MTU Aero Engines AG aber auch bei Siemens Energy integriert ist und dort das standardmäßige Softwarepaket zur aerodynamischen Berechnung von Turbomaschinen ist. Die in diesem Projekt erfolgten Entwicklungen stehen dem Partner MTU direkt zur Verfügung. TRACE stellt darüber hinaus ein an den deutschen Hochschulen und Forschungsinstituten weit verbreitetes Verfahren für die Untersuchung von Turbomaschinenströmungen dar. Die Arbeiten hier werden somit einen wichtigen Beitrag dazu leisten, das theoretische Verständnis aeroelastischer Probleme durch den Einsatz effizienter CFD-Verfahren gesteigert wird. Somit stehen die entwickelten Methoden unmittelbar dem deutschen Turbomaschinen-Forschungsnetzwerk zur Verfügung.

ZUSAMMENFASSUNG

In den Arbeitspaketen eins und zwei wurde gezeigt, dass der Einfluss von Deckbändern auf das aerodynamische Verhalten von Turbinenschaufeln zu einer Verschiebung der Flatterkurve führen kann. Um diesen Einfluss numerisch zu untersuchen wurden die dafür notwendige Anpassung in dem Präprozess-Modul „PREP“ implementiert.

Für die Arbeitspakete drei und vier wurde ein gekoppelter Fluid-Struktur Löser mit TRACE und CalculiX zur zeitgenauen und transienten Simulation von nichtlinearen Fluid-Struktur Phänomenen. Dieser wurde verifiziert und mit Hilfe des modalen FSI-Moduls in TRACE und einer linearen Methode numerisch validiert. Es wurde gezeigt, dass der Löser in der Lage ist, einen Grenzyklus einer Turbinenschaufelreihe mit nichtlinearer Reibung im Deckband

inklusive des transienten Einschwingvorgangs zu simulieren. Die dafür benötigten Simulationsressourcen können sehr hoch sein, abhängig von der Güte der Schwingungsinitialisierung.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] R. Kielb, „CFD for turbomachinery unsteady flows - An aeroelastic design perspective,“ in *Aerospace Sciences Meetings*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001.
- [2] K. C. Hall, J. P. Thomas und W. S. Clark, „Computation of Unsteady Nonlinear Flows in Cascades Using a Harmonic Balance Technique,“ *AIAA J.*, Bd. 40, Nr. 5, pp. 879-886, #may# 2002.
- [3] G. Ashcroft, C. Frey und H.-P. Kersken, „On the Development of a Harmonic Balance Method for Aeroelastic Analysis,“ in *6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI)*, 2014.
- [4] M. A. Spiker, R. E. Kielb, K. C. Hall und J. P. Thomas, „Efficient Design Method for Non-Synchronous Vibrations Using Enforced Motion,“ 2008.
- [5] H.-P. Kersken, C. Frey, C. Voigt und G. Ashcroft, „Time-Linearized and Time-Accurate 3D RANS Methods for Aeroelastic Analysis in Turbomachinery,“ *Journal of Turbomachinery*, Bd. 134, Nr. 5, p. 051024, 2012.
- [6] M. Krack, L. Salles und F. Thouverez, „Vibration prediction of bladed disks coupled by friction joints,“ *Archives of Computational Methods in Engineering*, Bd. 24, Nr. 3, pp. 589-636, 2017.
- [7] K. Becker, K. Heitkamp und E. Kügeler, „Recent Progress In A Hybrid-Grid CFD Solver For Turbomachinery Flows,“ in *Proceedings Fifth European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2010*, Lisbon, Portugal, 2010.
- [8] G. Dhondt, *The Finite Element Method for Three-Dimensional Thermomechanical Applications*, Wiley, 2004.
- [9] R. Loehner und C. Yang, „Improved ALE Mesh Velocities for Moving Bodies,“ *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Bd. 12, pp. 599-608, 1996.
- [10] P. Birken, T. Gleim, D. Kuhl und A. Meister, „Fast Solvers for Unsteady Thermal Fluid Structure Interaction,“ in *International Journal for Numerical Methods in Fluids 79*, Wiley, 2015, pp. 16-29.
- [11] S. Schmitt, „Simulation von Flattern und aerodynamischer Zwangserregung in Turbomaschinenbeschaufelungen,“ 2003.
- [12] H. Wendland, „Spatial Coupling In Aeroelasticity By Meshless Kernel-Based Methods,“

in *European Conference on Computational Fluid Dynamics*, TU Delft, The Netherlands, 2006.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: FE-Netzoberfläche (rot) und CFD-Vernetzung (dünne schwarze Linien, grüne Oberfläche)	5
Abbildung 2: Deckbandoberflächen Struktur- und CFD-Netz	6
Abbildung 3: Ausgewählte Zellen des CFD-Netzes entlang der Diskontinuität (weiße Linie)..	6
Abbildung 4: Flatterkurve der Turbinenschaufel mit und ohne Deckbandeinfluss	7
Abbildung 5: Kopplungsschema	8
Abbildung 6: Netzdeformation an der Schaufelspitze mit der Free Boundary Option	11
Abbildung 7: NACA Verdichterschaufeltestfall mit Machzahl als Kontur	11
Abbildung 8: Ausschnitt aus dem Niederdruckturbinentestfall.....	12
Abbildung 9: Strömungs- (rechts) und Strukturoberfläche (links) mit Oberflächendruck (Niederdruckturbine, ohne Deckband)	12
Abbildung 10: Augenblickliche Netzdeformation (NACA Testfall)	13
Abbildung 11: Zwei aufeinander folgende Aufrufe (zwei FSI-Iterationen) des Netzdeformationslösers innerhalb eines physikalischen Zeitschritts	14
Abbildung 12: Ausgebreitete Drückstörung im Kanal 1.) ohne Netzbewegung, 2.) mit Netzbewegung und GCL, 3.) mit Netzbewegung ohne GCL.....	15
Abbildung 13: Gekoppelte Simulationsdaten einer Abklingenden Schwingung (NACA Testfall)	16
Abbildung 14: Flatterkurve Niederdruckturbine mit TARCE+CalculiX Ergebnissen (links) und Wanderwellenmode der Schaufelreihe mit IBPA 72° (rechts)	17
Abbildung 15: Position einer Fügestelle (links) und Schema der Kontaktmodellformulierung (rechts) im Deckband der Niederdruckturbine	18
Abbildung 16: Logarithmisches Dekrement pro Periode einer Grenzyklussimulation (links) und X-Verschiebung eines Punkts im Deckband (rechts) der Niederdruckturbine	19
Abbildung 17: Semianalytische Arbeitsbilanz zur Abschätzung einer Grenzyklusamplitude	20
Abbildung 18: Massenstrom Grenzyklussimulation.....	20
Abbildung 19: Logarithmisches Dekrement einer Grenzyklussimulation mit reduzierter Anfangsamplitude.....	21