

Fachlicher Abschlussbericht

Forschungsvorhaben (FKZ 0327713X)

AG Turbo COOREFF-T

Verbundprojekt: CO₂-Reduktion durch Effizienz

Vorhaben - Nr. 4.1.2A1

**Aero-thermomechanische Untersuchung einer
gekühlten Dampfturbine unter ultra-superkritischen
Dampfparametern**

(Laufzeit: 01.07.2005 bis 30.06.2007)

(Abgabe des Abschlussberichtes: 30.10.2008)

Autor: Michael Sell

Alstom Power

Datum: 30.10.2008

Das Vorhaben, das diesem Bericht zugrunde liegt, wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 0327713X gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Zusammenfassung

Dieser Bericht umfasst die Tätigkeiten der ALSTOM Power für das COOREFF-T Teilvorhaben Projekt 4.1.2.A1 „Aero-Thermomechanische Untersuchung einer gekühlten Dampfturbine unter ultra-superkritischen Dampfparametern“, das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit unterstützt wurde.

Der Bericht fasst die Design-Tätigkeiten zusammen, die durchgeführt wurden.

Da bis zum Ende der Projektlaufzeit durch starke zeitliche Verzögerungen beim Projektpartner noch keine zuverlässig verwertbaren Ergebnisse vorlagen, wurde mit dem Fördergeber eine deutlich spätere Abgabe des Abschluss-Berichtes unter Einschluss der in dieser Zeit gewonnenen Resultate vereinbart.

Dieser Abschlussbericht umfasst alle im Förderzeitraum 01.07.2005 bis 30.06.2007 sowie darüber hinaus bis Oktober 2008 gewonnene Ergebnisse.

Da auch nach Abschluss dieses Berichtes noch nicht bearbeitete Arbeitspakete vorliegen, möchten wir betonen, dass firmeninterne Untersuchungen dazu fortgeführt und in den Verwertungsplan einfließen werden.

Inhalt

1	Einleitung	4
1.1	Gesamtziel des Vorhabens.....	4
1.2	Bezug zu den förderpolitischen Zielen.....	5
1.3	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens.....	5
1.4	Physikalischer Hintergrund	6
1.5	Arbeitsziele	8
1.6	Vorgehensweise	9
2	Stand der Wissenschaft und Technik über bisherige Arbeiten.....	12
2.1	Stand der Wissenschaft und Technik.....	12
2.2	Eigene bisherige Arbeiten.....	14
3	Beschreibung des Arbeitsplans.....	18
3.1	Ressourcenplanung.....	18
3.2	Arbeitsplan.....	18
3.3	Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten.....	21
3.4	Zusammenarbeit mit Dritten.....	22
4	Arbeitspakete	23
4.1	AP1: Projektkoordination	25
4.2	AP2: Geometrie-Randbedingungen.....	27
4.3	AP3: Analyse „Ungekühlter Fall“	33
5	Zusammenfassung und Ausblick	35
6	Literaturverzeichnis	36

1 Einleitung

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Dieses Vorhaben ist Teil des Verbundprojektes **COOREFF-T**; Dampferzeuger und Dampfturbine. Die Ergebnisse des Projektes werden auch in künftigen CO₂-freien Kraftwerkskonzepten eingebunden und auch hier zu einer wesentlichen Wirkungsgradsteigerung beitragen.

Schätzungen zufolge wird die weltweit installierte elektrische Leistung von ca. 15 TWh im Jahr 2000 auf bis zu 20 TWh im Jahr 2010 und 25 TWh im Jahr 2020 ansteigen. Der überwiegende Anteil dieser Leistung wird voraussichtlich in Dampfkraftwerken erzeugt, bei denen Kohle, Öl oder Kernbrennstoffe als Primärträger dienen. Darüber hinaus haben bereits heute ca. 20% der installierten Kraftwerke eine Laufleistung von über 30 Jahren und müssen daher in naher Zukunft ersetzt werden. So ist trotz eines stetigen Ausbaus der regenerativen Energien ein signifikanter Bedarf an neuen Dampfkraftwerken in den nächsten Jahrzehnten zu erwarten.

Neben der Forderung nach kostengünstiger Bereitstellung von elektrischer Energie sind es die Fragestellungen zur umweltverträglichen Energiewandlung und der Schonung der natürlichen Ressourcen, die in der Energietechnik eine zunehmende Rolle spielen. Ein verringerter Brennstoffverbrauch reduziert nicht nur die Brennstoffkosten, sondern schont die Ressourcen und führt zu einer Reduzierung der notwendigerweise auftretenden Verbrennungsprodukte. So bietet die Entwicklung hocheffizienter Dampfkraftprozesse, die mit stark angehobenen Dampfparametern betrieben werden, eine Reduzierung der spezifischen Emissionen von CO₂, NO_x und SO_x um bis zu 15% im Bezug auf heute erreichte Werte.

Auf Basis von thermodynamischen Überlegungen wird deutlich, dass eine signifikante Steigerung des thermischen Wirkungsgrades im Bereich der Dampfturbinen durch Anhebung der Frischdampfparameter Druck und Temperatur möglich ist. Im Rahmen der Auslegung sogenannter ultra-superkritischer Dampfkraftprozesse werden daher zur Zeit Möglichkeiten erörtert, eine Steigerung der Frischdampfparameter von zur Zeit 270 bar und 580°C (superkritischer Dampfkraftprozess) auf 375 bar bei bis zu 700°C zu erzielen. Die resultierenden Betriebsbedingungen und thermomechanischen Bauteilbelastungen erfordern neue Konzepte und Richtlinien für die Auslegung der für diese stark angehobenen Dampfparameter zu entwickelnden

Turbinen. Durch das durchgeführte Verbundvorhaben gewinnt die nationale und europäische Turbomaschinenindustrie Erfahrungs- und Wissenspotenzial auf dem Gebiet der ultra-superkritischen Dampfkraftprozesse, um gegenüber der weltweiten Konkurrenz - insbesondere gegenüber den Hauptkonkurrenten aus den USA und Japan - eine Spitzenposition behaupten zu können. Die zielgerichteten und koordinierten Forschungsanstrengungen im Rahmen der intensiven Kooperation zwischen Industrie und Hochschule dienen somit unmittelbar der Standortsicherung.

1.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen

Die Entwicklung hocheffizienter Dampfkraftprozesse erfordert die Entwicklung neuer Auslegungsmethoden für die thermisch hochbelastete Hochdruckturbinen, wozu unter Umständen auch ein neues Kühlkonzept für den thermisch hochbelasteten Bereich der Einlaufspirale und der Hochdruckturbinen gehört. Durch die Neuentwicklung ist eine Verringerung der spezifischen Emissionen von CO₂, NO_x und SO_x um bis zu 15% im Bezug auf heute erreichte Werte denkbar. Die Entwicklung wird auch in künftigen CO₂-freie Kraftwerken eingesetzt und führt zu einer weiteren Steigerung der Wirkungsgrade.

1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Die Eintrittsbereiche der Ultra-Hochdruck, Hochdruck- und Mitteldruckturbinen ultra-superkritisch ausgelegter Dampfkraftprozesse sind aufgrund der resultierenden hohen Dampftemperaturen und Druckdifferenzen höchsten thermo-mechanischen Belastungen ausgesetzt. Um die geforderte Verfügbarkeit und Lebensdauer der betroffenen Maschinenkomponenten gewährleisten zu können, sind daher geeignete Kühlungsmaßnahmen für die ersten Turbinenstufen sowie die jeweiligen Innengehäuse (Schaufelträger und Einlaufspirale) erforderlich.

Im Rahmen des beantragten Projekts sollten gekoppelte numerische Untersuchungen der Strömungs- und Wärmeübergangsverhältnisse in den ersten beiden Stufen einer ungekühlten (Referenz) sowie einer dampfgekühlten, zweiflutigen Mitteldruckdampfturbine in Schalenbauweise durchgeführt werden. Der Heißdampfzustand von 300 bar und 720°C ist dabei entsprechend einem ultra-superkritischen Dampfkraftprozess gewählt. Im Mittelpunkt der aero-thermischen Analysen stehen phänome-

nologische und quantitative Untersuchungen hinsichtlich der Kühlmöglichkeiten im dickwandigen Schaufelträger und in der ersten Leitreihe sowie die Untersuchung des Einflusses der Kühlung auf die thermische Bauteilbelastung. Hierbei kommt der Berücksichtigung der Schaufeldeckbandkavitäten sowie der Einlaufspirale eine besondere Bedeutung zu. Auf Basis der aero-thermischen Untersuchungen werden über elasto - plastische Festigkeitsanalysen die thermomechanischen Bauteilbelastungen der gekühlten sowie der ungekühlten Dampfturbinenkomponenten bestimmt. Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen werden im Entwicklungsprozess moderner Stufenverbände für ultra-superkritische Prozessparameter benötigt.

1.4 Physikalischer Hintergrund

Bei ultra-superkritischen Prozessen werden die Frischdampfparameter von heutigen 270 bar und 580°C auf zukünftig über 375 bar und 700°C angehoben. Für die Mitteldruckturbine ergibt sich eine entsprechende Anhebung der Dampfeintrittstemperatur von heute üblichen 585°C (1-fache Zwischenüberhitzung) auf ca. 720°C (2-fache Zwischenüberhitzung). Abbildung 1 zeigt einen möglichen Aufbau des Dampfturbosatzes eines zweifach-zwischenüberhitzten Prozesses mit ultra-superkritischen Prozessparametern und einer Anlagenleistung von 1 GW.

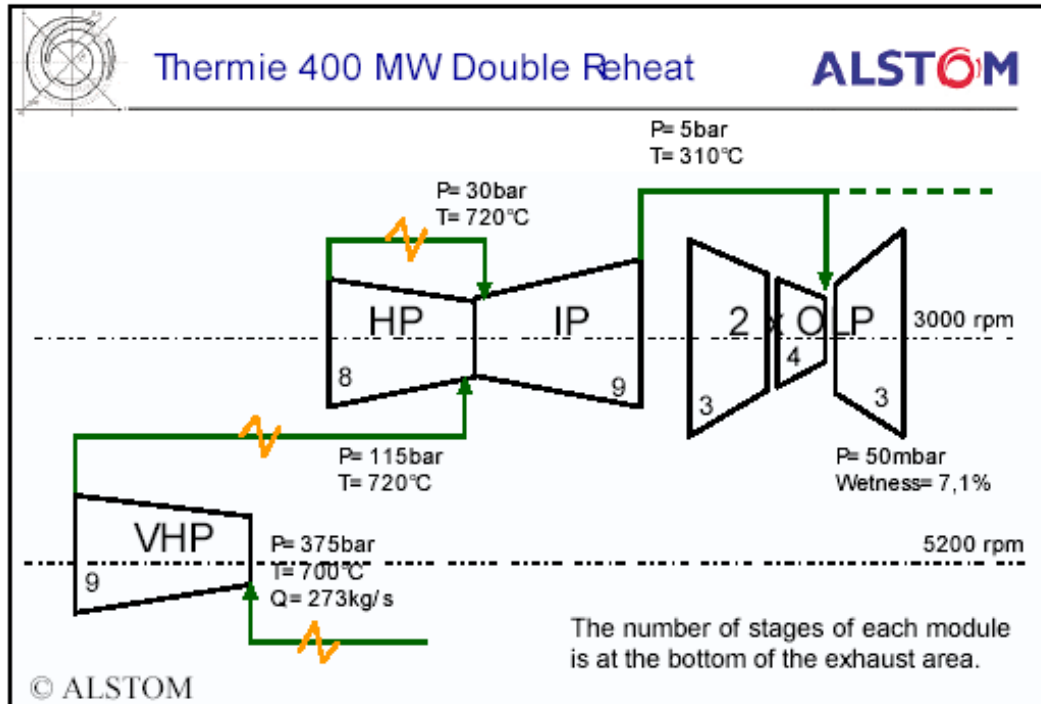


Abbildung 1: 400 MW Double Reheat Cycle

(Bildtext: „Die Anzahl der Stufen jedes Moduls steht am unteren Rand des Dampfaustrittsbereiches“).

Der dargestellte Dampfkraftprozess beruht auf einem annähernd konventionellen Konzept, bei dem durch die zweifache Zwischenüberhitzung der berechnete Wirkungsgrad auf ca. 55% angehoben werden kann.

Die hier skizzierten hohen Dampftemperaturen erfordern den Übergang von den heute im Einsatz befindlichen ferritischen und ferritisch - martensitischen Werkstoffen hin zu Nickelbasislegierungen, sog. Superlegierungen, für die thermisch hochbelasteten Dampfturbinenkomponenten. Diese Werkstoffe zeichnen sich durch eine stark verbesserte Zeitstandfestigkeit aus. Im Idealfall können die Komponenten die hohen Dampftemperaturen ohne weitere Kühlmaßnahmen ertragen. Um allerdings die Anforderungen an die Lebensdauer der Komponenten sowie das dynamische Lastwechselverhalten erfüllen zu können, wird absehbar eine Kühlung der vorderen Schaufelreihen und der Schaufelträger notwendig. Während durch die Kühlmaßnahmen die thermospannungserhöhenden Temperaturgradienten zunehmen, erhöht das verminderte Temperaturniveau in den gekühlten Bauteilen die Zeitstandfestigkeit für den verwendeten Werkstoff. Um belastbare Aussage bezüglich

der beiden einander widerstrebenden Thermospannungseinflüsse treffen zu können, sind detaillierte Analysen der Wärmeübergangsphänomene notwendig.

1.5 Arbeitsziele

Ziel dieses Projektes war daher die gekoppelte aerodynamische und aero-thermische Berechnung der Einlaufspirale, des Schaufelträgers sowie der ersten beiden Stufen einer thermisch hochbelasteten Mitteldruck-Dampfturbine. Die auftretenden aerodynamischen und thermomechanischen Belastungen wurden analysiert und Vorschläge für eine Kühlung der Maschinenkomponenten erarbeitet.

Dieses Projekt läuft als Partnerprojekt zu einem anderen, das am Institut für Dampf- und Gasturbinen der RWTH Aachen parallel aufgenommen wurde. Die Arbeit der beiden Projekte ist in hohem Grade mit den Primärzielen der ALSTOM Vorhaben verbunden. Dies soll sicherstellen, dass sich an der Universität studierte Design-Modelle an die ALSTOM Auslegungspraxis anpassen.

Es war notwendig, die Auswirkungen verschiedener Resultate für die zukünftige Auslegung der Dampfturbinen zu studieren und ihr Potenzial auf die neuen Auslegungskonzepte zu betrachten.

Die Arbeitsziele wurden in die folgenden Themenschwerpunkte aufgliedert:

1. Aerodynamische Untersuchungen (stationär, ungekühlte Geometrie)
 - Berücksichtigung der Realgaseffekte und realen aerodynamischen Transporteigenschaften (Viskosität) des Realgases Dampf
 - Untersuchung der nicht rotationssymmetrischen Strömung in der Einlaufspirale zur Ermittlung der aerodynamischen Randbedingungen der Stufenberechnung
 - Untersuchung der Aerodynamik der beiden Frontstufen unter Berücksichtigung durchströmter Deckbandkavitäten
2. Aero-thermische Untersuchungen (stationär, gekühlte und ungekühlte Geometrie)
 - Berücksichtigung der Realgaseffekte und realen aero-thermischen Transporteigenschaften (Leitfähigkeit, Prandtlzahl) des Realgases Dampf (Heißdampf und Kühldampf) bei den gekoppelten aero-thermischen Simulationen (Conjugate-Ansatz, CHT-Flow)

- Abschätzung der Wärmeströme an den Grenzen des Berechnungsgebietes (Schaufelträger)
 - Bestimmung der Wärmeströme in der ungekühlten Turbinengeometrie über gekoppelte Berechnungen von Strömung und Festkörper und Ermittlung der Orte, an denen aufgrund der hohen thermischen Belastung eine Kühlung der Bauteile sinnvoll und möglich ist
 - Untersuchung der Auswirkung der Kühlung auf die thermische Bauteilbelastung
3. Untersuchungen zur thermo-mechanischen Bauteilbelastung (gekühlt und ungekühlt)
- Ermittlung des Einflusses der Kühlung auf die thermischen und mechanischen Spannungen in den gekühlten Schaufeln bzw. dem gekühlten Schaufelträger im Vergleich zur ungekühlten Konfiguration.

1.6 Vorgehensweise

Das Vorhaben wurde in enger Kooperation mit dem Universitätspartner „Institut für Dampf- und Gasturbinen der RWTH Aachen“ realisiert, wobei am Institut die theoretischen Arbeiten und bei ALSTOM ein Großteil der Auslegungsarbeiten durchgeführt wurden. Gegenstand der numerischen Untersuchungen war der thermisch hoch belastete Eintrittsbereich einer zweiflutigen Mitteldruckturbine. Das Design der zu untersuchenden Turbine wurde bei ALSTOM festgelegt. Der Eintrittsbereich der Turbine umfasst die Einlaufspirale, den Schaufelträger sowie die ersten beiden Stufen der Turbine. Bei der Leitbeschaufelung werden sowohl die Schaufelfüße als auch die Kühldampfkanäle im Schaufelfestkörper berücksichtigt. Bei der Laufbeschaufelung werden die Deckbandkavitäten sowie die Labyrinthdichtungen in der Simulation erfasst. Axiale Wärmeströme in der Welle können vernachlässigt werden, so dass die Welle als hinreichend adiabat angenommen werden kann. Da der Fokus der Untersuchungen auf den Wärmeübergangsphänomenen zwischen Einlaufspirale und beschauftem Strömungskanal lag, kann auf eine Modellierung der wellenseitigen Deckbandüberströmungen (Leitschaufel) verzichtet werden.

Die Komplexität der zu untersuchenden Geometrie machte vor dem Hintergrund des enormen Berechnungsaufwandes zur gekoppelten Strömungs- und Wärmeübergangsanalyse in Dampfströmungen eine größtmögliche Reduktion der Berechnungsgebietgröße erforderlich. Hierzu wird zunächst die axiale Symmetrie der

zweiflutigen Turbinenkonstruktion ausgenutzt, die insbesondere den Modellierungsbereich der Einlaufspiralenströmung halbiert. Die nicht rotationssymmetrische Hälfte der Einlaufspirale hingegen muss unter Berücksichtigung der Dampfzufuhrleitung(en) über den gesamten Umfang modelliert werden, um hinreichend genaue Randbedingungen (Totaldruck, Totaltemperatur und repräsentative Strömungswinkelverteilung) für die Stufenberechnung erhalten zu können. Die Einlaufspirale wird dabei rein aerodynamisch untersucht.

Für eine repräsentative Umfangsposition der Einlaufspirale wird danach ein Segment in der Umfangserstreckung eines Schaufelkanals (Schaufelträger) herausgetrennt und gemeinsam mit Einlaufspiralengehäuse, Schaufelträger und den beiden Frontstufen vernetzt. Die Strömungsdaten der Lösung der kompletten Einlaufspirale dienen hierbei als Randbedingung für die anschließenden aerodynamischen und aero-thermischen Simulationen des gesamten Eintrittsbereiches der MD-Turbine.

Im beschauelten Teil des Strömungskanals wird jeweils eine repräsentative Teilung des entsprechenden Schaufelgitters vernetzt. Die Übergabe der Strömungsdaten zwischen den stehenden und rotierenden Bereichen des Berechnungsgebietes gelingt dabei über Mischungsebenen, so dass auch ungerade Schaufelanzahlen pro Gitter berücksichtigt werden können.

Um den Einfluss der Deckbandüberströmung der Laufschaufeln und der dadurch beeinflussten Sekundärströmungen auf die Ausbildung der Wärmeströme im Schaufelträger erfassen zu können, ist eine Vernetzung der Deckbandkavitäten inklusive der Labyrinthdichtungen erforderlich. Die Deckbandgeometrie wurde bei ALSTOM festgelegt. Zur Generierung der Startlösung der aero-thermischen Simulation der Einlaufgeometrie wurde zunächst eine rein aerodynamische Berechnung durchgeführt. Da die Turbine gemäß der ultra-superkritischen Prozessauslegung mit Mitteldruckdampf von 30-32 bar und einer Temperatur von 720°C beaufschlagt wird, sind das vom Idealgas abweichende Realgasverhalten des Dampfes sowie die temperaturabhängigen Stoffgrößen zu berücksichtigen. Hierzu werden in einem ersten Schritt die Realgaseffekte über einen Ansatz für "Idealen Dampf" mit Realgaskorrekturtermen berücksichtigt. Für diskrete Druckniveaus konnte diese Vorgehensweise in der Vergangenheit bereits erfolgreich angewendet werden /1/.

In einem weiteren Schritt sollten die im Rahmen eines AG Turbo II-Vorhabens /2/ entwickelten Realgas Dampfströmungen gemäß den Dampf tafeln der Industrieformulie-

rung IAPWS-IF97 für die parallelisierte Version des institutseigenen Strömungslösers nutzbar gemacht werden.

Da sich die numerischen Untersuchungen auf die ersten beiden Stufen der Turbine konzentrierten, mussten für das Gehäuse die axial-radialen Wärmeströme, die über die Begrenzung des Berechnungsgebietes hinausgehen, abgeschätzt werden. Hierfür wurden über stufenweise aufgelöste eindimensionale Prozessanalysen diskrete Temperaturverteilungen über die gesamte Schaufelträgerlänge bestimmt. Bei der Abschätzung und Kalibrierung dieser sogenannten "parasitären Wärmeströme" konnten darüber hinaus die Ergebnisse eines weiteren Teilprojektes des Verbundvorhabens mitberücksichtigt werden.

Aufbauend auf den aerodynamischen Simulationen und eindimensionalen Analysen wurden gekoppelte Rechnungen von Fluid und Festkörper durchgeführt, um die thermisch hochbelasteten Zonen innerhalb des Gehäuses und der Beschaukelung zu ermitteln. Auf diese Weise konnten die Stellen in den Schaufeln und innerhalb des Gehäuses festgelegt werden, an denen eine Kühlung notwendig bzw. sinnvoll ist. Für die Kühlung kommen mit großer Wahrscheinlichkeit die erste Leitschaufel sowie Teile des Gehäuses in Frage. ALSTOM klärte gemeinsam mit dem Vorhabenspartner IDG Aachen darüber hinaus, an welcher Stelle des Prozesses der Kühldampf entnommen und auf welchem Weg der Kühldampf den gekühlten Bauteilen zugeführt werden soll. Nach der Neuvernetzung der Geometrie unter Berücksichtigung der Kühlkanäle wurde die gekühlte Konfiguration durch gekoppelte Berechnungen von Strömung und Festkörper auf die Änderung der thermischen Belastung der gekühlten Bauteile hin untersucht. Vergleiche mit der ungekühlten Konfiguration zeigten, inwieweit sich die thermische Belastung insbesondere der Schaufeln durch gezielte Kühlung reduzieren lässt.

Um auch die Auswirkungen der Kühlung auf die mechanischen Belastungen zu untersuchen, wurden sowohl für die ungekühlte als auch die gekühlte Konfiguration Festigkeitsanalysen durchgeführt.

Für eine korrekte Ermittlung der mechanischen und thermomechanischen Belastungen war eine Berücksichtigung des elasto-plastischen Werkstoffverhaltens bei den projektierten hohen Temperaturen notwendig. Die Ergebnisse der Untersuchungen dienten dazu, das Kühlpotenzial für thermisch hochbelastete Dampfturbinen abzuschätzen, die in Prozessen mit ultra-superkritischen Dampfparametern betrieben werden. Auf diese Weise konnten technisch-konstruktive Randbedingungen für die Gestaltung neuer, hocheffizienter Turbinen zur Verfügung gestellt werden.

2 Stand der Wissenschaft und Technik über bisherige Arbeiten

2.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Überkritisch geführte Dampfkraftprozesse wurden erstmalig in den 50er Jahren des vergangenen Jahrhunderts ausgelegt und realisiert. Seitdem sind weltweit über 550 überkritische Kraftwerksblöcke in Betrieb gegangen. Während der größte Teil der Anlagen bis in die späten 70er Jahre von Unternehmen aus den USA und der UdSSR errichtet wurden, wird der Markt in den letzten Jahren von Unternehmen aus Japan dominiert. Weltmarktführer auf dem Sektor der überkritischen Dampfkraftwerke ist allerdings nach wie vor General Electric (USA) mit einem Marktanteil von ca. 23%. Die großen europäischen Kraftwerksbauer, Siemens/Westinghouse und ALSTOM, halten zusammen einen Weltmarktanteil von 22% /3/.

Alle bislang realisierten Prozesse basieren dabei auf ferritischen, ferritisch-martensitischen oder austenitischen Werkstofflösungen und sind somit auf maximale Temperaturen von 620°C (Austenit) begrenzt. Für einige der Kraftwerke sind auch Kühlkonzepte für die HD- und die MD-Dampfturbine dokumentiert. In /4/ wird für eine MAN-Turbine die Kühlung des Düsengehäuses (1.Stufe) im HD-Turbineneintrittsbereich mit Austrittsdampf eben dieser 1.Stufe realisiert. Ein Teil dieses Kühldampfes wird aus der HD-Turbine abgezogen und zur Rotor- und Radscheibenkühlung im Eintrittsbereich der MD-Turbine verwendet. Der Kühldampf wird dabei schließlich der MD-Heißdampfströmung zugemischt.

Ein ähnliches Konzept wird für GE-Dampfturbinen in /5/ vorgestellt. Auch hier wird Dampf aus der HD-Turbine entnommen und zur Kühlung des Rotors der MD-Turbine (zweiflutig) eingesetzt. Alternativ sind HD- und MD-Turbine (einflutig) in einem Gehäuse untergebracht, so dass der Kühldampf direkt der MD-Turbine zugeführt werden kann. In /6/ wird ein mit superkritischem Dampf beaufschlagter MHI-Turbinensatz über eine zentrische Wellenbohrung gekühlt. Mit Hilfe dieses Ansatzes, der auch in russischen Installationen umgesetzt worden ist /7/, wird vor allem das An- und Abfahrverhalten des Turbosatzes über eine Verminderung der thermomechanischen Belastung verbessert.

Die Zielsetzung einer Erhöhung der Dampfparameter hin zu ultra-superkritischen Prozessparametern hat in den letzten 5 Jahren in Europa eine Vielzahl von For-

schungsprojekten aus den Bereichen der Werkstofftechnik und der Prozessanalyse initiiert. Sie legen die Grundlage für die weiterführenden Forschungsvorhaben, die sich mit detaillierten Fragestellungen der Komponentenauslegung befassen.

So wurde im Rahmen des europäischen Thermie-Projektes und dessen Nachfolgeprojektes AD700 die Werkstoffentwicklung für eine 700°C-Turbine vorangetrieben. Dabei wurden Legierungen entwickelt, die den Anforderungen des Betriebs von Dampferzeugern und Dampfturbinen bei 700°C genügen (100.000 Stunden Zeitstandsfestigkeit bei ca. 100 MPa und den gegebenen Strömungs- und Materialtemperaturen). Des Weiteren wurden gute Fortschritte beim Einsatz dieser Legierungen in einer Serie von Prototypskomponenten zur Demonstration der Herstellbarkeit gemacht. Ein Vergleichstestprogramm wurde gestartet, um diese Prototypskomponenten in allen kritischen Eigenschaften zu untersuchen und potenzielle Versagensmechanismen zu erkennen. Bislang hat das Testprogramm die erwarteten Materialeigenschaften bestätigt und keinerlei technische Hindernisse bei der Auslegung und der Herstellbarkeit der Dampferzeuger und Turbinen aufzeigen können.

Als weiterer Aspekt der Thermie- und AD700-Projekte ist die Untersuchung der Realisierbarkeit ultra-superkritischer Prozesse in Kooperation der europäischen Turbomaschinenhersteller wie z.B. Siemens und ALSTOM, der Energieversorger wie z.B. Électricité de France (EdF) und RWE sowie spezialisierter Hersteller wie z.B. SAAR Schmiede. Ziel der Untersuchungen war das Design einer 700°C Turbinentechnologie unter den folgenden Voraussetzungen:

- die Erarbeitung von konzeptionellen Entwürfen für je einen 400MW und einen 1000MW-Turbosatz, wobei der Bestimmung der Abmessungen und Gewichte der Hauptkomponenten eine besondere Bedeutung zukommt
- die Analyse des Startverhaltens des Turbosatzes
- die Erarbeitung von Entwürfen für die angeschlossenen Ventile

Ergebnisse dieser Studie waren folgende Randbedingungen für das Design zukünftiger Turbinen:

- separate Gehäuse für Temperaturen oberhalb 600°C

- eine schnelllaufende Höchstdruckturbine (UHD) für eine 400 MW-Anlage mit zweifacher Zwischenüberhitzung
- geschweißte Rotoren, Hirth-Verzahnungen oder verschraubte Rotoren
- über Schrumpfringe zusammengehaltene Innengehäuse für die Höchst- und Hochdruckturbine
- Gehäuse in Topfbauweise für die Höchst- und Hochdruckturbine

2.2 Eigene bisherige Arbeiten

Beim Projektpartner – dem Institut für Dampf- und Gasturbinen - wurde seit mehr als einem Jahrzehnt kontinuierlich die Entwicklung von CHT-Flow (Conjugate Heat Transfer and Flow Simulation) vorangetrieben. CHT-Flow ist ein modernes und leistungsfähiges numerisches Rechenverfahren zur Analyse der aero-thermischen Phänomene und Bauteilbelastungen in thermisch hochbeanspruchten Turbomaschinenkomponenten.

Mit dem dreidimensionalen stationären Strömungslöser werden die vollständigen Navier-Stokes Gleichungen mit Hilfe der finiten Volumenmethode in konturangepassten Koordinaten diskretisiert und mit Hilfe eines impliziten Newton-Verfahrens gelöst. Durch ein Multi-Block-Verfahren wird die Diskretisierung komplexer Rechengebiete ermöglicht, wie sie z. B. bei der Berechnung von Spaltströmungen zwischen Deckband und Gehäuse bzw. Rotor auftreten. Die Berechnungen können sowohl in stehenden als auch in rotierenden Koordinatensystemen durchgeführt werden. Des Weiteren ist das Verfahren in der Lage über den Einsatz von Mischungsebenen zwischen rotierenden und stehenden Diskretisierungsbereichen, Stufen und Stufenverbänden zu rechnen. Zur Turbulenzmodellierung dienen verschiedene Modelle unterschiedlicher Komplexität. In den Strömungslöser sind neben einem robusten algebraischen Turbulenzmodell /8/ weitere Turbulenzmodelle implementiert (Eingleichungsmodell nach Goldberg /9/, Zwei-Gleichungs-k, -Modelle nach Nagano-Tagawa /10/ und Launder- Sharma /11/, Zwei-Gleichungs-k, -Modell nach Wilcox /12/, Anisotropie-Modell nach Craft- Launder-Suga /13/).

Im Rahmen der kontinuierlichen Weiterentwicklung ist der Strömungslöser CHT-Flow für die Berechnung instationärer Strömungen mittels eines expliziten Verfah-

rens für konstante Zeitschritte erweitert worden. Die Kopplung zwischen stehenden und rotierenden Bauteilen erfolgt mittels des Verfahrens der „sliding meshes“.

Zur Berücksichtigung der Realgaseffekte von Dampf ist der Löser im Rahmen des AG Turbo II Vorhabens 4.2.3b um Dampftafeln gemäß den Industrieformulierungen nach IAPWS-IF97 erweitert worden. Die Analyse der Wärmeströme in realen Systemen ist einer der Schwerpunkte der Aktivitäten des IDG. Neben experimentellen Untersuchungen zu Strömung und Wärmeübergang /14-17/ bestehen auf der numerischen Seite umfangreiche Erfahrungen mit der Modellierung und Simulation adiabater Systeme.

Das Berechnungswerkzeug CHT-Flow löst dazu simultan die Innen- und Außenströmung sowie den Wärmetransport durch Bauteile, ohne auf Wärmeübergangsgesetze zurückgreifen zu müssen. Wärmeübergangsgesetze gelten in der Regel nur für einfache Geometrien wie z.B. Rohre oder ebene Platten und liefern bei komplexen Geometrien wie z.B. Dampfturbinengehäusen ungenaue Ergebnisse. Dagegen bietet das im Strömungslöser implementierte Conjugate-Verfahren die Möglichkeit einer genauen Berechnung des Wärmeüberganges. Die Wärmeleitfähigkeit der aus verschiedenen Materialien bestehenden Komponenten (Schaufeln, Welle, Gehäuse) wird durch Angabe der materialspezifischen, temperaturabhängigen Größen berücksichtigt. Typische Anwendungsfälle für den Conjugate-Ansatz sind aerothermische Untersuchungen an Turbinenschaufeln oder Brennkammerbauteilen, die sehr hohen thermischen Belastungen ausgesetzt sind. Der Schutz dieser Bauteile durch Wärmedämmschichten oder durch Kühlung mit Kühlluft sind gängige Maßnahmen zur Erhöhung der Lebensdauer. CHT-Flow ermöglicht in diesem Zusammenhang gezielte Designoptimierungen und zeigte bereits vielfach die außergewöhnliche Leistungsfähigkeit dieses Werkzeuges in international vergleichenden „Blind-Case-Untersuchungen“ auf /18-27/.

Die im folgenden genannten Arbeiten dokumentieren die Entwicklung des Verfahrens und zeigen Anwendungsbeispiele im Turbomaschinenbereich: In den Arbeiten von Bohn und Emunds /28/,/29/, von Bohn, Emunds und Gier /30/, sowie Bohn, Gier, Holzenthal und Kusterer /31/ konnten mit diesem Verfahren Aussagen zur Anwendung und Gültigkeit verschiedener Turbulenzmodelle in turbomaschinenspezifischen Strömungen gemacht werden. Des weiteren konnten wertvolle Informationen über die Entstehung und Entwicklung von Sekundärströmungserscheinungen,

deren Entstehungsursachen in den Grenzschichten der Seitenwände liegen, gewonnen werden /30/. Der Einsatz des Verfahrens zur Berechnung einer kompletten Stufe ist in /32/ dokumentiert. Bohn, Becker, Behnke und Bonhoff /33/ bzw. Bohn, Becker, Behnke und Schönenborn /34/ führten vergleichende numerische und experimentelle Untersuchungen zu den aerodynamischen Einflüssen der Kühlluftausblausung bei einer innengekühlten Turbinenschaufel mit Hinterkantenausblausung durch. Weiterhin wurden sowohl numerische als auch experimentelle aerodynamische Untersuchungen von Vorderkantenausblausungen durch Lochreihen von Bohn, Becker /35/ und Bohn, Becker, Rungen /36, 37/ durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurden auf der numerischen Seite in Begleitung zu dem Vorhaben 2.1.8.5 (AG Turbo-Therm II) stationäre Rechnungen mit inhomogener Leitradabströmung und fünf nachgeschalteten Laufschaufeln durchgeführt, die eine deutliche Staupunktverlagerung an der Rotorschaufel infolge der Nachlaufdele des Leitrades aufzeigen. Solche Effekte können in einer stationären Stufenrechnung infolge der Umfangsmittelung in der Mischungsebene nicht simuliert werden. Nur instationäre Stufenrechnungen können sämtliche Interaktionsphänomene berücksichtigen.

Bezüglich der Berechnung von Strömung und Wärmeübergang wurde in den Arbeiten von Bohn, Bonhoff /38/ und Bohn, Bonhoff, Schönenborn, Wilhelmi /39, 40/ eine iterationsfreie Kopplung von Fluidraum und Festkörperbereich im Mehr-Block-Verfahren entwickelt. Im folgenden wurde das Rechenverfahren zur Bestimmung der thermischen Belastungen von konvektionsgekühlten und filmgekühlten Gasturbinenschaufeln eingesetzt. So wurde die konvektionsgekühlte Versuchsschaufel der NASA, Mark II, von Bohn, Bonhoff, Schönenborn /41/ und Bohn, Bonhoff, Lang, Schönenborn /42/ zweidimensional untersucht, wobei zusätzlich eine Analyse der thermischen Spannungen und Dehnungen mit Hilfe eines FEM-Lösers durchgeführt wurde. Schließlich wurden in weiteren Berechnungen /43/ auch dreidimensionale Untersuchungen dieser Konfiguration durchgeführt. Weitere gekoppelte dreidimensionale Untersuchungen wurden auch für filmgekühlte Konfigurationen mit Vorderkantenausblausung durchgeführt. Hierbei konnten von Bohn, Kusterer, Schönenborn /44/ die Auswirkungen dreidimensionaler Strömungsphänomene auf die Kühlluftverteilung entlang der Schaufeloberfläche aufgezeigt werden. Weiterhin wurde diese Konfiguration für unterschiedliche Betriebspunkte untersucht /45/.

In dem Forschungsprogramm "AG-Turbo-II" wurden die Untersuchungen hinsichtlich der Deckbandströmungen durchgeführt. Am Institut für Dampf- und Gasturbinen der RWTH Aachen wurden umfangreiche numerische und experimentelle Parameterstudien durchgeführt, um den Einfluss von Schaufelgestaltung, Kavität-Gestaltung und axialem Schaufelabstand auf den Turbinenwirkungsgrad einer zwei-stufigen Turbine zu ermitteln. Das Ziel war es, den relativen Beitrag der Einflüsse unter verschiedenen Schaufelbelastungen auf den Wirkungsgrad zu bestimmen. Hieraus konnten verschiedene Regeln für die Schaufel- und Turbinengestaltung abgeleitet werden. Eine Besonderheit der Untersuchungen war die Unterdrückung der Spaltströmungen über das Deckband dadurch, dass die Versuche mit radialen Spie-len "nahe Null" durchgeführt werden konnten. Die parallellaufende CFD Studie hat angemessene Übereinstimmungen mit den experimentell ermittelten Werten ge-zeigt. Es wurden wichtige Erkenntnisse für die Berechnung komplexer Geometrien unter instationären Bedingungen gewonnen. Dadurch wurde eine solide Basis für die Berechnung komplizierterer Geometrien geschaffen, bei denen der Wärmeüber-gang zwischen Strömung und Festkörper eine wichtige Rolle spielt. Die Resultate zeigen die Komplexität der Strömungen und die Größe der instationären Verluste. Die kombinierten Auswertungen der Ergebnisse, haben die Bedeutung der Spalt-strömungen gezeigt und die Notwendigkeit einer Strategie zur integrierten Konstruk-tion, die die Schaufelgestaltung und die Spaltströmungen zusammen berücksichtigt. Zusätzlich zeigen die Resultate, dass das Verständnis der Strömungsphysik und die Einbindung in die Optimierung der Turbinenkonstruktion vertieft werden konnte /46/.

3 Beschreibung des Arbeitsplans

3.1 Ressourcenplanung

Die für dieses Projekt erforderlichen Ressourcen waren kleiner als ein Mannjahr pro Jahr. Die Tätigkeiten lagen hauptsächlich in der Betreuung des Projektes und die detaillierte Auslegung der Konfigurationen für das Projekt. Eine wichtige Aufgabe war die Bewertung der Resultate des IDG in Aachen.

3.2 Arbeitsplan

Entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise gliederte sich das Projekt in folgende Einzelschritte:

- Betreuung des Gesamtvorhabens, inklusive Koordination mit anderen, passenden AG-Turbo III Vorhaben
- Die Entwicklung von Geometrien und Randbedingungen
- Analyse „ungekühlter“ Fall
- Entwicklung gekühlte Beschaukelung
- Analyse „gekühlter“ Fall
- Allgemeine Analyse der Resultate
- Analyse des Potenzials von Kühlung
- Abschlussbericht

Durchführung des Projektes gemäß Projektantrag

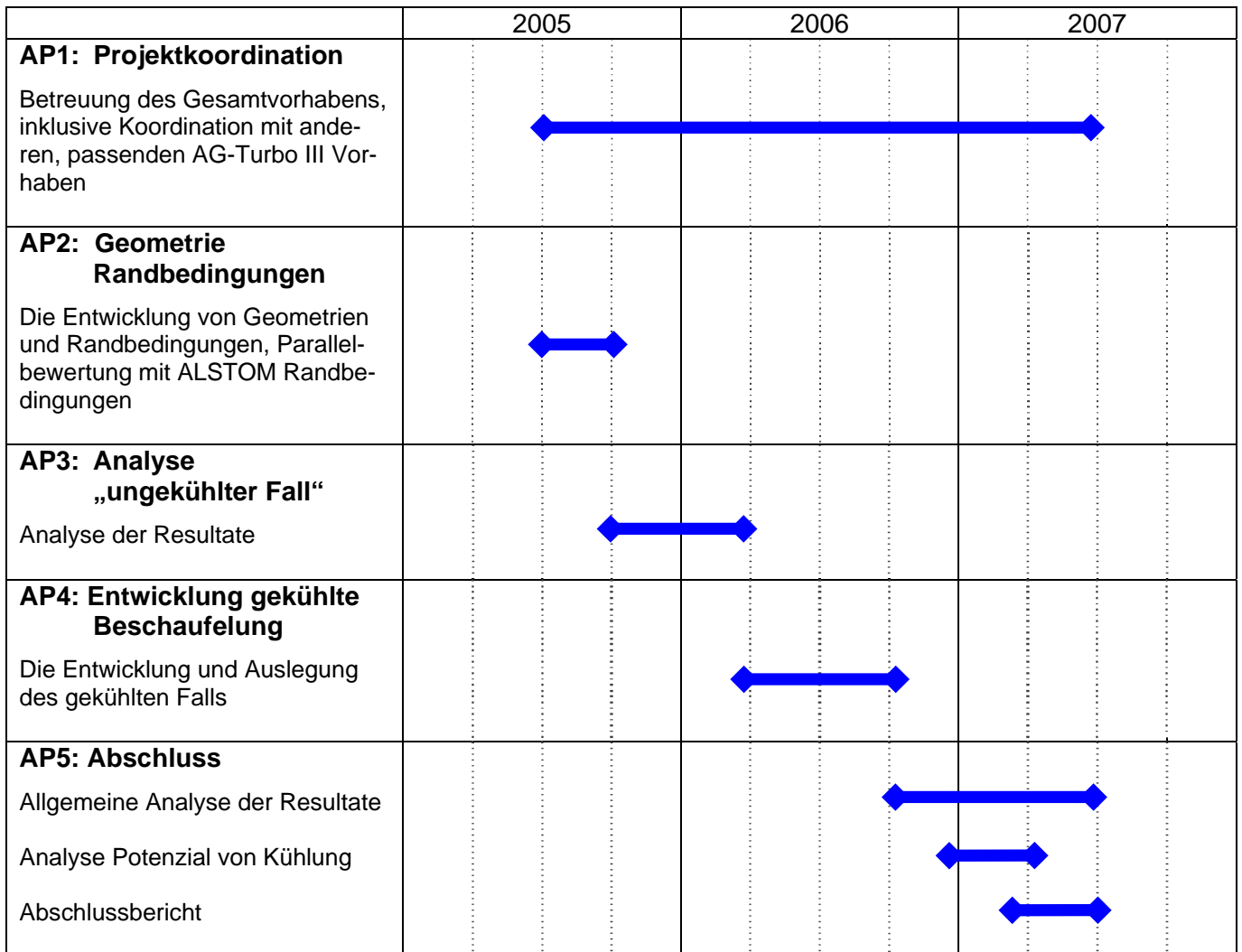


Abbildung 2a): Balken-Diagramm Zeitplan gemäss Projektantrag

Tatsächliche Durchführung des Projektes

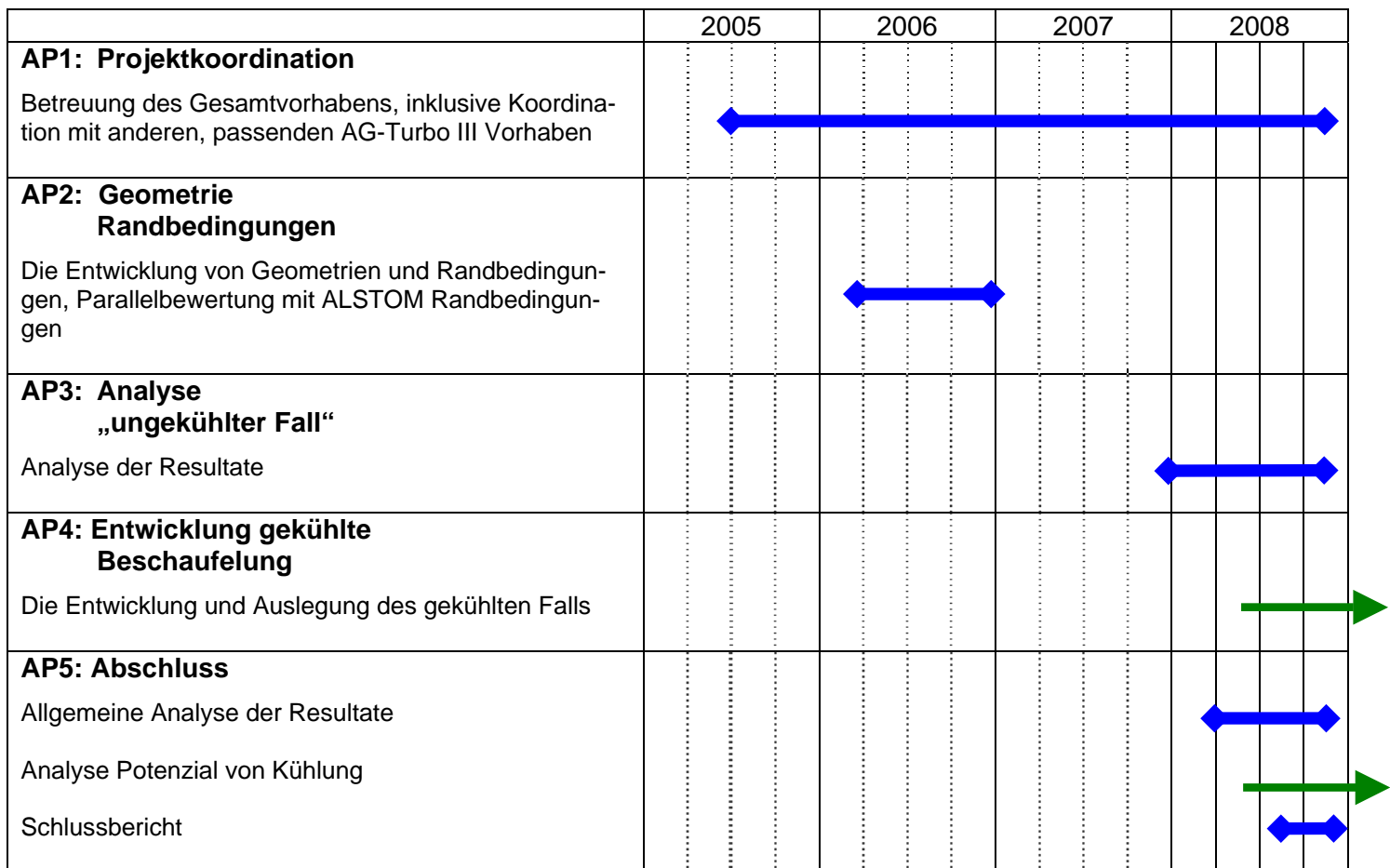


Abbildung 2 b): Balken-Diagramm Zeitplan gemäss tatsächlichem Projektverlauf

Durch die verzögerte Bereitstellung der Geometrien des Leitschaufelträgers sowie der Beschaufelung (Ende 4. Quartal 2006 statt Ende 3. Quartal 2005) konnte erst mit mehr als 12-monatiger Verspätung die Analyse des ungekühlten Falles beginnen. Das Arbeitspaket 3 wurde erst in der Zeit der Verlängerung nach dem offiziellen Ende des Förderzeitraumes (ab Ende 4. Quartal 2007) durchgeführt.

Die in den Arbeitspaketen AP4 und AP5 beschriebenen Projektschritte (grüne Pfeile) konnten auch bis zur Erstellung des Abschlußberichtes Ende Oktober 2008 nicht begonnen werden. Die Pfeile verweisen auf die Tatsache, dass auch nach Abschluss des geförderten Projektes durch fehlende Resultate aus dem korrespondierenden Projekt Nr. 4.1.2.A2 (FKZ 0327723D) ALSTOM diesen Themen einen hohen Stellenwert beimisst und in firmen-internen Untersuchungen diese fortführen wird.

3.3 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Im Bereich der Code-Anwendung bei derartigen Dampfparametern werden auf Basis der umfangreichen Erfahrungen innerhalb der Forschungsstelle neue Wege beschritten, die allerdings in Anbetracht der Komplexität der zu untersuchenden Themenstellung notwendig sind, um die Entwicklung moderner Beschaukelungen weiter voran treiben zu können. Darüber hinaus ist im Rahmen der Kooperation mit dem Universitätspartner IDG bei den Forschungsvorhaben AG Turbo I und AG Turbo II eine solide Basis für gemeinsame Forschungsvorhaben geschaffen worden. Durch den engen Kontakt mit den Partnern wird sichergestellt, dass die Forschungsergebnisse direkt in den internen Entwicklungsprozessen umgesetzt werden können.

Die wissenschaftlichen Erfolgsaussichten sind als hoch zu bewerten, da das Projekt in realistische, erreichbare Schritte aufgeteilt wurde, deren zusammengefasster Effekt einen Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik der Turbinenauslegungsstrategien bedeutet.

Dem deutschen Wissenschaftsstandort wird durch die Ergebnisse des Projektes die Möglichkeit geboten, den Entwicklungsschritt zur nächsten Generation von Dampfturbinen aktiv mitzugestalten. Dies wird in einem Zeitrahmen bis ca. 2013 geschehen

(siehe Abb. 3).

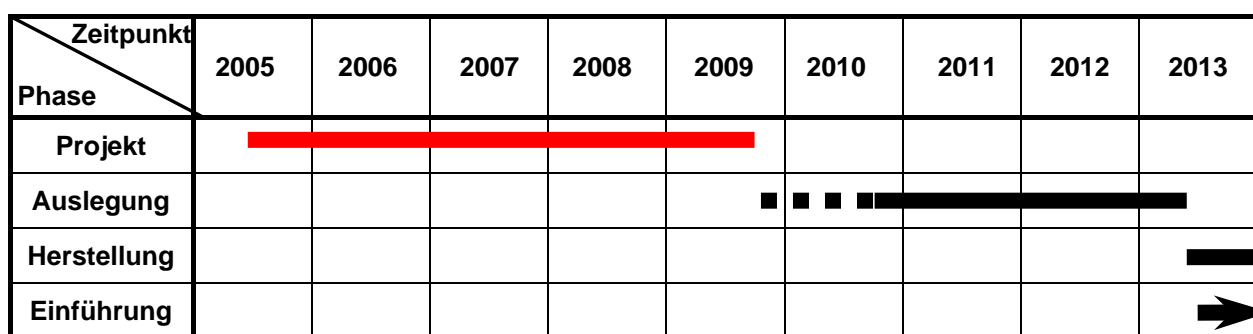


Abbildung 3: Umsetzung der aero-thermomechanischen Untersuchung einer gekühlten Dampfturbine unter ultra-superkritischen Dampfparametern

3.4 Zusammenarbeit mit Dritten

Das durchgeführte Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Dampf- und Gasturbinen an der RWTH Aachen durchgeführt und beinhaltet einen Austausch kommerziell vertraulicher Daten. Darüber hinaus wird die Einbeziehung der Fachwelt über Veröffentlichungen und den Informationsaustausch in Statusseminaren innerhalb des AG Turbo-Forschungsverbundes sichergestellt.

Der Vorhabenspartner IDG Aachen führte die numerischen Untersuchungen durch. Die Auswertung und Verwertung der Ergebnisse erfolgen in enger Kooperation, so dass deren Nutzbarkeit stets sichergestellt werden kann.

In einem weiteren Teilprojekt (4.1.1.) des Forschungsvorhabens AG Turbo III sollten die parasitären Wärmeströme in Turbinengehäusen detaillierter untersucht werden. Daher bot es sich an, dass im Rahmen des hier durchgeführten Vorhabens für die eindimensionale Abschätzung der parasitären Wärmeströme über die Berechnungsgrenzen hinaus die Ergebnisse des Teilprojektes 4.1.1 mitberücksichtigt werden können.

4 Arbeitpakete

Dieses Vorhaben ist eng mit dem Universitäts-Vorhaben Nr. 4.1.2.A2 (FKZ 0327723D) "Aero-thermomechanische Untersuchung einer gekühlten Dampfturbine unter ultra-superkritischen Dampfparametern" verbunden.

In Abbildung 4 zeigt der Balkenplan den Fortschritt in diesem Projekt des Universitätspartners bis zur letzten Arbeitskreissitzung im September 2008 in Köln.

Beim Projekt in Aachen gab es mehrere Personalwechsel und somit fehlte eine gewisse Kontinuität. Dies war zu bedauern, aber ALSTOM als Industriepartner hatte diese Tatsache akzeptieren müssen und die Universität beim Beantragen kostenneutraler Verlängerungen unterstützt.

Das Verbund-Projekt, das in diesem Bericht dargestellt wird, und das Universitätsprojekt sind eng miteinander gekoppelt, wobei Ergebnisse des Universitätsprojektes für die Analyse in diesem Projekt erforderlich sind. Zum Beispiel hängt das Arbeitspaket AP3 im ALSTOM – Projekt wesentlich von der Durchführung von Teilen des Arbeitspaketes AP2 in Aachen ab. Dieses konnte aber gemäss der aktualisierten Planung erst in 2008 abgeschlossen werden.

ALSTOM hat dieses Projekt sorgfältig durchgeführt. Leider muss dieser Abschlussbericht als unvollständig angesehen werden, da immer noch wichtige Resultate aus Aachen zum Abschluss der letzten Arbeitspakete (AP4 und AP5) fehlen.

COOREFF-T Teilverbundprojekt 4: Dampferzeuger und Dampfturbine	Aero-thermische Untersuchung einer gekühlten Dampf- turbine unter ultra-superkritischen Dampfparametern				Vorhaben 4.1.2 A/2 1.7. - 31.12.2008			
	2005	2006	2007	2008	2005	2006	2007	2008
1. Code-Entwicklung / Gittergenerierung								
Literaturrecherche	■				■			
Erweiterung des Codes zur Berücksichtigung der Realgaseigenschaften von Dampf	■				■			
Gittergenerierung der Einlaufspirale (Strömung)	■				■			
Voruntersuchung zur Schaufelkühlung					■			
Gittergen. des Turbinensegmentes (Strömung u., ohne / mit Kühlung)					■			
2. Aerodynamische und aerothermische Untersuchungen								
Abschätzen der Temperaturverteilung des Leitschaufelträgers					■			
Gekoppelte aerothermische Simulation der Einlaufspirale					■			
Gekoppelte aerothermische Simulation des ungekühlten Turbinensegments					■			
Postprocessing / Festlegen einer Kühlgeometrie und des Kühlbedarfs					■			
Gekoppelte aerothermische Simulation der gekühlten Konfiguration					■			
Postprocessing / Vergleich der thermischen Belastung mit ungekühlter Konfiguration					■			
3. Auswertung der Ergebnisse / Berichte								
Analyse möglicher Kühlkonzepte					■			
Berichterstattung					■	■	■	■

■ ursprüngliche Planung ■ durchgeführte Arbeiten = aktuelle Planung

Abbildung 4: Aktueller Stand, des Partner-Projekts 4.1.2.A/2

4.1 AP1: Projektkoordination

Betreuung des Gesamtvorhabens, inklusive Koordination mit anderen, passenden AG-Turbo III Vorhaben

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, das Projekt insgesamt zu koordinieren sowie die Koordination mit anderen AG-Turbo Vorhaben sicherzustellen.

Besonders das Vorhaben 0327720F „Parasitäre Wärmeflüsse im Innengehäuse einer Dampfturbine“ war für das vorliegende Projekt von Bedeutung.

In diesem Vorhaben wurde eine Modellierung der fehlenden parasitären Wärmeströme in Gehäusen angestrebt. Grund dafür ist, dass bei den früheren Berechnungen die Auswirkungen der auftretenden Wärmeströme auf den Wirkungsgrad nicht explizit berücksichtigt wurden. Deshalb wurden in dieser Arbeit die Auswirkungen der parasitären Wärmeströme im Innengehäuse einer Hochdruckdampfturbine auf den thermodynamischen Wirkungsgrad einer Teilturbine und auf den Gesamtwirkungsgrad einer Dampfturbine untersucht.

Dabei galt es zu klären, ob die bisherigen Ansätze, diese Effekte zu vernachlässigen, auch bei hohen Dampfzuständen angewendet werden dürfen. Zu diesem Zweck wurde ein einfaches 1D-Szenario für die Wärmeflüsse erstellt und in die Kreisprozess-Berechnung der Gesamtanlage eingebunden. Dieses 1D-Szenario basiert auf einer vereinfachten Innengehäusegeometrie, welche von den realen Konstruktionen abgeleitet ist. Die mit Hilfe dieses 1D-Szenarios analytisch ermittelten radialen Wärmeströme wurden mit den 2D-FEM-Rechnungen am ITLR, Stuttgart, mit 3D-FEM-Rechnungen der Firma ALSTOM und mit deren Betriebserfahrungen validiert. Beim Vergleich der Ergebnisse der 1D-, 2D- und 3D-Rechnungen konnte nachgewiesen werden, dass die Ergebnisse der 1D-Rechnungen konservativ gegenüber den beiden anderen sind. Somit ist es zulässig, mit diesen ermittelten 1D-Szenarien zu arbeiten.

Zwar werden bei diesen Abschätzungen die Strahlungsanteile vernachlässigt, dies ist jedoch zulässig, da sie bei den höheren Durchsätzen nur einen geringen Einfluss haben.

Mit Hilfe dieser vereinfachten Modelle werden nun Abschätzungen des Gesamtwärmestromverlustes Q_{rad} über das Innengehäuse an den Abdampf bestimmt. Jedoch geht diese Energie dem Gesamtprozess nur teilweise verloren. Dieser Wärmerückgewinn verschlechtert zunächst nur den inneren Wirkungsgrad der Hochdruckturbine. Trotzdem ist dieser Effekt unerwünscht.

Um den Fall einer VHP-Turbine untersuchen und anschließend bewerten zu können, werden mit diesem Vorgehen drei bestehende Gasturbinenanlagen von ALSTOM untersucht. Für die Untersuchung der Einflüsse auf den Gesamtwirkungsgrad sind die Wärmeverlustbetrachtungen mit einem Anlagenprogramm für Anlagenberechnungen von ALSTOM gekoppelt worden. Dabei zeigte sich, dass diese Auswirkungen auf den thermischen Gesamtwirkungsgrad als gering einzuschätzen sind. Somit ist es zulässig, die früher getroffene Annahme beizubehalten, die Auswirkungen der auftretenden parasitären Wärmeströme auf den Wirkungsgrad zu vernachlässigen.

Die Ergebnisse dieses Vorhabens zeigten, dass nur eine komplexe Berechnung eine vollständige Analyse der Auswirkungen auf die Turbinenleistung erlauben würde.

Die thermischen Randbedingungen für die Berechnung wurden diesem Vorhaben entnommen, so dass man einen konsistenten Satz miteinander gekoppelter Ergebnisse aus den verschiedenen Projekten erhält.

Ein weiteres, mit diesem Vorhaben in Zusammenhang stehendes Vorhaben ist V0327090A, „Wirkungsgradoptimierte Turbinenbeschaukelung“, in dem man eine Optimierung der Leckage der HD-/MD-Turbinenbeschaukelung anstrebte. (siehe Abb. 5)

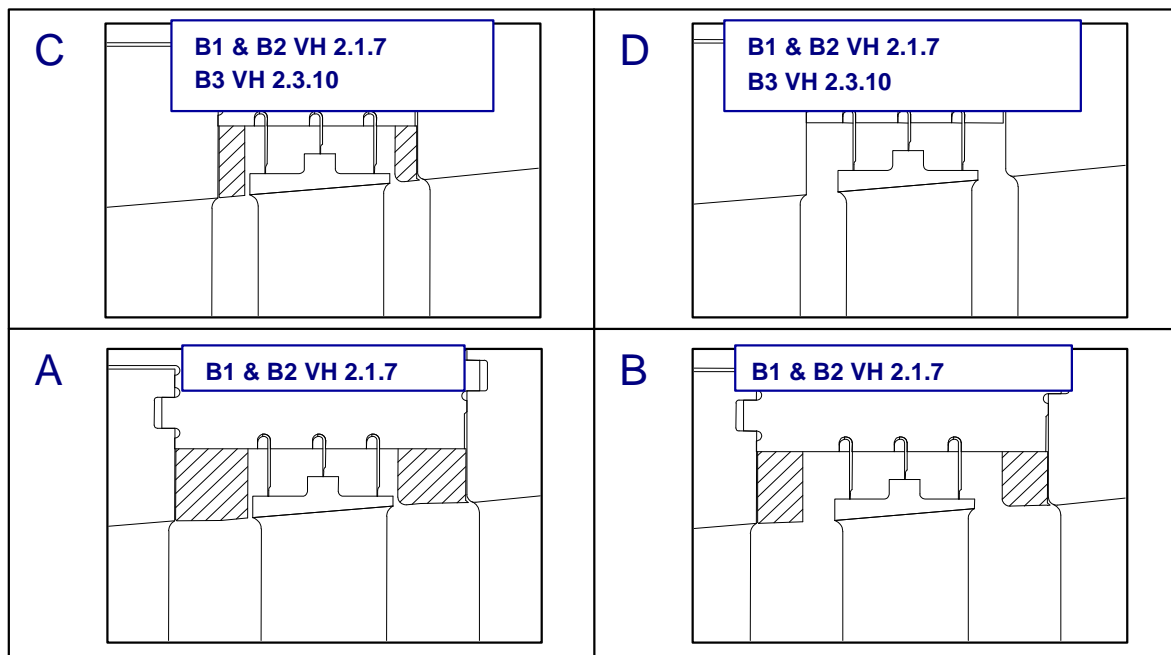


Abbildung 5: Experimentelle Geometrien aus dem Vorhaben
„Wirkungsgradoptimierte Turbinenbeschau felung“

Weitere Erkenntnisse über die Wärmeübergangs- und Wärmestromverhältnisse in den ersten Stufen der VHP Turbine sowie die Ergebnisse aus diesem und früheren Vorhaben betreffend Leckagen ermöglichen eine Optimierung der Auslegung der HD-/MD-Beschau felung. Dies ist möglich obwohl, wie unten erwähnt, die in diesem Projekt verwendete Beschau felung stark vereinfacht ist im Vergleich zu der im vorigen Projekt.

4.2 AP2: Geometrie-Randbedingungen

Die Entwicklung von Geometrien und Randbedingungen, Parallelbewertung mit ALSTOM Randbedingungen

ALSTOM lieferte eine komplette Geometrie, wie sie in einer 700°C Turbine eingesetzt werden würde, siehe Abbildung 6. Dies geschah als 3D-Modell mit den entsprechenden Zeichnungen.

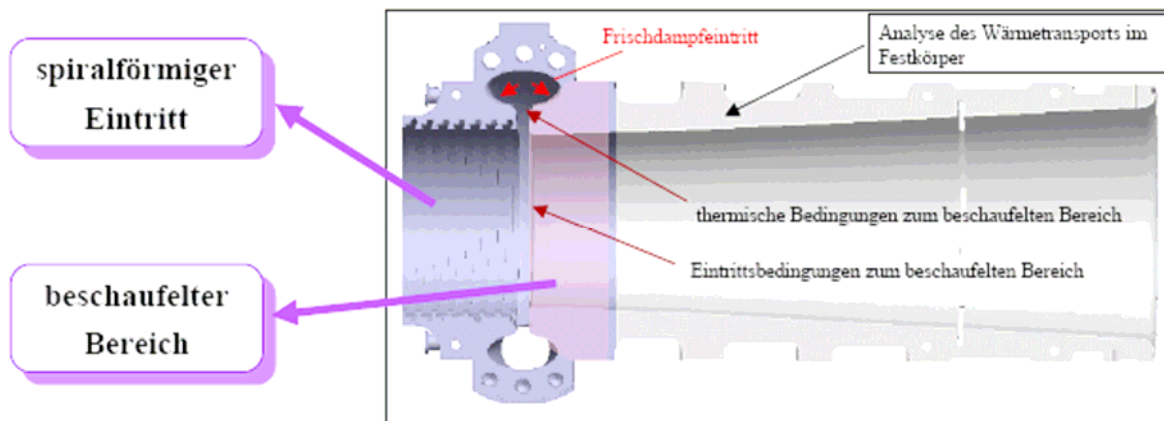


Abbildung 6: Schema der gelieferten Geometrie

Ein solches Gehäuse besitzt ein bedeutendes Designdetail, das als kommerziell sensitiv (wettbewerbsrelevant) betrachtet werden kann. Deshalb wurde für dieses Projekt ein generisches Gehäuse gewählt, das untersucht, aber aus verschiedenen Gründen bei der Konstruktion einer VHP Turbine verworfen wurde. Dieses Design kann bei 700°C eingesetzt werden, ist aber so weit von der üblichen ALSTOM Auslegung entfernt, dass Veröffentlichungen und Dissertationen aus dieser Arbeit abgeleitet werden dürfen. Obwohl das Design generisch ist, stimmt es andererseits so weit mit der ALSTOM Auslegung überein, dass es untersuchenswert ist und konkrete Auslegungsergebnisse aus den Schlussfolgerungen gezogen werden können.

Um eine Berechnung des Designs, selbst bei einem generischen Gehäuse, überhaupt durchführen zu können, mussten zunächst gewisse Merkmale vereinfacht werden. (siehe hierzu Abb. 7)

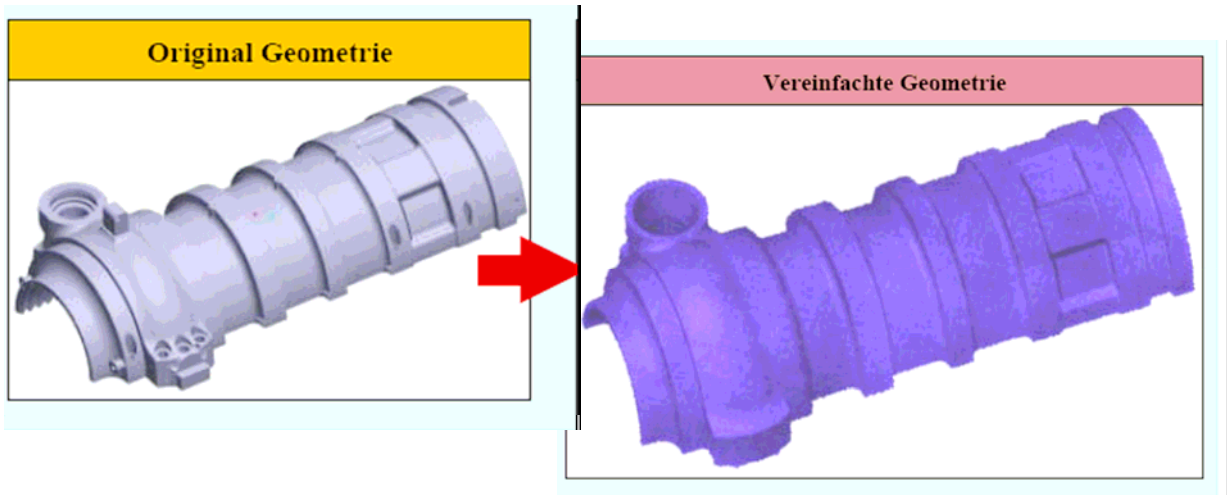


Abbildung 7: Vereinfachte Geometrie

Die wichtigsten Vereinfachungen waren das Entfernen der Verschraubungen und eine Verringerung der Anzahl der Flansche und Ringe. Um dies zu ermöglichen, mussten die möglichen Auswirkungen auf die Qualität der Ergebnisse in Bezug auf den Gesamtwärmeübergang im Gehäuse bewertet werden. Die Vereinfachung zeigte keine generelle Änderung in der Temperaturverteilung.

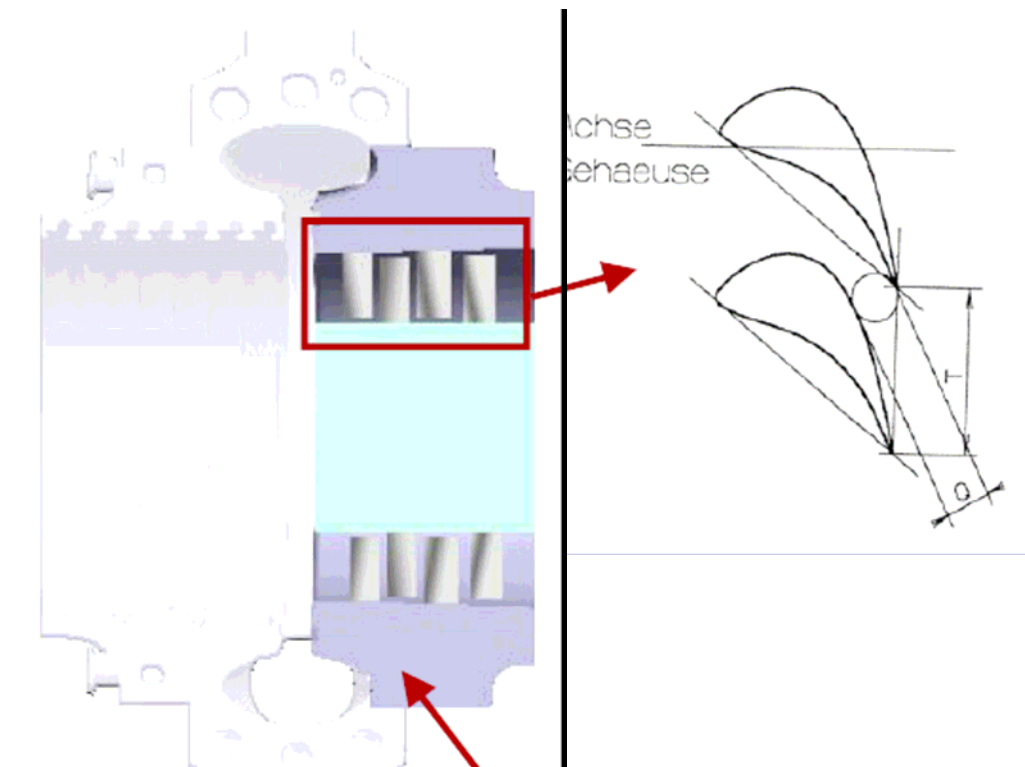


Abbildung 8: Beschauungsdetail

Man sollte beachten, dass bei Auslegungen, die für eine Anwendung in der Praxis untersucht werden, diese Merkmale vorhanden sein müssen, da zum Beispiel die Gehäusetemperatur und die Verteilung der Kerbspannungen an Flanschen und Schrauben das Kriech- und Verformverhalten, und somit auch die Lebensdauer der Komponenten, wesentlich beeinflussen und verschlechtern.

Für die Auslegung wurde eine generische Forschungsbeschaukelung gewählt, die bereits im Vorhaben 0327090A „Wirkungsgradoptimierte Turbinenbeschaukelung“ untersucht worden war. Es handelt sich um eine Beschaukelung, die, wie das Gehäuse, nicht kommerziell in einem ALSTOM Design eingesetzt werden würde, die aber für die ALSTOM Auslegungsphilosophie repräsentativ ist, so dass die Rechenresultate von Nutzen sind.

Auch diese Resultate können in zukünftigen Veröffentlichungen und Dissertationen verwendet werden.

Da die Auslegungsrandbedingungen für die Berechnung des ganzen 700°C Kreisprozesses repräsentativ sind, musste die Schaufel leicht verändert werden, um sie anzupassen. Dies beinhaltete eine Änderung des Staffelungswinkels der Schaufel (4,4°) sowie ein leicht geändertes Teilungs-/Sehnen-Verhältnis der Schaufelreihe (dies erreichte man durch eine höhere Anzahl Schaufeln bei größerem Durchmesser). Die daraus resultierende Beschaukelung kann den erforderlichen Dampfmassestrom aufnehmen.

Es wurde auch entschieden, die Schaufelspitze zu vereinfachen. Bei diesen Schaufelarten ist eine Ausführung mit Deckband üblich. Es würde jedoch einen enormen Rechenaufwand bedeuten, das Deckband zu vernetzen. Außerdem sind die Details der Deckbandkonstruktion für solche Bedingungen kommerziell sensitiv.

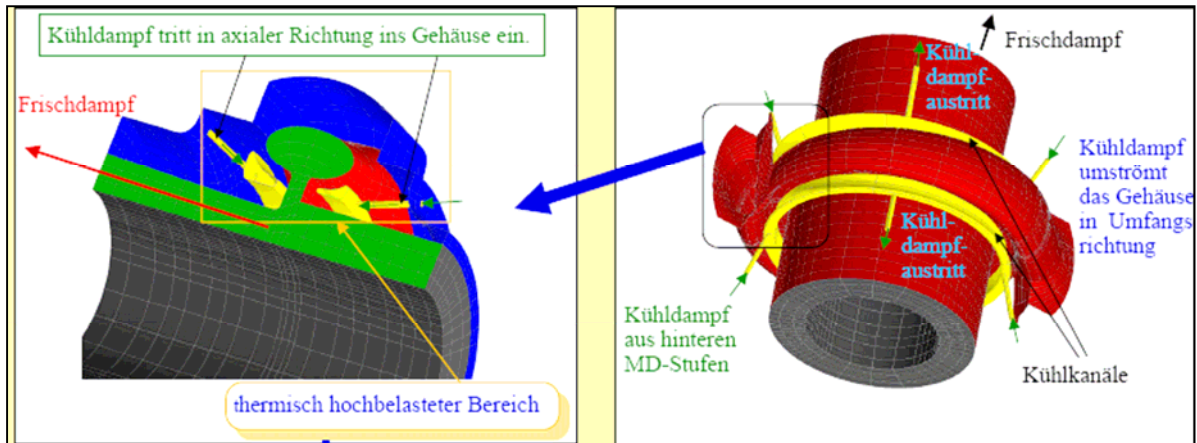


Abbildung 9: Kühlkonzept

In Gesprächen mit dem Universitätspartner wurde die Auslegung für ein gekühltes und ein ungekühltes Gehäuse diskutiert.

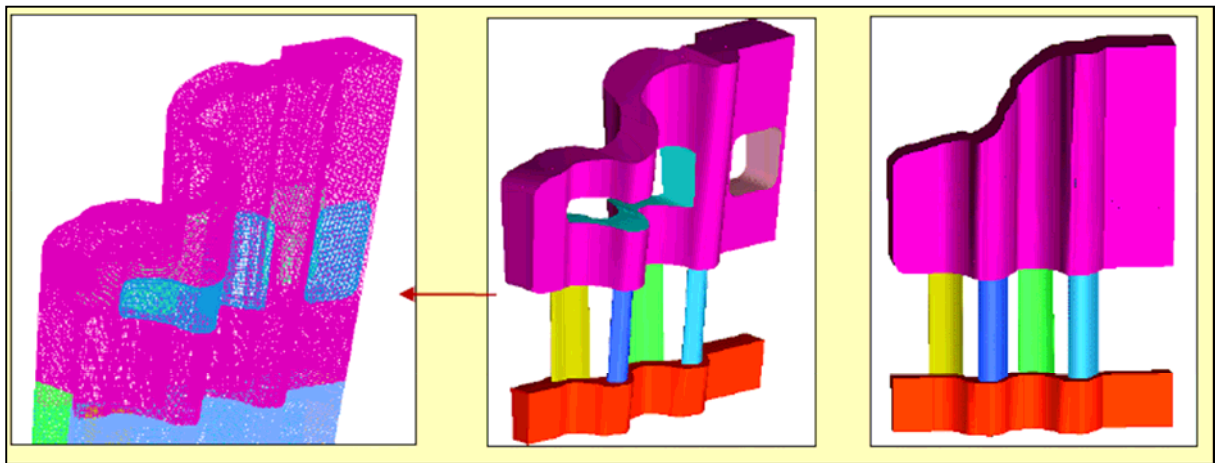


Abbildung 10: Kühlkonzept – Detail des Netzes

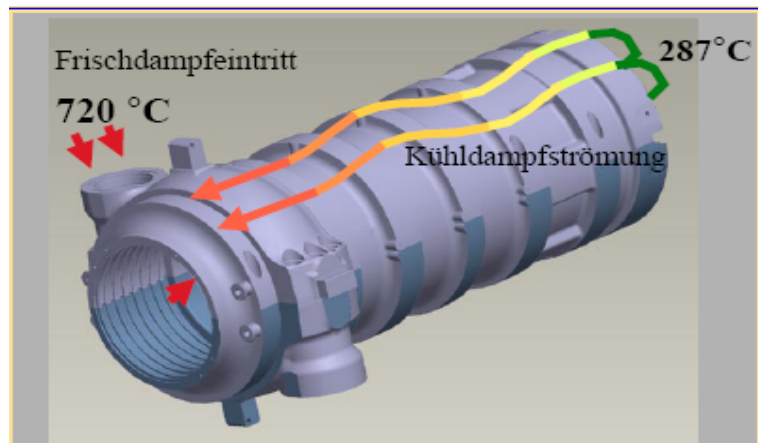


Abbildung 11: Detail der Kühlmassenströme

Einer der wichtigsten Gründe für die Durchführung des Vorhabens war es, dem Universitätspartner die Ausarbeitung eines Vorschlags für ein gekühltes Gehäuse zu ermöglichen. Die Idee war, Konzepte zu entwickeln und zu untersuchen, die der gegenwärtigen ALSTOM Auslegungsphilosophie widersprechen. Somit können neuartige Konzeptentwürfe ohne Einschränkung durch ALSTOM untersucht werden. Die vorgeschlagene Auslegung wurde jedoch von ALSTOM im Hinblick auf Kosten und Herstellbarkeit bewertet.

Das von Aachen vorgeschlagene Konzept beinhaltet zwei Kühlkanäle am Fuß der Einlaufspirale. In der endgültigen Auslegung wird jede Gehäusehälfte und jede Spiralseite mit Kühldampf aus der MD-Turbine versorgt. Der Vorschlag ist durchführbar, die Herstellung des resultierenden Gehäuses aufgrund der sehr komplexen Form jedoch schwierig. Trotzdem bietet dieser Vorschlag Vorteile und ist für diese Untersuchung geeignet.

Die Auswirkungen dieser Auslegung auf den Schaufelkanal ist in Abbildung 10 dargestellt, in der eine Blocknetzstruktur zu erkennen ist.

4.3 AP3: Analyse „Ungekühlter Fall“

Analyse der Resultate

Erst nach dem offiziellen Laufzeit-Ende des Projektes (am 30.06.2007) konnten von der Universität Aachen gelieferte Ergebnisse aus der ersten Berechnung (siehe Abbildung 12) angewendet werden. Diese Ergebnisse flossen in dieses Arbeitspaket ein.

Erste (nicht konvergierte) Ergebnisse wurden ausgetauscht und erörtert, sie sind in Abbildung 12 dargestellt. Diese betreffen den unbeschaufelten Bereich, d.h. den Bereich des Turbinengehäuses. In einem nächsten Schritt, der in den firmeninternen Untersuchungen erfolgt, wird die Beschauflung hinzugefügt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass starke thermische Gradienten zu erwarten sind, von denen bekannt ist, dass sie für die Lebensdauer der Komponenten problematisch sein können.

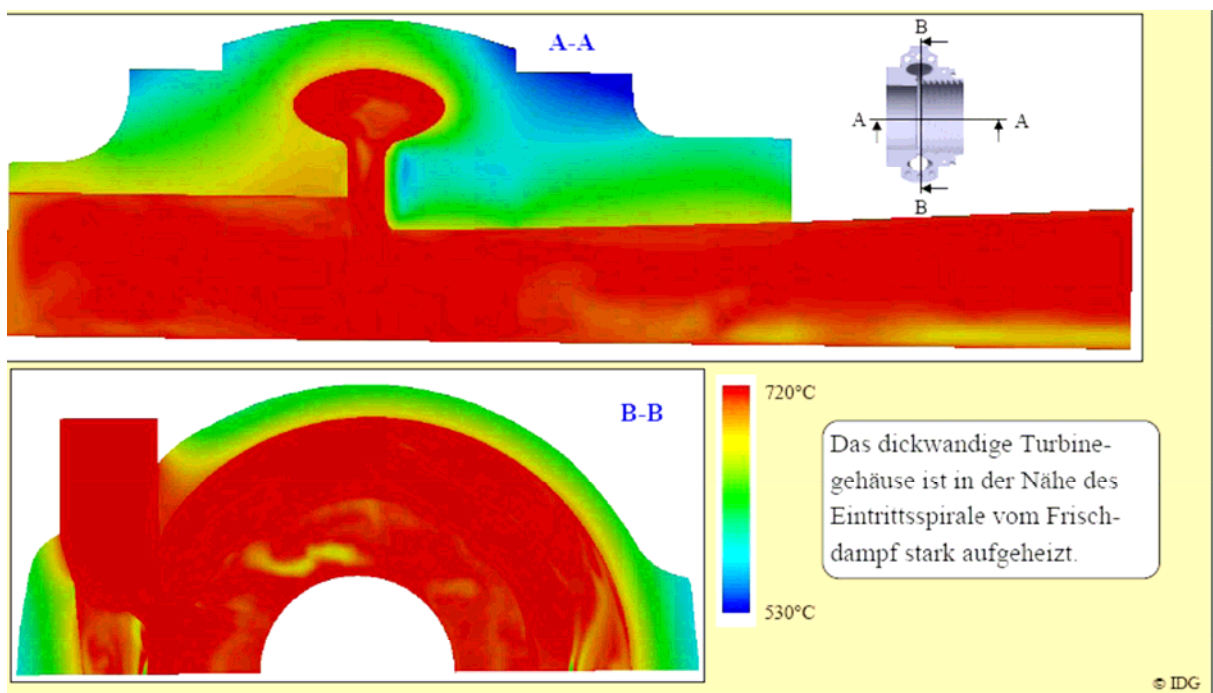


Abbildung 12: Vorläufige Temperaturverteilung

Zum Zeitpunkt des Abfassens dieses ALSTOM Abschlussberichtes sind diese Ergebnisse noch als vorläufig zu betrachten. In einem nächsten Schritt wird man die Ergebnisse des beschauften Bereichs analysieren, wo die Auswirkungen des Temperaturabfalls über die Schaufelreihe auf die Gehäusetemperaturverteilung deutlicher sind.

Der Bericht möchte betonen, dass es das Vorhaben mit starken zeitlichen Verzögerungen durchgeführt wurde. Die Ergebnisse sind gegenüber dem geplanten Umfang zum Teil immer noch unvollständig. Allerdings wurden bisher schon quantitativ wertvolle Daten für die Konstruktion gekühlter Gehäuse geliefert.

4.4 AP4: Entwicklung gekühlte Beschauflung

Analyse möglicher Kühlkonzepte

Zum Zeitpunkt des Abfassens dieses ALSTOM Abschlussberichts lagen auch mit einjähriger Verzögerung noch nicht die notwendigen konsolidierten Ergebnisse aus dem korrespondierenden Universitätsprojekt (AP2) vor, aus denen die Ergebnisse für optimierte Kühlkonzepte abgeleitet werden können. Die entsprechenden Auslegungen und Entwicklungen gekühlter Schaufeln, wie in diesem Arbeitspaket beschrieben, konnten deshalb noch nicht durchgeführt werden. Sie müssen dann innerhalb der Alstom - Designkonzepte überprüft werden.

4.5 AP5: Abschluss

Berichterstattung

Innerhalb dieses Arbeitspaketes wurde die Abschlussbericht mit vereinbarter einjähriger Verzögerung fertiggestellt sowie restliche Projekt-Administrationsschritte erledigt.

Soweit es die notwendigen Resultate aus dem korrespondierenden Projekt erlaubten, wurden einzelne Arbeitspakete zu Ende gebracht. Die Fortführung und den Abschluss der verbleibenden Pakete wird Alstom in Eigenregie verfolgen, daraus resultierende Ergebnisse werden im Verwertungsplan berücksichtigt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Vorhaben hat eine Reihe vielversprechender Ergebnisse hervorgebracht. Durch die enge Verschränkung der beiden parallel laufenden Projekte muss der Abschlussbericht dieses Teilvorhabens als unvollständig betrachtet werden. Erst nach Erstellung der vollständigen und verwendbaren Ergebnisse des Universitätsvorhabens können alle erwarteten Vorteile des hier vorliegenden Projektes ausgeschöpft werden. ALSTOM wird deshalb alle Anstrengungen unternehmen, die Ergebnisse gemäss der Projektspezifikation zu analysieren und darauf aufzubauen. Dies ist gemäss der revidierten Planung des Universitätspartners in 2009 zu erwarten.

6 Literaturverzeichnis

/1/ Bohn, D. Kusterer, K Wolff, A. Wolff, M.

Experimental and Numerical Investigation of a Steam Cooled Vane;
GT2002-30210, ASME Turbo Expo 2002, Amsterdam, The Netherlands

/2/ Bohn, D. Sürken, N. Kreitmeier, F

Nucleation Phenomena in a Multi-Stage Low Pressure Steam Turbine;
ImechE - Journal of Power and Energy, Part A, Vol. 217, No. 4, August 2003, pp.
453-460

/3 / Luby, P., Supercritical systems, Modern Power Systems, Vol.23, No.8, 2003

/4 / Neft, H., Franconville, G.

Neue Dampfturbinenkonzepte für höhere Eintrittsparameter und längere Endschaufeln. VGB
Kraftwerkstechnik, Bd. 73, Heft 5, Seiten 409-415 1993

/5 / Retzlaff, K.M., Ruegger, W.A

Steam Turbines for Ultra-super-critical Power Plants, GE Power Generation,
.GER-3945A, 1996

/6 / Obara, I., Tanaka, Y Magoshi, R., Yokota, H., Shige, T., Takita, K.

Design of 600°C Class 1000 MW Steam Turbine, JSME International , Journal,
Series B, Vol. 41, No. 3, 1998

/7/ Safonov, L.P. Sargorodskij, V.S Kovalenko, A.N., Chomenok, L.A.,

Rozenberg, S.S., Silin, V.L., Ogurcov, A.P., Gudkov, N.N., Mitin, V.N.
Implementation of systems with forced steam cooling for components of . 200
MW to 800 MW turbines. Tjazeloe Masinostroenie, No.1, pp.27-34,1996

/8/ Baldwin, B. S. Lomax, H.

Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows;
AIAA-78-257, 16th Aerospace Sciences Meeting, Huntsville, 1978

/9/ Goldberg, U. C.

Derivation and Testing of a One-Equation Model Based on Two Time Scales;
AIAA-Paper, August 1991

/10/ Nagano, Y. Tagawa, M

An Improved k , ϵ -Model for Boundary Layer Flows;
ASME Paper, Vol. 112, March 1990, pp 33-39

/11/ Launder, B.E. Sharma, B.I.

The Calculation of Turbulent Boundary Layers on Spinning and Curved
Surfaces Journal of Fluids Engineering, March 1977

/12/ Wilcox, D.C.

Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence
Models; AIAA-Journal, Vol. 25, No. 11, 1988

/13/ Craft, T.J. Launder, B.E Suga, K

Development and Application of Cubic Eddy-viscosity Model of . Turbulence. Int.
Journal Heat Transfer a. Fluid Flow, Feb. 1996

/14/ Bohn, D., Deuker, E., Emunds, R Gorzelitz, V

Experimental and Theoretical Investigations of Heat Transfer in Closed Gas-
Filled Rotating Annuli. ASME-Paper No. 93-GT-292

/15/ Bohn, D., Emunds, R., Gorzelitz, V., Krüger, U.

Experimental and Theoretical Investigations of Heat Transfer in Closed Gas-
Filled Rotating Annuli II. ASME-Paper No. 94-GT-175

/16/ Bohn, D., Krüger, U., Nitsche, K.

Numerical Investigations of Flow Pattern and Heat Transfer in a Rotating Cavity
between two Discs of the Compressor of a Siemens KWU V84.3 Gas Turbine.
ASME-Paper No. 95-GT-144

/17/ Bohn, D., Johann, E Krüger, U

Experimental and Numerical Investigations of Aerodynamic, Aspects of Hot Gas Ingestion in Rotor-Stator-Systems with Superimposed Cooling Mass Flow. ASME-Paper No. 95-GT-143

/18/ Bohn D. Krüger, U Schönenborn, H

Combined Aerodynamic and Thermal Analysis of a High. pressure Turbine Nozzle Guide Vane IGTC 1995, Yokohama, Japan, October 1995

/19/ Bohn, D. Becker, V Kusterer, K Otsuki, Y. Sugimoto, T. Tanaka, R.

Conjugate Flow and Heat Transfer Analysis of the Cooling Efficiency of a Convection-Cooled Turbine Blade with . Serpentine-Shaped Channels ISTP-10, Kyoto, Japan, November 1997

/20/ Bohn, D. Kusterer, K

Blowing Ratio Influence on Jet Mixing Flow Phenomena at the Leading Edge AIAA Paper 99-0670, Reno, USA, January 1999

/21/ Bohn, D. Becker, V

A Conjugate 3D-Flow and Heat Transfer Analysis of a Thermal . Barrier Cooled Turbine Guide Vane 98-GT-89, ASME Turbo Expo'98, Stockholm, June 1998

/22/ Bohn, D., Heuer, T

Conjugate Flow and Heat Transfer Calculation of a High , Pressure Turbine Nozzle Guide Vane. AIAA-Paper 2001-3304, Salt Lake City, USA, July 2001

/23/ Bohn, D., Funcke, H., Sürken, N., Kreitmeier, F

Numerical and Experimental Investigations on Endwall Contouring in a Four-Stage Turbine. ASME-Paper No. 2001-GT-481.

/24/ Bohn, D., Kusterer, K Lamping, M

Experimental and Numerical Analysis of Secondary Flow., Interactions in a Four-Stage Test Turbine; ICET'99, pp. 1 -11, Beijing, China, August 1999

/25/ Bohn, D. Becker, V. Rungen, A

Experimental and Numerical Conjugate Flow and Heat Transfer Investigation of the Influence of Density Ratio and Blowing. Ratio on the Film-Cooling Efficiency of a First Stage Turbine Guide Vane; ASME-Paper No. 99-GT-199

/26/ Bohn, D. Funcke, H Gier, J

Numerical and Experimental Investigations on the Flow in a 4- Stage Turbine with Special Focus on the Development of a Radial Temperature Streak. ASME-Paper No. 99-GT-27

/27/ Bohn, D., Funcke, H., Heuer, T. Bütikofer, J.

Experimental and Numerical Investigation on the Influence of Different Swirl-Ratios on the Temperature Streak Equalization in a 4-Stage Turbine. ASME-Paper No. 2000-GT-250

/28/ Bohn, D. Emunds, R

Ein Beitrag zur Berechnung der 2-dimensionalen reibungsbehafteten Strömung im 1. Leitrad einer axialen Kaltluftturbine unter besonderer Berücksichtigung der Zuströmturbulenz; ERCOFTAC, Aachen, 1992

/29/ Bohn, D. Emunds, R

A Navier-Stokes Computer Code for Theoretical Investigations on the Applicability of Various Turbulence Models for Flow Prediction along Turbine Blades; ASME-paper, 95-GT-90, Houston,,1995

/30/ Bohn, D. Emunds, R Gier, J.

Numerical Investigations on the 3-D Viscid Flow of an Axial Turbine . Nozzle; Proceedings of SMC, Phoenix, 1995

/31/ Bohn, D. Gier, J Holzenthal, K Kusterer, K.

Comparison of Characteristic flow Properties in a Turbine Nozzle for. Turbulence Models of different Complexity; Proceedings of the 2nd NMICM, Prag, 1997

/32/ Bohn, D. Gier, J. Emunds, R. Jennions, I.K.

The Computation of Adjacent Blade-Row Effects in a 1.5 Stage Axial Flow Turbine; ASME Paper,97-GT-81, 1997

/33/ Bohn, D. Becker, V, Behnke, K Bonhoff, B.

Experimental and Numerical Investigations of the Aero-dynamical Effect of Coolant Injection through the Trailing Edge of a Guide Vane; . ASME Paper, 95-GT-026, Houston,1995

/34/ Bohn, D. Becker, V Behnke, K Schönenborn, H

A Combined, Experimental und 2-D Computational Study on Trailing . Edge

Ejection with Different Cooling Gases; Proceedings of the 6th ISROMAC conference, Honolulu, 1996

/35/ Bohn, D. Becker, V

Experimental and Numerical Investigations of the Flow Field at the Leading Edge of a Film-Cooled Turbine Guide Vane; ISFMFE, Beijing, 9.-12.09. 1996

/36/ Bohn, D. Becker, V. Rungen , A

Analysis of the Location of the Stagnation Line on a Turbine Guide Vane with Shower-Head Cooling: Experimental and Theoretical. Investigations; ASME-conference, Kairo, 29.-31.12. 1996

/37/ Bohn, D. Becker, V Rungen , A

Experimental and Numerical Conjugate Flow and Heat Transfer Investigation of a Shower-Head Cooled Turbine Guide Vane;. ASME Paper 97-GT-15, 1997

/38/ Bohn D. Bonhoff, B

Berechnung der Kühl- und Störwirkung eines filmgekühlten transsonischen durchströmten Turbinengitters mit diabaten Wänden;VDI-Berichte Nr. 1109, 1994

/39/ Bohn, D. Bonhoff, B. Wilhelmi, H

Prediction of the Film-cooling Effectiveness in Gas Turbine . Blades Using a Numerical Model for the Coupled Simulation. of Fluid Flow and Diabatic Walls ISABE 95-7105, Melbourne, Australia, September 1995

/40/ Bohn, D. Bonhoff, B. Schönenborn, H. Wilhelmi, H

Validation of a Numerical Model for the Coupled Simulation of Fluid Flow and Diabatic Walls with Application to Film-cooled Turbine Blades; VDI-Berichte 1186, Turbomachinery - Fluid Dynamics and. Thermodyn. Aspects, 1st European Conf., Erlangen, 01.-03.03. 1995

/41/ Bohn, D. Bonhoff, B. Schönenborn, H.

Combined Aerodynamik und Thermal Analysis of a High-pressure Turbine Nozzle Guide Vane; IGTC 1995, Yokohama, 1995

/42/ Bohn, D. Bonhoff, B. Lang, G. Schönenborn, H.

Determination of Thermal Stress und Strain Based on a Combined Aerodynamic and Thermal Analysis for a Turbine Nozzle Guide Vane; ASME-COGEN Turbo Power, 95-CTP-089, 1995

/42/ Bohn, D.; Schönenborn, H.

3-D Coupled Aerodynamic und Thermal Numerical Analysis of a . Turbine Nozzle Guide Vane; ICTAM, Kyoto, 25.-31.08. 1996

/44/ Bohn, D.; Kusterer, K; Schönenborn, H.

3-D Numerical Simulation of the Flow through a Turbine Blade . Cascade with Cooling Injection at the Leading Edge; . ASME 96-GT-150, Birmingham, 1996

/45/ Bohn, D. Becker, V Kusterer, K

3-D Conjugate Flow and Heat Transfer Investigations of a Film-cooled Turbine Guide Vane at Different Operation Conditions; ASME Paper 97-GT-23, 1997

/46/ Bohn, D. Balkowski I, Tümmers, Ch Sell, M.

Influence of Open and Closed Shroud Cavities on the Flow Field of a 2-Stage Turbine with Shrouded Blading.

ASME GT2003-38369, ASME Turbo Expo 2003, Atlanta, USA, June 16-19, 2003