

Fachlicher Abschlußbericht 0327090A

AGTurbo II Vorhaben

Weiterentwicklung des CO₂-armen Gas- und Dampfprozesses.
Optimierung v. Strömung u. Werkstoffen in Verdichter u. Turbine.
Optimierung einer stabilen Verbrennung. Erhöhung der
Verfügbarkeit des Gesamtkraftwerkes

Einzelvorhaben 2.3.10A Wirkungsgradoptimierte Turbinenbeschaufelung

Michel Sell

ALSTOM POWER Generation GmbH

Mai 2005

Zusammenfassung

Dieser Bericht umfasst die Tätigkeiten der ALSTOM Energie für das Projekt 2.3.10A "Wirkungsgradoptimierte Turbinenbeschaukelung", das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit unterstützt wird. Der Bericht fasst die numerischen Tätigkeiten zusammen, die durchgeführt werden. Obwohl viele Leute zu den experimentellen Daten und zu numerischen Daten beigetragen haben, ist der Inhalt dieses Berichts in der Verantwortlichkeit des Autors alleine.

Bestätigungen

Dieser Report bestätigt den bedeutenden Beitrag der Personen, die im Rahmen dieses Projektes für ALSTOM Power arbeiteten.

A. Fowler
F. Kreitmeier
Dr. R. Greim
S. Havakechian

Inhalt

1.0. Einleitung

- 1.1 Zeilesetzung des Vorhabens
- 1.2. Einzelziele von ALSTOM Power:
- 1.3. Erfolgsaussichten
- 1.4. Stand der Wissenschaft und Technik, Literaturangaben
- 1.5. Eigene Bisherige Arbeiten
- 1.6. Projekt Planung
- 1.7. Gesamtziel des Vorhabens 2.3.10.A
- 1.8. Planung Vorhaben 2.3.10.A

2.0. Arbeitspaketen

- 2.1. AD 1 Fertigung
- 2.2. AD 1 Wuchtung
- 2.3. AD. 2 Probabilistische Auswertung der Versuchsergebnisse
 - 2.3.1. Monte-carlo Simulation
 - 2.3.2. Beispiele

3.0. Zusammenfassung und Ausblick

4.0. Literatur

Nomenclature

A	Fläche	[m ²]
c	Geschwindigkeit	[m/s]
CQK, CTK, CNK	Geschwindigkeiten in K Variante	[m/s]
CQM, CTM, CNM	Geschwindigkeiten in M Variante	[m/s]
CXN, CYN, CZN	Geschwindigkeiten in N Variante	[m/s]
E	Totalenergie	[J]
h	Enthalpie	[J/kg]
H	Total-Enthalpie	[J/kg]
HQ	Irreversibel gemittelte Enthalpie	[j/Kg]
ke	Kinetische Energie	[j/kg]
n	Flächen senkrecht-Richtung	[m]
\dot{m}	Massenstrom	[kg/s]
p	Druck	[Pa]
PQ	irreversibel gemittelter Druck	[Pa]
Q	Koordinate (siehe Abb. 2)	[m]
R	Koordinate (siehe Abb. 2)	[m]
s	Entropie	[J/kg.k]
t	Zeit	[s]
U	Koordinate (siehe Abb. 2)	[m]
u, v, w,	Geschwindigkeiten in senkrechten Koordinaten	[m/s]
$\tilde{\alpha}$	Koordinate (siehe Abb.2)	[°]
$\tilde{\alpha}$	Polytropischer Wirkungsgrad	[-]
$\tilde{\rho}$	Dichte	[kg/m ³]
$\tilde{\alpha}$	Betriebspunkte	[-]

1.0. Einleitung

Nach Einschätzung aller führenden internationalen Energiewirtschaftsexperten wird die globale Stromerzeugung in den nächsten Jahren wieder steigen. Seit 1980 ist ein Anstieg der Stromerzeugung um 66% auf 13'800 kWh/a zu verzeichnen und bis 2010 wird ein weiterer Anstieg um mehr als 50% vor allem in den Schwellenländern erwartet. Der relative Anteil der fossilen Brennstoffe an der Stromerzeugung bleibt dabei nahezu unverändert, wobei die Kohle mit einem Anteil von ca. 40% den größten Primärenergieträger darstellt. Außerdem wird in den Industrienationen ein erheblicher Ersatz- und Modernisierungsbedarf an bestehenden Anlagen erwartet. Die Beschaffungskriterien sind hierbei neben den geringen Investitionen vor allem die hohe Wirtschaftlichkeit durch hohen Wirkungsgrad, hohe Verfügbarkeit und lange Lebensdauer sowie die Umweltverträglichkeit.

Die Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Dampfturbine hat zwei klare Nutzen (1) verringerte Betriebskosten für Betriebsinhaber und (2) verringerte Klimaauswirkung durch eine Verringerung der CO₂-Produktion (für die gleichwertige Energie). Historisch hat die Optimierung der Dampfturbine sich auf die Kanalgeometrie und die Schaufelung konzentriert. In den letzten Jahren lag die Optimierung der 3-dimensionalen Schaufelprofile im Vordergrund der Bemühungen. Als Resultat gibt es bedeutenden Verbesserungen in der Turbinen-Leistungsfähigkeit, in Vergleich zu dem Status vor 15-20 Jahren. Ein Grossteil der Verbesserungen in der Turbine-Leistungsfähigkeit waren durch das Verständnis der sogenannten "Sekundär-Strömungen" entstanden, z.B. Passagen-Wirbeln, Nachlaufzellen, Endwand und Profiltrenzschichten.

Bei mehrstufigen Turbinenbeschaufelungen mit Deckbändern treten vielfältige externe und interne Wechselwirkungen (Interaktionen) auf:

Die **externen Interaktionen** betreffen jene mit dem Eintrittsgehäuse bzw. Einlauf sowie jene mit dem Austrittsdiffuser bzw. Austrittsgehäuse.

Die **internen Interaktionen** treten zwischen den Schaufelgittern untereinander sowie den Schaufelgittern mit den Deckband-Kavitäten und -Labyrinthströmungen auf. Die Deckband-Kavität ist dabei durch das sogenannte Einbettungsspiel des Deckbandes (abhängig vom Axialabstand der Schaufelgitter, den Fuss- und Deckbandüberständen bzw. vom notwendigen Dehnungsausgleich und Sicherheitsabstand) gekennzeichnet. Die Deckband-Labyrinthströmung schliesslich sei hier durch die Dichtstreifenspiele repräsentiert.

Die Schaufelgitter-Interaktion liegen in Reinkultur beim Einbettungsspiel und Dichtstreifenspiel gegen Null vor. Generell ist die Leitreiben-Laufreihen-Interaktion durch zeitliche und räumliche Strömungs-Inhomogenitäten (betrachtet in Absolutsystem) gekennzeichnet. Die zeitlichen Inhomogenitäten rühren dabei vom Druckfeld der Laufschaufeln; die räumlichen vom Druckfeld und Nachläufen der Leitschaufeln aber auch von deren Sekundärströmungen her. Die Inhomogenität hängt unter anderen stark von Verhältnis Gitterabstand zu Teilung, von der Profilform, vom Staffelungswinkel sowie von den Betriebsbedingungen ab.

Erfahrungsgemäss tritt in mehrstufigen Beschaufelungen aber auch eine merkbare Leitreiben-Leitreiben-Interaktion („clocking“) auf.

Die Schaufelgitter-Deckbandkavitäten-Interaktion ist normalerweise der Schaufelgitter-Schaufelgitter-Interaktion überlagert. Sie liegt dann in Reinkultur vor, wenn die Dichtstreifenspiele gegen Null gehen. Dann wird von den Druckfeldern der Schaufeln eine parasitäre, zirkulare Ausgleichströmung in den Kavitäten hervorgerufen, welche zu einer Intensivierung der Sekundärströmung in Leit- und Laufreihen und zu einer merkbaren Zusatzdissipation führt. Dieser Effekt hängt zusätzlich stark von den teilungsbezogenen Fuss- und Deckbandüberständen (also, der Abschirmung) bzw. vom Einbettungsspiel ab.

Anmerkung: Die Interaktion einer Deckband-Spaltströmung mit einer Turbinenbeschaufelung mit Deckband-Kavitäten ist Gegenstand eines eigenen Vorhabens (Vh. 2.1.1. „Wechselwirkung der Deckband-Spaltströmung und der Hauptströmung im Turbinen-Stufenverband“) und bleibt hier ausgeklammert.

In der Praxis kommen in Hochdruck- und Mitteldruck-Dampfturbinen vielfach Stufengruppen mit mindestens 3 bis maximal 12 Stufen vor. Für die Untersuchungen der externen und internen Interaktionsphänomene ist somit im Minimum eine 2-stufige Deckbandbeschaufelung nötig. Erst dann sind die beiden Randreihen den externen und den beiden Binnenreihen den internen Interaktionen ausgesetzt.

1.1 Zielsetzung des Vorhabens

Dieses Vorhabens baut stark auf die Ergebnisse des Vorhabens 2.1.7 „3D-Instationäre Schaufelgitter-Interaktion in 2-stufigen Turbinenbeschaufelungen mit Deckbandkavitäten“ auf.

Das Ziel des Vorhabens ist die experimentelle Erforschung der oben geschilderten Interaktions-Phänomene sowie deren numerischen Beschreibung mit Hilfe von neuartigen Strömungsmodellen. Sie sollen in Zukunft sicherstellen, dass mit instationären 3D- sowie quasi-instationären 3D-, Q3D-, 2D- und 1D- Codes treffsicherer gerechnet werden kann.

Die Einzelziele des Hochschulpartners sind in einem eigenen Antrag beschrieben. Dort wird insbesondere festgehalten, dass die experimentellen Untersuchungen an zwei ausgelegten 2-stufigen Deckbandbeschaufelungen mit hochwertiger Messtechnik durchgeführt werden.

Am Anfang der Untersuchungen steht die klassische Repetierstufenbeschaufelung (Beschaufelung 1) mit zylindrischen, wenig umlenkenden Schaufeln. Die beiden Stufen weisen die gleiche Geometrie auf, wie die beiden letzten einer 5-Stufigen Beschaufelung, welche bei ALSTOM Power bereits untersucht wurde. In der Folge wird eine Beschaufelung mit stärker umlenkenden Schaufeln (d.h. intensivierten Interaktioneneffekte) untersucht (Beschaufelung 2). Vom Vorhaben 2.3.10, wird eine dritte Beschaufelung, ein neuartige 3-dimensionale Entwicklung eingesetzt. (Beschaufelung 3).

In VH.2.3.10 soll eine stärker umlenkende 2-stufige Turbinenbeschaufelung untersucht werden. In Gegensatz zur 2. Beschaufelung in Vh. 2.1.7. Die Charakterisierung des Schaufelkanals: die Profile der Leitreihen sind „aft-loaded“, die Laufreihen „mid-loaded“. Die Schaufelgeometrie führt zu einem mittig-zentrierten Totaldruckfeld, die Stufenbelastung ist hoch. Der Schaufelkanal dürfte mit dieser Auslegung relativ hohe Wirkungsgrade erreichen. Von besonderem Interesse ist deshalb, in wie weit die hochbelasteten Schaufelenden, welche zu erhöhten parasitären Ausgleichströmen in den Deckbandkavitäten führen, diese Wirkungsgrad-Vorteile in Abhängigkeit vom Einbettungsspiel reduzieren. Die experimentelle Ergebnisse sind im Abschlussbericht des Hochschulpartners enthalten.

1.2. Einzelziele von ALSTOM Power:

Die Einzelziele von ALSTOM beziehen sich auf die Fertigungszeichnungen, die Fertigung, das Rotorschleudern, die probabilistische Auswertung der Versuche, sowie die Vorhabensbetreuung. Die Hauptresultate sind im Bericht des Hochschulpartners enthalten.

1.3. Erfolgsaussichten

Deckbandbeschaukelungen erbringen in Regelfall über 80% der Dampfturbinenleistung. Es darf davon ausgegangen werden, dass durch die Beherrschung der angesprochenen Interaktionen im Auslegungsprozess eine bemerkenswerte Wirkungsgrad-Verbesserung der Kraftwerks-Wirtschaftlichkeit (aus Sicht der Betreiber) erzielt wird. Beiträge dazu stammen aus einem verbesserten Wirkungsgrad (strömungsmechanische Interaktion), steigender Zuverlässigkeit (strömungs-/Strukturmechanische Interaktion), sowie aus reduzierten Herstellungskosten.

1.4. Stand der Wissenschaft und Technik, Literaturangaben

Die Interaktion zwischen einer Turbinestufe und ein- und mehrkanaligen Diffusoren war Gegenstand eines FVV-Vorhabens (vgl. Raab, Lippert (1995)). In der offenen Literatur sind viele Hinweise auf die Bedeutung der verschiedenen Interaktions-Phänomene zu finden (vgl. Übersicht von Dawes (1997)).

Die heutige Auslegung von Deckbandbeschaukelungen stützt sich vielfach auf quasistationären 1D-Verfahren ab, welche z.B. auf 5-stufigen Versuchen basieren. Sie verdanken ihre bekannte hohe Treffsicherheit dem Umstand, dass die oben geschilderten Interaktionen innerhalb der untersuchten Stufengruppe inhärent bewertet wurden. Quasistationäre 2D-sowie Q3D-Verfahren weisen dagegen einen grundsätzlichen Mangel auf, fehlen doch hier die Modelle für die Strömungsinhomogenitäten in der 3. Dimension und jene für die instationären (deterministischen) sowie anisotrop-turbulenten (probabilistischen) Schwankungen. Dieser Nachteil lässt sich im Rahmen von Nachrechnungen durch die Anwendung von quasistationären 3D-Verfahren teilweise reduziert, doch fehlen auch hier die relevanten Modelle für die instationären und anisotrop-turbulenten Schwankungen. Verbesserungen der Nachrechnung bringen die instationären 3D-Verfahren, welche nur noch von anisotropen Turbulenzmodellen abhängen. Allerdings, sind diese Codes derart Rechenzeit-intensiv, dass ein Einsatz nur sehr restriktiv erfolgen kann. Z.B. sind Berechnungen von 2 Stufen mit gleichen Schaufelzahlen sowie Einbettungs- und Dichtstreifenspielen gegen Null gerade noch denkbar. Berechnungen dieser Art sind deshalb sehr geeignet zu Interpretation von Messungen und zur Erarbeitung von Strömungsmodellen.

Es ist von essentieller Bedeutung, dass die Datenreduktion auf allen Dimensionsebenen direkt anhand konservativer und nicht konservativer Bilanzgleichungen erfolgt. Dies gilt für experimentelle und theoretisch/numerisch Daten in gleichem Masse. Die daraus abgeleiteten Strömungsmodelle sind a priori „Balance oder physics-based“. Sie werden nur unter diesen Voraussetzungen relative einfach zu gewinnen sein und eine robuste Struktur aufweisen. Die heute üblichen „statistics based“ Modelle sind dazu nur mit Einschränkungen in der Lage (vgl. Adamcyk, 1985) zu nutzen.

1.5. Eigene bisherige Arbeiten

ALSTOM Power hat jahrzehntelang die Beschaukelungs-Entwicklung mit einer 5-stufigen Versuchsturbine abgesichert (vgl. Wieland et al, 1994, Scarlin, 1996). Moderne Strömungsprogramme wurden anhand der Versuchsergebnisse validiert (vgl. Novak et al, 1992).

Die Untersuchungen beim Hochschulpartner werden an einer zeichnungsgleichen Versuchsturbine durchgeführt. Die Voraussetzungen zur Überprüfung der Lösungsmethode des oben beschriebenen Übertragsproblems von 2- auf höher Beschaukelungen sind damit erfüllt.

Die Integralbehandlung inhomogener Strömungsfelder auf der Basis der konservativen und nicht konservativen Bilanzgleichungen ist ein Thema, mit dem

ALSTOM Power bereits seit vielen Jahren befasst ist (vgl. Kreitmeier 1987, und 1992).

1.7 Gesamtziel des Vorhabens 2.3.10.A

Ziel bei der Entwicklung neuer Dampf und Gasturbinen ist es, durch geeignete Maßnahmen den Wirkungsgrad zu steigern, um unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten den Brennstoff möglichst optimal zu nutzen. Dies bedingt, unter anderem ein möglichst exaktes Verständnis der äußerst komplexen Strömungsphänomene in mehrstufigen Turbinenbeschaukelungen. Das sich unter Betriebsbedingungen einstellende Strömungsfeld ist räumlich und zeitlich stark inhomogen. Die zirkulare Inhomogenität rührt von den Druckfeldern und Nachläufen der Laufschaufeln, die zeitliche Inhomogenität rührt von den Druckfeldern und Nachläufern der Laufschaufeln sowie von den zerhackten Dellen der Leitschaufelnachläufen. Zudem beeinflussen die zirkularen Relativ-Positionen der Leit- bzw. Laufschaufelreihen untereinander das Strömungsfeld in der Beschaukelung (Clocking), in den Deckbandkavitäten treten druckfeld-getriebene Ausgleichsströmungen auf, welche zu einer Zusatzdissipation führen.

Alle diese Effekte sind in nicht unerheblichen Masse auch von der Last- bzw. Druckverteilung auf den einzelnen Schaufelreihen abhängig. Deshalb soll in diesem Vorhaben aufbauend auf den Erkenntnissen des vorangegangenen Vorhabens dieser Einfluss auf die Effekte systematisch untersucht werden. Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen werden im Designprozess moderner Stufenverbände für eine weitere Optimierung dringend benötigt. Hierdurch gewinnt die nationale/europäische Turbomaschinenindustrie ein Erfahrungs- und Wissenspotential, um gegenüber der weltweiten Konkurrenz (insbesondere gegenüber den Hauptkonkurrenten USA und Japan) eine Spitzenposition behaupten zu können. Zielgerichte und konzentrierte Forschungsanstrengungen im Rahmen der intensiven Kooperation zwischen Industrie und Hochschule dienen dieser Standortsicherung.

Aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen des Vorhabens 2.1.7. soll eine starke umlenkende 2-stufige Turbinenbeschaukelung untersucht werden. Charakterisierung des Schaufelkanals: Die Profile der Leitreihen sind „aft-loaded“, die Laufreihen „mid-loaded“; die Schaufel-Geometrie führt zu einem mittig-zentrierten Total-Druckfeld, die Stufenbelastung ist hoch. Der Schaufelkanal dürfte mit dieser Auslegung relativ hohe Wirkungsgrade erreichen. Von besonderem Interesse ist deshalb, in wie weit die hochbelasteten Schaufelenden, welche zu erhöhten parasitären Ausgleichsströmen in den Deckbandkavitäten führen, diese Wirkungsgrad-Vorteile in Abhängigkeit vom Einbettungsspiel reduzieren.

Die Einzelarbeiten von ALSTOM beziehen sich auf die Fertigungszeichnungen, die Fertigung, das Rotorschleudern, die probabilistische Auswertung der Versuche einschl. Modellbildung, sowie Vorhabensbetreuung.

1.8. Planung Vorhaben 2.3.10A

Der Inhalt dieses Vorhabens ist relative gering und betrifft nur 2 Arbeitspakete:

- Ad 1) Fertigungszeichnungen und Fertigung der Beschaukelung einschließlich des gebauten Rotors sowie einzelner Statorteile; Wuchten und Schleudern; Schleifen der Deckbänder bei Nenndrehzahl.
- Ad 2) Probabilistische Auswertung der Versuchsergebnisse,
 - Normal Axialabstände und Dichtstreifenspiele gegen Null,
 - Normal Axialabstände und Einbettungsspiele: Dichtstreifenspiele gegen Null

- Normal Axialabstände und Einbettungsspiele; normale Dichtstreifenspiele

Diese Bedingungen sind Schritt für Schritt vergleichbar mit jenen in Vh. 2.1.7, was die verschiedenen Einzeleinflüsse direkt aufzeigen wird.

Alle geometrischen Varianten werden in der Abbildung 1 unten zusammengefasst. Die Änderungen der Deckband und Leckagegeometrie werden gezeigt. Es sollte angemerkt werden, dass die gezeigte Geometrien-Anordnung in beiden Stufen eingesetzt wird. Auch die Labyrinth-Anordnung ist gleichzeitig im Leit- und Lauf-Beschaufelung eingesetzt.

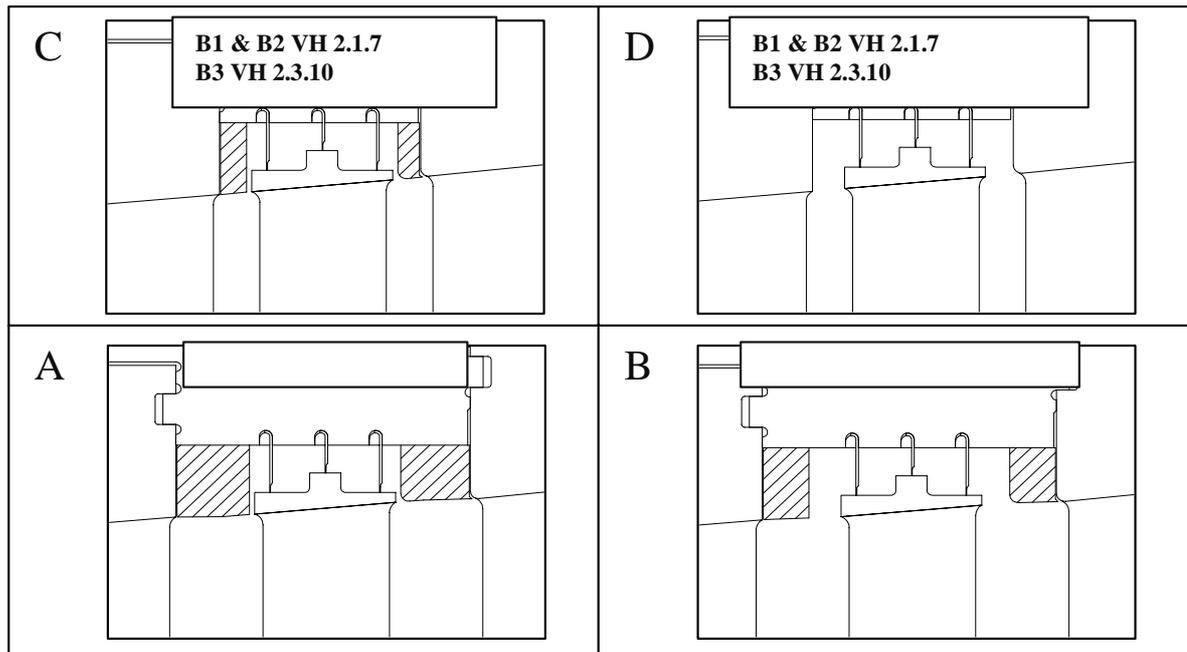


Abbildung 1: Variante Vorhaben 2.1.7 & Vh. 2.3.10

2.0., Arbeitspakete

2.1. Ad. 1 Fertigung

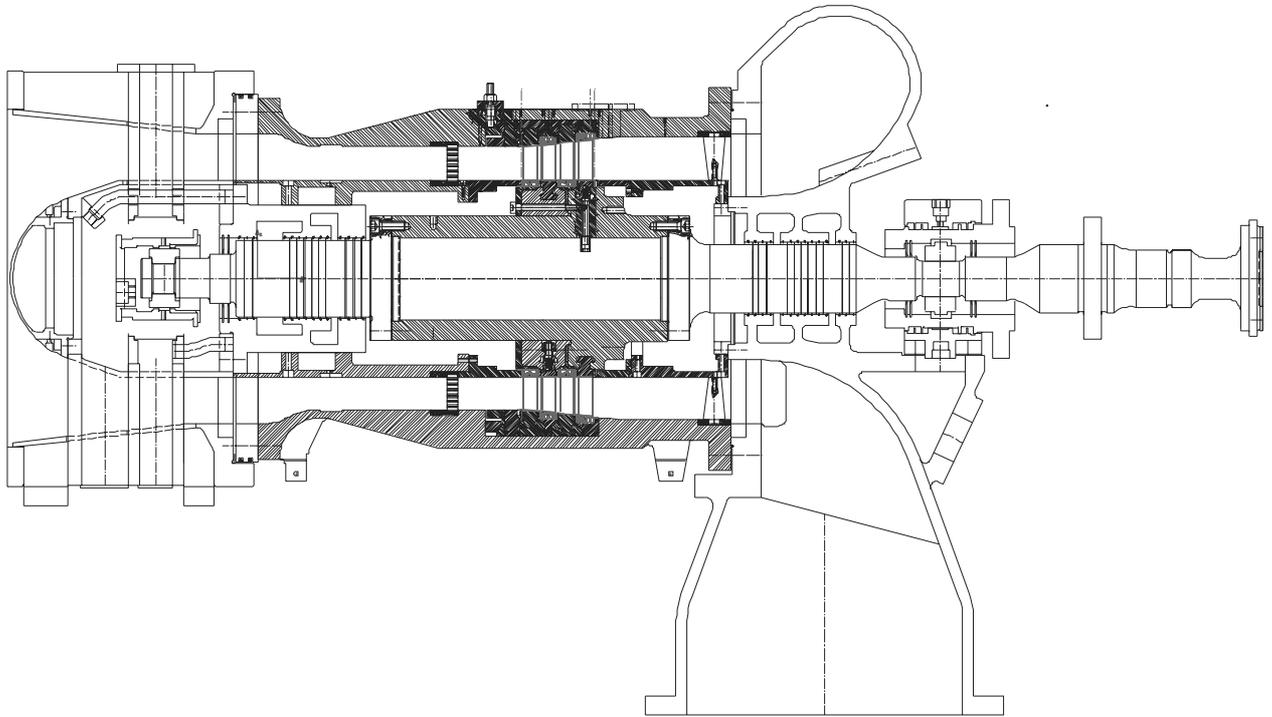


Abbildung 2 Versuchsstand Olli



Abbildung 3 Versuchsstand Olli

Die Untersuchung ist in Zusammenhang mit dem Hochschulepartner IDG Aachen durchgeführt worden, hier steht eine 2-stufige Turbine „Olli“ zu Verfügung [ab. 1, 2].

Die verwendete neue Beschauflung, ist mit den ALSTOM-internen Schaufel-Entwicklungs- Tools entwickelt worden. Diese Entwicklung erfolgte nach neuestem Designvorgaben und höchst interessant als mögliches Produkt für die Kraftwerkintegration.

Der Leitriehen der resultierender Profil sind „aft-loaded“, die Laufreihen „mid-loaded“. Die Schaufelgeometrie führt zu einem mittig-zentrierten Totaldruckfeld, die Stufenbelastung ist hoch. Das resultierende Profil ist in Abb. 4 zu sehen



Abbildung 4. ALSTOM Gefertigte Beschauflung für VH. 2. 3.10

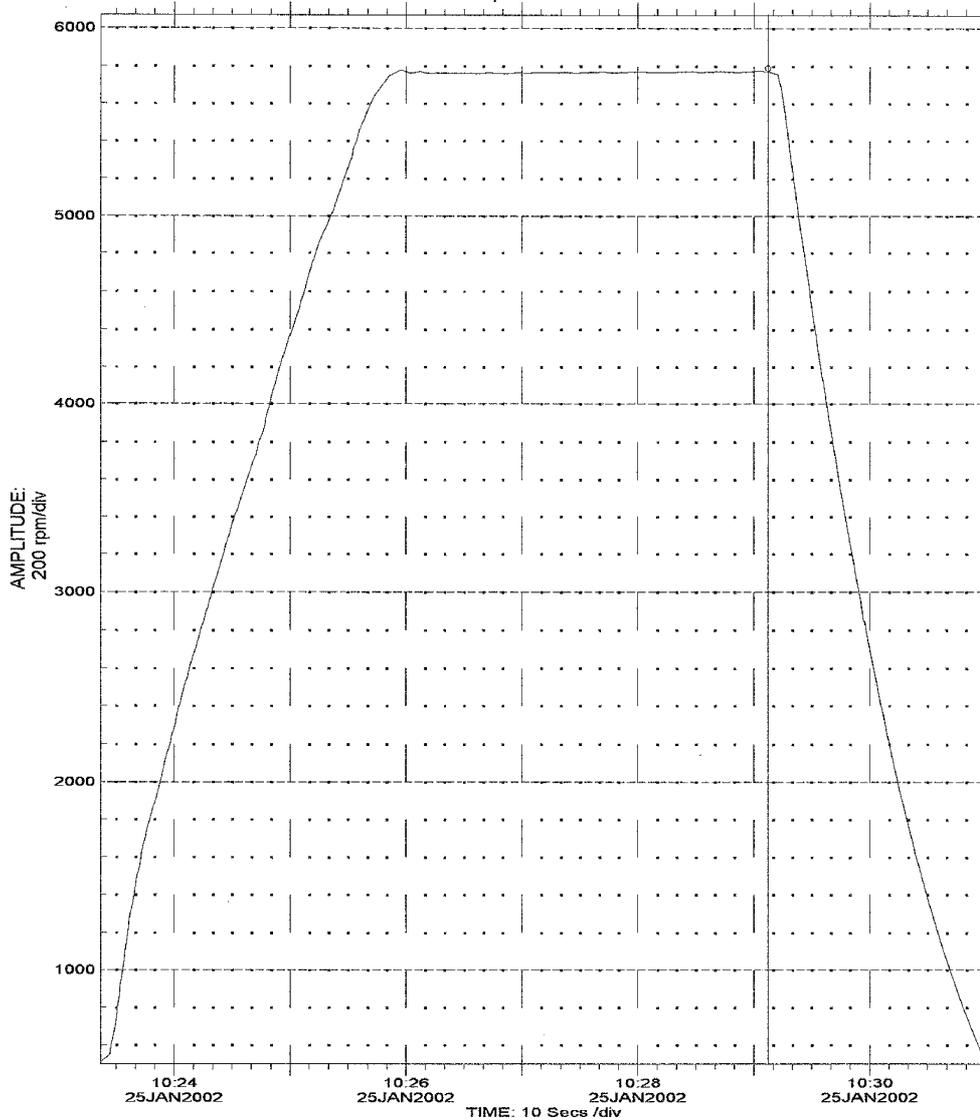
2.2. AD 1 Wuchtung

Nach Fertigung und Einbau des Rotors (durch ALSTOM Personal) wurde der Rotor gewuchtet. Diese Arbeiten sind erfolgreich durchgeführt worden (Abb. 5)

TREND PLOT
 COMPANY: ALSTOM Power
 MACHINE TRAIN:

PLOT NO. _____
 PLANT: Rotorteststand
 JOB REFERENCE: VT-OIII

POINT: Wellenschwingung1X $\angle 45^\circ$ Left RPM 5771 rpm
 MACHINE: Lagerstander 1X 25JAN2002
 From 25JAN2002 10:23:22 To 25JAN2002 10:31:00 Startup 10:29:07



COMMENTS

Schleuderprüfung
 3 min bei 5760 U/min □

BENTLY
 NEVADA

Ab. 5 Wucht-Protocol

2.3. . AD. 2 Probabilistische Auswertung der Versuchsergebnisse

In Wesentlichen, ist die Auswertung mit der früher vorgestellten Methodik in VH 2.1.7. Identisch.

ALSTOM hat ein ausgeprägtes Interesse, probabilistischen Methoden zu entwickeln. Genau wie in Vorhaben 2.1.7, wird dieses Vorhaben verwendet, Erfahrung mit

solchen Methoden zu sammeln. Es gibt, im Sinn der experimentellen Resultate, viele zusätzliche Informationen, die gewonnen werden können.

Zum Verständnis der Technik, wird hier die probabilistische Daten-Auswertung zur Ableitung der Leistungsfähigkeit verwendet. Die Leistungsfähigkeit wird mit den Messsonden von der Turbine (Druck und Temperatur) an den Eingangs- und Ausgangsflächen zur Maschine abgeleitet. Die Sonden-Daten werden mit dem Kreitmeier (Mittelungs-) Code berechnet, um den Strömungszustand (1D) im Eingang und Ausgang zu erhalten. Von diesen Werten kann die Leistungsfähigkeit abgeleitet werden. Über eine Überprüfung kann das Enthalpie-Gefälle mit dem globalen Enthalpiegefälle verglichen werden, das durch die Messdose auf dem Maschinenrotor gemessen wird. Dies gibt eine gute Anzeige für die Qualität der Messungen.

Die probabilistische Daten-Auswertung ist eine Monte-Carlo Methode (ab. 6). Diese wird im nächsten Abschnitt detailliert beschreiben. Eine Vielzahl von Eingabedaten wird ausgewertet, um einen einzelnen Ausgabewert zu ergeben. Alle Eingänge können durch einen Mittelwert und ein Standardabweichung beschrieben werden. Der einzelne Ausgabewert kann in gleicher Weise beschrieben sein.

Monte-Carlo Simulation nimmt einen Zufalls-Satz von Eingabedaten, die auf der Wahrscheinlichkeits-Verteilung basieren und errechnet dann den Ausgabewert. Wenn der Ausgabewert wiederholt errechnet worden ist, z.B. 500-1000 mal, dann kann die

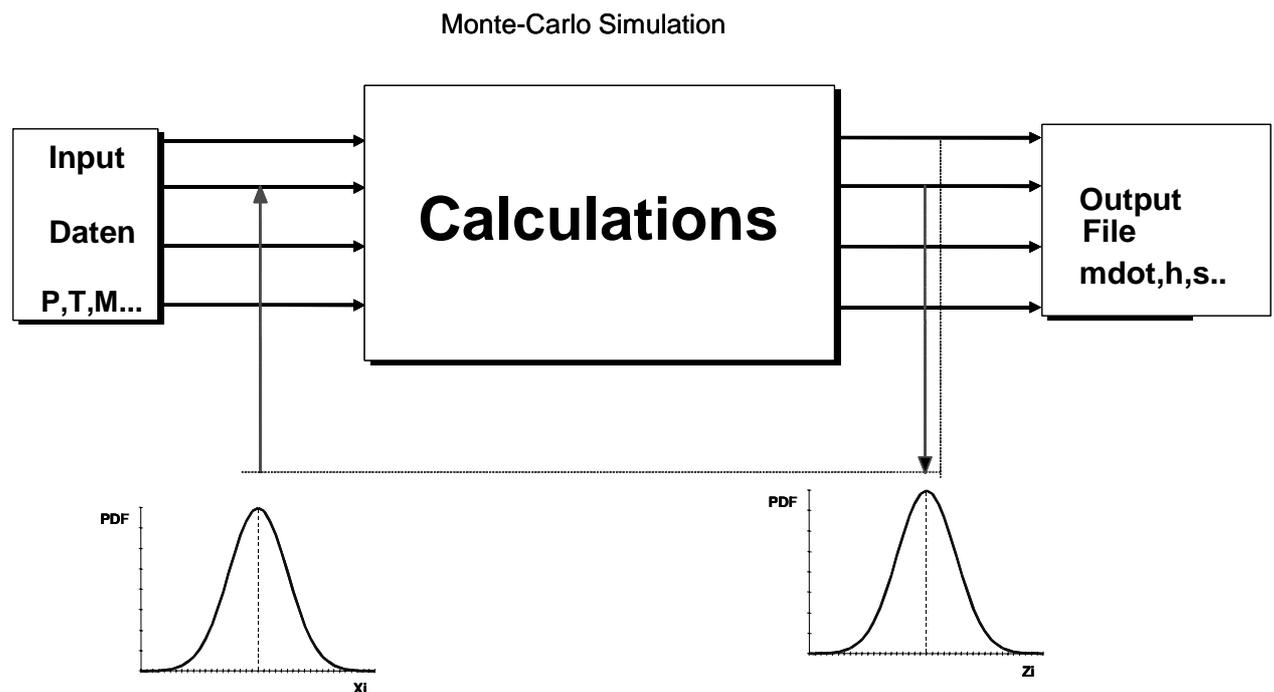
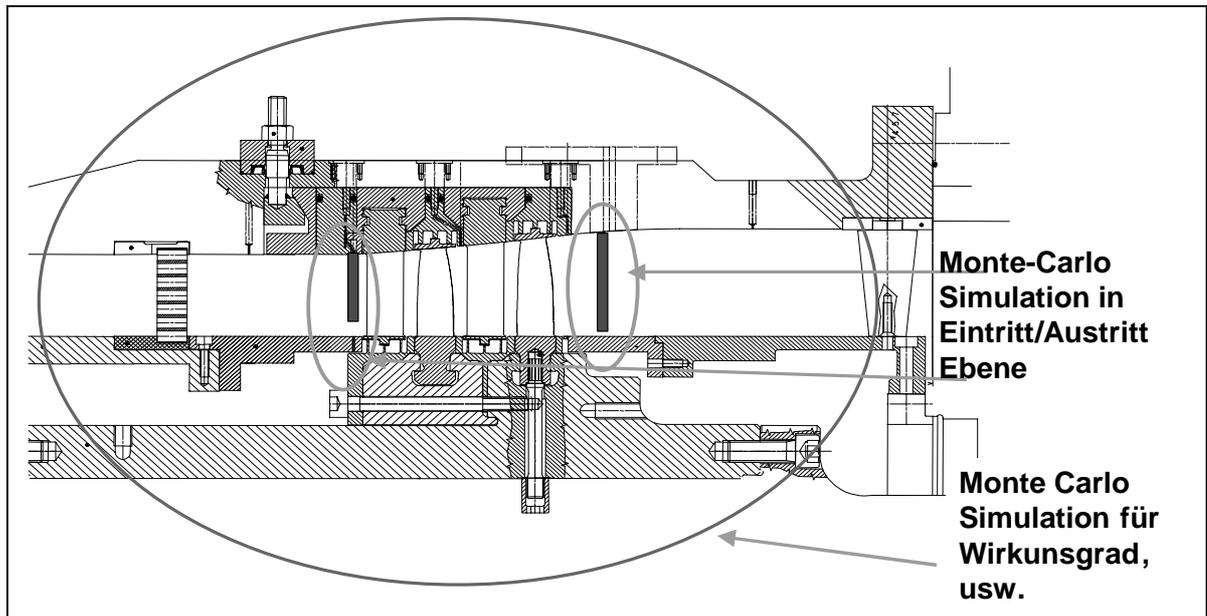


Abbildung 6: Prinzip des Probabilistisches Erweiterungen

Wahrscheinlichkeits-Verteilung des Ausgabewertes festgestellt werden.

Die probabilistische Datenauswertung, die für dafür entwickelt wurde, ist ein Doppelschale. Das erste Oberteil der Schale plant den Eingabewert und Ausgabewert der Sondenmessungen und die Standardabweichung wird für die experimentellen Daten abgeschätzt.

Dieses Oberteil führt zu einer Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Enthalpie und Entropie sowie kinetischen Energie in den Eingangs- und Anschlussflächen. Diese können in einer zweiten Schale dann verwendet werden, um die Turbinen-



Leistungsfähigkeit zu errechnen.

Abbildung 7: Prinzip der probabilistischen Erweiterungen

2.3.1. Monte-Carlo Simulation

Dieser Abschnitt beschreibt mathematisch, wie die Monte-Carlo Simulation eingeführt worden ist. Ein einfacher Drei – Schritte-Prozess wurde entwickelt.

Schritt 1:

Der Computer liefert N Zufalls-Zahlen, gleichmässig verteilt zwischen 0 und 1

$$X \equiv \{x_i; 0 < x_i < 1; i = 1 \dots N\}$$

diese N Zufalls-Zahlen wurden unter der Annahme folgender Wahrscheinlichkeits-Dichtungs-Funktion geliefert

$$PDF_x(\xi) = \begin{cases} 0 & \text{for } \xi \leq 0 \text{ or } \xi \geq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Schritt 2

aus X wird ein anderer Satz Y produziert

$$Y \equiv \left(X - \frac{1}{2} \right) \cdot 2$$

dieser Satz ist entsprechend der Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion verteilt

$$\text{PDF}_Y(\xi) = \begin{cases} 0 & \text{for } \xi \leq -1 \text{ or } \xi \geq 1 \\ 0.5 & \end{cases}$$

Schritt 3 (eine Gaussische Verteilung herstellen)

ohne Beweis: wenn der neue Datensatz aus dem bestehenden Satz gebildet wird

$$Z \equiv \mu + \sqrt{2} \cdot \sigma \cdot \text{efn}^{-1}(Y)$$

dann entspricht Z vermutlich dem pdf

$$\text{PDF}_Z(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\xi - \mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

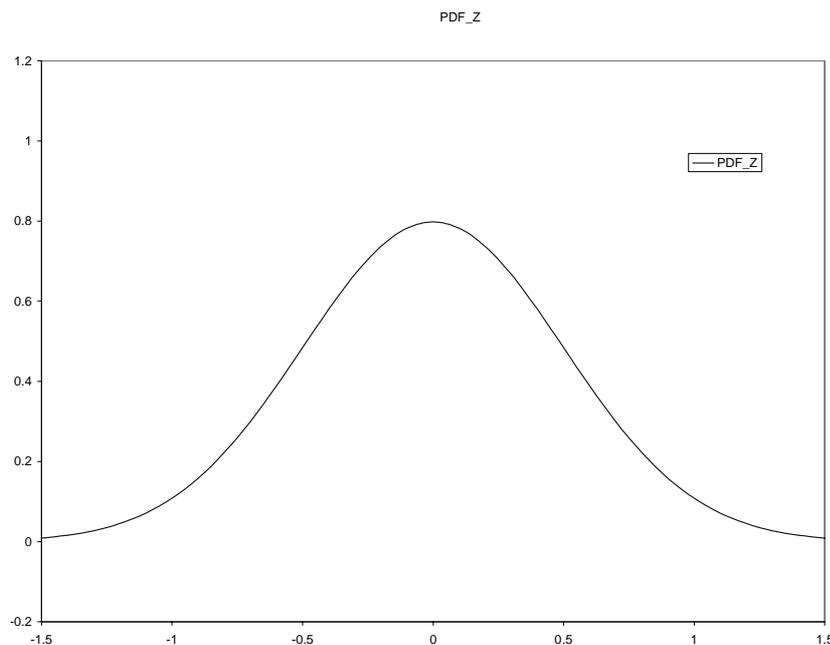


Abbildung 8: Gauss Verteilung

Es wäre auch möglich, eine logarithmische-Gauss-Verteilung zu definieren. Dies erfolgt nicht, weil die Datengrundlage einfache experimentelle Daten sind. Ohne Ausnahme für die hier verwendeten Variablen kann die Fehlerverteilungen angenommen werden, um eine Gaussische Verteilung anzunähern.

Definition eines Satzes getrennter Elemente

$$A = \{\eta_i ; i=1\dots N\}$$

Jedes Element in A bekommt die Gewichtung.

Das Gewicht selbst erreicht die räumliche Verteilung.

$$w_i(\eta) = \frac{1}{N \cdot \Delta \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\eta - \eta_i}{\Delta}\right)^2\right]$$

Wobei:

$$w_i(\eta) \longrightarrow \frac{1}{N} \delta_{\eta_i} \quad \text{wie} \quad \Delta \longrightarrow 0$$

Endlich:

$$\text{PDF}_A(\eta) = \sum_{i=1}^N w_i(\eta)$$

Die resultierende Verteilung ist in Abbildung [9] dargestellt.

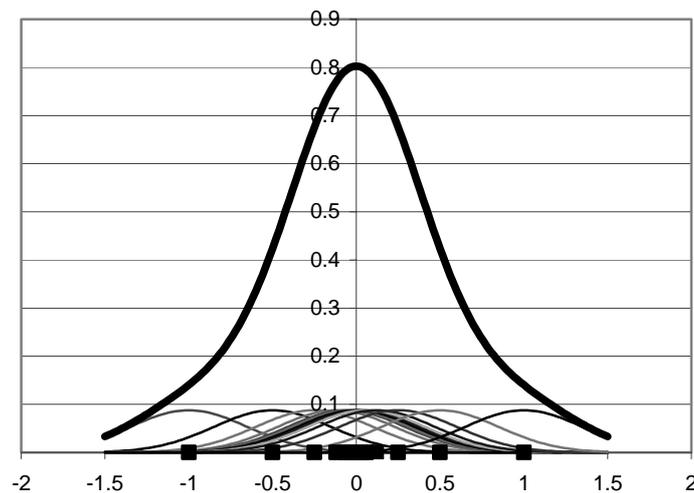


Abbildung 9: Gerade PDF

Als Konsequenz kann das Monte-Carlo Verfahren mit den rohen Daten und einem Wert für die Standardabweichung für den Datensatz durchgeführt werden.

2.3.2. Beispiele

Um die Anwendung des Codes zu zeigen, wird Beschaufelung 2 mit grossem Axialabstand und geschlossenen Kavitäten verwendet. Für die Auswertungen in der Fläche, sind Sondenmessfehler von 1 m/s in der Geschwindigkeit, 80Pa im Druck und 0.5°C in der Temperatur vorgewählt worden. Diese Werte sind die Erfahrungswerte, basierend auf Technikbeurteilung. Streng gesprochen, sollte es ein drittes Niveau der Probabilistikschule geben. Dieses würde die Sonden-Kalibrierungen umgeben und würde Standardabweichungen ergeben, die auf Sensor-Eigenschaften gegründet sind.

Es gibt zwei Gründe, warum dieses nicht eingeführt wird. Erstens ist der Zugang zu den rohen Sonden-Daten (und Kalibrierung) nicht immer möglich, und zweitens sind die Erfahrungswerte als typische Werte für die Messkette gut eingeführt.

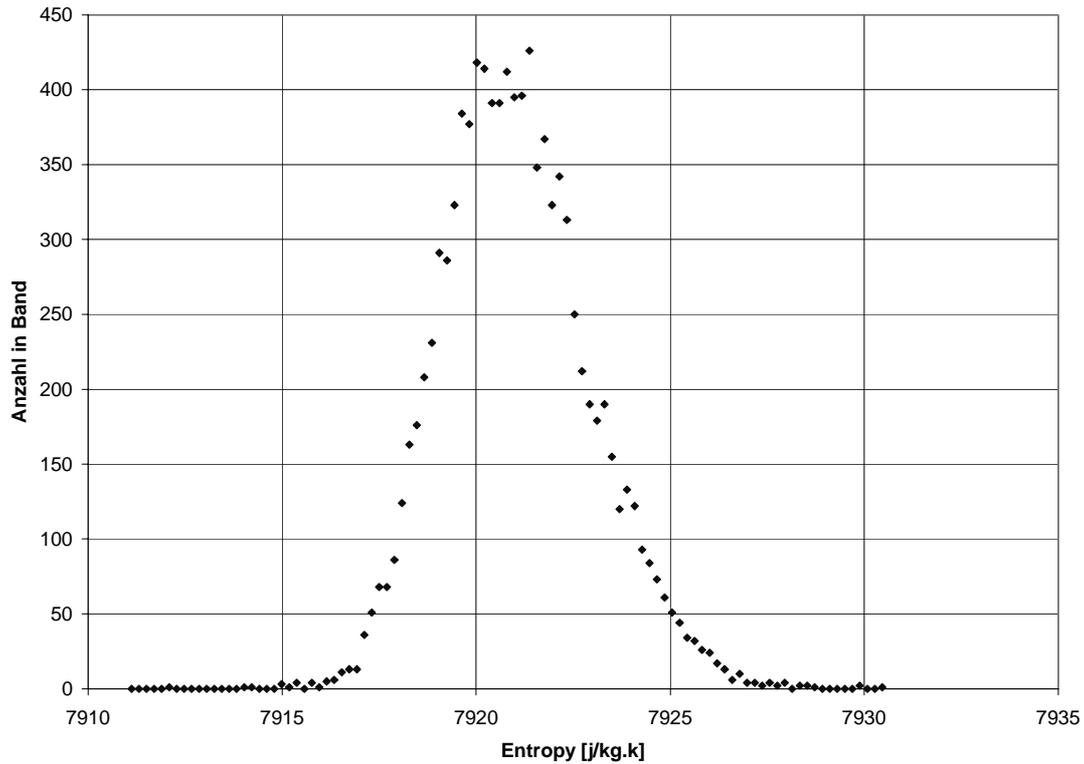


Abbildung 10: Probabilistische Entropie Verteilung

Die Abbildung 10 zeigt die Entropieverteilung in der Ausgangsfläche. Es ist ein gutes Beispiel für die probabilistische Datenauswertung. Die Entropie hier ist ein einzelner Wert, abgeleitet vom Kreitmeier-Programm und stellt die irreversible Entropie in der Fläche als einzelne Zahl dar. Offensichtlich ist dieses ein zusammengesetzter Wert, der aus Druck- und Temperaturwerten berechnet wird. Wie zu sehen ist, gibt es einen deutlichen Maximalwert und eine sehr schmale Standardabweichung. Die identische Tendenz ist auch in allen Variablen zu sehen. Als Beispiel wird die axiale kinetische Energie unten gezeigt.

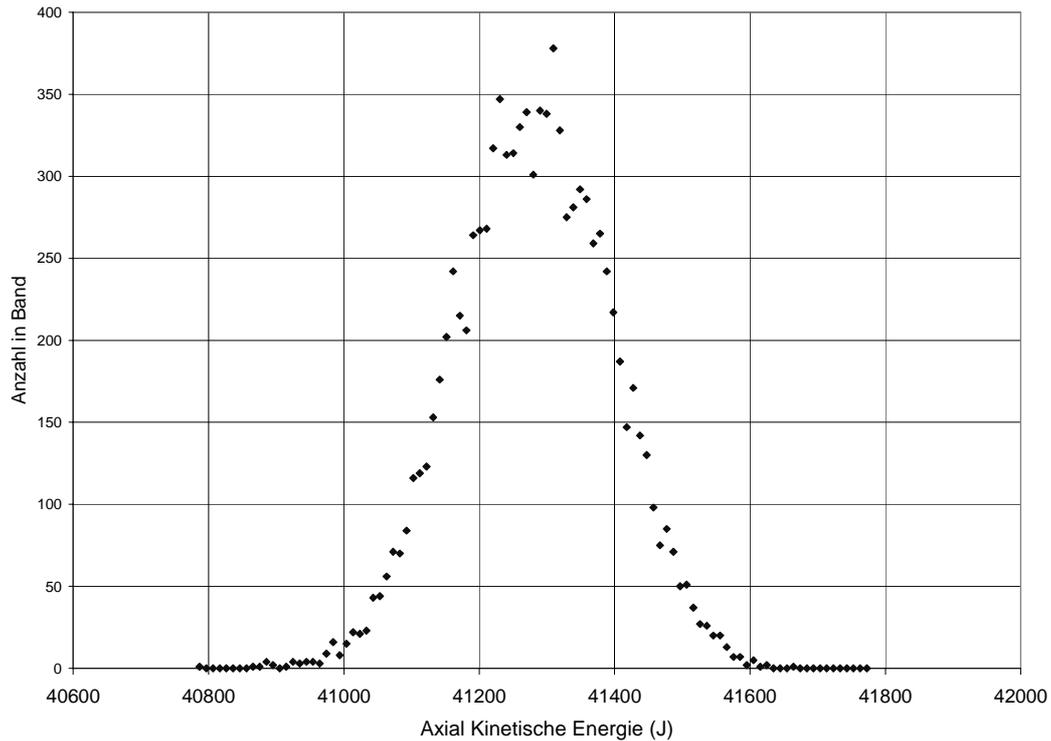


Abbildung 11: Probabilistische KE Verteilung

Die Abbildung zeigt die ausgewertete Leistungsfähigkeitsverteilung. Die Leistungsfähigkeit wird durch den wahrscheinlichsten Wert normalisiert. Der Mittelwert ist klar definiert. Eine Standardabweichung beträgt ungefähr 0,5%. Pragmatische würde dies bedeuten, dass eine Leistungsfähigkeitsmessung, die mit Sonden definiert wurde, mit einer Standardabweichung von 0,5% genau sein würde. Diese Abbildung bestätigt, dass die pragmatische Ansicht physikalisch angemessen ist.

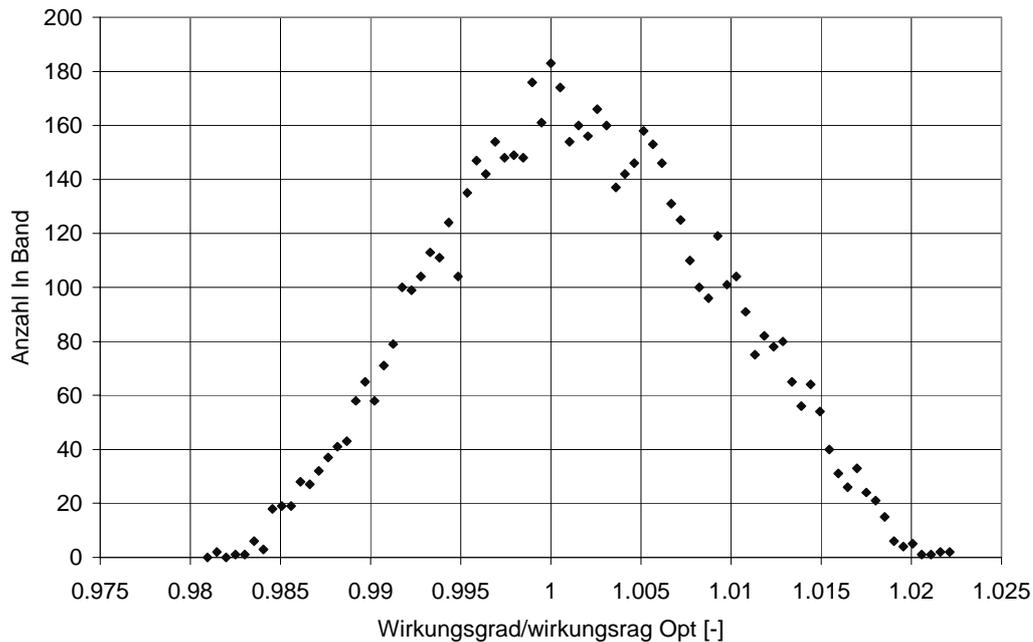


Abbildung 12: Probabilistischer Wirkungsgrad

Es reicht jedoch nicht aus, die Genauigkeit der Leistungsfähigkeit durch die Standardabweichung der Sonden-Messungen allein zu beurteilen. Ein besseres physikalisches Urteil kann gewonnen werden, indem man das Enthalpiegefälle über der Maschine festsetzt. Dieses erfolgt durch einen Vergleich des Enthalpiegefälles, gemessen mit den Rotorsonden und mit Messdosenmessungen.

$$\text{Enthalpie – Bilanz} = \frac{(\text{SondenEnthalpieGefälle} - \text{MessdoseEnthalpieGefälle})}{\text{SondenEnthalpieGefälle}}$$

Dies ist ein leistungsfähiger Parameter. Er kombiniert jede Messart, -Sonden und -globale. Folglich ist er für probabilistische und deterministische Störungen in der Messkette sehr empfindlich. Er wird häufig als Grundlage für eine erste Einschätzung der Messqualität eines Ergebnisses verwendet.

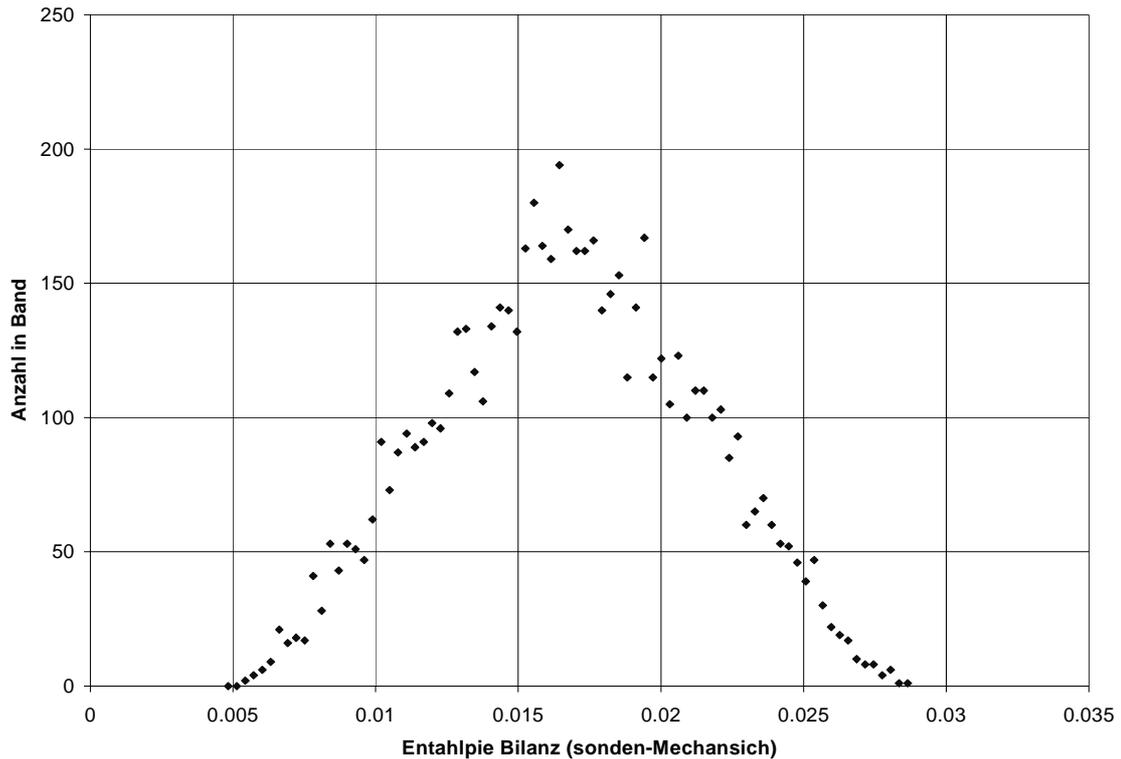


Abbildung 13: Probabilistische Enthalpie Bilanz

Die probabilistische Enthalpie-Bilanz wird in der Abbildung 13 gezeigt. Die wahrscheinlichste Enthalpiebilanz beträgt ungefähr 1.6%. Die Standardabweichung ist ungefähr 0.5%. Die Enthalpiebilanz ist bezüglich der Sondenmessungen voreingenommen.

Die geringfügige Diskrepanz kann dahingehend interpretiert werden, dass die Sonden auf einem relativ groben Netz gemessen werden. (Dieses enthält in etwa 117 Punkte in der Ebene). Als Resultat, werden dissipative Zonen nahe an der Endwand nicht fein aufgelöst. Dies stellt kein Problem dar, im Gegenteil, solch eine kleine Diskrepanz im Enthalpiegefälle ist bemerkenswert. Dieses zeigt die Qualität der Messungen durch den Universitätspartner.

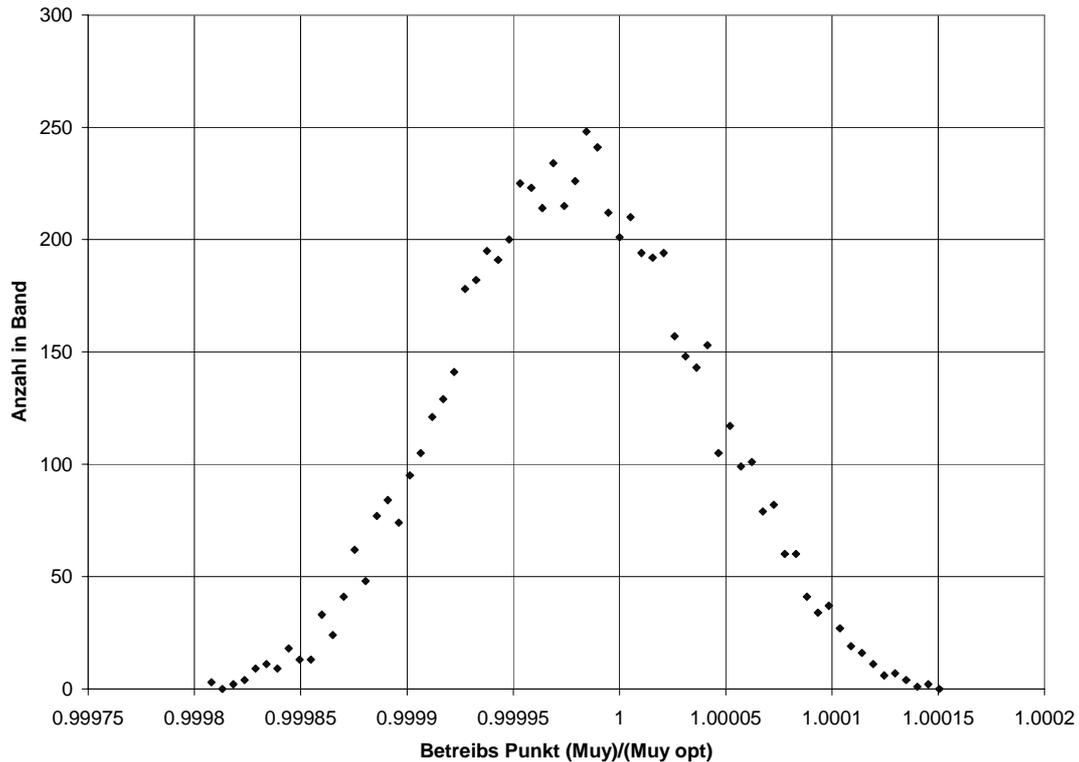


Abbildung 14: Probabilistischer Betriebspunkt

Eine andere wichtige Markierung ist die Stabilität des Betriebspunkts. Dieses wird in der Abbildung 14 gezeigt.

Hier wird das dimensionslose Enthalpiegefälle (normalisiert zur Umdrehungsgeschwindigkeit) gezeigt.

Die Analyse der tatsächlichen Werte der Abbildungen zeigen, dass der Prüfstand sehr stabil läuft.

Hier ist anzumerken, dass der jeweilige Betriebspunkt zum wahrscheinlichsten Betriebspunkt mit der wahrscheinlichsten Leistungsfähigkeit normalisiert ist. Wie die Abbildung zeigt, ist der wahrscheinlichste Betriebspunkt nicht mit dem vermutlichen Wirkungsgrad gleichzusetzen. Dieses ist eine Konsequenz der Unterschiede bezüglich der Enthalpieabgleichung.

Ein wichtiger Zusammenhang kann hier gezeichnet werden. Probabilistische Datenauswertung kann mit dem gleichen Datensatz Unterschiede in den Mitten der Wahrscheinlichkeitsverteilung produzieren.

In diesem Beispiel ist der Anschluss offensichtlich und trivial. In den komplizierteren Fällen wie einer vollen Analyse eines Kraftwerks, können die Verbindungen nicht trivial sein. Es können falsche Zusammenhänge gezeichnet werden, wenn nur ein begrenzter oder deterministischer Datensatz benutzt wird.

Dieses kann zu gefährlichen Schlussfolgerungen bezüglich Produktleistung oder Sicherheit führen.

3.0. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenstellung der wichtigsten Punkte:

- ALSTOM hat alle notwendigen Rotor- und Mechanischen Teile für das Parallelvorhaben 2.3.10.B des Hochschulpartners entworfen und geliefert
- Die notwendigen Werkzeuge für die Auswertung der experimentellen Daten wurden entwickelt.
- Diese Werkzeuge wurden verwendet, um zu zeigen, dass die experimentellen Daten, die von den Universitätspartnern geliefert werden, von der höchsten Qualität sind.

Die probabilistischen Techniken, die diesbezüglich in diesem Vorhabens entwickelt wurden, sind in allen ALSTOM Test-Turbinen als Daten-Auswerte-Prozedur eingeführt worden. Die Anwendung der gewonnenen Erfahrung auf andere Bereiche wird jetzt aktive betrachtet.

4.0 Literatur

Adamcyk, J. „Model equation for simulation flows in Multistage turbomachinery“ ASME paper 85-GT-226 (1985)

Dawes, W.N. „Current and future developments in Turbomachinery CFD (invited lecture) 2nd European Conference on turbomachinery – fluid dynamics and Thermodynamics, Antwerpen, 1997

Kreitmeier, F. A new time-averaging procedure for compressible unsteady turbulent flows ASME paper 87-Gt-83 1987

Kreitmeier, F. „Space averaging 3D flows using strictly formulated balance equations in turbomachinery“ IGTI Vol 7. 1992

Novak et al „Aerodynamic analysis of advanced blading for steam turbines“ EPRI Orlando 1992

Raab, I., Lippert, D. „Experimentelle und theoretische Untersuchungen an ein- und zweikanaligen Ringdiffusoren hinter einem offenen Ringraum und einem Turbinenlaufrad“ Abschlussbericht, FVV-Heft 593, 1995

Scarlin, B. „Höhere Wirkungsgrad durch moderne Dampfturbinentechnik“ ABB TECHNIK 8/1996

Wieland, U. et al „Advanced steam turbine blading for retrofits and reworking applications“ international joint power generation conference phoenix, USA 1994