

Bachelor Diplomarbeit, Herbstsemester 2017

Numerische Berechnung der Kennlinien von Pump-Turbinen

**im Turbinenbetrieb in der Nähe des S-Schlages
und
die Analyse der Strömungsvorgänge mit Fokus
auf Instabilitäten**

Verfasser:	Manuel Häusler
Betreuer:	Dr. Sabri Deniz Armando Del Rio Oliver Ryan
Experten:	Dr. Joel Schlienger
Industriepartner:	Andritz Hydro AG Obernauerstrasse 4, 6010 Kriens
Abgabedatum:	08. Januar 2018

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Sämtliche verwendeten Textausschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet.

Ort, Datum, Unterschrift

Kurzfassung

Das Umdenken in der Energieproduktion hin zu regenerativen Energiequellen mit schwankendem Energieertrag, hat weltweit die Nachfrage nach Pumpspeicher-Anlagen steigen lassen. Mit Pumpturbinen sind günstige Anlagen zur saisonalen Energiespeicherung und Netzstabilisierung realisierbar. Aktuelle Pumpturbinen-Laufräder weisen jedoch in wichtigen Betriebspunkten instabiles Verhalten auf. Dies macht einen Betrieb schwierig und reduziert die Lebensdauer der gesamten Anlage. Diese Arbeit versucht ein Werkzeug zu finden, um Instabilitäten eines Laufrades bereits während dessen Entwicklung zu erkennen und diese so verhindern zu können.

Dazu wurden zwei numerische Modelle eines instabilen Pumpturbinenmodelles mit kleiner spezifischen Drehzahl ($n_q = 26\text{min}^{-1}$) und einer Leitschaufelstellung von 6° erstellt. Diese Modelle sollen mit wenig Rechenaufwand die experimentell erkannte Instabilität möglichst gut reproduzieren können. Es wurde auf eine URANS-Simulation mit einem openFOAM Solver und k- ϵ Turbulenzmodell, beziehungsweise mit CFX und EARSM Turbulenzmodell inkl. Korrektur der Stromlinienkrümmung gesetzt. Ersteres soll gemäss Literatur schneller, jenes mit EARSM die Instabilität genauer reproduzieren können. Die Anfangswerte für die URANS wurden in beiden Fällen durch eine stationäre Simulation, deren Vorgabegrößen experimentell im Pumpturbinenprüfstand gemessen wurden, ermittelt.

Zur Detektion der Instabilität wurde ein Programm in Python (2.7) entwickelt, welches einige relevanten Werte, Diagramme und Ansichten automatisiert aus den Simulationsergebnissen generieren kann. Das Programm wurde modular aufgebaut, sodass es einfach um neue Funktionen erweitert und weitere Ausgaben implementiert werden können. Dazu wurde eine vollständige Dokumentation erstellt. Mithilfe dieses Programmes, welches einen funktionstüchtigen Entwicklungsstand erreichte, wurde ein Betriebspunkt des numerischen Modelles (openFOAM, k- ϵ) ausgewertet und analysiert.

Das numerische Modell weist keine positive Steigung in seiner Kennlinie auf, weshalb es nicht als instabil erkannt werden kann. Verantwortlich ist eine Randbedingung einer Ringgeometrie des schaufelfreien Raumes, welche aus numerischen Gründen mit dem Rotor vernetzt wurde und somit dreht. Zudem wurde eine Rückströmung aus dem Saugrohr zurück ins Laufrad erkannt, welche verantwortlich sein könnte für einen der Wirbel, die für Instabilität typisch sind.

Abstract

Because of the change in the energy production towards regenerative energy sources with fluctuating production, the demand for pumped hydro power plants has been rising worldwide. Pumped hydro systems with pump turbines are more economical and suitable for future needs like seasonal energy storage or grid stabilization. Current pump turbine rotor designs show unstable behaviour in important operation points. That effects negatively the operation itself and reduces the life time of the whole machine. This study evaluates tools to identify unstable operation behaviour during rotor development to ensure proper behaviour.

For that, two numerical models of a pump turbine model with unstable behaviour that has a small specific speed ($n_q = 26 \text{ min}^{-1}$) and a guide vane angle of 6° has been created. It is the goal of these numerical models to reproduce unstable behaviour accurately and with the shortest possible computing time. After some research it was decided to run URANS simulations with an openFOAM solver and a k- ϵ turbulence model on one hand and CFX with an EARSIM turbulence model and activated curvature correction on the other hand. The k- ϵ turbulence model should be faster, the EARSIM more accurate. The initial conditions for both URANS simulations are evaluated by running a steady state simulation. The initial conditions for the steady state simulation has been measured on a pump turbine testing bench.

For the detection of the unstable behaviour, a tool has been programmed using Python (2.7) as coding language. It can automatically generate values, diagrams, and views out of the simulation results. To implement more functions and outputting views in a simple way, it is coded on a modular base, has an extended documentation and lots of comments in the code. The tool has been developed to fully functionality during this study. As a test, one of the simulated operation points of the numerical model (openFOAM, k- ϵ) has been analysed.

The result showed, that a boundary condition of a small section in the mesh is responsible that no positive slope in the characteristic is reached and therefore no instability can be detected. In addition, a backflow out of the draft tube inside the runner section is recognised. This backflow might be responsible for one of the vortexes who are typically for instabilities.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Ausgangslage	3
1.2	Ziele	5
1.3	Vorgehen	5
2	Recherche	6
2.1	Modell (Domain)	6
2.2	Solver	6
2.3	Turbulenzmodelle	7
2.4	Randschicht Netzverfeinerung (y^+)	9
3	Untersuchungsobjekt	10
4	Numerisches Modell	11
4.1	Materialmodell	11
4.2	Netz	11
4.3	Solver & numerische Schemata	13
4.4	Turbulenzmodell	14
4.4.1	k- ϵ	14
4.4.2	EARSM-CC	14
4.5	Rand- & Anfangsbedingung	15
4.6	Messgrößen	16
5	PostProcessing Tool	18
5.1	Architektur & Softwareumgebung	18
5.2	Ansichten	19
5.3	Dokumentation	24
6	Strömungsanalyse	26
6.1	Kennlinienvergleich	26
6.2	OP4 mit dem PP-Tool (k- ϵ)	27
6.3	Strömungsuntersuchung am OP4	30
7	Schlussfolgerungen	32
8	Verzeichnisse	34

Anhänge

- A1 PP-Tool: Anleitung
- A2 PP-Tool: Variablendeklaration
- A3 PP-Tool: Softwarearchitektur
- A4 PP-Tool: Flussdiagramme
- A5 Aufgabenstellung
- A6 CD

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Wasserkraft-Industrie steckt in der Krise. Die Produktionskosten von Energie aus Wasserkraftwerken liegen über dem Preis, der sich auf dem freien Markt erzielen lässt, so berichtete SRF in [15]. Günstige Erdölpreise und Subventionen auf regenerative Energiequellen haben den Strompreis zusammenfallen lassen. Diese Subventionen vom Staat und das Verlangen nach nachhaltiger Energieproduktion, bewirken jedoch eine Chance für Pumpspeicherkraftwerke. Neben den vielen Vorteilen der regenerativen Energiequellen (Solarstrahlung, Wind- oder Gezeitenkraft), haben diese den grossen Nachteil, dass ihre Energieproduktion starken zeitlichen Schwankungen unterliegt. Mit vermehrtem Einsatz der regenerativen Energiequellen und der Abschaltung vieler stabil produzierenden thermischen Anlagen wie Kohle-, Öl-, Gas- oder Kernspaltreaktoren, ergibt sich ein instabiles, schwankendes Stromnetz.

In dieser neuen Energieverbraucherstruktur spielen Pumpspeicherkraftwerke eine immer wichtigere Rolle. Nicht nur sind sie in der Lage die wachsende Spitzenlast abzudecken, sie können auch die Flexibilität und Stabilisierung des Stromnetzes sicherstellen. Durch schnelle Wechsel zwischen Energieproduktion (Turbinenbetrieb) und Energieaufnahme/-speicherung (Pumpenbetrieb) können sie in kürzester Zeit auf Netzschwankungen reagieren, um Elektrizitätsmangel und -überschuss auszugleichen. Zudem können sie bei einem Zusammenbruch des Netzes, dieses selbständig und ohne äussere Energiezufuhr wieder aufbauen, was das Risiko von Blackouts mindert.

Infolge der Finanzkrise der Wasserkraft-Industrie bewirkt die Umstellung zu regenerativen Energiequellen ein zunehmendes Interesse nach preisgünstigen Pumpspeicher-Lösungen. So bieten sich Pumpturbinen mit nur einem, statt konventionell zwei Maschinenhäusern an. An dieses eine Laufrad werden folgende Anforderungen gestellt, welche Andritz Hydro in [1] in einer Marktanalyse festhielt:

- Grosse Nachfrage nach Anlagen für grosse Fallhöhen (Laufräder mit kleinem n_d)
- Schnelles und häufiges Umschalten zwischen Pump- und Turbinenbetrieb
- Gute Effizienz in weiten Betriebsbereichen
- Stabiles Verhalten (in Off-Design und bei Lastabwurf)

Dieses zunehmende Interesse und die hohen Anforderungen an das hydraulische Verhalten der Laufräder, erfordern neue Entwicklungen auf dem Gebiet von Pumpturbinen. Hierfür betreibt die Hochschule Luzern am CC Fluidmechanik & Hydromaschinen ein experimentelles und numerisches Forschungsprojekt zu Pumpturbinen und deren Instabilitäten. Der Schwerpunkt dieses Projektes liegt auf der Identifizierung, Vermeidung, Beeinflussung und Unterdrückung von Strömungsinstabilitäten an Pumpturbinen.

Viele aktuelle Laufradmodelle von Pumpturbinen weisen einen S-Schlag in ihren Kennlinien auf. Eine Kennlinie mit S-förmigem Verlauf (Verlauf mit positiver Steigung) entsteht, wenn mehrere Betriebspunkte bei gleichbleibender Drehzahl existieren. Bei diesen Laufrädern stellt sich, bei konstantem Anströmungswinkel (Leitschaufelwinkel), für mehrere Volumenströme eine gleichbleibende Drehzahl ein. Unglücklicherweise liegt dieser S-Schlag bei kleinen Leitschaufelöffnungswinkeln und einer Laufraddrehzahl von ungefähr 1500 U/min. Diese Drehzahl entspricht der Synchrodrehzahl des europäischen Stromnetzes (50Hz).

Somit liegen diese instabilen Betriebspunkte in einem Betriebsbereich, der für das Betreiben von Pumpturbinen enorm wichtig ist und welche im Betrieb häufig angefahren werden. In *Abbildung 1* sind zwei Vorgänge aufgezeigt, bei welchen die Pumpturbine den S-Schlag durchläuft. Zum einen ist das der Anlaufvorgang (Start-up), bei welchem die Pumpturbine mit kleinem Volumenstrom und kleinem Drehmoment an der Welle, mit dem Netz synchronisiert wird. Zum anderen der Lastabwurf, welcher entsteht, wenn im Netz abrupt der Verbrauch zurückgeht.

Ein weiterer Vorgang ist das Umschalten zwischen Pump- und Turbinenbetrieb. Auch dabei muss eine Netzsynchronisation stattfinden, wobei eine ähnliche Kurve wie beim Anlaufvorgang resultiert.¹

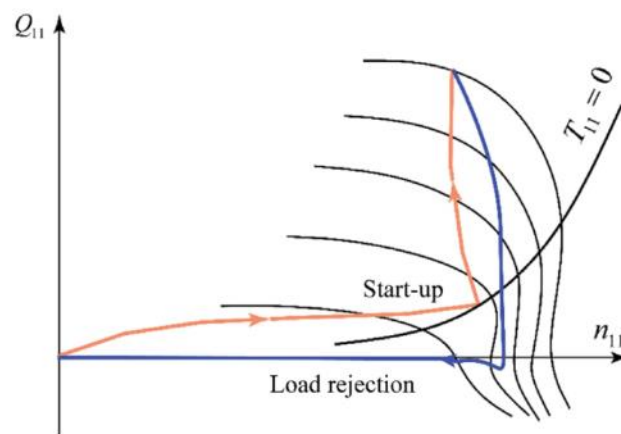


Abbildung 1: Start-up und Load-rejection bei einer Pumpturbine.

Q_{11} = dimloser Volumenstrom, n_{11} = dimlose Drehzahl,

T_{11} = Runaway (Drehmoment an der Welle = 0 Nm)

[20]

Vergangene Arbeiten (unter anderen [17] und [8]) sind bereits der Bedeutung, der Ursachen und der numerischen Modellierung von Instabilitäten nachgegangen. Dabei wurde erkannt, dass der Bereich zwischen dem Leitschaufelaustritt und dem Laufradeintritt (der schaufelfreie Raum) besonders ausschlaggebend ist für die Strömungsphänomene, welche für die Instabilität verantwortlich sind.

¹ Weitere Informationen zum Pumpturbinenlaufrad, dem Anlauf-&Umschaltvorgang, den dimensionslosen Kennzahlen (ku_1 , kcm_1 , km_1) der 4-Quadrantenkennlinie und dem S-Schlag sind in [11] zu finden.

1.2 Ziele

Ziel dieser Arbeit ist es, zwei numerische Modelle (mit zwei verschiedenen Turbulenzmodellen) aufzusetzen, welche die instabilen Phänomene einer Pumpturbine, bei moderatem Rechenaufwand, möglichst präzise wiedergeben und alle für die Auswertung notwendigen Grössen aufzeichnen. Damit soll mit einigen simulierten Betriebspunkten je eine Kennlinie erstellt und mit der experimentell erfassten Kennlinie verglichen werden. Parallel ist ein PostProcessing-Tool zu entwickeln, mit dessen Hilfe Simulationsergebnisse auf Instabilitäten untersucht werden können. Beispielfhaft soll mit diesem Tool ein simulierter Betriebspunkt ausgewertet und analysiert werden.

Das numerische Modell und das PostProcessing-Tool werden später für weitere Analysen verwendet und sollen helfen, die Instabilitäten von Pumpturbinen zu erkennen und zu verstehen.

1.3 Vorgehen

In einem ersten Schritt werden Recherchen bezüglich dem numerischen Modell betrieben. So können Informationen gesammelt werden, welche numerischen Modelle zur Instabilität führen könnten. Es werden verschiedene Solver und Turbulenzmodelle verglichen und deren Einfluss auf die Instabilität ermittelt.

Für das eigene numerische Modell wird das vorhandene Netz modifiziert und angepasst, um den Verlauf diverser Grössen während der Simulation überwachen und später auswerten zu können. Mit dem Netz und den Erkenntnissen aus der Recherche wird das PreProcessing der numerischen Modelle gemacht. Dabei werden Solver und Turbulenzmodell konfiguriert und diverse Messproben platziert.

Da mehr Betriebspunkte zu simulieren sind als im Zeitraum dieser Arbeit möglich, werden die einzelnen Simulationen priorisiert und anhand der Priorisierung nacheinander gestartet.

Parallel zu den laufenden Simulationen wird ein PostProcessing-Tool entwickelt. Softwareumgebung und –architektur werden anhand der gewünschten Funktionen entworfen. Es werden diverse Ansichten und Diagramme definiert, mit welchen die Strömungsergebnisse aus den Simulationen auf Instabilität überprüft und analysiert werden können. Diese werden nacheinander in das PostProcessing-Tool implementiert. Auch hier wird eine Prioritätenliste verfolgt, um den Zeitrahmen einzuhalten.

Zum Schluss wird ein simulierter Betriebspunkt mit dem PostProcessing-Tool ausgewertet und die Ergebnisse analysiert.

2 Recherche

Um das instabile Verhalten numerischer Modelle von Pumpturbinen(PT)-Laufräder bewerten zu können, wurden verschiedene Arbeiten zu Themen wie: Francis Laufrad, Pumpturbine, S-Schlag und Instabilität herangezogen. Daraus ergaben sich Kenntnisse, welche Vorgehensweise in anderen Arbeiten zum Erfolg führten und welche nicht.

2.1 Modell (Domain)

Die Wahl der modellierten Domain (Rechengebiet) hat, wie die Recherche ergab, einen entscheidenden Einfluss auf das instabile Verhalten des Modelles. Grundsätzlich muss für diese Art von Problemen eine möglichst vollständige Domain der PT (Eintritt Spiralgehäuse bis Austritt Diffusor) erstellt werden. Instabile Phänomene entstehen bei den untersuchten Betriebspunkten durch die Interaktion des rotierenden Laufrades mit den umliegenden, stehenden Geometrien. Es müssen räumlich und zeitlich aufgelöste Strömungen durch die Simulation entstehen können, was durch räumliche Mittelung bei teilweiser Modellierung von einzelnen Geometrien (z.B Laufrad) nicht möglich ist. Die Laufradseitenräume, und somit die Leckage-Strömungen, wurden bei fast allen Arbeiten weggelassen, was die Bildung von Instabilitäten nicht beeinträchtigte. Die so aus der Simulation ermittelten Drehmomente werden jedoch zu hoch ausfallen, was aber für diese Untersuchung nicht ausschlaggebend ist.

Die Laufradgeometrie an sich scheint auch einen Einfluss zu haben. So haben numerische Modelle, welche Laufräder mit grossen spezifischen Drehzahlen ($n_q > 30$, *siehe Kapitel 3*) abbilden, wenig Mühe die Instabilitäten im S-Schlag abzubilden. Gleiche Konfigurationen mit Laufräder kleiner spezifischer Drehzahlen scheitern in einigen Bereichen eine positive Steigung (einen S-Schlag) in der Kennlinie zu erzeugen. Ein weiteres Merkmal ist der Öffnungswinkel der Leitschaufeln. Bei grossen Öffnungswinkeln ($> 10^\circ$) scheinen auch Laufräder mit kleinem n_q zufriedenstellende Ergebnisse zu liefern, während bei kleinen Öffnungswinkeln die meisten scheitern.

Die einzige Konfiguration, mit welcher sich alle Modelle schwer tun, sind numerische Modelle von Laufrädern mit kleinem n_q und kleinem Leitschaufel-Öffnungswinkel. Wobei bei diesen, Betriebspunkte mit kleinen Volumenströmen besonders wenige Erfolge lieferten.

2.2 Solver

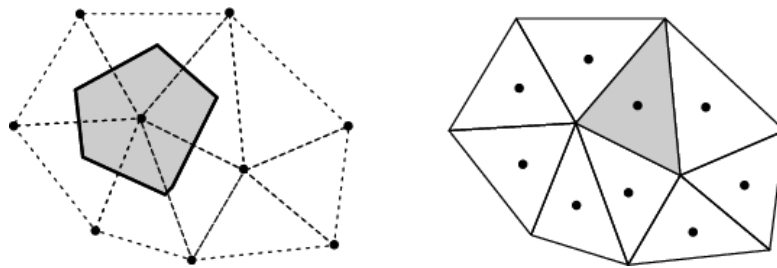
Alle herangezogenen Arbeiten verwenden Solver, um die Navier-Stokes Gleichungen zu lösen. Da es sich im Falle der PT um Randschichtprobleme und somit um turbulente Strömungen handelt, macht diese Entscheidung durchwegs Sinn. Die verschiedenen Solver weisen Unterschiede in der numerischen Methode, der Wahl des Kontrollvolumens und der zeitlichen und geometrischen Diskretisierung der zu lösenden Differenzialgleichungen auf, wie aus *Tabelle 1* entnommen werden kann.

Die numerische Methode beschreibt, wie das Geschwindigkeits- und das Druckfeld aus der Lösung der Massen- und Impulsgleichung generiert wird. Die pressure-based Methode wurde ursprünglich für langsame, inkompressible Strömungen und die density-based für schnelle, kompressible Strömungen entwickelt. Jedoch liefern beide Methoden bei verschieden grossem Rechenaufwand das gleiche Ergebnis. Bei der coupled Methode werden, im Vergleich zur segregated Methode, die beiden Gleichungen (Masse, Impuls) in einem Schritt gelöst, was den Rechenaufwand bei grossen Rechengebieten reduziert. Alle Solver verwenden zur geometrischen Diskretisierung die Finite-Volumen-Methode, wobei das Finite-Volumen je nach verwendetem Kontrollvolumen

unterschiedlich auf das Netz angewendet wird, was in *Abbildung 2* aufgezeigt wird. Bei der zeitlichen Diskretisierung wenden alle Solver ein Euler-Schema an. [4]

Solver	numerische Methode	Kontrollvolumen	Zeit Diskretisierung	Geometrie Diskretisierung
Ansys CFX	pressure based (coupled)	Zellenscheitel	Finite Differenzen (diverse Euler)	Finite Volumen (Upwind, High-Order)
Ansys Fluent	pressure based (coupled/segregated) oder density based	Zellenmitte	Finite Differenzen (diverse Euler)	Finite Volumen (diverse Upwind)
Numeca	density based	Zellenmitte	Finite Differenzen	Finite Volumen
openFOAM	pressure based (coupled/segregated) oder density based	Zellenmitte	Finite Differenzen (diverse Euler)	Finite Volumen (diverse Upwind)

Tabelle 1: verschiedene Solver



*Abbildung 2: Kontrollvolumen. [12]
links: Zellenmitte (cell-centred), rechts: Zellenscheitel (vertex-centred).*

Es zeigt sich, dass die verschiedenen Solver einen massiven Einfluss auf die Rechenzeit haben, das Ergebnis bezüglich Instabilitäten jedoch unverändert bleibt. Mit der Wahl des richtigen Solvers kann die Simulationsdauer reduziert werden, jedoch nicht die Korrektheit der Lösung.

2.3 Turbulenzmodelle

Ganz anders sieht es bei den verwendeten Turbulenzmodellen aus. Diese scheinen einen grossen Einfluss auf die korrekte Reproduzierung der Instabilität zu haben. Einen Überblick über die gängigsten Turbulenzmodelle liefert *Abbildung 3*. Die RANS-Turbulenzmodelle mitteln statistisch alle zeitlich schwankenden Grössen einer Strömung. Die zusätzlichen Belastungen der Strömung, welche durch die Schwankungen verursacht würden, werden mit einem zusätzlichen Turbulenzterm (Reynolds Stress Tensor) kompensiert. Dies ermöglicht in kurzer Zeit numerisch stabile Resultate. Strömungsphänomene, welche auf die zeitlichen Schwankungen angewiesen sind um zu existieren, sind jedoch bei der RANS nicht ersichtlich.

Einige recherchierte Arbeiten verwenden deshalb ein SAS Turbulenzmodell, bei welchem die Auflösungen der instationären Regionen des Strömungsfeldes dynamisch angepasst werden. Dies führt zu einem LES-Verhalten der Strömung in instationären Bereichen, während in stationären die numerischen Vorteile der RANS ausgenutzt werden können. SAS erfordert in den instationären Regionen ein sehr feines Netz und sehr kleine Zeitschritte, um zu konvergieren. Deshalb ist dieses Turbulenzmodell mit moderatem Rechenaufwand nicht zu einer Lösung zu bringen und für diese Arbeit ungeeignet.

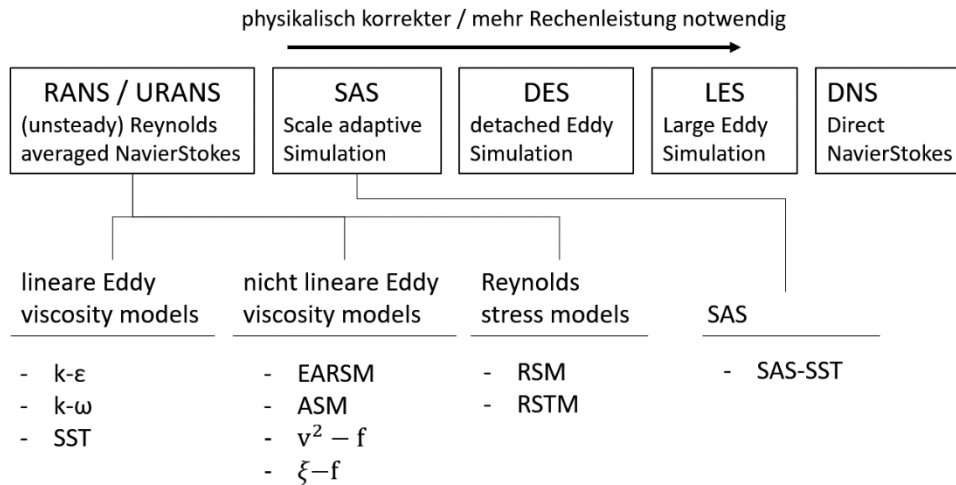


Abbildung 3: Turbulenzmodelle

Bei (U)RANS mit linearen Eddy viscosity Turbulenzmodellen kann das isotropische Verhalten kritisiert werden. Sie weisen nicht physikalisches Verhalten bei Staupunkten der Randschicht und bei gekrümmten Stromlinien auf. Etwas besser wird es bei nicht linearen Eddy viscosity Modellen. Die 4-equation Modelle (v^2-f) führen zwei zusätzliche Gleichungen ein, welche das Verhalten der Strömung in Wandnähe verbessern. Das EARSM Modell erweitert die in den Standard-Zweigliedungsmodellen verwendete Boussinesq Hypothese durch zusätzliche algebraische Terme, was das Verhalten bei Sekundärströmungen verbessert. Zusätzlich kann bei EARSM noch die curvature correction (CC) aktiviert werden, wobei der, in der Boussinesq hypothesis verwendete, Wirbelstärkentensor eine algebraische Korrektur erhält. Dieses Modell ist besonders geeignet für Strömungen mit Sekundärströmungen, gekrümmten Stromlinien und Systemrotation.

Ein anderer Ansatz den Reynolds Stress Tensor zu ermitteln, liefern die Reynolds Stress Turbulenzmodelle. Hier wird der Reynolds Stress Tensor mit einer Transportgleichung gesucht. Dies ist eine numerisch instabile Sache und braucht sehr viel Rechenleistung, ist jedoch das physikalischste Turbulenzmodell einer RANS.

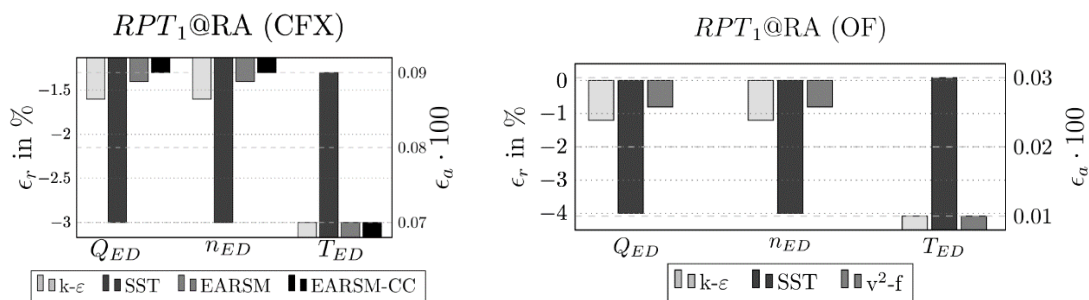


Abbildung 4: Einfluss verschiedener Turbulenzmodelle ($LA = 10^\circ$) [5]
 Q_{ED} = d-los Volumenstrom, n_{ED} = d-los Drehzahl, T_{ED} = d-los Drehmoment
 ϵ_r = relative Abweichung, ϵ_a = absolute Abweichung

In anderen Arbeiten vorgefundene Turbulenzmodelle sind k- ϵ , SST, v^2-f , EARSM und SAS-SST. Dies sind auch jene, welche durch diese Recherche für dieses Problem als die sinnvollsten Modelle hervor gingen. Das SAS-SST Turbulenzmodell, welches immer die besten Resultate lieferte, scheidet

aufgrund seines enormen Rechenaufwands aus. Die verbleibenden Modelle wurden in [5] auf ihre Fähigkeit zur Abbildung der Kennlinie hin untersucht. Das Resultat ist in *Abbildung 4* ersichtlich. Auffallend ist die Unfähigkeit des SST Turbulenzmodelles, die Realität abzubilden, was sich mit der Arbeit aus [11] deckt. Das EARSM-CC (mit curvature correction) Turbulenzmodell scheint am besten abzuschneiden, gefolgt vom v^2 -f. Beim v^2 -f und beim EARSM liefert die bessere Abbildung der Grenzschicht den entscheidenden Vorteil gegenüber k- ϵ . Beim EARSM mit CC kommt noch die Verbesserung durch die Korrektur der Stromlinienkrümmung hinzu.

Das überholte k- ϵ Modell scheint trotz kleinem Rechenaufwand einige Phänomene richtig abzubilden und reproduziert instabiles Verhalten näherungsweise in kurzer Zeit. Mit etwas mehr Rechenaufwand können mit dem EARSM-CC die Strömungsphänomene schon relativ physikalisch abgebildet werden. Das v^2 -f Turbulenzmodell liefert trotz höherer Rechenzeit weniger gute Ergebnisse als EARSM-CC. Anscheinend sind Sekundärströmungen gegenüber der Grenzschicht ausschlaggebender für das gewünschte instabile Verhalten der PT.

2.4 Randschicht Netzverfeinerung (y^+)

Während dem Schreiben des letzten Kapitels wurde bewusst, dass die Grenzschicht einen wesentlichen Einfluss auf das instabile Verhalten von Pumpturbinen im S-Schlag hat. Deshalb wird auch auf die geometrische Diskretisierung im Bereich der Grenzschicht eingegangen.

Die Grenzschicht scheint neben dem instationären Verhalten der Turbulenz und den Effekten aufgrund von gekrümmten Stromlinien der dritte, entscheidende Faktor bei der korrekten Reproduzierung des instabilen Verhaltens zu sein. Deshalb sollte das Netz in Randnähe genügend fein aufgelöst sein. Gemäss [5] sollte y^+ in den entscheidenden Bereichen (Stützschaufeln, Leitschaufeln, Laufrad, Diffusor) der Domain den Wert 5 nicht überschreiten wie in *Abbildung 5* zu sehen ist. Dies wird bei der Verwendung des v^2 -f Turbulenzmodelles den grössten Effekt erzeugen, ist jedoch auch bei den anderen Turbulenzmodellen zu empfehlen.

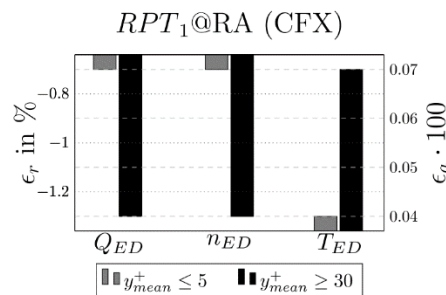


Abbildung 5: Einfluss von y^+ ($LA = 10^\circ$) [5]
 Q_{ED} = d-los Volumenstrom, n_{ED} = d-los Drehzahl, T_{ED} = d-los Drehmoment
 ϵ_r = relative Abweichung, ϵ_a = absolute Abweichung

3 Untersuchungsobjekt

Das zu untersuchende Objekt ist ein PT-Modell, welches von der Firma Andritz Hydro AG zu Forschungszwecken an der Hochschule Luzern im PT-Prüfstand installiert wurde. Bei dem Modell handelt es sich um eine PT mit einer kleinen spezifischen Drehzahl von $n_q = 26 \text{ min}^{-1}$. Die Definition von n_q lautet:

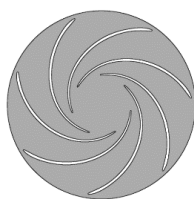
$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{\dot{V}}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad (3-1)$$

Diese Kenngrösse gibt das Einsatzgebiet der Maschine an.²

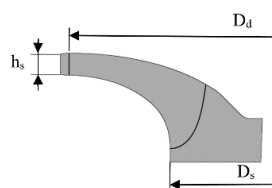
Laufräder mit kleinem n_q , wie das zu untersuchende Laufrad, sind für grosse Fallhöhen und somit zur Verarbeitung von grossen Druckdifferenzen bei kleinen Volumenströmen ausgelegt. Um dieses grosse Druckgefälle in nur einer Turbinenstufe verarbeiten zu können, muss die Arbeit durch die Fliehkraftkomponente aus der Eulergleichung (3-2) durch geeignete Laufrad-Geometrie maximiert werden. Dies resultiert in einem langgezogenen Meridianschnitt mit kleiner Querschnittsfläche und grossem Durchmesser Verhältnis (D_d/D_s). Diese Geometrie weist sehr schlechte strömungsführende Eigenschaften auf und macht diese Modelle anfällig für Strömungsinstabilitäten.

$$e_A = H \cdot g = \frac{\Delta p}{\rho} = \underbrace{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}}_{\text{kin. Energie}} + \underbrace{\frac{u_2^2 - u_1^2}{2}}_{\text{Fliehkraft}} \quad (3-2)$$

Weitere Angaben zum vorliegenden Pumpturbinenmodell sind in *Abbildung 6* und *Tabelle 2* angegeben.



(a) Grundriss



(b) Meridianschnitt



(c) Modell

Abbildung 6: Untersuchungsobjekt - Pumpturbinenmodell

$N_q \text{ (min-1)}$	$D_d \text{ (m)}$	$D_s \text{ (m)}$	$h_s \text{ (m)}$	Laufradschaufeln	Leitschaufeln
26	0.4221	0.2004	0.0222	7	20

Tabelle 2: Kennwerte des Pumpturbinen Modells

² Weitere Informationen siehe [11, Abbildung 1, Kapitel 2.1]

4 Numerisches Modell

Bei der Erstellung des numerischen Modelles wurden die Erkenntnisse aus *Kapitel 2* beachtet und so gut wie möglich umgesetzt.

Nr.	Materialmodell	Solver	Turbulenzmodell
1	Wasser (20°C)	openFOAM (coupledTransientMotionHandlerInterFaceIncFoam-3.41MP)	k-ε
2	Wasser (20°C)	CFX (Heat Transfer: Isothermal)	EARSM-CC

Tabelle 3: Übersicht numerisches Modell

4.1 Materialmodell

Eigenschaft		Wert	Erkenntnis
Dichte	(ρ)	998.21 [kg/m ³]	
Dynamische Viskosität	(η)	1.0012 x 10 ⁻³ [kg/(m·s)]	
Wärmekapazität	(cp)	4185 [J/(kg·K)]	
Wärmeleitfähigkeit	(λ)	0.59801 [W/(kg·K)]	
Reynoldszahl	(Re)	~ 501'000 [-]	turbulente Strömung
Machzahl	(Ma)	max. 0.0017 [-]	inkompressible Strömung

Tabelle 4: Materialkennwerte

Als Material wird Wasser bei 20°C verwendet. Die Strömung in der PT liegt in jedem Fall unterhalb der Grenze von Mach = 0.3, weshalb das Material als inkompressibel angenommen wird. Zudem ist die Reynoldszahl weit über dem Grenzwert von 2300 (turbulenter Umschlag in Rohrströmungen), weshalb die Strömung in der gesamten Domain turbulent ist. Stoffeigenschaften gemäss [16]

4.2 Netz

Die gesamte Rechendomain besteht aus vier Teil-Netzen. So können Laufrad und Leitschaufelwinkel für neue Konfigurationen ausgewechselt werden. Es sind alles strukturierte Netze und wurden mit Pointwise im CC FMHM erstellt. Während Netz 1 und 4 unverändert in diversen früheren Arbeiten zum Einsatz kamen, wurden die Netze 2 und 3 mehrfach angepasst und optimiert. Die Übergabe der Daten zwischen den stehenden Netzen (grün) erfolgt Zelle für Zelle, ohne spezielle Behandlung der Daten. Zwischen dem rotierenden Laufradnetz (blau) und den anschliessenden stehenden Netzen werden die Daten ebenfalls Zelle für Zelle übergeben, jedoch wird bei jedem Zeitschritt die neue Position der Zellen des Laufradnetzes berücksichtigt.

Laufradseitenräume wurden nicht modelliert, womit Leakageströmungen nicht berücksichtigt werden. Das Ende des Saugrohres wurde mit einem konvergenten Rohrstück verlängert. Diese Modifikation der realen Geometrie verbessert das Konvergenzverhalten, hat jedoch auf die Lösung und das instabile Verhalten keinen Einfluss.

Die einzelnen Netze inkl. der verwendeten Benennung sind in *Abbildung 7* zu sehen. Die zugehörigen Qualitätsmerkmale sind in *Tabelle 5* gelistet.

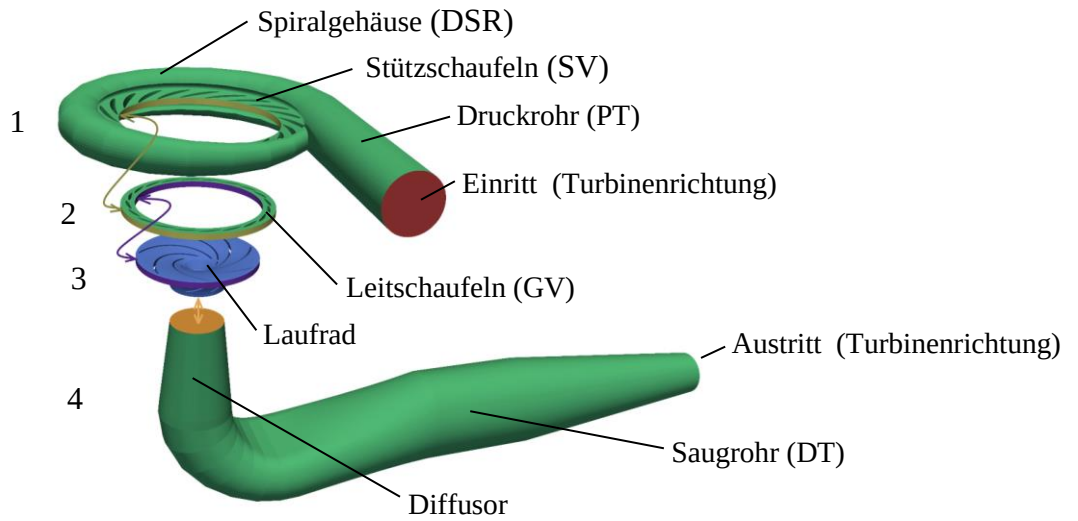
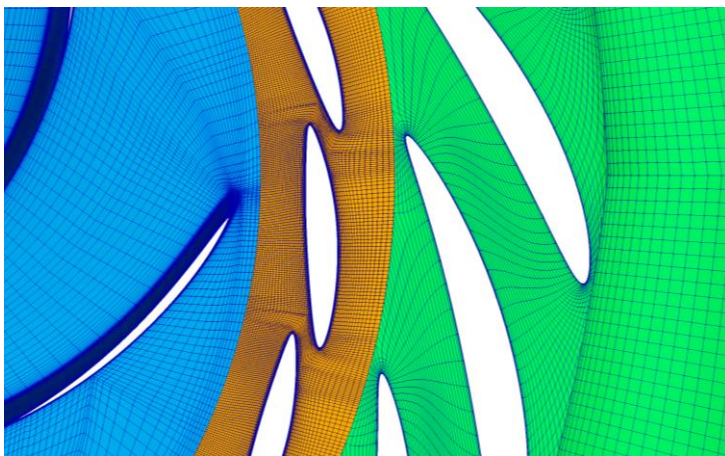


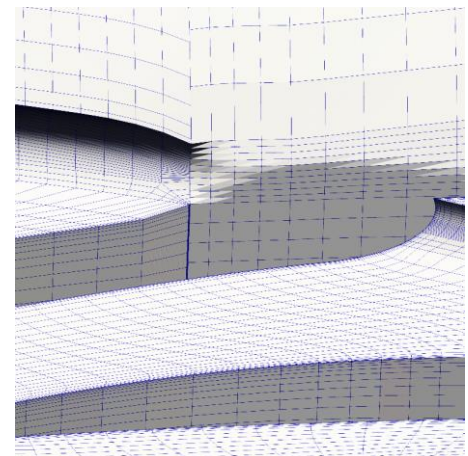
Abbildung 7: Netzkomponenten (1-4)

Nr.	Name	Netzgrösse (Hexa-Elemente) [Mio]	orthogonaler Winkel [min-Wert]	Volumen- verhältnis [max-Wert]	Aspekt- verhältnis [max-Wert]	y+ (Randschicht)	
						min	max
1	Druckrohr, Spiralgehäuse, Stützschaufeln	1.465	18.7°	396	438	11	14
2	Leitschaufeln	4.746	45.3°	4	58	11	39
3	Laufrad	3.335	26.6°	7	357	11	35
4	Diffusor, Saugrohr	0.791	45.1°	4	123	11	710
	Global	10.337	18.7°	396	438	11	710

Tabelle 5: Netz, Qualitätsmerkmale gemäss CFX



a) Ausschnitt schaufelfreier Raum



b) Bereich Sporn

Abbildung 8: Netztopologie

Da der schaufelfreie Raum und die Laufradeintrittskante gemäss [17] bezüglich Instabilität besonders wichtige Gebiete darstellen, wurden diese Teile des Netzes bereits mehrfach überarbeitet und optimiert. In *Abbildung 8 a* ist ein Ausschnitt der Topologie dieses Gebietes aus dem verwendeten Netz abgebildet. Wie zu sehen ist, wurde der Bereich zwischen Leitschaufeln und Laufradeintrittskante sehr fein aufgelöst. Auch die Zellen um die Laufradeintrittskante wurden der Strömung entsprechend fein aufgelöst.

Wie aus *Tabelle 5* entnommen werden kann, sind die Maximalwerte für Volumen- und Aspektverhältnis relativ gross. Das Problem ist auf den Bereich Sporn zurückzuführen. Wie in *Abbildung 8 b* zu sehen ist, treffen in diesem Bereich kleine mit grossen Zellen zusammen. Bis anhin konnten jedoch keine negativen Auswirkungen dieses Bereiches auf die Lösung festgestellt werden.

Die Randschicht weist gemäss *Tabelle 5* nicht die nach *Kapitel 2.4* geforderte Qualität auf. Im Diffusor sind, wie in *Abbildung 9* ersichtlich, für y^+ Extremwerte von 710 erreicht worden. Dies sind zwei Grössenordnungen mehr, als die geforderten 5 aus *Kapitel 2.4*. Konvergenz wurde trotzdem erreicht, Die entstandene Strömung muss in diesem Bereich jedoch mit Vorsicht genossen werden.

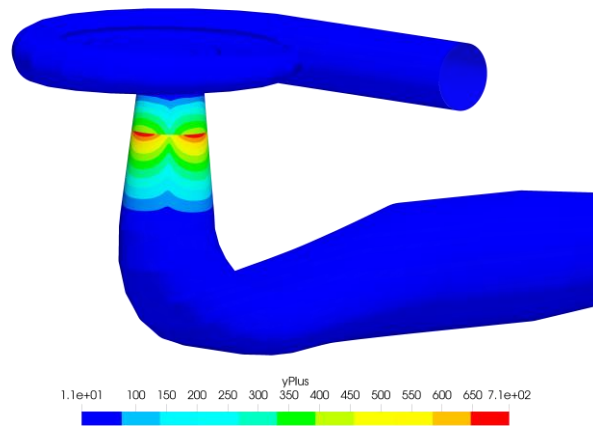


Abbildung 9: y^+ bei OP4

4.3 Solver & numerische Schemata

Die verwendeten Solver, OpenFOAM (OF) und Ansys CFX, sind beides numerische Löser der Navier-Stokes-Gleichung (NSG) (Impulsgleichung, Kontinuitätsgleichung und Energiegleichung). Die konstante Dichte des Materialmodells und die Annahme von isothermer Expansion erlaubt es, die Energiegleichung in CFX abzuschalten (Isothermal). In OF wird ein vom CC FMHM entwickelter Solver namens „*coupledTransientMotionHandlerInterFaceIncFoam-3.41MP*“ verwendet. Wie alle IncFoam-Solver in OF verwendet dieser Solver die NSG für inkompressible Fluide.

Beide (OF und CFX) arbeiten mit der finiten Volumen Methode und sind pressure-based coupled Solver (siehe *Kapitel 2.2*). Die coupled Methode löst die hydrodynamischen Gleichungen für Geschwindigkeit und Druck in einem System. Dies reduziert die notwendige Anzahl an Iterationen bis zur Konvergenz. Beide haben einen integrierten MotionHandler, welcher rotierende Netz-Gebiete entsprechend der Simulationszeit und der Drehzahl dreht. Die Diskretisierung der konvektiven Terme erfolgt mittels high-resolution (selbständige Wahl zwischen 1. und 2. Ordnung), die zeitlichen Terme werden mit backward Euler (1. Ordnung) diskretisiert. Das Konvergenzkriterium für die einzelnen Zeitschritte liegt bei 1×10^{-10} oder bei Erreichen von 10 Iterationen.

So unterscheiden sich die beiden Solver nur in der Art des Kontrollvolumens, was die beiden Resultate vergleichbar machen soll.

4.4 Turbulenzmodell

Die verwendeten Turbulenzmodelle sind k-ε und EARSM-CC, jeweils mit einer automatischen Randschichtbehandlung (awt). Da das EARSM Turbulenzmodell im lizenzfreien OF noch nicht implementiert wurde, wird es parallel zum OF in CFX gerechnet. Die Diskretisierung der Turbulenz erfolgt mit einem Schema der 1. Ordnung für k-ε und einem high-resolution für EARSM-CC.

4.4.1 k-ε

Das k-ε Modell ist ein Standard-Zweigleichungsmodell. Dabei werden zwei Transportgleichungen für die turbulente kinetische Energie (k) und die Dissipationsrate (ε) gelöst. Daraus ergibt sich eine turbulente Viskosität. Mit deren Hilfe wird aus dem Geschwindigkeitsfeld der Reynolds'sche Spannungstensor berechnet, welcher wiederum in der Reynolds averaged NSG verwendet wird.

$$\eta_T = \rho \cdot c_\eta \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4-1)$$

$$-R_{ij} = \eta_T \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \left(\rho k + \eta_T \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \quad (4-2)$$

$c_\eta = 0.09$, R_{ij} : Reynolds'scher Spannungstensor, δ_{ij} : Einheitsmatrix mit entsprechend vielen Einträgen

Bei diesem Turbulenzmodell werden also zwei Transportgleichung und eine lineare algebraische Gleichung zur Ermittlung der Turbulenz bei jeder Iteration gelöst.

4.4.2 EARSM-CC

Das verwendete EARSM ist ein nicht lineares Zweigleichungsmodell auf der Basis von k-ε. Auch EARSM berechnet die Transportgleichung für k und ε und definiert daraus die turbulente Viskosität (4-1). Der Reynolds'sche Spannungstensor wird jedoch aus dem Anisotropie-Tensor berechnet, welcher wiederum durch eine nicht lineare, algebraische aber explizite Matrix-Gleichung berechnet wird. Die genaue Anzahl an Termen dieser Matrix-Gleichung ist je nach Implementierung verschieden. (4-3)

$$\frac{R_{ij}}{\rho} = k \left(a_{ij} + \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \right) \quad (4-3)$$

wobei $a_{ij}(S_{ij}, \Omega_{ij}, \eta_T, \rho, \vec{v})$

a_{ij} : Anisotropie-Tensor, S_{ij} : Formänderungsgeschwindigkeitstensor, Ω_{ij} : Wirbelstärkentensor

Bei aktiviertem CC wird der Wirbelstärkentensor Ω_{ij} mit einer zusätzlichen algebraischen Gleichung korrigiert. Bei diesem Turbulenzmodell werden also zwei Transportgleichungen und zwei nicht lineare algebraische Gleichungen bei jeder Iteration zur Ermittlung der Turbulenz gelöst.

4.5 Rand- & Anfangsbedingung

Die Randbedingungen wurden gemäss *Tabelle 6* gesetzt. Für den Volumenstrom am Eintritt wurden die Messergebnisse aus dem Labor verwendet. Diese sind in *Tabelle 7* zusammengetragen.

Art der RB	Eintritt	Wände	Austritt
Dirichlet	$\dot{V}$, k , ε	$v = 0 \text{ m/s}$	$p = 0 \text{ Pa}$
Neumann	p	p , k , ε	v , k , ε

Tabelle 6: Randbedingungen

Für die Bestimmung der Anfangsbedingung für den OP4 wurde eine stationäre Simulation gemacht. Dabei wurden die Anfangsbedingungen $\dot{V}$ aus der Messung und k & ε mit 5% Turbulenz am Eintritt verwendet. k und ε werden gemäss [3] wie folgt berechnet:

$$k = \frac{2}{3} \cdot (I \cdot \bar{v}_{IG})^2 \quad (4-4)$$

$$\varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{0.3 \cdot D_{Inlet}} \quad (4-5)$$

I : Intensität der Turbulenz (5%), $\bar{v}_{IG}$: Geschwindigkeit am Eintritt, $D_{Inlet} = 0.2001 \text{ m}$

Alternative Methoden zur Ermittlung der Anfangsbedingung des ε Wertes für die stationäre Simulation sind folgende (aus [6]):

$$\varepsilon = \frac{\rho \cdot c_\eta \cdot k^2}{\eta} \cdot \left(\frac{\eta_T}{\eta} \right)^{-1} \quad (4-6)$$

$$\varepsilon = \frac{c_\eta \cdot k^{\frac{3}{2}}}{l_{mix}} \quad , \quad l_{mix} = \frac{0.07 \cdot D_{Inlet}}{c_\eta^{\frac{3}{4}}} \quad (4-7)$$

$\frac{\eta_T}{\eta} = 10$: bei 5% Turbulenz entspricht der Bruch 10, l_{mix} : Mixlänge ($\sim$ Wellenlänge des Turbulenzwirbels)

Es wurde die Formel (4-5) verwendet, da CFX, wenn nicht weiter spezifiziert, diese Methode verwendet. So sollen die Lösungen von CFX und OF vergleichbar werden.

Die Lösung der stationären Simulation wurde als Initialisierung für die transiente Simulation am OP4 verwendet. Diese transiente Lösung wiederum diente allen anderen Betriebspunkten als Anfangsbedingung. Der Betriebspunkt OP4 wurde gewählt, da er mitten im instabilen Bereich der LA6°-Kennlinie des zu untersuchenden Objektes liegt. Er soll der Strömung die Instabilität für die restlichen Betriebspunkte mitgeben.

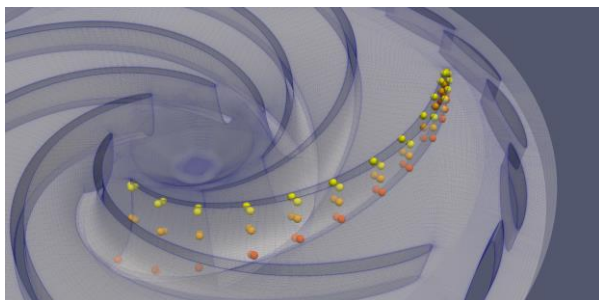
Betriebspunkt (OP)	Volumenstrom (l/min)	Drehzahl (min ⁻¹)
OP1	49.048	1500
OP2	26.556	1500
OP3	21.396	1500
OP4	14.894	1500
OP5	3.878	1500

Tabelle 7: Messwerte aus Pumpturbinenprüfstand

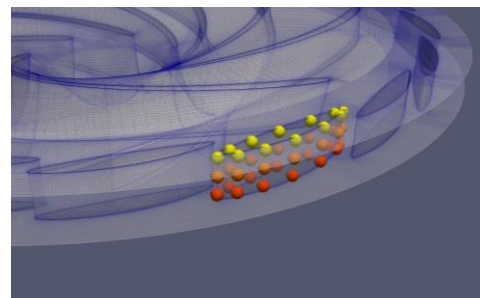
4.6 Messgrößen

An diversen Stellen wurden Messpunkte (Probes) und Messflächen (Patches) im Netz definiert. Über diese werden einige physikalische Größen während der Simulation aufgezeichnet.

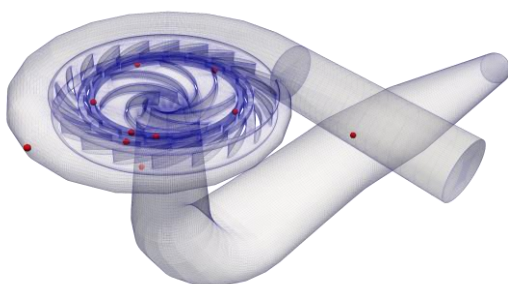
So wurden an einem der Laufradschaufeln auf drei Ebenen (10%, 50%, 90% Shroud) Druckmesspunkte platziert (*Abbildung 10 a*). Die Zeitsignale des Druckes, verteilt über die Laufradschaufel, sollen später analysiert werden. Selbiges wurde an zwei Leitschaufeln (Schaufeln Nr. 1 & 6) durchgeführt (*Abbildung 10 b*). Um die Ergebnisse der Simulation mit den Messungen aus dem Labor vergleichen zu können, wurden die Druckmessstellen vom Labor ins numerische Modell übernommen (*Abbildung 10 c*).



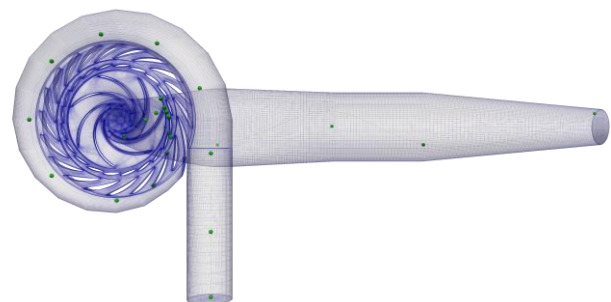
a) Laufradschaufel



b) Leitschaufel



c) Labormesspunkte



d) entlang Stromlinie

Abbildung 10: Messpunkte im Netz (Probes)

Um den Verlauf verschiedener physikalischer Größen auf ihrem Weg durch die Turbine verfolgen zu können, wurden entlang einer Stromlinie 28 Messpunkte platziert (*Abbildung 10 d*). An diesen Stellen werden Druck (p), Geschwindigkeit ($\vec{v}$), Totaldruck (p°), turbulente kin. Energie (k) und Wirbelstärke ($\vec{\omega}$) aufgenommen. Die Wirbelstärke wird zusätzlich an zwei Stellen (90° zueinander) im schaufelfreien Raum wiederum auf den drei Ebenen aufgenommen.

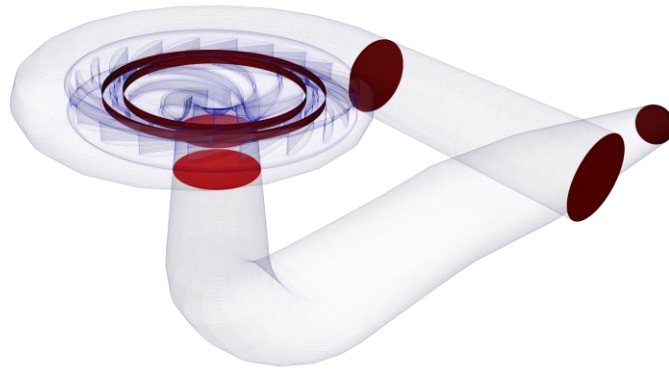


Abbildung 11: Messflächen im Netz (Patches)

In *Abbildung 11* sind alle Messflächen rot markiert. Grössen, welche über diese Messflächen aufgenommen werden, werden flächengemittelt. Zusätzlich werden an den Wand-Flächen des Laufrades, durch die Strömung verursachte Kräfte aufgezeichnet. Dies jeweils für jede Laufradschaufel einzeln und zusätzlich über alle Schaufeln, Hub und Shroud. Der Druck wird am Ein- und Austritt aufgenommen und die Wirbelstärke an den beiden Patches Laufradeintritt und -austritt. Der totale Druck (Massenstrom gemittelt) wird an allen Messflächen aufgenommen, dies erlaubt genaue Energiebilanzen durch das Laufrad hindurch. Am Patch Laufradeintritt wird jeweils der ein- und ausströmende Massenstrom integriert und separat aufgenommen.

Mit den aufgenommenen Zeitsignalen erhofft man sich durch FFT Analysen, zeitabhängige Phänomene ausfindig machen zu können und zu lokalisieren.

5 PostProcessing Tool

Mit diesem Tool, sollen simulierte Betriebspunkte von PT automatisiert ausgewertet werden. Es sollen Werte, Ansichten und Diagramme generiert werden, welche Aussagen bezüglich Instabilität ermöglichen. Mithilfe der Ausgaben muss entschieden werden können, ob das betrachtete PT-Laufrad instabile OP's aufweist oder nicht.

5.1 Architektur & Softwareumgebung

Das PostProcessing-Tool (PP-Tool) muss auf dem Cluster des CC FMHM lauffähig sein. Es soll von jedem Mitarbeiter des CC FMHM, sowie nachfolgenden Studenten bedient und erweitert werden können. Aus diesen Gründen wurde als Programmumgebung Python 2.7 mit einer Schnittstelle zu pypython gewählt. Python ist eine interpretierte höhere Programmiersprache. Interpreter sind für alle gängigen Betriebssysteme (Windows, Mac OS X, Linux) verfügbar und aufgrund seiner einfachen Syntax weit verbreitet. Deshalb sind viele nützliche Bibliotheken zur Funktionserweiterung verfügbar und eine grosse, aktive Community im Internet hilft bei Problemen. Pypython ist ein auf ParaView angepasster Python Interpreter, welcher es erlaubt, ParaView über die Kommandozeile zu bedienen und auf sämtliche Funktionen des Programmes zuzugreifen. Mit ihm ist es möglich, automatisiert PostProcessing in ParaView zu betreiben. Damit das PP-Tool lauffähig ist, müssen neben dem Interpreter (Python 2.7) noch folgende Bibliotheken installiert werden:

- PyQt5 (Bibliothek zur Erstellung und Manipulation von grafischen Benutzeroberflächen)
- NumPy (Bibliothek für wissenschaftliche Berechnungen – lineare Algebra, Matrizen, Fourier)
- Matplotlib (Bibliothek zur Erstellung von 2D Plots)

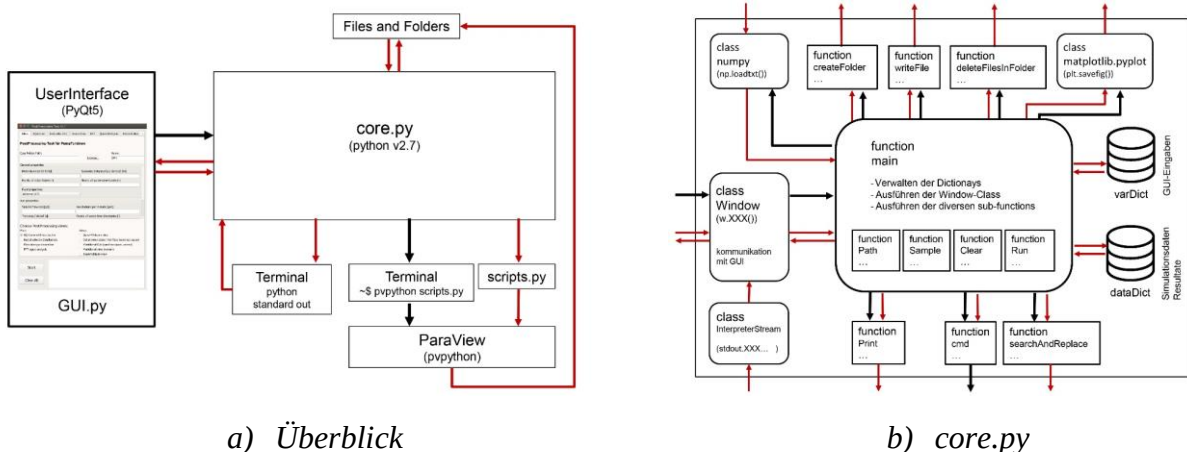


Abbildung 12: Softwarearchitektur

Mit dem Befehl „*python core.py*“ in der Kommandozeile, wird der Kern der Applikation geladen. Dieser wird die grafische Benutzeroberfläche (GUI) zeichnen, welche fortan für die Steuerung und die notwendigen Eingaben des Programmes zuständig ist.

In Abbildung 12 ist die Softwarearchitektur des PP-Tools zu sehen. Die Eingaben aus dem GUI werden an den *core.py* weitergegeben und dort verarbeitet. Wenn nötig, wird über die Schnittstelle (*function cmd* und *function searchAndReplace*) ein PostProcessing in Paraview gestartet. Als Ausgabe dienen in jedem Fall Medien- und Textfiles, welche während der Verarbeitung erstellt und über eine weitere Schnittstelle (*function createFolder*, *function writeFile*,

function deleteFilesInFolder, plt.savefig()) im entsprechenden Case-Folder in den Unterordner „Post“ gespeichert werden.

	Komponente	Beschreibung
E(ingabe)	GUI	Steuerung der Anwendung, sowie Auswahl der auszuwertenden Simulation und der zu generierenden Ansichten und deren Einstellungen
V(erarbeitung)	Python-Scripts & Pypython-Scripts	Die ausgewählten Ansichten werden durch aufrufen von Unterfunktionen oder mit Pypython nacheinander generiert.
A(usgabe)	TXT-, PNG-, AVI-Files	Die Resultate (verschiedene generierte Dateien), werden im Case-Folder im Unterordner „Post“ gespeichert.

Tabelle 8: EVA des PP-Tools

Neben den Files, stellt das Ausgabefeld im GUI, eine weitere Ausgabe dar. Dabei werden Ausgaben, welche über den „standard out“ von Python (`print(...)`) ausgegeben werden, durch die *class InterpreterStream* abgefangen und an das GUI weitergeleitet. Dies ermöglicht die Kommunikation mit dem Benutzer während der Auswertung. Dieser wird über Zwischenresultate und den Verlauf der Auswertung laufend informiert oder auf Fehleingaben im GUI aufmerksam gemacht.

Über die Schnittstelle (*np.loadtxt()*) ist das PP-Tool im Stande, die von der Simulation geschriebenen Files der Zeitsignale (siehe Kapitel 4.6) selbständig einzulesen und für die Weiterverarbeitung abzuspeichern. Die Funktionen *Path*, *Sample*, *Clear* und *Run* werden durch Buttons im GUI gestartet. Diese starten die eigentlichen Programmfunktionen des PP-Tools:

- Mit *Path* wird ein Explorer-Fenster geöffnet, mit welchem das .foam-File der Simulation und somit der auszuwertende Simulations-Case wählt werden kann.
- *Sample* plottet das Zeitsignal der Druckdifferenz zwischen Inlet und Outlet der Simulationsdomain. Mit deren Hilfe kann die Konvergenzzeit ermittelt werden, was ein wichtiger Eingabeparameter für die Auswertung ist.
- *Clear* setzt das gesamte GUI und die Datenbanken zurück. Alle Eingaben und Resultate werden gelöscht, damit ein neuer Case ausgewertet werden kann.
- *Run* startet die Auswertung. Es werden alle Eingaben überprüft und danach in die Datenbank „varDict“ gespeichert. Dann werden nacheinander alle im GUI selektierten Ansichten durch aufrufen der jeweiligen Subfunction generiert. Diese Subfunctions haben Zugriff auf alle Schnittstellen (*ParaView*, *numpy*, *pyplot*, *writeFile*, *deleteFileInFolder*,...) sowie die Datenbanken (*varDict* und *dataDict*) und verfügen somit über alle Werkzeuge, um die jeweilige Ansicht zu generieren und abzuspeichern.

Weitere Dokumente zur Softwarearchitektur sind im *Anhang A3* zu finden.

5.2 Ansichten

Um instabilitäts-typische Strömungsphänomene erkennen zu können oder zu entscheiden, ob das betrachtete Laufrad stabil ist oder nicht, werden vom PP-Tool wahlweise Ansichten generiert und Werte berechnet. Diese sollen aussagekräftig sein und alles Relevante abbilden können. Dazu wurden einige relevante Ansichten aus recherchierten Arbeiten definiert und in *Tabelle 9* zusammengetragen. Diese Ansichten sollen nacheinander im PP-Tool implementiert werden.

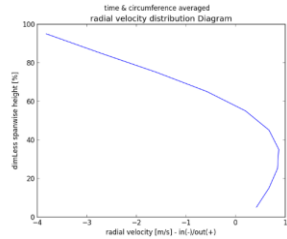
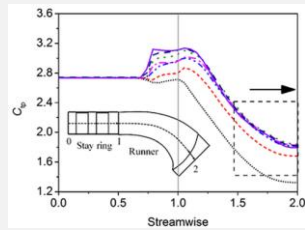
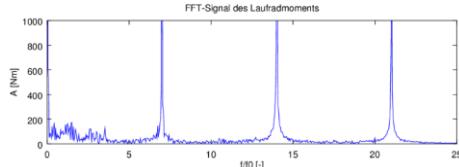
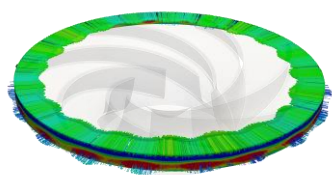
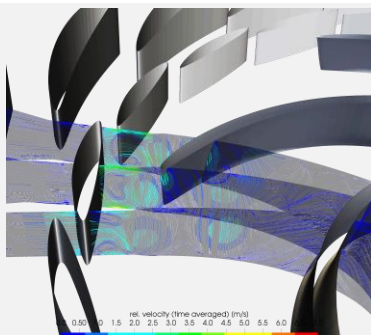
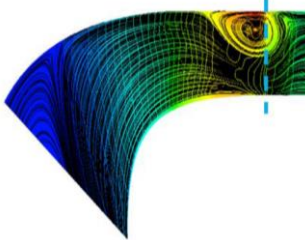
Name	Bild	Beschreibung
4 Quadranten Kennlinie (Prio: 1)		Berechnung von ku_1 , kcm_1 und km_1 Ausgabe: Im GUI und in Textdatei
Radialgeschwindigkeits-verteilung über Spanwise-Höhe (Prio: 2)		Diagramm der Radialgeschwindigkeit (X-Achse) aufgetragen über die Spanwise-Höhe in Prozent (Y-Achse). Ausgabe: PNG des Diagramms in Post-Ordner, sowie Diagrammdaten in Textdatei
Verlauf einer Grösse entlang einer Stromlinie (Prio: 6)		Diagramm einer Grösse, aus Messpunkten von <i>Abbildung 10 d)</i> . Die Grösse zeitlich gemittelt, geplottet als eine Funktion der Distanz dieses Messpunktes zum Inlet entlang der Stromlinie. Ausgabe: PNG's der Diagramme im entsprechenden Unterordner, sowie Diagrammdaten in Textdatei
FFT Zeitsignalanalyse (Prio: 9)		Diagramm der Fourier-Transformierten eines Zeitsignales aus einem der Messpunkte aus <i>Kapitel 16</i> Ausgabe: PNG's der Diagramme im entsprechenden Unterordner, sowie Diagrammdaten in Textdatei
Quasi-Midspan Ansicht (Prio: 3)		Schnittebene horizontal durch das Laufrad gemäss <i>Abbildung 21 a)</i> auf verschiedenen Spanwise-Höhen. Wahlweise mit Contour-Plots verschiedener, zeitgemittelter Grössen und/oder Stromlinien. Ausgabe: PNG's der Ansicht im entsprechenden Unterordner
Radialgeschwindigkeit durch Rotor-Stator Interface (Prio: 4)		Vektorpfeile der Strömung durch die Zylinderebene gemäss <i>Abbildung 21 b)</i> . Länge und Kolorierung der Vektoren mit Radialgeschwindigkeit. Kolorierung der Zylinderebene mit Radialgeschwindigkeit (-1-1). Wahlweise ein Screenshot mit zeitgemittelten Werten und/oder eine Animation der transienten Lösungen. Ausgabe: PNG und/oder AVI der Ansicht im entsprechenden Unterordner
Meridionalschnitt (Prio: 5)		Schnittebene vertikal durch das Laufrad gemäss <i>Abbildung 21 c) und d)</i> . Wahlweise eine Detailansicht (drei Schnitte bei einer Leitschaufel) oder eine Übersicht (Schnitte alle 30° über den gesamten Umfang verteilt) mit eingefärbten 2D-Stromlinien auf den Schnittflächen. Jeweils ein Screenshot mit zeitgemittelten Werten und/oder eine Animation der transienten Lösungen. Ausgabe: PNG und/oder AVI der Ansicht im entsprechenden Unterordner
Meridional View (Prio: 7)		Schnitt durch den Schaufelmeridian gemäss <i>Abbildung 21 e)</i> . Zeitlich und über alle Laufradzischenräume gemittelte Werte des totalen Druckes in einem Contour-Plot und schwarzen 2D-Stromlinien. Ausgabe: PNG der Ansicht im „Post“-Ordner
Blade-to-Blade View (Prio: 8)		Schnittebene horizontal durch das abgewinkelte Laufrad gemäss <i>Abbildung 21 f)</i> auf verschiedenen Spanwise-Höhen. Wahlweise zeitlich gemittelte Werte des totalen Druckes und/oder Wirbelstärke mit schwarzen Stromlinien. Jeweils ein Screenshot mit zeitgemittelten Werten und/oder eine Animation der transienten Lösungen. Ausgabe: PNG und/oder AVI der Ansicht im entsprechenden Unterordner

Tabelle 9: geplante Ansichten im PP-Tool

Bei allen Ansichten wird ein grosser Wert auf den Bereich des schaufelfreien Raumes gelegt, der gemäss [17] in besonderem Masse verantwortlich ist für die Strömungsvorgänge, welche zu Instabilitäten führen. Es sollen die Wirbelbildung und die Rückströmungen in diesem Gebiet beobachtet und analysiert werden können. Mit den FFT Zeitanalysen sollen zeitliche Phänomene untersucht werden, um feststellen zu können, ob zeitlich ändernde Strömungsvorgänge verantwortlich sein könnten.

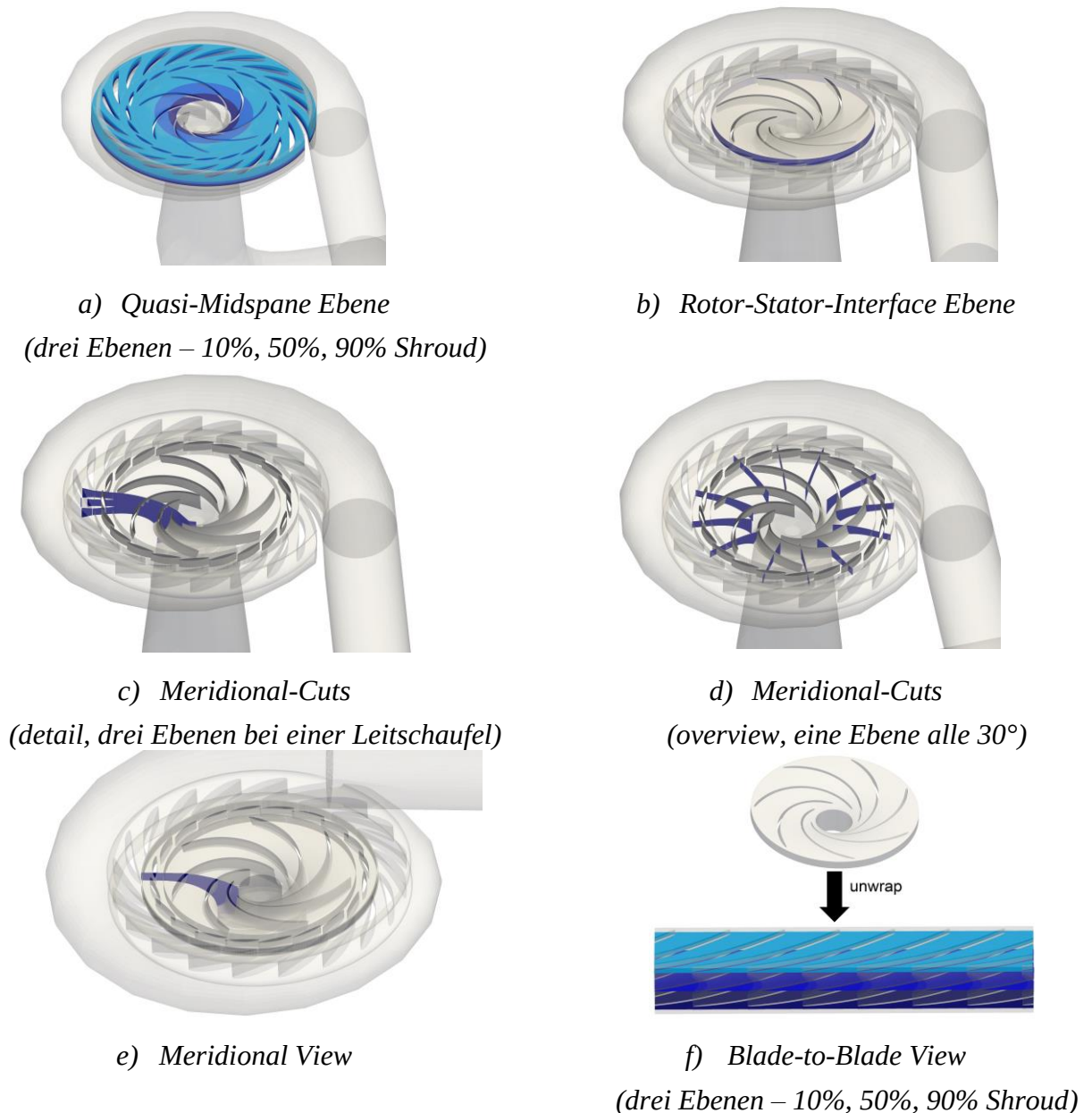


Abbildung 21: verwendete Ebenen für die Ansichten

Abbildung 21 zeigt alle, für ParaView-Ansichten verwendete Schnittebenen und ihre Position in der PT. Da die Implementierung aller Ansichten den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wurden für die einzelnen Ansichten Prioritäten vergeben. Diese sind in *Tabelle 9* ersichtlich. Nach diesen Prioritäten wurde eine Ansicht um die andere in das PP-Tool implementiert, soweit die Zeit reichte.

5.3 Dokumentation

Das PP-Tool soll ein Tool sein, mit welchem alle Simulationsauswertungen des laufenden, numerischen Forschungsprojektes über Pumpturbinen und deren Instabilitäten gemacht werden können (siehe *Kapitel 3*). Es ist bei weitem noch nicht vollständig, weitere Funktionen müssen/sollen in Zukunft noch dazukommen. Grundlage dazu ist eine solide Softwarearchitektur und eine saubere Dokumentation. Im Anhang finden sich deshalb noch zusätzliche Dokumente, welche helfen sollen, das Programm weiterzuentwickeln und zu ergänzen:

- **Anleitung (Anhang A1)**
In der Anleitung werden die Installation und die Bedienung des Tools behandelt. Ausserdem wird jedes Eingabefeld des GUI beschrieben. Am Schluss befindet sich eine Bug-Liste. Bugs, welche während der Bedienung auffallen, können dort eingetragen werden, damit bei Gelegenheit Patches für das PP-Tool gemacht werden können.
- **Variablendeklaration (Anhang A2)**
In der Variablendeklaration sind alle verwendeten, globalen Variablen aufgelistet. Dazu eine Typendeklaration und eine Quellenangabe, welcher Inhalt den Variablen zugewiesen wird. Globale Variablen sind jene Variablen, welche in einer der Datenbanken (varDict oder dataDict) gespeichert sind.
- **Softwarearchitektur (Anhang A3)**
In der Softwarearchitektur befindet sich die Quelle der *Abbildung 12*. Darin sind alle Daten- (rot) und Befehlsströme (schwarz) eingezeichnet. Damit ist ersichtlich, welches Programmmodul für welche Aufgabe zuständig ist.
- **Flussdiagramme (Anhang A4)**
In den Flussdiagrammen ist eine grafische Ansicht des Quellcodes aufgezeichnet. Nicht alle Aktionen sind vollständig dargestellt, jedoch soweit, dass die Logik hinter einem Algorithmus verstanden werden kann. Einige Felder in den Flussdiagrammen haben einen blauen Rahmen und eine Nummer. Dies sind Berechnungsaktionen. Sie beziehen sich auf folgende Formeln:

$$k_{u1} = \frac{n \cdot \pi \cdot D_1}{\sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |\Delta p|}} \quad (5-1)$$

$$k_{cm1} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{D_1^2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |\Delta p|}} \quad (5-2)$$

$$k_{m1} = \frac{M}{|\Delta p| \cdot D_1^3 \cdot \frac{\pi}{8}} \quad (5-3)$$

Formeln (5-1) bis (5-3) aus [8]

Mithilfe folgender Formel kann die Schnitthöhe für 10%, 50% oder 90% Spanwise-Height aus der gesamten Höhe (h_s) ermittelt werden. Für X wird je nach dem 10, 50 oder 90 eingesetzt:

$$coordsZ_x = \frac{h_s}{2} + (X \cdot \frac{h_s}{100}) \quad (5-4)$$

Für das „radialvelocity distribution“ Diagramm musste die dimlose Spanwise-Height errechnet und die in ParaView gemittelte radiale Geschwindigkeit verwendet werden. Dazu wurden die Koordinaten der Punkte (5-5) und (5-6) ermittelt und daraus die jeweilige dimlose Höhe nach (5-7) gerechnet:

$$C_{Z,+}(x) = 0 - \frac{h_s}{2} + x \cdot \frac{h_s}{n} \quad (5-5)$$

$$C_{Z,-}(x) = 0 - \frac{h_s}{2} + (x - 1) \cdot \frac{h_s}{n} \quad (5-6)$$

$$dimLess_{C_{Z,x}} = \frac{1}{h_s} \cdot \left| C_{Z,-}(x) + \frac{|C_{Z,+}(x) - C_{Z,-}(x)|}{2} - (0 - \frac{h_s}{2}) \right| \quad (5-7)$$

$n = \text{Anzahl Punkte} / x = n\text{-ter Punkt}$

Des Weiteren musste für die Ansichten, welche mit ParaView erstellt wurden, die radiale Geschwindigkeit berechnet werden, da diese vom Solver (OF und CFX) nicht ausgegeben wird. Dazu steht in ParaView der Python-Calculator zur Verfügung, welcher Funktionen zur Umrechnung von Vektor- und Skalarfeldern bereits integriert hat.

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \text{norm.} (coordsX * iHat + coordsY * jHat + coordsZ * kHat) \quad (5-8)$$

$$c_{rad} = \vec{c} \cdot \vec{r} \quad (5-9)$$

$$\overrightarrow{c_{rad}} = c_{rad} * \vec{r} \quad (5-10)$$

Die Variable $\vec{r}$ entspricht dem Ortsvektor eines Elements mit den Netzkoordinaten X,Y,Z.

Der Punkt steht im Python-Calculator für ein Kreuzprodukt und ein Stern für eine Multiplikation.

6 Strömungsanalyse

Mit der Strömungsanalyse soll ermittelt werden, ob die erstellten numerischen Modelle die Instabilität im Bereich des S-Schlages korrekt wiedergeben. Dies geschieht durch einen Vergleich der Durchfluss- & Momentenkennlinie des numerischen Modelles, mit jenen der im Labor des CC FMHM gemessenen Werte.

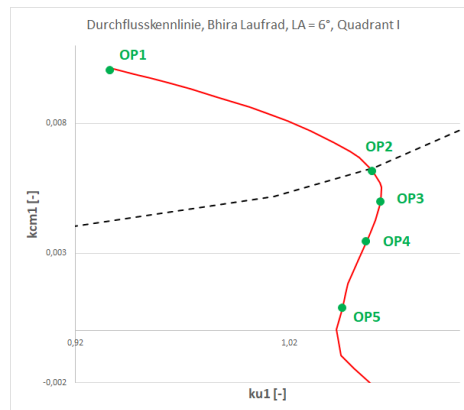
Anschliessend soll mithilfe des PP-Tools ein Betriebspunkt des k - ϵ Modelles ausgewertet und entschieden werden, ob die generierten Ansichten hilfreich sind bei der Bestimmung einer Instabilität des Laufrades. Durch weitere Untersuchung der Strömung wird ermittelt, ob Ansichten noch verändert und/oder weitere Ansichten definiert werden sollen, um die Entscheidungsgrundlage zu verbessern.

6.1 Kennlinienvergleich

Die orange Kennlinie in *Abbildung 22 b) und c)* zeigt die simulierte Kennlinie, welche mit dem, in dieser Arbeit erstellten numerischen Modells, berechnet wurde. Im Vergleich zur blauen Kennlinie (numerisches Modell mit k - ϵ Turbulenzmodell und einer früheren Netzversion (siehe [9])) scheinen die ku_1 -Werte um einen konstanten Faktor nach links verschoben. Nach einiger Suche, konnten nebst dem unterschiedlichen Laufradnetz (welches als Fehlerquelle durch frühere Netzanalysen ausgeschlossen werden kann), zwei Unterschiede gefunden werden.

1. Unterschiedlicher Anfangswert von ϵ in der SteadyState Simulation (statt der Formel (4-5) wurde in der blauen Simulation die Formel (4-6) zur Ermittlung des Anfangswertes von ϵ , verwendet)
2. Unterschiedliche Randbedingung an den Patches ROTOR_HUB/SHROUD_OUT (Statt wie in der blauen Simulation, die Absolutgeschwindigkeit (v) an der Wand in diesem Bereich Null zu setzen, wurde die Relativgeschwindigkeit (w) Null gesetzt. Da die genannten Patches in Realität zum Stator gehören würden, ist es sinnvoll die Absolutgeschwindigkeit in diesem Bereich Null zu setzten, wie es in der blauen Simulation getan wurde.)

Durch zwei Testsimulationen (Quadrate mit rotem Rahmen) konnten diese zwei Unterschiede als Ursprung des abweichenden ku_1 -Wertes bestätigt werden. Die Änderung des Anfangswertes für ϵ (erstes Quadrat von links) macht nicht sehr viel aus. Viel entscheidender ist die unterschiedliche Randbedingung in dem Bereich des Rotors, welcher in Realität zum Stator gehören würde. Im numerischen Modell wurden die -OUT-Patches aus numerischen Gründen dem Rotor zugewiesen, wie es bei der numerischen Turbomaschinenberechnung üblich ist. Dies scheint der entscheidende Faktor zu sein, welcher dem k - ϵ Turbulenzmodell zu einer positiven Steigung in der Durchflusskennlinie verhilft und somit eine Identifikation als instabiles Laufrad zulässt.



a) Simulationsablauf / SST

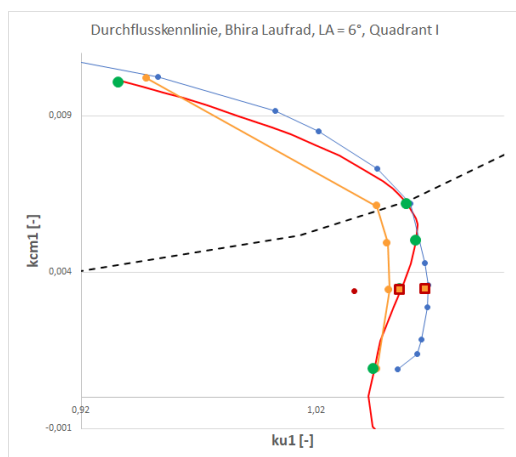
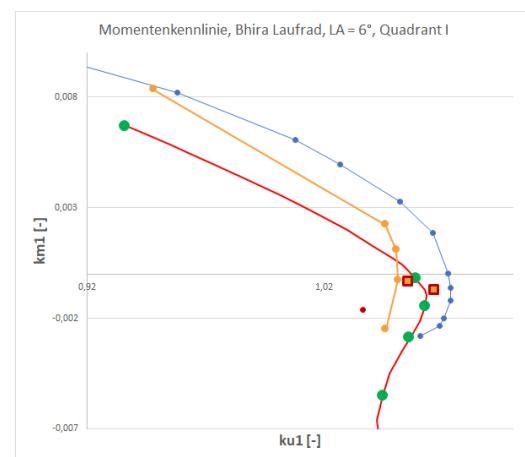
b) Durchflusskennlinie $k-\epsilon$ c) Momentenkennlinie $k-\epsilon$

Abbildung 22: Kennlinienvergleich blaue Kennlinie aus [9]

Im numerischen Modell mit CFX und dem EARSM-CC Turbulenzmodell scheint sich im PreProcessing der stationären Simulation ein Fehler eingeschlichen zu haben. Die Resultate der Simulation sind unrealistisch. Der Fehler konnte jedoch noch nicht ermittelt werden, weshalb die Resultate nicht gelistet sind. Weiter wird auf dieses numerische Modell im weiteren Verlauf der Arbeit nicht mehr weiter eingegangen.

6.2 OP4 mit dem PP-Tool ($k-\epsilon$)

Zur Überprüfung der implementierten Ansichten im PP-Tool und es einem Live-Test zu unterziehen, wurde die Lösung eines Betriebspunktes mit dem PP-Tool vollständig ausgewertet. Der Betriebspunkt 4 wird als auszuwertende Lösung ausgewählt, denn dieser liegt inmitten des instabilen Bereiches (im S-Schlag) und ist besonders geeignet, um die Ansichten zu überprüfen. Dafür wurde dessen Case-Folder, inklusive der enthaltenen Lösungsordner, im PP-Tool geladen und die notwendigen Einstellungen gemäss *Anhang A1* vorgenommen. Sämtliche verfügbaren Ansichten wurden selektiert, um sie vom PP-Tool generieren zu lassen. Das PP-Tool brauchte über 10 Stunden, um die Ansichten aus den 36 Lösungsordnern zu generieren. Der Testlauf verlief ohne Fehlermeldungen. Damit hat das PP-Tool den Live-Test bestanden und es kann bestätigt werden, dass

Version 1.1 des PP-Tools im Stande ist, die implementierten Ansichten aus Lösungsdaten von Pumpturbinen-Simulationen zu generieren.

In den *Abbildung 23* bis *Abbildung 25* sind die aus Sicht des Autors aussagekräftigsten, der bis anhin implementierten Ansichten des PP-Tools abgebildet. Die «original»-Ansicht kommt jeweils vom numerischen Modell, welches in dieser Arbeit erstellt wurde. Die «frühere Sim.»-Ansicht wurde aus dem Modell mit der blauen Kennlinie gemäss *Abbildung 22* generiert. Die «Testsimulation»-Ansicht ist das «original»-Modell, bei welchem die zwei Punkte (ϵ Anfangswert und -OUT-Patch Randbedingung, gemäss Kapitel 6.1) aus dem «früheren»-Modell angeglichen wurden. Dies ist aus dem rechten Quadrat der *Abbildung 22* ersichtlich.

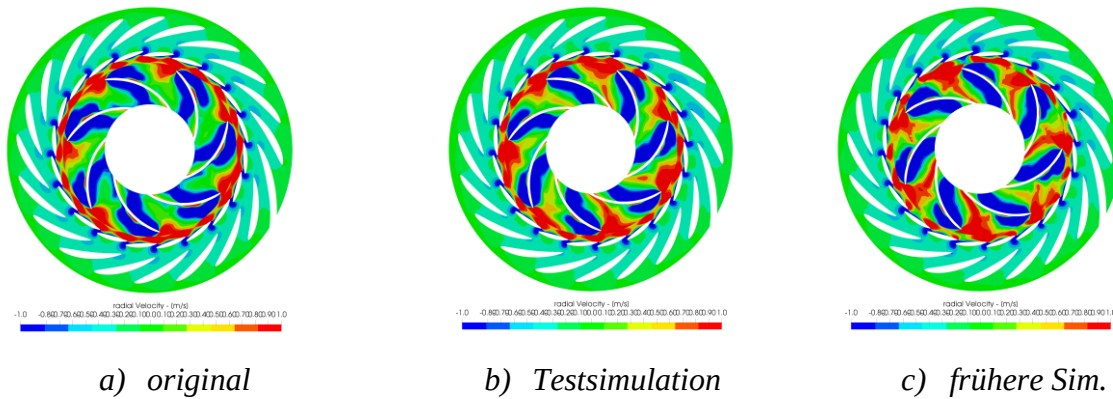


Abbildung 23: Quasi-Meridianschnitt (Radialgeschwindigkeit / -1 bis 1 m/s)

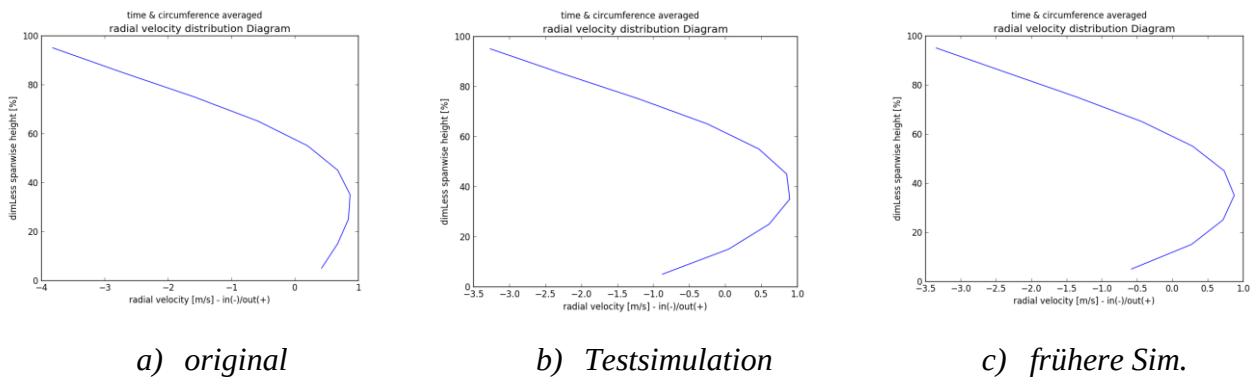


Abbildung 24: Verteilung der Radialgeschwindigkeit über spanwise Höhe in % ab Shroud

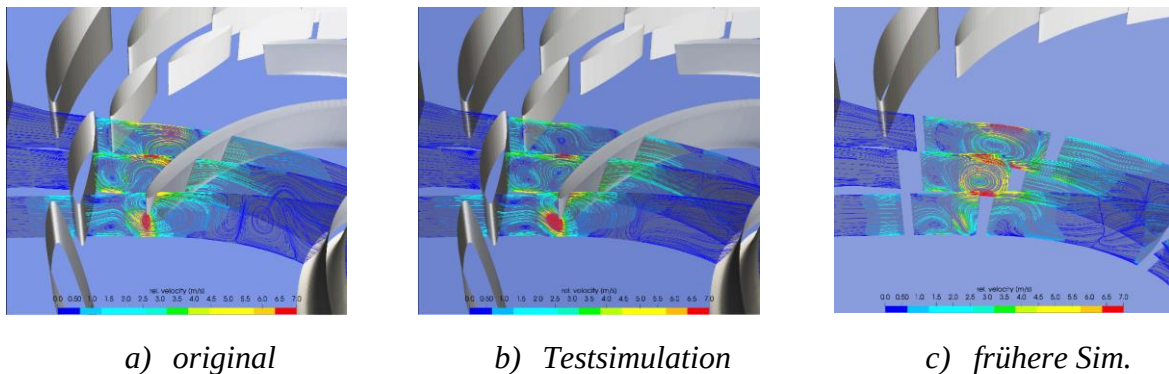


Abbildung 25: Meridional-Cut, Momentaufnahme der Animation aus der Detail-Ansicht

In der Quasi-Meridianschnitt-Ansicht aus *Abbildung 23* ist die zeitlich gemittelte Radialgeschwindigkeit auf einer spanwise Höhe von 50% dargestellt. Blaue Bereiche bedeuten Strömung in die Turbine hinein und rote Bereiche sind Rückströmungen.

Im Diagramm aus *Abbildung 24* ist die Radialgeschwindigkeit zeitlich und über den Umfang gemittelt in Abhängigkeit zur spanwise Höhe in Prozent aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass im oberen Bereich die Strömung mit hoher Geschwindigkeit in die Turbine hineinfliesst, während sie in der Mitte, zwischen Hub und Shroud, aus der Turbine zurück in den schaufelfreien Raum fließt.

In der Detail-Ansicht der Meridional-Cut Ansicht sind die horizontal liegenden Wirbelstrukturen im schaufelfreien Raum und hinter der Druckkante der Laufradschaufel zu sehen. In der zeitlich gemittelten Ansicht ist dieser zweitgenannte Wirbel nicht zu sehen, weshalb diese zeitgemittelte Ansicht weniger aussagekräftig zu sein scheint.

Allgemein scheinen zeitgemittelte Ansichten von vektoriellen Größen (Stromlinien und Vektorpfeile aus einer Geschwindigkeit) weniger aussagekräftig, als deren Animationen der ungemittelten Werten. Experimente mit der Meridional-View und der BladeToBlade-View aus dem ParaView-Plugin «Turbo Blade Post» schlugen bislang fehl, weil die vektoriellen Größen nicht korrekt dargestellt werden. Hoffentlich wird dafür noch eine Lösung gefunden, sodass in Zukunft auch diese wertvollen Ansichten zu Hilfe genommen werden können. Eine weitere hilfreiche Ansicht, wäre eine Animation der Stromlinien im Quasi-Midspan Schnitt, wie in *Abbildung 26* dargestellt. Darauf sind die vertikal liegenden Wirbelstrukturen in den Schaufelräumen des Laufrades zu sehen. Diese könnte zugunsten der in *Tabelle 9* (Quasi-Midspan) erwähnten zeitgemittelten, gefärbten Stromlinien implementiert werden, welche viel weniger aussagekräftig ist.

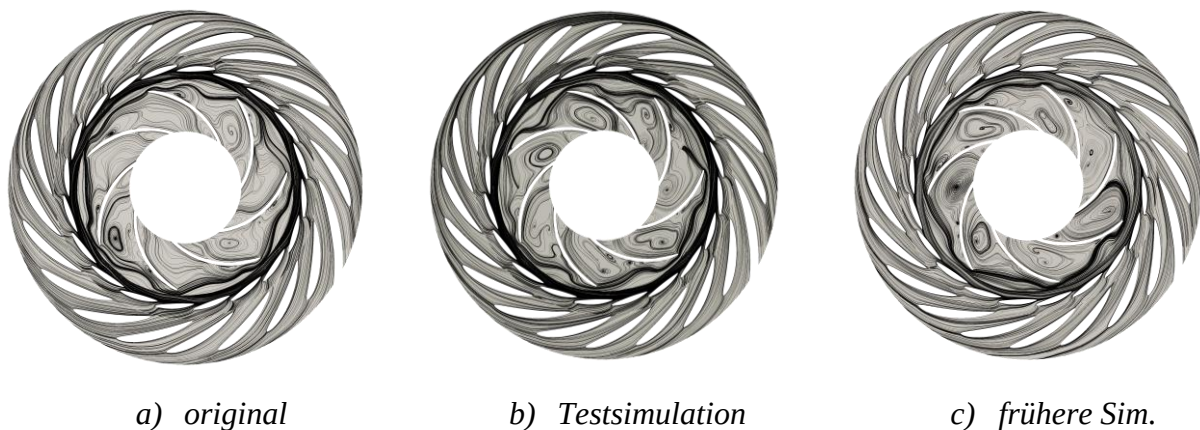


Abbildung 26: Quasi-Meridianschnitt, Momentaufnahme einer Animation mit Stromlinien

Mit den vorgestellten Ansichten (*Abbildung 23* bis *Abbildung 26*) können alle bisher bekannten und relevanten Strömungsphänomene, erkannt und deren Relevanz bestimmt werden. Eine Analyse der Strömung bezüglich dieser Phänomene folgt in *Kapitel 6.3*. Die in diesem Kapitel vorgestellten Ansichten, sollen den Betrachter auf die wesentlichen Aspekte der Identifikation von Instabilität aufmerksam machen und ihn nicht mit Informationen überfluten, wie dies bei komplexen Ansichten wie *Abbildung 27* der Fall sein würde.

6.3 Strömungsuntersuchung am OP4

Die Strömungsphänomene, welche in [17] als Ursprung von Instabilität bezeichnet werden, konnten mit dem numerischen Modell reproduziert werden. Die Bezeichnungen «primary vortex» und «secondary vortex» aus [17] werden übernommen. *Abbildung 27* zeigt 3D Stromlinien, eingefärbt mit der Radialgeschwindigkeit (von -1 bis 1 m/s). Dadurch wird ersichtlich, wo Strömung in Strömungsrichtung (blau) fließt und wo Rückströmungen (rot) entstanden sind. Zwei markante Stellen mit Rückströmungen sind am Laufrad-Austritt der Druckseite der Laufradschaufel entlang, und am Eintritt im Bereich Shroud ersichtlich.

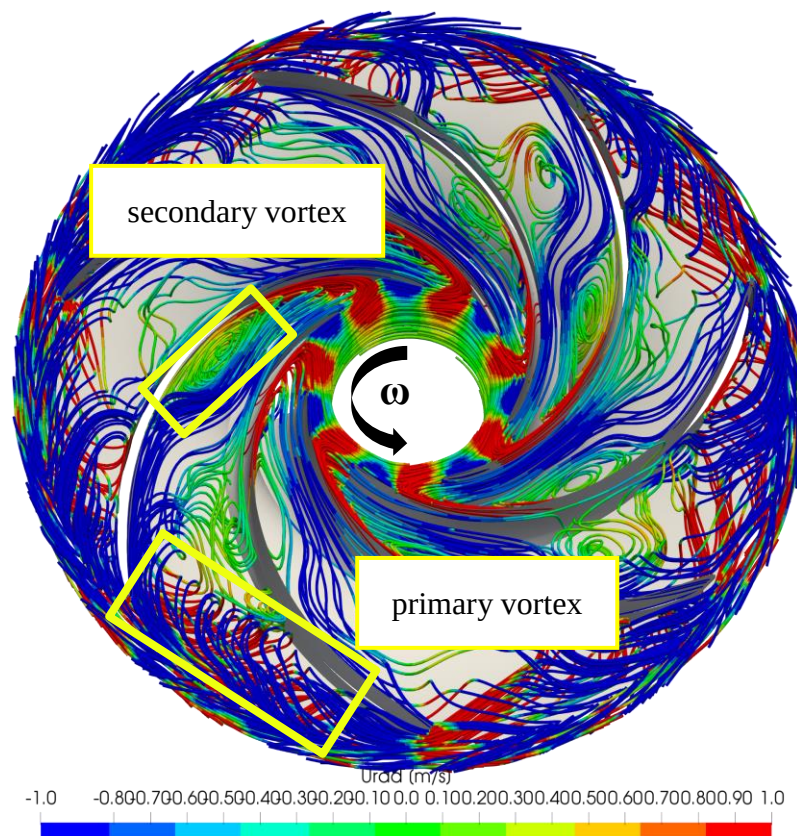


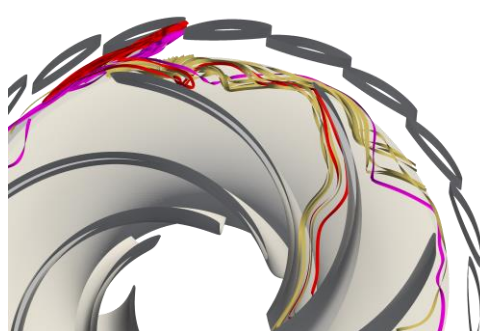
Abbildung 27: 3D Stromlinien, eingefärbt mit Radialgeschwindigkeit (rot: Rückströmung)

An den markierten Stellen entstehen die zwei obengenannten Wirbel.

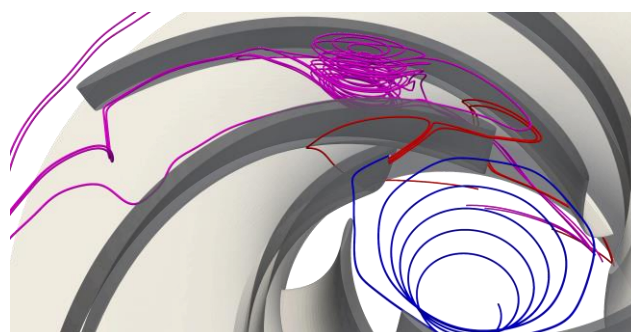
Die Strömungsverfolgung in *Abbildung 28 b*) zeigt, dass der eine markante Wirbel (secondary vortex) entsteht, weil die Strömung, welche im Hub-Bereich fließt, nach der Durchquerung der Laufradschaufelräume nicht aus dem Schaufelraum austreten kann. Eine Rückströmung aus dem Saugrohr (*Abbildung 28 b*), rote und blaue Stromlinie) verhindert in diesem Bereich, dass Strömung aus dem Schaufelraum ausfließen kann. Das einfließende Fluid (pink) sucht sich, durch Bildung dieses Wirbels, den Weg nach unten und fließt im unteren Bereich Shroud mittig aus dem Schaufelraum. Es ist zu beobachten, dass eine Rückströmung aus dem Saugrohr den Austritt aus den Laufradschaufelräumen Grossteiles blockiert, um selber ins Laufrad zurückfließt. Diese Rückströmung limitiert den Durchfluss durch das Laufrad.

Der andere, horizontal liegende, zapfenförmige Wirbel (primary vortex) im Bereich des schaufelfreien Raumes und Laufradeintritts, hindert das Fluid, in die Schaufelräume einzutreten. Er zwingt die eintretende Strömung durch mehrere solcher Zapfenwirbel, von Eintritt zu Eintritt zu

wandern, bis sie es schafft, durch einen Schaufelkanal in die Turbine zu gelangen. Auf diesem Weg blockiert sie mit ihren Zapfenwirbeln mehrere Eintrittsräume. Nachströmendes Fluid wird gezwungen, gleiches zu tun. Geschuldet wird das zum einen, dem erstgenannten Wirbel, welcher die Durchflussmenge limitiert und zum anderen, dem steilen Anströmwinkel, welcher dem Fluid von den Leitschaufeln vorgegeben wird. In *Abbildung 28 a)* wurde die Strömung von einem bestimmten Leitschaufelaustritt aus verfolgt. Die Strömung, welche nahe der Hub in den schaufelfreien Raum eintritt, findet den Weg in die Turbine schneller, als die Strömung nahe der Shroud. Diese rotiert erst im schaufelfreien Raum herum, bevor sie es in die rotierende Domain des Laufrades schafft und blockiert von da durch Zapfenwirbel mehr Eintrittsräume, wie das die gelben Stromlinien zeigen.



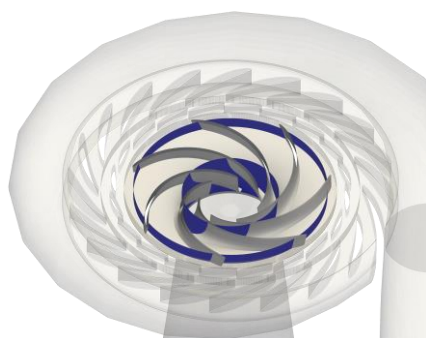
a) ab Leitschaufel



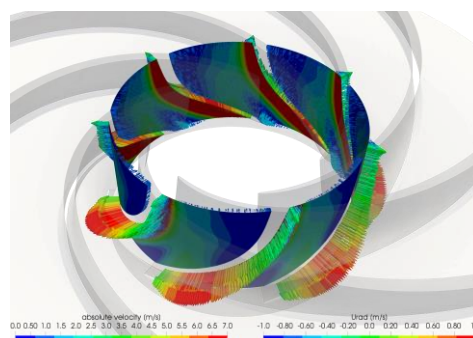
b) ab Laufradschaufelkante Saugseite

Abbildung 28: Strömungsverfolgung

Diese Beobachtungen basieren auf der Analyse eines Betriebspunktes und sind somit nicht abschliessend untersucht. Um diese Phänomene zu bestätigen müssen noch andere Betriebspunkte ausgewertet und analysiert werden. Ein gutes Mittel dies zu überprüfen könnten Ansichten gemäss *Abbildung 13* und *Abbildung 17* sein. Jedoch sollte die zugrundeliegende Schnittebene im Radius auf 0.2m reduziert werden, sodass sie im Bereich des Zapfenwirbels (primary vortex) zu liegen kommt. So wird die Relevanz dieses Wirbels ersichtlich. Zusätzlich könnte eine Ansicht gemäss *Abbildung 29* interessant sein, um beobachten zu können, welche Strömungsmenge zum Umkehren gezwungen wird (wie in *Abbildung 28 b)*, pinke Stromlinie). Es wird vermutet, dass der zweite Wirbel (secondary vortex) grösser ist, je weniger Strömung aus dem Laufrad gelangen kann und desto mehr Strömung aus dem Saugrohr ins Laufrad zurückfliesst. Ein solcher Zusammenhang könnte mit einer Ansicht wie in *Abbildung 29 b)* erkannt werden. Falls möglich wäre ein zeit- und umfanggemittelttes Diagramm dieser Fläche anschaulich.



a) Vorschlag: Zylinderebenen für Ansichten



b) Ansicht Laufradaustrittsebene

Abbildung 29: Zylinderschnitte als Indikator für Wirbelbildung

7 Schlussfolgerungen

Numerisches Modell

Recherchen früherer Arbeiten zu ähnlichen Themen haben ergeben, dass numerische Simulationen von Pumpturbinen mit Laufrädern von kleiner spezifischer Drehzahl ($n_q < 30$) Mühe haben, die Instabilitäten zu reproduzieren, wenn Betriebspunkte mit kleinen Leitschaufelöffnungswinkeln ($< 10^\circ$) und kleinen Volumenströmen (nahe Runaway) simuliert werden sollen. Um bei diesen Bedingungen trotzdem vernünftige Resultate zu erhalten, sind ein geeignetes Turbulenzmodell und eine gute Auflösung der Randschicht ($y^+ \leq 5$) erforderlich. Bei den Turbulenzmodellen scheint das SAS-Modell die Kennlinie verglichen mit experimentell ermittelten Werten am besten abzubilden. Steht nicht ausreichend Zeit zur Verfügung, um auf die Konvergenz einer SAS-Simulation zu warten, so muss auf eine URANS-Simulation ausgewichen werden. Keines der URANS-Turbulenzmodelle erreicht solch gute Resultate, wie eine SAS-Simulation, weshalb vermutet wird, dass neben den in URANS-Simulationen beobachtbaren Strömungsphänomenen auch zeitabhängige Turbulenzphänomene zu einer Instabilität beitragen. Wird trotzdem URANS eingesetzt, sollte ein Modell verwendet werden, welches Sekundärströmungen, Stromlinienkrümmungen und die Grenzschicht möglichst genau modelliert. Es hat sich gezeigt, dass das EARSM Turbulenzmodell mit aktivierter Korrektur der Stromlinienkrümmung (curvature correction - CC) einen guten Kompromiss zwischen Rechenaufwand und physikalischer Korrektheit darstellt. Soll mit möglichst kleinem Rechenaufwand entschieden werden können, ob ein Laufrad instabile Betriebspunkte aufweist, so kann zum $k-\varepsilon$ Turbulenzmodell gegriffen werden. Dieses erfasst zwar nicht alle instabilen Betriebspunkte, scheint jedoch die ausgeprägtesten Instabilitätsphänomene abbilden zu können.

In dieser Arbeit wurde festgestellt, dass mit verschiedenen gebräuchlichen Methoden (Formeln (4-5) bis (4-7)) zur Ermittlung des Initialwertes von ε , Abweichungen bis zu 0.5% in den Simulationsresultaten ($ku1$ und $kcm1$) entstehen können. Einen noch grösseren Einfluss hat eine Randbedingung in der Rotor-Domain gezeigt. Aus netztechnischen, bzw. den daraus resultierenden numerischen Gründen, muss ein Ringbereich des schaufelfreien Raumes, in direktem Anschluss zur Laufradgeometrie, als Laufraddomain modelliert werden. Dieser schmale Ring wird deshalb, anders als in der Realität, mit dem Laufrad mitdrehen. Wenn man an den Wandbereichen dieses Ringes die Relativgeschwindigkeit Null setzt, entsteht eine Abweichung im Simulationsresultat von über 1%, gegenüber einer Nullsetzung der Absolutgeschwindigkeit an dieser Stelle. Beide Modellierungen sind physikalisch nicht korrekt. Das Null setzen der Absolutgeschwindigkeit würde an dieser Stelle jedoch mehr Sinn machen.

PP-Tool

Das PP-Tool ist ein Programm, welches Simulationsresultate von Pumpturbinen automatisch auswertet und Werte, Ansichten und Diagramme generiert, welche helfen sollen, Instabilitäten und deren Ursachen zu erkennen. Als Softwareumgebung für dieses Programm wurde Python 2.7 verwendet. Zur benutzerfreundlichen Steuerung des Programmes wurde mit «PyQt 5» eine grafische Benutzeroberfläche erstellt, in der Angaben zum Simulationsfall sowie Einstellungen der zu generierenden Ansichten und Diagramme eingegeben werden können. Strömungsbilder werden über eine Schnittstelle in ParaView erstellt und anschliessend als Mediendatei (.png oder .avi) im angegebenen Simulationsordner gespeichert. Zur Auswertung der Zeitsignale, welche über Messpunkte (Probes) und -flächen (Patches) während der Simulation aufgenommen werden, wird «Numpy» verwendet. Mit dieser Bibliothek können Daten aus Textdateien eingelesen und als Arrays weiterverarbeitet werden. Ausgaben in Diagrammform werden mit der Bibliothek «Matplotlib» aus den Arrays gezeichnet und als Mediendatei (.png) ebenfalls im Simulationsordner gespeichert.

Zusätzlich wird eine Textdatei erstellt, in welchem alle simulationsspezifischen Eingaben und alle Diagramme und Werte in Textform abgespeichert werden.

Es wurden bereits einige, als relevant befundene Ansichten und Diagramme definiert und drei dieser Ansichten und ein Diagramm bereits implementiert. Das Programm wurde modular aufgebaut, so dass weitere Ansichten und Diagramme ohne grossen Aufwand hinzugefügt werden können. Viele Kommentare im Code, ein Flussdiagramm des gesamten Programmablaufes und eine Variablendeklaration in Form einer Tabelle, sollen einem zukünftigen Weiterentwickler helfen, die Programmstruktur zu verstehen.

Es wurde ein Programm entwickelt und getestet, mit welchem man sich auf Knopfdruck, aus Simulationsergebnissen eines Betriebspunktes von einer beliebigen Pump turbine, Ausgaben generieren lassen kann und auf dessen Grundlage das instabile Verhalten dieser Pump turbine untersucht werden kann.

Auswertung und Analyse von OP4

Wie bereits in früheren Arbeiten beschrieben, sind bei URANS-Simulationen zwei Wirbel auszumachen, welche für die positive Steigung der Kennlinie und somit als Merkmal für Instabilität angesehen werden können. Der eine Wirbel liegt horizontal im Bereich des Laufradeintritts und blockiert nach strömendes Fluid vor dem Eintreten in das Laufrad. Der andere Wirbel liegt im zweiten Drittel im Schaufelraum des Laufrads. Analysen in dieser Arbeit zeigen, dass er sich bildet, weil aus dem Saugrohr rückströmendes Fluid den oberen Austrittsbereich aus dem Schaufelraum blockiert und sich die Strömung einen Weg nach unten suchen muss. Dabei kommt es zu einer Rückströmung an der Druckseite der Laufradschaufel entlang im Bereich Schaufelraumaustritt.

Die mit dem PP-Tool generierten Ansichten liefern wertvolle Informationen über diese Phänomene, wenn man weiss, worauf geachtet werden muss. So zeigt der ContourPlot der Radialgeschwindigkeit auf der Quasi-Midspan Ebene, wo sich die häufigsten Gebiete mit Rückströmungen befinden. In der Detailansicht mit den drei Meridional-Cut Schnittebenen können die horizontal liegenden Wirbel im schaufelfreien, sowie dem Laufradschaufeleintritts-Raum beobachtet werden. Um auch den anderen, vertikal im Laufradkanal stehenden Wirbel in einer Ansicht erkennen zu können, wird eine zeitliche Animation der Stromlinien auf der Quasi-Midspan Ebene vorgeschlagen. Der ContourPlot auf der Zylinderschnittebene im Eintrittsbereich des Laufrades, sowie das Diagramm (Rotor-Stator Interface) zeigen, die aus erstgenanntem Wirbel resultierenden Rückströmungen. In gleichem Rahmen wäre auch ein ContourPlot auf einer Zylinderschnittebene im Austrittsbereich des Laufrades interessant. Darin wären die Rückströmungen, welche zum zweitgenannten Wirbel führen, ersichtlich.

Weitere Schritte

Implementierung zusätzlicher Ansichten im PP-Tool:

- Grössenverlauf entlang eines Stromfadens
- FFT-Analysen von bestimmten Zeitsignalen
- Versetzung der Zylinderebene in den Laufradeintrittsbereich
- Zusätzliche Ansichten der Radialgeschwindigkeit im Laufradaustrittsbereich (Zylinderebene & Diagramm)
- TurboBladePost: Meridional-View & Blade-To-Blade View mit Stromlinien

Wenn die Arbeiten an der parallel laufenden Arbeit, zur Implementierung des EARSIM Turbulenzmodelles in openFOAM abgeschlossen ist, könnten Simulationen mit dem EARSIM Turbulenzmodell mit dem PP-Tool ausgewertet und mit den $k-\epsilon$ Ergebnissen verglichen werden. Daraus würde ersichtlich, ob das EARSIM Turbulenzmodell die Instabilität besser abbilden und ob zusätzliche Phänomene erscheinen können, welche das $k-\epsilon$ Modell nicht modellieren konnte.

8 Verzeichnisse

Symbolverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
p	Pa	Druck
p°	m^2/s^2	Energie-Inhalt einer Strömung (statischer Druck + dynamischer Druck)
$\vec{v}$	m/s	Geschwindigkeit
$\vec{c}$	m/s	Absolutgeschwindigkeit
$\vec{w}$	m/s	Relativgeschwindigkeit
$\vec{u}$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
$\vec{c}_{rad}$	m/s	Radialgeschwindigkeit
$\vec{v}_{IG}$	m/s	Durchschnittsgeschwindigkeit (initial Guess am Inlet)
$\vec{\omega}$	1/s	Wirbelstärke
$\dot{V}$	m^3/s	Volumenstrom
ρ	kg/m^3	Massendichte
η	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$	dynamische Viskosität
c_p	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	spezifische Wärmekapazität (konstanter Druck)
λ	$\text{W}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Wärmeleitfähigkeit
I	-	Intensität
k	m^2/s^2	turbulente kinetische Energie
ε	m^2/s^3	turbulente Dissipationsrate
η_T	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$	turbulente Viskosität
c_η	-	Anisotropieparameter (0.09)
R_{ij}	N/m^2	Reynolds'scher Spannungstensor (reynolds stress tensor)
δ_{ij}	-	Kronecker-Delta (Einheitsmatrix mit nxn Einträgen)
S_{ij}	-	Formänderungsgeschwindigkeitstensor (strain rate tensor)
Ω_{ij}	1/s	Wirbelstärkentensor (vorticity tensor)
a_{ij}		anisotropie Tensor
e	$\text{Js}/\text{kg} = \text{m}^2/\text{s}^2$	massenspezifische Energie
H	m	Förderhöhe
D_d	m	Lauftraddurchmesser (Druckseite)
D_s	m	Lauftraddurchmesser (Saugseite)
h_s	m	spannweite Höhe (Höhe zwischen Hub und Shroud am Lauftradeintritt)
$\vec{r}$	m	Ortsvektor (vom Ursprung zu einem bestimmten Punkt im Raum)
$\vec{g}$	m/s^2	Ortsfaktor (beschleunigung des Schwerfeldes)
n	U/min	Drehzahl
M	Nm	Drehmoment
Ma	-	Machzahl
Re	-	Reynoldszahl
$ku1$	-	dimlose Drehzahl (speziell für Pumpturbinen)
$kcm1$	-	dimloser Volumenstrom (speziell für Pumpturbinen)
$km1$	-	dimloses Drehmoment (speziell für Pumpturbinen)

Abkürzungsverzeichnis

CC FMHM	Kompetenzzentrum für Fluidmechanik & Hydromaschinen
dimlos	dimensionslos
EARSM-CC	Explicit Algebraic Reynolds Stress Model mit Curvature correction
EVA	Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe
GUI	grafische Benutzeroberfläche (gafical user interafce)
NSG	Navier-Stokes-Gleichungen
OF	openFOAM (FOAM: field operation and manipulation)
OP	Betriebspunkt (operation point)
PP-Tool	PostProcessing-Tool
PT	Pumpturbine
RB	Randbedingung
SST	Shear-Stress-Transport
URANS	unsteady reaynlods averaged navier stokes

Literaturverzeichnis

- [1] Andritz Hydro Zurich, Switzerland. (Juli 2010).
Recent Developments in Pump Turbines. Charlotte, USA.
- [2] Ansys CFX. (2016).
Chapter 2: Turbulence and Wall Function Theory. *Theory Guide*, 17.1.
- [3] Ansys CFX. (2016).
Chapter 3.2: Initialization Parameters. *Modeling Guide*, 17.1.
- [4] Ansys Fluent. (2016).
Chapter 21: Solver Theory. *Theory Guide*, 17.1.
- [5] Bauer, C., Lenarcic, M., Giese, M., & Jung, A. (2016).
Prediction of S-shaped characteristics in reversible pump-turbines using different numerical approaches. Wien: TU Wien.
- [6] CFD Online. (Januar 2014).
Turbulence free-stream boundary conditions. Abgerufen am Dezember 2017 von https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_free-stream_boundary_conditions
- [7] Davidson, L. (September 2017).
Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling. Göteborg, Schweden.
- [8] Del Rio, A. (2016).
Numerische Strömungsanalyse im S-Schlag einer Pumpturbine. Horw.
- [9] Del Rio, A. (2017).
interner Zwischenbericht Nr.2 (KW11-KW14). Horw.
- [10] Hasmatuchi, V. (2012).
Hydrodynamics of a Pump-Turbine Operating at Off-Design Conditions in Generating Mode. Lausanne: EPFL.
- [11] Häusler, M. (2016).
Numerische Berechnung der Kennlinien einer Pump-Turbine im Turbinenbetrieb in der Nähe des S-Schlages. Horw: Hochschule Luzern.
- [12] Heinzl, R. (August 2007).
Finite Volumes. Abgerufen am Dezember 2017 von Concepts for Scientific Computing: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/heinzl/node25.html>
- [13] Hui, S., Ruofu, X., Fujun, W., Yexiang, X., & Weichao, L. (2014).
Analysis of the Pump-turbine S Characteristics Using the Detached Eddy Simulation Method. Beijing: Chinese Journal of Mechanical Engineering.
- [14] Jacquet, C., Fortes-Patella, R., Balarac, L., & Houdeline, J.-B. (2016).
CFD Investigation of Complex Phenomena in S-Shape Region of Reversible Pump-Turbine. Grenoble: IOP Publishing.

-
- [15] SRF. (22. Mai 2017).
SRF Schweizer Radio und Fernsehen. Von Stromkonzerne Axpo und BKW streiten sich öffentlich: <https://www.srf.ch/news/wirtschaft/stromkonzerne-axpo-und-bkw-streiten-sich-oeffentlich> abgerufen
- [16] Verein Deutscher Ingenieure. (2013).
D2.1. Tabelle 1. Stoffwerte von Wasser. In *VDI Wärmeatlas* (S. 176). Berlin: Springer Vieweg.
- [17] Widmer, C., Ledergerber, N., Senn, F., & Staubli, T. (2010).
Instabilität von Pumpturbinen. Horw.
- [18] Xia, L., Cheng, Y., You, J., Zhang, X., Yang, J., & Qian, Z. (2016).
Mechanism of the S-Shaped Characteristics and the Runaway Instability of Pump-Turbines. Wuhan: Journal of Fluids Engineering.
- [19] Zhang, S., Shi, Q., & Zhang, K. (2012).
Flow behaviour analysis of reversible pump-turbine in "S" characteristic operating zone. Wuhan: IOP Publishing.
- [20] Zhigang, Z., Honggang, F., Shuhong, L., & Yulin, W. (2015).
S-shaped characteristics on the performance curves of pump-turbines in turbine mode. Tsinghuan: Elsevier.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: verschiedene Solver	7
Tabelle 2: Kennwerte des Pumpturbinen Modells.....	10
Tabelle 3: Übersicht numerisches Modell	11
Tabelle 4: Materialkennwerte	11
Tabelle 5: Netz, Qualitätsmerkmale gemäss CFX.....	12
Tabelle 6: Randbedingungen	15
Tabelle 7: Messwerte aus Pumpturbinenprüfstand	16
Tabelle 8: EVA des PP-Tools.....	19
Tabelle 9: geplante Ansichten im PP-Tool	21

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Start-up und Load-rejection bei einer Pumpturbine [20].....	4
Abbildung 2:	Kontrollvolumen [12]	7
Abbildung 3:	Turbulenzmodelle	8
Abbildung 4:	Einfluss verschiedener Turbulenzmodelle ($LA = 10^\circ$) [5]	8
Abbildung 5:	Einfluss von y^+ ($LA = 10^\circ$) [5]	9
Abbildung 6:	Untersuchungsobjekt - Pumpturbinenmodell	10
Abbildung 7:	Netzkomponenten (1-4)	12
Abbildung 8:	Netztopologie	12
Abbildung 9:	y^+ bei OP4	13
Abbildung 10:	Messpunkte im Netz (Probes).....	16
Abbildung 11:	Messflächen im Netz (Patches).....	17
Abbildung 12:	Softwarearchitektur	18
Abbildung 13:	Radialgeschwindigkeitsverteilung	21
Abbildung 14:	Grösse entlang Stromlinie [18]	21
Abbildung 15:	FFT Analyse [8]	21
Abbildung 16:	Contour-Plot auf Quasi-Meridianschnitt.....	21
Abbildung 17:	Radialgeschwindigkeit auf Rotor-Stator Interface.....	21
Abbildung 18:	StreamLines auf Meridional-Cut	21
Abbildung 19:	Meridional View [14]	21
Abbildung 20:	Blade-to-Blade View [10].....	21
Abbildung 21:	verwendete Ebenen für die Ansichten	23
Abbildung 22:	Kennlinienvergleich [9]	27
Abbildung 23:	Quasi-Meridianschnitt (Radialgeschwindigkeit / -1 bis 1 m/s)	28
Abbildung 24:	Verteilung der Radialgeschwindigkeit über spanwise Höhe	28
Abbildung 25:	Meridional-Cut, Momentaufnahme der Animation aus der Detail-Ansicht	28
Abbildung 26:	Quasi-Meridianschnitt, Momentaufnahme einer Animation mit Stromlinien...	29
Abbildung 27:	3D Stromlinien, eingefärbt mit Radialgeschwindigkeit.....	30
Abbildung 28:	Strömungsverfolgung.....	31
Abbildung 29:	Zylinderschnitte für Ansichten	31

A1 PP-Tool: Anleitung

Anleitung

Zum PostProcessing-Tool für Pumpturbinen

Installation

Erforderlich	Getestet mit
OS (Windows, Linux, Mac)	Ubuntu 17.04
Python 2.7 (inkl. Systemvariablen)	python 2.7.13
PyQt5	Qt: 5.7.1 / PyQt: 5.7 / SIP: 4.18.1
Numpy	numpy 1.12.1
Matplotlib	matplotlib 2.0.0
ParaView (inkl. Systemvariablen)	ParaView 5.4.1

Alle Komponenten der Reihe nach manuell oder mit pip (Python Paketverwaltungsmanager) installieren. Pip ist zu empfehlen, wenn neben den genannten noch andere Pakete für Python installiert werden sollen.

Bedienung

Programm starten

1. In Programmordner navigieren
2. In Konsole mit dem Befehl ***python core.py*** das Programm starten

Im erscheinenden Fenster kann im oberen Bereich, entsprechend den Tabs, diverse Einstellungen zur Generierung der entsprechenden Ansichten vorgenommen werden. Im Main-Tab werden Informationen des auszuwertenden Simulations-Case abgefragt und es kann selektiert werden, welche Ansichten vom Tool generiert oder berechnet werden sollen.

Im unteren Bereich sind die Steuerung und die Ausgabe untergebracht. Ein Button (01) ist zum Starten der Auswertung und einer (02) zum Löschen aller Ein- und Ausgaben. Dieser setzt die Maske wieder auf den Ursprung zurück und löscht alle gespeicherten Variablen und Lösungen. Daneben befindet sich die Ausgabe (03). Darin wird der User über Falscheingaben, den Verlauf der Auswertung und die Resultate, während der Auswertung, informiert.



Programm schliessen

Durch drücken des X-Buttons oben links wird das Programm beendet, wie bei Fenster-Anwendungen gewohnt.

Das Beenden des Programmes während dem eine Auswertung im Gange ist, ist nicht vorgesehen.

Auswertung starten

Mit Klick auf den Start-Button (01), wird die Auswertung gestartet. Je nachdem wie viele Zeitschritte (Main-Tab, Nr. 11) berücksichtigt werden müssen, kann die Auswertung relativ lange dauern. Verdunkelt sich das Fenster, bedeutet dies, dass das Fenster seit langem nicht aktualisiert wurde (das Programm beschäftigt sich wahrscheinlich gerade mit Paraview) und **nicht**, dass es abgestürzt ist.

Mit der Meldung „DONE Run!“ ist die Auswertung abgeschlossen und alle selektierten Ansichten wurden fehlerfrei generiert.

Ausgaben

Das Programm generiert drei Arten von Ausgaben:

- Resultate und Informationen während der Auswertung direkt im Programmfenster
- Diagramme, Screenshots und Animationen werden im Case-Folder gespeichert
- Eine Textdatei mit Case Informationen und Eingaben, sowie aller Resultate und Pfadangaben zu allen gespeicherten Dateien wird im Case-Folder gespeichert

Ausgabe im Programmfenster

Im Ausgabefeld (03) wird der User laufend über den Verlauf der Auswertung informiert. Wurden Falscheingaben gemacht wird man darauf hingewiesen. Zusätzlich werden, jeweils nach erfolgreichem Abschluss eines Plots oder einer Ansicht, über diese Ausgabe bereits die Resultate angezeigt, so dass diese noch während der Auswertung weiterverwendet werden können.

Ausgabe von ku1, kcm1 und km1

Diese Kennwerte werden bei jeder Auswertung berechnet und dessen Resultate werden neben dem Ausgabefeld und der Textdatei im Programmfenster im Tab 4Q-Curve (unten) ausgegeben und bleiben dort gespeichert, bis zum drücken des „Clear All“ Buttons oder zum Schliessen des Programmes.

Ausgabe der Diagramme, Screenshots und Animationen

Diese generierten Files werden als Mediendateien im angegebenen Case-Folder im Unterordner „Post“ abgespeichert. Für jede Ansicht wird ein separates Unterverzeichnis erstellt und die generierten Dateien abgespeichert.

Ausgabe in Textdatei

Zusätzlich wird ein Textfile generiert, in welchem alle Einstellungen und Resultate gespeichert werden. Das File ist so aufgebaut, dass die relevanten Zeilen (9, 13, 17, 23, 27, 31, 35, 40, 44) immer denselben Inhalt haben, unabhängig ob die jeweilige Ansicht generiert wird oder nicht. Wird eine Ansicht nicht generiert, werden statt eines Resultates zwei Bindestriche (--) stehen.

```
1  ## Result-File of the Pumpurbine Simulation-Case: BhiraLA6_OP4_trans.foam ##
2  ## Simulation-Path: /media/manuel/Dateien/Dokumente/HSLU/7.Semester/Diplomarbeit/Sim/transient/OF/OP4/BhiraLA6_OP4_trans.foam ##
3  -----
4
5  # Case specific input data from GUI #
6
7  general Properties:
8  Case-FileName,Case-Name,Runnerdiameter (D1) [m],Spanwise height (hub-shroud) [m], Number of rotor blades [], Number of GV blades[]
9  BhiraLA6_OP4_trans.foam,OP4,0.4221,0.0222,7,20
10
11  Fluid properties:
12  density,viscosity,cp,thermal conductivity
13  [998.2, 0.0010012, 4185, 0.59801]
14
15  Run properties:
16  Solver,volume flow rate [m^3/s],rotations per second [1/s],timestep [s],number of saved time directories [],End-Time [s],cutted time [s]
17  OF,0.014894,25.0,0.000222,36,0.8,0.3
18
19  -----
20
21  # 4Q-Curve #
22  dp (Inlet-Outlet), torque (RunnerAll), ku1, kcm1, km1
23  490750.601111, -3.78909462492, 1.05722785812, 0.00339433051656, -0.000261437973585
24
25  # Radial velocity distribution #
26  [X-Axis (Urad tAV & gAV)] / [Y-Axis (dimensionless spanwise height)]
27  [0.3139357475680536, 0.6235776132677618, 0.8529289626420338, 0.9057170137072303, 0.7026198074709636, 0.21132710317045098, -0.5674015119807472, -1.5]
28
29  # Quasi-Midspan View #
30  Folder of saved QMid-Views:
31  /media/manuel/Dateien/Dokumente/HSLU/7.Semester/Diplomarbeit/Sim/transient/OF/OP4/BhiraLA6_OP4_trans.foam/Post/Q-Midspan/...
32
33  # Radial velocity Views at Runner-Stator interface #
34  Folder of saved cyl-Views:
35  /media/manuel/Dateien/Dokumente/HSLU/7.Semester/Diplomarbeit/Sim/transient/OF/OP4/BhiraLA6_OP4_trans.foam/Post/CylinderSurface/...
36
37  # Meridional-Cut View #
38  # Detailed View (vanless space and runner section) #
39  Folder of saved Meridional Views:
40  /media/manuel/Dateien/Dokumente/HSLU/7.Semester/Diplomarbeit/Sim/transient/OF/OP4/BhiraLA6_OP4_trans.foam/Post/MeridionalCut/...
41
42  # Overview (whole circumference) #
43  Folder of saved Meridional Views:
44  /media/manuel/Dateien/Dokumente/HSLU/7.Semester/Diplomarbeit/Sim/transient/OF/OP4/BhiraLA6_OP4_trans.foam/Post/MeridionalCut/...
45
```

Einstellungsmöglichkeiten

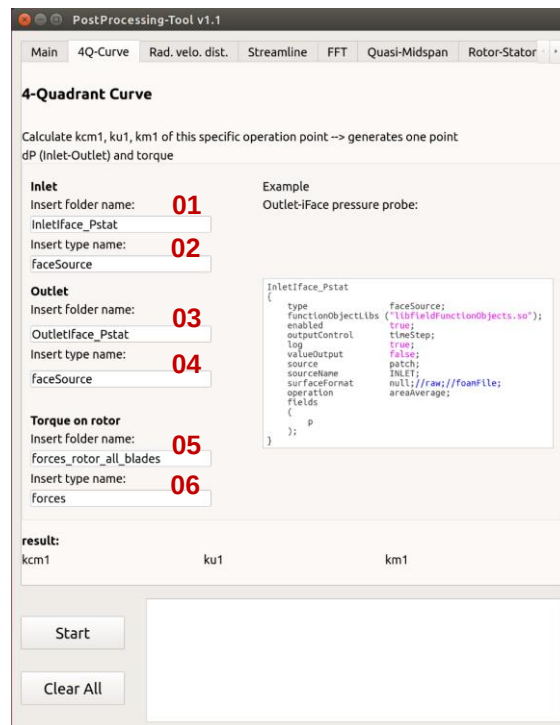
Hauptfenster (Main Tab)

Main Tab		
Nr.	Feldname	Beschreibung
01	Case Folder Path	Auswahl des .foam-Files des auszuwertenden Simulation-Cases.
02	Name	Eindeutige Bezeichnung des Simulation-Cases
03	Rotordiameter	Laufreddurchmesser des Laufrades der simulierten Pumpturbine
04	Spanwise distance	Höhe in meter (Hub-Shroud) bei Laufradeintritt der simulierten Pumpturbine
05	Numb. of rotor baldes	Anzahl Laufradschaufeln der simulierten Pumpturbine
06	Numb. of guide-vane baldes	Anzahl Leitschaufeln der simulierten Pumpturbine
07	Fluid properties	Dropdown Auswahl des verwendeten Fluid-Modelles. (weitere Fluid-Modelle können mit Qt-Designer hinzugefügt werden)
08	Volume flow rate	Der Simulation vorgegebener Volumenstrom (Randbedingung Inlet)
09	Revolutions per minute	Der Simulation vorgegebene Drehzahl des Laufrades
10	Timestep	Zeitschritt der Simulation (für Pumpturbinen: max. 4° Rotation pro Zeitschritt)

11	Numb. of saved time directories	Anzahl behaltene Lösungen von Zeitschritten (für Pumpturbinen: Lösungen für eine komplette Laufradrotation)
12	Simulation end time	Zeit, bei welcher die Simulation abgebrochen wurde
13	Starting time for postprocessing	Zeit, welche für das PostProcessing der Zeitsignale nicht berücksichtigt werden soll. Die Lösungen bis zur gewählten Zeit werden weggeschnitten für die Auswertung. Es soll die Zeit angegeben werden, welche die Simulation braucht zum konvergieren. Damit die Zeitanalyse nicht durch unkonvergierte Lösungen verfälscht wird. Mit dem <i>Sample</i> Button kann man sich das Zeitsignal der Druckdifferenz ($\Delta p = p_{\text{Inlet}} - p_{\text{Outlet}}$) anzeigen lassen. So kann die Konvergenzzeit graphisch ausgelesen werden.
14	Used solver	Hacken setzen, welcher Solver für die Simulation gebraucht wurde. (CFX-Solver wird momentan vom Tool noch nicht unterstützt)
15	Plots	Auswahl verschiedener Plots, welche das Tool generieren kann. (4-Q Curve wird in jedem Fall generiert, ob ausgewählt oder nicht)
16	Views	Auswahl verschiedener Views (Screenshots & Animationen), welche das Tool generieren kann.

4-Quadrant Curve (4Q-Curve Tab)

Einstellungsmöglichkeiten für die Generierung der Werte für die 4-Quadranten Kennlinie (Durchflusskennlinie & Momentenkennlinie). Für den ausgewählten Case wird je ein kcm1, ku1 und km1 gerechnet und ausgegeben.



4Q-Curve Tab		
Nr.	Feldname	Beschreibung
01	p _{stat} at Inlet (folder name)	Bezeichnung der Probe (statischer Druck gemittelt über Inlet-Fläche)
02	p _{stat} at Inlet (type name)	Proben type (Art der Probe: faceSource)
03	p _{stat} at Outlet (folder name)	Bezeichnung der Probe (statischer Druck gemittelt über Outlet-Fläche)
04	p _{stat} at Outlet (type name)	Proben type (Art der Probe: faceSource)
05	torque on Rotor (folder name)	Bezeichnung der Probe (Kräfte, generiert an allen Rotor-Patches)
06	torque on Rotor (type name)	Proben type (Art der Probe: forces)

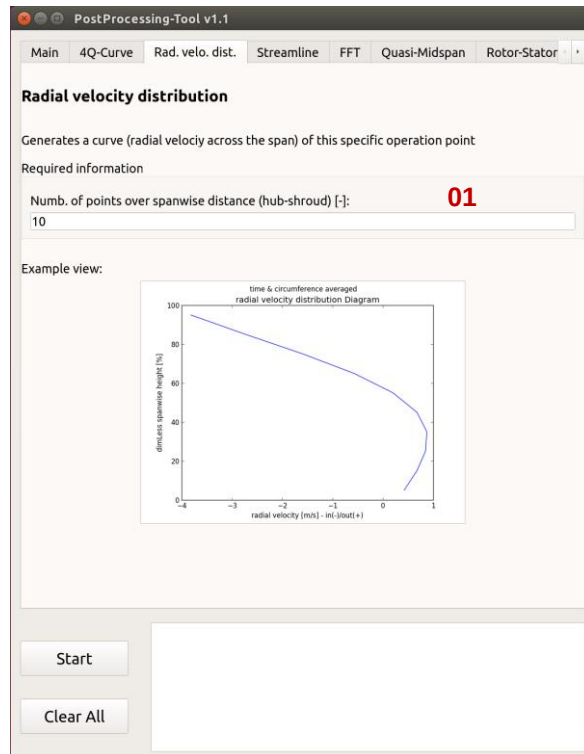
Die Eingaben müssen den Bezeichnungen und Typen entsprechen, welche im PreProcessing vergeben wurden. Ein PreProcessing Beispiel wird rechts abgebildet.

Bei einem Tippfehler wird das Programm mit einer Fehlermeldung abstürzen, dass der Dateipfad nicht gefunden wurde. Vor dem Start: Eingaben auf Tippfehler überprüfen!!

Radial velocity distribution (rad. vel. dist Tab)

Einstellungsmöglichkeit für die Generierung des Diagramms zur Radialgeschwindigkeitsverteilung durch das Rotor-Stator interFace beim Laufradeintritt.

Das Diagramm zeigt die Verteilung der Radialgeschwindigkeit über die Höhe (Hub-Shroud) in Prozent. Ein Beispiel eines Diagramms mit einer Auflösung von 10 Punkten ist unten dargestellt.



Rad. velo. dist. Tab		
Nr.	Feldname	Beschreibung
01	Numb. Of points over spanwise distance	Anzahl Punkte, welche zur Zeichnung des Diagramms ermittelt werden sollen. Je höher der Wert, desto besser wird das Diagramm aufgelöst, aber desto länger dauert dessen Generierung.

Plots along a streamline (Streamline Tab)

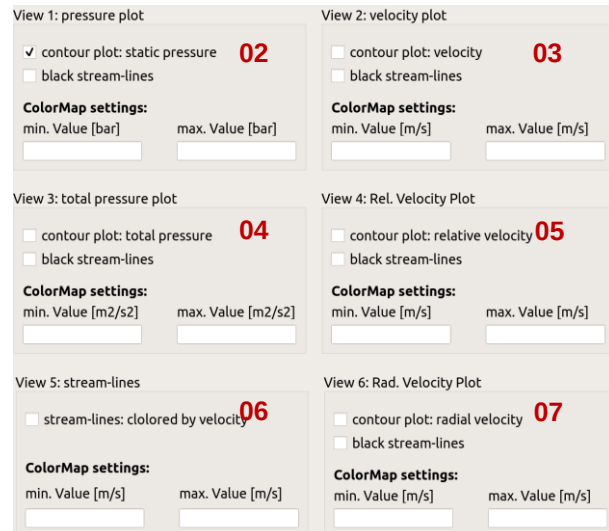
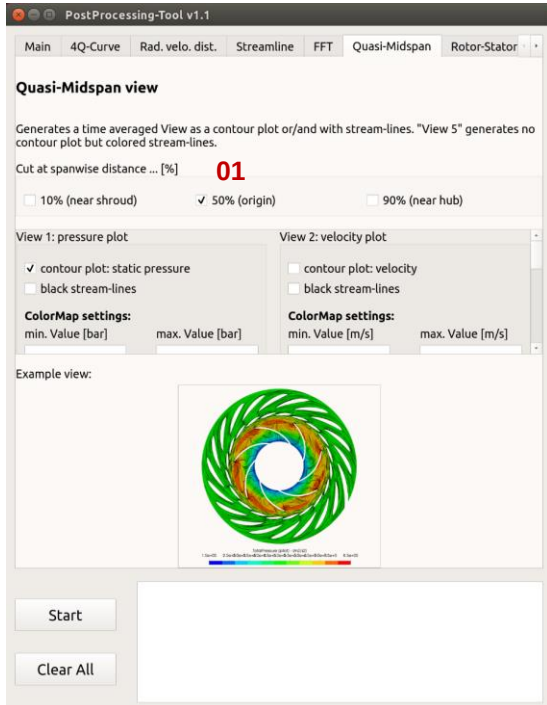
Noch nicht implementiert

FFT signal analysis (FFT Tab)

Noch nicht implementiert

Quasi-Midspan View (Quasi-Midspan Tab)

Einstellungsmöglichkeiten für die Generierung einer Quasi-Midspan Ansicht. Mit Quasi-Midspan ist ein Schnitt horizontal durch die Pumpturbine gemeint. Die Midspan des Laufrades wird somit falsch wiedergegeben, jedoch im Bereich des unbeschauften Raumes und des Laufradeintrittes stimmt der Schnitt mit der richtigen Midspan überein.



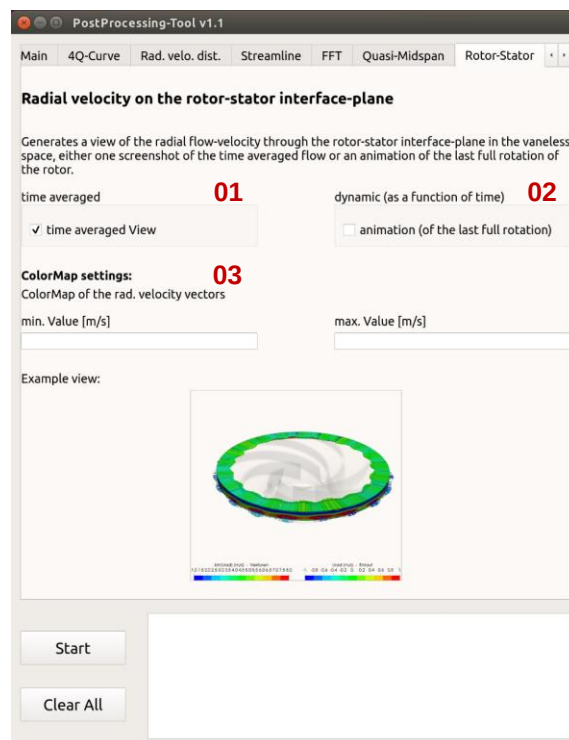
Quasi-Midspan Tab		
Nr.	Feldname	Beschreibung
01	Cut at spanwise distance...	Auf welcher Höhe (Hub-Shroud) geschnitten wird. 50% bedeutet 0.5*höhe, also durch den Ursprung. Es können wahlweise 1-3 Häkchen gemacht werden
02	View 1: pressure plot	Kontur-Plot des statischen Druckes mit den gesetzten Grenzen (min. / max.) für die Kolorierung. Wahlweise mit oder ohne Stromlinien
03	View 2: velocity plot	Kontur-Plot der absoluten Geschwindigkeit mit den gesetzten Grenzen (min. / max.) für die Kolorierung. Wahlweise mit oder ohne Stromlinien
04	View 3: total pressure plot	Kontur-Plot des totalen Druckes (massenspezifische Energie) mit den gesetzten Grenzen (min. / max.) für die Kolorierung. Wahlweise mit oder ohne Stromlinien
05	View 4: rel. velocity plot	Kontur-Plot der relativen Geschwindigkeit mit den gesetzten Grenzen (min. / max.) für die Kolorierung. Wahlweise mit oder ohne Stromlinien
06	View 5: stream-lines	Stromlinien der relativen Geschwindigkeit mit den gesetzten Grenzen (min. / max.) für die Kolorierung.

07	View 6: rad. velocity plot	Kontur-Plot der radialen Geschwindigkeit mit den gesetzten Grenzen (min. / max.) für die Kolorierung. Wahlweise mit oder ohne Stromlinien
----	----------------------------	--

Um eine bestimmte Ansicht zu aktivieren, muss das erste Häkchen gesetzt werden. Dann können zu dieser Ansicht wahlweise zusätzlich Stromlinien zugefügt werden. Die Grenzen der Kolorierung müssen abhängig des Betriebspunktes gesetzt werden.

Radial velocity on the rotor-stator interface-plane (Rotor-Stator Tab)

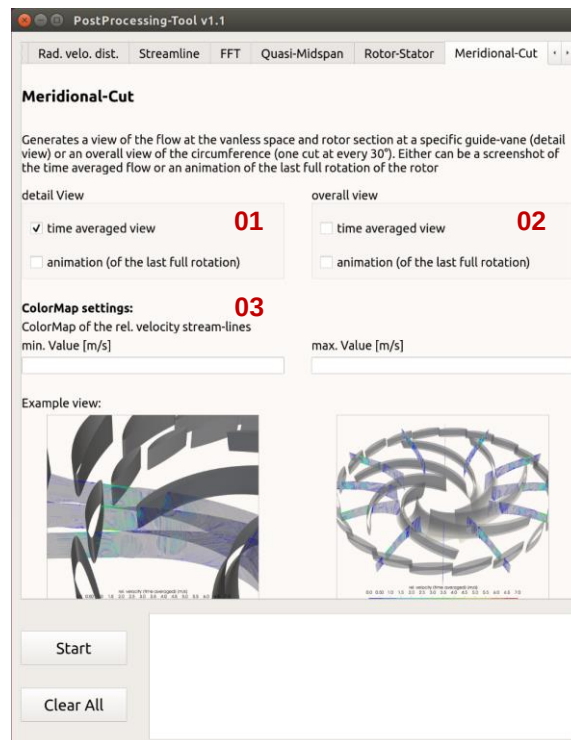
Einstellungsmöglichkeiten für die Generierung der Ansicht zur visuellen Darstellung der radialen Geschwindigkeit durch die zylindrische Interface-Fläche zwischen Rotor und Stator. Durch diese wird ersichtlich, wo und wieviel Strömung ins Laufrad hinein und wo und wieviel hinaus fließt. (Länge und Richtung der Vektorpfeile)



Rotor-Stator Tab		
Nr.	Feldname	Beschreibung
01	time averaged	Wenn selektiert, wird ein Screenshot einer zeitlich gemittelten Ansicht generiert
02	dynamic (as a function of time)	Wenn selektiert, wird eine Animation (.avi-File) über alle behaltene Lösungen (siehe Main Tab; Nr. 11) generiert. Zu sehen sein wird das dynamische Verhalten der radialen Geschwindigkeit.
03	ColorMap settings	Min und max Werte für die Kolorierung der Vektorpfeile. Die Kolorierung der Zylinderfläche ist fix von -1 bis +1 definiert.

Meridional-Cut (Meridional-Cut Tab)

Einstellungsmöglichkeiten für die Generierung der Meridional-Cut Ansicht. Dabei werden die Strömungsverhältnisse mithilfe von Stromlinien (relative Geschwindigkeit) im schaufelfreien Raum und im Eintrittsbereich des Rotors über die Höhe (Hub-Shroud) sichtbar gemacht.



Meridional-Cut Tab		
Nr.	Feldname	Beschreibung
01	detail view	Detaillierte Ansicht (Nahaufnahme) mit drei Schnitten bei einer Leitschaufel. Es werden wahlweise ein zeitlich gemittelter Screenshot und/oder eine dynamische Animation des Ausschnittes generiert.
02	overall view	Überblickende Ansicht mit einem Schnitt alle 30° über den gesamten Umfang verteilt. Es werden wahlweise zeitlich gemittelte Screenshots (zwei, 90° zueinander gedreht, um alle Schnitte sehen zu können) und/oder eine dynamische Animation des Ausschnittes generiert.
03	ColorMap settings	Min und max Werte für die Kolorierung der Stromlinien.

Meridional-View (Meridional-View Tab)

Noch nicht implementiert

Blade-To-Blade-View (BtB View Tab)

Noch nicht implementiert

Mögliche Fehler

Läuft das Programm in einen Fehler, für den keine Fehlerbehandlung eingebaut ist, schliesst sich das Programm und alle Einstellungen und noch nicht generierte Ansichten sind verloren. Deshalb sollte der Start-Button (01) erst gedrückt werden, wenn man sich sicher ist, dass alle Einstellungen im GUI stimmen.

Folgende Fehler konnten bis jetzt nachgewiesen werden, welche (noch) keine Fehlerbehandlung haben:

- Tab 4Q-Curve: Eingabefelder 01-06 weisen auf einen unbekannten Pfad
(Ursache: Tippfehler oder falsche Eingabe / Überprüfung des Speicherortes der gewünschten Probe)
-

A2 PP-Tool: Variablendeklaration

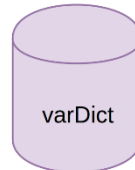
Datenbanken

Datentypen

- **string** (Zeichenkette) UTF-8
- **bool** (Boolscher Wert: True/False) wie integer
- **integer** (ganze Zahl) mind. 32bit
- **float** (Fließkommazahl) 64bit

varDict

Dictionary, in dem alle globalen Variablen gespeichert werden. Als Quelle dienen ihm die Eingabefelder des GUI.



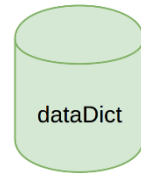
Nr.	Name der Variablen	Beschreibung
01	CaseFilePath	single value (kompletter Pfad des .foam-Files) Quelle: Main Tab, 01
02	CaseFileName	single value (Name des .foam-Files) Quelle: Main Tab, 01
03	CaseFolderPath	single value (Pfad des Ordners in welchem .foam-File liegt) Quelle: Main Tab, 01
04	CaseName	single value (Eindeutiger Name des Cases) Quelle: Main Tab, 02
05	CaseRDiameter	single value (Durchmesser des Laufrades (D1) aus Zeichnung) Quelle: Main Tab, 03
06	CaseSpanwiseHeight	single value (Höhe des Laufradeintritts (h1) aus Zeichnung) Quelle: Main Tab, 04
07	CaseZcoords	List of values: [10%,50%,90%] (berechnete Z-Koordinate in meter der jeweiligen Position) Quelle: Main Tab, 04
08	CaseNumb_RotorBlades	List of values: [numb, list] (Anzahl Laufradschaufeln und Liste der Namen der Laufradpatches) Quelle: Main Tab, 05
09	CaseNumb_GVBlades	List of values: [numb, list] (Anzahl Leitschaufeln und Liste der Namen der Leitrادpatches) Quelle: Main Tab, 06
10	CaseFluidProp	List of values [p,η,c_p,λ] (Fluid-Eigenschaften) Quelle: Main Tab, 07 (Dropdown)
11	CaseFlowRate	single value (der Simulation vorgegebener Volumenstrom im l/s) Quelle: Main Tab, 08
12	CaseRPM	single value (der Simulation vorgegebene Drehzahl in rpm) Quelle: Main Tab, 09
13	Case_dT	single value (Zeitschritt der Simulation) Quelle: Main Tab, 10

14	CaseNumb_TimeDicts	single value (Anzahl der von der Simulation behaltene Lösungen der Zeitschritte) Quelle: Main Tab, 11
15	CaseStartTime	single value (Zeit, der ersten behaltenen Lösung) Quelle: Main Tab, 10,11 und 12 (errechnet)
16	CaseEndTime	single value (Zeit des Simulationsabbruchs) Quelle: Main Tab, 12 (errechnet)
17	CaseTimeCut	single value (Zeit, welche für die Zeitsignalauswertung dem Signal abgeschnitten wird) Quelle: Main Tab, 13
18	CaseWhich	List of values: [OF,CFX] (Handelt es sich um eine OF oder CFX Simulation) Quelle: Main Tab, 14
19	MainView	List of values: [4q,Urad,sLine,FFT,qMid,cyl,MerCut,MerV,BtB] (True=jeweilige Ansicht wurde selektiert, False=nicht selektiert) Quelle: Main Tab, 15 und 16
20	pstat_patchInlet_Folder	single value (Name des Ordners mit dem entsprechenden Zeitsignal) Quelle: 4Q-Curve Tab, 01
21	pstat_patchInlet_Type	single value (Name des Files mit dem entsprechenden Zeitsignal) Quelle: 4Q-Curve Tab, 02
22	pstat_patchOutlet_Folder	single value (Name des Ordners mit dem entsprechenden Zeitsignal) Quelle: 4Q-Curve Tab, 03
23	pstat_patchOutlet_Type	single value (Name des Files mit dem entsprechenden Zeitsignal) Quelle: 4Q-Curve Tab, 04
24	torque_RunnerAll_Folder	single value (Name des Ordners mit dem entsprechenden Zeitsignal) Quelle: 4Q-Curve Tab, 05
25	torque_RunnerAll_Type	single value (Name des Files mit dem entsprechenden Zeitsignal) Quelle: 4Q-Curve Tab, 06
26	Urad_numPoint	single value (Anzahl Punkte zur Generierung des Diagramms) Quelle: rad. vel. dist Tab, 01
27	qMidZcoords	List of values: [10%,50%,90%] (Auf welcher Höhe soll geschnitten werden) Quelle: Quasi-Midspan Tab, 01
28	qMidView(1-9)	List of values: [status,streamline,min,max,phys1,phys2,title] (Einstellungen der jeweiligen Ansicht, physikalische Größe in Plot, Titel der ColorMap) Quelle: Quasi-Midspan Tab, 02-07
29	cylView	List of values: [statAV,statMV,min,max] (Einstellung der Ansicht {timeAveraged, Animation,...}) Quelle: Rotor-Stator Tab, 01-03
30	MerCutDetail	List of values: [statAV,statMV,min,max] (Einstellung der Ansicht {timeAveraged, Animation,...}) Quelle: Meridional-Cut Tab, 01 und 03
31	MerCutOverV	List of values: [statAV,statMV,min,max] (Einstellung der Ansicht {timeAveraged, Animation,...}) Quelle: Meridional-Cut Tab, 02 und 03

Jede Eingabe im GUI, wird auf ihren Datentyp hin überprüft, bevor er ins varDict aufgenommen wird.

dataDict

Dictionary, in dem alle Simulationsdaten (Simulationszeit, Zeitsignale, Ergebnisse, ...) gespeichert werden. Die Daten in diesem Dictionary enthalten Daten für Diagramme und Kennwerte.



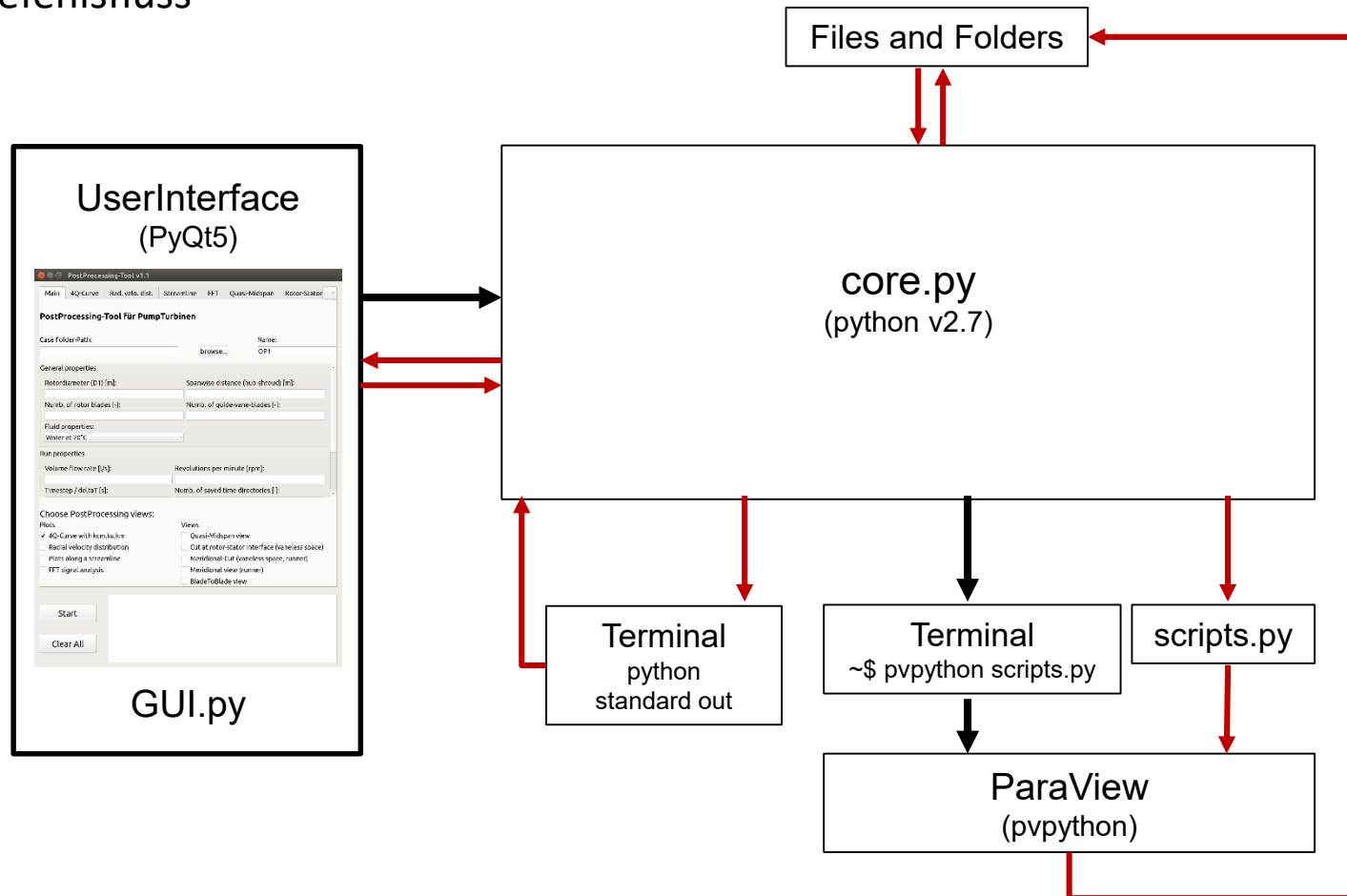
Nr.	Name der Variablen	Beschreibung
01	simTime	value: Geschnittenes Zeitsignal Quelle: File der Probe (pstat_patchInlet)
02	simdp_INtOUT	List: [Geschnittenes Zeitsignal, zeitlich gemittelter Wert] Quelle: File der Proben (pstat_patchInlet) und (pstat_patchOutlet)
03	simTorque_RunnerAll	List: [Geschnittenes Zeitsignal, zeitlich gemittelter Wert] Quelle: File der Probe (torque_runnerAll)
04	simKu1	value (durch Programm errechnet)
05	simKcm1	value (durch Programm errechnet)
06	simKm1	value (durch Programm errechnet)
07	Urad_lfaceGVRrunner	List: [Werte; Über den Umfang und zeitlich gemittelte Radialgeschwindigkeit] (durch Programm errechnet)
08	dimLess_coordsZ	List: [Werte der dimensionlose Höhe (Hub-Shroud) in %] (durch Programm errechnet)

A3 PP-Tool: Softwarearchitektur

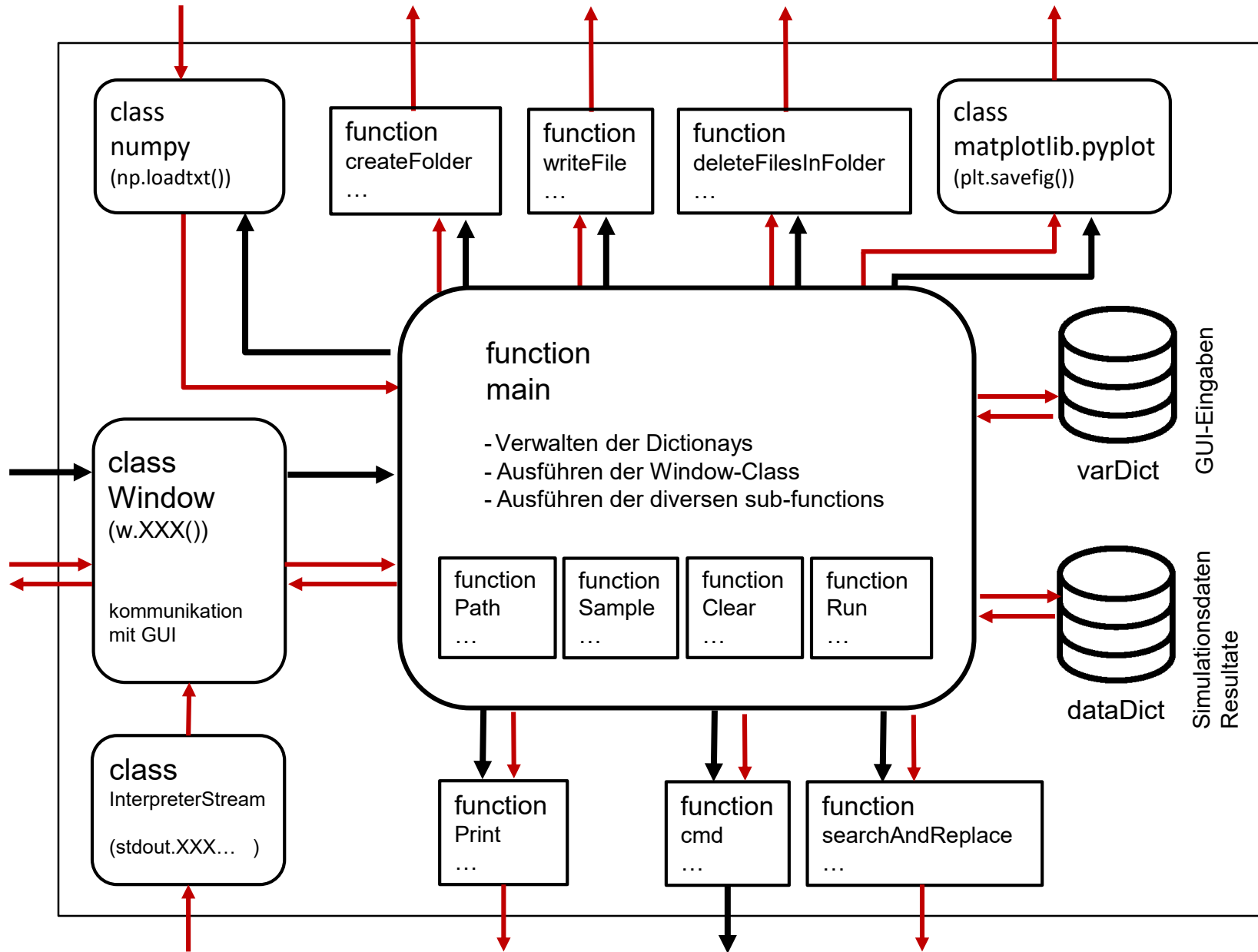
Software Architektur

→ Informationsfluss

→ Befehlsfluss



core.py



function Run

function
Run

- Nacheinander Ausführen der einzelnen
sub-functions

function
4q
...

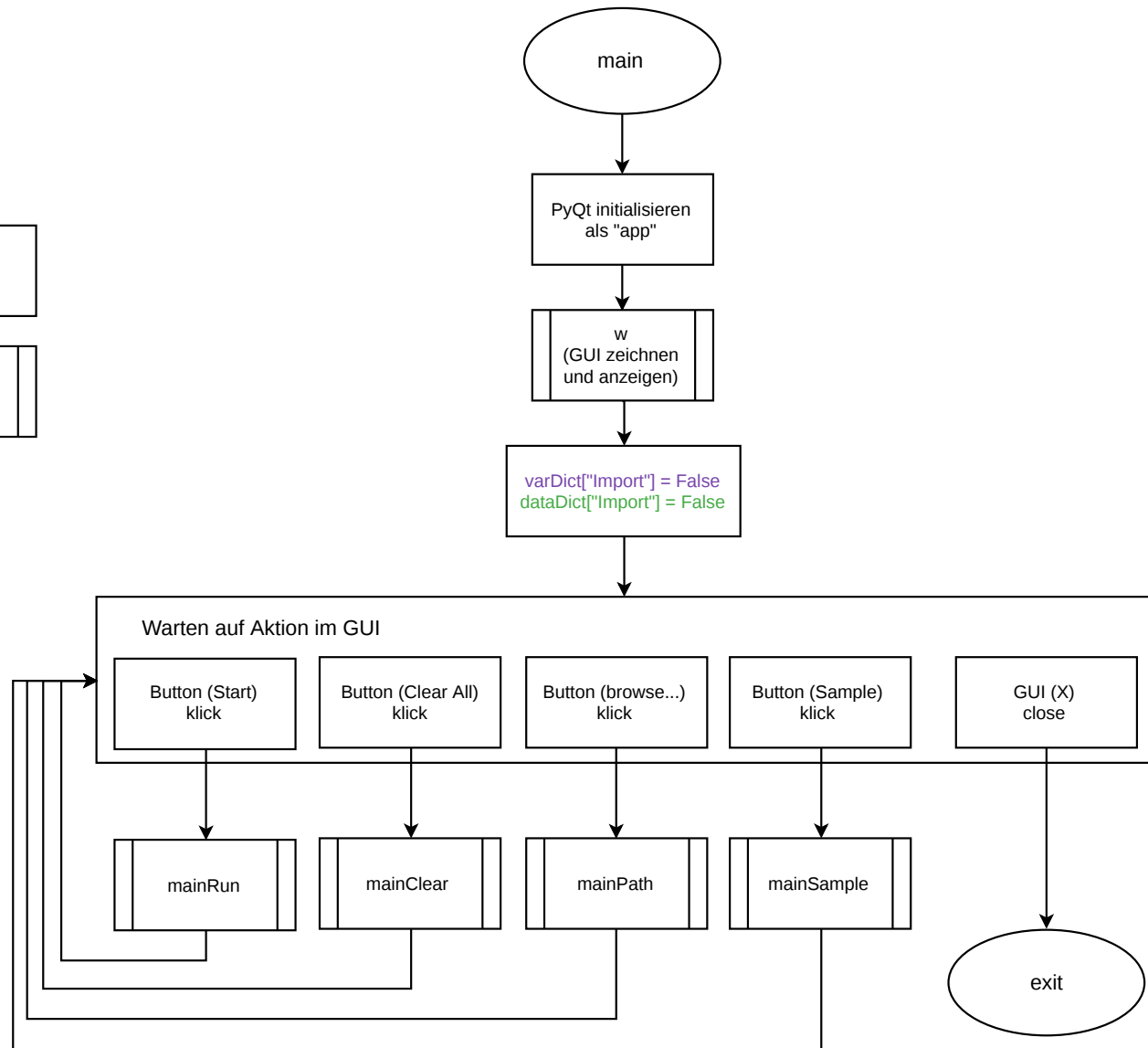
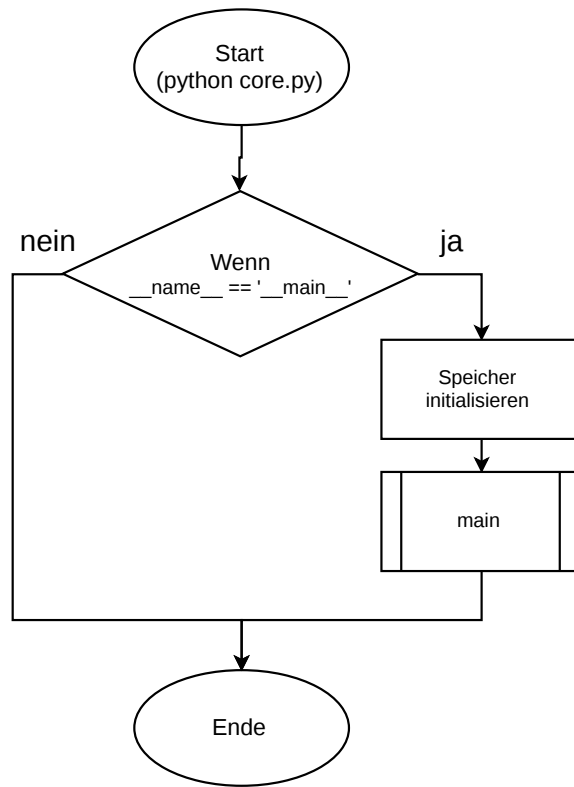
function
qMid
...

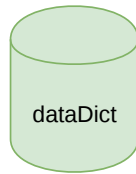
function
Urad
...

function
cyl
...

function
MerCut
...

A4 PP-Tool: Flussdiagramme

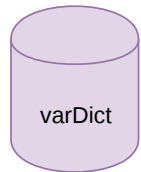




dataDict

dataDict

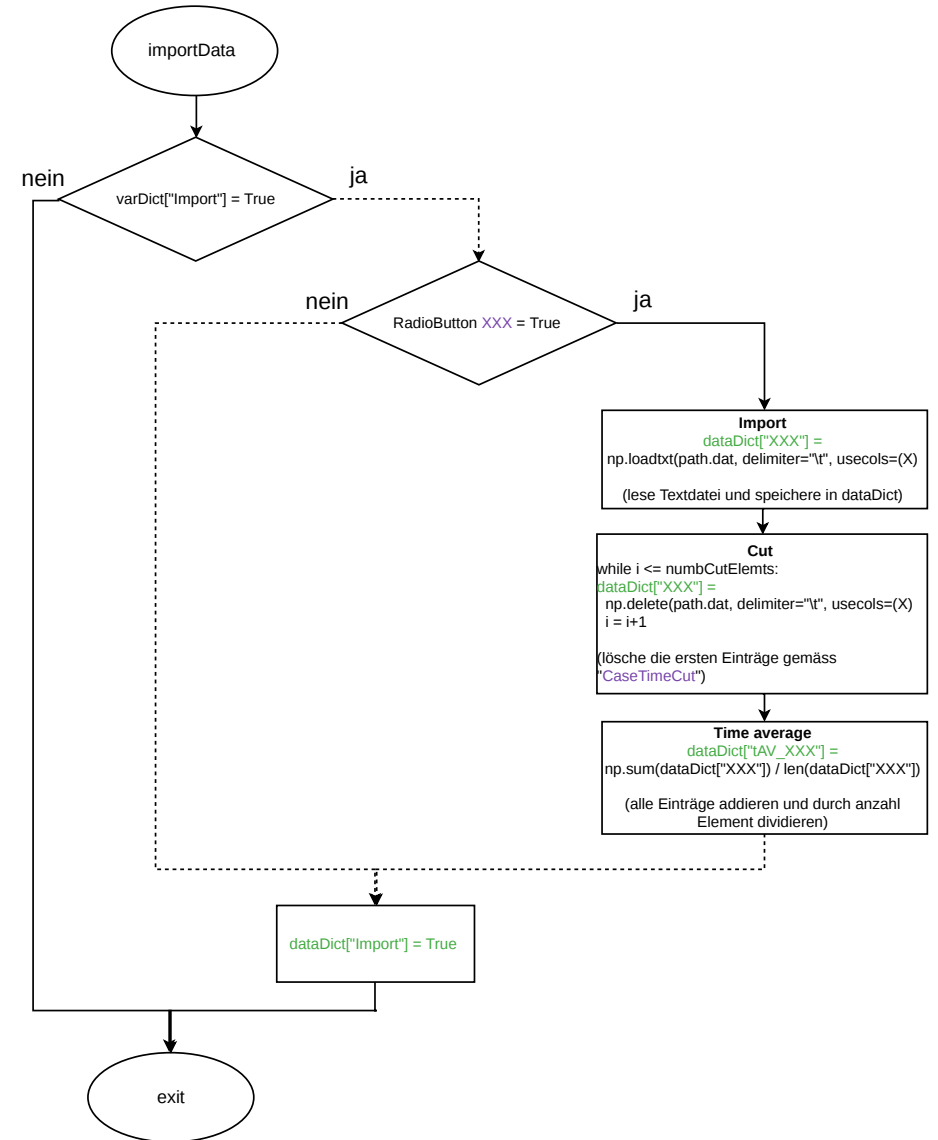
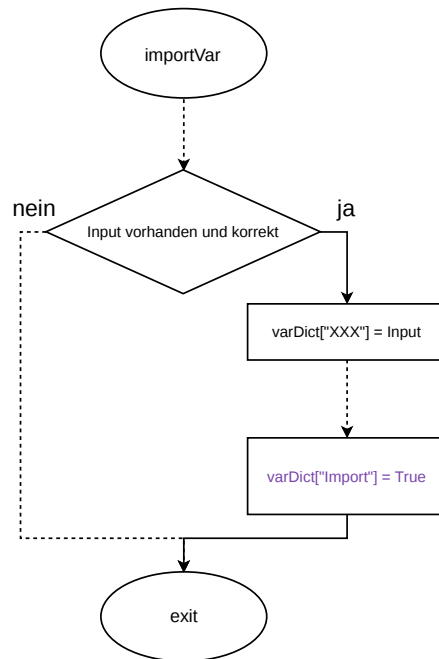
Python Dictionnaire.
Hier werden alle Simulations-
Resultate gespeichert.

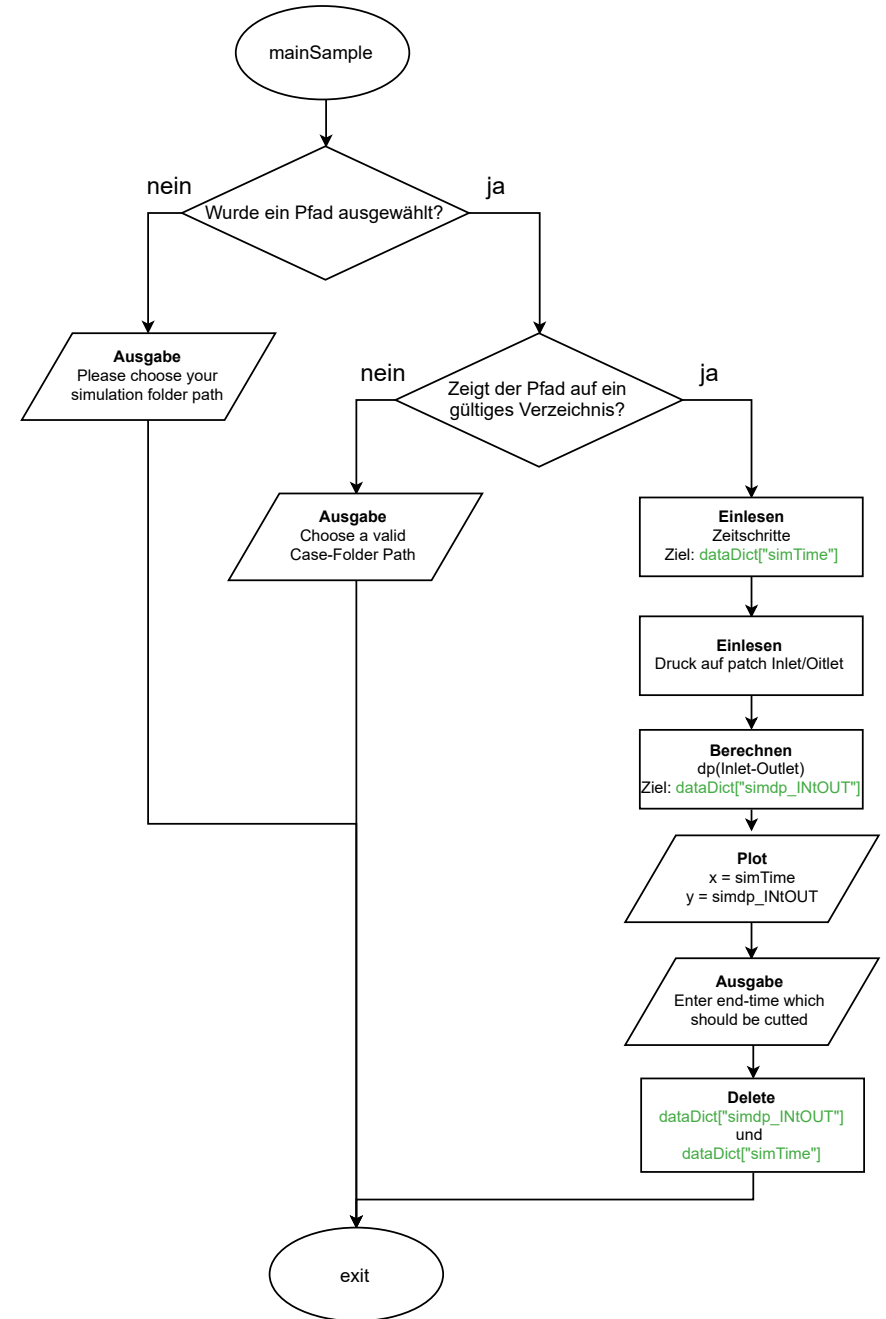
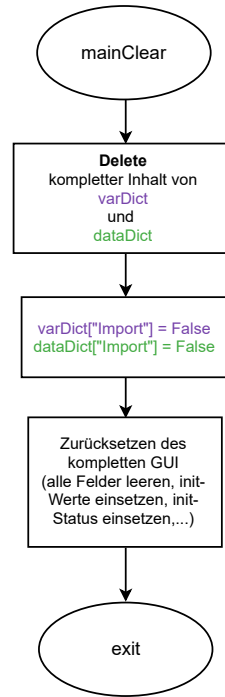
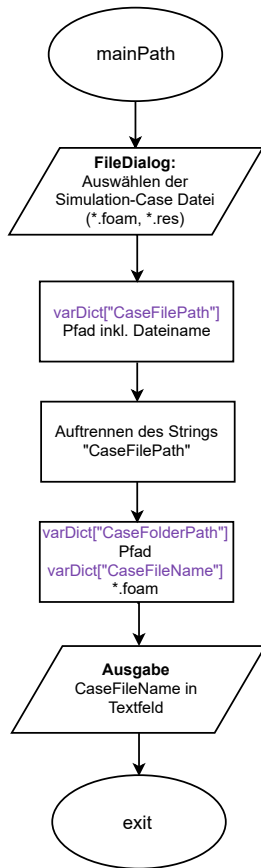


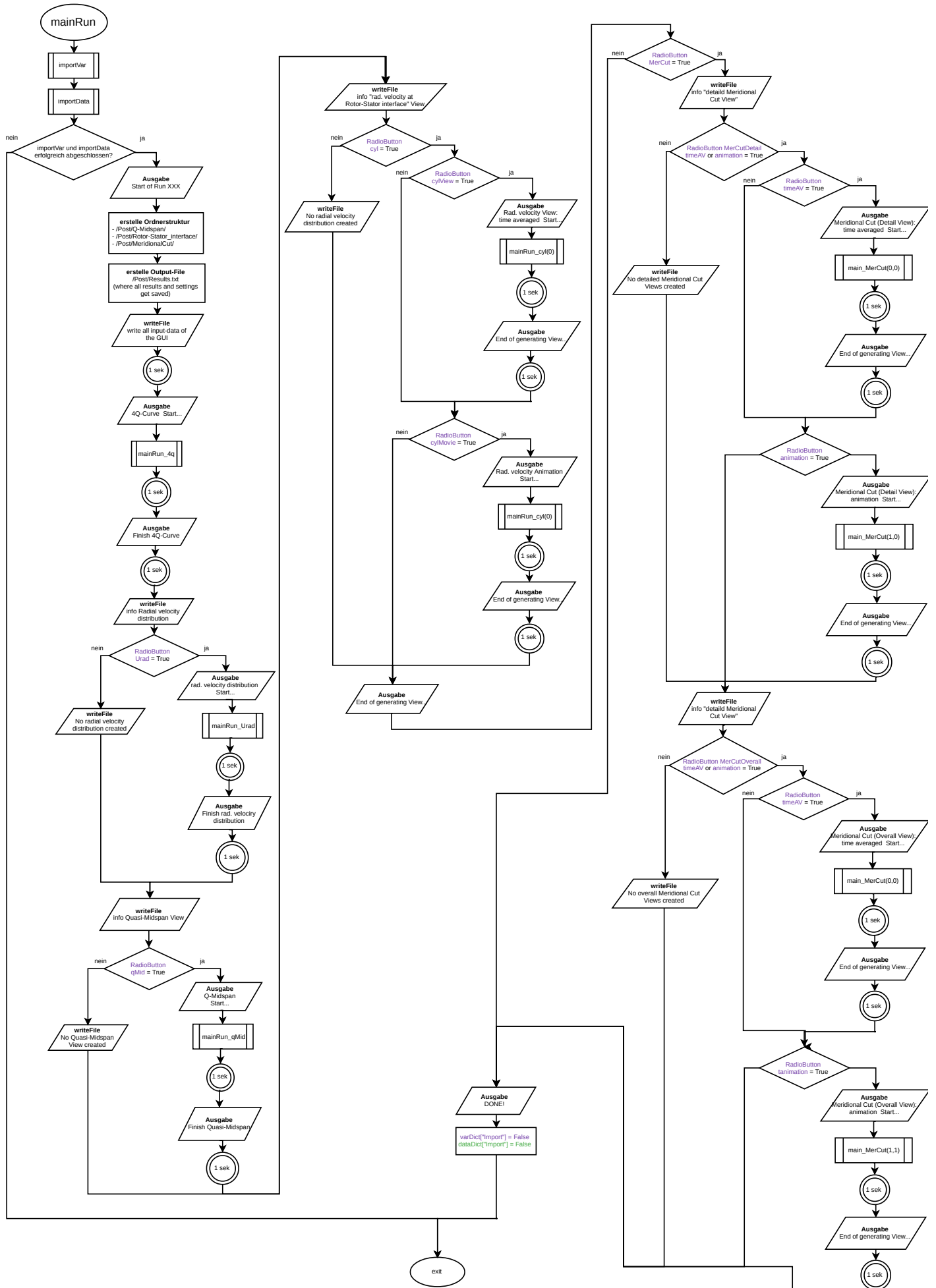
varDict

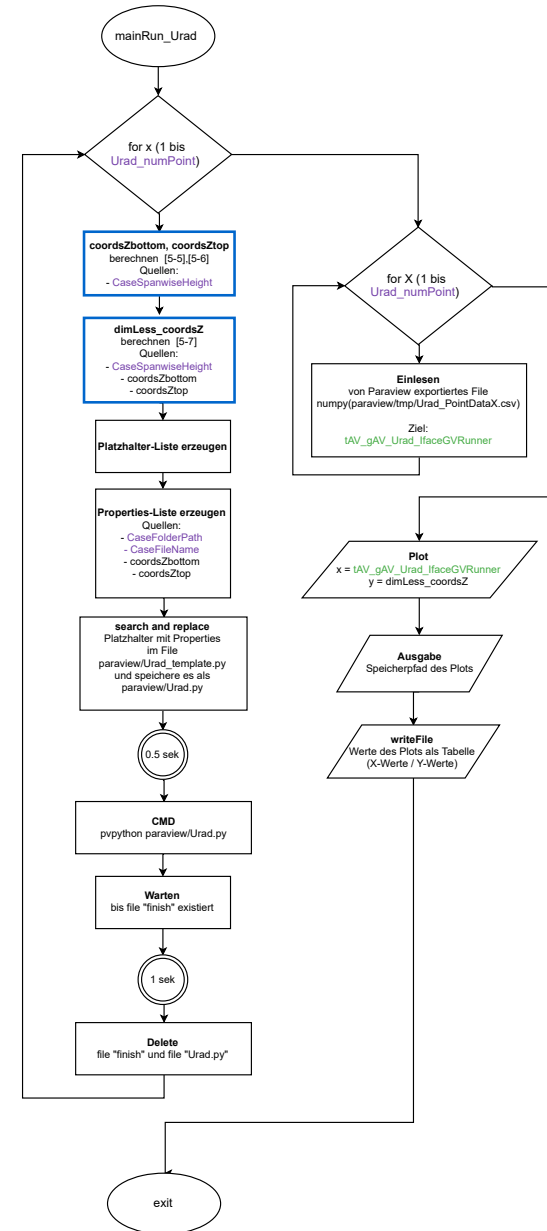
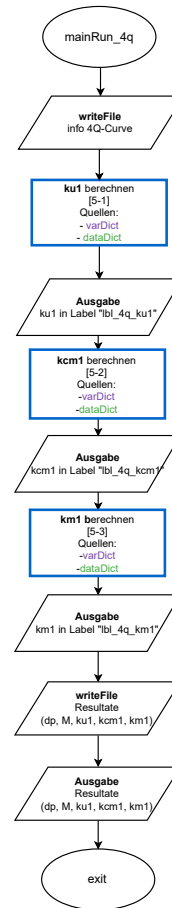
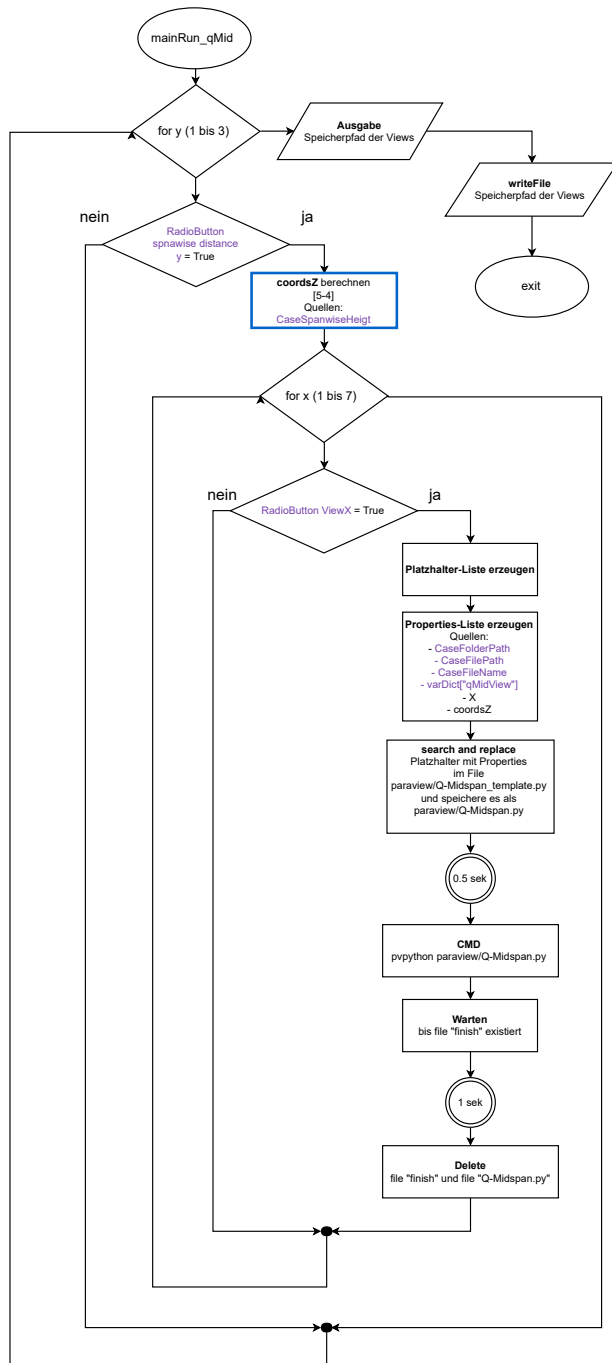
varDict

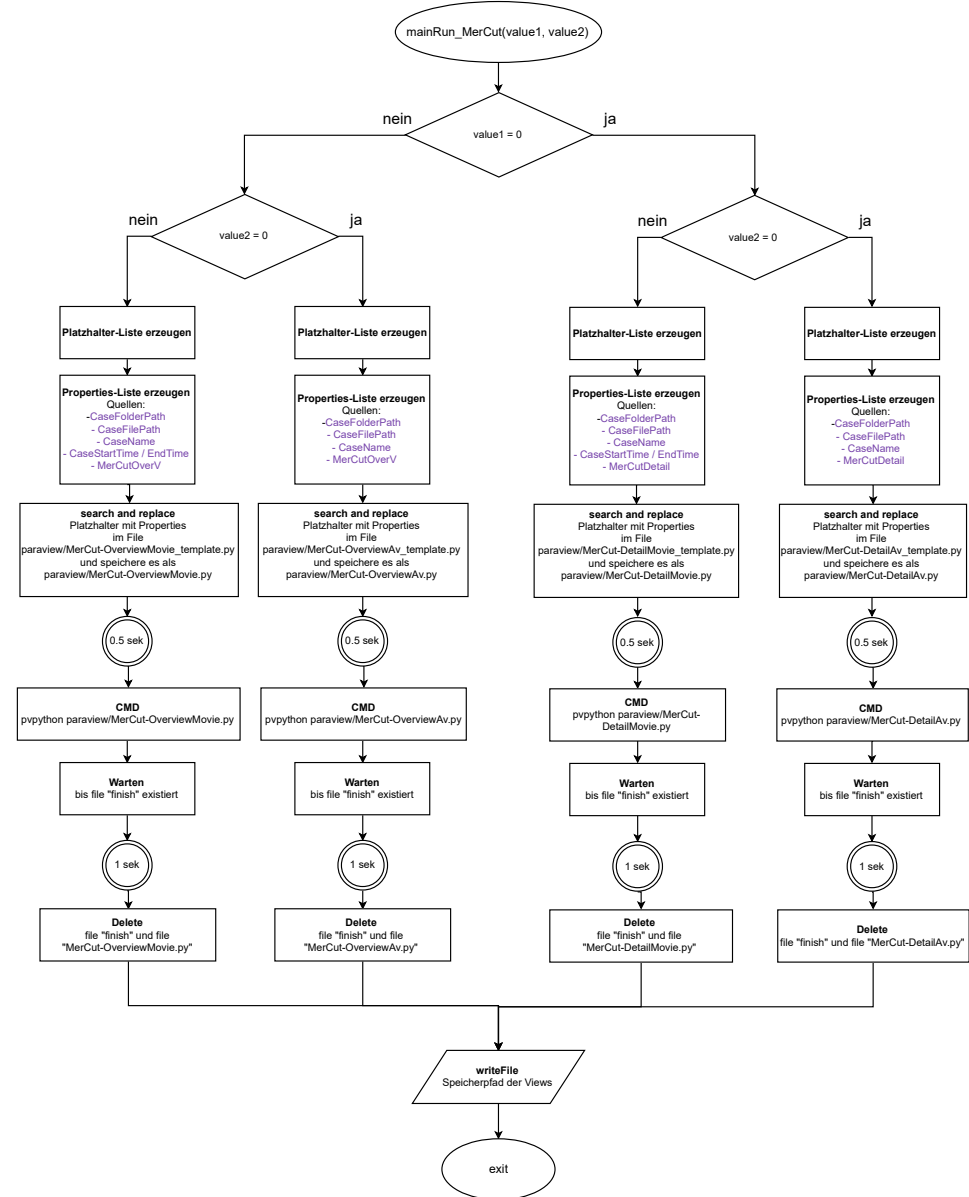
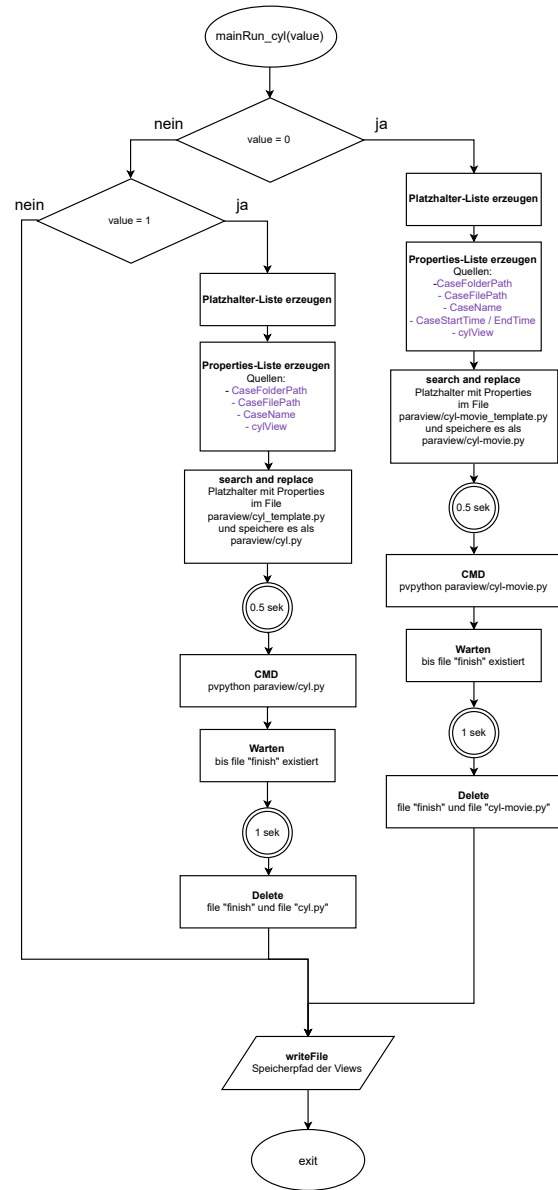
Python Dictionnaire.
Hier werden alle GUI-Eingaben
gespeichert.











A5 Aufgabenstellung

Horw, 7. Januar 2018

Institut für Maschinen und Energietechnik

Bachelor-Diplomarbeit in Fluidmechanik und Hydromaschinen

Aufgabe für **Manuel Häusler**

1. Arbeitstitel

Numerische Berechnung der Kennlinien von Pump-Turbinen im Turbinenbetrieb in der Nähe des S-Schlages und die Analyse der Strömungsvorgänge mit Fokus auf Instabilitäten

2. Fachliche Schwerpunkte

Fluid Mechanik, CFD, Pump-Turbine, 4-Quadranten Kennlinien, Strömungsinstabilität, S-Schlag

3. Einleitung

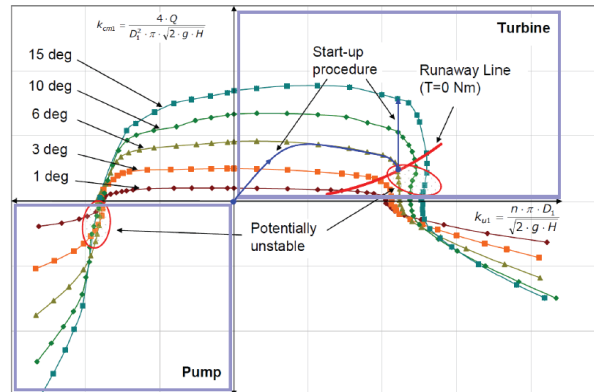
In der heutigen Energieverbraucherstruktur spielen die Pumpturbinen mehr und mehr eine wichtige Rolle. Nicht nur wegen ihrem Anteil an wachsender Energieproduktion zur Spitzenlastabdeckung (z.B. etwa 4% der in der Schweiz produzierten Energie) aber auch wegen ihrer Rolle bezüglich der Flexibilität und Stabilisierung des Stromnetzes.

Pumpspeicherkraftwerke sind gut geeignet, häufige Wechsel zwischen Elektrizitätsmangel und -überschuss auszugleichen und bereiten auch den Weg für den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien, wie Wind und Sonne. Denn Stromerzeugung aus Wind- und Solarkraftwerken unterliegen starken Schwankungen. Daher nimmt der Bedarf an Pumpspeicher-kraftwerken weltweit weiter zu. Im Gegensatz zu thermischen Kraftwerken können Pumpspeicherkraftwerke in kürzester Zeit auf Netzschwankungen reagieren, indem sie benötigte Elektrizität generieren und überschüssige aufnehmen. Bei einem Ausfall des Energieversorgungssystems können Pumpspeicherkraftwerke ohne äussere Energiezufuhr das Netz wieder aufbauen. Dagegen stellen die kombinierte Betriebsform in Pump- und Turbinenrichtungen hohe Anforderungen an das Design, die Performance und die Stabilität der Pumpturbinen. Moderne Pumpturbinen unterliegen häufigem Wechsel zwischen Pumpen- und Turbinenbetriebsmodus und die Betreiber verlangen auch kurze Umschaltzeiten zwischen Pumpen- zu Turbinenbetrieb. Das Betriebsverhalten ist dynamisch mit schnellen Lastwechseln (Da Pumpspeicherwerke verstärkt die Rolle der Regelung für elektrische Verbundnetze ausüben) und mit wachsendem Betrieb unter Teil- oder Überlast („Off-Design“) Betriebsbedingungen.

Das zunehmende Interesse an Pumpturbinen im Energiemarkt und die herausfordernden Anforderungen, vor allem das Auftreten von Strömungsinstabilitäten an verschiedenen Betriebsbedingungen erfordern neue Entwicklungen auf dem Gebiet von Pumpturbinen. An der Hochschule Luzern am CC Fluidmechanik & Hydromaschinen läuft ein experimentelles und numerisches Forschungsprojekt über Pumpturbinen und deren Instabilitäten. Der Schwerpunkt dieses Projektes liegt an der Identifizierung, Vermeidung, Beeinflussung und Unterdrückung von Strömungsinstabilitäten an Pumpturbinen.

Neulich wurde am hydraulischen Laboratorium der Hochschule Luzern an dem Pumpturbinenprüfstand eine neue Modellturbine (von Andritz Hydro) installiert. An dieser neuen

Pumpturbine mit einer kleinen spezifischen Drehzahl werden Messungen an verschiedenen Betriebspunkten (Designpunkt, Teillast, Volllast, Pumpen- und Turbinenbetriebe, Durchbrennen) durchgeführt um die Kennlinien der Pumpturbine zu bestimmen. Die Bestimmung der sogenannten 4-Quadranten Kennlinien der Pump-Turbine ist der erste Schritt für die Untersuchung der Strömungsinstabilitäten an Pump-Turbinen.

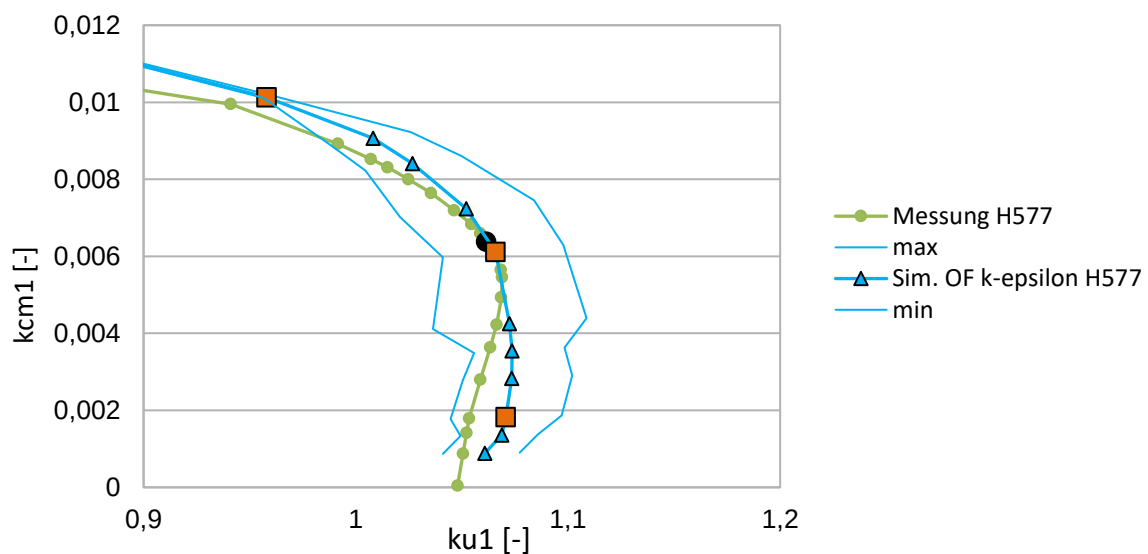


Beispiel der 4-Quadranten Kennlinien einer Pump-Turbine

4. Aufgabenstellung

Bis jetzt wurden verschiedene CFD Simulationen am Bhira Pump-Turbinen Modell Laufrad, sowie an anderen Pump-Turbinen durchgeführt. Die Aufgabenstellung ist einerseits die CFD Berechnungen für das Pump-Turbinen Laufrad Bhira weiterzuführen, um die experimentell bestimmte Kennlinie mit CFD genauer abzubilden (dabei sollen verschiedene Turbulenzmodelle ausprobiert werden) sowie eine Auswertungsmethode zu entwickeln, die zur besseren und schnelleren Analyse der Ergebnisse führen wird.

Die detaillierte Analyse der Ergebnisse der durchgeführten Strömungssimulationen ist wichtig für das Verständnis der komplexen Strömungsvorgänge, welche zu den Strömungsinstabilitäten führen können. Zu diesem Zweck sollen verschiedene Auswertemethoden zur „Automatisierung“ der Strömungsauswertung für das Simulationsmodell Bhira realisiert werden und mit dessen Hilfe die CFD Ergebnisse analysiert werden.



5. Durchführung der Arbeit

Die Arbeit soll folgendes Vorgehen und Inhalte enthalten:

1. Fehlende CFD Simulationen neu aufsetzen

Die bereits durchgeführten Simulationen beinhalten zum Teil nicht alle notwendigen Resultate (Messstellen, Messgrößen, ungenügende zeitliche Auflösung der transienten Simulation etc.). Aus diesem Grund müssen die gewünschten Betriebspunkte neu berechnet werden. Bei den beabsichtigten Simulationen handelt es sich vorerst um die Betriebspunkte im S-Schlag-Gebiet der Pumpenturbine Bhira (siehe orange Markierungen in Abbildung oben). Dabei sollen die Simulationen mit dem k-epsilon Turbulenzmodell in OpenFoam und dem EARSM cc Turbulenzmodell in CFX durchgeführt werden. Der Student soll zuerst die Simulationsdurchführung planen:

1. Simulationsmodell anpassen (In Absprache: Welche Größen müssen überwacht werden und an welchen Stellen).
2. Zeitplan für die Simulationen erstellen.
3. Simulationen überwachen und die Resultate auf Plausibilität prüfen.

2 Automatisieren der Auswertung für Bhira (nach „Katalog“)

Für die Automatisierung der Strömungsauswertung wird ein Katalog von Vorschlägen vorliegen, welcher umgesetzt werden soll (Der Katalog wurde von den Betreuern erstellt). Folgende spezifischen Arbeiten werden dabei anfallen:

1. Skripten der Simulationsauswertung (paraView, cfx-post).
2. Bearbeiten und Darstellen von Auswertgrößen (octave, matlab, excel)

3. Automatisieren der Auswertung für Bhira (eigene Vorschläge)

1. Überlegen welche Größen und Vorgänge von Interesse sein könnten um zusätzliche Erkenntnisse der Strömung zu gewinnen (Literaturrecherche).
2. Überlegen wie die interessanten Eigenschaften der Strömung sinnvoll dargestellt werden können (experimentieren in paraView oder cfx-post).
3. Skripten der Simulationsauswertung (paraView, cfx-post).
4. Bearbeiten und Darstellen der auszuwertenden Größen (octave, matlab, excel)

4. Auswerten der berechneten Betriebspunkte mit dem implementierten Auswertetool

Das erstellte Auswertetool soll dazu verwendet werden, die neu berechneten Betriebspunkte zu analysieren. Dabei sollen Erkenntnisse über die Strömungsvorgänge gewonnen werden. Zudem soll anhand der ausgewerteten Betriebspunkte das Auswertetool wenn nötig angepasst, erweitert und verbessert werden.

5. Dokumentieren der Ergebnisse

- Erstellen eines Berichtes nach Vorgabe der HSLU T&A der die wesentlichen Resultate, Erläuterungen, Darstellungen, Vergleiche mit den Experimenten und eine Zusammenfassung enthält.

Termine

Start der Arbeit:	19. 09. 2017
Zwischenpräsentation:	nach Absprache im Zeitraum November 2017
Abgabe Schlussbericht:	08.01.2018
Schlusspräsentation:	nach Absprache im Zeitraum Januar 2018

5. Dokumentation

Der Schlussbericht muss im Sekretariat Bachelor- & Masterausbildung abgegeben werden. Vertrauliche Arbeiten sind in einem verschlossenen Kuvert abzugeben. Die termingerechte Abgabe wird mit einem Stempel bestätigt.

Der Schlussbericht ist in 3-facher Ausführung zu erstellen (je 1 Exemplar für Dozent, Experte oder Partner, Bibliothek). Er muss zwingend enthalten:

- die folgende Selbstständigkeitserklärung auf der Rückseite des Titelblattes:
„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Sämtliche verwendeten Textausschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet.
Horw, Datum, eigenhändige Unterschrift“
- einen deutschen und englischen Abstract mit jeweils maximal 2.000 Zeichen

Zusätzlich muss dem betreuenden Dozenten eine CD mit dem Bericht (inkl. Anhänge), mit den Präsentationen, eventuell Messdaten, Programmen, Auswertungen, usw. abgegeben werden. Für die öffentliche Bachelor-Diplomausstellung ist ein Poster gemäss den beiliegenden Vorgaben zu erstellen.

6. Fachliteratur/Web-Links/Hilfsmittel

Wird zum Start im Laufe der Durchführung durch die betreuenden Personen bereitgestellt.

7. Zusätzliche Bemerkungen

Sämtliche vom Auftraggeber oder Industrie-Partner zur Verfügung gestellten Unterlagen sind vertraulich zu behandeln.

Die Ergebnisse der Projektarbeit stehen dem Industriepartner vollumfänglich zur Verfügung.

8. Industrie-/Wirtschaftspartner (Kontaktpersonen)

Andritz Hydro AG
Oberrauerstrasse 4,
6010 Kriens
Homepage: www.andritz.com

9. Verantwortlicher Dozent / verantwortliche Dozentin, Betreuungsteam

Dr. Sabri Deniz, Armanda Del Rio

10. Experte/Expertin

Dr. Joel Schlienger

11. Beilagen

- Bewertungsraster für Bachelor-Diplomarbeit
- Vorgaben für Poster Industrieprojekt oder Bachelor Diplomarbeit

Beilage 1: Bewertungsraster für PAIND ?? nicht BDA ??

Die Arbeiten werden gemäss folgendem Raster bewertet. Zusätzlich erfolgt eine verbale Gesamtbeurteilung.

Punktebewertung / Kriterienliste	Vorgängige Punktezuordnung	Erreichte Punkte
1. Prozess - Erfassen der Problemstellung, Abgrenzung, Zielsetzung - Planung, Organisation, Systematik - Erwerb von neuem Wissen - Selbstständigkeit, Einsatz, Problemlösung, Motivation - Kommunikation und Teamarbeit	30	
2. Bericht und Inhalt - Zielerreichung (Erfüllungsgrad) - Lösungswege überzeugend und nachvollziehbar - Innovation, Kreativität der erarbeiteten Lösungen - Validierung der Ergebnisse, Diskussion der Resultate - Berichtstruktur, Layout und Sprache	50	
3. Präsentation - Projektzwischenpräsentation - Gehalt Schlusspräsentation - Schlusspräsentation: Präsentationstechnik, Stimulanz, Sprache, Auftreten - Mündliche Befragung	20	
Erreichte Punktzahl		
Bewertung (F < 60, E = 60...67, D = 68...75, C = 76...83, B = 84...91, A = 92 ... 100)		

Verbale Gesamtbeurteilung

.....

Beilage 2: Vorgaben für das Poster Industrieprojekt oder Bachelor Diplomarbeit

Die Vorlage erhalten Sie für MS Publisher

Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

HOCHSCHULE LUZERN

Technik & Architektur
Abteilung Maschinentechnik

Industrieprojekt

Das Poster muss folgende Elemente enthalten

1. **Titel** der Arbeit
2. **Worum geht es?**
Formulierung der Problemstellung der Arbeit aus Ihrer Sicht (kurzer informativer Text - keine Kopie der Aufgabenstellung)
3. **Wie wurde das Problem gelöst?**
Kurze Aufzeichnung des Lösungskonzeptes in Textform.
4. **Was sind die Ergebnisse?**
Darstellung der wichtigsten Ergebnisse mit Text, Bildern, Grafiken
5. Formales
 - Mindestens 2 zum Thema der Arbeit passende **Bilder**, Diagramme, Grafiken etc. Die Bilder müssen etwas aussagen über die Arbeit.
 - **Steckbrief** der Studierenden, Informationen zu beteiligten Dozierenden, Industriepartner
 - Schriftart Verdana (MS Office)

gut: wenig Text, aussagekräftige Bilder, grosse Schrift

schlecht: viel Text, Unwesentliches, zu kleine Schrift, schlechte Bildqualität

Steckbrief Studierende(r)

Foto 58 x 45 mm



Beispielbild 1

Beispielbild 2

blauer Rand: Grenzen für Text
schwarzer Rand: Zuschneidrahmen, Grenze für Bilder

FH Zentralschweiz

A6 CD

Auf der CD befindet sich folgender Inhalt:

- Vorliegende Arbeit in PDF-Format
- Alle Abbildungen, der vorliegenden Arbeit
- Excel Tabelle der Messdaten und Simulationsergebnissen
- Alle Ausgaben des PP-Tools von OP4
- PP-Tool, Version 1.1 als ZIP