



Masterarbeit

**Erarbeitung einer neuen durch
3D-CFD-Berechnungsverfahren gestützten
Methode zur Ermittlung des Abströmwinkels
einer verwundenen Turbinen-Laufschaufel**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Reinhard Willinger
E302
Institut für Energietechnik und Thermodynamik

und

Dipl.-Ing. Ahmed Hamdy Abdel-Rahman
MAN Diesel & Turbo SE
D-46145 Oberhausen, Deutschland

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Christiane Kienl
0625283
2320 Rauchenwarth 33

Wien, 11.11.2011

Vorwort

Diese Diplomarbeit stellt den Abschluss meines Maschinenbaustudiums an der Technischen Universität Wien dar.

Ich möchte mich bei MAN Diesel & Turbo SE Oberhausen für die Bereitstellung der Hard- und Software zur Bearbeitung dieser Aufgabenstellung bedanken. Weiters gilt mein Dank dem Betreuer dieser Arbeit, Hrn. DI Ahmed Hamdy Abdel-Rahman, der die Bearbeitung des Themas unterstützend begleitet hat. Ich danke auch meinen Kollegen der Abteilung Numerische Methoden für die zahlreichen konstruktiven Gespräche und Anregungen.

Bei Hrn. Prof. Reinhard Willinger möchte ich mich für die unkomplizierte Betreuung seitens der Universität und die Ermöglichung einer Diplomarbeit in der Industrie bedanken.

Nicht zuletzt auch ein Dankeschön an meine Eltern, die mir das Studium ermöglicht haben.

Und DANKE all jenen, welche mich aus der Bibliothek rausgezerrt und die angenehmen Seiten des Studentenlebens gezeigt haben.

Christiane Kienl

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Abkürzungsverzeichnis | iii |
| 1 Kurzfassung | 1 |
| 2 Abstract | 2 |
| 3 Einleitung | 3 |
| 3.1 Aufbau und Ziel der Arbeit | 3 |
| 4 Theoretische Grundlagen | 6 |
| 4.1 Allgemeines zur Turbinenbeschaukelung | 6 |
| 4.2 Die Turbinenstufe | 7 |
| 4.2.1 Wirkungsgrade | 7 |
| 4.2.2 Profilverluste | 8 |
| 4.2.3 Abströmwinkel | 9 |
| 4.3 3D-Schaukel | 11 |
| 5 Schaukeltypen | 13 |
| 5.1 T-Schaukel | 13 |
| 5.2 T-kon-Schaukel | 14 |
| 5.3 V-Schaukel | 14 |
| 5.4 GT3-Beschaukelung | 15 |
| 5.5 MARTin-Beschaukelung | 16 |
| 6 Programme | 17 |
| 6.1 EXPANDER | 17 |
| 6.1.1 Neuerungen | 17 |
| 6.2 TBlock | 19 |
| 6.3 Ansys CFX | 20 |
| 7 Ermittlung des Abströmwinkels | 21 |
| 7.1 Modellbildung | 21 |
| 7.2 Postprozessor | 22 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 8 | Nachrechnung einer Testmaschine | 26 |
| 8.1 | Testmaschine Variante A | 27 |
| 8.1.1 | EXPANDER | 27 |
| 8.1.2 | TBlock | 29 |
| 8.1.3 | Ansys CFX | 31 |
| 8.2 | Testmaschine Variante B | 33 |
| 8.2.1 | EXPANDER | 33 |
| 8.2.2 | TBlock | 35 |
| 8.2.3 | Ansys CFX | 37 |
| 9 | Validierung der Ergebnisse | 40 |
| 9.1 | Testmaschine Variante A | 40 |
| 9.2 | Testmaschine Variante B | 43 |
| 9.2.1 | Netzabhängigkeit des Massenstroms | 45 |
| 10 | Zusammenfassung und Ausblick | 49 |
| | Abbildungsverzeichnis | 51 |
| | Tabellenverzeichnis | 53 |
| | Literaturverzeichnis | 54 |

Abkürzungsverzeichnis

| Name | Einheit | Bedeutung |
|-------------|-----------------|--|
| $1D$ | | eindimensional |
| $3D$ | | dreidimensional |
| a | $\frac{kJ}{kg}$ | spezifische technische Arbeit |
| b | m | axiale Spaltbreite |
| c | $\frac{m}{s}$ | Absolutgeschwindigkeit |
| CAE | | Computer Aided Engineering |
| CFD | | Computational Fluid Dynamics |
| D_m | m | Mittlerer Durchmesser |
| h | $\frac{kJ}{kg}$ | spezifische Enthalpie |
| l | m | Kanalhöhe |
| \dot{m} | $\frac{kg}{s}$ | Massenstrom |
| Ma | – | Machzahl |
| $MARTin$ | | MAN Turbo Gasturbine |
| p | Pa | Druck |
| r_a | m | Außenradius |
| r_i | m | Innenradius |
| r_{Euler} | m | Eulerradius |
| P_t | W | technische Leistung |
| s | m | Sehnenlänge |
| t | m | Teilung |
| T | N | Tangentialkraft |
| u | $\frac{m}{s}$ | Umfangsgeschwindigkeit |
| w | $\frac{m}{s}$ | Relativgeschwindigkeit |
| α | $grad$ | Strömungswinkel der Absolutgeschwindigkeit |
| β | $grad$ | Strömungswinkel der Relativgeschwindigkeit |
| β_s | $grad$ | Staffelungswinkel |
| η | – | Wirkungsgrad |
| ϕ | – | Durchflusszahl |

| | | |
|-----------|------------------|-------------------------------|
| κ | – | Isentropenexponent |
| λ | – | Arbeitszahl |
| ρ | $\frac{kg}{m^3}$ | Dichte |
| ψ_T | – | aerodynamische Belastungszahl |

Indizes

| | |
|------------|------------------------|
| 0 | Ebene vor dem Leitrad |
| 1 | Ebene nach dem Leitrad |
| 2 | Ebene nach dem Laufrad |
| <i>A</i> | Austritt |
| <i>E</i> | Eintritt |
| <i>id</i> | ideal |
| <i>s</i> | isentrop |
| <i>Sp</i> | Spalt |
| <i>t</i> | total |
| <i>zus</i> | Zusatz |
| ' | Leitrad |
| " | Laufrad |

1 Kurzfassung

Das Programm EXPANDER von MAN Turbo beinhaltet ein Verfahren zur Auslegung von Axialexpandern, die durch energiereiche, in der Prozessgasindustrie anfallende Gasgemische angetrieben werden. Diese Maschinen werden hauptsächlich zur Energierückgewinnung eingesetzt.

EXPANDER wurde als weitere Entwicklung der in-house Auslegungssoftware speziell für den erfahrenen Benutzer konzipiert. Während die vorhandenen Auslegungstools dem Berechnungsingenieur immer mehr Entscheidungen abnehmen, soll dieses Programm dem Benutzer ein hohes Maß an Flexibilität ermöglichen.

Diese Arbeit behandelt die Modifikation der Implementierung der „V-Schaufel“ in den EXPANDER. Im Speziellen wird hier auf den Abströmwinkel der 3D-Schaufel Wert gelegt, da dieser bisher immer sehr große Abweichungen zu Vergleichsrechnungen aufgewiesen hat.

Der Abströmwinkel wird für definierte Profilschnitte bei unterschiedlichen Staffelungen, Machzahlen und Teilungen mittels Ansys CFX berechnet und in die Datenbank des Auslegungsprogramms eingetragen. Anschließend wird eine neue Routine zur Berechnung des auf den Eulerradius gemittelten Winkels entwickelt. Ob die genannte Vorgehensweise auch zum Erfolg geführt hat, zeigen Vergleichsrechnungen mit einer Testmaschine. Dafür wird die Maschine mit EXPANDER ausgelegt, nachgerechnet und mit Ergebnissen von Ansys CFX und TBlock von John Denton verglichen.

2 Abstract

The software program EXPANDER from MAN Turbo is a tool to rate axial expander, machines working with highly energized gas mixtures from process gas industry. Basically expanders are used for energy recovery in industrial plants.

EXPANDER is a further development of in-house design software and especially conceived for advanced users. This software offers a high degree of flexibility because common tools make many decisions which are out of the CAE engineers hands.

This master thesis covers the modification of the implementation of the “V-blade“ in EXPANDER. It will be focused on the outlet flow angle of this three-dimensional blade because of high deviations in former comparative calculations.

The outlet flow angle will be calculated with Ansys CFX for pre-defined profile sections at different stagger angles, Mach numbers and pitches. The results are implemented into the EXPANDER database. Subsequently a new code for the calculation of the averaged outlet flow angle at the Euler radius is developed. Comparative calculations of a test machine will show, if the new procedure is successful. To manage this, the machine will be designed with EXPANDER-design mode and recalculated with EXPANDER-analysis mode, Ansys CFX and TBlock by John Denton.

3 Einleitung

In Zeiten steigender Kosten für Energieträger ist das Streben nach einer effizienten Nutzung vorhandener Energiequellen besonders stark. Dabei liegt es nahe, die bei der Produktion von Prozessgasen entwickelte Enthalpie weiter zu verwerten. Durch die Überarbeitung und Neuauslegung solcher Anlagen gewinnt der Expander immer mehr an Bedeutung.

Ein Expander ist eine Wärmekraftmaschine und gehört zur Familie der Gasturbinen. Das verwendete Arbeitsmittel ist dabei aber kein Verbrennungsgas einer Brennkammer sondern ein schon unter Druck stehendes Gas. Dieses Fluid wird zur Energierückgewinnung in der Turbine expandiert. Dabei wird unterschieden, ob der Expander in den verfahrenstechnischen Prozess integriert ist und die Energie für den Antrieb verschiedener Arbeitsmaschinen liefert, oder für die Stromerzeugung mit einem Generator verbunden ist.

Wie bei klassischen Gasturbinen gibt es auch hier die Ausführung in radialer und axialer Bauweise abhängig von Volumenstrom und Druckgefälle. Die Palette der Expander von MAN Turbo umfasst derzeit Axialexpander für Hoch- und Niedertemperaturanwendungen. Die Grenze der Eintrittstemperatur der Niedertemperatur-Ausführung sind 550°C , die des Hochtemperaturrexpanders 730°C [2]. Die maximale Leistung liegt bei 30 MW und die des Eintrittsdrucks bei 16 bar [4].

3.1 Aufbau und Ziel der Arbeit

Für die korrekte Auslegung einer Maschine ist es wichtig, die Geschwindigkeitsdreiecke zu kennen, insbesondere den Abströmwinkel β_2 . Frühere Untersuchungen von MAN Turbo haben ergeben, dass dieser im hausinternen Auslegungsprogramm für eine bestimmte 3D-Laufschaukel systematisch ungenau berechnet wurde. Ziel dieser Arbeit ist es, den Abströmwinkel der „V-Schaukel“ mittels eines CFD-Verfahrens neu zu bestimmen und in das Auslegungsprogramm zu implementieren.

In Kapitel 4 werden die theoretischen Grundlagen einer Turbinenstufe erläutert. Im Speziellen wird auf Wirkungsgrade und Verluste eines Turbinengitters eingegangen. Da es sich bei der hier untersuchten Schaufel um eine 3D-Schaukel handelt, wird der Zweck und die Umsetzung für die Verwendung dieser Beschaukelung näher beschrieben.

Das fünfte Kapitel widmet sich den bei MAN Turbo verwendeten unterschiedlichen Arten von Turbinenschaufeln. Es werden sowohl Profilform als auch Vor- und Nachteile des Einsatzes von diversen Leit- und Laufschaufeln gezeigt.

In Kapitel „Programme“ werden die in dieser Arbeit verwendeten Programme erklärt. Die Palette reicht dabei vom eindimensionalen Auslegungsprogramm bis hin zum kommerziellen 3D-Navier-Stokes Löser. Es werden auch die Änderungen im firmeninternen Auslegungsprogramm für Axialexpander erklärt, die im Zuge dieser Arbeit notwendig waren.

Der darauffolgende Abschnitt beschäftigt sich mit der Bestimmung des Abströmwinkels der V-Schaukel mittels Ansys CFX. Der Winkel wird dabei an verschiedenen Profilschnitten bei variierender Machzahl, Teilung und unterschiedlichem absoluten Staffelungswinkel der Schaufel bestimmt. Zusätzlich werden die Differenzen zwischen neuen und alten Abströmwinkeln gezeigt.

Um zu prüfen, ob die Änderungen von β_2 auch zum Erfolg geführt haben, wird in Kapitel 9 ein Expander mit verschiedenen numerischen Verfahren gerechnet. Eine zweistufige Maschine wird ausgelegt und mit 3D CFD Verfahren nachgerechnet. Es werden zwei Geometrien verwendet und drei unterschiedliche EXPANDER-Auslegungsvarianten. Die Maschinenparameter spezifische Leistung, Massenstrom, isentroper Wirkungsgrad und der Abströmwinkel der V-Schaukel werden zwischen den verschiedenen Auslegungsversionen verglichen. Für einen ersten Überblick werden die Verläufe von Machzahl, Druck und Enthalpie über der Turbine von TBlock und Ansys CFX dargestellt und beurteilt.

Im vorletzten Kapitel werden die detaillierten Ergebnisse der verschiedenen Rechnungen und Maschinen verglichen. Neben den allgemeinen Maschinenparametern wie Massenstrom und Leistung wird auch dem

Abströmwinkel der V-Schaufel besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Des Weiteren wird eine kurze Netzstudie zwischen Ansys CFX und TBlock im Hinblick auf die Berechnung des Massenstroms durchgeführt.

Den Abschluss bildet eine Zusammenfassung mit Ausblick auf zukünftige Untersuchungen im Bereich der Numerischen Simulation von Expandern.

4 Theoretische Grundlagen

4.1 Allgemeines zur Turbinenbeschaufelung

Der Energieumsatz in einer Turbomaschine erfolgt im Schaufelgitter. Bei einer Turbinenstufe, wie es im Expander der Fall ist, gilt es, die Strömung hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit und Richtung so umzulenken, dass die im Fluid gespeicherte potentielle Energie als mechanische Energie an den Läufer abgegeben werden kann. Die Leitreihe in einer axialen Turbinenbeschaufelung hat dabei die Aufgabe, das Arbeitsmedium in axialer Richtung zu führen, die Expansion und damit Beschleunigung der Strömung und die Umlenkung dieser in Umfangsrichtung zu bewirken [3].

Die Strömung weist dabei am Austritt aus Leit- und Laufschaufel im Allgemeinen ein kompliziertes dreidimensionales Geschwindigkeitsfeld auf. Um die Berechnung dennoch so einfach wie möglich zu halten, wird ein mittlerer Schnitt gewählt. Dieser muss so bestimmt werden, dass ihm die charakteristischen Strömungsparameter als integrale Mittelwerte zugeordnet werden können. Dabei stellt der Eulerradius r_E ,

$$r_E = \sqrt{\frac{r_a^2 + r_i^2}{2}} \quad (1)$$

mit dem Außenradius des Strömungskanals r_a und dem Innenradius r_i , einen mittleren Radius dar.

Für eine übersichtliche Darstellung der Geschwindigkeiten innerhalb einer Stufe werden Geschwindigkeitsdreiecke mit Absolut-, Relativ- und Umfangsgeschwindigkeit des betrachteten Punktes gebildet. Mit diesen Werten lässt sich auch die sogenannte „Euler’sche Impulsmomentengleichung“ für eine Turbinenstufe bilden [5]:

$$a = -(u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}) \quad (2)$$

mit den Umfangsgeschwindigkeiten u und den Umfangskomponenten der Absolutströmung c_u an Leit- und Laufrad und der am Radumfang geleisteten spezifischen Schaufelarbeit a . Da hier die effektiven Geschwindigkeiten verwendet

wurden, entspricht Gleichung 2 dem verlustbehafteten Zustandverlauf. Es ist ersichtlich, dass entweder hohe Umfangsgeschwindigkeiten oder eine starke Strömungsumlenkung zu einer hohen spezifischen Schaufelarbeit und somit großen Leistung führen. Eine Erhöhung der Leistung ist auch durch die Vergrößerung des Massensstroms erreichbar. Die Grenzen bilden dabei die maximale Fliehkraftbeanspruchung und die aerodynamische Belastung der Schaufeln. Subtrahiert man von a noch die Leit- und Laufradspaltverluste $\Delta a'_{sp}$ $\Delta a''_{sp}$ und sonstige anfallende Verluste Δa_{zus} ergibt sich die innere Arbeit der Stufe.

Die Verallgemeinerung der strömungsmechanischen Grundgleichungen, Massen-, Impuls- und Energiebilanz, bilden die Navier-Stokes Gleichung. Sie kann nur mittels numerischer Verfahren wie Finite Elemente, Finite Volumen oder Finite Differenzen gelöst werden. In der numerischen Simulation von Strömungsproblemen werden derzeit meist Finite Volumen Löser verwendet. Auch die in dieser Arbeit verwendeten Programme basieren auf der Theorie der Finiten Volumen.

4.2 Die Turbinenstufe

Nur durch eine optimale Auslegung der Turbinenstufe kann dem Fluid die maximale mögliche Energie entzogen und in Arbeit umgewandelt werden.

4.2.1 Wirkungsgrade [9]

Befindet sich die Turbinenstufe innerhalb einer mehrstufigen Turbine, so ist es am sinnvollsten, die Totalzustände an Ein- und Austritt zu vergleichen und es ergibt sich der reine Schaufelwirkungsgrad zu

$$\eta = \frac{a}{\Delta h_s + \frac{c_0^2 - c_2^2}{2}}. \quad (3)$$

Wird die Arbeit a auf das statische Isentropengefälle bezogen, fällt die kinetische Energie weg und der Wirkungsgrad wird zu

$$\eta_0 = \frac{a}{\Delta h_s}. \quad (4)$$

Handelt es sich um eine Endstufe und die Austrittsenergie $\frac{c_2^2}{2}$ kann nicht verwertet werden, wird der Total-zu-Statisch Wirkungsgrad benutzt

$$\eta_E = \frac{a}{\Delta h_s + \frac{c_0^2}{2}}. \quad (5)$$

4.2.2 Profilverluste

Für die Ermittlung der Profilgeometrie werden aus dem erforderlichen Energieumsatz an der Stufe die Geschwindigkeitsdreiecke bestimmt. Mit den daraus entnommenen An- und Abströmwinkel β_1 und β_2 ist die notwendige Umlenkung durch das Schaufelgitter bekannt. Die damit bestimmte Geometrie muss nun so verfeinert werden, dass sich der kleinst mögliche Profilverlustbeiwert ergibt.

Die Profilverluste am Schaufelgitter setzen sich zusammen aus Verlusten aufgrund von Reibung und jenen hervorgerufen durch Strömungsablösung. Dabei gibt es ein optimales Verhältnis von axialer Breite des Strömungskanals zu Teilung, bei dem sich ein Minimum des Profilverlustbeiwerts einstellt. Ist dieses Verhältnis zu klein, löst sie saugseitig ab und kann der Umlenkung nicht mehr folgen. Der Profilverlustbeiwert ist dabei hauptsächlich durch die Ablösung geprägt. Tritt der umgekehrte Fall ein und es wird der Strömung ein schmaler Kanal in Umfangsrichtung geboten, so gibt es auch einen großen Anteil an benetzter Oberfläche in der Strömung wodurch der Verlust durch Reibung ansteigt.

Durch das „Zweifel-Kriterium“ kann das optimale Verhältnis $\frac{b}{t}$ aus den Strömungswinkeln berechnet werden. Die grundsätzliche Idee dahinter besteht darin, die Tangentialkraft an der Schaufel zu maximieren und die Verluste so klein wie möglich zu halten. Die größte Umfangskraft ist durch den maximalen Druck an der Druckseite und den minimalsten Druck saugseitig zu erreichen. Die aerodynamische Belastungszahl ψ_T beschreibt das Verhältnis von tatsächlicher Tangentialkraft zu maximal möglicher [8]:

$$\psi_T = \frac{T}{T_{id}} = 2\left(\frac{t}{b}\right) \sin^2 \beta_2 (\cot \beta_2 - \cot \beta_1). \quad (6)$$

Mittels empirischen Erkenntnissen konnte festgestellt werden, dass für ein optimales

$\frac{b}{t}$ gelten muss:

$$0.8 < \psi_T < 1.2 . \quad (7)$$

Es gibt unterschiedliche Einflussfaktoren die zu einer Strömungsablösung bzw. erhöhter Reibung führen. Im Folgenden werden nur jene genannt, welche für das Verständnis der in dieser Arbeit gezeigten Profilformen wichtig sind.

Durch eine endliche Hinterkante kommt es zu einer sprunghaften Erweiterung des Strömungskanals und somit zu einer zusätzlichen Energiedissipation. Es entsteht ein Hinterkantenunterdruck und in Folge dessen ein Hinterkantenwirbel. Abhängig von der Dicke der Hinterkante fällt dieser stärker oder schwächer aus.

Der Fächerverlust beschreibt den Einfluss der Strömung auf ein kreisförmiges Gitter. Die Vorderkanten der Schaufeln stehen dabei nicht mehr parallel zueinander, weswegen auch die Teilung von Fuß zu Spitze zunimmt. Gemeinsam mit der variierenden Umfangsströmung in radialer Richtung kommt es zu Anströminzidenzen.

Ist der Winkel der Anströmung zu spitz oder stumpf tritt ein Stoß auf. Für besonders dünne Vorderkanten ist der Bereich einer optimalen Anströmung kleiner als für gut gerundete dicke Profile. Die Gefahr einer Energiedissipation durch einen Bauchstoß ist dadurch höher und sollte nach Möglichkeit vermieden werden.

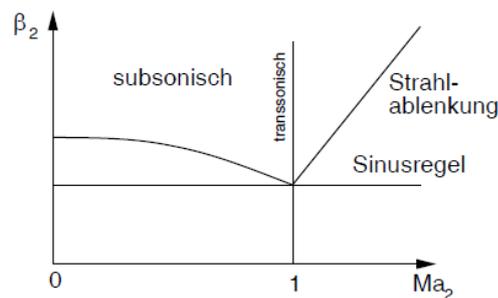


Abbildung 1: Abströmwinkel in Abhängigkeit der Abströmmachzahl [8]

4.2.3 Abströmwinkel

In Abbildung 1 ist der Abströmwinkel β_2 in Abhängigkeit der Austrittsmachzahl für ein axiales Turbinengitter dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass sich der Winkel

ausgehend von $Ma = 1$ zu kleineren Machzahlen hin leicht vergrößert und es im Überschallbereich zu einer Strahlablenkung kommt.

Die Berechnung von β_2 kann durch unterschiedliche Verfahren erfolgen. An dieser Stelle wird die „Sinusregel“ nach W. Traupel [5] vorgestellt.

Sinusregel

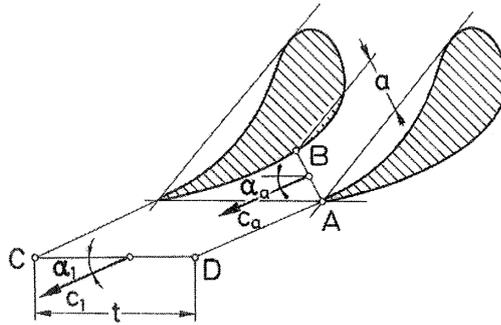


Abbildung 2: Herleitung des Abströmwinkels bei Unterschallströmung [9]

Wird die Kontinuitätsgleichung auf das Gitter in Abbildung 2 angewendet, so ergibt sich für den Austritt zwischen AB und CD

$$a\rho_a c_a = \rho_1 c_1 t \sin \alpha_1 \quad (8)$$

und somit der Abströmwinkel

$$\sin \alpha_1 = \frac{\rho_a c_a a}{\rho_1 c_1 t}. \quad (9)$$

Bei $Ma = 1$ ist die Annahme $\rho_1 c_1 = \rho_a c_a$ gerechtfertigt, weswegen $\sin \alpha_1$ nur mehr vom Querschnittsverhältnis a/t abhängt. Auf Basis der Erkenntnis, dass die Machzahl in diesem Gebiet nur einen geringen Einfluss auf den Abströmwinkel hat, wird daraus die „Sinusregel“

$$\sin \alpha_1 \approx \frac{a}{t} \quad (10)$$

abgeleitet.

4.3 3D-Schaufel [7]

Verringert sich das Nabenverhältnis $\frac{r_i}{r_a}$, fallen die Änderungen der Anströmung von Schaufelfuß zu -spitze stärker aus als bei kurzen Schaufeln. Deswegen werden Endstufenschaufeln meist verwunden ausgeführt, um die Geschwindigkeitsdreiecke über die gesamte Schauffellänge an die Strömung anzupassen.

Die Motivation für die Verwendung einer 3D-Beschaufelung besteht in erster Linie darin, die Schaufel an die dreidimensionale Strömung in axialen Turbinengittern anzupassen und damit eine Wirkungsgradverbesserung zu erzielen. Im Folgenden werden einige Möglichkeiten der 3D-Beschaufelungen näher erläutert.

Die Variation der Profilform und des Staffelungswinkels wird hauptsächlich in Laufschaufeln eingesetzt und dient dazu, die Schaufel an die Abströmung der Leitschaufel anzupassen. Es gilt dabei, den Fächerverlust zu minimieren und die Schaufel resistenter gegenüber Anströminzidenzen zu machen.

Die Neigung der Schaufelachse in Umfangsrichtung soll dem radialen Druckgradienten, der durch die Umlenkung der Strömung erzeugt wird, entgegenwirken. Im herkömmlichen Kreisgitter fällt der Druck von Gehäuse zur Nabe hin ab und es kommt zu einer Grenzschichtströmung Richtung Nabe. Energiearmes Fluid sammelt sich in der Ecke zwischen Saugseite und Nabe und kann dort zu einer Grenzschichtablösung führen. Wird die Schaufelachse aber in Umfangsrichtung geneigt, entsteht ein gegengesetzter Druckgradient und es kommt zu einer Druckabsenkung am Gehäuse bzw. einem Druckanstieg an der Nabe.

Bei der „Compound Lean“-Beschaufelung wird durch eine konvexe Druck- und eine konkave Saugseite ein spitzer Winkel zwischen Druckseite und Seitenwand bzw. ein stumpfer Winkel zwischen Saugseite und Seitenwand erzeugt. Der positive Neigungswinkel beeinflusst das radiale Gleichgewicht dahingehend, dass die Stromlinien von den Randzonen zur Schaufelmitte hin verschoben werden. Es folgt eine Entlastung der Randzonen und somit auch eine verminderte Strömungsablösung an Nabe und Gehäuse. Durch die erhöhte Belastung in der Kernströmung kommt es aber zu größeren Profilverlusten.

Eine Verdickung der Vorderkante im Seitenwandbereich bringt eine Verstärkung des Hufeisenwirbels. Dessen saugseitiger Ast soll dem Kanalwirbel entgegenwirken und ihn von der Saugseite abdrängen. Das gleiche Ziel hat die Optimierung des Eckenradius zwischen Schaufel und Seitenwänden. Es darf aber nicht darauf vergessen werden, dass es damit auch zu einer Verstärkung des druckseitigen Astes kommt.

5 Schaufeltypen [2]

Abhängig von den unterschiedlichen Anforderungen in einem Axialexpander stehen mehrere Typen von Schaufeln zur Verfügung. Im Folgenden wird auf die unterschiedlichen Beschaukelungen, welche bei MAN Turbo zum Einsatz kommen, eingegangen.

5.1 T-Schaukel

Die T-Schaukel wird sowohl als Leit- wie auch Laufschaufel eingesetzt. Durch das tropfenförmige Profil ist sie weitgehend unempfindlich gegenüber Anströminzidenzen weswegen die T-Schaukel auch zur bevorzugten Beschaukelungsart im Axialexpander zählt. In Abbildung 3 ist die Schaufel am Bauch liegend gezeigt.

Ein Nachteil dieser Schaufel ist die konstante Sehnenlänge über der gesamten Schaufelhöhe, wodurch sie ab einem Verhältnis von $\frac{\text{Kanalhöhe}}{\text{mittlerer Durchmesser}} = 15$ nicht mehr einsetzbar ist [5]. Die Folge wären große Unterschiede in der Umfangsgeschwindigkeit, die wiederum zu einer starken Beeinflussung der Geschwindigkeitsdreiecke führen. Weiters wird bei großen Schaufellängen das Teilungsverhältnis an der Schaufelspitze zu groß und das Zweifel-Kriterium (Gleichung 7) kann nicht mehr eingehalten werden. Deswegen werden ab dem genannten Verhältnis von $\frac{l}{D_m}$ verwundene Schaufeln eingesetzt.

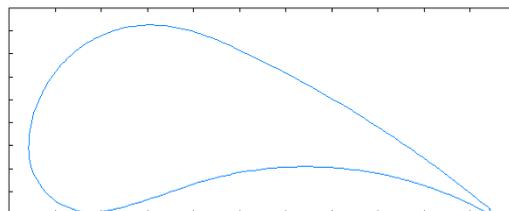


Abbildung 3: T-Schaukel

5.2 T-kon-Schaufel

Die konische T-Schaufel ist durch eine abnehmende Sehnenlänge zur Schaufelspitze hin charakterisiert. Das Grundprofil ist aber wie bei der prismatischen T-Schaufel durch eine dicke Vorderkante und einen kleinen Hinterkantenradius gekennzeichnet. Durch die leichte Änderung des lokalen Staffelungswinkels von Schaufelfuß zu Schaufelspitze ist die T-kon Schaufel eine dreidimensional verwundene Schaufel. Abbildung 4 zeigt drei Profilschnitte der Schaufel wobei der dünnste an der Spitze liegt. Für diese und alle weiteren Schaufeln sind alle Profilschnitte jeweils mit 0° Staffelungswinkel abgebildet.

Mit der konischen T-Leitschaufel ist eine kleinere Teilung auch in Gehäusenähe möglich ohne die minimal erforderliche Fußteilung zu unterschreiten. Dadurch ist ebenfalls eine höhere Anzahl an Schaufeln pro Stufe erreichbar und das Zweifel-Kriterium kann eingehalten werden.

Die T-kon-Schaufel wird häufig in der Leitschaufelreihe in Kombination mit der V-Schaufel in der Laufschaufelreihe gebraucht.

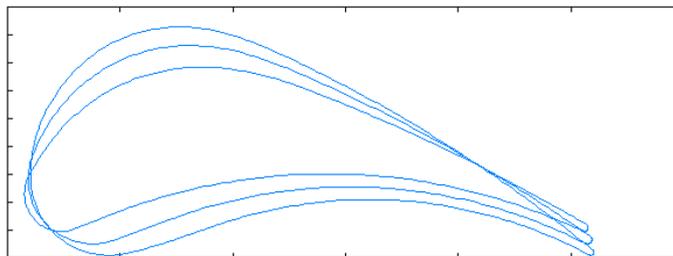


Abbildung 4: Konische T-Schaufel

5.3 V-Schaufel

Die V-Schaufel stammt ursprünglich aus dem Dampfturbinenbereich und ist eine dreidimensional verwundene Laufschaufel mit geringer Profildicke und Umlenkung. Somit ist der konstruktive Strömungswinkel auch bei langen Schaufeln an die erhöhte Umfangsgeschwindigkeit angepasst. Aus diesem Grund findet die V-Schaufel

vorwiegend in der letzten Laufschaufelreihe des Axialexpanders Anwendung.

Die Schaufel ist im Auslegungsprogramm von MAN durch fünf Profilschnitte aufgebaut, wie in Abbildung 5 dargestellt. Details zum Auslegungsprogramm und der Implementierung der V-Schaukel sind in Kapitel 6.1 beschrieben.

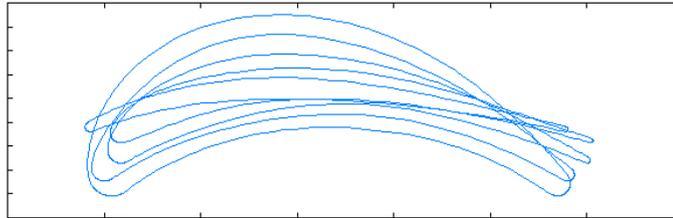


Abbildung 5: V-Schaukel

5.4 GT3-Beschaufelung

Die GT3-Beschaufelung stammt ursprünglich aus der Gasturbinenentwicklung und wird in Hochtemperaturexpandern eingesetzt. Eine Stufe besteht dabei aus einer verwundenen Laufschaufel- und einer prismatischen Leitschaufelreihe (siehe Abbildung 6).

Für die Berechnungsprogramme sind die notwendigen Daten aus sechs Profilschnitten bekannt.

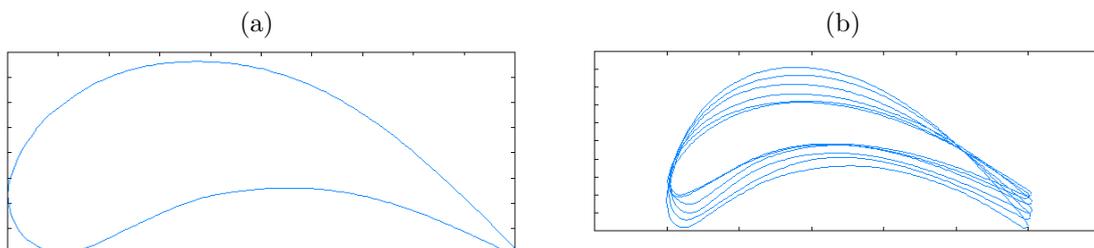


Abbildung 6: GT3-Beschaufelung (a) Leitschaufel (b) Laufschaufel

5.5 MARTin-Beschaufelung

Für die von MAN neu entwickelte Gasturbine **MAN TuRbo GasTurbine**, kurz MARTin, wurden eigene Schaufeln konzipiert um die Turbine noch effizienter zu gestalten. Die MARTin-Beschaufelung besteht aus einer verwundenen Leit- und Laufschaufel (Abbildung 7).

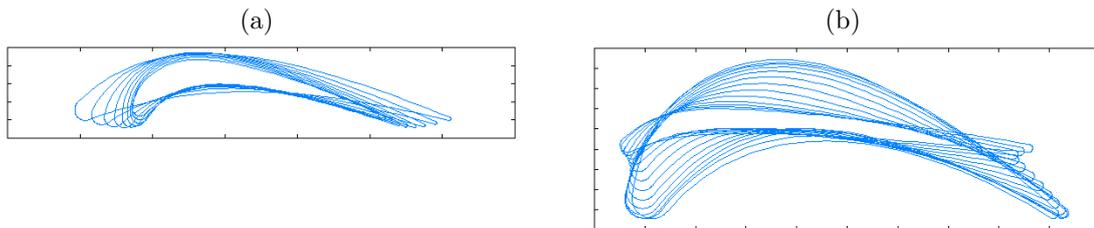


Abbildung 7: MARTin-Beschaufelung (a) Leitschaufel (b) Laufschaufel

6 Programme

6.1 Expander

Das Programm „EXPANDER“ wurde von MAN Turbo entwickelt und dient zur Auslegung eines Axialexpanders mit nachfolgendem Diffusor. Die Berechnung erfolgt weitestgehend nach den theoretischen Grundlagen von W. Traupel [5]. Mit Kenntnis des verwendeten Fluids, der Eintrittstotaltemperatur, dem Eintrittstotaldruck und dem statischen Austrittsdruck wird die Geometrie der gesamten Maschine und der Schaufeln bestimmt.

Um die Geometrie der Schaufel berechnen zu können, ist die Eingabe des Schaufeltyps erforderlich. Für jeden Schaufeltyp liegen die strömungstechnisch relevanten Angaben vor, um aus dem notwendigen Enthalpiegefälle die Geschwindigkeitsdreiecke und damit alle Strömungsparameter zu bestimmen. Diese Angaben sind für eine vom Schaufeltyp abhängige Anzahl von Profilschnitten bekannt, welche in äquidistanten Abständen über die gesamte Schaufellänge gemacht wurden.

Neben einem Programm zur Auslegung des Expanders gibt es auch jeweils eines zur Nachrechnung der Maschine mit der bei der Auslegung ermittelten Geometrie und eines zur Erstellung von Kennlinien. Die im nächsten Abschnitt beschriebenen Neuerungen betreffen alle drei Programme.

6.1.1 Neuerungen

Geometrische Profildaten

Die hier behandelte V-Schaukel setzt sich aus fünf Profilschnitten zusammen („JK“, „GH“, „EF“, „CD“, „AB“). Für jeden dieser Schnitte wird die Sehnenlänge und der lokale Staffelungswinkel in Abhängigkeit vom ersten Profil am Schaufelfuß berechnet. Die Distanz zwischen diesen Schnitten ist dabei abhängig von der Schaufelhöhe. Das bedeutet, dass für unterschiedliche Schaufellängen die Daten der Profilschnitte nicht einfach um einen Faktor skaliert werden können, sondern

bei jeder Auslegung eine neue Schaufel aus unterschiedlichen Schnitten aufgebaut wird.

Bisher wurde im EXPANDER-Programm jede Schaufel von einer bekannten V-Schaufel mit einem Faktor für Sehnenlänge und Profilschnittabstand auf die berechnete Länge skaliert. Aufgrund der eben genannten Tatsache, dass die Schaufel aber so nicht gefertigt wird, wurden die Daten für Sehnenlänge, Profilschnittabstand und minimaler Fußteilung aus Konstruktionszeichnungen und Datenblättern entnommen und die Berechnung auf das neue Verfahren umgestellt. Es ist nun möglich, die in einer echten Maschine verwendete V-Schaufel auch schon in der Auslegung abzubilden.

Zusätzlicher und geänderter Profilschnitt

Bei der Vernetzung der kompletten V-Schaufel wurde festgestellt, dass zur Erstellung eines qualitativ hochwertigen Netzes ein zusätzlicher Profilschnitt in der unteren Hälfte der Schaufel erforderlich ist. Aus diesem Grund wurde im Programm ein weiterer Schnitt zwischen JK und GH gelegt und das Problem konnte erfolgreich behoben werden.

Der letzte Schnitt vor dem Schaufelfuß ist das JK-Profil. Um aber auch die ganze Schaufel darstellen zu können, wurde dieses Profil in den Schaufelfuß hineingelegt, sodass auch Daten für die Vernetzung zwischen JK und Nabe vorhanden waren. In der Realität ist dieser Abschnitt aber nicht gerade, sondern folgt der Schaufelkontur und verläuft divergent. Deswegen wurde das JK-Profil im Schaufelfuß durch ein Profil aus den Konstruktionsanforderungen ersetzt.

Diese beiden Programm-Optimierungen waren nur im Auslegungsprogramm erforderlich.

Abströmwinkel

Die letzte Erweiterung des EXPANDER-Programms betrifft den Profilabströmwinkel der V-Schaufel. Der Abströmwinkel wurde immer nur im Eulerschnitt auf die tatsächlich vorliegende Machzahl korrigiert. Die Daten des Abströmwinkels liegen aber für jeden Profilschnitt bei jeweils vier Stafflungswinkel, vier Machzahlen und sieben Teilungsverhältnissen, $\frac{\text{Teilung}}{\text{Sehnenlänge}}$, vor. Deswegen wurde eine Routine

eingeführt, welche den Abströmwinkel an jedem Profil einzeln auf die vorherrschende Machzahl anpasst und erst anschließend eine Mittelung aller Profilabströmwinkel auf den Eulerradius erfolgt. Die neue Routine arbeitet iterativ, da für die Bestimmung von β_2 neben Teilungsverhältnis und Staffelungswinkel auch die Machzahl am jeweiligen Profil bekannt sein muss. Diese wird aber durch β_2 berechnet weswegen eine Iteration des Abströmwinkels erforderlich ist.

Bei Betrachtung der Ergebnisse des Abströmwinkels aus Ansys CFX hat sich herausgestellt, dass der Einfluss der Machzahl gering ist, entsprechend Abbildung 1. Deswegen wird auch eine zweite Routine für die Berechnung des Abströmwinkels im EXPANDER getestet. Diese Methode findet bereits bei der MARTin-Schaufel Anwendung und hat dort auch zu plausiblen Ergebnissen geführt. Dabei werden den errechneten Abströmwinkeln der jeweiligen Profilschnitte durch ihren radialen Abstand zur Nabe eine Gewichtung gegeben und durch eine Mittelung dieser Werte der endgültige Winkel berechnet. Die Machzahlkorrektur erfolgt hier am gemittelten Winkel am Ende der Rechnung.

6.2 TBlock

TBlock wurde von Prof. J. Denton der Cambridge University entwickelt. MAN Turbo besitzt den Quellcode und die Erlaubnis, es weiterzuentwickeln. Es ist ein Navier-Stokes-Löser, der speziell auf die Probleme von Turbomaschinen angepasst ist, wie z.B. durch die Verwendung von Zylinderkoordinaten. Für die Turbulenzmodellierung wird das Prandtl'sche Mischungsweglängenmodell herangezogen. Mit TBlock kann man sowohl stationäre als auch instationäre Aufgabenstellungen lösen.

Das Programm rechnet blockstrukturierte Netze. Man hat mehrere Optionen, das Netz einzulesen. Eine davon ist, das blockstrukturierte Netz in einem externen Vernetzer zu erstellen und es anschließend TBlock als ASCII-Datei zur Verfügung zu stellen. Eine weitere Möglichkeit ist, die Eckpunkte eines Blocks mit Netzparametern vorzugeben und den TBlock-internen Netzgenerator zu verwenden um das gewünschte Netz zu erhalten. Der TBlock-Solver ist sehr stabil und kann

auch stark verzerrte Netze berechnen.

Mit etwas Aufwand kann auch ein Netz, welches mit Ansys Turbogrid erstellt worden ist, in die Eingabedatei für TBlock eingelesen werden. Dies ist manchmal notwendig, wenn es aufgrund von geometrischen Bedingungen zu extrem kleinen Netzmaschenwinkel kommt, welche das Ergebnis maßgeblich beeinflussen.

6.3 Ansys CFX

Das Programmpaket Ansys CFX inkludiert neben einem Pre- und Postprozessor einen vollwertigen 3D-Navier-Stokes Löser. Es arbeitet nach der Methode der Finiten Volumen und ist für Strömungsprobleme aller Art geeignet. Neben stationären und transienten Problemfällen können auch laminare und turbulente, sub-, trans- und supersonische Strömungen berechnet werden. Verbrennungsrechnungen und Mehrphasenströmungen sind ebenfalls mit Ansys CFX lösbar.

Zur Erstellung des Rechnetzes für Ansys CFX wurde Turbogrid von Ansys herangezogen, da es eine direkte Schnittstelle zwischen den beiden Programmen beinhaltet.

7 Ermittlung des Abströmwinkels

7.1 Modellbildung

Die Herausforderung, ein Modell zu finden, welches die Realität bestmöglichst abbildet, aber dennoch die Berechnungszeit in einem akzeptablen Bereich hält, macht die optimale Modellbildung für die CFD-Rechnung zu einem essentiellen Schritt.

Im EXPANDER-Programm werden nur die Daten von fünf Profilschnitten der Schaufel für die Auslegung einer Maschine herangezogen, im Folgenden bezeichnet mit „JK“, „GH“, „EF“, „CD“ und „AB“ von Schaufelfuß bis -spitze, dargestellt in Abbildung 8.

Es ist nur mit erheblichem Aufwand möglich, aus einer komplett 3D-berechneten Schaufel die Abströmwinkel und dazugehörigen Machzahlen der einzelnen Profile auszulesen. Ansys CFX kann nur 3D-Modelle berechnen, weswegen jeder Profilschnitt mit einer Höhe von 3 mm extrudiert wurde und somit ein prismatisches 3D-Modell erzeugt wurde. Das dabei verwendete blockstrukturierte Netz (Abbildung 9) ist ein O-Netz im Bereich der Schaufel und ein H-Netz im Ein- und Auslaufbereich. Es wurde für alle vier globalen Staffelungswinkel und sieben Teilungsverhältnisse ein Modell des jeweiligen Profilschnitts angefertigt und berechnet. Der Staffelungswinkel ist dabei jener Winkel, welcher durch Sehnenlänge und Vektor der Umfangsgeschwindigkeit eingeschlossen ist.

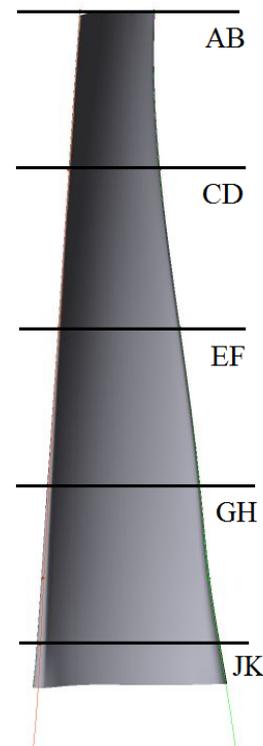


Abbildung 8: Profilschnitte

Im Ansys CFX Preprocessor wurden der Totaldruck und die Totaltemperatur am

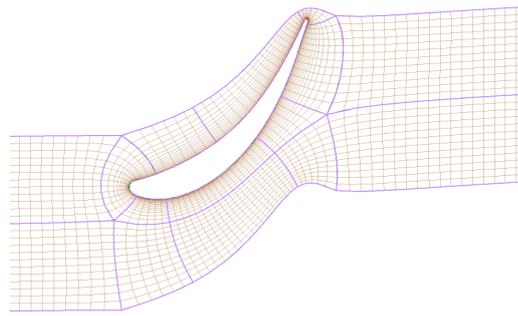


Abbildung 9: Netz des CFD-Modells

Eintritt und der statische Druck am Austritt vorgegeben. Das SST-Modell wurde als Turbulenzmodell verwendet und Luft als ideales Gas.

7.2 Postprozessor

Für die Bestimmung des Abströmwinkels wurde im CFX Postprozessor eine radiale Ebene nahe der Hinterkante in die Strömung gelegt (Abbildung 10). Der Verlauf

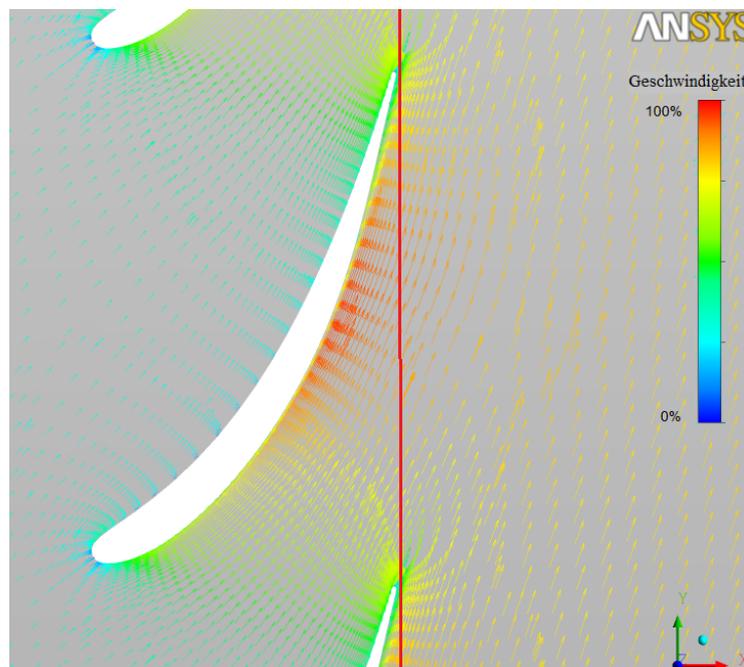


Abbildung 10: Bestimmung des Abströmwinkels in Ansys CFX

des Abströmwinkels von der Unterkante der Ebene bis zur Oberkante wurde durch eine Massenmittelung berechnet. Der dem jeweiligen Schnitt zugeordnete Radius lag

immer in der Mitte des Modells, weswegen der gesuchte Winkel auch an dieser Stelle ausgelesen wurde. Die massengemittelte Machzahl wurde ebenfalls in dieser Ebene bestimmt.

Beim Profil JK entstehen bei sehr großen Teilungsverhältnissen aufgrund der dicken Hinterkante Hinterkantenwirbel und wegen der hohen Geschwindigkeit und der anschließenden Verzögerung treten Ablösungen an der Saugseite auf. Da diese hohen Verhältnisse am Schaufelfuß aber praktisch nie vorkommen, wurde dieser Tatsache auch keine weitere Aufmerksamkeit gewidmet. Die fehlenden Daten wurden durch die Mittelung einer Extrapolation der bestimmten Winkel bei kleineren Teilungsverhältnissen und den Werten aus der alten Datenbank berechnet.

Um die Abströmwinkel für die vom EXPANDER-Programm verwendeten Machzahlen und Teilungsverhältnisse zu ermitteln, wurden die Werte in Excel-Tabellen eingetragen und auf feste Machzahlen und Teilungsverhältnisse interpoliert. Der Verlauf von β_2 bei unterschiedlichen Machzahlen in Abhängigkeit vom Teilungsverhältnis für einen Profilschnitt ist in Abbildung 11 dargestellt. Die durchgezogenen Geraden stellen die neuen Werte dar. Wie erwartet, sind die Abweichungen des Winkels bei variierenden Austrittsmachzahlen gering.

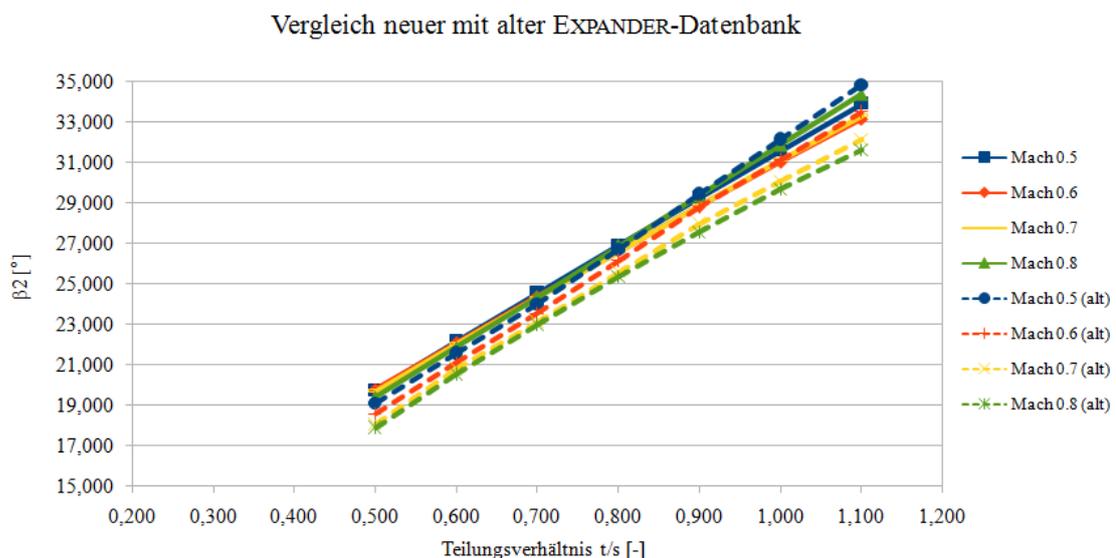
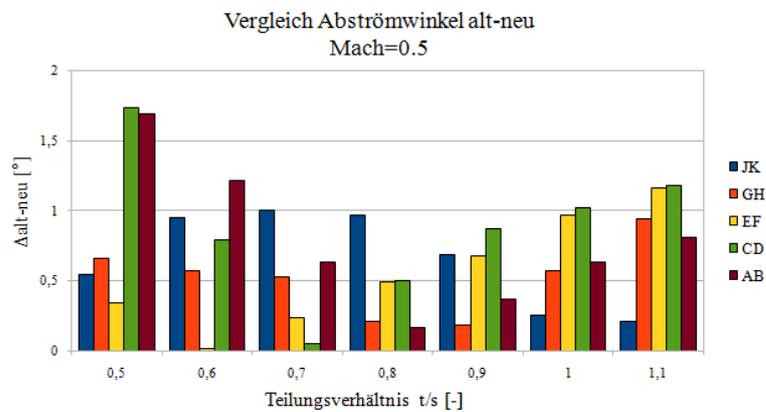


Abbildung 11: Verlauf des Abströmwinkels bei einem Profilschnitt mit festem Stafflungswinkel

In Abbildung 12 und 13 sind die absoluten Differenzen zwischen den alten und den neuen Winkeln gezeigt. Der Wert des jeweiligen Profilschnittes ist für vier Machzahlen bei festen Teilungsverhältnissen exemplarisch für den kleinstmöglichen der vier Staffelungswinkel abgebildet. Die Differenzen von bis 3° im Vergleich zu den alten Daten entsprechen den Erwartungen. Die große Abweichung des JK-Profiles bei den letzten beiden Machzahlen ist auf den Hinterkantenwirbel zurückzuführen, der bei diesen Machzahlen das Ergebnis stärker beeinflusst hat. Der Einfluss auf die Berechnung von EXPANDER ist aber gering, da am Schaufelfuß so hohe Machzahlen meist nicht erreicht werden.

(a)



(b)

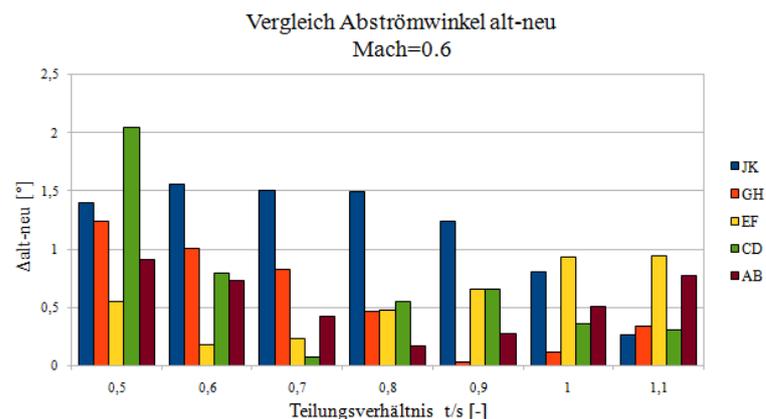


Abbildung 12: Differenzen zwischen alten und neuen Abströmwinkeln (a) $Ma = 0.5$

(b) $Ma = 0.6$

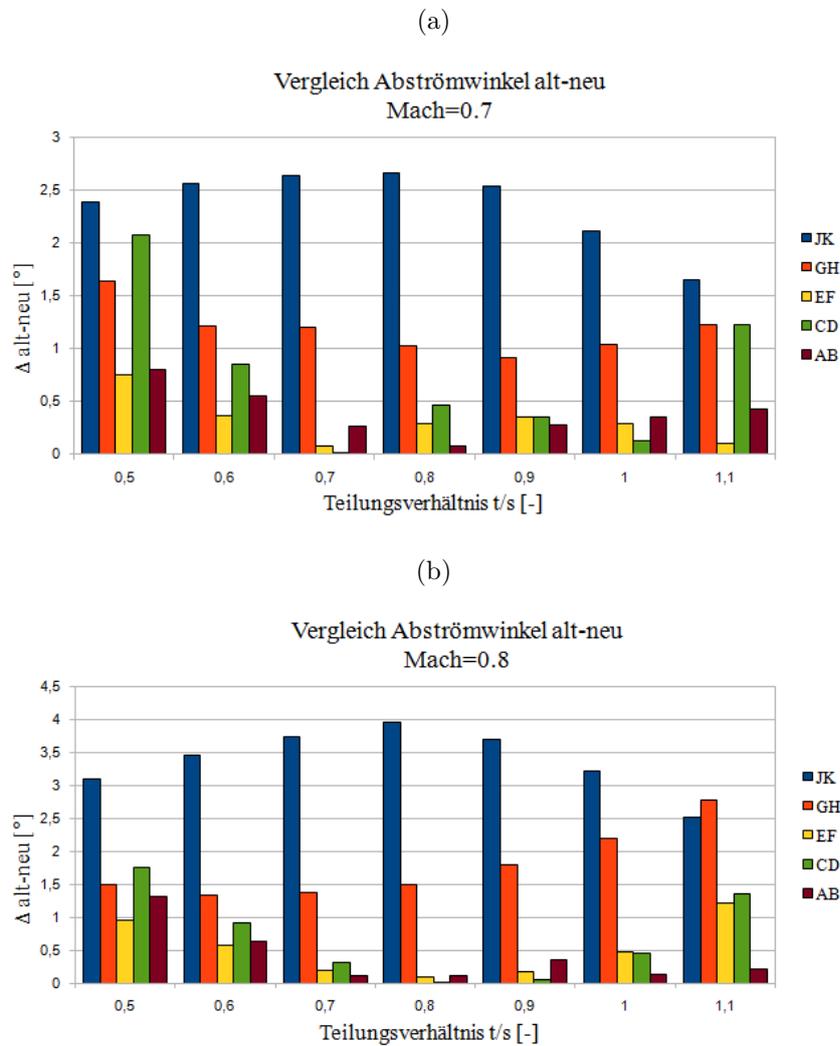


Abbildung 13: Differenzen zwischen alten und neuen Abströmwinkeln (a) $Ma = 0.7$

(b) $Ma = 0.8$

8 Nachrechnung einer Testmaschine

Durch Gegenrechnungen mit TBlock und Ansys CFX wird festgestellt, ob die Erneuerung der Abströmwinkel und die Programmoptimierungen in EXPANDER auch zu einer Verbesserung der Ergebnisse geführt haben.

Als Testmaschine wird ein zweistufiger Expander verwendet. Die erste Stufe hat eine T-Beschaufelung, die Leitschaufeln der zweiten Stufe sind vom Typ T-konisch und V-Schaufeln bilden die letzte Laufschaufelreihe. An der zweiten Stufe sind an Leit- und Laufreihe Spalte zwischen Schaufel und Nabe bzw. Gehäuse.

Um eine repräsentative Schlussfolgerung zu erzielen, wurde die Maschine einmal mit moderaten Staffelungswinkeln (Variante A) und einmal mit möglichst kleinen β_S (Variante B) gerechnet, um die Stabilität von EXPANDER auch unter Extrembedingungen beurteilen zu können.

Wie schon unter Abschnitt 6.1.1 erwähnt, wird der Abströmwinkel der V-Schaufel des modifizierten EXPANDER-Programms entweder durch eine Iterationsschleife oder durch die schon bestehende „MARTin-Routine“ berechnet. Als Vergleich zu den bisherigen Ergebnissen mittels EXPANDER dient eine Geometrie, die mit dem alten Programm ausgelegt wurde. Diese drei Rechnungen werden im Folgenden als „Iteration“, „MARTin“ und „Alt“ bezeichnet.

Die Geometrie der Maschine für Ansys CFX und TBlock wird durch eine Auslegung mit EXPANDER bestimmt. Die Nachrechnungsroutine von EXPANDER wird zum Vergleich mit den Ergebnissen der 3D-CFD Verfahren herangezogen. Die ausgelegten Expander wurden mit jener Programm-Variante nachgerechnet, mit der sie berechnet wurden.

Als Randbedingungen wurden der totale Druck und die Totaltemperatur am Eintritt, der statische Druck am Diffusoraustritt und die Drehzahl der Maschine angegeben. Das Fluid ist eine Mischung aus N_2 , O_2 , CO_2 und H_2O und wurde auch als solches mit den gegebenen Massenanteilen in jedem der Programme eingestellt. Das Turbulenzmodell in Ansys CFX ist wie schon in Kapitel 7 das SST-Modell.

In den Tabellen 1 bis 6 wurde der isentrope Wirkungsgrad für die Turbine

$$\eta_s = \frac{T_{tE} - T_{tA}}{T_{tE} - T_{tA,s}} \quad (11)$$

mit

$$T_{tA,s} = T_{tE} \cdot \left(\frac{p_{tA}}{p_{tE}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (12)$$

verwendet.

8.1 Testmaschine Variante A

8.1.1 Expander

Die Geometrie der Maschine Variante A ist in Abbildung 14 gezeigt. Zwischen Iteration und MARTin hat sich aufgrund derselben EXPANDER-Datenbank die Turbinenlänge nicht geändert, während bei Alt wegen der angepassten minimalen Fußteilung die Turbine um 1.18 mm kürzer ist. Der Diffusor ist bei Iteration um

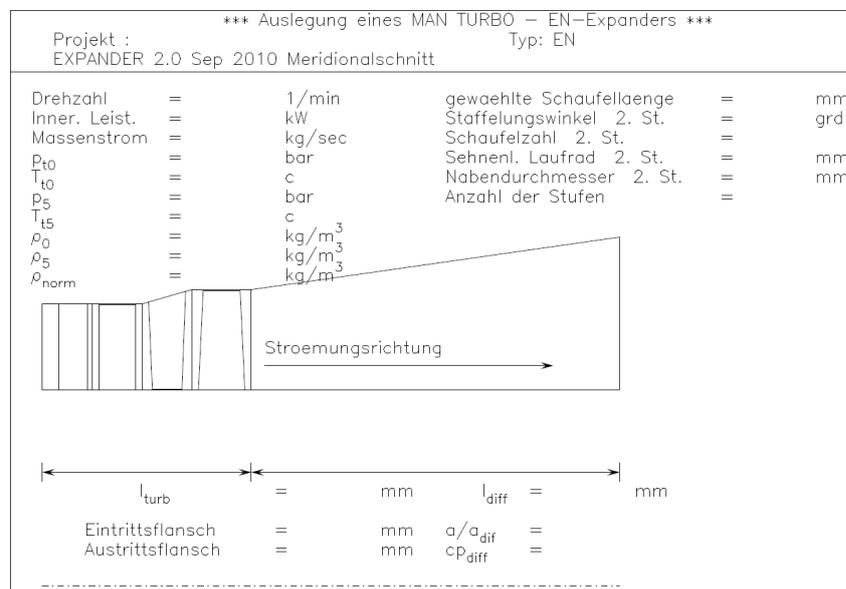


Abbildung 14: Geometrie Testmaschine A - Iteration

4.8 mm und bei MARTin um 2.8 mm kürzer als bei der Auslegung nach dem alten Programm. Die Schaufellängen und -zahlen sind gleich geblieben bis auf die Anzahl der Laufschaufeln in der zweiten Stufe bei Alt. Hier wurde ausgerechnet, dass 4

zusätzliche Schaufeln notwendig sind. Das ist durch die geometrischen Änderungen an der V-Schaufel erklärbar.

In Abbildung 15 sind die Geschwindigkeitsdreiecke der Turbine im Eulerschnitt der EXPANDER-Nachrechnung Iteration abgebildet. In dieser Ansicht sind drei Profilschnitte der T-kon- und der V-Schaufel gezeigt. Man kann erkennen, dass alle Schaufeln ideal angeströmt werden, wodurch es zu keiner Energiedissipation durch Inzidenzen kommt. Der Abströmwinkel der V-Schaufel weist einen leichten Gegendrall auf. Die Geschwindigkeitsdreiecke aller EXPANDER-Versionen waren in der ersten Stufe ident und in der zweiten ähnlich.

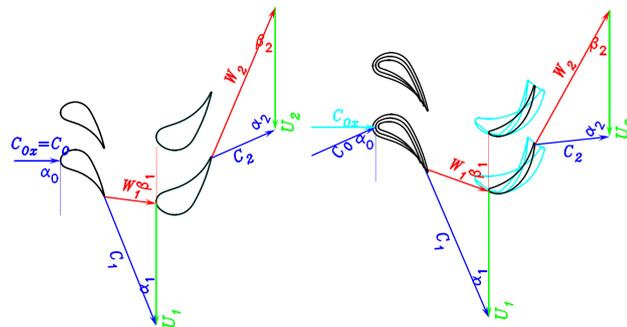


Abbildung 15: Geschwindigkeitsdreiecke Testmaschine A - Iteration

Tabelle 1 zeigt die prozentualen Anteile von spezifischer Leistung, Massenstrom, isentropem Wirkungsgrad und Abströmwinkeln der V-Schaufel der Nachrechnung durch Iteration, MARTin und Alt zur EXPANDER-Auslegung Iteration. Die Vergleichsbasis wurde willkürlich gewählt und dient nur zur Entdimensionierung der Werte. Die Abweichungen zwischen Nachrechnung und der jeweiligen Auslegung zu berechnen, ist nicht zielführend, weil die Daten sonst nicht einwandfrei gegenübergestellt werden können. Der Abströmwinkel wurde nicht auf die EXPANDER-Auslegung bezogen, sondern stellt die Differenz zu einem Referenzwinkel dar. Somit können die absoluten Unterschiede besser dargestellt werden. Diese Vorgehensweise wurde bei allen maschinenbezogenen Daten in diesem Kapitel eingehalten.

In Tabelle 1 zeigen sich die Auswirkungen der Programmänderungen. Der Abströmwinkel der V-Schaufel wird bei der Version mit Iteration um 1.57° niedriger

| Version | a [%] | \dot{m} [%] | η_s [%] | $\beta_2 - \beta_{2,ref}$ [$^\circ$] |
|-----------|---------|---------------|--------------|--|
| Iteration | 99.98 | 99.96 | 100.03 | 42.92 |
| MARTin | 99.99 | 100.00 | 100.05 | 43.44 |
| Alt | 100.05 | 99.95 | 100.10 | 44.49 |

Tabelle 1: Maschinendaten Testmaschine A EXPANDER

berechnet als mit Alt. Die MARTin-Routine mit der neuen Datenbank der Winkel errechnet ein β_2 welches um 1.05° geringer ist als Alt. Der isentrope Wirkungsgrad ist bei Alt am größten.

Die genaue Analyse der kompletten Maschinendaten hat ergeben, dass die Werte für Geschwindigkeiten und Winkel der ersten Stufe bei allen Varianten ident ist. Somit sind während der Bearbeitung des Programms keine Fehler unterlaufen, welche die Berechnung der anderen Schaufeltypen beeinflusst hätte.

8.1.2 TBlock

Für die schnelle „Batch-Bearbeitung“ der zu lösenden Probleme wird ein H-Mesh-Vernetzer eingesetzt. Deswegen weichen die Netzmaschen stark von idealen Rechtecken ab (Abbildung 16). TBlock läuft aber auch bei stark deformierten Netzen stabil.

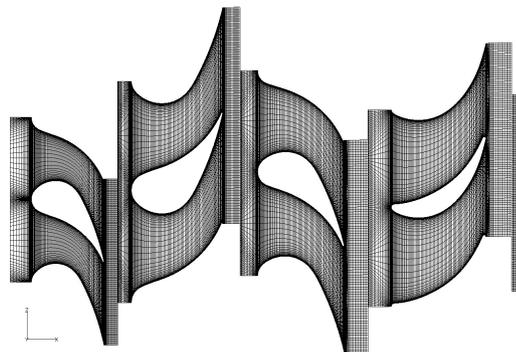


Abbildung 16: TBlock-Netz Testmaschine A - Iteration

In Abbildung 17 ist die Entwicklung der Machzahl der Auslegungsvariante Iteration im Expander bei 50% der Schaufelhöhe dargestellt. Der Sprung der Werte zwischen den Schaufelreihen ist dadurch zu erklären, dass im Stator die absolute und im

Rotor die relative Machzahl gezeigt ist. An den Schaufelnasen sind die Staupunkte durch die kleinen Machzahlen definierbar. Es ist zu erkennen, dass die Anströmung in allen Schaufelreihen fast optimal ist. An der V-Schaufel liegt der Staupunkt leicht bauchseitig versetzt. Diese Schaufel ist hier zwar nur in einem Schnitt dargestellt, bei näherer dreidimensionaler Betrachtung wurde sie aber auch über die komplette Schaufelhöhe gut angeströmt. Abbildung 17 ist exemplarisch für alle TBlock-Rechnungen der Testmaschine Variante A, weil es kaum Unterschiede zwischen den Verläufen der Machzahl gegeben hat.

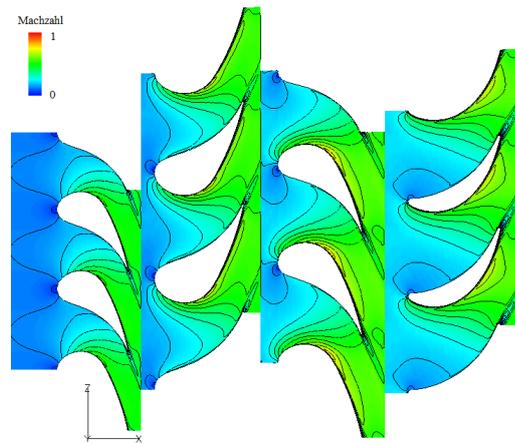


Abbildung 17: Entwicklung der Machzahl bei TBlock Testmaschine A - Iteration

Die Druckverteilung von erster Leitschaufel- bis letzter Laufschaufelreihe ist in Abbildung 18 gezeigt. Der Versatz in der Druckentwicklung zwischen den Schaufeln kommt auf Grund der Rotation der Laufschaufeln zustande.

Die Differenzen zwischen den unterschiedlichen EXPANDER-Varianten der allgemeinen Maschinenparameter a , \dot{m} und η_s in Tabelle 2 ist gering. Durch die geometrischen Änderungen an der V-Schaufel hat sich aber der Abströmwinkel um 1.5° (Iteration) bzw. 1.47° (MARTin) im Gegensatz zu Alt verkleinert.

| Version | a [%] | \dot{m} [%] | η_s [%] | $\beta_2 - \beta_{2,ref}$ [°] |
|-----------|---------|---------------|--------------|-------------------------------|
| Iteration | 101.58 | 98.34 | 100.63 | 41.56 |
| MARTin | 101.65 | 98.56 | 100.64 | 41.59 |
| Alt | 101.61 | 98.27 | 100.75 | 43.06 |

Tabelle 2: Maschinendaten Testmaschine A TBlock

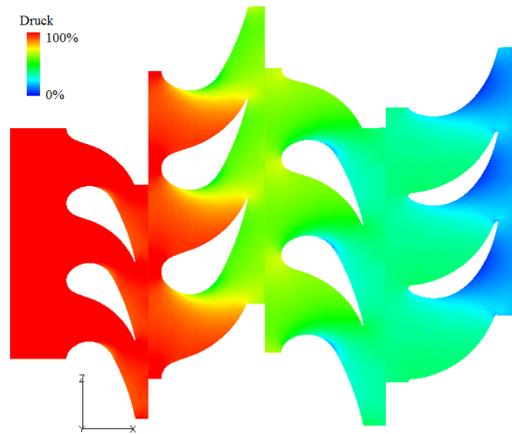


Abbildung 18: Druckverlauf in der Turbine bei TBlock Testmaschine A - Iteration

8.1.3 Ansys CFX

Das Modell für Ansys CFX (Abbildung 19) hat hinter dem Diffusor noch einen konvergenten Teil, da es sonst zu Rückströmungen am Diffusoraustritt kommt und die Rechnung abbricht. Die Randbedingung des statischen Drucks am Modellaustritt wurde so angepasst, dass am Diffusoraustritt der geforderte Wert aus der EXPANDER-Nachrechnung erreicht wird. Die Differenz des Drucks zwischen EXPANDER-Nachrechnung und Ansys CFX am Ende des Diffusors betrug bei Iteration und MARTin 0.29% und bei Alt 0.097%. Die Auswirkung dieser Abweichungen auf die Endergebnisse ist gering.

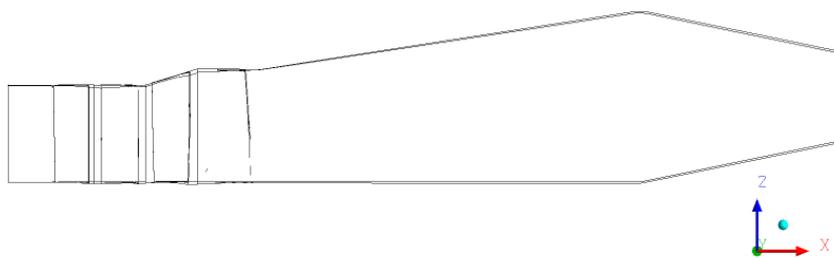


Abbildung 19: CFX-Modell von Testmaschine A - Iteration

Das Netz aus Turbogrid für die Turbinenbeschaukelung ist in Abbildung 20 gezeigt. Es handelt sich dabei um ein unstrukturiertes O-H-Netz für jede Schaufelreihe. Dadurch werden starke Netzverzerrungen, wie sie beim H-Netz der Fall sind, unterbunden. Die letzte Laufschaufelreihe hängt direkt mit dem Diffusor zusammen.

Deswegen sind die Netzmaschen hier größer, um die Rechenzeit nicht wegen einer zu feinen Diskretisierung in Diffusor- und Auslaufbereich zu verlängern.

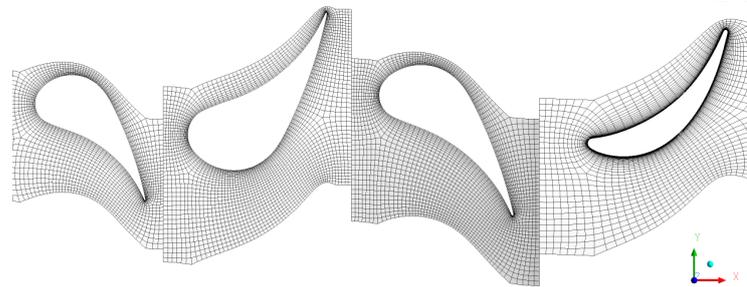


Abbildung 20: Turbogridnetz der Turbine von Testmaschine A - Iteration

Für einen Vergleich der Ergebnisse aus TBlock und CFX ist in Abbildung 21 der Verlauf der Machzahl über den gesamten Expander bei halber Schaufelhöhe dargestellt. Es handelt sich um jene EXPANDER-Auslegung, welche den Abströmwinkel mittels Iteration bestimmt. Die Abweichungen in der Entwicklung der Machzahl über der axialen Länge im Vergleich zu Abbildung 17 ist aufgrund der unterschiedlichen Farbverläufe durch die Legenden zustande gekommen.

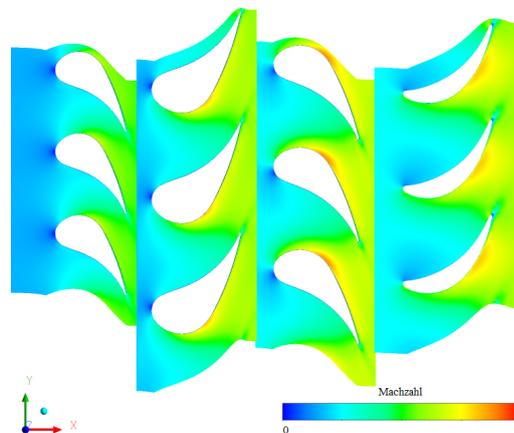


Abbildung 21: Entwicklung der Machzahl bei CFX Testmaschine A - Iteration

Bei der Druckverteilung des Expanders mittels CFX (Abbildung 22) ist ebenfalls kein Unterschied zur TBlock-Rechnung festzustellen. Die Minimum- und Maximumwerte wurden ident mit jenen aus Abbildung 18 gewählt. Durch die variierenden Verläufe der Legenden ist auch die unterschiedliche Entwicklung des Drucks zu erklären.

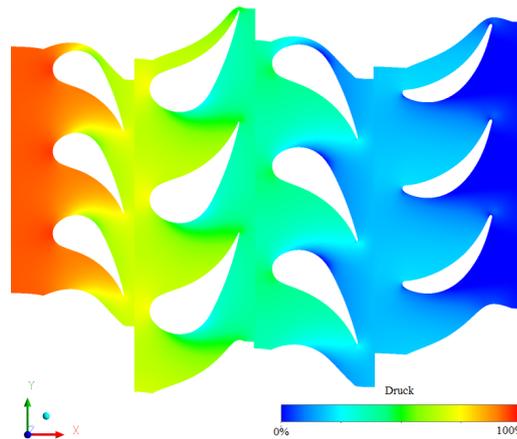


Abbildung 22: Druckverlauf in der Turbine bei CFX Testmaschine A - Iteration

In Tabelle 3 sind die Abweichungen von spezifischer Leistung, Massenstrom, isentropem Wirkungsgrad und Abströmwinkel der letzten Laufschaufelreihe im Bezug auf Nachrechnung Iteration aufgelistet. Die Maschinenparameter a , \dot{m} und η_s sind bei allen drei Versionen ähnlich. Der Abströmwinkel der V-Schaufel ist auch hier wieder bei der Auslegung durch Iteration am geringsten. Die Abweichungen zwischen Iteration und Alt (0.91°) und MARTin und Alt (0.42°) sind geringer als bei TBlock.

| Version | a [%] | \dot{m} [%] | η_s [%] | $\beta_2 - \beta_{2,ref}$ [$^\circ$] |
|-----------|---------|---------------|--------------|--|
| Iteration | 101.24 | 102.75 | 111.72 | 42.73 |
| MARTin | 101.25 | 102.95 | 111.61 | 43.22 |
| Alt | 101.16 | 102.62 | 111.34 | 43.64 |

Tabelle 3: Maschinendaten Testmaschine A Ansys CFX

8.2 Testmaschine Variante B

8.2.1 Expander

In Abbildung 23 ist die Geometrie gezeigt, welche mit dem EXPANDER-Auslegungstool berechnet wurde. Die Werte bezeichnen die prozentuale Änderung der Geometrie zu Variante A. Die Schauffellänge der ersten Stufe hat sich um 18.45% erhöht, die der zweiten um 6.27%. Die Schauffelanzahl der ersten

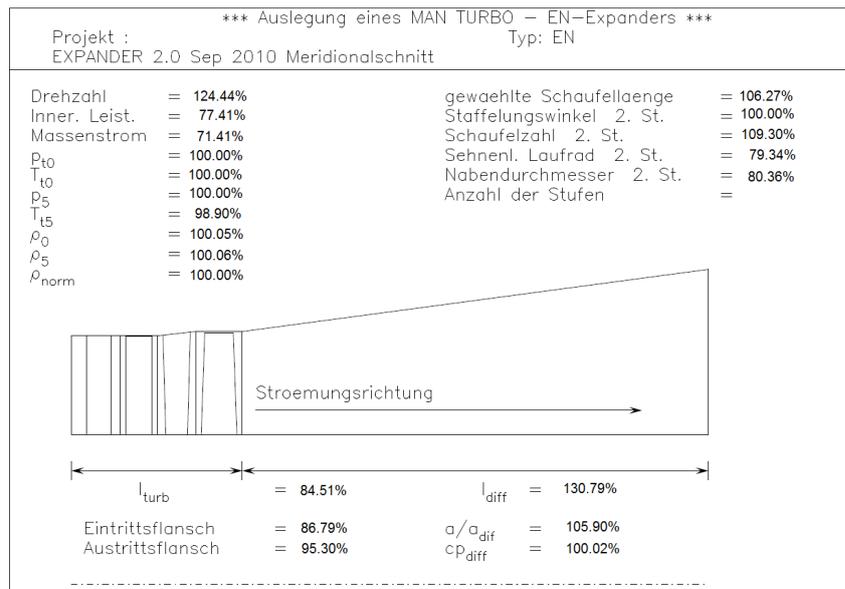


Abbildung 23: Geometrie Testmaschine B - Iteration

Leitreihe wurde um 12% verringert, die der ersten Laufschaufelreihe um 16.22% vergrößert. Die Beschauflung der zweiten Stufe hat nun 10% mehr konische T- und 9.30% mehr V-Schaufeln. Der absolute Staffelungswinkel der ersten Leitreihe ist um 16.20% kleiner geworden, die Laufschaufeln stehen jetzt 7.10% steiler im Vergleich zu Variante A. Während β_S der zweiten Laufschaufelreihe gleich geblieben ist, wurde er bei Leitschaufelreihe 2 um 4.72% verkleinert. Bis auf die Drehzahl (24.4% höher als Variante A) sind alle sonstigen Randbedingungen gleich geblieben.

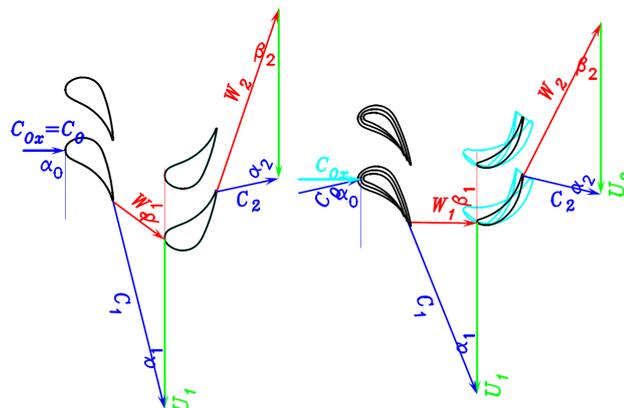


Abbildung 24: Geschwindigkeitsdreiecke Testmaschine B - Iteration

Die Geschwindigkeitsdreiecke der EXPANDER-Nachrechnung Iteration sind in Abbildung 24 für die komplette Turbine abgebildet. Durch den kleineren Staffelungswinkel der ersten drei Schaufelreihen fällt auch die Umlenkung der Strömung stärker aus als bei Testmaschine A. Abgesehen vom absoluten Abströmwinkel der V-Schaukel, welcher einen Gleichdrall aufweist, ist die Maschine aber im Hinblick auf die extremen Staffelungswinkel gut ausgelegt. Auch hier hat es wieder keine Unterschiede zwischen den EXPANDER-Versionen der ersten Stufe gegeben und nur leichte Änderungen in Betrag und Richtung der Geschwindigkeiten der zweiten Stufe.

Tabelle 4 listet die Maschinenparameter spezifische Arbeit, Massenstrom, isentroper Wirkungsgrad und Abströmwinkel der V-Schaukel auf. Durch den kleineren Staffelungswinkel der T- und T-kon-Schaukelreihen verringert sich der Massendurchsatz pro Zeiteinheit. Werden die Staffelungswinkel verkleinert, vergrößert sich der Abströmwinkel der Schaufeln. Dadurch verschiebt sich die Turbinenkennlinie in der λ - ϕ -Darstellung nach links. Mit einer Verminderung der Durchflusszahl ϕ kommt es zu einer Verringerung des Massenstroms. Die EXPANDER-Nachrechnung Alt berechnet den kleinsten Abströmwinkel der letzten Laufschaufel.

| Version | a [%] | \dot{m} [%] | η_s [%] | $\beta_2 - \beta_{2,ref}$ [°] |
|-----------|---------|---------------|--------------|-------------------------------|
| Iteration | 102.70 | 75.30 | 101.74 | 44.84 |
| MARTin | 102.76 | 75.30 | 101.80 | 45.28 |
| Alt | 102.56 | 75.30 | 101.61 | 43.88 |

Tabelle 4: Maschinendaten Testmaschine B EXPANDER

8.2.2 TBlock

Durch den kleineren Staffelungswinkel der ersten drei Schaufelreihen ist auch das H-Netz stärker verzerrt als bei Variante A (Abbildung 25).

In Abbildung 26 ist die Verteilung der Machzahl in der Turbine bei TBlock gezeigt. Durch die steilere Anströmung haben sich auch die Staupunkte bei den beiden Laufschaufeln druckseitig verschoben. Die Änderungen sind aber nicht so gravierend,

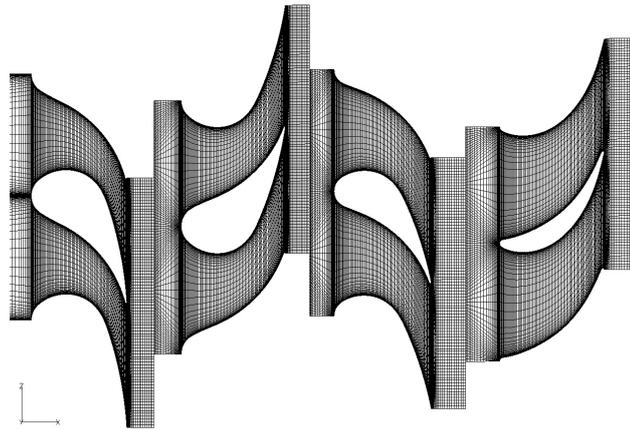


Abbildung 25: TBlock-Netz Testmaschine B - Iteration

dass es zu Ablösungen an der Saugseite der Schaufeln kommt. Der Druckverlauf

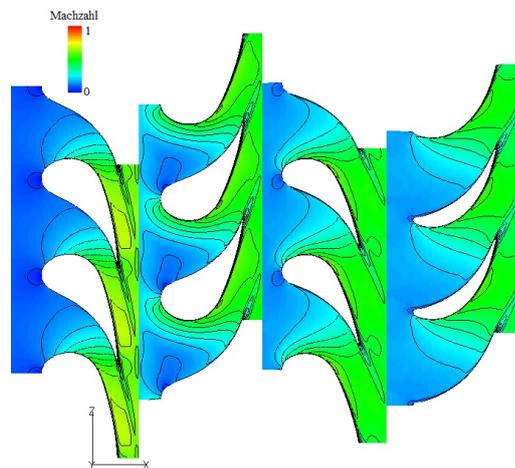


Abbildung 26: Entwicklung der Machzahl bei TBlock Testmaschine B - Iteration

in der Turbine ist in Abbildung 27 gezeigt. Man kann hier erkennen, dass durch den kleineren Staffelungswinkel ein höheres Druckgefälle in der ersten Leitschaufel abgebaut wird als bei Maschine A.

Die allgemeinen Maschinendaten und der Abströmwinkel sind in Tabelle 5 gezeigt. Wie erwartet gibt es auch wieder nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Programm-Versionen. Der Abströmwinkel der V-Schaufel ist wie in 8.2.1 bei Alt am geringsten.

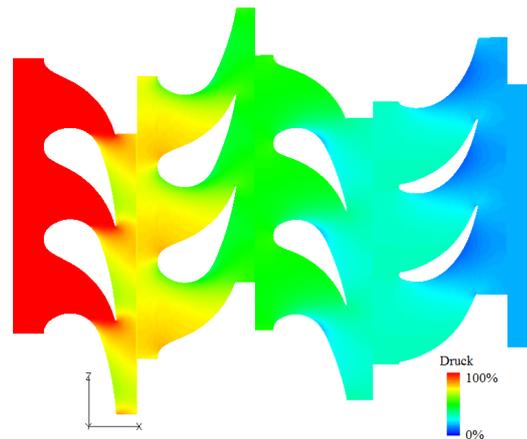


Abbildung 27: Druckverlauf in der Turbine bei Testmaschine B - Iteration

| Version | a [%] | \dot{m} [%] | η_s [%] | $\beta_2 - \beta_{2,ref}$ [°] |
|-----------|---------|---------------|--------------|-------------------------------|
| Iteration | 101.86 | 67.97 | 99.36 | 44.02 |
| MARTin | 101.84 | 68.05 | 99.34 | 44.05 |
| Alt | 101.74 | 67.87 | 99.32 | 43.61 |

Tabelle 5: Maschinendaten Testmaschine B TBlock

8.2.3 Ansys CFX

Der Austrittsdruck am Diffusor war bei der Option mit Iteration um 0.48 %, bei MARTin und Alt um 0.29 % größer als gewünscht. Das Netz ist in Abbildung 28 dargestellt und ähnelt jenem, welches für die Testmaschine A verwendet wurde. Durch einen längeren Einlaufbereich ist das Netz der ersten Leitschaufel größer.

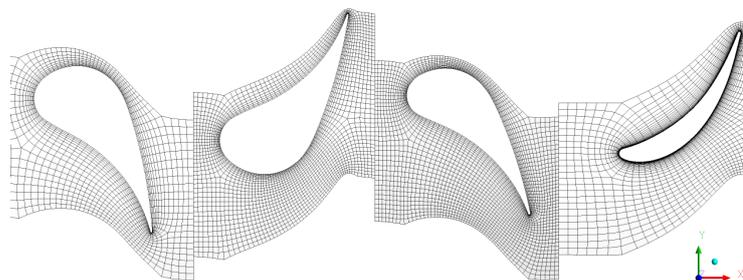


Abbildung 28: CFX-Netz bei Testmaschine B - Iteration

Die Verteilung der Machzahl bei Testmaschine B ist in Abbildung 29 gezeigt. In dieser Darstellung wird die druckseitige Anströmung der ersten Laufräder noch deutlicher. Es kommt aber auch zu keinen Ablösungen und somit entspricht es

qualitativ den Ergebnissen aus TBlock.

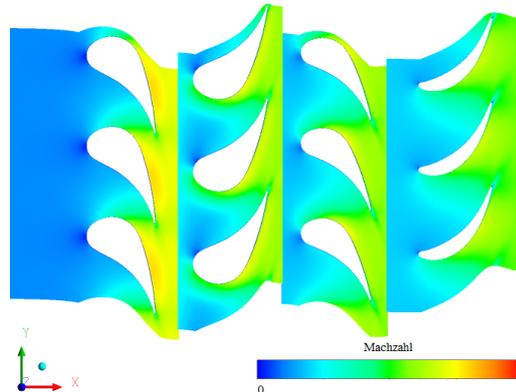


Abbildung 29: Entwicklung der Machzahl bei CFX Testmaschine B - Iteration

Beim Druckverlauf in CFX (Abbildung 30) sind Unterschiede zu TBlock zu erkennen. Die Differenzen sind aber nicht so stark wie bei Maschine A. Aufgrund von ähnlichen Ergebnissen bei Strömungsparametern und thermodynamischen Größen sind die Abweichungen durch den unterschiedlichen Farbverlauf der Legenden erklärbar.

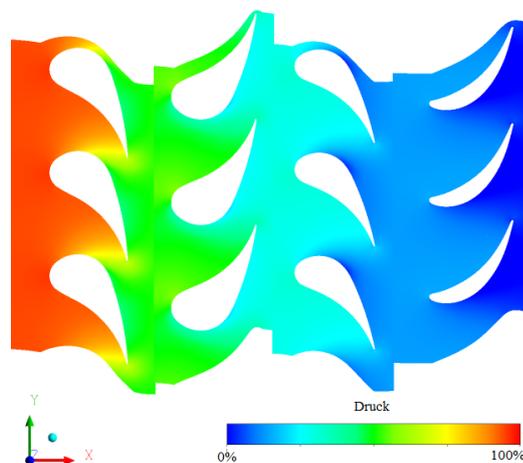


Abbildung 30: Druckverlauf in der Turbine bei CFX Testmaschine B - Iteration

Die Ergebnisse von ausgewählten Maschinendaten sind in Tabelle 6 aufgelistet. Die spezifische Arbeit variiert hier vom größten (MARTin) bis zum kleinsten Wert (Alt) um 1.71 %, und ist damit nicht so homogen wie in vorangegangenen Rechnungen.

Der Abströmwinkel der V-Schaufel ist wie bei allen Berechnungen der Testmaschine B bei Alt am kleinsten.

| Version | a [%] | \dot{m} [%] | η_s [%] | $\beta_2 - \beta_{2,ref}$ [°] |
|-----------|---------|---------------|--------------|-------------------------------|
| Iteration | 102.24 | 70.80 | 112.16 | 44.70 |
| MARTin | 103.69 | 70.82 | 112.10 | 45.39 |
| Alt | 101.98 | 70.67 | 112.06 | 44.55 |

Tabelle 6: Maschinendaten Testmaschine B Ansys CFX

9 Validierung der Ergebnisse

9.1 Testmaschine Variante A

Die Ergebnisse aus den CFX- und TBlock-Rechnungen wurden auf die Resultate der jeweilige EXPANDER-Nachrechnung bezogen. Es wird geprüft, welche EXPANDER-Variante die besten Ergebnisse in Kombination mit den 3D-CFD-Verfahren liefert.

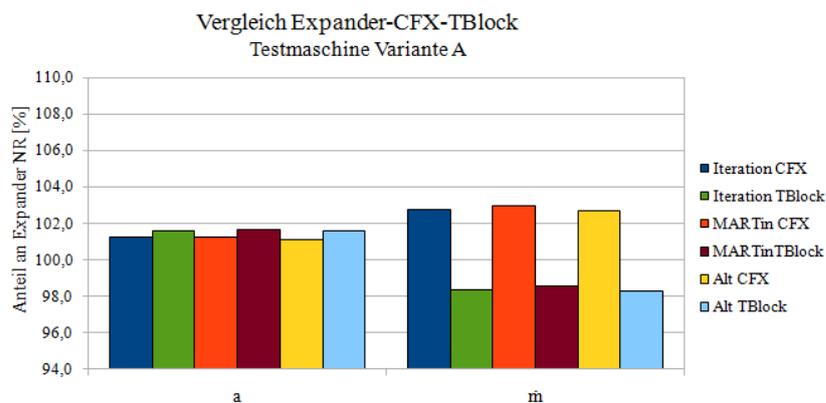


Abbildung 31: Vergleich spezifische Arbeit und Massenstrom Variante A

Die spezifische Arbeit a in Abbildung 31 ist der Quotient von Leistung P_t und Massenstrom \dot{m} und wurde zum besseren Vergleich der Verfahren zueinander angewendet. Durch den höheren Massenstrom bei ähnlicher Leistung ist die spezifische Arbeit bei den CFX-Rechnungen systematisch geringer als bei TBlock.

Abbildung 32 zeigt die Anteile der Abströmwinkel und Machzahlen der ersten Stufe im Bezug auf die jeweilige EXPANDER-Nachrechnung. TBlock berechnet einen stärkeren Drall der Abströmung der Leitschaufel in der ersten Stufe. Gleiches, nur nicht in so ausgeprägter Form, gilt für den Abströmwinkel in der ersten Laufschaufelreihe. Die Abweichung der Machzahl nach der Leitschaufel ist bei allen Varianten hoch, wobei die TBlock-Ergebnisse herausstechen.

Mit 0.624% Differenz zur EXPANDER-Nachrechnung liegt β_2 der zweiten Laufschaufelreihe der CFX-Rechnung MARTin am nächsten zum Nachrechnungsprogramm (Abbildung 33). Der Abströmwinkel der V-Schaufel

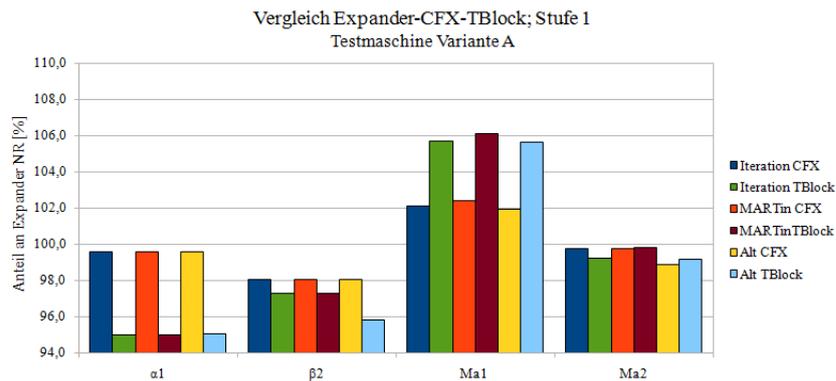


Abbildung 32: Vergleich 1.Stufe Testmaschine A

von Iteration CFX hat 0.691 % und Alt CFX 3.316 % Abweichung zu EXPANDER. Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen Alt und Iteration zu erkennen, woraus zu schließen ist, dass in der Arbeitskette vom Erstellen des geeigneten Modells zur Ermittlung des Abströmwinkels bis zur Umsetzung im EXPANDER-Programm keine Fehler unterlaufen sind. Dadurch, dass die Winkel im modifizierten EXPANDER von CFX-Rechnungen stammen, muss auch die Differenz zwischen Auslegungsprogramm und CFX bei den neuen Versionen (Iteration und MARTin) am kleinsten sein.

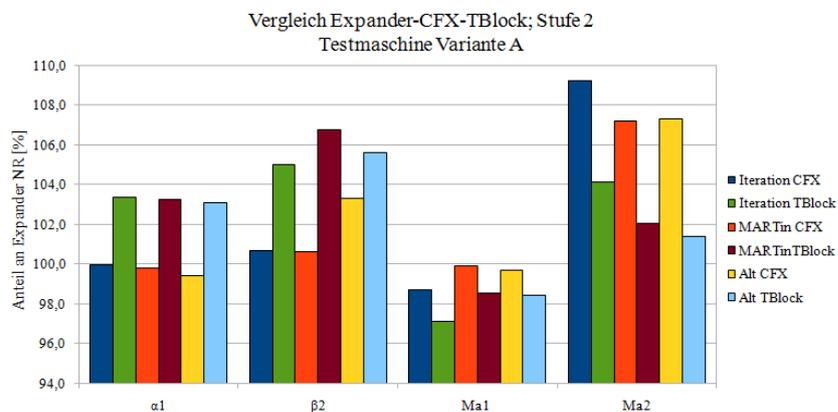


Abbildung 33: Vergleich 2.Stufe Testmaschine A

Es setzt sich auch beim Abströmwinkel der V-Schaufel der Trend aus den vorhergehenden Schaufelreihen fort, dass TBlock am weitesten von den EXPANDER-Rechnungen entfernt liegt. Bei den Rechnungen mit TBlock hat MARTin mit 6.777 % die größte und Iteration mit 5.011 % die kleinste Abweichung.

Da der Fokus auf der Berechnung des Winkels mittels Iteration liegt, ist es ein gutes Ergebnis, dass Iteration um 0.602% näher an EXPANDER liegt als Alt.

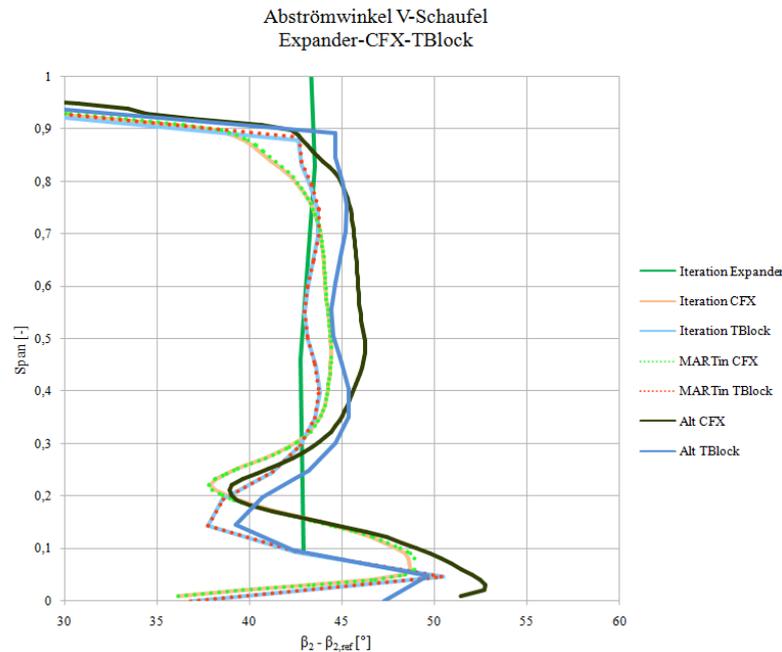


Abbildung 34: Verlauf des Abströmwinkels über der Schaufel

Abbildung 34 zeigt den Verlauf des Abströmwinkels nach der Berechnung von EXPANDER, CFX und TBlock. Es ist zu erkennen, dass TBlock und CFX eine ähnliche Entwicklung aufweisen. Es bilden beide die Abweichung des Abströmwinkels in Nabennähe ab. Die schwarze und blaue Linie entsprechen den Daten jener Maschine, welche durch das alte Auslegungsprogramm berechnet wurden. Während die Ergebnisse von Iteration und MARTin bei den unterschiedlichen CFD-Programmen fast ident sind, haben die Werte aus Alt einen Offset von rund 2° . Diese Abweichung verschwindet aber bei einer dimensionslosen Schaufelhöhe von 0.09 (TBlock) bzw. 0.15 (CFX). Die große Differenz zur EXPANDER-Auslegung an der Schaufelspitze ist bedingt durch die Spaltströmung. Der Kanalwirbel in Nabennähe führt im Bereich der dimensionslosen Schaufelhöhe von 0 bis 0.1 zu einer Minderumlenkung und damit zur Vergrößerung von β_2 . Dreht der Wirbel anschließend wieder in Richtung Druckseite der benachbarten Schaufel, kommt es zur Mehrumlenkung des Abströmwinkels. Die Überlagerung der

Hauptströmung mit der Spaltströmung an der Schaufelspitze führt auch hier zu einer starken Minderumlenkung von β_2 . Der Verlauf der Stromlinien an der Saugseite der Schaufel von Schaufelvorder- zu Hinterkante sind in Abbildung 35 dargestellt. Sie verdeutlichen, wie es zur Änderung von β_2 an Schaufelfuß und -spitze kommt. Weiters sind die Stromlinien erkennbar, welche durch den Spalt zwischen Gehäuse und Schaufel gehen.

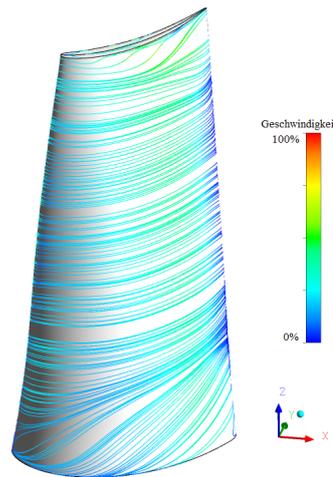


Abbildung 35: Stromlinien an der Saugseite der V-Schaufel

Wegen der unterschiedlichen Berechnungsmethoden im EXPANDER ist es nur bei Iteration möglich, die Werte des jeweiligen Profilabströmwinkels auszugeben. Obwohl in einem eindimensionalen Programm wie EXPANDER die eben genannten Effekte nicht abgebildet werden können, ergibt sich nach der Mittelung eine gute Übereinstimmung mit den CFD-Ergebnissen (Abbildung 33).

9.2 Testmaschine Variante B

Der Massenstrom der TBlock-Rechnungen ist bei allen drei EXPANDER-Auslegungsvarianten um 5% kleiner als die jeweilige CFX-Rechnung (Abbildung 36). Diese Abweichungen sind nicht analog mit den Ergebnissen aus Variante A in Kapitel 9.1 und werden deswegen in Kapitel 9.2.1 genauer untersucht.

Im Gegensatz zur Testmaschine Variante A haben die Abströmwinkel der ersten

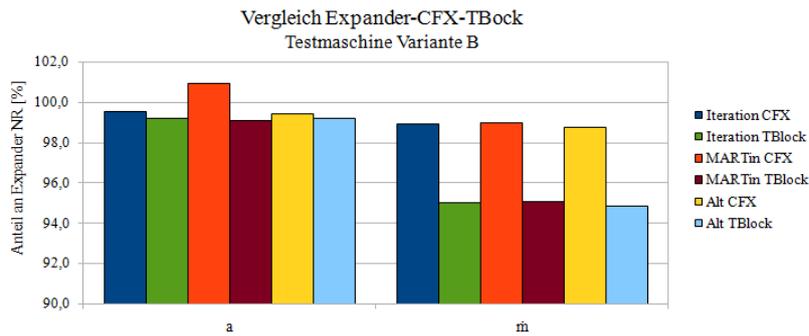


Abbildung 36: Vergleich spezifische Arbeit und Massenstrom Variante B

Stufe in Abbildung 37 der CFX-Rechnungen größere Abweichungen zu den EXPANDER Nachrechnungen als TBlock. Bei der Abströmmachzahl Ma_1 zeigt sich qualitativ derselbe Verlauf wie bei Variante A. Die Ergebnisse aus TBlock haben die höchsten Differenzen und auch die Reihung von Iteration, MARTin und Alt ist ident.

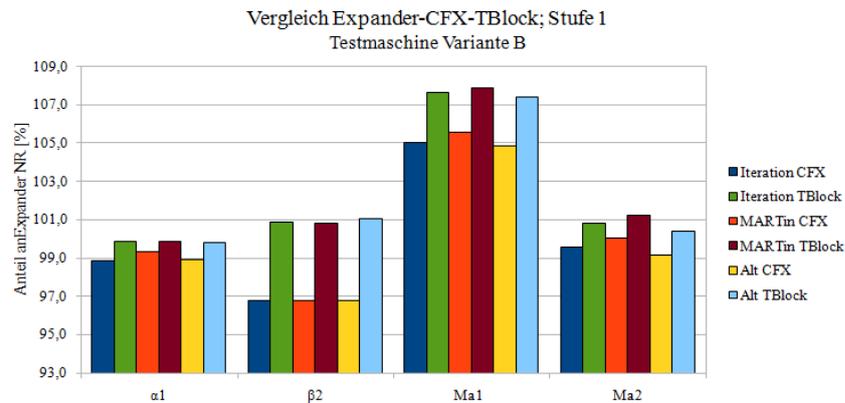


Abbildung 37: Vergleich 1.Stufe Testmaschine B

Bei genauerer Betrachtung von β_2 der V-Schaufel weisen auch diese ein ähnliches Verhalten wie in Variante A auf. MARTin-CFX liegt mit 0.487% am nächsten an den EXPANDER-Ergebnissen, Iteration hat eine Abweichung von 0.554% und Alt weicht um 2.557% ab. Das bedeutet, dass auch hier die Änderungen an der V-Schaufel im EXPANDER zu einem besseren Ergebnis geführt haben. Bei den Ergebnissen aus TBlock hat Alt mit 1.017% die geringste Differenz. Die Abströmwinkel von Iteration sind um 3.255% und von MARTin um 4.921% größer

als im Auslegungsprogramm. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass sich die Werte aus den jeweiligen Rechnungen immer auf jene EXPANDER-Variante beziehen, mit der sie auch ausgelegt wurde.

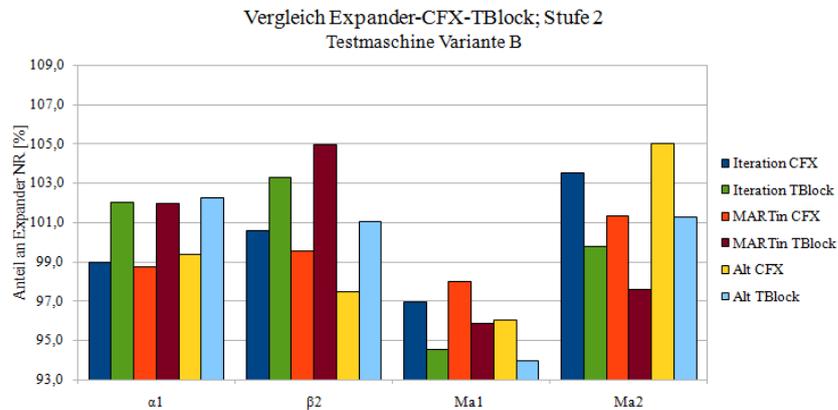


Abbildung 38: Vergleich 2.Stufe Testmaschine B

Die Leitschaufel der zweiten Stufe weist auch wieder geringere Machzahlen bei den TBlock-Rechnungen im Vergleich zu den CFX-Ergebnissen auf.

9.2.1 Netzabhängigkeit des Massenstroms

In 8.2.2 wurde gezeigt, dass die Abweichung des Massenstroms aus den TBlock-Rechnungen zu den Ergebnissen aus EXPANDER und CFX sehr groß ist. Dies spiegelt die bisherigen Erfahrungen von MAN Turbo wider, dass der Massenstrom mit TBlock immer zu klein berechnet wurde. In Anbetracht dessen, dass der kleinere Stafflungswinkel der Schaufeln auch zu stärker verzerrten H-Netzen führt, lag die Vermutung nahe, dass der Grund dafür der Einfluss durch das Netz war.

Es besteht in TBlock die Möglichkeit, Netze aus Ansys Turbogrid zu implementieren. Da hierfür aber ein erheblicher Arbeitsaufwand entsteht, ist dies keine Standardvorgehensweise bei der Berechnung einer kompletten Maschine. Abbildung 39 zeigt das Netz im Bereich der Hinterkante der ersten Leitschaufel der Testmaschine B. Bedingt durch den kleinen Stafflungswinkel ist beim H-Netz von TBlock (a) an der Hinterkante zu erkennen, dass die Netzmaschen eine schlechte Qualität aufweisen.

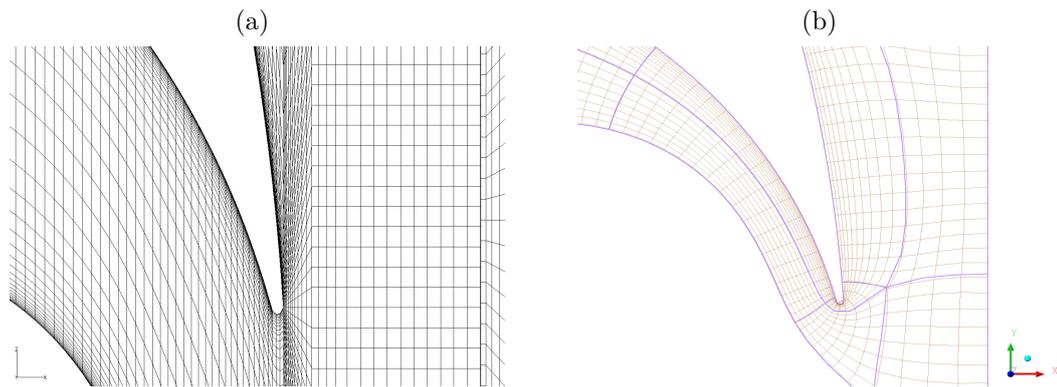


Abbildung 39: Netz an der Hinterkante der ersten Leitschaufel (a) TBlock
(b) Ansys Turbogrid

Testmaschine Variante B, 1. Stufe

TBlock benötigt über der Schauffellänge für jeden Block dieselbe Anzahl an Netzmaschen. Die in Abschnitt 8.2 verwendete Maschine hat in der zweiten Stufe sowohl an Leit- wie auch Laufschaufel Spalte. Druck- und Saugseite haben bedingt durch ihre unterschiedlichen Längen nicht dieselbe Anzahl an Netzmaschen. Bei der Verbindung dieser im Spalt gibt es deswegen einen Sprung der Netzmaschen in der Verbindungsebene. TBlock kann dies nicht berechnen, weswegen als erste Evaluierung nur die erste Stufe berechnet wurde.

Das Modell hat hinter der Laufschaufel einen Auslaufteil um Einflüsse aus der Umgebung nach dem Austritt zu verhindern. Der statische Druck am Austritt entspricht jenem Wert, der aus der CFX-Rechnung der gesamten Maschine an der Mischungsebene zwischen erster und zweiter Stufe berechnet wurde. Die Randbedingungen am Eintritt sind ident mit jenen des Gesamtmodells aus Kapitel 8.2.

Für eine bessere Gegenüberstellung wurde die CFX-Rechnung auch mit dem Modell der ersten Stufe wiederholt. Da auch hier wieder ein konisches Endstück notwendig war, differierte der statische Druck in der Mischungsebene um 0.11 %.

In Abbildung 40 sind die prozentualen Abweichungen des Massenstroms zum Ergebnis der EXPANDER-Nachrechnung aus 8.2.1 gezeigt. Ein Vergleich mit der

gesamten Maschine ist deswegen zulässig, weil der Großteil des Massenstroms durch die erste Stufe bestimmt wird. Es wurde das EXPANDER-Programm mit der Berechnung des Abströmwinkels mittels Iteration verwendet.

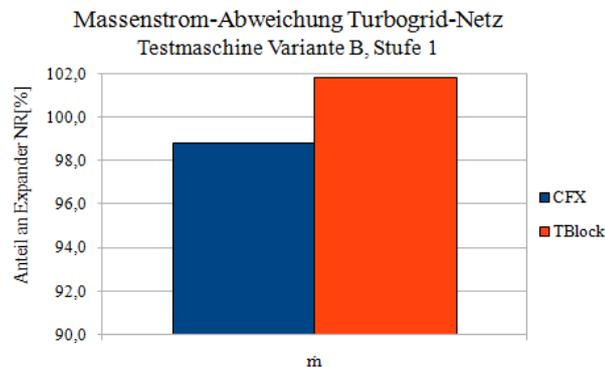


Abbildung 40: Abweichung des Massenstroms mit Turbogrid-Netzen
Testmaschine B 1.Stufe

Die Abweichung von 1,8 % zur EXPANDER-Nachrechnung der gesamten Maschine ist um 3,4 % geringer als die Berechnung der gesamten Maschine mit den H-Netzen. Dies bestätigt die Annahme, dass das H-Netz für kleine Staffelungswinkel das Ergebnis durch die starke Abweichung zu idealen Netzmaschen beeinflusst.

Testmaschine Variante B

Aufgrund des positiven Ergebnisses vom vorhergehenden Abschnitt wird nun die gesamte Maschine in TBlock mit Turbogrid-Netzen ausgestattet. Es soll auch ein exakter Vergleich zu EXPANDER angestellt werden können. Es wird die komplette Maschine ohne Spalte an den Schaufelspitzen ausgelegt, sodass die Netze auch TBlock-kompatibel sind.

Die Randbedingungen waren wieder ident zu allen anderen Rechnungen der ganzen Maschine. Der statische Druck am Diffusoraustritt in CFX war um 0,29 % größer als gefordert.

Abbildung 41 zeigt die Abweichung der Massenströme von Variante B mit bzw. ohne Spalt zur jeweiligen EXPANDER-Nachrechnung. Der Zusatz „mit Spalt“ bezeichnet dabei jene Version, welche in TBlock mit H-Netzen berechnet wurde und Spalte in

der zweiten Stufe aufweist. „Ohne Spalt“ ist die Testmaschinen-Variante ohne Spalte und mit Turbogrid-Netzen sowohl in der CFX- als auch in der TBlock-Rechnung.

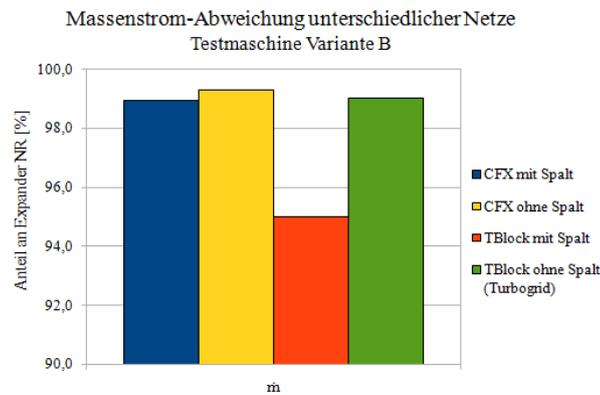


Abbildung 41: Abweichung des Massenstroms Testmaschine B

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Berechnung der Schaufel mit O-Netzen zu einer besseren Übereinstimmung mit den EXPANDER-Rechnung führt. Der prozentuale Unterschied des Massenstroms zur EXPANDER-Nachrechnung zwischen H- und O-Netzen sind 4.02%. Dieser Unterschied deckt sich wie erwartet mit den Ergebnissen der ersten Stufe aus dem vorhergehenden Abschnitt. Es sei noch zu erwähnen, dass das Turbogrid-Netz der Leitschaufel in der zweiten Stufe in den beiden Rechnungen ohne Spalt feiner war als in jenen mit Spalt, weil die Rechnung in TBlock sonst nicht konvergierte. Anhand der Gegenüberstellung der Resultate lässt sich feststellen, dass die Beeinflussung auf das Endergebnis als gering einzustufen ist.

10 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Diplomarbeit wurde die eindimensionale Auslegung einer 3D-Turbinen-Laufschaukel mittels modernen 3D-CFD-Verfahren verfeinert und eine neue Methode zur Berechnung des Abströmwinkels dieser Schaukel erarbeitet und programmtechnisch implementiert.

Das Auslegungsprogramm EXPANDER hatte in einer ersten Version eine einzige Variante der V-Schaukel implementiert. Der dreidimensionale Aufbau der Schaukel erfolgt aber je nach Schaukellänge nach exakten Konstruktionsvorschriften. Dies betrifft in erster Linie die Abstände in radialer Richtung zwischen den verschiedenen Profilen. EXPANDER wurde mit dieser Vorschrift erweitert, sodass der Aufbau der V-Schaukel direkt zu den Konstrukteuren in drei Dimensionen geliefert werden kann.

Die Ermittlung des Abströmwinkels der Schaukelprofile erfolgte in Ansys CFX. Die Rechnungen wurden in jedem der fünf Profilschnitte für vier verschiedene Austrittsmachzahlen, vier globale Staffelungswinkel und sieben unterschiedliche Teilungsverhältnisse $\frac{\text{Teilung}}{\text{Sehnenlänge}}$ durchgeführt. Die durch Excel bereinigten und gemittelten Ergebnisse wurden anschließend in die EXPANDER-Datenbank übertragen. Durch die neue Bestimmung der Abströmwinkel war auch eine geänderte Berechnung in EXPANDER erforderlich. Es wurde eine neue Routine (Iteration) eingeführt, welche den Winkel an jedem Profilschnitt einzeln auf die jeweilige Machzahl korrigiert und erst anschließend auf den Eulerradius mittelt. Zusätzlich wurde noch eine weitere Routine (MARTin) zur Berechnung des Abströmwinkels getestet.

Die Validierung des neuen Auslegungsprogramms erfolgte mit einer zweistufigen Testmaschine, welche in Ansys CFX und TBlock nachgerechnet wurde. Es hat sich herausgestellt, dass der Abströmwinkel bei CFX durch MARTin am nächsten an den EXPANDER-Daten liegt, beim H-Netz mit TBlock aber am weitesten entfernt. Die Ergebnisse aus der Routine Iteration sind bei Ansys CFX fast gleich wie MARTin und weisen bei TBlock die geringsten Abweichungen auf.

Die Maschine wurde ebenfalls mit besonders kleinen Staffelungswinkeln konstruiert. Auch hier war die Reihenfolge der Abweichungen der verschiedenen Programmversionen gleich wie bei Testmaschine A. Der einzige Unterschied lag darin, dass bei TBlock nicht Iteration am nächsten zu den EXPANDER-Werten lag sondern Alt. In Anbetracht der eben genannten Ergebnisse ist die Schlussfolgerung, dass die EXPANDER-Version Iteration am besten geeignet ist für zukünftige Auslegungen von Axialexpandern.

Der Massenstrom wurde in TBlock im Vergleich zu EXPANDER und Ansys CFX viel zu niedrig berechnet. Eine detaillierte Analyse hat ergeben, dass die starke Anstellung der Schaufeln zu extrem verzerrten Netzen führt. Die Verwendung von O-Netzen aus Ansys Turbogrid verbesserte den Wert des Massenstroms maßgeblich. Deswegen gilt die Empfehlung, bei Maschinen mit sehr kleinen Staffelungswinkeln den Mehraufwand durch die Implementierung eines Turbogrid-Netzes in TBlock in Kauf zu nehmen, um die Ergebnisse nicht durch das Netz negativ zu beeinflussen.

Die Abweichungen von TBlock zu EXPANDER der verschiedenen Maschinenparameter waren höher als erwartet. Durch die Erkenntnis, dass das Netz einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat, sollten alle Rechnungen mit Turbogrid-Netzen wiederholt werden. Dies und Erweiterungen im EXPANDER-Programm können Themen für weitere Forschungsarbeiten im Bereich der Numerischen Simulation von Axialexpandern sein.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Abströmwinkel in Abhängigkeit der Abströmmachzahl | 9 |
| 2 | Herleitung des Abströmwinkels bei Unterschallströmung | 10 |
| 3 | T-Schaufel | 13 |
| 4 | Konische T-Schaufel | 14 |
| 5 | V-Schaufel | 15 |
| 6 | GT3-Beschaufelung | 15 |
| 7 | MARTin-Beschaufelung | 16 |
| 8 | Profilschnitte | 21 |
| 9 | Netz des CFD-Modells | 22 |
| 10 | Bestimmung des Abströmwinkels in Ansys CFX | 22 |
| 11 | Verlauf des Abströmwinkels | 23 |
| 12 | Differenzen zwischen alten und neuen Abströmwinkeln (1) | 24 |
| 13 | Differenzen zwischen alten und neuen Abströmwinkeln (2) | 25 |
| 14 | Geometrie Testmaschine A - Iteration | 27 |
| 15 | Geschwindigkeitsdreiecke Testmaschine A | 28 |
| 16 | TBlock-Netz Testmaschine A - Iteration | 29 |
| 17 | Entwicklung der Machzahl bei TBlock Testmaschine A - Iteration | 30 |
| 18 | Druckverlauf in der Turbine bei TBlock Testmaschine A - Iteration | 31 |
| 19 | CFX-Modell von Testmaschine A - Iteration | 31 |
| 20 | Turbogridnetz der Turbine von Testmaschine A - Iteration | 32 |
| 21 | Entwicklung der Machzahl bei CFX Testmaschine A - Iteration | 32 |
| 22 | Druckverlauf in der Turbine bei CFX Testmaschine A - Iteration | 33 |
| 23 | Geometrie Testmaschine B - Iteration | 34 |
| 24 | Geschwindigkeitsdreiecke Testmaschine B | 34 |
| 25 | TBlock-Netz Testmaschine B - Iteration | 36 |
| 26 | Entwicklung der Machzahl bei TBlock Testmaschine B - Iteration | 36 |
| 27 | Druckverlauf in der Turbine bei Testmaschine B - Iteration | 37 |
| 28 | CFX-Netz bei Testmaschine B - Iteration | 37 |
| 29 | Entwicklung der Machzahl bei CFX Testmaschine B - Iteration | 38 |

| | | |
|----|--|----|
| 30 | Druckverlauf in der Turbine bei CFX Testmaschine B - Iteration . . . | 38 |
| 31 | Vergleich spezifische Arbeit und Massenstrom Variante A | 40 |
| 32 | Vergleich 1.Stufe Testmaschine A | 41 |
| 33 | Vergleich 2.Stufe Testmaschine A | 41 |
| 34 | Verlauf des Abströmwinkels über der Schaufel | 42 |
| 35 | Stromlinien an der Saugseite der V-Schaukel | 43 |
| 36 | Vergleich spezifische Arbeit und Massenstrom Variante B | 44 |
| 37 | Vergleich 1.Stufe Testmaschine B | 44 |
| 38 | Vergleich 2.Stufe Testmaschine B | 45 |
| 39 | Netzvergleich TBlock zu Ansys Turbogrid | 46 |
| 40 | Abweichung des Massenstroms mit Turbogrid-Netzen Testmaschine B 1.Stufe | 47 |
| 41 | Abweichung des Massenstroms Testmaschine B | 48 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Maschinendaten Testmaschine A EXPANDER | 29 |
| 2 | Maschinendaten Testmaschine A TBlock | 30 |
| 3 | Maschinendaten Testmaschine A Ansys CFX | 33 |
| 4 | Maschinendaten Testmaschine B EXPANDER | 35 |
| 5 | Maschinendaten Testmaschine B TBlock | 37 |
| 6 | Maschinendaten Testmaschine B Ansys CFX | 39 |

Literatur

- [1] Greving, J.: *Erweiterung eines Auslegungsprogrammes für Axialexpander um die Berechnung von weiteren Schaufeltypen und kompletten Kennfeldern sowie Validierung durch 3D-CFD Verfahren*, Diplomarbeit RWTH Aachen, Oberhausen 2010
- [2] Restemeier, M.: *Erweiterung eines Auslegungsprogrammes für Axialexpander um weitere Schaufeltypen und Nachrechnung von ausgewählten Maschinen durch ein 3D-CFD Verfahren*, Diplomarbeit RWTH Aachen, Oberhausen 2006
- [3] Seume, J. (Hrsg.) und Lechner, C.: *Stationäre Gasturbinen*, Springer Verlag, 2. Auflage, Berlin Heidelberg 2010
- [4] URL: <http://www.mandieselturbo.com>, Homepage von MAN Diesel & Turbo SE, 04.10.2011
- [5] Traupel, W.: *Thermische Turbomaschinen - Erster Band*, Springer Verlag, 3. Auflage, Berlin Heidelberg 1977
- [6] Weise, C.: *Strömungsanalyse in einem siebenstufigen Axialexpander mit mehreren Rechenverfahren*, Diplomarbeit Universität Duisburg Essen, Oberhausen 2008
- [7] Willinger, R.: *Moderne Entwicklungstendenzen thermischer Turbomaschinen*, Skriptum zur Vorlesung, Inst. f. Energietechnik und Thermodynamik, Technische Universität Wien, Wien 2011
- [8] Willinger, R.: *Numerische Strömungsberechnung von thermischen Turbomaschinen*, Skriptum zur Vorlesung, Inst. f. Energietechnik und Thermodynamik, Technische Universität Wien, Wien 2010
- [9] Willinger, R.: *Thermische Turbomaschinen*, Skriptum zur Vorlesung, Inst. f. Energietechnik und Thermodynamik, Technische Universität Wien, Wien 2009

Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe und dass alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken entnommen sind, durch Angaben von Quellen als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

Diese Diplomarbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form in keinem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt.

Ort, Datum

Unterschrift