TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Maschinenwesen Institut für Strömungsmechanik, Professur für Turbomaschinen und Flugantriebe

Großer Beleg

Evaluierung der CFD-Software Multall zur Simulation der Strömung in Turbomaschinen

Andriy Prots

Matrikelnummer: 3956911

Professur für Turbomaschinen und Flugantriebe

Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. habil. Ronald Mailach

Industrieller Betreuer: Dr.-Ing. Oliver Velde

Universitärer Betreuer: M. Sc. Matthias Kniefs

16.03.2018

B2077

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Maschinenwesen

Institut für Strömungsmechanik

Professur für Turbomaschinen und Flugantriebe

Aufgabenstellung zum Großen Beleg / Forschungspraktikum

Name: **Andriy Prots** **Matr. Nr.** **3956911**

Thema: Evaluierung der CFD-Software MULTALL zur Simulation der Strömung in Turbomaschinen

Zielsetzung:

Im Rahmen der Arbeit soll untersucht werden, wie gut die CFD-Software MULTALL (Prof. em. John Denton, Cambridge University) für die Strömungsberechnung in Turbomaschinen geeignet ist und wie eine automatisierte Anbindung an die Software CFturbo erfolgen kann.
Die Untersuchungen sollen anhand von zwei typischen Beispielen für inkompressible und kompressible Strömung vorgenommen werden, für die seitens CFturbo sowohl geometrische Größen in Form eines CFturbo-Modells als auch validierte Ergebnisse kommerzieller CFD-Programme vorliegen. Neben der Beurteilung der Qualität der Simulationsergebnisse soll dokumentiert werden, was nötig ist, um eine komfortable und möglichst vollautomatische Anbindung von MULTALL an CFturbo zu erreichen. Die parametrischen Geometriemodelle liegen in CFturbo bereits vor. Vielfältige Exportfomate in CFturbo sollten eine Übertragung der Geometrie nach MULTALL ermöglichen.

Die Arbeit gliedert sich damit in die folgenden Schritte:

1. Einarbeitung in die Aufgabenstellung und Literaturstudium
2. Analyse des Systemaufbaus, technischer Hintergründe und Anwendungsgrenzen
3. Kompilierung der Fortran-Quellcodes der einzelnen Teilsysteme (Windows)
4. Analyse und Dokumentation der notwendigen Eingabedateien für die Geometrie, Vernetzungs- und Solverparameter
5. Analyse des Vernetzers hinsichtlich Performance, Stabilität und Netzqualität
6. Entwicklung einer einfachen Bedienoberfläche für die Teilprogramme
7. Durchführung und Auswertung der Simulationen für einen kompressiblen und einen inkompressiblen Fall, möglichst für eine Radial- und eine Axialmaschine
8. Einschätzung von:
    a. Robustheit des Systems
    b. Rechenzeit und Lösungsqualität im Vergleich zu kommerzieller CFD-Software (CFX, CCM+ oder TCFD) bei vergleichbarer Netzfeinheit
    c. Art und Umfang der Schnittstellenentwicklung in CFturbo zur Anbindung von MULTALL
9. Dokumentation und Präsentation der Arbeit

Betreuer: Dr.-Ing. Oliver Velde / CFturbo
M. Sc. Matthias Kniefs / TU Dresden

Ausgehändigt am: 08.08.2017

Prof. Dr.-Ing. habil. R. Mailach
Betreuender Hochschullehrer

Rahmenbedingungen:

Die Rahmenbedingungen des Großen Belegs / Forschungspraktikums ergeben sich aus der für die Kandidatin / den Kandidaten gültigen Prüfungsordnung.
In Abständen von wenigstens 4 Wochen ist dem Betreuer an der Professur für Turbomaschinen und Flugantriebe über erledigte Arbeiten zu berichten (1 Seite). Dabei ist auf wesentliche Ergebnisse und beeinträchtigende Schwierigkeiten hinzuweisen, die das Erreichen des Sach- und Terminziels gefährden. Bei Überschreitung der max. Bearbeitungsdauer lt. Prüfungsordnung bzw. bei Überschreitung einer Bearbeitungsdauer von 6 Monaten behält es sich der Lehrstuhl vor, die Aufgabenstellung zurückzuziehen.
Zur Hälfte der Bearbeitungszeit ist in einer Zwischenvorstellung (15-20min Vortrag) über den Stand der Arbeiten und den Zeitplan zu berichten. Der Vortrag kann alternativ zu einem Seminar am Lehrstuhl durch ein Telefonat / Webex mit den Betreuern erfolgen. Die Terminfindung verantwortet der/die Kandidat/in.

Zwei Exemplare der Arbeit sowie ein Datenträger, welcher die Dokumentation und die bearbeiteten Daten enthält, verbleiben an der Professur für Turbomaschinen und Flugantriebe. Die Präsentation der Ergebnisse innerhalb des Lehrstuhlseminars ist Bestandteil der Arbeit.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich reiche sie erstmals als Prüfungsleistung ein. Mir ist bekannt, dass ein Betrugsversuch mit der Note „nicht ausreichend“ (5,0) geahndet wird und im Wiederholungsfall zum Ausschluss von der Erbringung weiterer Prüfungsleistungen führen kann.

Vorname:	Prots
Name:	Andriy
Matrikelnummer:	3956911

Dresden, den _____
Datum

_____
Unterschrift

Zusammenfassung

Für die Konstruktion einer Turbomaschine kann der Ingenieur auf Programme wie CFturbo zurückgreifen. Während des Konstruktionsprozesses muss die Performance des aktuellen Designs immer wieder mittels einer CFD-Simulation überprüft werden. Dabei muss ein Kompromiss zwischen der Genauigkeit der Ergebnisse und der Berechnungszeit gefunden werden. Eine solche CFD-Simulation ist noch nicht in CFturbo möglich und es muss daher auf andere Programme zurückgegriffen werden. Eine vielversprechende Möglichkeit wäre die Integration des Programms „Multall“, da der Quellcode dieses Strömungslösers frei zugänglich ist.

Ziel dieser Arbeit war es, die Qualität der Rechenlösungen und die Performance von Multall einzuschätzen. Dazu wurde zunächst die innere Struktur des Programms analysiert. Anschließend erfolgte eine Analyse, in welcher Form die Geometrie und Solverparameter an Multall übergeben werden müssen. Im nächsten Schritt wurde das Programm auf Windows kompiliert. Zur Validierung wurden Testbeispiele gerechnet und die Ergebnisse mit denen eines kommerziellen Strömungslösers verglichen. Dafür wurden Modelle verwendet, die mit CFturbo erstellt wurden. Um diese für Multall aufzubereiten, wurde ein Konvertierungsprogramm geschrieben. Abschließend folgte eine Einschätzung des Systems.

Die Berechnungen haben gezeigt, dass die Ergebnisse von Multall vergleichbar sind mit den Ergebnissen des kommerziellen Strömungslösers. Allerdings kann es in einigen Fällen schwierig sein, eine stabile Konfiguration zu finden. Bereits kleine Änderungen in der Eingabedatei können einen großen Einfluss auf die Stabilität der Berechnungen haben.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **17**

2 Motivation und Ziel **18**

3 Analyse des Systemaufbaus und technische Hintergründe **19**
3.1 Programmpaket Multall-open . . . 19
3.1.1 Meangen . . . 19
3.1.2 Stagen . . . 19
3.1.3 Multall . . . 19
3.2 Multall . . . 20
3.2.1 Rechennetz . . . 20
3.2.2 Lösungsverfahren . . . 21
3.2.3 Reibungsmodellierung . . . 22
3.2.4 Konvergenzkriterien . . . 23
3.2.5 Spaltmodellierung . . . 24
3.2.6 Generierung des CUSP . . . 24
3.2.7 Mischungsebene . . . 25

4 Kompilierung des Fortran-Quellcodes unter Windows **26**

5 Analyse der Eingabedatei **28**
5.1 Eingabe der Geometrie . . . 29
5.2 Eingabe der Vernetzungsparameter . . . 30
5.3 Eingabe Solverparameter . . . 32
5.4 Eingabe Randbedingungen . . . 33

6 Analyse des Vernetzers **36**

7 Aufbereiten von CFturbo-Modellen für Multall **39**

8 Auswertungsmöglichkeiten der Ergebnisse **42**
8.1 Auswertung der Bildschirmausgabe . . . 42
8.2 Auswerten der Daten mit plotall . . . 43
8.3 Auswerten der Daten mit TCFD . . . 44

9 Durchführen von Vergleichsrechnungen **47**
9.1 CC pi 4.0 . . . 47
9.1.1 Beschreibung des Modells . . . 47

9.1.2 Konfiguration der Strömungslöser . . . 47
9.1.3 Validierung des Rechengebietes in Multall . . . 48
9.1.4 Vergleich der Ergebnisse . . . 49
9.1.5 Vergleich der Ergebnisse für verschiedene Konfigurationen in Multall . . . 50
9.1.6 Modellierung des Spalts . . . 52
9.2 AF NQ 182 . . . 54
9.2.1 Beschreibung des Modells . . . 54
9.2.2 Konfiguration der Strömungslöser . . . 55
9.2.3 Validierung des Rechengebietes in Multall . . . 55
9.2.4 Vergleich der Ergebnisse . . . 56

10 Einschätzung des Systems **57**
10.1 Robustheit des Systems, Rechenzeit und Lösungsqualität . . . 57
10.2 Art und Umfang der Schnittstellenentwicklung in CFturbo zur Anbindung an Multall . . . 58

11 Schlussfolgerung und Ausblick **60**
11.1 Zusammenfassung . . . 60
11.2 Zukünftige Untersuchungsgebiete . . . 61
11.2.1 Parallelisierung mit OpenMP . . . 61
11.2.2 Beschleunigung der Konvergenz mit Startlösung . . . 62

Tabellenverzeichnis

7.1 Schritte zur Erzeugung der Geometriedaten für Multall 40

9.1 Konfigurationen der verschiedenen Testfälle 52
9.2 Ergebnisse der Testfälle aus Tabelle 9.1 53

Abbildungsverzeichnis

1.1 Ablaufplan bei der Konstruktion einer Turbomaschine 17

3.1 Richtungen der Indizes ([2]) 21
3.2 Multigrid in Multall, 3x3x3 und 9x9x9 Blöcke (links) und die „superblocks“ (rechts) ([2]) 23
3.3 Erzeugung eines CUSP an einer dicken Hinterkante ([3]) 24
3.4 Mischungsebene in Multall ([3]) 25

4.1 Arrays in Multall, gelb stellt das tatsächlich im Speicher allokierte Array dar, grün stellt die Zellen dar, die während der Rechnung benötigt werden. 26
4.2 Ausgaben von Multall in der Kommandozeile 27

5.1 Auszug aus einer Eingabedatei für Multall ohne Card 3 (links) und mit Card 3 (rechts) 28
5.2 Eingabe der Geometrie in Multall. Dabei müssen die Koordinaten der durchgezogenen Linien eingegeben werden, die (gepunktete) Saugseite ergibt sich aus der Eingabe der tangentialen Dicke. 30
5.3 Beispiel Eingabe der Geometrie - allgemeine Angaben 31
5.4 Beispiel Eingabe der Geometrie - Eingaben für den Spalt 31
5.5 Beispiel Eingabe der Geometrie - Schaufelgeometrie 32
5.6 Beispiel Eingabe der Geometrie - Neugenerierung der meridionalen Gitterabstände 32
5.7 Beispiel Eingabe der Vernetzungsparameter, Festlegung der Anzahl der Gitterpunkte in Umfangsrichtung und radialer Richtung und deren Abstände. Dabei werden in Umfangsrichtung die Abstände automatisch erzeugt (Card 14) und in radialer Richtung manuell eingegeben (Card 15) 33
5.8 Beispiel Eingabe der Vernetzungsparameter, Auswahl des Verfahrens zur Anpassung des Gitters in meridionaler Richtung 33
5.9 Beispiel Eingabe der Solverparameter, Card 2, 4, 8 und 10 34
5.10 Beispiel Eingabe der Solverparameter, Card 28 und 29. Dabei wurde in Card 29 die dynamische Viskosität eingegeben 34
5.11 Beispiel Eingabe der Randbedingungen - Wahl des Typs der Randbedingungen an Eintritt und Austritt 35
5.12 Beispiel Eingabe Randbedingungen - Eingabe der Werte 35

6.1 Erzeugter Absatz in der Schaufelgeometrie bei einem Diagonalrad 36
6.2 Links: fehlerhafte Interpolation einer abgeschnittenen Vorderkante, dabei wurde die Kontur der Vorderkante nachgezogen. Rechst: Interpolation der abgerundeten Vorderkante 37

6.3 Vergleich reale Schaufelgeometrie (gelb) und von Multall interpolierte Schaufelgeometrie (rot) bei verschiedenen Radien. Die Eingabe erfolge dabei bei den 5 Radien 65.0 mm, 83.6 mm, 111.0 mm, 130.3 mm und 149.0 mm 38

7.1 Speicherform der Geometrie in .xml-Datei aus CFturbo (links) und Eingabeform der Geometrie in Multall (rechts) 39
7.2 Schritte zur Erzeugung der Geometriedaten für Multall 40
7.3 CFturbo to Multall Converter: Eingabe von Parameter für die Multall Eingabedatei 41
7.4 CFturbo to Multall Converter: Änderung von Parametern für die Multall Eingabedatei 41

8.1 Ausgabe in der Konsole - Informationen über den Konvergenzfortschritt 42
8.2 Ausgabe in der Konsole - Detaillierte Informationen 43
8.3 Menü von Plotall 44
8.4 Darstellung von Ergebnissen mit Plotall, links: Darstellung des Rechengitters, rechts: Verlauf der statischen Drücke 44
8.5 Abwicklung eines Vollmodells mit dem „TurboUnwrap“ Filter. Links: originales Modell. Rechts: abgewickeltes Modell 45
8.6 Links: Geladenes Rechenergebnis aus Multall in Paraview. Rechts: Verlauf der Stromlinien für ein abgewickeltes Profil 46
8.7 Optionen des TCDF-Filters „TurboUnwrap“ 46

9.1 Darstellung des Modells „CC pi 4.0“ 48
9.2 Links: Vergleich der konstruierten Schaufel in CFturbo und der eingegeben Geometrie für Multall. Rechts: Vergleich des konstruierten Modells in CFturbo und des Rechengebietes 49
9.3 Darstellung der Kennlinien des Modells „CC pi 40“ für 100% (links) und 85% (rechts) der Auslegungsdrehzahl, ermittelt mit SimericsMP (grün) und Multall (rot) 50
9.4 Verlauf der Totaldrücke über der Kanalhöhe am der Schaufelvorderkante (links) und Schaufelhinterkante (rechts), ermittelt mit SimericsMP (grün) und Multall (rot) 51
9.5 Rechengitter einer Meridianquerschnittsfläche im Bereich des Spalts 53
9.6 Darstellung des Modells „NQ 182“ 54
9.7 Originale Konfiguration des Modells „NQ 182“ im Meridianschnitt, die Komponente „Stator“ wurde für die Berechnungen entfernt 54
9.8 Vergleich der konstruierten Schaufel und der eingegebenen Geometrie in Multall . 55
9.9 Vergleich des konstruierten Modells und des Rechengebietes für Laufrad (links) und Leitrad (rechts) 56
9.10 Darstellung der Kennlinien des Modells „AF NQ 182“ für 100% (links) und 75% (rechts) der Auslegungsdrehzahl, ermittelt mit SimericsMP (grün) und Multall (rot) 56

10.1 Fehlerhafte Eingabe der Schaufelgeometrie (links, konvergiert), korrigierte Eingabe (Mitte, keine Konvergenz), korrigierte Eingabe und Erzeugung des CUSP (rechts, konvergiert) 58

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Symbol	Name	Einheit
A	Fläche	m^2
c_{ax}	Axialkomponente der Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
c_m	Meridionalkomponente der Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
c_r	Radialkomponente der Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
c_u	Umfangskomponente der Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
C_p	Wärmekapazität	$\frac{J}{kg\,K}$
$C_{p,1}$, $C_{p,2}$, $C_{p,3}$	Koeffizienten für den Polynomansatz für Variation der Wärmekapazität mit der Temperatur	$\frac{J}{kg\,K}$, $\frac{J}{kg\,K^2}$, $\frac{J}{kg\,K^3}$
E	Totalenthalpie	$\frac{kJ}{kg}$
f_i	Fluss über Zelloberfläche i	verschiedene
$f_{j,i}$	Fluss über Zelloberfläche i des Blocks j	verschiedene
F	Flussvariable, $F = \rho$, ρV_x, ρV_r, $\rho r V_\vartheta$ oder ρE	verschiedene
F^n_{Ecke}	Flussvariable an einer Ecke zum Zeitschritt n	verschiedene
$\Delta\widetilde{F}^n_{Block}$	Änderung der Flussvariable in einem superblock	verschiedene
ΔF^n_{Ecke}	Änderung der Flussvariable an einer Ecke zum Zeitschritt n	verschiedene
$\Delta\widetilde{F}^n$, ΔF^n, ΔF^n_{Zelle}, $\Delta\widetilde{F}^n_{Zelle}$	Änderung des Flusses in einer Zelle zum Zeitschritt n	verschiedene
I	Index der Gitterpunkte in Umfangsrichtung in Multall	–
J	Index der Gitterpunkte in meridionaler Richtung in Multall	–
K	Index der Gitterpunkte in radialer Richtung in Multall	–
l_τ	Wandeinheit	m
$\dot{m}$	Massenstrom	$\frac{kg}{s}$
n	Drehzahl	$\frac{1}{min}$
n	Zeitschritt	–
N	Anzahl der Blöcke in einem Superblock	–
p	Druck	Pa
p_t	Totaldruck	bar
Δp_t	Totaldruckdifferenz	bar
$q1$	Koordinatenrichtung im $q1$-$q2$-$q3$-Koordinatensystem	m
$q2$	Koordinatenrichtung im $q1$-$q2$-$q3$-Koordinatensystem	m
$q3$	Koordinatenrichtung im $q1$-$q2$-$q3$-Koordinatensystem	m
Q	Volumenstrom	$\frac{m^3}{h}$

r	Radius	m
r	radiale Koordinate im Zylinderkoordinatensystem in Multall	m
$r\vartheta_0$, $r\vartheta_u$	$r-\vartheta$-Koordinate der Schaufeloberseite, Schaufelunterseite	m
t	tangentiale Dicke	m
T	statische Temperatur	K
T_t	Totaltemperatur	K
T_{ref}	Referenztemperatur bei Polynomansatz für Variation der Wärmekapazität mit der Temperatur	K
Δt	Zeitschrittweite	s
U	Vektorfeld der Absolutgeschwindigkeit in .vts-Datei	$\frac{m}{s}$
$URel$	Vektorfeld der Relativgeschwindigkeit in .vts-Datei	$\frac{m}{s}$
vol, vol_{Zelle}	Volumen der Zelle	m^3
vol_{Block}	Volumen eines „superblocks“	m^3
V	Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
V_x	Geschwindigkeit in axialer Richtung	$\frac{m}{s}$
V_r	Geschwindigkeit in radialer Richtung	$\frac{m}{s}$
V_ϑ	Geschwindigkeit in Umfangsrichtung	$\frac{m}{s}$
$V_{m,in}$	Startlösung der meridionalen Geschwindigkeit am Eintritt	$\frac{m}{s}$
x	axiale Koordinate im Zylinderkoordinatensystem in Multall	m
x	dimensionslose Koordinate in Umfangsrichtung bei Benutzung des „TurboUnwrap“-Filters	$-$
y	Umfangswinkel in rad bei Benutzung des „TurboUnwrap“-Filters	rad
y	Wandabstand	m
y^+	Wandabstand y in Wandeinheiten l_τ	$-$
z	axiale Koordinate in CFturbo	m
z	dimensionslose Kanalhöhe bei Benutzung des „TurboUnwrap“-Filters	m
α'	Winkel zwischen der Umfangskomponente und der Meridionalkomponente der Geschwindigkeit	deg
γ	Winkel zwischen der Radialkomponente und der Axialkomponente der Geschwindigkeit	deg
κ	Isentropenexponent	$-$
η	dynamische Viskosität	$Pa\,s$
Π	Totaldruckverhältnis	$-$
ρ	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$
ϑ	Umfangskoordinate im Zylinderkoordinatensystem in Multall	rad

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CFL-Zahl	Courant-Friedrich-Lewis-Zahl
TCFD	TurbomaschineryCFD
SSS-Schema	„Simple-Super-Scree“-Schema

Variablennamen in Multall

Variablenname	Bedeutung
CONLIM	Konvergenzlimit
EAVG	durchschnittliche prozentuale Änderung der Meridionalgeschwindigkeit
ECONG	maximaler Unterschied des Massenstroms zwischen benachbarten Meridianquerschnittsflächen
EMAX	Maximalwert der prozentualen Änderung der Meridionalgeschwindigkeit
I, J, K	Indizes der Gitterpunkte in $q2$, $q3$, $q1$ Richtung
ID, JD, KD	Größe der Arrays in Multall in $q2$, $q3$, $q1$ Richtung
IM, KM, JM	Ausdehnung des Rechengebietes in $q2$, $q3$, $q1$ Richtung
IF_REPEAT	Wahl, ob die Maschine Repetierstufen besitzt
ILOS	Wahl des Turbulenzmodells
IN_FLOW	Wahl, ob Massenstrom durch Maschine vorgegeben wird
IN_PRESS	Wahl der Art der Druckrandbedingung am Eintritt
IN_VR	Wahl, wie Radialgeschwindigkeit am Eintritt festgelegt wird
IN_VTAN	Wahl, wie Tangentialgeschwindigkeit am Eintritt festgelegt wird
IPOUT	Wahl der Art der Randbedingung am Austritt
ISHIFT	Index des Verfahrens zur Anpassung des Gitters in meridionaler Richtung
ITIMST	Indes des gewählten Zeitschrittverfahren
JMIX	Index einer Mischungsebene in meridionaler Richtung
KTIPS, KTIPE	Indizes der Gitterpunkte in radialer Richtung, an denen der Spalt beginnt bzw. endet
NSTEP_MAX	maximale Anzahl an Iterationsschritten

1 Einleitung

Die Auslegung einer Turbomaschine beginnt mit der Definition von Randbedingungen. Beispielsweise können der zu fördernde Massenstrom $\dot{m}$, das Druckverhältnis Π, der mittlere Durchmesser D und die Nenndrehzahl n festgelegt werden. Anschließend wird mithilfe dieser Werte und weiterer zu treffender Annahmen (wie z. B. Wirkungsgrade) die Turbomaschine schrittweise konstruiert. Dafür sind in der Literatur diverse Methoden bekannt (z. B. Gitterauslegung nach Stanitz und Prian). Dabei kann der Ingenieur von Software wie CFturbo unterstützt werden. Die Strömung in der so konstruierten Turbomaschine wird anschließend mithilfe eines CFD-Programms berechnet. Mit den Ergebnissen kann überprüft werden, ob die Randbedingungen eingehalten werden. Weiterhin kann die Performance eingeschätzt und damit auch Schwachstellen in der Konstruktion wie beispielsweise ein zu geringer Wirkungsgrad erkannt werden. In den meisten Fällen ist daher eine Anpassung des Entwurfs notwendig. Anschließend erfolgt eine erneute CFD-Rechnung aus den gleichen Gründen. Dieser Prozess wiederholt sich solange bis eine zufriedenstellende Lösung gefunden wurde. Der Ablauf ist in Abbildung 1.1 verdeutlicht.

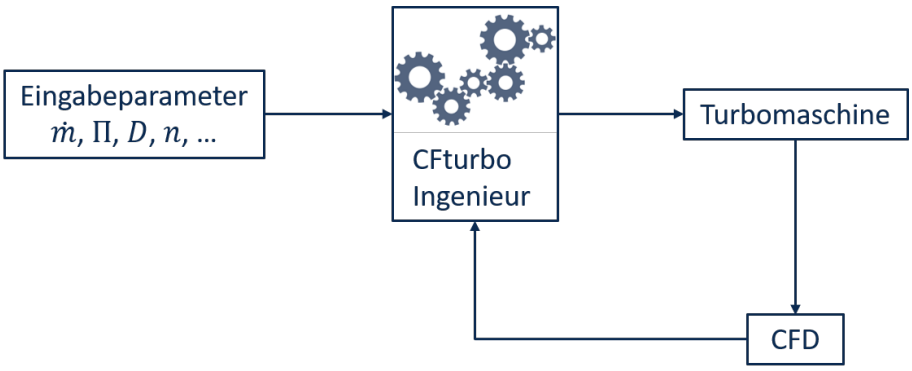


Abbildung 1.1: Ablaufplan bei der Konstruktion einer Turbomaschine

An das CFD-System werden verschiedene Anforderungen gestellt. So steht die Genauigkeit der Rechnungen im Vordergrund, da auf deren Ergebnissen die weitere Anpassung der Konstruktion erfolgt. Weiterhin sollte die Berechnung möglichst schnell erfolgen, damit viele Optimierungsschritte in geringer Zeit durchgeführt werden können. Dies kann oftmals dadurch erreicht werden, indem das Rechennetz gröber aufgelöst wird. Dies steht aber im Konflikt zur Genauigkeit, da für diese ein möglichst feines Netz zu wählen ist. Es gilt daher, einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit zu finden.

2 Motivation und Ziel

Die Firma CFturbo ist ein Unternehmen, das auf dem Gebiet der Turbomaschinen tätig ist. Die von dieser Firma stammende Software CFturbo unterstützt den Ingenieur beim Entwurf von hochwertigen Turbomaschinen. Das Programm ermöglicht die Konstruktion von axialen, diagonalen und radialen Laufrädern. Weiterhin können Statoren und Spiralgehäuse entworfen werden. Der Anspruch ist es, den Entwurfsprozess zu einem hohen Grad zu automatisieren, dem Anwender aber noch genügend Einflussmöglichkeiten zu geben.

Um einen ersten Eindruck der Qualität des Entwurfs zu erhalten, kann innerhalb des Programms eine potentialtheoretische Berechnung der Strömung durchgeführt werden. Weiterhin kann die Geometrie für verschiedene CFD-Programme wie PumpLinx und TurbomaschineryCFD (TCFD) aufbereitet werden. Anschließend kann in diesen eine Rechnung durchgeführt werden. Zur Zeit ist es allerdings noch nicht möglich, eine Strömungssimulation im Programm selbst durchzuführen.

Eine vielversprechende Möglichkeit wäre die Integration des Strömungslösers Multall, welcher als Open-Source-Software verfügbar ist. Zuvor muss allerdings untersucht werden, wie gut dieses Programm für die Strömungsberechnung in Turbomaschinen geeignet ist. Weiterhin soll analysiert werden, wie eine (möglichst automatisierte) Anbindung an CFturbo erfolgen kann. Daher ergeben sich für diese Arbeit folgende Schwerpunkte:

- Analyse des Systemaufbaus, technische Hintergründe und Anwendungsgrenzen
- Kompilierung des Fortran-Quellcodes für Windows
- Analyse und Dokumentation der notwendigen Eingabedateien für Geometrie, Vernetzungsparameter und Solverparameter
- Analyse des Vernetzers hinsichtlich Performance, Stabilität und Netzqualität
- Entwicklung einer einfachen Bedienoberfläche zum Erstellen der Eingabedatei für Multall
- Durchführung und Auswertung von Simulationen
- Einschätzung (bezüglich Robustheit des Systems, Rechenzeit und Lösungsqualität und Art und Umfang der Schnittstellenentwicklung für die Anbindung von Multall an CFturbo)

3 Analyse des Systemaufbaus und technische Hintergründe

3.1 Programmpaket Multall-open

Das Programmpaket „Multall-open“ wurde von Prof. John Denton während seiner Zeit am Whittle Laboratorium der Cambridge Universität geschrieben. Mittels der enthaltenen Programme kann eine Turbomaschine entworfen werden und anschließend die Strömung durch diese mit dem enthaltenen Strömungslösers berechnet werden. Das Programm wird vom Autor als Open-Source-Software zur Verfügung gestellt. Der Quellcode der einzelnen Programme kann von der Seite

https://sites.google.com/site/multallopen/home

heruntergeladen werden.

Das Paket besteht dabei aus den 3 Programmen Meangen, Stagen und Multall. Dabei dienen die ersten 2 zur Auslegung der Turbomaschine, mit dem dritten wird die Strömungssimulation durchgeführt. Mit diesen Programmen kann eine Turbomaschine vollständig ausgelegt und berechnet werden.

3.1.1 Meangen

Die Auslegung startet mit dem Programm Meangen. Dabei werden Randbedingungen wie Eintrittsdruck, Eintrittstemperatur und Drehzahl festgelegt. Weiterhin müssen Angaben über die kinematischen Verhältnisse gegeben werden. Aus diesen Daten werden die sogenannten „meanlines“ berechnet. Das Ergebnis wird in die Datei „stagen.dat“ geschrieben, welches als Eingabedatei für das Programm Stagen dient.

3.1.2 Stagen

Mit dem Programm Stagen wird nun die fertige Schaufelgeometrie generiert. Dafür wird die Ausgabedatei aus Meangen eingelesen. Dabei hat der Benutzer hier die Möglichkeit, auf die Profilerzeugung Einfluss zu nehmen (beispielsweise durch eine Verjüngung des Profils). Stagen erzeugt aus diesen Informationen eine Datei, welche anschließend von Multall gelesen werden kann.

3.1.3 Multall

Der eigentliche Strömungslöser ist Multall. Das Programm ist speziell darauf ausgelegt, die Strömung in Turbomaschinen zu berechnen. Die Berechnungen erfolgen dabei für ein Segment auf

einem strukturierten Gitter. Dabei wird das Strömungsfeld mit nur einem einzigen Gitter abgebildet, die Grenze zwischen 2 Schaufelreihen wird mit einer Mischungsebene gesondert behandelt. Der Lösungsalgorithmus basiert auf einer Finiten-Volumen-Methode.

Aus den Ergebnissen der Strömungssimulation kann anschließend in Stagen eine Verbesserung der Konstruktion vorgenommen werden und anschließend erneut berechnet werden. Zudem kann in begrenzten Umfang durch Multall selbst eine Neugestaltung der Schaufel erfolgen.

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit konzentrierten sich hauptsächlich auf die Fähigkeiten von Multall. Das Erzeugen der Schaufel wird dabei von CFturbo übernommen. Im folgenden Abschnitt wird daher Multall detaillierter vorgestellt.

3.2 Multall

Multall ist ein Programm zum Lösen der 3D-Navier-Stokes Gleichungen. Dieses ist insbesondere für mehrstufige Turbomaschinen entworfen worden. In [3] sind unter Anderem für Multall folgende Funktionalitäten gelistet:

- Berechnung mehrstufiger Turbomaschinen
- Unterstützung von Axial-/Diagonal-/Radialrädern
- 3 Turbulenzmodelle
- Mischungsebene zwischen benachbarten Schaufelreihen
- Q3D-Berechnungen, Throughflow-Berechnungen
- Effekte durch raue Oberfläche
- Berechnung von Leckage- und Kühlluftströmen
- spezielle Verfahren für Strömungen mit geringen Mach-Zahlen und inkompressible Strömungen
- Spaltmodellierung zwischen Schaufel und Gehäuse/Nabe
- Berechnung von Repetierstufen

Das Programm ist in Fortran77 geschrieben und kann somit auf jedem Computer mit einem passenden Compiler laufen.

3.2.1 Rechennetz

Für die Berechnungen wird ein strukturiertes Gitter verwendet. Die Koordinaten der Zellecken werden im Zylinderkoordinatensystem $x-r-\vartheta$ gespeichert. Dabei erstreckt sich die x-Koordinate in axialer Richtung. Die ϑ-Koordinate dreht dabei entgegen dem Uhrzeigersinn, falls in die gleiche Richtung wie die positive x-Koordinate geschaut wird. Für die Indizierung werden die Indizes I, J und K verwendet. Diese können jeweils den Koordinatenrichtungen des $q1$-$q2$-$q3$-Koordinatensystems zugeordnet werden. Dabei verläuft der Index I entlang der Umfangslinie und entspricht der Koordinate $q2$ [7]. Der Index J verläuft entlang der Meridianstromlinie und entspricht damit der Koordinate $q3$ [7]. Der Index K verläuft folglich orthogonal zur Meridianstromlinie und Umfangslinie und entspricht damit der Koordinate $q1$ [7]. Die Richtung der einzelnen Indizes kann Abbildung 3.1 entnommen werden. Falls im Folgenden von radialer Richtung gesprochen wird, so ist damit die $q1$-Richtung gemeint. Falls von Umfangsrichtung gesprochen wird, ist dabei die $q2$-Richtung gemeint.

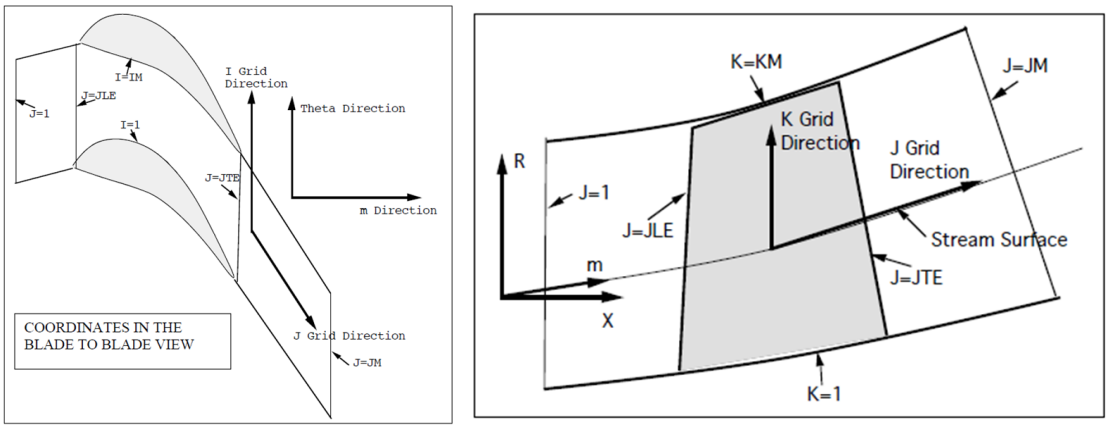


Abbildung 3.1: Richtungen der Indizes ([2])

Die Berechnung erfolgt segmentweise mit periodischen Randbedingungen. Dabei wird das Rechengebiet zwischen zwei benachbarten Schaufeln aufgespannt. Die Schaufeloberseiten liegen daher an den Rändern des Rechengitters. Für die gesamte Maschine wird nur ein Rechengitter verwendet, folglich ist die Anzahl der Gitterpunkte in $q1$- und $q2$-Richtung bei allen Schaufelreihen gleich. Zwischen den einzelnen Schaufelreihen erfolgt der Informationsaustausch mittels Mischungsebenen.

Die Verwendung eines strukturierten Gitters hat bei einem Finite-Volumen-Verfahren den Vorteil, dass die Nachbarzellen sehr einfach bestimmt werden können. Dies erleichtert die Kalkulation der Flüsse über die einzelnen Zellen. Der Fluss über Zellen, die die Schaufeloberfläche darstellen, zu 0 gesetzt werden. Diese Zellen können in einem strukturierten Gitter ebenfalls einfach ermittelt werden, da nur die Indizes der Schaufelvorder- und hinterkanten bekannt sein müssen. Ein weiterer Vorteil ist, dass die periodischen Randbedingungen einfach umgesetzt werden können. Hierfür muss nur der Index in Umfangsrichtung geändert werden, um die entsprechende Nachbarzelle am anderen Rand zu erhalten. Nachteilig ist allerdings, dass die Zellen teilweise große Streckungen aufweisen können. Dies kann sich nachteilig auf die Genauigkeit auswirken. Allerdings kann dieser Fehler mit einer genügend großen Anzahl an Gitterpunkten reduziert werden [2]. Aus der Kombination aus segmentweiser Rechnung und der Verwendung des strukturierten Gitters ergibt sich zudem der Hauptnachteil, dass nur der Hauptströmungspfad gerechnet werden kann. Komponenten wie Volute oder Rotoren mit Splitter-Blades können mit Multall folglich nicht gerechnet werden.

3.2.2 Lösungsverfahren

Zur Lösung der 3D-Navier-Stokes Gleichungen wird ein Finite-Volumen-Verfahren verwendet. Dabei werden die Zustandsgrößen jeweils an den Ecken der Zellen gespeichert. Bei der Bildung der Flüsse über die Oberfläche werden diese vorher gemittelt. Diese Flüsse werden gebildet für

- den Massenstrom ($\rho V A$),
- den Impulsstrom ($pA + \rho V^2 A$)
- und den Energiestrom ($\rho\, V\, E\, A$).

Der Fluss des Massenstroms dient zur Berechnung der Dichte ρ. Die Geschwindigkeitskomponenten (ρV_x, ρV_r, $\rho r V_\vartheta$) werden mit Hilfe des Impulsstroms berechnet. Der Fluss der Energie dient zur Berechnung der Totalenthalpie ρE, aus welcher wiederum die Totaltemperatur T_t berechnet wird.

Diese Flüsse werden für jede einzelne Zelloberfläche gebildet. Um den Fluss über eine Zelle zu ermitteln, werden die Flüsse der dazugehörigen Oberflächen summiert. Die Änderung $\Delta\widetilde{F}^n$ der

Flussvariable F (mit $F = \rho$, ρV_x, ρV_r, $\rho r V_\vartheta$ oder ρE) im Zeitschritt n ergibt sich somit mittels ([3])

$$\Delta \widetilde{F}^n = \frac{\Delta t}{vol} \sum_i f_i \tag{3.1}$$

wobei Δt die Zeitschrittweite, vol das Zellvolumen und f_i der Fluss über eine Zelloberfläche ist. Aus Stabilitätsgründen wird diese Änderung nicht sofort zur Variable F addiert. Stattdessen wird das sogenannte „scree"-Schema verwendet, wo zusätzlich die Änderung aus dem vorherigen Zeitschritt $n-1$ beachtet wird ([3]):

$$\Delta F^n = 2\,\Delta \widetilde{F}^n - \Delta \widetilde{F}^{n-1} \tag{3.2}$$

Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass nur eine Auswertung pro Zeitschritt erfolgen muss und nur die Flüsse aus dem letzten Zeitschritt gespeichert werden müssen. Dieses Verfahren ist stabil bis zu einer Courant-Friedrich-Lewis-Zahl (CFL-Zahl) von 0.5 ([3]), wobei empfohlen wird, eine etwas kleinere CFL-Zahl zu wählen (z. B. 0.4)

Um den Informationstransport zu beschleunigen, wird das Prinzip des Multigrids verwendet. Dabei werden die Flüsse nicht nur über die einzelnen Zellen gebildet sondert auch über Blöcke der Größe 3x3x3 und 9x9x9 (Standartgrößen, diese können angepasst werden). Auf der gröbsten Ebene des Multigrids werden sogenannte „superblocks" gebildet. Dabei wird eine Schaufelreihe in 4 Blöcke unterteilt, welche sich über die gesamte Umfangsrichtung und radiale Richtung erstrecken. Über diese wird ebenfalls der numerische Fluss gebildet. Die Struktur der einzelnen Superblocks ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Der Fluss über einen Superblock kann durch Summation der Flüsse über die enthaltenen Blöcke berechnet werden:

$$\Delta \widetilde{F}^n_{Block} = \sum_j \sum_i f_{j,i} \tag{3.3}$$

Dabei ist $f_{j,i}$ der Fluss im Block j über die Zelloberfläche i. Die Flüsse über die inneren Zelloberflächen eliminieren sich gegenseitig und es bleibt der Fluss über die Oberfläche des Blocks übrig. Diese Änderung wird anschließend auf alle enthaltenen Zellen verteilt, womit sich für die Änderung der Flussvariable in einer Zelle ergibt:

$$\Delta \widetilde{F}^n_{Zelle} = \frac{\Delta t}{vol_{Zelle}} \sum_i f_i + \frac{N\,\Delta t}{vol_{Block}} \sum_j \sum_i f_{i,j} \tag{3.4}$$

Dabei ist N die Anzahl der Zellen in deinem betrachteten Superblock. Anschließend wird gemäß Gleichung (3.2) das „scree"-Schema angewendet um ΔF zu berechnen. Da die Werte auf den Ecken der Zellen gespeichert werden, muss die Änderung der Flussvariable ΔF auf die 8 Zellecken verteilt werden und anschließend zur Variable hinzugefügt werden:

$$\Delta F^n_{Ecke} = \frac{1}{8} \sum_i \Delta F^n_{Zelle,i} \tag{3.5}$$

$$F^{n+1}_{Ecke} = F^n_{Ecke} + \Delta F^n_{Ecke} \tag{3.6}$$

Dabei ist $\Delta F_{Zelle,i}$ die Änderung der Flussvariable einer der 8 angrenzenden Zellen einer Ecke im Gitter.

3.2.3 Reibungsmodellierung

Die laminaren Viskosität wird entweder direkt über die Eingabe der dynamischen Viskosität oder durch Eingabe der Reynolds-Zahl der ersten Schaufelreihe definiert. Dabei wird zunächst in den Berechnungen von einer konstanten dynamischen Viskosität ausgegangen. Es ist allerdings

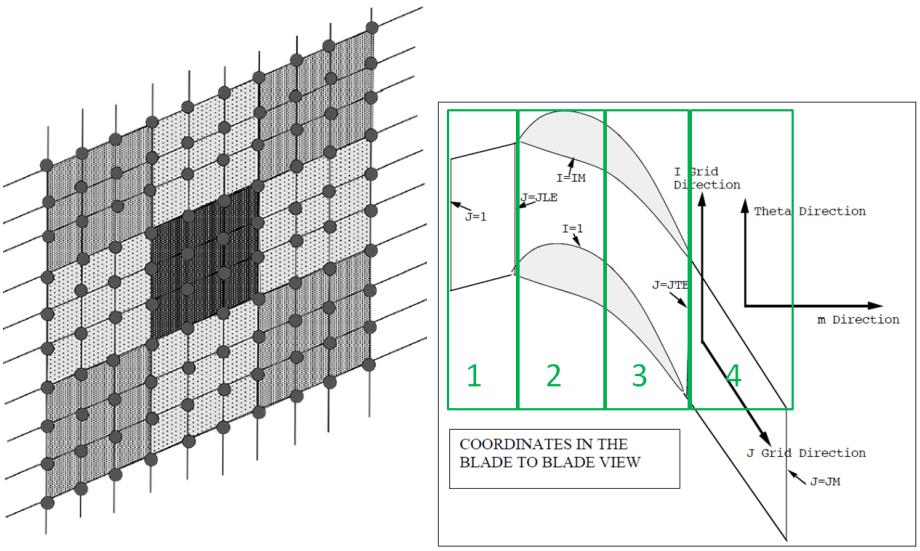


Abbildung 3.2: Multigrid in Multall, 3x3x3 und 9x9x9 Blöcke (links) und die „superblocks“ (rechts) ([2])

möglich, diese in Abhängigkeit der Temperatur berechnen zu lassen. Dies ist für Turbomaschinen nützlich, in welcher sich die Temperatur stark ändert.

Die Bestimmung der Wandschubspannungen erfolgt mittels Wandfunktionen unter Anwendung des log-Gesetzes. Dafür wird angenommen, dass der erste Gitterpunkt in der Pufferschicht ($5 < y^+ < 30$, [4]), oder in der logarithmischen Schicht ($y^+ > 30$, [4]) liegt. Dabei ist y^+ der Wandabstand y in Wandeinheiten l_τ: $y^+ = \frac{y}{l_\tau}$. Anschließend wird durch eine Anpassung des logarithmischen Wandgesetzes die Wandschubspannung bestimmt.

Die turbulente Viskosität kann in Multall auf 2 verschiedene Weisen modelliert werden. Die Standartvariante ist eine Modellierung mittels eines Mischungswegmodells. In diesem wird davon ausgegangen, dass sich der Mischungsweg linear von der Wand bis zu einem einzugebenden Limit verändert. Dieses 0-Gleichungsmodell ist seit Beginn der Entwicklung in Multall vorhanden und wurde dementsprechend über die Jahre immer weiter verbessert ([2]). Eine alternative Methode stellt das Spalart-Almaras-Turbulenzmodell dar. In diesem wird zusätzlich eine Konvektionsgleichung für die turbulente Viskosität gelöst, wodurch mehr Rechenzeit benötigt wird. Der Autor des Programms empfiehlt daher die Verwendung des Mischungswegmodells ([1]).

Weiterhin erlaubt Multall eine reibungsfreie Berechnung der Strömung.

3.2.4 Konvergenzkriterien

Nach jedem Zeitschritt werden 3 Fehler ausgewertet:

- EMAX: Maximalwert der prozentualen Änderung der Meridionalgeschwindigkeit an einem Gitterpunkt zwischen den Iterationsschritten
- EAVG: Durchschnittliche prozentuale Änderung der Meridionalgeschwindigkeit an den Gitterpunkten zwischen den Iterationsschritten
- ECONT: Unterschied des Massenstroms zwischen benachbarten Meridianquerschnittsflächen ($J = const.$)

In der Eingabedatei müssen dabei die maximale Anzahl an Iterationsschritten (NSTEP_MAX) und das Konvergenzlimit (CONLIM) eingegeben werden. Laut [2] soll die Iterationsschrittanzahl im Bereich 2000 bis 5000 liegen. Für das Konvergenzlevel soll ein Wert von 0.005 gewählt werden. Damit das Programm konvergiert, müssen 2 Bedingungen erfüllt werden:

1. Die durchschnittliche Änderung der Meridionalgeschwindigkeit muss kleiner sein als das Konvergenzlimit oder der Maximalwert muss kleiner sein als das vierfache des Konvergenzlimits (EAVG $<$ CONLIM oder |EMAX| $<$ 4 CONLIM)

2. Der Unterschied der Massenströme zwischen benachbarten Meridianquerschnittsflächen darf maximal 1% betragen (ECONT $<$ 1%)

Die erste Bedingung stellt sicher, dass die Rechnung tatsächlich konvergiert ist. Durch die zweite Bedingung wird die Kontinuität des Massenstroms sichergestellt. Beide Bedingungen müssen gleichzeitig erfüllt werden bevor Konvergenz erreicht wird.

3.2.5 Spaltmodellierung

Multall bietet die Möglichkeit, den Einfluss des Spalts zwischen Laufschaufel und Gehäuse oder zwischen Leitschaufel und Nabe zu beachten. Dazu muss zunächst die Schaufelgeometrie so eingegeben werden, als wäre kein Spalt vorhanden. Anschließend wird die Spaltgröße an der Vorderkante und an der Hinterkante eingegeben, dazwischen findet eine lineare Interpolation der Spaltdicke statt. Weiterhin muss angegeben werden, wie viele Gitterpunkte in radialer Richtung für die Modellierung des Spaltes benötigt werden. Aus diesen Daten erzeugt Multall automatisch das Gitter und die eingegebene Schaufelgeometrie wird um das Spaltmaß in radialer Richtung verkleinert. Damit kann die Auswirkung des Spalts berechnet werden.

3.2.6 Generierung des CUSP

Wird eine dicke Hinterkante mit einem feinen Netz aufgelöst, kann es dazu kommen, dass bei der Rechnung die Strömung der Druckseite der Hinterkante bis auf die Saugseite folgt und erst dort die Separation stattfindet ([3]). Dies führt zu negativen Belastungen der Schaufelhinterkante, was so in der Realität nicht beobachtet werden kann ([3]). Um dieses numerische Problem zu verhindern, gibt es in Multall die Möglichkeit, die Strömung der Saug- und Druckseite künstlich zu separieren. Dies geschieht durch die Generierung eines sogenannte CUSP (siehe Abbildung 3.3). Dieses erzeugt eine künstliche Blockage, überträgt aber keine Kräfte. Dadurch können realistischere Darstellungen der Strömung erreicht werden ([3]).

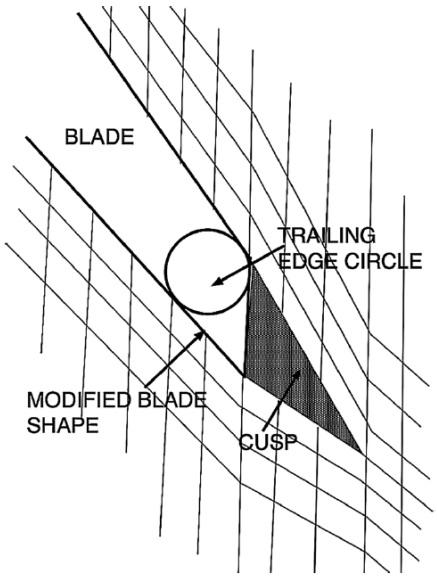


Abbildung 3.3: Erzeugung eines CUSP an einer dicken Hinterkante ([3])

3.2.7 Mischungsebene

Multall berechnet die Strömung auf einem Segment. Da benachbarte Schaufelreihen oftmals eine unterschiedliche Anzahl an Schaufeln haben, ist die geometrische Ausdehnung des Rechengebietes in Umfangsrichtung für jede Schaufelreihe unterschiedlich. Bei benachbarten Schaufelreihen rotiert eine (Laufschaufel), die andere steht still (Leitschaufel). Deshalb muss der Informationsaustausch zwischen den Ebenen besonders behandelt werden. Dies geschieht an den Mischungsebenen.

Die Mischungsebenen werden vom Programm automatisch erstellt. Die letzte Meridianquerschnittsfläche der stromauf liegenden Schaufelreihe (JMIX) hat die gleiche meridionale Position wie die Meridianquerschnittsfläche der stromab liegenden Schaufelreihe einer Mischungsebene (JMIX+1). An der Mischungsebene findet eine Mittelung des Flusses statt, sodass dieser in Umfangsrichtung gleichmäßig ist. Eine ausführliche Beschreibung ist in [1] zu finden. Abbildung 3.4 zeigt schematisch das Gitter an einer Mischungsebene.

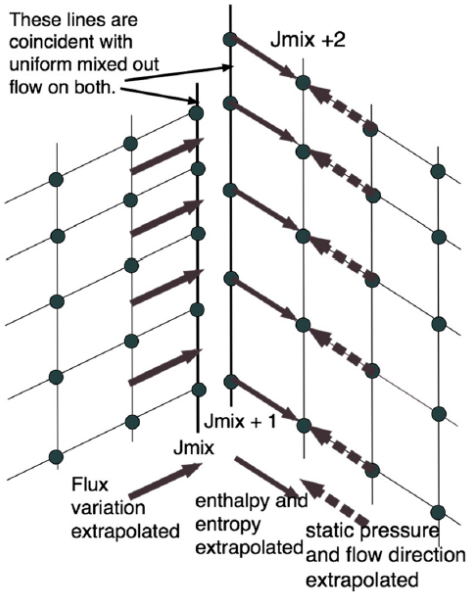


Abbildung 3.4: Mischungsebene in Multall ([3])

4 Kompilierung des Fortran-Quellcodes unter Windows

Das langfristige Ziel ist eine automatische Anbindung von Multall an CFturbo, welches für Windows ausgelegt ist. Daher ist es notwendig, Multall für Windows zu kompilieren. Ein geeigneter Fortran Compiler (gfortran) wird durch das Projekt MinGW zur Verfügung gestellt, welches die Compiler der GNU Compiler Collection (GCC) auf Windows portiert hat. Das gleichnamige Programm kann unter

http://www.mingw.org/

heruntergeladen werden.

Um Multall auf Windows zu kompilieren, muss eine kleine Anpassung vorgenommen werden. Um Rechenzeit zu sparen, werden fast alle Arrays, die im Verlauf des Programmablaufes benötigt werden, bereits zum Programmstart im Speicher reserviert. Die Größe dieser Arrays muss bereits zum Zeitpunkt des Kompilierens bekannt sein. Diese werden zunächst möglichst groß gewählt, damit wiele Geometrien geladen und damit auch viele Modelle gerechnet werden können. Tatsächlich benötigt wird oftmals nur ein Teil dieser Felder, was in Abbildung 4.1 angedeutet ist.

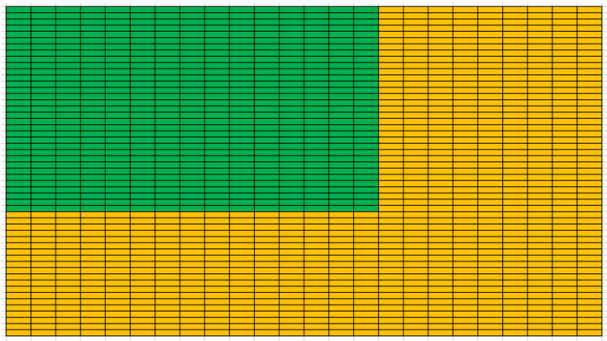


Abbildung 4.1: Arrays in Multall, gelb stellt das tatsächlich im Speicher allokierte Array dar, grün stellt die Zellen dar, die während der Rechnung benötigt werden.

In der ursprünglichen Version von Multall sind die Größen der Arrays so gewählt, dass diese mehr als 2 GB Arbeitsspeicher benötigen. Um ein solches Programm zu erzeugen, muss die Compileroption „`mcmodel=medium`“ oder „`mcmodel=large`“ verwendet werden. Diese Option ist in der Windows-Version des Fortran Compilers nicht vorhanden ([5]). Deshalb müssen die Arraygrößen reduziert werden. Dies erfolgt in der Datei „commall-open-17.5.f“. In dieser werden alle globalen

Variablen definiert. Die Größen der Arrays werden durch die Variablen ID, JD und KD definiert. Eine mögliche Wahl wäre ID=50, JD=1300 und KD=50. Werden diese Werte geändert, lässt sich das Programm auch unter Windows erstellen.

Die ausführbare Datei kann nun mit dem Befehl „`gfortran multall-17.5.f -o multall.exe`“ erzeugt werden. Dabei ist „multall-17.5.f“ die Datei, welche den Quellcode enthält und „multall.exe“ der Name der ausführbaren Datei, die erzeugt wird. Beide Namen müssen an die tatsächlichen Dateinamen angepasst werden. Nachdem das Programm erfolgreich kompiliert wurde, lässt sich dieses mittels „`multall.exe < input.txt`“ starten. Dabei ist „input.txt“ der Name der Eingabedatei, die eingelesen wird. Dieser Name muss ebenfalls angepasst werden. Dabei muss beachtet werden, dass sich in dem Ordner, in dem Multall ausgeführt wird, eine Datei namens „intype“ befindet. Als Inhalt darf nur das Zeichen „n“ enthalten sein. Ursache dafür ist, dass vor kurzem die Struktur der Eingabedatei verändert wurde. Diese Datei dient dazu, um zwischen den verschiedenen Strukturen zu wählen und eine Abwärtskompatibilität zu ermöglichen. Es wird empfohlen, die Eingabedateien in der neuen Struktur zu verfassen, diese wird eben mit dem Zeichen „n“ ausgewählt.

Ist die Eingabedatei richtig konfiguriert, startet die Rechnung automatisch. Der Fortschritt der Rechnung kann im Fenster der Kommandozeile betrachtet werden (Abbildung 4.2). Dabei läuft das Programm solange, bis entweder das Konvergenzkriterium oder die maximale Anzahl an Zeitschritten erreicht wurde. Anschließend wird das Ergebnis der Rechnung in die Datei „flow_out“ geschrieben. Um das Programm vorzeitig zu Beenden, kann die Datei „stopit“ bearbeitet werden. Diese Datei wird automatisch bei Programmstart erzeugt und während der Berechnung regelmäßig von Multall gelesen. Üblicherweise steht in dieser eine „0“, sodass die Berechnungen weiterlaufen. Wird dieser Wert auf „1“ geändert, so wird die Berechnung beendet und das aktuelle Ergebnis in die Datei „flow_out“ geschrieben. Mit dieser Datei findet anschließend eine Auswertung der Berechnung statt.

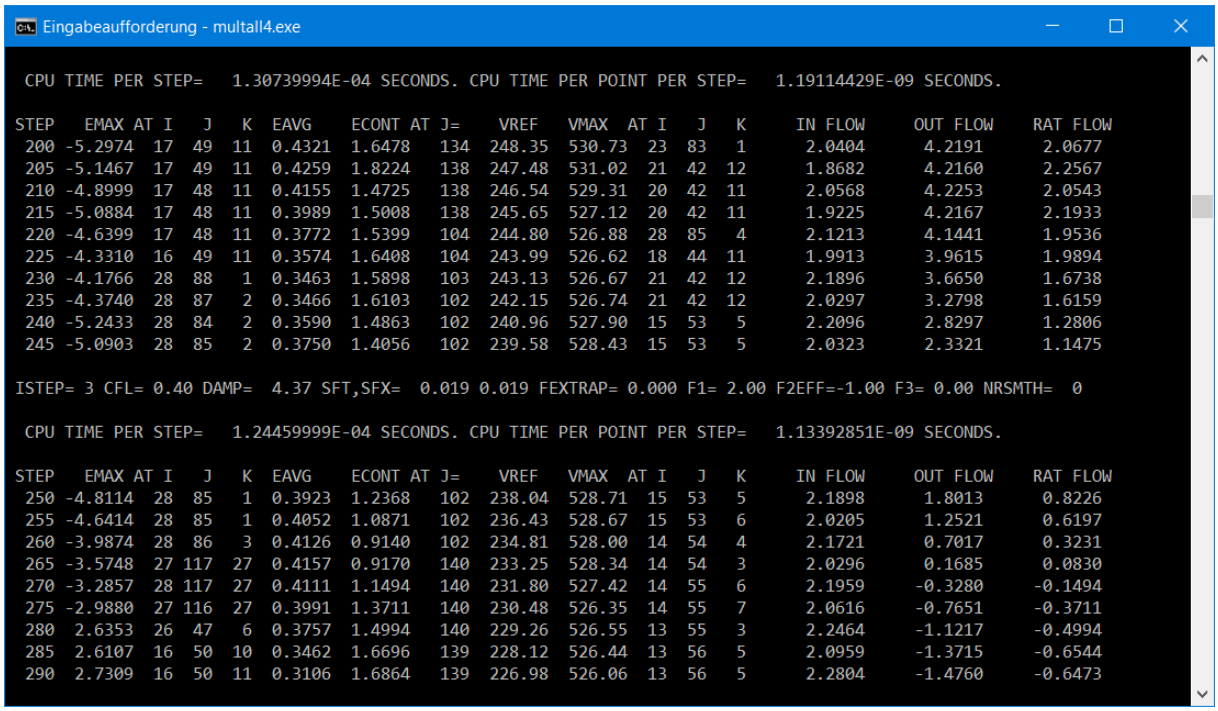


Abbildung 4.2: Ausgaben von Multall in der Kommandozeile

5 Analyse der Eingabedatei

Alle Eingabewerte für Multall werden in einer einzigen Datei übergeben. Diese ist an das Lochkartensystem angelehnt. Die Datei ist in einzelne sogenannte „Cards“ unterteilt. Jede Card besteht üblicherweise aus 2 Zeilen. Die erste Zeile ist eine kurze Beschreibung der Eingabe. In dieser Zeile kann jeder beliebige Text eingegeben werden, der Inhalt wird von Multall ignoriert und dient zur Übersichtlichkeit für den Benutzer. Die zweite Zeile enthält die eigentlichen Werte, die eingegeben werden. Ein Auszug aus solch einer Datei kann in Abbildung 5.1 gesehen werden.

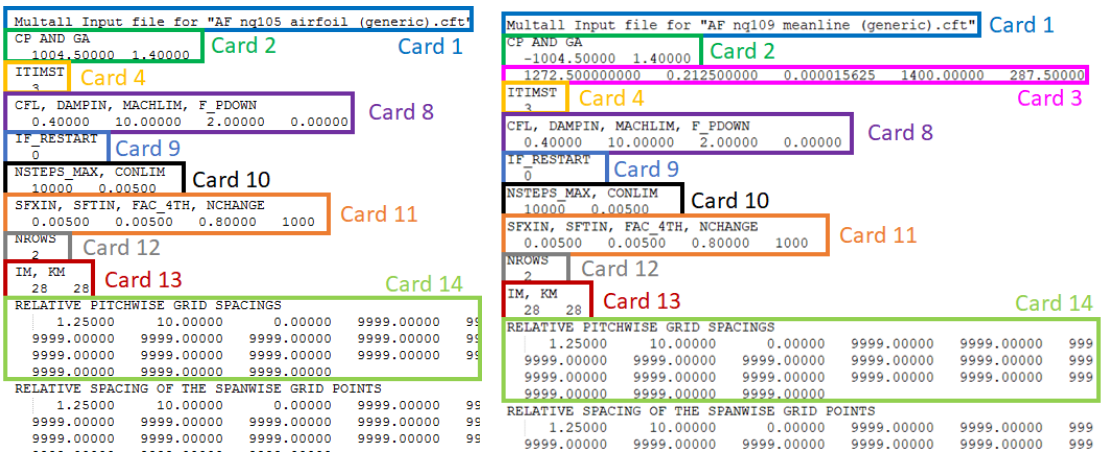


Abbildung 5.1: Auszug aus einer Eingabedatei für Multall ohne Card 3 (links) und mit Card 3 (rechts)

Beispielsweise wird in Card 2 die Wärmekapazität C_p und der Isentropenexponent κ eingegeben. Wie im Beispiel erkennbar müssen nicht immer alle Cards vorhanden sein. Für $C_p = const.$ entfällt die Eingabe von Card 3. Falls C_p nicht konstant sein soll, so müssen in Card 3 die Koeffizienten und Referenztemperatur für den Polynomansatz $C_p(T) = C_{p,1} + C_{p,2}\,(T - T_{ref}) + C_{p,3}\,(T - T_{ref})^2$ und die Gaskonstante eingegeben werden. Eine Besonderheit ist zudem, dass diese Card nur aus einer Zeile besteht und somit keine Zeile zur Beschreibung hat. Ein Auszug einer solchen Eingabedatei mit Card 3 ist ebenfalls in Abbildung 5.1 zu sehen.

Weiterhin gibt es Cards mit variabler Größe wie beispielsweise Card 14. In dieser werden beispielsweise die relativen Abstände der Gitterpunkte in $q2$-Richtung definiert. Die Größe solcher Cards ist oftmals abhängig von der Anzahl der Gitterpunkte. Durch die Verwendung von Fortran77 dürfen in einer Zeile maximal 72 Zeichen stehen. Deshalb werden die Werte bei solchen Cards in mehreren Zeilen eingegeben, üblicherweise beinhaltet eine Zeile 8 Werte.

Bei der Erstellung der Eingabedatei muss beachtet werden, dass die Cards in der richtigen Reihenfolge gelistet sind, da dies beim Einlesen der Datei in Multall vorausgesetzt wird. Weiterhin

dürfen nur die Cards vorhanden sein, die tatsächlich benötigt werden. So ist Card 3 genau dann einzugeben, wenn für die Wärmekapazität in Card 2 ein negativer Wert eingegeben wurde. Ansonsten darf Card 3 nicht eingegeben werden, da sonst die Einleseroutine fehlschlägt und die Rechnung nicht gestartet werden kann.

Die vollständige Spezifikation der Eingabedatei kann der Datei „new-readin-input-data.pdf“ ([1]) entnommen werden, welche mit dem Programm mitgeliefert wird. Im Folgenden wird nur auf die wesentlichsten Eingaben für die Geometrie, die Vernetzungsparameter, die Solverparameter und den Randbedingungen eingegangen.

5.1 Eingabe der Geometrie

Die Eingabe der Geometrie erfolgt für jede Schaufelreihe einzeln. In jeder Schaufelreihe wird die Geometrie nur für eine Schaufel eingegeben. Durch die Eingabe der Schaufelzahl in Card 41 kann dann die Ausdehnung des Rechengitters in Umfangsrichtung berechnet werden. In Card 42 wird die Anzahl der Gitterpunkte für diese Schaufelreihe in meridionaler Richtung eingegeben. Dabei ist zu beachten, dass für jede Schaufelreihe neben den Angaben für das Schaufelprofil jeweils eine Angabe für das Strömungsgebiet vor und hinter der Schaufel erfolgen muss. Somit muss in Card 42 ebenfalls eingegeben werden, an welchen Gitterpunkten die Schaufelvorderkante und Schaufelhinterkante liegen. Die Position wird dabei relativ zum Beginn der jeweiligen Schaufelreihe angegeben. Die Angabe der Drehzahl erfolgt in Card 49, dabei muss die Anzahl der Umdrehungen pro Minute eingegeben werden. Für einen Stator ist folglich der Wert 0 einzugeben. Eine positive Drehzahl bedeutet, dass sich das Laufrad in positiver ϑ-Richtung dreht. Dabei ist es wichtig zu beachten, dass in Multall die ϑ-Koordinate entgegengesetzt zur ϑ-Koordiante in CFturbo orientiert ist. In Card 49 kann zudem angegeben werden, zwischen welchen Gitterpunkten die Kontur der Nabe und des Gehäuses rotiert. In der Regel kann hier der Bereich der Schaufel oder der Schaufelreihe genommen werden. In Card 50 werden zudem Startwerte für die statischen Drücke an Schaufelvorderkante und Schaufelhinterkante angegeben. Diese sollten möglichst genau eingegeben werden, damit die Konvergenz schneller erreicht wird.

Die Schaufelgeometrie wird für jede Schaufelreihe an wenigen Schnitten eingegeben (üblicherweise 3 für nahezu zylindrische Schaufeln, 5 für verwundene Schaufeln). Dazwischen findet eine nichtlineare Interpolation statt. Die Eingabe erfolgt dabei im Bereich vor der Schaufelvorderkante, im Bereich der Schaufel selbst als auch im Bereich der Schaufelhinterkante. Hierfür wird im jedem Schnitt die Schaufeloberseite in meridionaler Richtung abgefahren. Dafür müssen die axialen Koordinaten (Card 59) und die dazugehörigen Radien (Card 65) und $r - \vartheta$-Werte (Card 61) angegeben werden. Die Konstruktion der Schaufelunterseite erfolgt durch die Angabe der tangentialen Schaufeldicke in Card 63. Dabei muss im Bereich vor der Schaufelvorderkante und im Bereich nach der Schaufelhinterkante sowie jeweils am Gitterpunkt der Schaufelvorder- und Hinterkante der Wert 0 eingegeben werden. In den Cards 58, 60, 62 und 64 gibt es zudem die Möglichkeit, eine Skalierung und Verschiebung der Werte vorzunehmen. Dies ist besonders dann nützlich, wenn die Eingaben in Millimetern sind und so in Meter umgewandelt werden. Diese Eingaben müssen für jeden Schaufelschnitt durchgeführt werden. Die Eingabe der Profilgeometrie ist in Abbildung 5.2 verdeutlicht.

Die Gitterpunkte in meridionaler Richtung werden dann aus den Eingabepunkten erstellt. Dabei sollten im Bereich der Schaufelvorderkante mehr Punkte eingegeben werden, da sich dort die Strömungsverhältnisse stark ändern und somit die Geometrie so genau wie möglich eingegeben werden muss. Es gibt allerdings auch die Möglichkeit, sowohl die Anzahl der Gitterpunkte als auch die Gitterabstände in meridionaler Richtung neu erzeugen zu lassen. Diese Option wird in Card 47 aktiviert. In Card NG_2 muss nun die neue Anzahl der Gitterpunkte für den Bereich vor der Schaufel, im Bereich der Schaufel und nach der Schaufel eingegeben. In Card NG_5 (vor der Schaufel), NG_8 (Schaufel) und NG_11 (hinter der Schaufel) werden nun die gewünschten relativen Gitterabstände eingegeben. Diese Option sollte vor allem bei radialen und diagonalen

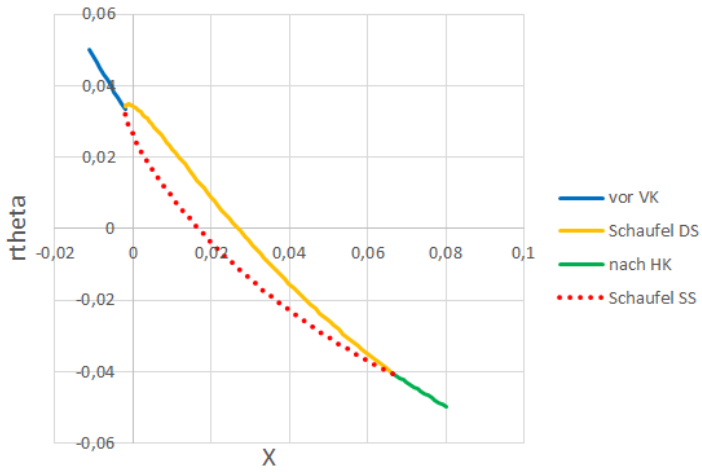


Abbildung 5.2: Eingabe der Geometrie in Multall. Dabei müssen die Koordinaten der durchgezogenen Linien eingegeben werden, die (gepunktete) Saugseite ergibt sich aus der Eingabe der tangentialen Dicke.

Laufrädern genutzt werden (siehe Kapitel 6). Weiterhin ist es so möglich, in den Cards 59 bis 65 die Eingabe mit sehr vielen Gitterpunkten zu tätigen, die Berechnung allerdings auf weniger Gitterpunkten laufen zu lassen.

Weiterhin ist es möglich, den Spalt zwischen Laufschaufel und Gehäuse bzw. zwischen Leitschaufel und Nabe eingeben zu lassen. Mit KTIPS und KTIPE werden in Card 43 die Gitterpunkte in radialer Richtung angegeben, an denen der Spalt beginnt bzw. endet. Für einen Spalt an der Nabe ist KTIPS=1 zu setzen, für einen Spalt am Gehäuse ist KTIPE=KM (=Anzahl der Gitterpunkte in radialer Richtung) zu setzen. Üblicherweise werden 4 Gitterpunkte verwendet um den Spalt zu modellieren. Falls kein Spalt betrachtet werden soll, müssen beide Werte auf 0 gesetzt werden. In Card 44 werden anschließend die Spalthöhen an der Vorderkante und Hinterkante angegeben. Diese werden dabei als Anteil der meridionalen Schaufellänge gegeben, dazwischen findet eine lineare Interpolation statt. Abschließend muss der Verlauf der Schaufeldicke in radialer Richtung in Card 45 eingegeben werden. Dafür wird für jeden Gitterpunkt in radialer Richtung ein Faktor angegeben, mit der die berechnete tangentiale Dicke multipliziert wird. Für Gitterpunkte im Bereich der Schaufel sollte der Wert 1.0 eingegeben werden, für den letzen Gitterpunkt auf der Schaufel und für Gitterpunkte im Spalt der Wert 0.0. Hier gibt es die Möglichkeit, eine Abrundung der Schaufelkante am Spalt zu erreichen.

Eine Beispieleingabe der Geometrie kann den Abbildungen 5.3 bis 5.6 entnommen werden.

5.2 Eingabe der Vernetzungsparameter

Da in Multall ein strukturiertes Gitter verwendet wird, muss die Anzahl der Gitterpunkte in allen 3 Dimensionen angegeben werden. Die Anzahl der Gitterpunkte in $q2$-Richtung (IM) und $q1$-Richtung (KM) werden in Card 13 eingegeben. Für eine reibungsfreie Rechnung wäre IM=KM=28 eine typische Wahl ([2]). In den mitgelieferten Beispielen wurde für eine reibungsbehaftete Rechnung IM=KM=37 gewählt. Diese Anzahl ist für alle Schaufelreihen gleich. Der Abstand dieser Gitterpunkte wird in den Cards 14 ($q2$-Richtung) und 15 ($q1$-Richtung) festgelegt. Dies kann auf 2 Arten erfolgen. Die erste Möglichkeit besteht in der direkten Eingabe der relativen Abstände der Gitterpunkte. Aus der Teilung bzw. Kanalhöhe werden anschließend die absoluten Abstände bestimmt. Die zweite Möglichkeit wäre eine automatische Berechnung der Gitterpunktabstände. Dafür muss der dritte Wert der entsprechenden Card auf 0 gesetzt werden.

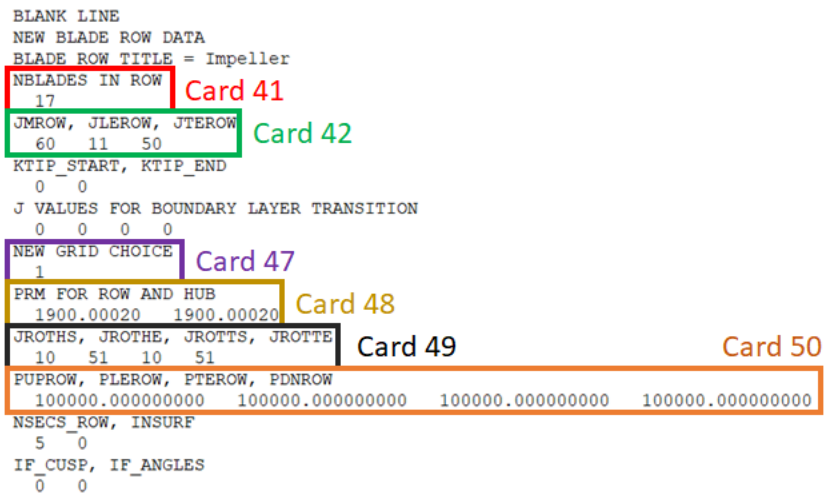


Abbildung 5.3: Beispiel Eingabe der Geometrie - allgemeine Angaben

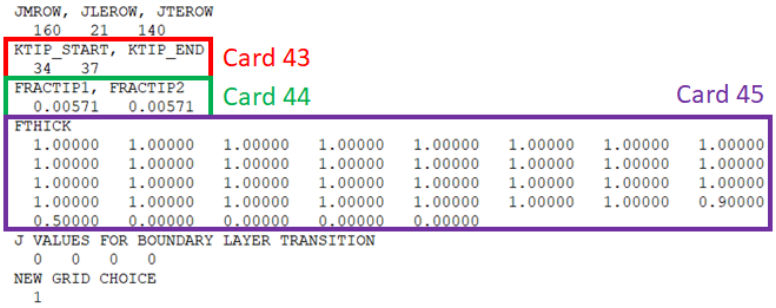


Abbildung 5.4: Beispiel Eingabe der Geometrie - Eingaben für den Spalt

In diesem Fall gibt der erste Wert die Zuwachsrate der Abstände an und der zweite Wert das maximale Verhältnis. Eine Eingabe

1.2500 10.0000 0.0000 9999.0000 ...

würde bedeuten, dass der Abstand zwischen 2 benachbarten Gitterpunkten um 25% zunimmt und das Verhältnis zwischen größten und kleinsten Gitterabstand maximal 10 beträgt. Alle weiteren Werte werden dann ignoriert, müssen aber dennoch eingegeben werden. Folglich müssen in beiden Fälle jeweils IM-1 bzw. KM-1 Zahlenwerte eingegeben werden.

Die Anzahl der Gitterpunkte in meridionaler Richtung wird für jede Schaufelreihe einzeln eingegeben. Die Gesamtausbreitung ergibt sich folglich als Summe aus dieser.

Die Eingabe der Schaufelreihe muss nicht kontinuierlich erfolgen, d. h. es können zwischen benachbarten Schaufelreihen Überlappungen in meridionaler Richtung existieren. Diese Überlappung wird von Multall entfernt. Dafür muss in Card 33 der Wert für ISHIFT auf 2, 3 oder 4 gesetzt werden, wobei die Wahl von ISHIFT=2 oder ISHIFT=4 empfohlen wird. Damit wird ein fortlaufendes Gebiet im Bereich der Mischungsebene sichergestellt. Weiterhin werden für ein möglichst günstiges Rechengebiet die Schaufelreihen in Umfangsrichtung gedreht. Zudem werden die Abstände der Gitterpunkte in meridionaler Richtung vor und nach der Schaufel angepasst. Dadurch wird sichergestellt, dass diese im Bereich der Schaufelkanten keinen zu großen Abstand haben.

In den Abbildungen 5.7 und 5.8 sind Beispieleingaben für die Vernetzungsparameter dargestellt. In Abbildung 5.7 können zusätzlich die unterschiedlichen Möglichkeiten bei der Eingabe der Gitterabstände gesehen werden. In Card 13 werden diese automatisch erzeugt, in Card 14 manuell eingegeben.

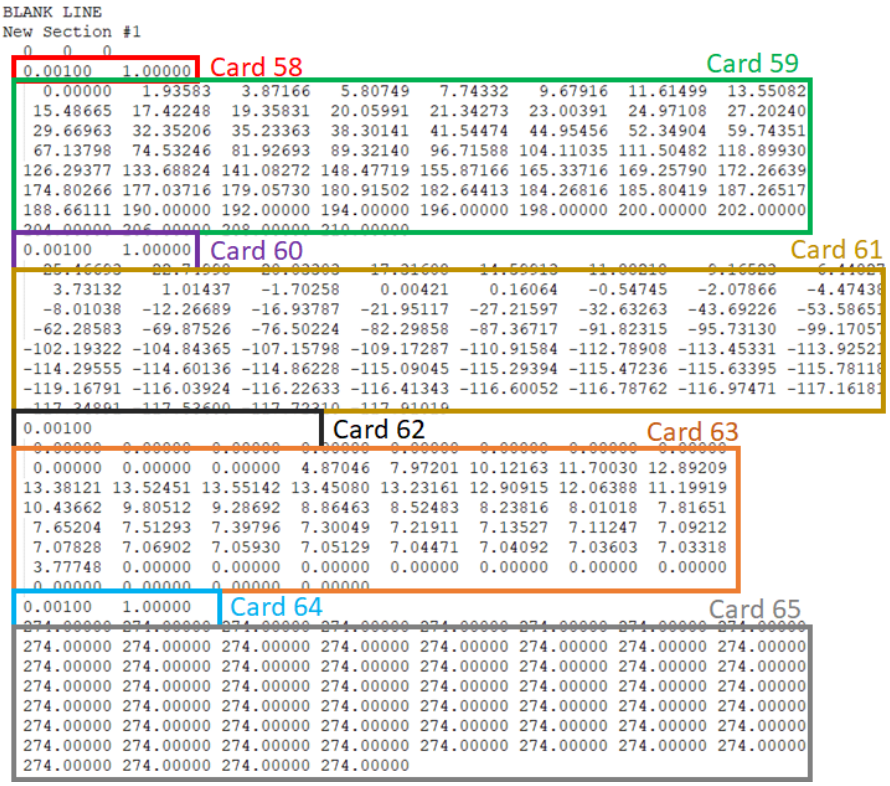


Abbildung 5.5: Beispiel Eingabe der Geometrie - Schaufelgeometrie

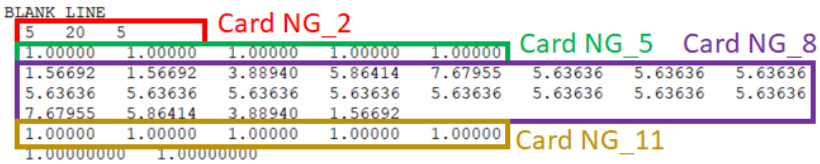


Abbildung 5.6: Beispiel Eingabe der Geometrie - Neugenerierung der meridionalen Gitterabstände

5.3 Eingabe Solverparameter

Multall bietet eine große Anzahl an Solverparametern an, die gewählt werden können. Für die meisten von diesen können Standartwerte gesetzt werden.

Die Wärmekapazität C_p und der Isentropenexponent κ werden in Card 2 gesetzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass $C_p = const.$ gilt, falls der Zahlenwert größer als 0 eingegeben wird. Wird der Zahlenwert für C_p kleiner als 0 eingegeben, so wird eine Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität mittels eines Polynomansatzes $C_p(T) = C_{p,1} + C_{p,2}\,(T - T_{ref}) + C_{p,3}\,(T - T_{ref})^2$ angenommen. Die Koeffizienten als auch die Referenztemperatur und die Gaskonstante (zur Berechnung des Isentropenexponenten) sind in diesem Fall in Card 3 einzugeben.

Das Zeitschrittverfahren ITIMST wird in Card 4 gesetzt. Üblicherweise wird hier das „Simple-Super-Scree“-Schema (SSS-Schema) gewählt (ITIMST=3). Für kleine Mach-Zahlen ist die Änderung der Dichte so gering, dass die Rundungsfehler einen größeren Einfluss haben. Bei der Berechnung der Drücke werden dadurch große Fluktuationen erzeugt, wodurch die Konvergenz der Rechnung erschwert wird ([3]). Somit gibt es für inkompressible Strömungen ein spezielles Zeitschrittverfahren. Dieses sollte bei Mach-Zahlen kleiner als 0.25 genutzt werden ([1]). Dabei kann der Druck mittels einer künstlichen Schallgeschwindigkeit errechnet werden (ITIMST=5) oder die Rechnung vollständig inkompressibel durchgeführt werden (ITIMST=6). Um die Kon-

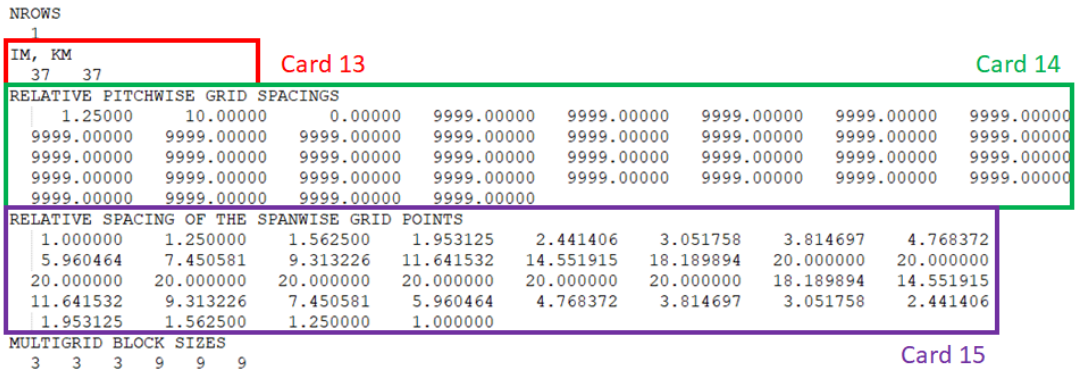


Abbildung 5.7: Beispiel Eingabe der Vernetzungsparameter, Festlegung der Anzahl der Gitterpunkte in Umfangsrichtung und radialer Richtung und deren Abstände. Dabei werden in Umfangsrichtung die Abstände automatisch erzeugt (Card 14) und in radialer Richtung manuell eingegeben (Card 15)

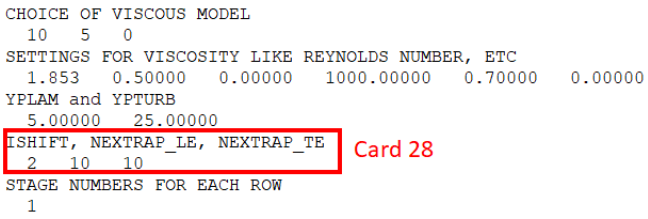


Abbildung 5.8: Beispiel Eingabe der Vernetzungsparameter, Auswahl des Verfahrens zur Anpassung des Gitters in meridionaler Richtung

vergenz zu beschleunigen, kann das „Super-Scree-Scheme“ angewendet werden. Dafür muss jeweils die Nummer des Zeitschrittverfahrens als negative Zahl eingegeben werden (-3, -5 oder -6). Dieses erlaubt höhere CFL-Zahlen (bis 0.75), kann aber zu Instabilitäten führen.

Die CFL-Zahl wird in Card 8 eingegeben. Falls das „Scree-Scheme“ gewählt wurde, sollte diese nicht höher als 0.4 sein, für das SSS-Schema können CFL-Zahlen bis zu 0.75 gewählt werden. Die maximale Anzahl der Iterationsschritte NSTEPS_MAX und das Konvergenzlimit CONLIM werden in Card 10 eingegeben. Dabei sollten für die Berechnung niemals mehr als 10 000 Schritte für mehrstufige, 3 000 Schritte für einstufige Maschinen benötigt werden. Das Konvergenzlimit sollte dabei im Bereich zwischen 0.001 und 0.005 liegen.

Die Wahl des Turbulenzmodells erfolgt in Card 28 mit der Variable ILOS. Dabei kann zwischen reibungsfreier Rechnung (ILOS=0), dem Mischungswegmodell mit dem alten (ILOS=10) und neuen (ILOS=100) Berechnungsalgorithmus und dem Turbulenzmodell nach Spalart-Almaras (ILOS=200) gewählt werden. Falls die Rechnung nicht reibungsfrei erfolgt (ILOS$\neq$0), muss in Card 29 eine Angabe zur Viskosität getätigt werden. Dabei gibt es entweder die Möglichkeit, die dynamische Viskosität direkt einzugeben (in $10^{-5}\,Pa\,s$) oder indirekt über die Reynoldszahl der ersten Schaufelreihe. Ist der Zahlenwert kleiner als 100 wird dies als erste Variante vom Programm interpretiert, für einen Zahlenwert größer als 100 die zweite.

Weiterhin gibt es eine Vielzahl weiterer Eingabeparameter wie Relaxationsfaktoren. Für diese werden üblicherweise Standartwerte gewählt. Die wichtigsten Solverparameter sind in Abbildung 5.9 und 5.10 dargestellt.

5.4 Eingabe Randbedingungen

Prinzipiell wird in Multall mit einer Druck-Druck-Randbedingung gerechnet. Der genaue Typ der Randbedingungen wird in den Cards 22 (Eintritt) und 23 (Austritt) festgelegt. Mit der Va-

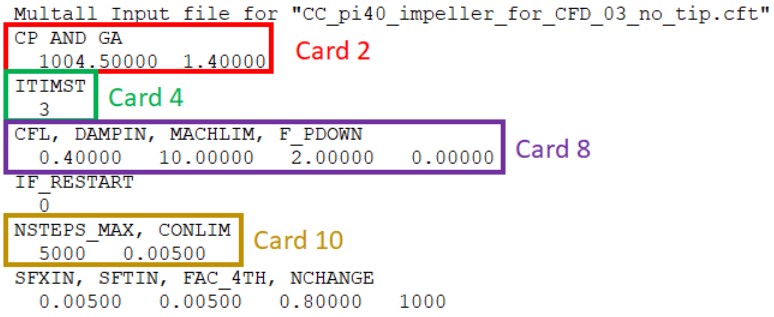


Abbildung 5.9: Beispiel Eingabe der Solverparameter, Card 2, 4, 8 und 10

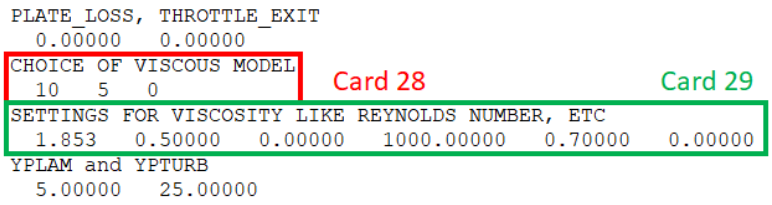


Abbildung 5.10: Beispiel Eingabe der Solverparameter, Card 28 und 29. Dabei wurde in Card 29 die dynamische Viskosität eingegeben

riable IN_PRESS wird bestimmt, wie der statische Druck an der Randbedingung des Eintritts bestimmt wird. Dabei wird IN_PRESS=0 bevorzugt. Mit dieser Wahl wird der statische Druck aus der statischen Dichte und dem Gasgesetz bestimmt. Weiterhin ist eine Mittelung des statischen Drucks möglich durch eine andere Auswahl von IN_PRESS. Aus dem einzugebenden Totaldruck und Totaltemperatur und der Isentropenbeziehung kann anschließend die Absolutgeschwindigkeit der Strömung berechnet werden. Diese wird, je nach Wahl der folgenden Parameter, in die einzelnen Geschwindigkeitskomponenten umgerechnet.

Mit der Variable IN_VTAN wird die Richtung der tangentialen Geschwindigkeit festgelegt. Mit IN_VTAN=0 wird der Strömungswinkel im Absolutsystem, mit IN_VTAN=1 der Strömungswinkel im Relativsystem eingegeben. Mit IN_VTAN=1 muss die absolute Tantentialgeschwindigkeit direkt eingegeben werden. Üblicherweise wird IN_VTAN=0 gesetzt. Mit IN_VR wird die radiale Geschwindigkeitskomponente am Eintritt festgelegt. Typischerweise wird dabei IN_VR=1 gewählt, sodass sich diese aus der einzugebenden Meridionalgeschwindigkeit und dem entsprechenden Winkel ergibt. Mit der Variable IN_FLOW gibt es diie Möglichkeit, einen Massenstrom am Eintritt vorzugeben. Dies wird vom Autor des Programms allerdings ausdrücklich nicht empfohlen ([1]). Daher wird IN_FLOW üblicherweise auf den Wert 0 gesetzt. Weiterhin kann mit der Variable IF_REPEAT vorgegeben werden, dass die berechnete Maschine Repetierstufen besitzt (IF_REPEAT=1). Falls nicht, ist dieser Wert ebenfalls auf 0 zu setzen.

Am Austritt wird der statische Druck an Nabe und Gehäuse festgelegt. Dabei kann mit der Variable IPOUT aus Card 23 entschieden werden, wie mit diesen Werten umgegangen wird. Üblicherweise wird IPOUT=1 gesetzt, sodass der statische Druck zwischen Nabe und Gehäuse mit den eingegebenen Werten linear interpoliert wird. Bei IPOUT=-1 wird der statische Druck am Gehäuse festgehalten und ein radiales Gleichgewicht angewandt. Für IPOUT=0 wird der statische Druck an der Nabe festgehalten und ebenfalls ein radiales Gleichgewicht angewandt. Für die beiden letzten Fälle wird der jeweils nicht benötigte statische Druck ignoriert, muss aber dennoch eingegeben werden. Mit IPOUT=3 kann die statische Druckverteilung direkt eingegeben werden.

Die Eingabe der Randbedingungen erfolgt umfangsgemittelt an Punkten, die in der $q1$-Richtung verteilt sind. Die Anzahl der Punkte wird in Card 73 festgelegt, der relative Abstand dieser Punkte wird in Card 74 eingegeben. Diese Punkte müssen damit nicht mit den tatsächlichen Gitter-

punkten übereinstimmen. Wie bei der Erzeugung des Gitters gibt es auch hier die Möglichkeit, die Gitterabstände manuell einzugeben oder automatisch mit der gleichen Methodik wie in Card 14 und 15 generieren zu lassen. Am Eintritt werden der Totaldruck (Card 75) und Totaltemperatur (Card 77) gesetzt. Am Austritt müssen die statischen Drücke an Nabe und Gehäuse in Card 82 eingegeben werden. Weiterhin müssen die kinematischen Verhältnisse am Eintritt angegeben werden. In Card 80 muss der Winkel zwischen der Umfangskomponente und Meridionalkomponente der Geschwindigkeit angegeben werden ($\tan\alpha' = \frac{c_u}{c_m}$), in Card 81 der Winkel zwischen der Radialkomponente und Axialkomponente der Geschwindigkeit ($\tan\gamma = \frac{c_r}{c_{ax}}$). Weiterhin müssen Startwerte für die Umfangsgeschwindigkeit und Meridionalgeschwindigkeit in Card 78 und 79 angegeben werden. Da dies nur Startwerte sind, sollten diese nicht das Ergebnis beeinflussen sondern nur die benötigte Rechenzeit. Durch eine ungünstige Wahl dieser Startwerte kann es allerdings dazu kommen, dass die Berechnung mit einem Fehler abbricht. (siehe Abschnitt 10.1)

Beispieleingaben für die Randbedingungen sind in Abbildung 5.11 und 5.12 zu sehen.

```
NUMBER OF BLADE GEOMETRY INPUT SURFACES                    Card 22
  5
IN_PRESS, IN_VTAN, IN_VR, IN_FLOW, IF_REPEAT, RFIN
  0    0    1    0    0    0.50000
IPOUT, SFEXIT, NSFEXIT                                     Card 23
  1    0.00000    0
PLATE_LOSS, THROTTLE_EXIT
  0.00000    0.00000
CHOICE OF VISCOUS MODEL
  10    5    0
```

Abbildung 5.11: Beispiel Eingabe der Randbedingungen - Wahl des Typs der Randbedingungen an Eintritt und Austritt

```
BLANK LINE
NUMBER OF INLET BOUNDARY CONDITION POINTS                  Card 73
  28
RELATIVE SPACING OF THE INLET BC POINTS                    Card 74
    1.25000     10.00000      0.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
 9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
 9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
 9999.00000   9999.00000   9999.00000
ABSOLUTE STAGNATION PRESSURE AT INLET                      Card 75
  101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000
  101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000
  101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000
  101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000
INLET STAGNATION TEMPERATURE                               Card 77
  293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000
  293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000
  293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000
  293.15000   293.15000   293.15000   293.15000
INLET TANGENTIAL VELOCITY                                  Card 78
  0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
  0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
  0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
  0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
INLET MERIDIONAL VELOCITY                                  Card 79
  300.00000   300.00000   300.00000   300.00000   300.00000   300.00000   300.00000   300.00000
  300.00000   300.00000   300.00000   300.00000   300.00000   300.00000   300.00000   300.00000
  300.00000   300.00000   300.00000   300.00000   300.00000   300.00000   300.00000   300.00000
  300.00000   300.00000   300.00000   300.00000
INLET YAW ANGLE                                            Card 80
  0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
  0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
  0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
  0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
INLET MERIDIONAL PITCH ANGLE                               Card 81
  0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
  0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
  0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
  0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
SPECIFIED DOWNSTREAM PRESSURES ON HUB AND CASING           Card 82
  300000.00000   300000.00000
```

Abbildung 5.12: Beispiel Eingabe Randbedingungen - Eingabe der Werte

6 Analyse des Vernetzers

Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, erfolgt die Eingabe der Schaufelgeometrie über wenige Schaufelschnitte. Dabei werden die Koordinaten einer Schaufelseite und die dazugehörigen tangentialen Dicken angegeben. Dies wird vom Programm eingelesen. Die Anzahl der Gitterpunkte in $q1$-Richtung ist eine größere (z. B. 37 Gitterpunkte) als die Anzahl an eingegebenen Schaufelschnitten (üblicherweise 3 oder 5). Daher muss eine Interpolation der Schaufelschnitte auf die Gitterpunkte erfolgen. Diese ist bereits eingebaut und wird automatisch durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass für axiale Rotoren und Statoren diese Interpolation ohne Probleme erfolgt. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Dort wird die interpolierte Geometrie aus Multall mit der realen Geometrie aus CFturbo an verschiedenen Schnitten verglichen. Dabei wurde die Schaufelgeometrie an 5 Schnitten eingegeben (bei $r = 65.0\,mm$, $83.6\,mm$, $111.0\,mm$, $130.3\,mm$ und $149.0\,mm$). Die anderen Schnitte wurden in Multall durch Interpolation ermittelt. In diesem Beispiel wurde eine stark verwundene und verjüngende Schaufel gewählt, wodurch die Eingabe an 5 Schnitten erfolgen musste. Bei annähernd zylindrischen Schaufeln reicht es aus, die Eingabe an nur 3 oder 2 Schnitten zu tätigen.

Bei einem Radialrad bzw. einem Diagonalrad gab es allerdings Probleme. So erzeugte Multall in der Schaufelmitte einen Absatz (siehe Abbildung 6.1), welcher in den Eingabedaten so nicht vorhanden war.

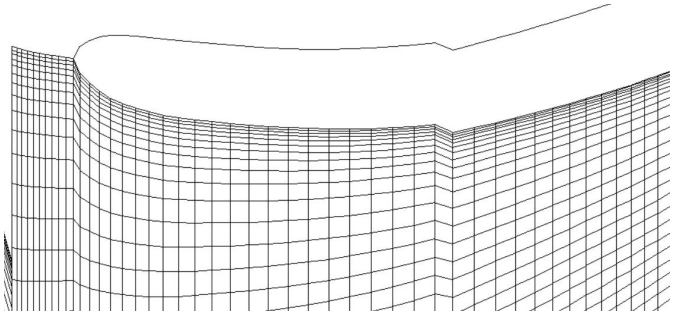


Abbildung 6.1: Erzeugter Absatz in der Schaufelgeometrie bei einem Diagonalrad

Die Ursache dafür konnte nicht abschließend geklärt werden, diese ist wahrscheinlich in den Interpolationsroutinen zu suchen. Um dieses Problem zu beheben, muss bei Diagonalrädern die Option der Neugenerierung des Gitters genutzt werden. Ohne diese Option wird der Gitterabstand in Strömungsrichtung aus der eingegeben Geometrie berechnet. Mit der Neugenerierung des Gitters gibt es die Möglichkeit, diesen Abstand vorzugeben und neu zu definieren. Außerdem kann die Anzahl der Gitterpunkte in Ströumngsrichtung verändert werden. Beispielsweise kann die Eingabe sehr fein mit 150 Punkten erfolgen, die Rechnung wird dann aber auf einem gröbe-

ren Gitter mit 80 Gitterpunkten in Strömungsrichtung durchgeführt. In diesem Fall werden die Gitterabstände aus der Eingabe ignoriert und die Geometrie auf die neuen Abstände angepasst.

Ein weiteres Problem tritt bei der Eingabe von abgeschnittenen Vorder- oder Hinterkanten auf, welche oftmals bei radialen Laufrädern auftreten. Durch den Sprung in der tangentialen Dicke erzeugt die Interpolation in einigen Fällen fehlerhafte Kanten, wie in Abbildung 6.2 dargestellt. Abhilfe dagegen schafft eine Abrundung der Vorderkante in CFturbo, wodurch allerdings die Strömung verändert wird. Bei einer Hinterkante kann die Generierung eines CUSP Abhilfe schaffen.

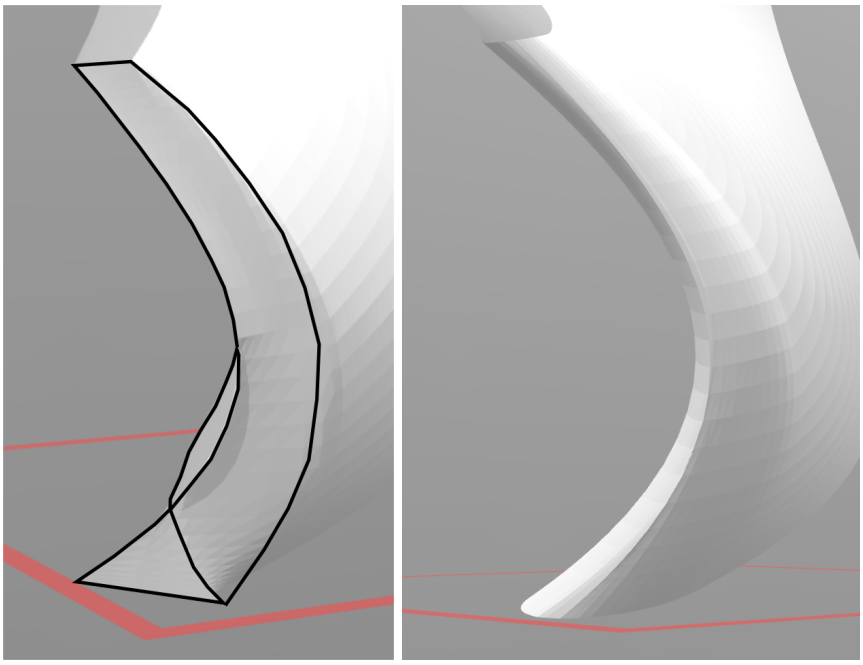


Abbildung 6.2: Links: fehlerhafte Interpolation einer abgeschnittenen Vorderkante, dabei wurde die Kontur der Vorderkante nachgezogen. Rechst: Interpolation der abgerundeten Vorderkante

Die Gitterabstände in $q1$- und $q2$-Richtung müssen seaparat eingegeben werden. Dabei gibt es entweder die Möglichkeit, diese relativen Abstände zwischen 2 benachbarten Gitterpunkten manuell einzugeben oder diese automatisch erzeugen zu lassen. Über diese Eingaben lässt sich das Gitter in diesen Richtungen steuern.

Die Eingaben in meridionaler Richtung müssen nicht kontinuierlich zwischen den Schaufelreihen sein, es kann eine Überlappung stattfinden. Die Grenzen einer Schaufelreihe werden von Multall automatisch verschoben, sodass diese Überlappung entfernt wird (siehe Abschnitt 5.2). Des Weiteren wird das Gitter vor und hinter der Schaufel in Umfangsrichtung verschoben, sodass die Gitterlinien möglichst parallel zur Strömung verlaufen.

Durch die Tatsache, dass in der Eingabedatei bereits alle Parameter eingegeben werden, mit denen das Gitter beschrieben werden kann, wird die Vernetzung sehr schnell durchgeführt. Üblicherweise dauert diese weniger als 5 Sekunden und bietet bei richtiger Konfiguration ein Rechengitter, welches die gegebene Geometrie gut abbildet. Dies wird z. B. im Abschnitt 9.1.3 verdeutlicht, wo die konstruierte Geometrie und das erzeugte Rechengitter an einem konkreten Beispiel verglichen werden. Eine Kontrolle der Netzqualität kann durch das Programm „plotall“ erfolgen (siehe Abschnitt 8.2).

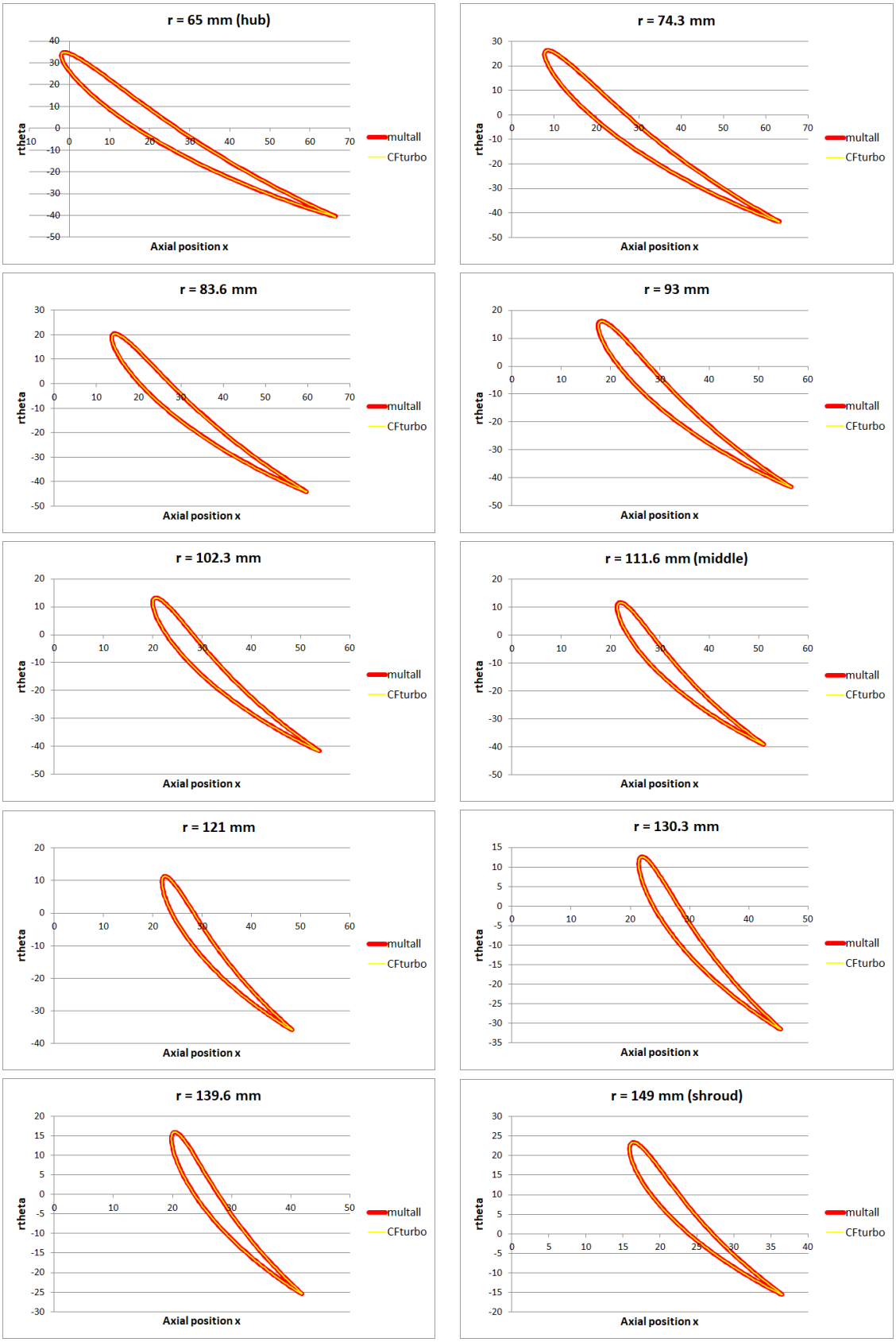


Abbildung 6.3: Vergleich reale Schaufelgeometrie (gelb) und von Multall interpolierte Schaufelgeometrie (rot) bei verschiedenen Radien. Die Eingabe erfolge dabei bei den 5 Radien 65.0 mm, 83.6 mm, 111.0 mm, 130.3 mm und 149.0 mm

7 Aufbereiten von CFturbo-Modellen für Multall

Um die Qualität der Rechnungen von Multall bewerten zu können wurden Modelle von CFturbo für Multall aufbereitet. Um diese entsprechenden Eingabedateien zu erstellen, wurde das Programm „CFturbo to Multall Converter“ geschrieben. Ziel war es, eine valide Eingabedatei möglichst automatisiert zu erstellen.

Dafür werden 2 Dateien aus CFturbo benötigt. Aus der Projektdatei (.cft) werden die Randbedingungen, die enthaltenen Komponenten und deren Begrenzungsmaße ausgelesen. Die Geometrie der Schaufeln wird aus einer .xml-Datei ausgelesen, welche von CFturbo erstellt werden kann (Menu –> Project –> Export –> Basic –> General geometry –> XML). In dieser Datei werden die Profilschnitte einzeln gespeichert. Dabei werden für jeden Schnitt die Punkte der Außenkontur fortlaufend gespeichert. Diese Punkte müssen eingelesen werden und für Multall aufbereitet werden (axiale Position, Radius und $r - \vartheta$-Koordinate einer Schaufelfläche und die dazugehörige tangentiale Dicke). Die unterschiedlichen Formen zur Beschreibung der Profilgeometrie sind in Abbildung 7.1 verdeutlicht.

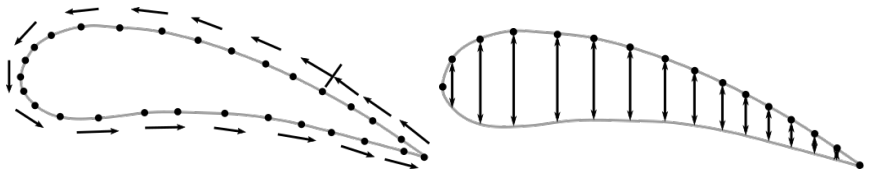


Abbildung 7.1: Speicherform der Geometrie in .xml-Datei aus CFturbo (links) und Eingabeform der Geometrie in Multall (rechts)

Für Axialräder wird dafür in jeden Schnitt die minimale und maximale axiale Position gesucht. Dabei muss beachtet werden, dass in CFturbo diese mit der Koordinate z bezeichnet wird, in Multall allerdings die Koordinate x benutzt wird. Anschließend werden die Punkte in 2 Gruppen geteilt (Schaufeloberseite und Schaufelunterseite; je nach Staffelungswinkel stimmen diese nicht mit Druckseite und Saugseite überein). Nun werden in Abhängigkeit der gewünschten Gitterpunkte in Strömungsrichtung die Punkte in axialer Richtung verteilt. Diese Verteilung ist im Anhang genauer beschrieben. Bei diesem Verfahren wird an den Schaufelkanten eine höhere Punktdichte zu erzeugt, da sich dort die Geometrie stark ändert. Für jeden dieser Punkte wird nun der Radius r und die $r - \vartheta$-Koordinaten der Schaufeloberseite ($r\vartheta_o$) und Schaufelunterseite ($r\vartheta_u$) interpoliert. Die tangentiale Dicke ist nun die Differenz aus $r\vartheta_o - r\vartheta_u$, für die $r - \vartheta$-Koordinate wird $r\vartheta_o$ gewählt. Dieser Algorithmus ist in Abbildung 7.2 verdeutlicht.

Für radiale Räder ist die Vorgehensweise ähnlich. Der Unterschied zu Axialrädern besteht dabei im Bereich, wo sich der Radius stärker ändert als die axiale Position. Aus der Kenntnis

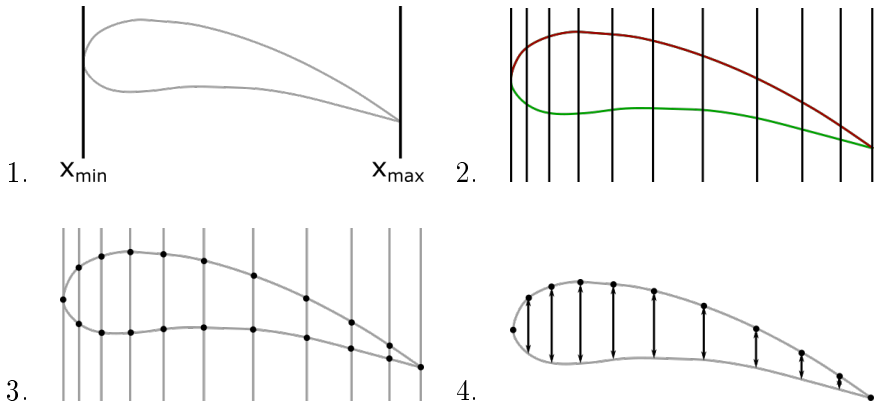


Abbildung 7.2: Schritte zur Erzeugung der Geometriedaten für Multall

vom minimalen und maximalen Radius wird der Radius aus dem Punktindex berechnet. Daraus kann anschließend die axiale Position aus der gegebenen Profilgeometrie interpoliert werden. Dieses Verfahren liefert z. B. bei radialen Verdichterlaufrädern eine bessere Dateneingabe im Bereich der Schaufelhinterkante. In diesem Bereich ändert sich die axiale Position wesentlich geringer als die radiale Position. Tabelle 7.1 listet nochmal die wesentlichen Schritte bei der Erzeugung der Geometriedaten.

Axialrad, Radialrad/Diagonalrad bei $\Delta x > \Delta r$	beschaufelter Radialdiffusor, Radialrad/Diagonalrad bei $\Delta x < \Delta r$
1. Bestimmen von x_{min} und x_{max} 2. Schaufelseiten separieren, Berechnen von x (aus x_{min}, x_{max} und Punktindex i) 3. Interpolation von r, ϑ_o und ϑ_u 4. Berechnen von $r\vartheta_o$ und der tangentialen Dicke t	1. Bestimmen von r_{min} und r_{max} 2. Schaufelseiten separieren, Berechnen von r (aus r_{min}, r_{max} und Punktindex i) 3. Interpolation von x, ϑ_o und ϑ_u 4. Berechnen von $r\vartheta_o$ und der tangentialen Dicke t

Tabelle 7.1: Schritte zur Erzeugung der Geometriedaten für Multall

Dieser Algorithmus wurde im Programm „CFturbo to Multall Converter“ implementiert. In Abbildung 7.3 und 7.4 sind 2 Screenshots des Programms zu sehen. Dieses ist dabei aus 5 Tabulatoren aufgebaut. Im ersten Tabulator („File Selection“) wird die zu ladende Datei ausgewählt. Die Anzahl der Gitterpunkte in Umfangsrichtung (IM) und radialer Richtung (KM) wird auf der zweiten Tabulatorseite gesetzt („Multall Read Parameters“), ebenfalls wie die Anzahl der Gitterpunkte in meridionaler Richtung je Schaufelreihe. Weiterhin können hier Werte für Cards gesetzt werden, deren Größe von KM abhängt (z. B. Druck- und Temperaturrandbedingungen oder die Meridionalgeschwindigkeit am Eintritt, Abbildung 7.3). Viele dieser Werte werden zwar von CFturbo berechnet, werden aber nicht in die .cft-Datei geschrieben. Daher war es zunächst einfacher, diese manuell einzutragen als diese neu zu berechnen. Mit einem Klick auf den Button „Read Data From CFturbo“ werden nun die 2 Dateien (.cft und .xml) von CFturbo eingelesen und alle benötigten internen Variablen initialisiert. Auf der Seite „Log“ werden diverse Ausgaben geschrieben, die eine Fehlersuche erleichtern. Auf der Seite „Multall Parameters" können nun die Werte der einzelnen Cards vom Benutzer geändert werden (Abbildung 7.4). Diese wurden bereits mit Standartwerten belegt. Mit Klick auf den Button „Create Multall Input“ wird die Datei an den im unteren Bereich angegebenen Speicherort geschrieben und auf der Seite „Multall Input File“ angezeigt.

Neben der Eingabedatei für Multall erstellt das Programm zusätzlich für jede Schaufelreihe ein 3D-File im .stl-Format, in welchem die eingegebene Schaufelgeometrie dargestellt wird. Mit-

tels dieser Datei kann die Eingabe auf offensichtliche Fehler überprüft werden. Weiterhin kann diese Datei in CFturbo importiert werden. Dies ermöglicht einen Vergleich der Geometrie des Modells mit den Geometriedaten aus der Eingabedatei für Multall. Eine Anwendung davon ist in Abschnitt 9.1.3 gezeigt.

Das Programm „CFturbo to Multall Converter“ diente im Folgenden als Schnittstelle zwischen Multall und CFturbo. Damit wurden die gerechneten Fälle aufbereitet. Ein großer Teil des Programms kann wiederverwendet werden, falls Multall an CFturbo angebunden wird.

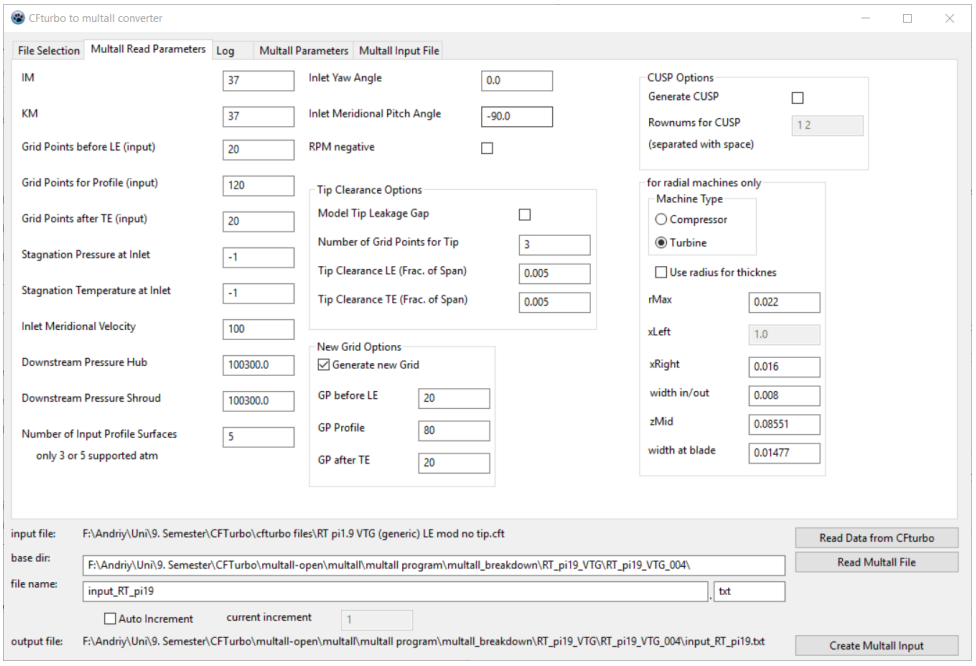


Abbildung 7.3: CFturbo to Multall Converter: Eingabe von Parameter für die Multall Eingabedatei

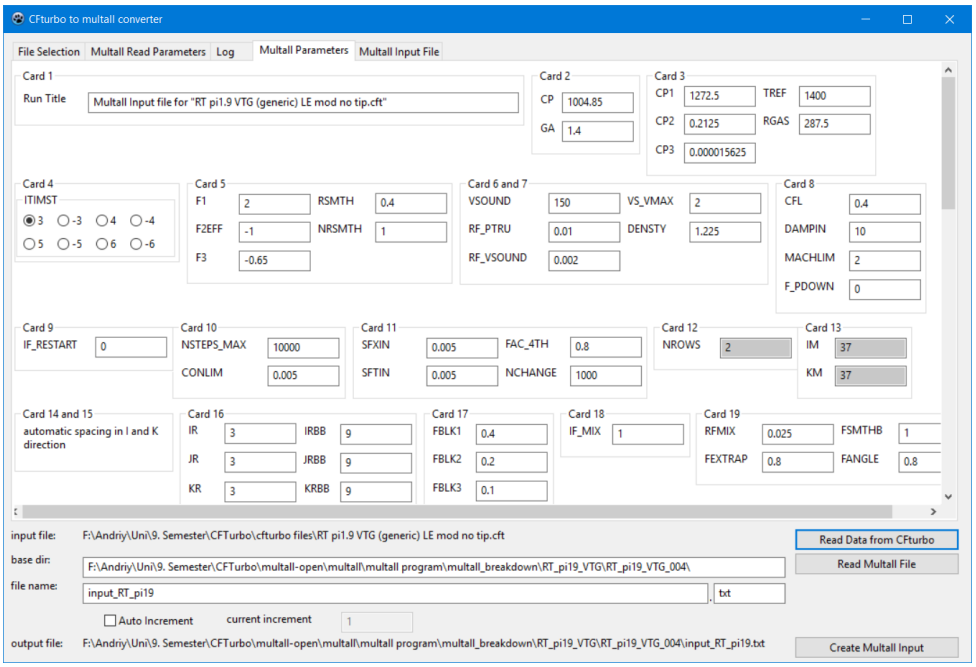


Abbildung 7.4: CFturbo to Multall Converter: Änderung von Parametern für die Multall Eingabedatei

8 Auswertungsmöglichkeiten der Ergebnisse

8.1 Auswertung der Bildschirmausgabe

Während der Rechnungen werden diverse Informationen in der Konsole ausgegeben. Aller 5 Zeitschritte erfolgt eine Ausgabe des maximalen Fehlers (EMAX), durchschnittlichen Fehlers (EAVG) und Kontinuumfehlers (ECONT). Dies kann in Abbildung 8.1 gesehen werden. Anhand dieser Werte kann abschätzt werden, ob die Rechnung konvergieren wird und wie viel Zeit diese noch benötigt. Weiterhin wird der Massenstrom am Eintritt und Austritt angezeigt. Aller 100 Schritte erfolgt eine detailliertere Ausgabe (Abbildung 8.2). In dieser wird der Verlauf des Massenstroms, Druckverhältnisses und der Totaltemperatur für die Meridianquerschnittsflächen (J= *const.*) gezeigt. Die Spalte „STAGNATION PRESSURE“ suggeriert, dass hier der Totaldruck in *bar* gelistet wird. Tatsächlich ist hier das Verhältnis des Totaldrucks an der entsprechenden Ebene zum Totaldruck am Eintritt gegeben. Weiterhin werden die Zustandsgrößen am Eintritt und Austritt sowie isentrope und polytrope Wirkungsgrade gezeigt. Anhand dieser Ausgaben kann bereits eine erste Einschätzung zu den Ergebnissen getroffen werden.

Um die Bildschirmausgabe zu weiteren Verarbeitung in einer Textdatei zu speichern, muss Multall mit dem Befehl „`multall.exe < input.txt > out.txt`“ gestartet werden. Nach dem Beenden der Rechnung liegt die Ausgabe in der Datei „out.txt“ vor. Dieser Dateiname kann den Bedürftnissen angepasst werden.

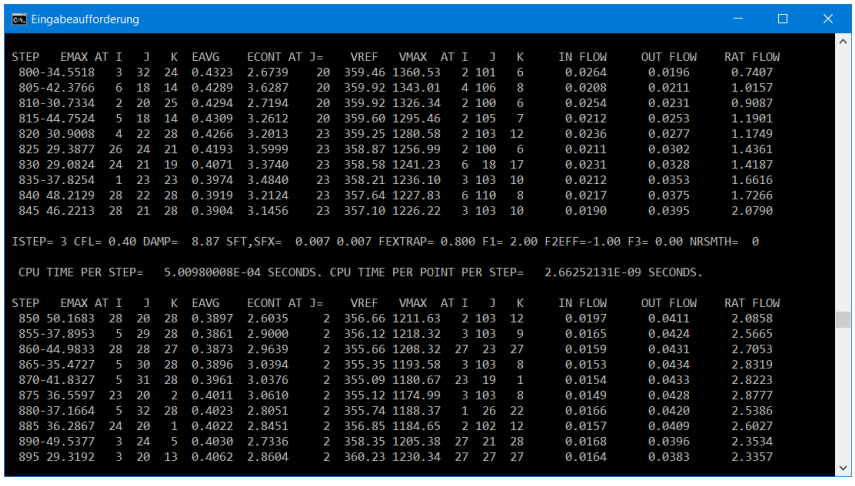


Abbildung 8.1: Ausgabe in der Konsole - Informationen über den Konvergenzfortschritt

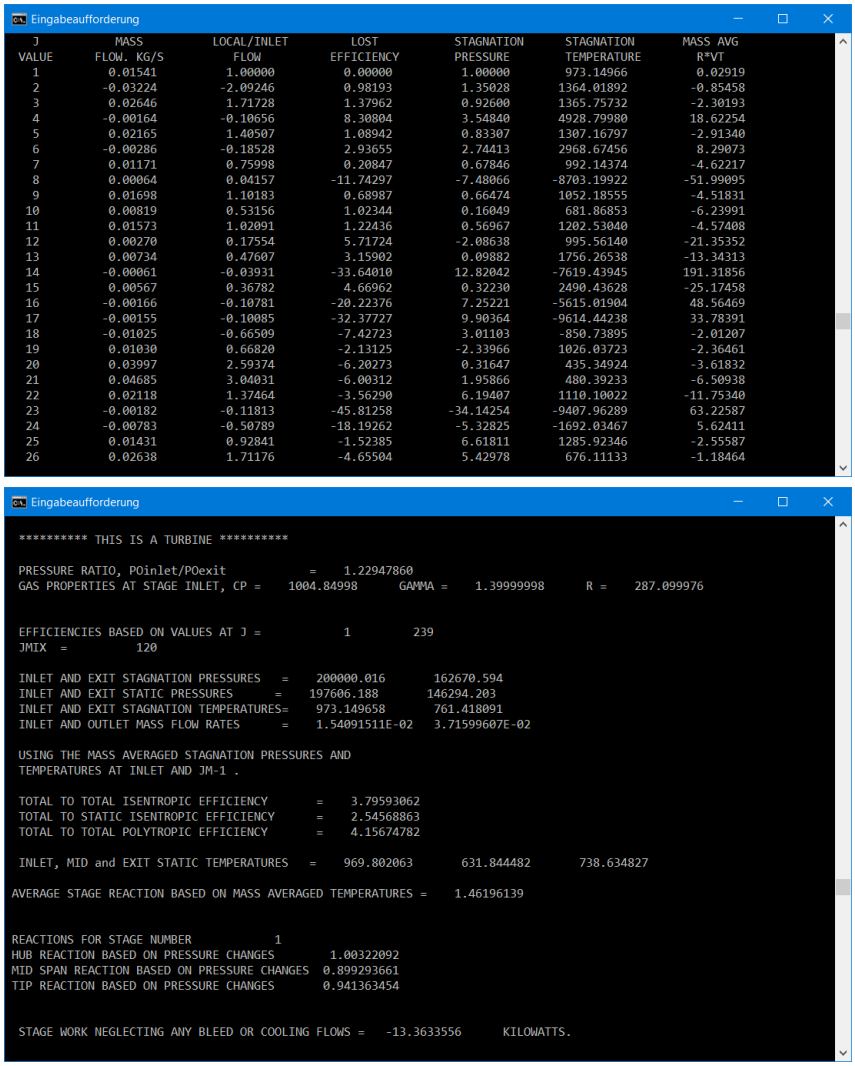


Abbildung 8.2: Ausgabe in der Konsole - Detaillierte Informationen

8.2 Auswerten der Daten mit plotall

Beim Beenden der Rechnung werden die Rechenergebnisse in die Datei „flow_results“ geschrieben. Um diese unformatierte Datei auszuwerten, wird das Programm „plotall“ im Programmpaket „Multall-open“ mitgeliefert. Dieses muss in einem Kommandozeilenfenster gestartet werden. Anschließend müssen nun Angaben in der Kommandozeile getätigt werden um die gewünschte Darstellung zu erhalten. Abbildung 8.3 zeigt das Menü von plotall. Beispielsweise kann hier das Rechennetz (Menüpunkt 14) oder statische Druckverteilung (Menüpunkt 4) dargestellt werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8.4 zu sehen.

Um beispielsweise das Rechengitter darzustellen, muss zunächst der Menüpunkt „14“ ausgewählt werden. Anschließend muss die Fläche ausgewählt werden, auf der das Gitter angezeigt werden soll. Für eine Meridianstromfläche muss „S“ eingegeben werden, für eine Meridianquerschnittsfläche „Q“. Anschließend muss der Index der Ebene ausgewählt werden, die angezeigt werden soll. Beispielsweise zeigt K=1 die Meridianstromfläche an der Nabe, K=KM (=Anzahl der Gitterpunkte in radialer Richtung) die Meridianstromfläche am Gehäuse. Anschließend kann die Darstellung vergrößert werden. Dafür müssen sowohl Vergrößerungsfaktor als auch das Zentrum der Vergrößerung angegeben werden. Abschließend gibt es die Möglichkeit, die Darstellung für mehrere Segmente zu erstellen. Wurden die entsprechenden Eingaben getätigt, erscheint ab-

schließend ein Bild des Rechengitters. Für die Darstellung der Strömungsgrößen ist das Vorgehen analog.

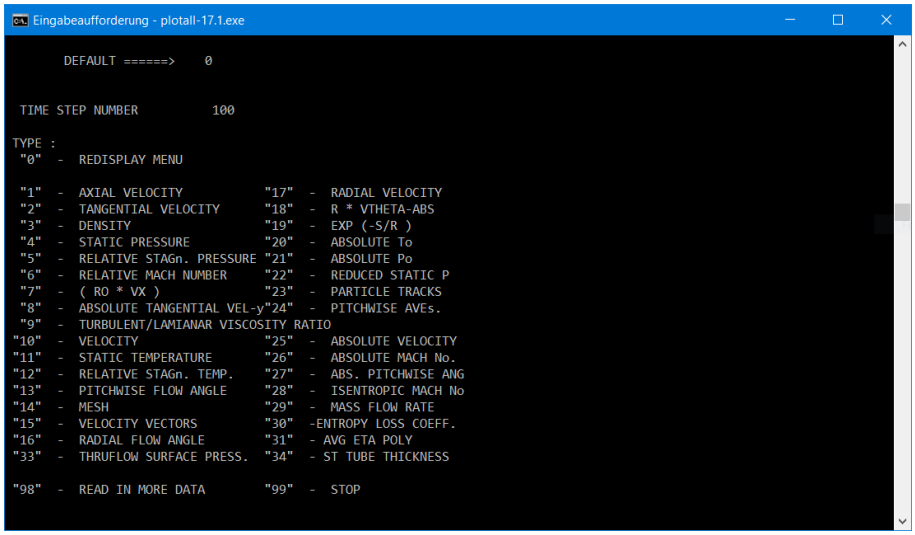


Abbildung 8.3: Menü von Plotall

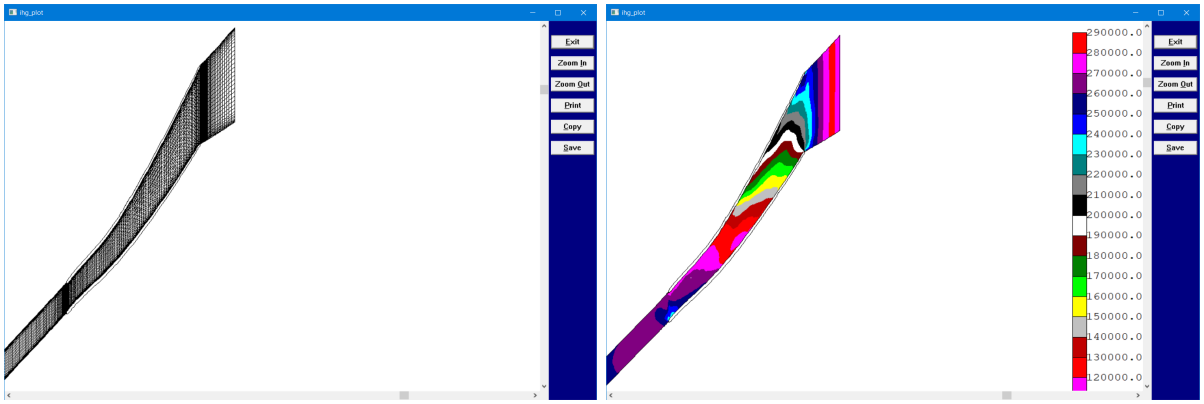


Abbildung 8.4: Darstellung von Ergebnissen mit Plotall, links: Darstellung des Rechengitters, rechts: Verlauf der statischen Drücke

Plottall erlaubt vielfältige Darstellungsmöglichkeiten, hat allerdings auch viele Nachteile. So ist die Eingabe nur über die Kommandozeile möglich, eine kleine Änderung in der Darstellung erfordert die komplette Neueingabe der entsprechenden Konfiguration. Zudem kann die Farbskala nicht geändert werden. So kann es vorkommen, dass eine Farbe mehrmals verwendet wird (siehe Abbildung 8.4). Weiterhin können mit plotall nur Ergebnisse aus Multall eingelesen werden. Dies erschwert den Vergleich zu anderen Programmen. Aufgrund der Tatsache, dass der Quellcode nicht frei verfügbar ist, können diese Probleme nicht ohne weiteres behoben werden. Deshalb wurde Multall so verändert, dass eine Auswertung mit Paraview möglich ist.

8.3 Auswerten der Daten mit TCFD

Das Programm TurbomaschineryCFD (TCFD) der Firma „CFD Support“ liefert den Filter „TurboUnwrap“ für Paraview, mit welchem eine Auswertung der Strömung in Turbomaschinen erfolgen kann. Mit diesem Filter erfolgt eine Abwicklung der Kontur. Die meridionale Koordinate m wird dabei auf die Koordinate x im Bereich $[0;1]$ projiziert. Hierbei steht $x = 0$ für den Eintritt und $x = 1$ für den Austritt. Der Winkel ϑ wird auf die Koordinate y auf das Intervall $[0;2\pi]$

projiziert. Das rotationssymmetrische Modell muss dabei an einer Stelle aufgeschnitten werden. Die Punkte bei $z = 0$ und $z = 2\pi$ sind im eigentlichen Modell identisch. Als dritte Koordinate dient der Abstand des Gitterpunktes von der Nabe. Diese wird auf die Koordinate z und das Intervall $[0; 1]$ projiziert. Dabei bedeutet $z = 0$, dass der Gitterpunkt auf der Nabe liegt. Für $z = 1$ liegt der Gitterpunkt auf dem Gehäuse. Um diese Abwicklung durchzuführen, wird folglich die Kontur der Nabe und des Gehäuses als Referenz genommen. Die skalaren Werte werden anschließend unverändert auf die transformierten Gitterpunkte verschoben. Die Vektorfelder „U“ (Absolutgeschwindigkeit) und „URel“ (Relativgeschwindigkeit) werden entsprechend an die neuen Gitterpunkte angepasst, alle anderen Vektoren werden nicht verändert. Dieser Filter erlaubt sowohl eine Abwicklung von Vollmodellen als auch von Gebieten, die nur ein Segment darstellen. Ein beispielhafte Abwicklung ist in Abbildung 8.5 dargestellt.

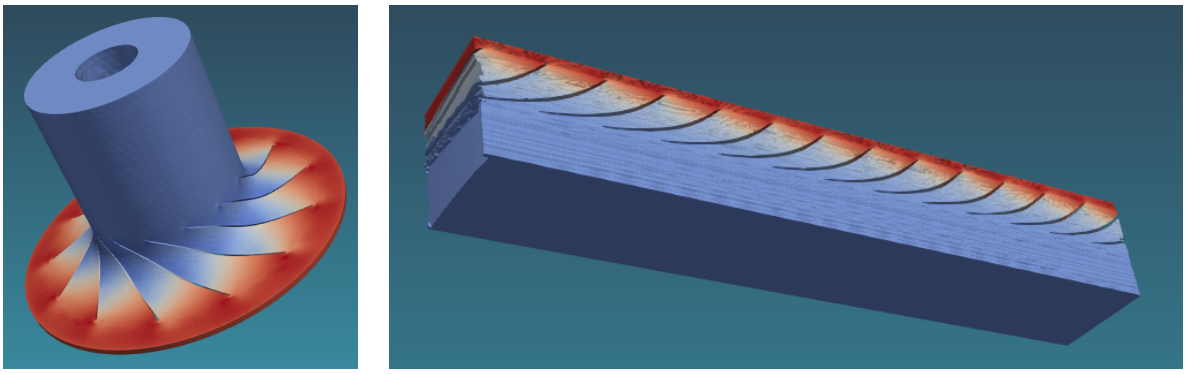


Abbildung 8.5: Abwicklung eines Vollmodells mit dem „TurboUnwrap“ Filter. Links: originales Modell. Rechts: abgewickeltes Modell

Um diesen Filter benutzen zu können, musste zunächst Multall so erweitert werden, dass eine Ausgabedatei erstellt wird, welche von Paraview gelesen werden kann. Hierfür wurde das VTK-Dateiformat gewählt. Da Mulltall auf einen strukturierten Gitter rechnet, bietet es sich an, die Ergebnisse in einer .vts-Datei zu speichern (Serial vtkStructuredGrid). Die genauen Spezifikationen des Dateityps können [6] entnommen werden. In dieser Datei („flow_results.vts“) werden die Absolutgeschwindigkeit, die Relativgeschwindigkeit, Totaldruck und -temperatur, statischer Druck und statische Temperatur gespeichert. Die Geschwindigkeiten mussten dabei unter den Namen „U“ und „URel“ gespeichert werden, damit diese korrekt auf das transformierte Gitter angepasst werden können.

Damit die Abwicklung erfolgen kann, muss dem Filter die Kontur der Nabe und des Gehäuses übergeben werden. Dafür werden 2 Dateien erzeugt: „flow_results_hub.vts“ enthält die Kontur der Nabe und „flow_results_shroud.vts“ die Kontur des Gehäuses. Nun müssen diese 3 Dateien zusammengefasst werden. Dies geschieht mit der Datei „flow_results.vtm“, welche zu den anderen 3 Dateien verlinkt und für die Auswertung geladen wird. In Abbildung 8.6, links kann ein geladenes Beispiel aus Multall gesehen werden. Die graue Farbe stellt das eigentliche Rechengebiet dar, die rote Farbe das Gebiet der Nabe und die grüne Farbe das Gebiet des Gehäuses.

Nachdem die Datei „flow_results.vtm“ in TCFD geladen wurde, müssen folgende Filter angewandt werden:

- Point Data to Cell Data
- TurboUnwrap
- Cell Data to Point Data

Der erste und dritte Filter werden benötigt, damit die Vektoren der Geschwindigkeiten richtig umgeformt werden. Die Konfiguration der „TurboUnwrap“-Filters ist in Abbildung 8.7 für eine

Beispielrechnung aus Multall zu sehen. Hier muss zunächst das Gitter ausgewählt werden, welches abgewickelt werden soll (Main), das Gitter, welches die Nabe darstellt (Hub) und das Gitter, welches das Gehäuse (Shroud) darstellt. Bei der Abwicklung eines Vollmodells muss dieses an einer gewählten Stelle aufgeschnitten werden. Diese Stelle wird mit der Option „Break“ angegeben. Diese ist besonders für periodische Segmente relevant, da unter Umständen der Schnitt durch das Segment geht und die Abwicklung in 2 Bereiche geteilt wird. In diesem Fall muss die Standarteinstellung der „Break“-Option geändert werden (z. B. auf (-1; 0; 0)).

Nach einem Klick auf „Apply“ wird der Filter angewendet und die Abwicklung durchgeführt. Anschließend können zur weiteren Darstellung die vorhandenen Mittel von Paraview benutzt werden. Beispielsweise zeigt Abbildung 8.6, rechts den Verlauf der Stromlinien in einem radialen Laufrad.

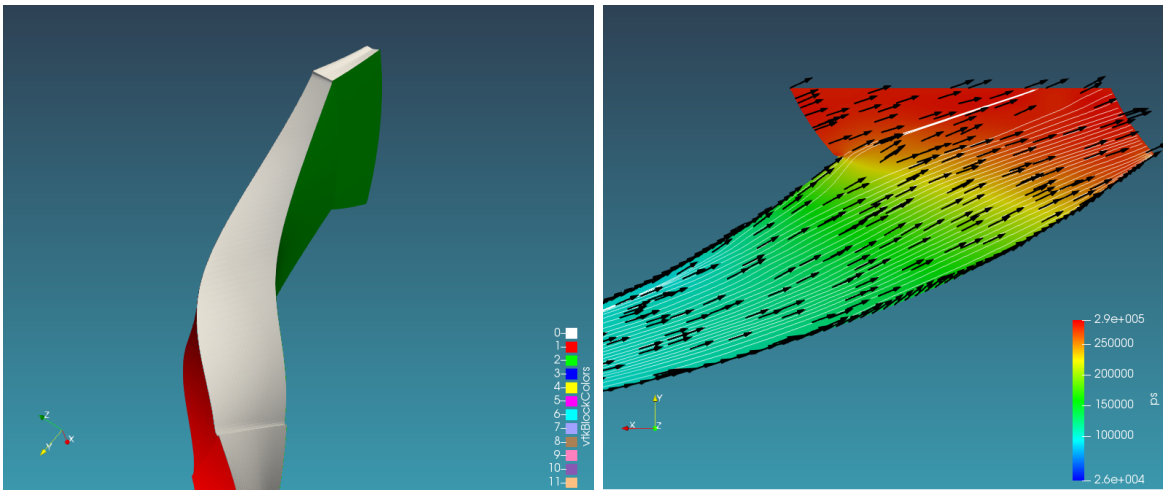


Abbildung 8.6: Links: Geladenes Rechenergebnis aus Multall in Paraview. Rechts: Verlauf der Stromlinien für ein abgewickeltes Profil

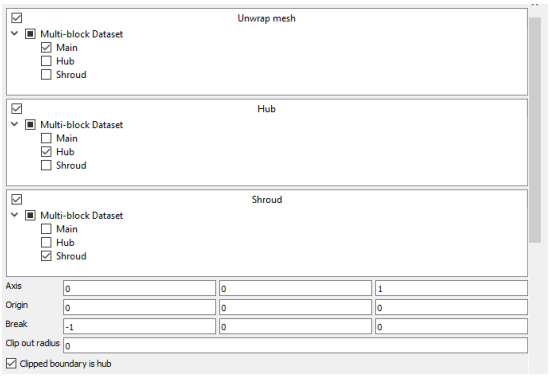


Abbildung 8.7: Optionen des TCDF-Filters „TurboUnwrap“

9 Durchführen von Vergleichsrechnungen

Die Vergleichsrechnungen wurden für Standartbeispiele aus CFturbo durchgeführt. Da CFturbo eine Exportfunktion für diverse CFD-Löser besitzt, mussten diese Daten nur noch für Multall aufbereitet werden. Dafür wurde das in Kapitel 7 beschriebene Konvertierungsprogramm benutzt. Als kommerzielles CFD-Programm wurde SimericsMP gewählt, da dieses sehr performant ist und bei vielen Modellen robust lief. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgte dabei im EnSight-Format, welches ebenfalls mit Paraview geöffnet werden konnte. Anschließend konnte auf diese der „TurboUnwrap"-Filter angewandt werden. Somit konnten für beide Programme vergleichbare Darstellungen erstellt werden.

9.1 CC pi 4.0

9.1.1 Beschreibung des Modells

Als erstes Vergleichsmodell wurde das Laufrad des radialen Verdichters „CC pi 4.0" gewählt. Dieses ist in Abbildung 9.1 zu sehen. Das Laufrad hat 13 Laufschaufeln. Für den Auslegungspunkt wurde ein Massenstrom von $\dot{m} = 4\,\frac{kg}{s}$ und ein Totaldruckverhältnis von $\Pi = 4$ gewählt. Die Drehzahl beträgt $n = 22\,360\,\frac{1}{min}$. Am Eintritt herrscht ein Totaldruck von $p_t = 1.013\,bar$ und eine Totaltemperatur von $T_t = 20\,°C$.

Das ursprüngliche Modell besteht nur aus dem Laufrad. Um ein gleichmäßigeres Strömungsfeld am Ein- und Austritt zu erhalten, wurde jeweils vor und nach dem Laufrad ein schaufelloser Bereich hinzugefügt. Die Auslegung wurde entsprechend mit dem Programm CFturbo vorgenommen.

Durch das strukturierte Gitter ist es in Multall schwer, Vorder- und Hinterkanten zu modellieren, deren Dicke sprunghaft abnimmt. Dies ist besonders bei radialen Verdichtern an der Hinterkante und bei radialen Turbinen an der Vorderkante zu beobachten. Deshalb wurde hier die Hinterkante abgerundet (siehe Kapitel 6). Weiterhin wurde zunächst der Spalt zwischen Gehäuse und Laufrad entfernt.

9.1.2 Konfiguration der Strömungslöser

Bei der Berechnung mittels Multall wurden jeweils 37 Gitterpunkte in Umfangsrichtung und radialer Richtung gewählt. Die Gitterpunktabstände in beide Richtungen wurden automatisch erstellt. Dabei wurde die Zuwachsrate auf 1.2 gesetzt und das maximale Verhältnis der Abstände auf 20.0. Dies hat die Besten Ergebnisse geliefert. Für das Einlesen der Geometrie wurden jeweils 40 Punkte vor und nach dem Laufrad genutzt, 120 Punkte für das Profil. Die Geometrie

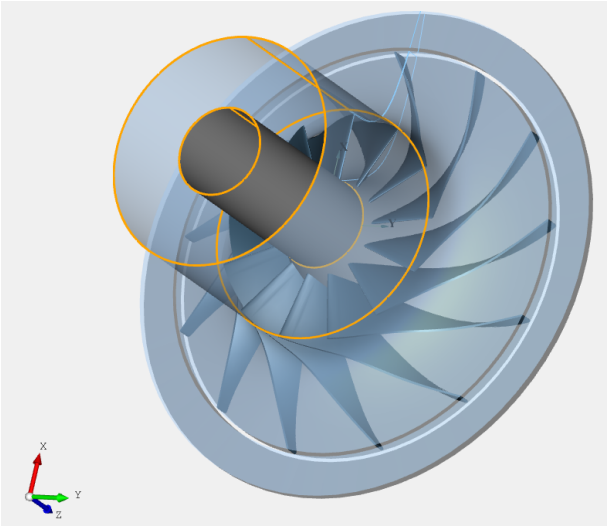


Abbildung 9.1: Darstellung des Modells „CC pi 4.0“

wurde dabei an 5 Schaufelschnitten eingegeben. Anschließend wurden die Gitterpunkte in meridionaler Richtung neu erstellt, dabei wurden wieder jeweils 40 Gitterpunkte für den Bereich vor und hinter dem Laufrad gewählt und 80 Gitterpunkte für das Profil. Dies ergibt insgesamt etwa 200 000 Zellen für das Rechengitter. Als Zeitschrittverfahren wurde ITIMST=3 gewählt, da hier eine Kompression der Strömung zu erwarten ist. Für das Turbulenzmodell wurde das Mischungswegmodell nach dem alten Berechnungsalgorithmus gewählt (ILOS=10). Für die dynamische Viskosität wurde ein Wert von $\eta = 1.853 \times 10^{-5}\, Pa\, s$ eingegeben. Die Eingabedatei für den Auslegungspunkt ist im Anhang beigefügt.

Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde versucht, in SimericsMP eine ähnliche Konfiguration wie in Multall zu wählen. So wurde mit einer konstanten dynamischen Viskosität gerechnet. Am Eintritt waren Totaldruck und -temperatur gegeben, am Austritt der statische Druck. Diese Bedingungen sind auch so in Multall gegeben. Beim Turbulenzmodell gab es allerdings eine Abweichung zu Multall, da in SimericsMP nur 2-Gleichungsmodelle enthalten sind. Hier musste daher auf das K-ε-Modell zurückgegriffen werden. Für die Netzfeinheit wurden die Standartwerte gewählt. Mit diesen Einstellungen wurden knapp 425 000 Zellen für das gesamte Strömungsgebiet erzeugt. Wird diese Zahl auf ein periodisches Segment umgerechnet, sind dies 32 000 Zellen pro Segment. Damit war das Netz in Multall feiner aufgelöst.

9.1.3 Validierung des Rechengebietes in Multall

Im ersten Schritt wurde die eingegebene Geometrie und das daraus erzeugte Gitter mit dem eigentlichen Modell verglichen. Für den Vergleich der eingegebenen Geometrie kann die .stl-Datei benutzt werden, welche vom Konvertierungsprogramm erstellt wird (siehe Kapitel 7). Diese Datei kann in CFturbo mittels „Menu –> Project –> Import 3D geometry“ geladen werden. Das Ergebnis kann in Abbildung 9.2, links, gesehen werden, wobei die eingegebene Geometrie zur besseren Unterscheidung mit rot dargestellt wurde. Im Bereich der Schaufel können mehrere rote und blaue Flächen gesehen werden. Durch diese Farben kann gesehen werden, welche Geometrie weiter oben liegt. Die Bereiche wechseln sich unregelmäßig ab. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Abweichungen zwischen den Geometrien minimal sind. Somit folgt, dass die eingegebene Geometrie und eigentliche Schaufelform sehr gut übereinstimmen.

Um das Rechengebiet zu vergleichen, muss eine entsprechende .stl-Datei mittels Paraview erstellt werden. Dafür muss die Datei „flow_results.vts“ geladen werden. Anschließend müssen die Filter „ExtractSurface“ und „Triangulate“ angewandt werden. Diese benötigen keine weiteren Angaben des Benutzers. Diese Filter werden benötigt, da die Speicherung im .stl Format nur für

Datensätze im „PolyData“ Format möglich ist, die Daten aber bisher nur in strukturierter Form vorliegen. Anschließend kann mit „Menü –> Save Data“ die Geometrie im .stl-Format gespeichert werden. Dafür muss im „Files of type“ dieses ausgewählt werden. Anschließend kann diese Datei wie oben beschrieben in CFturbo geladen werden. Da Paraview die Koordinaten in Meter speichert, CFturbo diese Werte allerdings als Millimeter interpretiert, muss das geladene Modell noch skaliert werden. Dies kann direkt in CFturbo geschehen, dafür muss im entsprechenden Dialog der Faktor 100 000% eingegeben werden.

Abbildung 9.2, rechts, zeigt den Vergleich zwischen Rechennetz und realer Geometrie. Auch hier wechseln sich die roten und blauen Flächen ab. Dies lässt schließen, dass der Strömungskanal zwischen 2 Schaufelreihen sehr genau durch das Rechengebiet abgebildet wird.

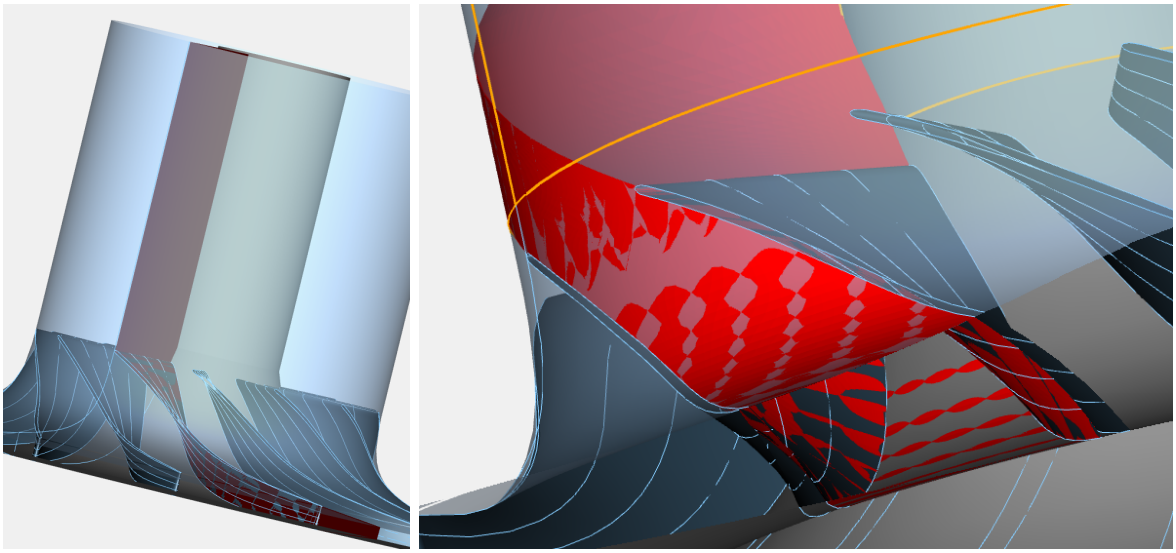


Abbildung 9.2: Links: Vergleich der konstruierten Schaufel in CFturbo und der eingegeben Geometrie für Multall. Rechts: Vergleich des konstruierten Modells in CFturbo und des Rechengebietes

9.1.4 Vergleich der Ergebnisse

Im Auslegungspunkt liefern beide Programme sehr ähnliche Ergebnisse. So sagt SimericsMP einen Massenstrom von $\dot{m} = 5.35\,\frac{kg}{s}$ und Multall einen Massenstrom von $\dot{m} = 5.52\,\frac{kg}{s}$ voraus. Ein Unterschied in der Größenordnung von 3 % ist erwartbar gewesen aufgrund der unterschiedlichen Rechenmodelle in beiden Programmen. In Abbildung 9.3 sind die Drehzahlkennlinien für 100% und 85% der Auslegungsdrehzahl zu sehen. Diese stimmen ebenfalls bei beiden Programmen gut überein. Bei der 85%-Kennlinie gibt es im Bereich der Schluckgrenze eine kleine Abweichung. Die Ursache dafür könnte in den verschiedenen Turbulenzmodellen liegen, da die Versperrung möglicherweise unterschiedlich berechnet wird.

In Abbildung 9.4 ist der Verlauf des Totaldrucks über die Schaufelhöhe dargestellt. An der Schaufelvorderkante stimmen die Verläufe gut überein, Multall zeigt hier einen etwas höheren Druck. Dies lässt schließen, dass die Verluste im Einlauf in SimericsMP höher berechnet wurden. Der Verlauf an der Schaufelhinterkante ist hingegen deutlich verschieden. Auch hier zeigt Multall den höheren Totaldruck. Bei beiden ist aber sichtbar, dass der Druck zum Gehäuse zunimmt. Die Größenordnung und der grobe qualitative Verlauf stimmen aber überein. Auch in der Berechnungszeit ähneln sich beide Programme, beide benötigen etwa 10 Minuten für einen Betriebspunkt.

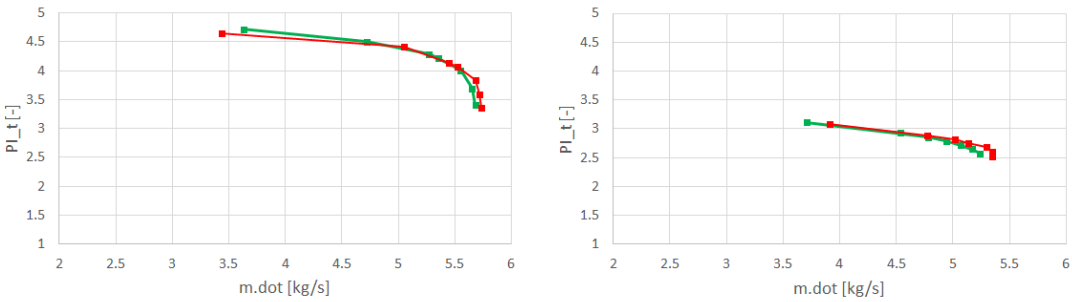


Abbildung 9.3: Darstellung der Kennlinien des Modells „CC pi 40“ für 100% (links) und 85% (rechts) der Auslegungsdrehzahl, ermittelt mit SimericsMP (grün) und Multall (rot)

9.1.5 Vergleich der Ergebnisse für verschiedene Konfigurationen in Multall

In radialer Richtung und Umfangsrichtung wurden jeweils 37 Gitterpunkte gewählt. Grundlegend kann davon ausgegangen werden, dass je mehr Gitterpunkte genommen werden, desto genauer werden die Rechenergebnisse. Allerdings steigt die benötigte Rechenzeit. Während des Auslegungsprozesses ist es wünschenswert, diese Rechenzeit bei einer akzeptablen Lösungsgenauigkeit zu minimieren. Deshalb wurde für die gleiche Eingabedatei verschiedene Konfigurationen gewählt. Die Randbedingungen wurden dabei gleich gelassen. Verglichen wurden dabei sowohl der berechnete Massenstrom und Druckverhältnis als auch die benötigte Rechenzeit.

Folgende Parameter haben einen wesentlichen Einfluss auf die Rechenzeit und Genauigkeit der Ergebnisse:

- Anzahl der Gitterpunkte in radialer Richtung und in Umfangsrichtung
- Abstände der Gitterpunkte in radialer Richtung und in Umfangsrichtung
- Anzahl der Gitterpunkte in meridionaler Richtung
- Wahl des Turbulenzmodells

Um diese Einflüsse zu untersuchen, wurden 12 Testfälle erstellt. Diese können Tabelle 9.1 entnommen werden.

Für eine Verringerung der Anzahl der Gitterpunkte in Umfangsrichtung und radialer Richtung müssen die entsprechenden Werte in Card 13 geändert werden. Für die Testfälle 1) bis 3) wurden diese abwechselnd auf 27 verringert.

Die Abstände der Gitterpunkte in radialer Richtung und Umfangsrichtung wurden automatisch erzeugt. In den Testfällen 4) bis 7) wurden dabei sowohl der Zuwachs der Abstände als auch das maximale Verhältnis in beide Richtungen geändert. In Testfall 8) wurden diese manuell eingegeben. Die entsprechenden Werte wurden dabei aus einer mitgelieferten Beispieldatei entnommen und sind dem Anhang beigefügt.

In den Testfällen 9) und 10) wurde die Anzahl der Gitterpunkte in meridionaler Richtung verändert. Dies geschah durch eine Veränderung der Parameter für die Gitterneugenerierung. Dadurch war sichergestellt, dass exakt die gleiche Geometrie eingegeben wurde.

In den Testfällen 11) bis 12) wurde das Turbulenzmodell geändert. Dabei wurde jeweils eine Rechnung laminar, mit dem Mischungswegmodell mit dem neuen Berechnungsalgorithmus und dem Spalart-Almaras-Turbulenzmodells durchgeführt.

Die Ergebnisse der einzelnen Testfälle sind in Tabelle 9.2 gelistet.

Wie erwartet wird die Berechnungszeit geringer, falls die Anzahl der Gitterpunkte in radialer Richtung und Umfangsrichtung verändert werden (Fall 1) bis 3)). Dabei konnte im Fall 3) eine Verringerung der Berechnungszeit um 40% erreicht werden, allerdings war der berechnete

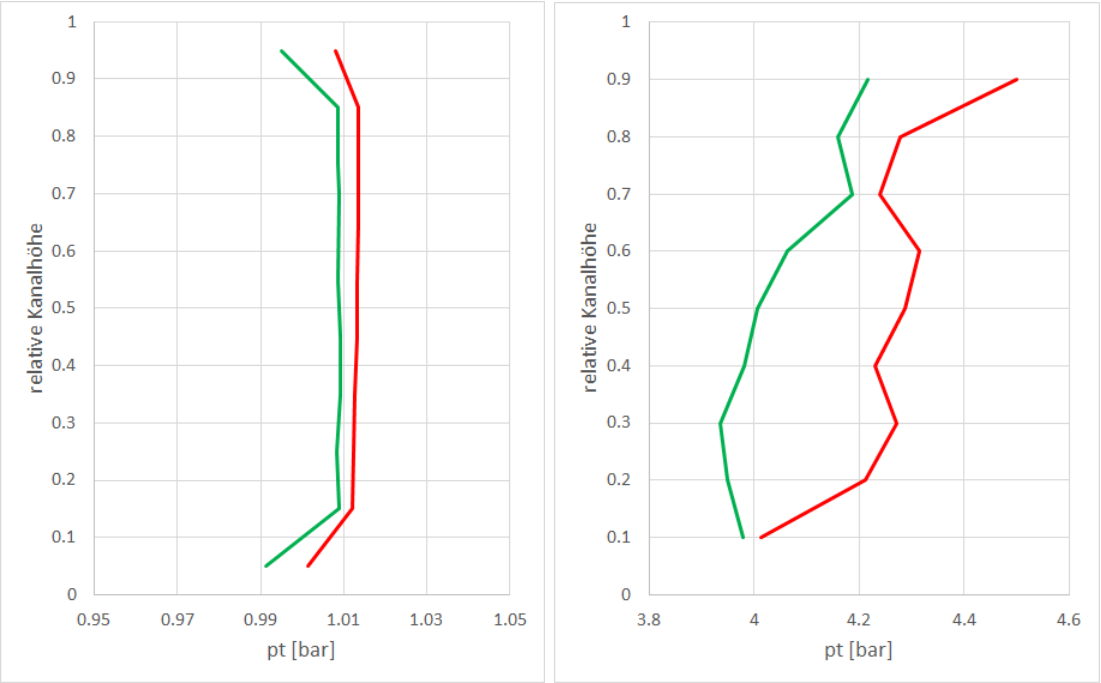


Abbildung 9.4: Verlauf der Totaldrücke über der Kanalhöhe am der Schaufelvorderkante (links) und Schaufelhinterkante (rechts), ermittelt mit SimericsMP (grün) und Multall (rot)

Massenstrom und Totaldruck am Austritt (bei identischen Ranbedingungen) jeweils um etwa 2% höher als in der Referenzrechnung. In der Auslegungsphase sind solche Abweichungen noch akzeptabel.

Ebenfalls einen Einfluss auf das Ergebnis haben die Gitterpunktabstände in radialer Richtung und Umfangsrichtung. In den Fällen 4) und 5) wurde der Zuwachs zwischen den Gitterpunkten auf den Faktor 1.15 verringert, im Fall 5) wurde zusätzlich das maximale Verhältnis auf den Wert 15 gesetzt. In beiden Fällen stimmen die berechneten Massenströme und Totaldrücke am Austritt mit den Werten aus der Referenzrechnung überein (Abweichung $< 0.5\%$). In den Fällen 6) und 7) (Zuwachsrate 1.10, maximales Verhältnis 15 im Fall 7)) sind die Abweichungen deutlich größer (ca. 3%). Dabei stieg bei gleicher Anzahl der Gitterpunkte die Rechenzeit um etwa 35%. Bei der manuellen Eingabe der Gitterpunktabstände wurden hingegen die Ergebnisse der Referenzrechnung fast getroffen (Abweichung $< 0.5\%$), die Berechnungszeit wurde dabei um 3% verringert. Hier wird deutlich, dass die richtige Wahl der Gitterpunktabstände sehr wichtig ist für die Qualität der Ergebnisse. Die Kombination Zuwachsrate 1.20 und maximales Verhältnis 20 hat in diesem Modell gute Ergebnisse geliefert. Allerdings sind während der Untersuchung an anderen Modellen Fälle aufgetreten, wo z. B. die Kombination Zuwachsrate 1.10, maximales Verhältnis 10 (Fall 7)) bessere Ergebnisse geliefert hat. Hier kann zunächst keine allgemeine Aussage getroffen werden, welche Kombination am besten ist. Dies muss für jedes Modell einzeln untersucht werden. Weiterhin wäre zu untersuchen, ob die Gitterpunktabstände, welche im Fall 8) gewählt wurden, bei anderen Modellen ebenfalls gute Ergebnisse liefern.

Auch durch eine Verringerung der Gitterpunkte in meridionaler Richtung (Fall 9)) wird die Berechnungszeit gesenkt (hier: 37%). Allerdings darf vor allem im Profil die Anzahl nicht zu gering sein (siehe Fall 10)), da ansonsten die Rechnung nicht konvergiert. In diesem speziellen Fall lag ECONT (relativer Unterschied der Massenströme zwischen Ebenen von J=const.) bei knapp 2% im Bereich der Schaufelvorderkante. Dies deutet darauf hin, dass diese nicht genau genug abgebildet wurde. Daher sollten für das Profil mindestens 80 Gitterpunkte in meridionaler Richtung benutzt werden.

Testfall	Veränderung zur Referenzkonfiguration
Referenz	IM=KM=37 Gitterpunktabstand in radialer Richtung und Umfangsrichtung: Zuwachs 1.20, maximales Verhältnis 20.0 Anzahl der Gitterpunkte vor der Vorderkante: 40 Anzahl der Gitterpunkte für Schaufel: 80 Anzahl der Gitterpunkte nach der Hinterkante: 40 Turbulenzmodell: Mischlungswegmodell, alter Berechnungsalgorithmus
1)	Verringerung von IM auf 28
2)	Verringerung von KM auf 28
3)	Verringerung von IM und KM auf 28
4)	Veränderung Gitterpunkteabstand in radialer Richtung und Umfangsrichtung (Zuwachs 1.15, maximales Verhältnis 20.0)
5)	Veränderung Gitterpunkteabstand in radialer Richtung und Umfangsrichtung (Zuwachs 1.15, maximales Verhältnis 15.0)
6)	Veränderung Gitterpunkteabstand in radialer Richtung und Umfangsrichtung (Zuwachs 1.10, maximales Verhältnis 20.0)
7)	Veränderung Gitterpunkteabstand in radialer Richtung und Umfangsrichtung (Zuwachs 1.10, maximales Verhältnis 10.0)
8)	manuelle Eingabe der Gitterpunktabstände
9)	Anzahl der Gitterpunkte vor der Vorderkante: 20 Anzahl der Gitterpunkte nach der Hinterkante: 20
10)	Anzahl der Gitterpunkte von der Vorderkante: 20 Anzahl der Gitterpunkte für Schaufel: 40 Anzahl der Gitterpunkte nach der Hinterkante: 20
11)	lamianre Rechnung
12)	Mischungswegmodell, neuer Berechnungsalgorithmus
13)	Spalart-Almaras-Turbulenzmodell

Tabelle 9.1: Konfigurationen der verschiedenen Testfälle

Auch das verwendete Turbulenzmodell hat einen Einfluss auf das Ergebnis. So wurde nach 5000 Iterationsschritten für eine laminare Rechnung (Fall 11)) als auch bei der Wahl des Mischungswegmodells mit dem neuen Berechnungsalgorithmus (Fall 12)) keine Konvergenz erreicht. Bei der Wahl des Spalart-Almaras-Turbulenzmodells wurde der Massenstrom 10% geringer berechnet als bei der Referenzrechnung, der Totaldruck am Austritt war 2.5% kleiner. Da dieses eine längere Berechnungszeit hatte, ist es empfehlenswert, bei den Berechnungen das Mischungswegmodell mit dem alten Berechnungsalgorithmus zu wählen. Dieses ist robust und schnell, liefert aber dennoch gute Ergebnisse.

9.1.6 Modellierung des Spalts

Im der Originalkonfiguration gibt es einen Spalt der Größe $1\,mm$ zwischen Laufrad und Gehäuse. Dieser kann mit Multall ebenfalls berechnet werden. Dafür wurde folgende Konfiguration gewählt:

- Anzahl der Gitterpunkte für Spalt: 4
- Verhältnis Spalthöhe/Kanalöhe an Schaufelvorderkante: 0.0144
- Verhältnis Spalthöhe/Kanalhöhe an Schaufelhinterkante: 0.0633

Dies liefert einen Massenstrom vom $4.60\,\frac{kg}{s}$, während SimericsMP einen Massenstrom von $4.66\,\frac{kg}{s}$ voraussagt. Wie erwartet wird in beiden Programmen der Massenstrom kleiner vorausgesagt als

Testfall	$\dot{m}$ in kg/s	$p_{t,out}$ in Pa	Iterationsschritte	Berechnungszeit in s
Referenz	5.52	411808	3386	664
1)	5.47	410682	3056	445
2)	5.62	416002	4251	594
3)	5.62	420846	3816	392
4)	5.54	414022	3491	665
5)	5.54	414022	3491	666
6)	5.72	423160	4871	917
7)	5.72	423160	4871	896
8)	5.50	409955	3316	622
9)	5.55	412151	2986	417
10)			> 5000	
11)			> 5000	
12)			> 5000	
13)	4.99	399442	4336	1030

Tabelle 9.2: Ergebnisse der Testfälle aus Tabelle 9.1

bei dem Modell mit Spalt. Der Unterschied zwischen den beiden Programmen beträgt etwa 1% und ist damit akzeptierbar. Eine Ursache für den Unterschied könnte darin liegen, dass in Multall die Kante der Schaufel am Spalt aufgrund des strukturiereten Gitters nicht exakt wiedergegeben werden kann (siehe Abbildung 9.5). So wird in in Multall eine Spitze in der Schaufel erzeugt, während in SimericsMP diese Kante glatt war. Weiterhin ist das Rechengitter im Bereich des Spalts in Multall start verzerrt, was sich ebenfalls negativ auf das Rechenergebnis auswirken kann. Eine weitere Ursache für den Unterschied liegt daran, dass die Geometrien nicht zu 100% identisch waren. Wenn in CFturbo ein Spalt zwischen Gehäuse und Laufschaufel eingebaut wird (Main dimensions –> Setup –> Unshrouded), wird dabei die Geometrie der Laufschaufel geringfügig verändert. Für die Eingabe des Spalts in Multall muss die Geometrie der Schaufel bis zum Gehäuse eingegeben werden. Anschließend wird dieses Profil im Bereich des Spalts entfernt. Da die Geometrie bei Vorhandensein eines Spalt nicht bis zum Gehäuse verfügbar ist, musste für Multall das Modell ohne Spalt eingelesen werden. Dadurch waren die Schaufelgeometrien leicht unterschiedlich.

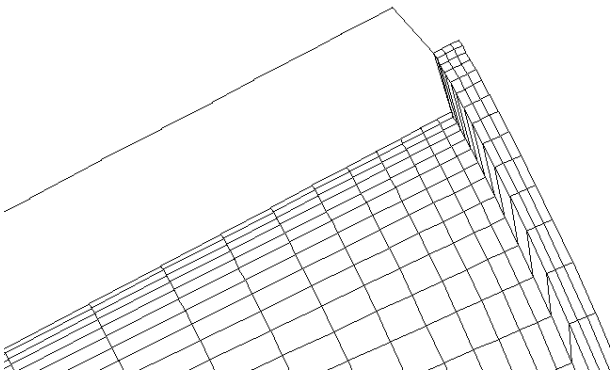


Abbildung 9.5: Rechengitter einer Meridianquerschnittsfläche im Bereich des Spalts

9.2 AF NQ 182

9.2.1 Beschreibung des Modells

Das Modell „AF NQ 182“ ist ein axialer Ventiltor. Dieser ist in Abbildung 9.6 dargestellt. Dieser besteht aus einem Laufrad mit 7 Schaufeln und einem Leitrad mit 9 Schaufeln. Für den Auslegungspunkt wurde ein Volumenstrom von $Q = 3096\,\frac{m^3}{h}$ und ein Totaldruckaufbau von $\Delta p_t = 0.005\,bar$ gewählt. Die Drehzahl beträgt $n = 3500\,\frac{1}{min}$. Der Ventilator fördert Luft, dabei herrscht am Eintritt eine Totaltemperatur von $T_t = 20°C$ und ein Totaldruck von $p_t = 1.0\,bar$.

Im ursprünglichen Modell beginnt die Nabe erst kurz vor dem Laufrad (siehe Abbildung 9.7). Durch das strukturierte Gitter in Multall ist es schwierig, den Beginn der Nabe darzustellen, da sich hier der Radius der Nabe stark ändert. Weiterhin ist es schwierig den Bereich ohne Nabe zu modellieren, da Multall davon ausgeht, dass der innere eingegebene Schnitt auf einer Nabe liegt. Deshalb wurde diese Komponente entfernt. Weiterhin war angedacht, den Bereich vor dem Laufrad und nach dem Leitrad zu erweitern um ein ausgeglicheneres Strömungsfeld zu erhalten. Dies führte allerdings zu Stabilitätsproblemen bei Multall, sodass darauf verzichtet wurde. Weiterhin wurde auch hier der Spalt zwischen Laufrad und Gehäuse entfernt.

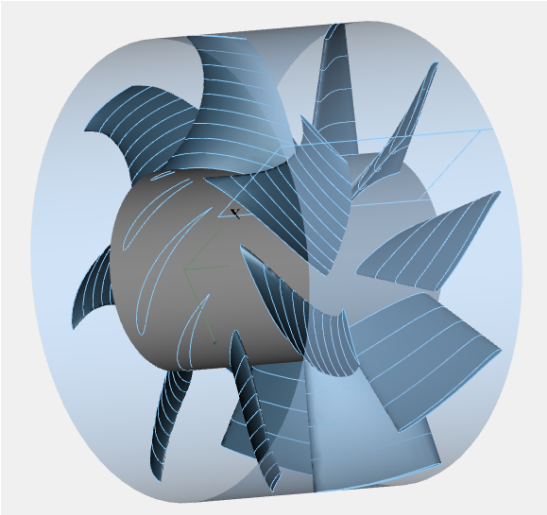


Abbildung 9.6: Darstellung des Modells „NQ 182“

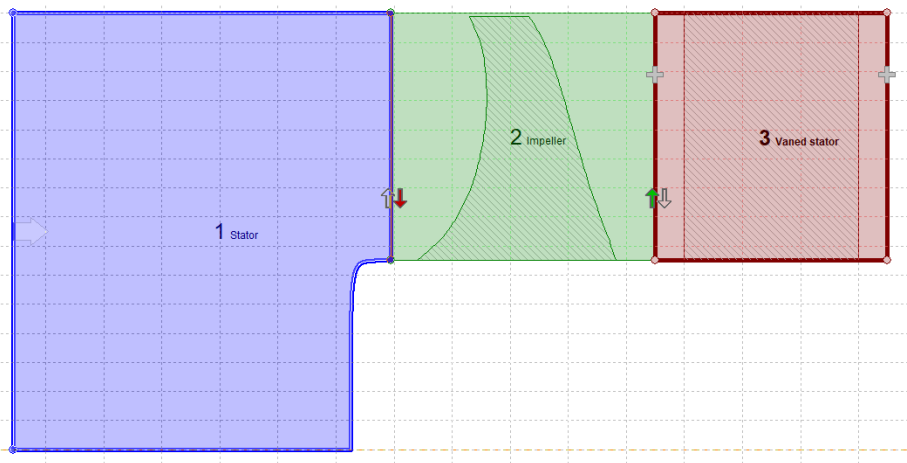


Abbildung 9.7: Originale Konfiguration des Modells „NQ 182“ im Meridianschnitt, die Komponente „Stator“ wurde für die Berechnungen entfernt

9.2.2 Konfiguration der Strömungslöser

Für das Gitter in Multall wurden jeweils 37 Gitterpunkte in radialer Richtung und Umfangsrichtung gewählt. In meridionaler Richtung wurden für jede Schaufelreihe 20 Gitterpunkte vor und nach der Schaufel und 80 Gitterpunkte für die Schaufel bei der Eingabe der Geometrie gewählt. Anschließend wurde bei den Berechnungen die Abstände in meridionaler Richtung neu generiert, da die Berechnungen sonst nicht konvergiert sind. Das Rechengebiet hatte damit in meridionaler Richtung eine Ausbreitung von 204 Gitterpunkten. Durch den geringen Druckaufbau kann die Strömung als inkompressibel betrachtet werden. Deshalb wäre das Zeitschrittverfahren ITIMST=5 oder ITIMST=6 prädestiniert gewesen für dieses Modell. Allerdings erzeugten diese bereits nach wenigen Iterationschritten (<200) „NaN"-Zahlen, wodurch die Rechnung abgebrochen ist. Es konnte keine Konfiguration gefunden werden, mit denen die Rechnungen mit diesen Zeitschrittverfahren konvergiert sind. Dadurch musste wieder auf das Zeitschrittverfahren ITIMST=3 zurückgegriffen werden.

Die Konfiguration von SimericsMP erfolgte ähnlich wie bei der Berechnung des Modells „CC pi 4.0". Es wurde eine konstante dynamische Viskosität gesetzt. Als Randbedingungen wurden der Totaldruck und die Totaltemperatur am Eintritt und der statische Druck am Austritt gesetzt. Auch hier wurde das K-ϵ-Turbulenzmodell gewählt. Mit den Standarteinstellungen von von SimericsMP zur Netzfeinheit wurden insgesamt 825 000 Zellen erstellt. Mit der gewählten Auflösung in Multall wären für die Darstellung des Volmodells insgesamt etwa 2 225 000 Zellen nötig gewesen. Somit war auch hier das Netz in Multall feiner aufgelöst.

9.2.3 Validierung des Rechengebietes in Multall

Bevor die Ergebnisse der einzelnen Strömungslöser verglichen wurden, wurde auch hier zunächst das Rechengebiet verglichen. Das Vorgehen ist dabei zum vorherigen Modell identisch und ist im Abschnitt 9.1.3 beschrieben.

Wie in Abbildung 9.8 und 9.9 erkennbar ist, entspricht die eingegebene Geometrie in Multall in sehr guter Näherung der Originalgeometrie und wird darüber hinaus gut vom Rechengebiet abgebildet.

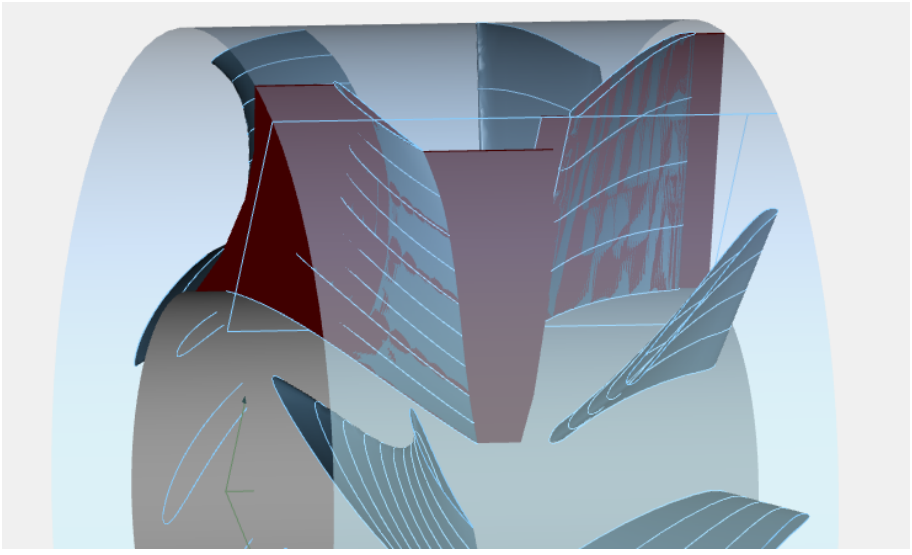


Abbildung 9.8: Vergleich der konstruierten Schaufel und der eingegebenen Geometrie in Multall

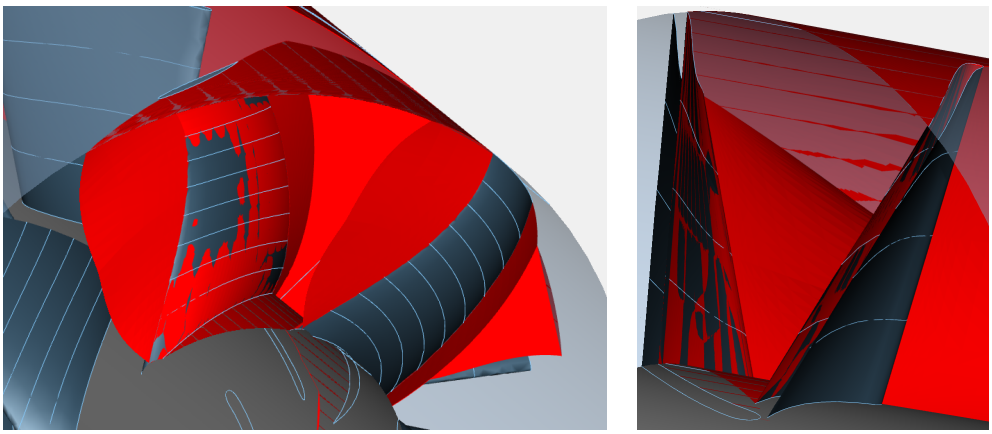


Abbildung 9.9: Vergleich des konstruierten Modells und des Rechengebietes für Laufrad (links) und Leitrad (rechts)

9.2.4 Vergleich der Ergebnisse

Die erzeugten Drehzahlkennlinien für 100% und 75% der Nenndrehzahl sind in Abbildung 9.10 dargestellt. Da der Ventilator einen geringen Druckaufbau leistet, wurde die y-Achse entsprechend angepasst, sodass diese bei einem Totaldruckverhältnis von 1.0 beginnt. Die Drehzahlkennlinien liegen nahe beieinander. Für die Nenndrehzahl gibt es im Bereich der Pumpgrenze allerdings eine größere Abweichung. So wird der Massenstrom bei der Auslegungsdrehzahl und bei einem Totaldruckverhältnis von $\Pi_t = 1.00485$ in Multall 10% kleiner geschätzt als in SimericsMP. Im Kennfeld der 75%-Drehzahl verläuft die durch Multall erzeugte Kurve etwas flacher. Dennoch liegen die Ergebnisse sehr nah beieinander. Die Darstellung der Abweichungen wird zudem durch die Skalierung der y-Achse begünstigt. In Multall wurden für die Berechnung von einem Betriebspunkt etwa 20-25 Minuten benötigt. Dabei wurden etwa 5500 Iterationsschritte benötigt. Da in diesem Modell der Druckaufbau gering ist, ließe sich die Berechnungszeit bei Verwendung eines Zeitschrittverfahrens für inkompressible Strömungen senken. Diese Berechnungen sind allerdings unter Verwendung dieser abgestürzt. In SimericsMP hat eine Berechnung etwa 15 Minuten gedauert.

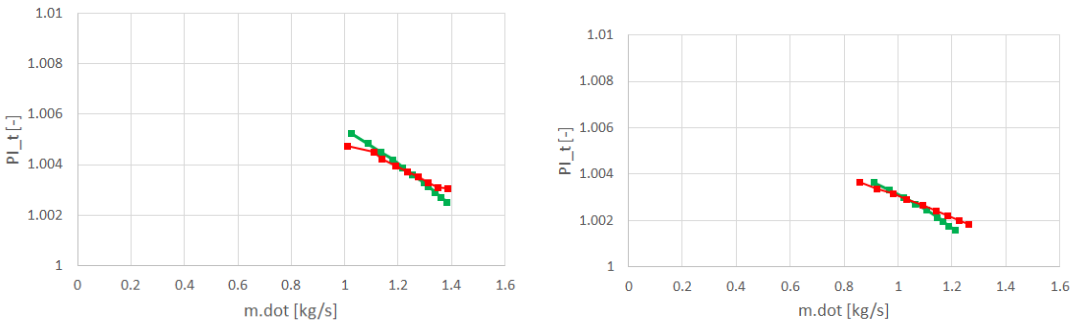


Abbildung 9.10: Darstellung der Kennlinien des Modells „AF NQ 182“ für 100% (links) und 75% (rechts) der Auslegungsdrehzahl, ermittelt mit SimericsMP (grün) und Multall (rot)

10 Einschätzung des Systems

10.1 Robustheit des Systems, Rechenzeit und Lösungsqualität

Durch den Einsatz eines strukturierten Gitters sind nur wenige Parameter notwendig, um dieses zu beschreiben. Dadurch wird das Gitter in kurzer Zeit mit einer hohen Qualität generiert. Werden die weiteren Parameter richtig gewählt, so wird die Strömung durch die Maschine schnell berechnet.

Das Finden der richtigen Parameter kann aber teilweise schwierig sein. Wie in Abschnitt 9.1.5 angedeutet, kann schon die Änderung der Gitterpunktabstände in radialer Richtung und in Umfangsrichung das Ergebnis und die Rechenzeit maßgeblich beeinflussen. Auch gibt es keine universelle Einstellung, die für jedes Problem gute Ergebnisse liefert. Für die richtige Wahl der Parameter ist somit eine gewisse Erfahrung notwendig. Diese kann nur dadurch aufgebaut werden, indem das Programm über einen längeren Zeitraum benutzt wurde und damit mehrere verschiedene Modelle gerechnet wurden.

Für die untersuchten Modelle war es generell schwierig, die richtige Konfiguration zu finden. Beispielsweise war angedacht, das Abströmgebiet beim Modell „CC 40“ bis zum Radius $r = 310\,mm$ zu modellieren. Da dies aber keine stabile Rechnung in Multall möglich machte, musste dieses auf einen Radius von $r = 250\,mm$ verkleinert werden. Beim Modell „NQ 182“ wurden überhaupt keine Abströmgebiete aus den gleichen Gründen eingebaut. Obwohl die Strömung inkompressibel ist, war eine Rechnung mit einem dafür eigentlich geeigneten Zeitschrittverfahren nicht möglich. Die Rechnungen sind dabei nach wenigen Schritten abgestürzt. Somit musste das Zeitschirttverfahren ITIMST=3 gewählt werden. Wurde ein Punkt gerechnet, der außerhalb der Betriebsbereiches liegt, so verlief die Rechnung am Anfang ohne Probleme. Der durchschnittliche Fehler und der Kontinuumsfehler nahmen beide mit einer akzeptablen Rate ab. Erst nach etwa 3500 Zeitschritten wurden diese größer, die Rechnung ist anschließend nach etwa 5500 Zeitschritten abgestürzt. Die Erwartung wäre gewesen, dass das Programm entweder gleich am Anfang abstürzt oder dieses bis zum Erreichen der maximalen Iterationsschrittanzahl läuft, ohne dabei das Konvergenzkriterium zu erreichen.

Weiterhin sind während der Benutzung des Programms weitere unerwünschte Phänomene aufgetreten. So wurde ein axialer Ventilator mit dem Zeitschrittverfahren ITIMST=5 (inkompressibel) gerechnet. Der Startwert für die meridionale Geschwindigkeit wurde dabei auf $V_{m,in} = 10.0\,\frac{m}{s}$ gesetzt. Das Modell konvergierte nach 4316 Iterationsschritten. Anschließend wurde die meridionale Geschwindigkeit erhöht auf $V_{m,in} = 12.166\,\frac{m}{s}$. Diese kleine Änderung der Startlösung hatte zur Folge, dass die Berechnung nach 146 Iterationsschritten abgestürzt ist und somit kein Ergebnis geliefert hat. Dies ist umso erstaunlicher, da die Eingabe der meridionalen Geschwindigkeit nur eine Startlösung darstellt und bereits eine kleine Änderung zum Absturz des Programms geführt hat. Bei Benutzung des Zeitschrittverfahren ITIMST=3 lief das Programm hingegen für

beide Fälle ohne Probleme.

In einem weiteren Beispiel wurde durch das selbst geschriebene Konvertierungsprogramm, welches die CFturbo-Modelle für Multall aufbereitet, eine fehlerhafte Geometrie an der Hinterkante erzeugt (Abbildung 10.1, links). Dieser Fehler ist zunächst nicht aufgefallen, da die Rechnungen konvergiert sind. Nur die Divergenz zwischen den Auslegungsgrößen und den berechneten Strömungsgrößen in Multll ließ einen Fehler erahnen. Ihn zu detektieren war allerdings schwierig, da dessen Ursache theoretisch überall hätte liegen können. Erst nach einer Kontrolle des Rechennetzes wurde der offensichtliche Fehler entdeckt. Nachdem dieser behoben wurde (Abbildung 10.1, Mitte), konnten die Rechnungen das Konvergenzkriterium allerdings nicht mehr nicht erfüllen. Erst durch die Generierung des CUSP (Abbildung 10.1, rechts) konnte Konvergenz erreicht werden.

Diese zwei Beispiele verdeutlichen, dass bereits kleinste Änderungen in der Eingabe einen großen Einfluss auf das Verhalten von Multall haben können. Da Multall darauf ausgelegt ist, in Kombination mit Meangen und Stagen zu arbeiten, treten solche Fehler möglicherweise seltener auf, falls der Entwurfsprozess mit diesen Programmen erfolgt.

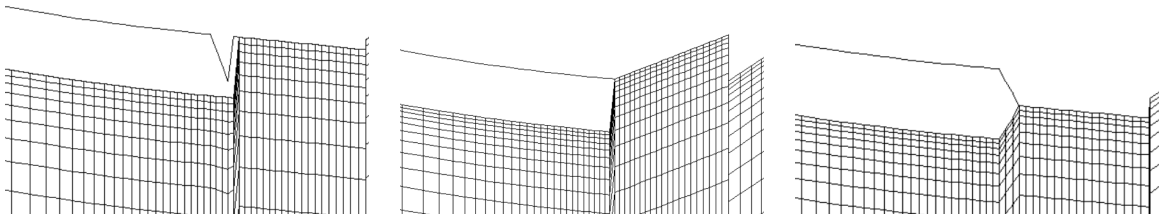


Abbildung 10.1: Fehlerhafte Eingabe der Schaufelgeometrie (links, konvergiert), korrigierte Eingabe (Mitte, keine Konvergenz), korrigierte Eingabe und Erzeugung des CUSP (rechts, konvergiert)

Falls die Konfiguration der Eingabedatei optimal ist, liefert das Programm gute Ergebnisse. Drehzahlkennlinien können gut vorausgesagt werden. Dabei beträgt die Rechenzeit um die 15 Minuten pro Schaufelreihe. Eine Verringerung der Rechenzeit lässt sich dadurch erreichen, dass das Rechengitter gröber erzeugt wird. Dies ist durch wenige Änderungen in der Eingabedatei möglich und die dadurch entstehenden Abweichungen sind in der Regel vertretbar.

10.2 Art und Umfang der Schnittstellenentwicklung in CFturbo zur Anbindung an Multall

Wie die Beispiele gezeigt haben, ist es prinzipiell möglich, Modelle mit Multall zu berechnen, die mittels CFturbo erstellt wurden. Es ist zudem weitaus einfacher, einen bereits vorhandenen Strömungslöser anzubinden als eine eigene CFD-Software zu schreiben. Weiterhin sollte davon abgesehen werden, den vorhandenen Code in eine andere Programmiersprache umzuschreiben. Dadurch könnte zwar eine vollständige Integration des Strömungslösers in CFturbo erreicht werden, allerdings würden damit einige Nachteile einhergehen. Da Multall in Fortran geschrieben ist, geht das Programm bereits effizient mit den vorhanden Ressourcen um. Durch eine Parallelisierung kann eine weitere Verbesserung der Auslastung erreicht werden. Ein weiterer Nachteil wäre die Gefahr, dass beim Umschreiben Fehler passieren, die schwer zu entdecken sind. Zudem wäre die Integration zukünftiger Updates von Multall erschwert.

Für die Erstellung einer Eingabedatei für Multall von CFturbo-Modellen wurde das Programm „CFturbo to Multall Converter“ geschrieben. Teile von diesem können in CFturbo wiederverwendet werden, wenn Multall angebunden wird. Für die Erzeugung der Geometrie wird eine .xml-Datei eingelesen. Dies wäre bei einer Anbindung von Multall nicht mehr nötig, da CFturbo

diese Profildaten intern gespeichert hat und diese Daten nutzen kann.

Bevor eine Integration von Multall an CFturbo erfolgt, müssen noch folgende Punkte geklärt werden:

- Berechnung von Voluten und Splitterblades. Durch die Verwendung des strukturierten Gitters können beide Elemente nicht mit Multall berechnet werden.
- Automatische Generierung des Einlaufgebietes und des Auslaufgebietes. Diese werden benötigt, um die Konvergenz der Rechnung zu ermöglichen. Diese müssen nur für Multall in der Eingabedatei erstellt werden und müssen richtig konfiguriert sein, da sonst möglicherweise keine Konvergenz erreicht wird.
- Nutzerfreundliche Darstellung der Ausgabe. Bisher wird die Ausgabe nur in der Konsole getätigt. Bei einer Anbindung an CFturbo müsste diese entsprechend angepasst werden, damit der Benutzer über den Fortschritt der Berechnung informiert wird.
- Eingabe der Spaltgeometrie. Um einen Spalt in Multall darzustellen, muss das Schaufelprofil bis zum Gehäuse/Nabe eingegeben werden. Anschließend wird diese um die Spalthöhe verkleinert. In CFturbo müsste die Schaufel zunächst bis zum Gehäuse/Nabe interpoliert werden, bevor die Geometrie eingegeben wird.

11 Schlussfolgerung und Ausblick

11.1 Zusammenfassung

Mit Multall hat der Ingenieur ein weiteres Programm zur Verfügung, welches die Strömung in einer Turbomaschine berechnen kann. Dieses wird als Open-Source-Software kostenlos zur Verfügung gestellt. Somit hat jeder Ingenieur die Möglichkeit, dieses zu benutzten. Da der Quellcode des Programms bekannt und einsehbar ist, lässt sich Multall sehr einfach an die eigenen Bedürfnisse anpassen. So können die Ergebnisse in ein Format geschrieben werden, welches mit den vorhandenen Mitteln des Benutzers ausgewertet werden kann (z. B. Paraview, TCFD). Multall kann prinzipiell auch verwendet werden, um die Strömung durch Turbomaschinen, welche mit CFturbo konstruiert wurden, zu berechnen.

Die Berechnungen werden auf einem strukturierten Gitter durchgeführt, wobei eine Finite-Volumen-Methode mit periodischen Randbedingungen angewendet wird. Die Turbulenz kann entweder durch ein Mischungswegmodell oder durch das Spalart-Almaras-Turbulenzmodell dargestellt werden. Der Informationsaustausch findet durch die Mischungsebenen statt, die im Programm gesondert behandelt werden. Multall bietet darüber hinaus eine Vielzahl an weiteren Funktionalitäten wie die Modellierung des Spalts.

Multall ist auf allen Computern mit einem Fortran77 Compiler lauffähig. Für Windows wird ein solcher Compiler durch das Projekt „MinGW“ bereitgestellt. Bevor der Quellcode auf Windows kompiliert werden kann, müssen zuvor die Arraygrößen verkleinert werden. Die Rechnung kann anschließend durch einen Kommandozeilenaufruf gestartet werden. Durch eine entsprechend konfigurierte Batch-Datei können so mehrere Rechnungen ohne weitere Aktionen des Benutzers hintereinander laufen.

Die Eingaben für die Geometrie und der Solverparameter erfolgen alle in einer Datei. Diese besteht aus mehreren sogenannten Cards. Die Struktur dieser Eingabedatei ist durch die im Programmpaket mitgelieferten Dateien und Beispielen gut dokumentiert und nachvollziehbar. Änderungen an der Konfiguration sind so einfach durchzuführen, sofern sich der Benutzer mit der Struktur dieser Eingabedatei bekannt macht.

Multall rechnet segmentweise auf einem strukturierten Gitter. Dadurch erfolgt die Gittergenerierung sehr schnell, sodass die eigentlichen Berechnungen ohne große Verzögerung gestartet werden. Weiterhin hat das strukturierte Gitter bei der eingesetzten Finite-Volumen-Methode Vorteile, da unter anderem die benachbarten Zellen schnell bestimmt werden können. Allerdings gibt es dadurch einige Nachteile. So können beispielsweise plötzliche Änderungen der Geometrie (stumpfe Hinterkanten bei radialen Laufrädern) nur sehr schwer dargestellt werden. Weiterhin ist es nicht möglich, mit Multall die Strömung durch Voluten oder Laufräder mit Splitterblades zu berechnen.

Für die Einschätzung der Perfomance wurden Modelle gerechnet, die mit CFturbo erstellt

wurden. Um diese Modelle für Multall aufzubereiten, wurde das Programm „CFturbo to Multall Converter“ erstellt. Dieses liest 2 Dateien ein, die von CFturbo zuvor erstellt werden müssen. Anschließend kann der Benutzer die gewünschten Eingabeparameter einstellen und die Eingabedatei für Multall erstellen. Dies stellt sicher, das eine valide Datei erstellt wird. Teile des Programms können später wiederverwendet werden, falls Multall an CFturbo angebunden wird.

Der Benutzer hat verschiedene Möglichkeiten, um die erhaltenen Ergebnisse aus den Berechnungen von Multall auszuwerten. Informationen über den Konvergenzverlauf können während der Rechnung aus der Kommandozeile entnommen werden. In dieser werden auch regelmäßig der Verlauf der Totaldrücke und Totaltemperaturen über die einzelnen Meridianquerschnittsflächen gezeigt. Eine detailierte Analyse kann mit dem mitgelieferten Kommandozeilenprogramm „plotall“ durchgeführt werden. Da dieses einige Nachteile hat, wurde Multall so verändert, dass eine Auswertung in TCFD mit dem Filter „TurboUnwrap“ möglich ist. Dies erleichtert es, Ergebnisse aus verschiedenen Programmen zu vergleichen.

Die 2 berechneten Beispiele in Kapitel 9 zeigen, dass mit Multall brauchbare Aussagen zur Leistungsfähigkeit des Entwurfs getroffen werden können. Diese Ergebnisse stimmen zudem gut mit Ergebnissen eines kommerziellen Strömungslösers überein. Allerdings können bereits kleine Änderungen in der Eingabedatei zu signifikanten Änderungen in den Ergebnisgrößen führen. Teilweise sind Rechnungen abgestürzt, bei denen nur der Startwert für die meridionale Geschwindigkeit am Eintritt geringfügig geändert wurde. Falls die Eingabewerte für das Modell aber richtig angepasst wurden, so laufen die Rechnungen schnell und robust.

11.2 Zukünftige Untersuchungsgebiete

Bisher wurden die Untersuchungen an einem axialen und radialen Verdichter durchgeführt. Es ist allerdings nicht gelungen, ein Modell einer Turbine so zu konfigurieren, dass die Berechnungen konvergiert sind. Hier müsste untersucht werden, wie diese Konfiguration angepasst werden kann, um eine stabile Rechnung zu erhalten.

Während der Auslegung einer Turbomaschine müssen die Ergebnisse nur eine bestimmte Genauigkeit aufweisen. Solange der Fehler nicht zu groß ist und abgeschätzt werden kann, kann die Genauigkeit für eine schnellere Berechnung geopfert werden. Hier könnte eine größere Studie erfolgen. Bespielsweise könnte untersucht werden, wie viele Gitterpunkte benötigt werden, um eine hinreihende Genauigkeit zu erreichen. Weiter bietet Multall die Möglichkeit, Q3D (nur eine Zelle in radialer Richtung) und Throughflow (nur eine Zelle in Umfangsrichtung) Berechnungen durchzuführen. Um diese zu benutzen, müssen die Werte in der Eingabedatei entsprechend angepasst werden. Hier könnte auch untersucht werden, wie genau die Berechnungen sind und welcher Zeitvorteil erzielt werden kann.

Falls es eine Anbindung von Multall an CFturbo geben sollte, kann untersucht werden, wie die Berechnungen beschleunigt werden können. Dabei könnte einerseits eine Parallelisierung des Programms zur besseren Ausnutzung der vorhandenen Ressourcen angestrebt werden. Andererseits könnte eine Beschleunigung der Konvergenz durch eine verbesserte Startlösung auf Basis einer potentialtheoretischen Rechnung erfolgen.

11.2.1 Parallelisierung mit OpenMP

Die aktuelle Version von Multall ist sequentiell aufgebaut. Auf einem Computer mit einem i7-4771 Prozessor (4 physische Kerne, 3.50 GHz Grundtaktfrequenz) verbraucht das Programm dabei etwa 16-20% der Prozessorleistung. Somit könnte durch eine Parallelisierung des Programms eine größere Auslastung und damit eine geringere Berechnungszeit erreicht werden. Multall ist in Fortran77 geschrieben, welches seit Jahren nicht mehr gepflegt wird und durch neuere Varianten (z. B. Fortran 2008) ersetzt wurde. Die einzige Parallelisierungsmöglichkeit wäre somit mittel OpenMP. Durch die vielen Schleifen, die in Multall vorhanden sind, ließe sich dies aber einfach

umsetzten.

Um ein Programm mit OpenMP zu erstellen, muss während des Kompilierens die Compileroption „-fopenmp“ verwendet werden. Dies wurde auch für die aktuelle Version von Multall getestet. Da in dieser keine Anweisungen für OpenMP vorhanden sind, sollte diese Compileroption zunächst keinen Einfluss auf den Programmablauf haben. Doch hier gab es unter Windows Probleme. Das Programm ließ sich zwar mit der Compileroption „-fopenmp“ erstellen. Doch während der Berechnungen traten bereits nach 5 Schritten „NaN“-Zahlen auf. Dies war nicht der Fall, wenn das Programm ohne die Compileroption „-fopenmp“ erstellt wurde. Unter Linux hingegen lief das Programm in beiden Varianten identisch.

Bevor eine Parallelisierung mittels OpenMP angestrebt wird, muss zunächst dieses Problem untersucht und gelöst werden.

11.2.2 Beschleunigung der Konvergenz mit Startlösung

Bevor die Berechnung gestartet wird, werden die benötigten Felder mit Startwerten belegt. Mit diesen werden in den Berechnungsschritten die neuen Werte berechnet, bis das Konvergenzkriterium erreicht ist. Multall bietet aber auch die Möglichkeit, Berechnungen fortzuführen. Dabei wird die Datei „flow_out“ eingelesen und für die Initialisierung der Felder benutzt. Diese Datei wird immer beim Beenden der Berechnung erstellt.

Die Möglichkeit wäre nun, eine solche Datei vor dem Starten der Berechnung zu erzeugen. Beispielsweise könnte dafür die Lösung aus einer potentialtheoretischen Betrachtung genutzt werden. Die Arbeitsschritte wären dann:

1. Erstellen der Eingabedatei für Multall
2. Starten der Rechnung zur Generierung des Gitters mit wenigen Rechenschritten (z. B. 10 Rechenschritte)
3. Einlesen der Gittergeometrie
4. Ermittlung der potentialtheoretischen Lösung
5. Projektion der potentialtheoretischen Lösung auf das Gitter
6. Schreiben der Datei „flow_out“
7. Start der eigentlichen Rechnung mit Benutzung der geschriebenen „flow_out“-Datei

Das Gitter kann dabei aus der Datei „grid_out“ gelesen werden, welche beim Start einer Rechnung geschrieben wird. Die Struktur der Dateien kann dem Quellcode entnommen werden. Durch eine Änderung des Quellcodes können diese auch angepasst werden.

Wird dabei angenommen, dass bei der potentialtheoretischen Lösung die Ergebnisse nahe an der Lösung aus der CFD-Simulation liegt, dann sollte die Berechnung schneller konvergieren als bei Benutzung einer Startlösung. Der genaue Effekt wäre dann Gegenstand einer weiteren Studie.

Literaturverzeichnis

[1] John D. Denton. Data input for the program MULTALL OPEN using NEW READIN.

[2] John D. Denton. Multistage turbomaschinery flow calculation program MULTALL OPEN.

[3] John D. Denton. Multall–an open source, computational fluid dynamics based, turbomachinery design system. *Journal of Turbomachinery*, 139(12):121001–121001–12, Sep 2017.

[4] Jochen Froehlich. Vorlesungsunterlagen Turbulente Stroemungen.

[5] Intel. https://software.intel.com/en-us/node/523174.

[6] Kitware, Inc. https://www.vtk.com/wp-content/uploads/2015/04/file-formats.pdf.

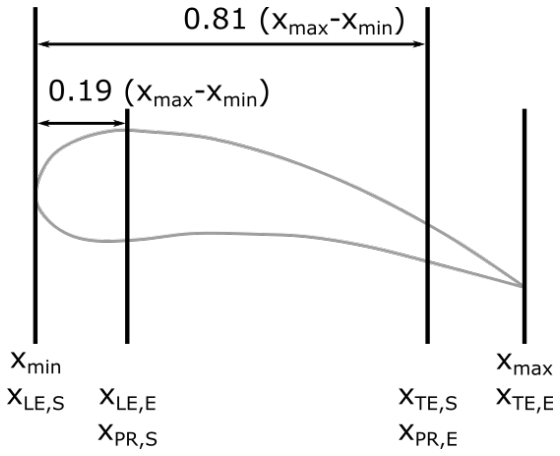
[7] Martin Lange. Vorlesungsunterlagen Radial- und Axialverdichter, 2017.

Anhang

Funktion für die Verteilung der Gitterpunkte

Das Profil einer Schaufel erfährt die größten Veränderungen im Bereich der Vorderkante und der Hinterkante. Beim Einlesen der Profilgeometrie ist daher zu achten, dass möglichst viele Punkte an beiden Kanten liegen, um die Geometrie möglichst genau einlesen zu können. Um später bei der Interpolation des Gitters mögliche Fehler zu vermeiden, wird weiterhin die Forderung gestellt, den Abstand zwischen 2 Gitterpunkten gleichmäßig zu erhöhen und Sprünge zu vermeiden. Um diese Bedingungen zu erfüllen, wurde eine spezielle Funktion erstellt.

Dafür sei angenommen, dass die Vorderkante bei x_{min} und die Hinterkante bei x_{max} liegt. Die Anzahl der einzugebenden Punkte beträgt n_{points}. Diese werden durchgehend mit dem Index i indiziert, beginnend bei 0. Das Profil wird nun in 3 Bereiche unterteilt: Bereich nahe der Vorderkante (LE), nahe der Hinterkante (TE) und der Bereich zwischen den Kanten (PR). Dabei liegt der Bereich LE im Intervall $[x_{min};x_{min} + 0.19\,(x_{max} - x_{min})] = [x_{LE,S}; x_{LE,E}]$, der Bereich PR im Intervall $[x_{min} + 0.19\,(x_{max} - x_{min});\ x_{min} + 0.81\,(x_{max} - x_{min})] = [x_{PR,S}; x_{PR,E}]$ und der Bereich TE im Intervall $[x_{min} + 0.81\,(x_{max} - x_{min});x_{max}] = [x_{TE,S}; x_{TE,E}]$. Um den Bereich an den beiden Kanten darzustellen, werden jeweils $n_{LE} = n_{TE} = 0.27\,n_{points}$ benötigt, die restlichen $n_{PR} = 0.46\,n_{points}$ werden dem Bereich PR zugeordnet.



Für Punkte im Bereich LE wird die axiale Koordinate mittels

$$x_{LE} = x_{LE,S} + (\frac{i}{n_{LE} - 1})^{1.8} * (x_{LE,E} - x_{LE,S})$$

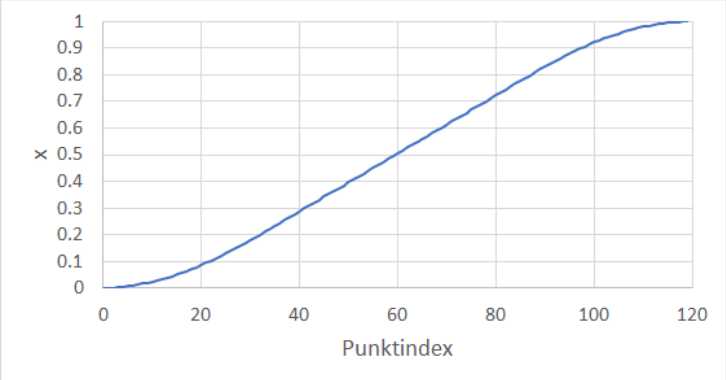
berechnet. Im Bereich PR findet eine lineare Interpolation statt:

$$x_{PR} = x_{PR,S} + \frac{i - n_{LE} + 1}{n_{PR} + 1} (x_{PR,E} - x_{PR,S})$$

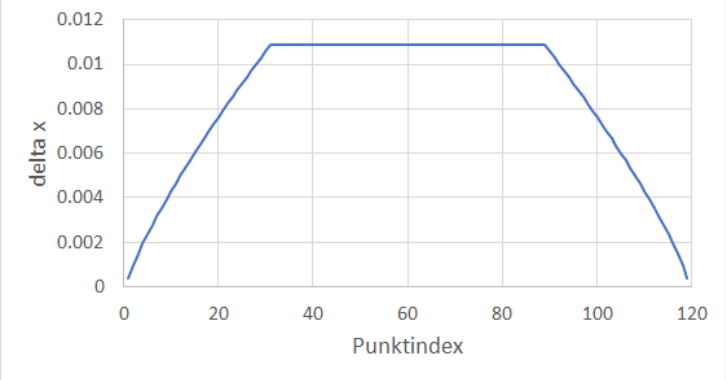
Für den Bereich TE werden die Punkte ähnlich dem Bereich LE berechnet:

$$x_{TE} = x_{TE,S} + (1 - (\frac{i - n_{LE} - n_{PR}}{n_{TE} - 1})^{1.8}) * (x_{TE,E} - x_{TE,S})$$

Mit diesem Vorgehen wird sichergestellt, dass die Punkte zu den beiden Kanten geschoben werden und deren Abstände keine großen Sprünge aufweisen. Für das Intervall $[x_{min}; x_{max}] = [0; 1]$ und 120 Punkte würden diese wie folgt verteilt werden:



Der Verlauf der Abstände zwischen den Punkten sieht dabei wie folgt aus:



Der Vorteil dieser Verteilung ist, dass diese mit nur wenigen Parametern beschrieben werden kann. Es müssen die Anzahl der Punkte in den Bereichen LE und TE (hier je 27% der Gesamtanzahl), die Größe der Bereiche (hier je 19% des Gesamtbereiches) und die Exponenten (hier in beiden Bereichen 1.8) festgelegt werden. Weiterhin ist diese Verteilung auf eine beliebige Gesamtpunktanzahl anwendbar. Somit kann durch wenige Änderungen diese Verteilung an die eigenen Bedürfnisse angepasst werden.

Verwendete Gitterpunktabstände des Testfalls 8) aus Abschnitt 9.1.5

Für die relativen Gitterabstände in radialer Richtung und in Umfangsrichtung wurden folgende Werte genommen:

```
 1.000000  1.250000  1.562500  1.953125  2.441406  3.051758  3.814697  4.768372
 5.960464  7.450581  9.313226 11.641532 14.551915 18.189894 20.000000 20.000000
20.000000 20.000000 20.000000 20.000000 20.000000 20.000000 18.189894 14.551915
11.641532  9.313226  7.450581  5.960464  4.768372  3.814697  3.051758  2.441406
 1.953125  1.562500  1.250000  1.000000
```

Diese wurden der mitgelieferten Beispieldatei „3stg-compr+samods-17.5.dat“ entnommen.

Eingabedatei für das Modell „CC 14“

```
Multall Input file for "CC_pi40_impeller_for_CFD_03_no_tip.cft"
CP AND GA
  1004.50000  1.40000
ITIMST
  3
CFL, DAMPIN, MACHLIM, F_PDOWN
  0.40000   10.00000   2.00000   0.00000
IF_RESTART
  0
NSTEPS_MAX, CONLIM
  5000   0.00500
SFXIN, SFTIN, FAC_4TH, NCHANGE
  0.00500   0.00500   0.80000   1000
NROWS
  1
IM, KM
  37   37
RELATIVE PITCHWISE GRID SPACINGS
       1.20000     20.00000      0.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
       9999.00000   9999.00000
  9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
  9999.00000   9999.00000
  9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
  9999.00000   9999.00000
  9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
  9999.00000   9999.00000
  9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
RELATIVE SPACING OF THE SPANWISE GRID POINTS
       1.20000     20.00000      0.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
       9999.00000   9999.00000
  9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
  9999.00000   9999.00000
  9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
  9999.00000   9999.00000
  9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
  9999.00000   9999.00000
  9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
MULTIGRID BLOCK SIZES
  3   3   3   9   9   9
MULTIGRID TIME STEP FACTORS
  0.40000   0.20000   0.10000
MIXING PLANE MARKER, IFMIX
  0
IFCOOL, IFBLEED, IF_ROUGH
  0   0   0
NUMBER OF BLADE GEOMETRY INPUT SURFACES
  5
IN_PRESS, IN_VTAN, IN_VR, IN_FLOW, IF_REPEAT, RFIN
  0   0   1   0   0   0.50000
IPOUT, SFEXIT, NSFEXIT
  1   0.00000   0
PLATE_LOSS, THROTTLE_EXIT
  0.00000   0.00000
CHOICE OF VISCOUS MODEL
  10   5   0
SETTINGS FOR VISCOSITY LIKE REYNOLDS NUMBER, ETC
  1.853   0.50000   0.00000   1000.00000   0.70000   0.00000
YPLAM and YPTURB
  5.00000   25.00000
ISHIFT, NEXTRAP_LE, NEXTRAP_TE
  2   10   10
STAGE NUMBERS FOR EACH ROW
  1
5 values of NOUT
  100   999999   999999   999999   999999
CHOICE OF VARIABLES TO BE PRINTED OUT
  0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
STREAM SURFACES FOR PRINTED OUTPUT
  0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
BLANK LINE
NEW BLADE ROW DATA
```

```
BLADE ROW TITLE = Radial Impeller
NBLADES IN ROW
  13
JMROW, JLEROW, JTEROW
  160   21   140
KTIP_START, KTIP_END
  0   0
J VALUES FOR BOUNDARY LAYER TRANSITION
  0   0   0   0
NEW GRID CHOICE
  1
PRM FOR ROW AND HUB
  -22360.00200   -22360.00200
JROTHS, JROTHE, JROTTS, JROTTE
  20   141   20   141
PUPROW, PLEROW, PTEROW, PDNROW
  101300.000000000   101300.000000000   269100.000000000   269100.000000000
NSECS_ROW, INSURF
  5   0
IF_CUSP, IF_ANGLES
  0   0
BLANK LINE
New Section #1
  0   0   0
  0.00100   0.00000
  -200.00000 -189.48339 -178.96679 -168.45018 -157.93357 -147.41697 -136.90036
  -126.38375
  -115.86714 -105.35054  -94.83393  -84.31732  -73.80072  -63.28411  -52.76750
  -42.25090
   -31.73429  -21.21768  -10.70108   -0.18447   10.33214   10.46876   10.71856
   11.04204
    11.42510   11.85960   12.34004   12.86238   13.42350   14.02089   14.65245
    15.31644
    16.01134   16.73583   17.48875   18.26906   19.07584   19.90824   20.76549
    21.64691
    22.55183   23.47967   24.42987   25.40192   26.39534   27.40968   28.44451
    29.49944
    30.57409   31.66810   32.78115   33.91290   35.06306   36.23133   37.41744
    38.62112
    39.84213   41.08021   42.33514   43.60669   44.89465   46.19881   47.51897
    48.85495
    50.20655   51.57360   52.95593   54.35336   55.76574   57.19291   58.63472
    60.09101
    61.56166   63.04652   64.54545   66.05833   67.58502   69.12540   70.67936
    72.24677
    74.38647   76.27538   77.95464   79.45035   80.78998   81.98483   83.05949
    84.02999
    84.90101   85.68853   86.40328   87.04816   87.63377   88.16156   88.64341
    89.07849
    89.47486   89.83437   90.15920   90.45492   90.72031   90.96221   91.18217
    91.37958
    91.55803   91.71856   91.86231   91.99175   92.10855   92.21226   92.30426
    92.38581
    92.45858   92.52279   92.57870   92.62771   92.67071   92.70823   92.74002
    92.76699
    92.79003   92.80961   92.82607   92.83929   92.84999   92.85878   92.86593
    92.87163
    92.87555   92.87858   92.88089   92.88242   92.88346   92.88421   92.88453
    92.88481
    92.88491   92.88494   92.88497   92.88498   92.71596   92.54694   92.37792
    92.20890
    92.03988   91.87086   91.70184   91.53282   91.36380   91.19478   91.02576
    90.85674
    90.68772   90.51870   90.34968   90.18066   90.01164   89.84262   89.67360
    89.50457
  0.00100   0.00000
    0.57621   0.57621   0.57621   0.57621   0.57621   0.57621   0.57621   0.57621
    0.57621   0.57621   0.57621   0.57621   0.57621   0.57621   0.57621   0.57621
    0.57621   0.57621   0.57621   0.57621   0.57621   1.35177   1.94805   2.53528
    3.07346   3.62271   4.17453   4.69110   5.20525   5.71870   6.24055   6.78407
    7.34774   7.92931   8.52525   9.14220   9.76968  10.41585  11.07194  11.74431
```

```
 12.42814  13.12547  13.83620  14.55802  15.29368  16.04122  16.80152  17.57516
 18.36147  19.16149  19.97541  20.80367  21.64743  22.50664  23.38165  24.27464
 25.18622  26.11662  27.06686  28.03969  29.03786  30.06103  31.11097  32.18961
 33.29955  34.44509  35.63050  36.85801  38.13247  39.45727  40.83915  42.28409
 43.79824  45.39239  47.07556  48.86643  50.77314  52.81196  54.99730  57.37807
 60.92934  64.43710  67.91069  71.35742  74.78065  78.18347  81.56881  84.93969
 88.29507  91.63614  94.96574  98.28010 101.58219 104.86906 108.14440 111.40393
114.64978 117.88004 121.09338 124.29206 127.47125 130.63196 133.77470 136.89600
139.99553 143.07488 146.12971 149.15863 152.16083 155.13819 158.08626 161.00367
163.88882 166.74017 169.55596 172.33545 175.07690 177.77764 180.43541 183.04798
185.61288 188.12752 190.59015 192.99739 195.34564 197.63130 199.85026 201.99741
204.07108 206.06429 207.97120 209.78509 211.49791 213.05094 214.35526 215.40571
216.17185 216.65893 216.78894 216.36089 219.84070 223.31637 226.78811 230.25612
233.72057 237.18164 240.63948 244.09424 247.54605 250.99506 254.44138 257.88514
261.32643 264.76537 268.20206 271.63658 275.06904 278.49950 281.92806 285.35478
0.00100
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 1.24805 2.08230 2.78800
3.35005 3.84039 4.26282 4.59591 4.83853 5.03326 5.17903 5.26400
5.30832 5.32021 5.31708 5.32134 5.32264 5.33115 5.33353 5.34347
5.34972 5.36053 5.37177 5.38243 5.39659 5.40969 5.42422 5.43993
5.45553 5.47241 5.48978 5.50780 5.52716 5.54628 5.56554 5.58660
5.60820 5.62890 5.64955 5.67178 5.69713 5.72112 5.74440 5.76756
5.79027 5.81439 5.84157 5.86950 5.89830 5.92779 5.95677 5.98676
6.01574 6.04404 6.07363 6.11143 6.15118 6.19520 6.22061 6.26701
6.32290 6.37318 6.41497 6.45112 6.47908 6.49782 6.50826 6.51390
6.51011 6.49961 6.48439 6.46010 6.43401 6.39946 6.36466 6.32294
6.28033 6.23459 6.18567 6.13948 6.08720 6.03553 5.98566 5.93198
5.87945 5.83080 5.77998 5.72849 5.67779 5.63132 5.58505 5.53780
5.49143 5.44595 5.40138 5.35885 5.31765 5.27721 5.23756 5.19851
5.16000 5.12212 5.08577 5.05060 5.01646 4.98348 4.95166 4.91998
4.88771 4.85911 4.83081 4.80373 4.77786 4.70412 4.50515 4.15649
3.59001 2.80545 1.73990 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00100   0.00000
 45.00000  45.00000  45.00000  45.00000  45.00000  45.00000  45.00000  45.00000
 45.00000  45.00000  45.00000  45.00000  45.00000  45.00000  45.00000  45.00000
 45.00000  45.00000  45.00000  45.00000  48.68936  48.73852  48.82854  48.94569
 49.08444  49.24183  49.41593  49.60530  49.81021  50.02836  50.25900  50.50323
 50.75925  51.02691  51.30622  51.59725  51.89912  52.21284  52.53678  52.87356
 53.22033  53.57933  53.94908  54.32991  54.72365  55.12855  55.54784  55.98039
 56.42490  56.88424  57.35846  57.84645  58.35006  58.87248  59.41138  59.96766
 60.54462  61.14440  61.76551  62.40931  63.07736  63.77476  64.50212  65.26069
 66.05404  66.88420  67.75305  68.66584  69.62784  70.64065  71.71435  72.85051
 74.05784  75.34674  76.72154  78.19300  79.77464  81.47783  83.33506  85.35211
 88.38453  91.39137  94.37239  97.32738 100.25610 103.15831 106.03378 108.88224
111.70345 114.49713 117.26301 120.00081 122.71024 125.39100 128.04277 130.66524
133.25808 135.82094 138.35346 140.85529 143.32604 145.76531 148.17270 150.54776
152.89007 155.19915 157.47451 159.71566 161.92206 164.09315 166.22835 168.32704
170.38859 172.41231 174.39747 176.34331 178.24903 180.11376 181.93657 183.71649
185.45244 187.14329 188.78780 190.38463 191.93231 193.42922 194.87357 196.26340
197.59645 198.87021 200.08176 201.22775 202.30417 203.30621 204.22785 205.06137
205.79622 206.41676 206.89597 207.15805 209.30015 211.44225 213.58434 215.72644
217.86854 220.01064 222.15273 224.29483 226.43693 228.57903 230.72112 232.86322
235.00532 237.14742 239.28951 241.43161 243.57371 245.71581 247.85790 250.00000
BLANK LINE
New Section #2
  0   0   0
  0.00100   0.00000
  -200.00000 -189.48623 -178.97246 -168.45868 -157.94491 -147.43114 -136.91737
  -126.40359
  -115.88982 -105.37605  -94.86228  -84.34850  -73.83473  -63.32096  -52.80719
  -42.29341
   -31.77964  -21.26587  -10.75210   -0.23832   10.27545   10.40562   10.64363
   10.95184
    11.31682   11.73081   12.18858   12.68626   13.22090   13.79009   14.39184
    15.02449
    15.68659   16.37688   17.09426   17.83775   18.60644   19.39955   20.21635
    21.05616
```

```
 21.91837   22.80241   23.70777   24.63394   25.58047   26.54692   27.53291
 28.53805
 29.56197   30.60435   31.66486   32.74319   33.83906   34.95219   36.08232
 37.22919
 38.39256   39.57220   40.76790   41.97943   43.20660   44.44921   45.70706
 46.97998
 48.26778   49.57031   50.88739   52.21886   53.56457   54.92438   56.29813
 57.68570
 59.08693   60.50170   61.92988   63.37135   64.82598   66.29366   67.77427
 69.26770
 71.11144   72.75023   74.20428   75.50698   76.67951   77.73766   78.68986
 79.55536
 80.34079   81.05711   81.71125   82.30604   82.85230   83.35201   83.81095
 84.23336
 84.61974   84.97636   85.30250   85.60303   85.88110   86.13608   86.37116
 86.58739
 86.78618   86.96792   87.13578   87.29071   87.43252   87.56260   87.68169
 87.79116
 87.89158   87.98318   88.06704   88.14415   88.21525   88.28035   88.33992
 88.39483
 88.44566   88.49279   88.53647   88.57674   88.61418   88.64936   88.68250
 88.71375
 88.74306   88.76893   88.79300   88.81523   88.83598   88.85518   88.87268
 88.88884
 88.90365   88.91648   88.92642   88.93178   88.85336   88.77494   88.69652
 88.61810
 88.53968   88.46126   88.38284   88.30442   88.22600   88.14758   88.06916
 87.99074
 87.91231   87.83389   87.75547   87.67705   87.59863   87.52021   87.44179
 87.36337
0.00100   0.00000
  0.73036   0.73036   0.73036   0.73036   0.73036   0.73036   0.73036   0.73036
  0.73036   0.73036   0.73036   0.73036   0.73036   0.73036   0.73036   0.73036
  0.73036   0.73036   0.73036   0.73036   0.73036   1.46570   2.11988   2.75569
  3.38483   3.96767   4.55922   5.14334   5.72601   6.33856   6.97848   7.64059
  8.32615   9.03264   9.75817  10.50367  11.26599  12.04313  12.83899  13.64473
 14.46757  15.30441  16.15295  17.01648  17.89271  18.78108  19.68362  20.59969
 21.52794  22.47071  23.42794  24.39962  25.38632  26.38904  27.40829  28.44470
 29.50006  30.57547  31.67192  32.79066  33.93315  35.10124  36.29689  37.52593
 38.78844  40.08696  41.42650  42.80998  44.24311  45.73135  47.27991  48.89785
 50.59221  52.37453  54.26188  56.26353  58.39225  60.66852  63.13521  65.79391
 69.25764  72.78138  76.25631  79.68946  83.08616  86.45092  89.78945  93.10064
 96.38984  99.65622 102.90158 106.12480 109.32864 112.51123 115.67397 118.81612
121.93634 125.03691 128.11465 131.16887 134.20149 137.20956 140.19248 143.15090
146.08360 148.98864 151.86491 154.71177 157.52960 160.31643 163.07066 165.79096
168.47604 171.12475 173.73615 176.30865 178.84045 181.33000 183.77560 186.17532
188.52716 190.82888 193.07805 195.27205 197.40829 199.48623 201.50008 203.44506
205.31985 207.11920 208.83805 210.47064 212.00803 213.41216 214.58823 215.53410
216.22421 216.66498 216.78795 216.42273 219.90359 223.38033 226.85316 230.32226
233.78781 237.24998 240.70893 244.16480 247.61773 251.06786 254.51531 257.96020
261.40263 264.84272 268.28055 271.71623 275.14984 278.58146 282.01117 285.43906
0.00100
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 1.29784 2.18342 2.91128
3.51590 3.98134 4.37133 4.67840 4.88656 5.06117 5.18218 5.21974
5.22115 5.20502 5.18984 5.17857 5.17064 5.16292 5.15488 5.14700
5.14187 5.13613 5.13382 5.13218 5.13015 5.13055 5.13161 5.13319
5.13547 5.13916 5.14356 5.14862 5.15464 5.16120 5.16838 5.17622
5.18547 5.19485 5.20493 5.21575 5.22725 5.23942 5.25193 5.26748
5.28308 5.29887 5.31574 5.33383 5.35270 5.37407 5.39648 5.42079
5.44632 5.47002 5.50130 5.53604 5.57434 5.60590 5.65254 5.69497
5.61364 5.64612 5.67513 5.69689 5.71092 5.71774 5.71798 5.71130
5.69925 5.68004 5.65692 5.62787 5.59631 5.55971 5.52079 5.48000
5.43523 5.39239 5.34667 5.29926 5.25391 5.20652 5.15872 5.11326
5.06961 5.02446 4.97989 4.93628 4.89529 4.85583 4.81619 4.77718
4.73900 4.70199 4.66659 4.63214 4.59829 4.56543 4.53355 4.50251
4.47241 4.44322 4.41481 4.38721 4.35840 4.33281 4.30811 4.28345
4.26028 4.23786 4.21605 4.19521 4.17326 4.12037 3.95105 3.65245
3.15785 2.46984 1.53908 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
```

```
      0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
      0.00100   0.00000
       66.00129  66.00129  66.00129  66.00129  66.00129  66.00129  66.00129  66.00129
       66.00129  66.00129  66.00129  66.00129  66.00129  66.00129  66.00129  66.00129
       66.00129  66.00129  66.00129  66.00129  66.00129  66.02332  66.08607  66.17309
       66.27583  66.39133  66.51987  66.66149  66.81851  66.98774  67.16936  67.36547
       67.56955  67.78089  67.99987  68.22788  68.46391  68.72334  68.99455  69.27574
       69.56612  69.86532  70.17522  70.49428  70.82269  71.16476  71.51700  71.87968
       72.25543  72.64398  73.04484  73.45851  73.88876  74.33489  74.79694  75.27578
       75.77296  76.29273  76.83365  77.39712  77.98470  78.59836  79.24091  79.91591
       80.62576  81.37249  82.16074  82.99201  83.87298  84.80604  85.79709  86.85453
       87.98333  89.19686  90.50062  91.90595  93.42174  95.07323  96.87593  98.84508
      101.54118 104.21452 106.86492 109.49217 112.09607 114.67640 117.23295 119.76549
      122.27380 124.75763 127.21675 129.65090 132.05983 134.44326 136.80093 139.13254
      141.43781 143.71642 145.96807 148.19242 150.38914 152.55787 154.69825 156.80990
      158.89242 160.94540 162.96841 164.96099 166.92268 168.85297 170.75136 172.61729
      174.45019 176.24946 178.01444 179.74448 181.43883 183.09674 184.71739 186.29989
      187.84331 189.34663 190.80875 192.22848 193.60450 194.93539 196.21955 197.45523
      198.64043 199.77292 200.85010 201.86899 202.82603 203.71692 204.53635 205.27742
      205.93077 206.48249 206.90854 207.14156 209.28448 211.42740 213.57033 215.71325
      217.85617 219.99909 222.14201 224.28494 226.42786 228.57078 230.71370 232.85662
      234.99955 237.14247 239.28539 241.42831 243.57123 245.71416 247.85708 250.00000
    BLANK LINE
    New Section #3
      0   0   0
      0.00100   0.00000
      -200.00000 -189.48791 -178.97582 -168.46372 -157.95163 -147.43954 -136.92745
      -126.41536
      -115.90327 -105.39117  -94.87908  -84.36699  -73.85490  -63.34281  -52.83072
      -42.31862
       -31.80653  -21.29444  -10.78235   -0.27026   10.24183   10.36552   10.59167
       10.88452
        11.23131   11.62468   12.05963   12.53251   13.04051   13.58133   14.15310
        14.75422
        15.38333   16.03922   16.72085   17.42729   18.15768   18.91127   19.68736
        20.48532
        21.30456   22.14456   23.00479   23.88481   24.78417   25.70247   26.63932
        27.59437
        28.56727   29.55771   30.56537   31.58997   32.63123   33.68889   34.76269
        35.85241
        36.95781   38.07867   39.21478   40.36595   41.53196   42.71264   43.90781
        45.11730
        46.34093   47.57855   48.82999   50.09512   51.37377   52.66582   53.97112
        55.28953
        56.62094   57.96521   59.32222   60.69186   62.07400   63.46854   64.87537
        66.29438
        67.84544   69.22639   70.46120   71.57575   72.58763   73.50020   74.33453
        75.09881
        75.79872   76.44213   77.03362   77.58113   78.08792   78.55671   78.99413
        79.39776
        79.77409   80.12604   80.45215   80.75758   81.04378   81.31120   81.55901
        81.79133
        82.00923   82.21362   82.40531   82.58320   82.75008   82.90671   83.05365
        83.19120
        83.31985   83.44045   83.55389   83.66079   83.76130   83.85581   83.94501
        84.02945
        84.10947   84.18503   84.25660   84.32476   84.38979   84.45184   84.51089
        84.56732
        84.62082   84.66824   84.71328   84.75543   84.79506   84.83190   84.86577
        84.89687
        84.92521   84.94957   84.96840   84.97856   84.99074   85.00292   85.01510
        85.02728
        85.03946   85.05164   85.06382   85.07600   85.08818   85.10036   85.11254
        85.12472
        85.13690   85.14908   85.16126   85.17344   85.18561   85.19779   85.20997
        85.22215
      0.00100   0.00000
        0.61304   0.61304   0.61304   0.61304   0.61304   0.61304   0.61304   0.61304
        0.61304   0.61304   0.61304   0.61304   0.61304   0.61304   0.61304   0.61304
        0.61304   0.61304   0.61304   0.61304   0.61304   1.65485   2.32710   2.97739
        3.64109   4.28223   4.91156   5.57444   6.27151   7.00428   7.77007   8.56283
```

```
 9.37974  10.22080  11.08835  11.97097  12.87647  13.79827  14.73528  15.69065
16.66011  17.64275  18.64117  19.65438  20.67802  21.71620  22.76843  23.83436
24.91223  26.00437  27.11079  28.23172  29.36787  30.51926  31.68722  32.87267
34.07657  35.30005  36.54437  37.81090  39.10154  40.42015  41.76791  43.14695
44.56143  46.01387  47.50929  49.05257  50.64754  52.30311  54.02647  55.82909
57.71755  59.70431  61.80115  64.03072  66.41750  68.96921  71.74593  74.75368
78.16857  81.66180  85.09515  88.47696  91.81547  95.11242  98.37498 101.60414
104.80298 107.97252 111.11366 114.22777 117.31508 120.37596 123.41102 126.41930
129.40119 132.35655 135.28403 138.18354 141.05562 143.89910 146.71318 149.49723
152.25043 154.97275 157.66309 160.32056 162.94429 165.53341 168.08683 170.60342
173.08269 175.52370 177.92516 180.28577 182.60428 184.87941 187.10969 189.29357
191.42933 193.51587 195.55147 197.53333 199.45912 201.32623 203.13438 204.87742
206.55402 208.16031 209.69212 211.14463 212.50907 213.76402 214.81484 215.65824
216.27507 216.67092 216.78707 216.48240 219.96435 223.44218 226.91610 230.38630
233.85296 237.31624 240.77630 244.23330 247.68736 251.13863 254.58722 258.03325
261.47683 264.91806 268.35705 271.79389 275.22866 278.66145 282.09234 285.52140
0.00100
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 1.45774 2.34874 3.06385
3.66232 4.12509 4.47439 4.76316 4.96048 5.10147 5.16450 5.13616
5.10416 5.07286 5.04794 5.01986 4.99795 4.97620 4.95220 4.92971
4.91150 4.89241 4.87467 4.85963 4.84447 4.83039 4.81736 4.80568
4.79500 4.78526 4.77633 4.76812 4.76079 4.75483 4.74945 4.74493
4.74119 4.73818 4.73602 4.73466 4.73396 4.73464 4.73670 4.73966
4.74373 4.74865 4.75471 4.76346 4.77277 4.78421 4.79590 4.81261
4.83169 4.85379 4.87961 4.90407 4.93831 4.97442 5.01314 5.05506
4.92674 4.94557 4.95928 4.96624 4.96817 4.96290 4.95286 4.93596
4.91368 4.88841 4.85819 4.82456 4.78770 4.74811 4.70775 4.66475
4.62163 4.57864 4.53353 4.48841 4.44456 4.40128 4.35864 4.31698
4.27622 4.23709 4.19929 4.16241 4.12681 4.09248 4.05924 4.02697
3.99636 3.96727 3.93905 3.91171 3.88536 3.86004 3.83566 3.81214
3.78948 3.76702 3.74601 3.72576 3.70626 3.68734 3.66922 3.65096
3.63494 3.61880 3.60338 3.58850 3.57132 3.53725 3.39831 3.15003
2.72848 2.13742 1.33494 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00100   0.00000
 83.31123  83.31123  83.31123  83.31123  83.31123  83.31123  83.31123  83.31123
 83.31123  83.31123  83.31123  83.31123  83.31123  83.31123  83.31123  83.31123
 83.31123  83.31123  83.31123  83.31123  83.31123  83.32145  83.36122  83.42139
 83.49217  83.56967  83.65598  83.75228  83.86269  83.98397  84.11670  84.25957
 84.40467  84.55421  84.70954  84.87126  85.04029  85.24138  85.44938  85.66422
 85.88724  86.11771  86.35555  86.60127  86.85773  87.12267  87.39642  87.68008
 87.97578  88.28199  88.59957  88.92961  89.27346  89.63324  90.00821  90.39954
 90.80876  91.23736  91.68663  92.15797  92.65374  93.17840  93.73132  94.31533
 94.93457  95.59114  96.28968  97.03221  97.82432  98.67275  99.58448 100.56443
101.61946 102.75893 103.99031 105.33522 106.80202 108.40102 110.17718 112.12900
114.49398 116.83900 119.16389 121.46847 123.75257 126.01600 128.25856 130.48007
132.68032 134.85910 137.01620 139.15140 141.26447 143.35519 145.42329 147.46855
149.49069 151.48946 153.46457 155.41573 157.34266 159.24504 161.12255 162.97486
164.80161 166.60245 168.37700 170.12486 171.84562 173.53885 175.20408 176.84085
178.44864 180.02693 181.57515 183.09271 184.57897 186.03327 187.45487 188.84302
190.19688 191.51557 192.79812 194.04348 195.25051 196.41794 197.54439 198.62831
199.66795 200.66135 201.60624 202.49999 203.33949 204.12097 204.83976 205.48982
206.06292 206.54688 206.92061 207.12501 209.26876 211.41251 213.55626 215.70001
217.84376 219.98751 222.13126 224.27501 226.41876 228.56251 230.70625 232.85000
234.99375 237.13750 239.28125 241.42500 243.56875 245.71250 247.85625 250.00000
BLANK LINE
New Section #4
  0   0   0
  0.00100   0.00000
  -200.00000 -189.48943 -178.97887 -168.46830 -157.95773 -147.44717 -136.93660
  -126.42603
  -115.91546 -105.40490  -94.89433  -84.38376  -73.87320  -63.36263  -52.85206
  -42.34150
   -31.83093  -21.32036  -10.80979   -0.29923   10.21134   10.32853   10.54281
   10.82029
    11.14888   11.52160   11.93372   12.38179   12.86312   13.37555   13.91731
    14.48688
    15.08297   15.70444   16.35029   17.01965   17.71170   18.42573   19.16109
```

```
          19.91717
355       20.69341   21.48931   22.30440   23.13823   23.99038   24.86048   25.74816
          26.65308
356       27.57492   28.51337   29.46814   30.43896   31.42556   32.42771   33.44516
          34.47768
357       35.52506   36.58709   37.66357   38.75431   39.85912   40.97783   42.11027
          43.25627
358       44.41568   45.58834   46.77410   47.97282   49.18436   50.40859   51.64537
          52.89459
359       54.15611   55.42983   56.71561   58.01336   59.32296   60.64430   61.97729
          63.32182
360       64.59687   65.74306   66.78161   67.72087   68.57837   69.36758   70.09093
          70.76016
361       71.37726   71.95254   72.48747   72.98606   73.45412   73.89003   74.29963
          74.68569
362       75.04803   75.38940   75.71221   76.01761   76.30523   76.57655   76.83393
          77.07818
363       77.31009   77.53002   77.73878   77.93722   78.12591   78.30518   78.47540
          78.63729
364       78.79147   78.93859   79.07902   79.21300   79.34095   79.46332   79.58048
          79.69249
365       79.79954   79.90216   80.00062   80.09504   80.18526   80.27192   80.35505
          80.43432
366       80.50890   80.57754   80.64269   80.70400   80.76165   80.81523   80.86456
          80.90953
367       80.94993   80.98436   81.01092   81.02531   81.12809   81.23087   81.33366
          81.43644
368       81.53922   81.64200   81.74478   81.84756   81.95034   82.05312   82.15590
          82.25868
369       82.36146   82.46424   82.56702   82.66980   82.77258   82.87536   82.97814
          83.08092
370     0.00100   0.00000
371       0.85316   0.85316   0.85316   0.85316   0.85316   0.85316   0.85316   0.85316
372       0.85316   0.85316   0.85316   0.85316   0.85316   0.85316   0.85316   0.85316
373       0.85316   0.85316   0.85316   0.85316   0.85316   1.66943   2.43368   3.10648
374       3.78461   4.47619   5.20432   5.98700   6.81351   7.67921   8.58271   9.51935
375      10.48096  11.46895  12.48559  13.52305  14.57862  15.65551  16.75165  17.86040
376      18.98566  20.12699  21.28341  22.45236  23.63355  24.82856  26.03712  27.25897
377      28.49371  29.74013  31.00007  32.27408  33.56236  34.86548  36.18420  37.51938
378      38.87208  40.24356  41.63529  43.04958  44.48804  45.95271  47.44719  48.97334
379      50.53660  52.14077  53.78968  55.49123  57.24988  59.07450  60.97219  62.95428
380      65.03849  67.23889  69.56441  72.04421  74.70683  77.57299  80.68229  84.09390
381      87.47115  90.89197  94.24706  97.54310 100.79209 103.99251 107.15411 110.27655
382     113.36303 116.41418 119.43230 122.41817 125.37213 128.29475 131.18608 134.04637
383     136.87514 139.67236 142.43774 145.17136 147.87286 150.54176 153.17750 155.77956
384     158.34751 160.88084 163.37897 165.84130 168.26713 170.65546 173.00564 175.31773
385     177.59045 179.82299 182.01442 184.16387 186.27036 188.33284 190.35019 192.32146
386     194.24531 196.12025 197.94479 199.71755 201.43697 203.10076 204.70701 206.25315
387     207.73699 209.15569 210.50590 211.78367 212.98222 214.09030 215.02368 215.77317
388     216.32113 216.67580 216.78616 216.53924 220.02228 223.50122 226.97624 230.44755
389     233.91533 237.37974 240.84093 244.29906 247.75426 251.20667 254.65641 258.10359
390     261.54833 264.99073 268.43088 271.86889 275.30483 278.73880 282.17086 285.60111
391     0.00100
392     0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
393     0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
394     0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 1.43761 2.42852 3.14662
395     3.72188 4.17254 4.53117 4.83249 4.98999 5.03571 5.00477 4.95399
396     4.90303 4.85572 4.81457 4.77435 4.73352 4.69176 4.65709 4.62019
397     4.58422 4.55004 4.51852 4.48958 4.46008 4.43197 4.40518 4.37967
398     4.35566 4.33284 4.31053 4.28948 4.26951 4.25054 4.23244 4.21501
399     4.19841 4.18290 4.16823 4.15479 4.14268 4.13143 4.12148 4.11148
400     4.10372 4.09844 4.09337 4.09151 4.09134 4.09433 4.09981 4.10602
401     4.11298 4.12996 4.15142 4.16494 4.19633 4.21998 4.25630 4.29465
402     4.18416 4.19045 4.19125 4.18623 4.17928 4.16271 4.14408 4.12190
403     4.09605 4.06579 4.03295 3.99803 3.96130 3.92323 3.88429 3.84490
404     3.80459 3.76399 3.72336 3.68339 3.64472 3.60690 3.56989 3.53383
405     3.49893 3.46546 3.43338 3.40269 3.37332 3.34503 3.31802 3.29316
406     3.26924 3.24645 3.22478 3.20424 3.18477 3.16629 3.14875 3.13218
407     3.11642 3.10142 3.08712 3.07363 3.06077 3.04843 3.03679 3.02501
408     3.01414 3.00368 2.99378 2.98437 2.97314 2.95453 2.84934 2.65289
409     2.30488 1.81153 1.13213 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
```

```
410       0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
411       0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
412       0.00100   0.00000
413       100.62653 100.62653 100.62653 100.62653 100.62653 100.62653 100.62653 100.62653
414       100.62653 100.62653 100.62653 100.62653 100.62653 100.62653 100.62653 100.62653
415       100.62653 100.62653 100.62653 100.62653 100.62653 100.62520 100.64448 100.67785
416       100.71713 100.75849 100.80462 100.85653 100.91974 100.99082 101.06756 101.14687
417       101.22767 101.31144 101.39974 101.49161 101.59778 101.72096 101.84875 101.98234
418       102.12127 102.26556 102.41552 102.57407 102.73880 102.91074 103.09082 103.27949
419       103.47655 103.68438 103.90392 104.13468 104.37749 104.63356 104.90446 105.19182
420       105.49665 105.82005 106.16406 106.53097 106.92197 107.33969 107.78756 108.26846
421       108.78482 109.33930 109.93763 110.58345 111.28098 112.03602 112.85380 113.74518
422       114.72268 115.78706 116.94779 118.23613 119.64935 121.21849 122.95358 124.90043
423       126.94704 128.97638 130.98831 132.98266 134.95928 136.91801 138.85869 140.78114
424       142.68520 144.57068 146.43740 148.28517 150.11379 151.92306 153.71277 155.48270
425       157.23263 158.96232 160.67155 162.36006 164.02759 165.67388 167.29864 168.90160
426       170.48244 172.04086 173.57653 175.08910 176.57822 178.04351 179.48457 180.90100
427       182.29236 183.65819 184.99799 186.31126 187.59745 188.85597 190.08620 191.28749
428       192.45910 193.60027 194.71017 195.78788 196.83242 197.84270 198.81751 199.75551
429       200.65520 201.51487 202.33257 203.10600 203.83249 204.50878 205.13080 205.69335
430       206.18931 206.60812 206.93154 207.10842 209.25300 211.39758 213.54216 215.68674
431       217.83132 219.97589 222.12047 224.26505 226.40963 228.55421 230.69879 232.84337
432       234.98795 237.13253 239.27711 241.42168 243.56626 245.71084 247.85542 250.00000
433     BLANK LINE
434     New Section #5
435       0   0   0
436       0.00100   0.00000
437       -200.00000 -189.48920 -178.97839 -168.46759 -157.95678 -147.44598 -136.93517
          -126.42437
438       -115.91357 -105.40276  -94.89196  -84.38115  -73.87035  -63.35954  -52.84874
          -42.33793
439        -31.82713  -21.31633  -10.80552   -0.29472   10.21609   10.32673   10.52903
           10.79100
440         11.10123   11.45311   11.84220   12.26522   12.71965   13.20344   13.71492
            14.25266
441         14.81542   15.40216   16.01191   16.64386   17.29723   17.97135   18.66561
            19.37943
442         20.11229   20.86370   21.63323   22.42045   23.22498   24.04645   24.88451
            25.73885
443         26.60916   27.49516   28.39657   29.31312   30.24459   31.19072   32.15130
            33.12611
444         34.11495   35.11762   36.13393   37.16370   38.20676   39.26295   40.33209
            41.41404
445         42.50864   43.61576   44.73524   45.86696   47.01079   48.16659   49.33425
            50.51364
446         51.70465   52.90718   54.12110   55.34631   56.58271   57.83020   59.08868
            60.35806
447         61.39761   62.34380   63.20822   63.99801   64.72953   65.40147   66.03008
            66.61230
448         67.15857   67.67054   68.14984   68.60239   69.02989   69.43205   69.81359
            70.17597
449         70.52052   70.84750   71.15775   71.45389   71.73681   72.00737   72.26632
            72.51436
450         72.75216   72.98030   73.19935   73.40960   73.61152   73.80577   73.99283
            74.17309
451         74.34688   74.51452   74.67581   74.83134   74.98151   75.12655   75.26663
            75.40117
452         75.53113   75.65663   75.77724   75.89327   76.00510   76.11215   76.21500
            76.31338
453         76.40732   76.49669   76.58140   76.66123   76.73614   76.80561   76.86944
            76.92716
454         76.97797   77.02084   77.05395   77.07206   77.26544   77.45882   77.65220
            77.84558
455         78.03896   78.23234   78.42573   78.61911   78.81249   79.00587   79.19925
            79.39263
456         79.58601   79.77940   79.97278   80.16616   80.35954   80.55292   80.74630
            80.93968
457       0.00100   0.00000
458         0.70714   0.70714   0.70714   0.70714   0.70714   0.70714   0.70714   0.70714
459         0.70714   0.70714   0.70714   0.70714   0.70714   0.70714   0.70714   0.70714
460         0.70714   0.70714   0.70714   0.70714   0.70714   1.66951   2.43313   3.12936
```

```
  3.85868   4.65056   5.50355   6.42154   7.39157   8.40418   9.45945  10.55193
 11.67637  12.82507  14.00226  15.20473  16.42986  17.67044  18.92986  20.20692
 21.50006  22.80817  24.13051  25.46414  26.80961  28.16779  29.53764  30.91885
 32.31176  33.71647  35.13278  36.56077  38.00092  39.45385  40.92033  42.40137
 43.89831  45.41255  46.94572  48.49962  50.07643  51.67882  53.31076  54.97534
 56.67699  58.42039  60.21233  62.05837  63.96936  65.95677  68.02648  70.18960
 72.46793  74.88161  77.43769  80.18588  83.12399  86.32047  89.79622  93.60536
 96.98852 100.30171 103.54781 106.73320 109.86395 112.94786 115.98325 118.97589
121.92842 124.84103 127.71644 130.55525 133.35723 136.12381 138.85536 141.55166
144.21268 146.83859 149.42973 151.98595 154.50702 156.99271 159.44272 161.85671
164.23431 166.57508 168.87862 171.14417 173.37139 175.56009 177.70973 179.81965
181.88925 183.91746 185.90377 187.84776 189.74875 191.60603 193.41777 195.18375
196.90352 198.57572 200.19818 201.77147 203.29338 204.76202 206.17784 207.53675
208.83765 210.07843 211.25635 212.36844 213.41060 214.37734 215.20466 215.86917
216.35921 216.67809 216.78518 216.59118 220.07530 223.55534 227.03149 230.50392
233.97282 237.43835 240.90068 244.35995 247.81630 251.26986 254.72075 258.16909
261.61499 265.05855 268.49987 271.93905 275.37616 278.81130 282.24455 285.67598
0.00100
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 1.45348 2.42301 3.13474
3.70782 4.17863 4.53146 4.76173 4.81636 4.73752 4.66781 4.59999
4.53312 4.46368 4.39900 4.33874 4.28434 4.22798 4.17360 4.12157
4.07176 4.02415 3.97850 3.93511 3.89285 3.85237 3.81348 3.77594
3.73967 3.70495 3.67175 3.63977 3.60866 3.57816 3.54851 3.52005
3.49293 3.46704 3.44243 3.41893 3.39568 3.37315 3.35321 3.33437
3.31696 3.30159 3.28535 3.27048 3.25954 3.25465 3.25409 3.24516
3.24259 3.25422 3.24577 3.26818 3.26127 3.27993 3.29595 3.30536
3.29840 3.29438 3.28893 3.27885 3.26389 3.25091 3.23000 3.20770
3.18319 3.15597 3.12841 3.09950 3.06890 3.03829 3.00732 2.97576
2.94377 2.91200 2.88149 2.85152 2.82219 2.79367 2.76604 2.73941
2.71385 2.68936 2.66606 2.64375 2.62276 2.60316 2.58474 2.56743
2.55124 2.53565 2.52147 2.50852 2.49650 2.48534 2.47391 2.46440
2.45560 2.44690 2.43849 2.43151 2.42379 2.41726 2.41172 2.40558
2.39944 2.39402 2.38863 2.38323 2.37774 2.37123 2.30337 2.15777
1.88761 1.49311 0.93538 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00100   0.00000
117.93355 117.93355 117.93355 117.93355 117.93355 117.93355 117.93355 117.93355
117.93355 117.93355 117.93355 117.93355 117.93355 117.93355 117.93355 117.93355
117.93355 117.93355 117.93355 117.93355 117.93355 117.93461 117.93654 117.93948
117.94352 117.94809 117.95313 117.95919 117.96683 117.97509 117.98470 117.99587
118.00838 118.02244 118.03911 118.05663 118.07850 118.10195 118.12863 118.15875
118.19208 118.22914 118.27187 118.31846 118.37112 118.43040 118.49552 118.56754
118.64855 118.73857 118.83756 118.94676 119.06794 119.20282 119.35205 119.51656
119.69802 119.89820 120.11886 120.36211 120.63131 120.92834 121.25448 121.61429
122.01109 122.44771 122.93397 123.46932 124.05998 124.71240 125.43043 126.23255
127.12046 128.10033 129.20028 130.41410 131.77942 133.30025 135.00430 136.92365
138.67053 140.40267 142.11993 143.82220 145.50934 147.18120 148.83766 150.47857
152.10377 153.71311 155.30644 156.88360 158.44441 159.98870 161.51630 163.02701
164.52066 165.99703 167.45594 168.89716 170.32047 171.72565 173.11247 174.48066
175.82998 177.16017 178.47093 179.76198 181.03301 182.28370 183.51371 184.72270
185.91029 187.07608 188.21967 189.34060 190.43842 191.51263 192.56269 193.58804
194.58806 195.56211 196.50945 197.42933 198.32090 199.18321 200.01526 200.81589
201.58382 202.31758 203.01552 203.67569 204.29578 204.87301 205.40394 205.88411
206.30742 206.66490 206.94095 207.09193 209.23733 211.38274 213.52814 215.67354
217.81895 219.96435 222.10975 224.25516 226.40056 228.54597 230.69137 232.83677
234.98218 237.12758 239.27298 241.41839 243.56379 245.70919 247.85460 250.00000
BLANK LINE
  40   80   40
  1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000
  1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000
  1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000
  1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000
  1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000
  0.07921   0.07921   0.19661   0.29643   0.38819   0.47474   0.55748   0.63723
  0.71454   0.78982   0.86333   0.93531   1.00593   1.07533   1.14362   1.21091
  1.27728   1.34279   1.40751   1.47150   1.53480   1.59745   1.67568   1.67568
  1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568
  1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568
```

```
532       1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568
533       1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568   1.67568
534       1.67568   1.67568   1.67568   1.59745   1.53480   1.47150   1.40751   1.34279
535       1.27728   1.21091   1.14362   1.07533   1.00593   0.93531   0.86333   0.78982
536       0.71454   0.63723   0.55748   0.47474   0.38819   0.29643   0.19661   0.07921
537       1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000
538       1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000
539       1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000
540       1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000
541       1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000   1.00000
542       1.00000000   1.00000000
543     BLANK LINE
544     NUMBER OF INLET BOUNDARY CONDITION POINTS
545       37
546     RELATIVE SPACING OF THE INLET BC POINTS
547          1.25000     10.00000      0.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
            9999.00000   9999.00000
548       9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
          9999.00000   9999.00000
549       9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
          9999.00000   9999.00000
550       9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
          9999.00000   9999.00000
551       9999.00000   9999.00000   9999.00000   9999.00000
552     ABSOLUTE STAGNATION PRESSURE AT INLET
553       101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000
          101300.00000   101300.00000   101300.00000
554       101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000
          101300.00000   101300.00000   101300.00000
555       101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000
          101300.00000   101300.00000   101300.00000
556       101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000
          101300.00000   101300.00000   101300.00000
557       101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000   101300.00000
558     INLET STAGNATION TEMPERATURE
559       293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000
          293.15000   293.15000
560       293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000
          293.15000   293.15000
561       293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000
          293.15000   293.15000
562       293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000
          293.15000   293.15000
563       293.15000   293.15000   293.15000   293.15000   293.15000
564     INLET TANGENTIAL VELOCITY
565       0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
566       0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
567       0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
568       0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
569       0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
570     INLET MERIDIONAL VELOCITY
571       90.00000   90.00000   90.00000   90.00000   90.00000   90.00000   90.00000
          90.00000
572       90.00000   90.00000   90.00000   90.00000   90.00000   90.00000   90.00000
          90.00000
573       90.00000   90.00000   90.00000   90.00000   90.00000   90.00000   90.00000
          90.00000
574       90.00000   90.00000   90.00000   90.00000   90.00000   90.00000   90.00000
          90.00000
575       90.00000   90.00000   90.00000   90.00000   90.00000
576     INLET YAW ANGLE
577       0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
578       0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
579       0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
580       0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
581       0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
582     INLET MERIDIONAL PITCH ANGLE
583       0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
584       0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
585       0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
586       0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
```

```
  0.00000   0.00000   0.00000   0.00000   0.00000
SPECIFIED DOWNSTREAM PRESSURES ON HUB AND CASING
  269100.00000   269100.00000
MIXING LENGTH LIMITS ON ALL BLADE ROWS FOR ILOS=100 or ILOS=200
  0.030000  0.030000  0.030000  0.030000  0.030000  0.020000
FACTOR TO INCREASE THE TURBULENT VISCOSITY OVER THE FIRST NMIXUP STEPS
  2.00000   1000

```