

DAS ATRD-PROJEKT – EIN BEISPIEL FÜR DIE ZUSAMMENARBEIT VON INDUSTRIE UND UNIVERSITÄT ZUR FÖRDERUNG DER GRUNDLAGENFORSCHUNG

N. Schinko¹, M. Kürner¹, S. Staudacher¹, M.G. Rose¹,
J. Gier², I. Raab², F. Lippl²

¹Institut für Luftfahrtantriebe (ILA), Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart, Deutschland

²MTU Aero Engines GmbH (MTU), Dachauer Straße 665, 80995 München, Deutschland

Zusammenfassung

Das Institut für Luftfahrtantriebe (ILA) der Universität Stuttgart und dessen Industriepartner MTU Aero Engines GmbH (MTU) stellen, im Rahmen des Kompetenzzentrums für Turbinen von Luftfahrtantrieben, mit dem „Advanced Turbine Research and Demonstration Rig“ (ATRD-Rig) einen Versuchsträger zur Vermessung von zweistufigen, speziell bei niedrigen Reynoldszahlen betriebenen Niederdruckturbinen für Hochschulforschungszwecke bereit.

Damit nach dem Erstlauf ein von der Industrie unabhängiger und in punkto Grundlagenforschung zukunftsweisender Umgang mit dem Versuchsträger am ILA möglich wird, waren eine Vielzahl von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig. Um zum Beispiel die Strömung präzise vermessen zu können, bietet das ATRD-Rig vor und hinter jeder Schaufelreihe mehrere Zugänge zur Flächentraaversierung mit Sonden. Für eine zukünftig effektive Nutzung dieser Möglichkeit erforderte dies den Aufbau eines halbautomatisierten Kalibrierkanals zur präzisen Kalibrierung der zum Einsatz kommenden Sonden, sowie die Entwicklung eines hochgenauen Verfahrens zur Beurteilung der Sondenmessdaten am Versuchsleitstand.

Um weiter für die über die zentrale Messwerterfassungsanlage (ZME) des Stuttgarter Höhenprüfstands gewonnenen Daten bereits während des Versuchs eine Auswertung und eine aussagekräftige Darstellung der Ergebnisse zu realisieren, wurde ein leistungsfähiges Datenerfassungssystem programmiert, auf dessen Aufbau und Berechnungsschemen ebenfalls eingegangen wird.

In Zukunft wird das ILA eigenständig, in Anlehnung an einen Zehnjahresplan, mit dem ATRD-Rig Forschungsprojekte an Niederdruckturbinen durchführen, bei denen unter anderem die automatisierte Optimierung von Strömungs- und Leistungsrechnungen zum festen Bestandteil des Testprogramms gehört.

LISTE DER SYMBOLE

C	[·]	Kalibrierfaktor
cp	[J/(kgK)]	spezifische Wärmekapazität
e	[Pa]	Partialdruck
f()	[·]	Funktion
h	[J/kg]	spezifische Enthalpie
Ma	[·]	Machzahl
p	[N/mm ²]	Druck
R	[J/(kgK)]	spezifische Gaskonstante
T	[K]	Temperatur
X	[·]	spezifische Luftfeuchte

ϕ	[J/(kgK)]	auf den absoluten Nullpunkt bezogene relative Entropie, Entropiefunktion
φ	[·]	relative Luftfeuchtigkeit

INDIZES

0	Umgebung
gas	Strömungsmedium Luft
H ₂ O	100% gasförmiges Wasser
k	während der Kalibrierung
M	gemessener Wert
m	Mittelwert
N	Messwert am Versuchsträger
φ	feste Sondengeometrie
s	am Messort der Luftfeuchtigkeit
t	gemessene Größe
trL	thermodynamisch statischer Zustand
	thermodynamisch totaler Zustand
	trockene Luft

GRIECHISCHE SYMBOLE

α	[°]	Strömungswinkel Umfangsrichtung, Sondengierwinkel
β	[°]	Strömungswinkel Radialrichtung, Sondennickwinkel
η	[kg/(ms)]	dynamische Viskosität
κ	[·]	Isentropenexponent

ABKÜRZUNGEN

ATRD	Advanced Turbine Research and Demonstration
DVP	Drehschiebervakuumpumpe
HDT	Hochdruckturbine
ILA	Institut für Luftfahrtantriebe
KOS	Koordinatensystem
ME	Messebene
MTU	MTU Aero Engines GmbH
NDT	Niederdruckturbine
NDT-Modul	Niederdruckturbinenmodul
NLR	Nachleitrad
NI-HF-DAQ	Hochfrequenzmessanlage
PULS	MTU-Datenerfassungssystem
Rig	Versuchsträger
Scan	Datensatz gemittelter Messwerte
SVG	Sondenverstellgerät
VLR	Vorleitrad
ZME	Zentrale Messwerterfassungsanlage

1. EINLEITUNG

Im Rahmen des im November 2006 zwischen der MTU und der Universität Stuttgart gegründeten Kompetenzzentrums für Turbinen von Luftfahrtantrieben, wurde durch die MTU und das ILA ein gemeinsames Forschungsprojekt zur Untersuchung von modernen Niederdruckturbinen gestartet. Innerhalb von zwei Jahren erfolgte dabei in Kooperation der Aufbau eines Versuchsträgers mit dem Namen „Advanced Turbine Research and Demonstration Rig“, der zur Vermessung von zweistufigen Niederdruckversuchsturbinen auf dem institutseigenen Höhenprüfstand des ILA dient.

Der erste Lauf des Rigs fand Ende 2008, unter der Leitung der MTU, mit der Vermessung einer aerodynamisch hoch belasteten Turbine statt. Bei dieser Messkampagne erfolgte auch der erfolgreiche Funktionstest des in der Programmiersprache LabView® entwickelten Datenerfassungssystems, durch welches das ILA seitdem die Möglichkeit hat, eigenständig Versuchsturbinen zu vermessen und die gewonnenen Daten synchron zur Erfassung auszuwerten. Im Jahr 2009 wird auf dem ATRD-Rig die Vermessung einer für niedrige Reynoldszahlen ausgelegten Beschauflung durch das ILA erfolgen. Die Instrumentierung der Versuchsturbinen bei beiden Kampagnen ist kompatibel, weshalb ein Funktionstest des ILA-Datenerfassungssystems und eine Vergleichsmessung zum MTU-Datenerfassungssystem PULS bereits während der ersten Messkampagne möglich waren.

Gegenwärtig arbeitet das ILA an einem System zur Feldmessung mit Sonden über die am ATRD-Rig vorhandenen Zugänge. Dazu wurde neben der Ansteuerung der Sondenverstellmechanismen ein neuartiges Auswerteverfahren für die Sondenmessdaten entwickelt und ein Kalibrierkanal aufgebaut, der zur Sondenkalibrierung bei niedrigen Reynoldszahlen und zum Test des Traversierungssystems dient.

Die vorliegende Abhandlung beschreibt den Aufbau des ATRD-Rigs nach [1], die Instrumentierung des Rigs nach [2] und [3] bei den ersten beiden Messkampagnen und dessen Integration am Stuttgarter Höhenprüfstand. Weiter wird auf die im Rahmen des Projekts geleisteten

Entwicklungsarbeiten in punkto Datenerfassung und Auswertung von Sondenmessungen sowie den Aufbau des Kalibrierkanals eingegangen.

2. BESCHREIBUNG DES NIEDERDRUCKTURBINENPRÜFSTANDS

Mit dem zweistufigen ATRD-Rig wurde in Zusammenarbeit mit der MTU eine kostengünstige und einfach modifizierbare Versuchseinrichtung, die am ILA mit geringem Energiebedarf betrieben werden kann, bereitgestellt. Die Auslegung und Umsetzung orientierte sich an folgenden grundlegenden Richtlinien:

- Kostengünstige Bereitstellung der Hardware für alle geplanten Bauten, auch bei leichten Modifikationen (z.B. Änderung des Zuströmdralls und der Schaufelzahlen, Variation des Ringraums oder Einsatz einer Telemetrieeinheit)
- Integration mehrerer Traversiermöglichkeiten stromauf und stromab jeder Schaufelreihe, als auch am Turbinenein- und Turbinenaustritt
- Auslegung als Forschungs-Rig mit ausreichend großen Abständen der Schaufelreihen, zur Einbringung von Sonden mit großem Schaftdurchmesser
- Unterbringung von Vorkehrungen zur Integration einer Kühlluftsimulation und zum Einsatz eines Dellenenerzeugers, um zukünftig eine große Variation an Messmöglichkeiten zu gewährleisten

Der fertig montierte Versuchsträger hat eine Länge von 2,0 Metern, der größte Durchmesser, ohne montierte Sondenverstellgeräte, beträgt 1,4 Meter und die gesamte Konstruktion wiegt, inklusive Versuchsturbine, circa 5,0 Tonnen. Hierbei ist die Beschauflung aus Aluminium gefertigt.

Das ATRD-Rig kann innerhalb der in TAB 1 angegebenen Bereiche betrieben werden. Diese Grenzen sind durch die Wellenlagerung, die Wellenfestigkeit, die Auswahl der Wasserbremse und die Gehäusedichtigkeit definiert. Zusätzliche Einschränkungen können sich bei einer Variation des Schaufelwerkstoffes oder bei Festigkeitslimitierungen einzelner Komponenten aufgrund von Fertigungsabweichungen ergeben und müssen beim Betrieb entsprechend berücksichtigt werden.

	Einheit	Max.	Min.
Massenstrom	kg/s	15	0,0
Totaltemperatur Eintritt	K	400	280
Totaltemperatur Austritt	K	350	263
Totaldruck Eintritt	Bar	2,0	0,1
Totaldruck Austritt	Bar	1,0	0,05
Expansionsverhältnis	-	2,4	1,0
Drehzahl	1/min	4000	0,0
Mechanische Leistung	kW	1200	0,0
Drehmoment	Nm	3000	0,0
Achsschub	kN	55,0	0,0
Drehmoment Leitgitter	Nm	1000	0,0

TAB 1: Zulässiger Betriebsbereich des ATRD-Rigs

In BILD 1 ist eine Aufrisszeichnung des kompletten Rigs zu sehen, die die Positionen und Bezeichnungen der mit Messsonden und -stellen instrumentierten Messebenen (ME) im Einlauf- und Abströmbereich beinhaltet. Die Messebenen stehen senkrecht auf der Rig-Längsachse (z-Achse). Weiter ist auf der Abbildung zu erkennen, dass der Versuchsträger in drei Module untergliedert ist: Dem Rig-Einlauf, dem Niederdruckturbinen-Modul (NDT-Modul) und dem Rig-Austritt.

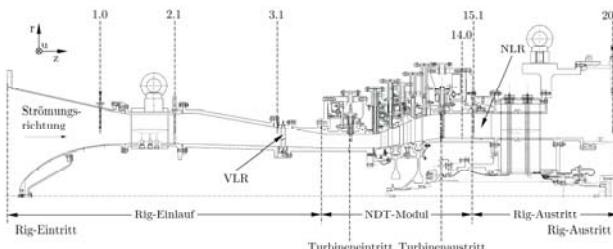


BILD 1: Aufrisszeichnung des Versuchsträgers

Die Instrumentierung der Ein- und Austrittsstrecke entspricht nach [4] dem gängigen Prinzip zur Vermessung des Ein- und Austrittszustands der Strömung bei Niederdruckturbinenversuchen.

Zusätzlich zu der in den folgenden Kapiteln beschriebenen Instrumentierung des Versuchsträgers, kommen noch weitere Druck- und Temperaturmessstellen im Bereich des NDT-Moduls am Außen- und Innengehäuse sowie Schwingungsaufnehmer an den Außenringen von Fest- und Loslager der Welle. Diese Messstellen dienen der Betriebsüberwachung und der Berechnung des in Richtung der z-Achse wirkenden Achsschubs.

2.1. Rig-Einlauf

Die Erzeugung einer für die am Prüfstand reproduzierbare Vermessung einer Turbine repräsentativen und homogenen Zuströmung geschieht über den Rig-Einlauf. Diese Baugruppe besteht aus dem vorderen Rippengehäuse, das Nabeng- und Gehäusekontur über acht sternförmig angeordnete Profilstreben miteinander verbindet, dem Zuströmkanal und dem darin integrierten Vorleitrad (VLR).

Der Totaldruck des vom Höhenprüfstand gelieferten Luftmassenstroms wird direkt hinter dem Rig-Einlauf in ME 1.0 über vier Totaldrucksonden bestimmt. Gleich nach der vorderen Rig-Aufhängung erfolgt in ME 2.1 die Messung der Totaltemperatur der Zuströmung über acht gleichmäßig über den Umfang verteilten Kammsonden, mit je drei, in gleichen Abständen zueinander in radialer Richtung angeordneten Thermoelementen. Dadurch, dass diese beiden Messebenen in großem Abstand stromauf zur Turbine stehen, kann gewährleistet werden, dass die Qualität der Strömung am Turbineneintritt nicht durch den sich ausbildenden Nachlauf der Sonden beeinträchtigt wird. Nach der Kontraktion des Ringraums zwischen ME 2.1 und ME 3.1 folgt das aus Stahl gefertigte VLR, welches den Drall der Zuströmung in die Niederdruckturbine (NDT) simuliert, wie er im Triebwerk bei der Abströmung aus der Hochdruckturbine (HDT) entsteht. Die Schaufelzahl des VLR beträgt 120. Die Stellung dieser Schaufeln kann um $\pm 15^\circ$ gegenüber ihrer Nominalposition um die Schaufellängsachsen zur

Simulation unterschiedlicher HDT-Lastpunkte gedreht werden.

Um bei Auswertungsrechnungen den Totaldruckverlust, den im Rig-Einlauf speziell das VLR erzeugt, berücksichtigen zu können, wird der statische Druck in ME 3.1 an Nabe und Gehäuse über jeweils acht gleichmäßig in Umfangsrichtung angeordnete Messstellen gemessen. Zur Bestimmung des Totaldrucks am Turbineneintritt wird der in ME 1.0 gemessene Totaldruck mit einem durch eine Kalibrierung des Einlaufs generierten Verlustbeiwert, in Abhängigkeit des statischen Drucks in ME 3.1, korrigiert.

2.2. NDT-Modul

Das NDT-Modul ist die zentrale Einheit des ATRD-Rigs. In ihm wird die Strömung durch die Turbine zwischen den Schaufelreihen und am Turbinenein- und austritt mit Sonden, Kämmen und statischen Druckmessstellen vermessen. In BILD 2 ist, zur besseren Übersicht und Kennzeichnung der Positionen aller Messebenen, die Aufrisszeichnung des NDT-Moduls vergrößert dargestellt.

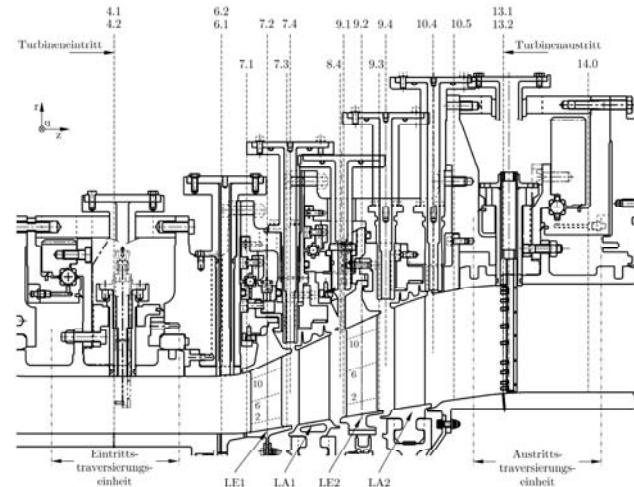


BILD 2: Aufrisszeichnung des NDT-Moduls

Die Scheiben des Rotors sind aus rostfreiem Vergütungsstahl gefertigt und besitzen am äußeren Radius eine Umfangsnut zur Befestigung von Schaufeln mit Hammerkopffüßen. Durch die Ausführung des Versuchsträgers mit diesem Typ der Schaufel-Scheibe-Verbindung, kann bei jeder Neuauslegung und -fertigung der Beschaufelung eine Variation der Schaufelzahl um $\pm 20\%$ vom gegenwärtigen Bauzustand realisiert werden [5].

Insgesamt sind am NDT-Modul 26 Zugänge für Traversionsonden mit Schaftdurchmessern von acht bis zehn Millimeter realisiert. TAB 2 beinhaltet die Positionen der Sondenzugänge und der in ME 13.2 verbauten Kammsonden bei Nullposition der Umfangsverstellungen in allen Ebenen. Die jeweilige Millimeterangabe in Klammern unter den Gradangaben definiert den am Zugang maximal verwendbaren Sondendurchmesser. Sonden mit kleineren Schaftdurchmessern können an allen Zugängen durch den Einsatz von passenden Reduzierhülsen verwendet werden. Alle Gradangaben in der Tabelle beziehen sich auf das in BILD 2 dargestellte

linksdrehende Koordinatensystem (KOS). Damit ist, bei einer Blickrichtung entgegen der Strömungsrichtung und damit entgegen der z-Achse, eine Drehung im Uhrzeigersinn positiv. Jede der sechs verbauten Kammsonden besitzt zehn zueinander identisch in radialer Richtung über die Kanalhöhe angeordnete Einzelmessstellen. Um eine korrekte, wie in [6] beschriebene Anströmung dieser Messstellen für alle Lastpunkte auch bei extremen Variationen des Turbinenaustrittsdralls zu gewährleisten, können die Kämme um ihre Längsachse im Intervall von -25° bis $+40^\circ$ gedreht und damit nachgestellt werden.

	ME 4.2	ME 6.2	ME 7.4	ME 8.4	ME 9.4	ME 10.4	ME 13.2
Zugang Sonde	30,00° (10 mm)	50,00° (10 mm)	36,00° (10 mm)	13,22° (8 mm)	112,90° (10 mm)	100,90° (10 mm)	18,62° (10 mm)
Zugang Sonde	120,75° (10 mm)	140,00° (10 mm)	126,00° (10 mm)	69,08° (8 mm)	185,00° (10 mm)	194,00° (10 mm)	138,62° (10 mm)
Zugang Sonde	211,50° (10 mm)	230,00° (10 mm)	216,00° (10 mm)	162,18° (8 mm)	206,00° (10 mm)	287,10° (10 mm)	240,00° (10 mm)
Zugang Sonde	302,25° (10 mm)		306,00° (10 mm)	249,08° (10 mm)	317,72° (10 mm)	336,76° (10 mm)	
Totaldruckkamm							0,00°
Totaldruckkamm							120,00°
Totaldruckkamm							258,62°
Totaltemperaturkamm							55,86°
Totaltemperaturkamm							175,86°
Totaltemperaturkamm							295,86°

TAB 2: Positionen der Zugänge für Traversionsonden und der Austrittskämme

Die Ein- und Austrittstraversierungseinheit wird bei einer Flächentraversierung komplett mit eingebauten Traversier- und Kammsonden in Umfangsrichtung verfahren. Dagegen wird bei den mittleren Zugängen, von ME 6.2 bis ME 10.4, der Effekt einer Flächentraversierung durch die in ihrer Position relativ zum Rig-KOS festen Zugänge und die in Umfangsrichtung beweglichen Leitschaufelkränze erzielt. Die Verstellung einer Einheit oder eines Leitkranzes erfolgt jeweils durch einen elektrischen Stellantrieb. Eine Sondenbewegung in radialer Richtung und um die Sondenlängsachse wird über an den Zugängen montierbare Sondenverstellgeräte (SVG) realisiert, in welche die Traversionsonden eingespannt sind. In jedem Zugang können so Flächentraversierungen über mindestens $1\frac{1}{2}$ Schaufelteileungen durchgeführt werden. Sind in ME 13.2 keine Sonden eingebaut und die drei Zugangsstützen dieser Ebene demonstriert, kann mit den eingebauten Kammsonden eine Umfangstraversierung über 180° erfolgen. Dasselbe gilt für ME 4.2, sofern entsprechend der Strömung angepasste Kämme in der Eintrittstraversierungseinheit verbaut sind.

Zur statischen Druckmessung im Strömungskanal der Versuchsturbine dienen Wandbohrungen mit scharfkantiger Eintrittskante, deren Längsachsen senkrecht zur Konturinnenfläche des Strömungskanals an den jeweiligen Bohrstellen liegen. Wüst [7] zeigt, dass scharfkantige Bohrungen bei der statischen Druckmessung über die Innenkontur des Gehäuses an bewegtem Fluid die geringsten Messungenauigkeiten zur Folge haben. In TAB 3 sind alle statischen Druckmessstellen im Nabeng- und Gehäusebereich des NDT-Moduls aufgeführt. Der Buchstabe G steht für Gehäusemessstellen, N für Nabennmessstellen, PG für Messstellen auf den Leitschaufelplattformen im Gehäusebereich, PN für Messstellen auf den

Leitschaufelplattformen im Nabengbereich, KG für Kammerdrücke in den Kavitäten auf der Gehäuseseite und KN für Kammerdrücke in den Kavitäten der Nabenseite. Die in der Tabelle pro Messebene angegebene Anzahl an statischen Druckmessstellen ist jeweils in gleichmäßigen Abständen zueinander über den Umfang verteilt. Alleine die statischen Druckmessstellen auf den Leitschaufelplattformen in ME 7.3, 9.1 und 9.3 sind in ungleichmäßigen Abständen in Umfangsrichtung angeordnet. Hier sind immer sieben statische Druckmessstellen gleichmäßig über den Teilkreisbogen der Ausdehnung einer Schaufelteilung angeordnet und die drei übrigen Messstellen sind dazu versetzt gleichmäßig über den Umfang verteilt. Bei den Versuchen soll mit dieser Instrumentierung in ME 7.3, 9.1 und 9.3 messtechnisch untersucht werden, ob eine Ermittlung des statischen Drucks in der jeweiligen Messebene über Messstellen in Kavitäten eine große Abweichung zu einer Messung des statischen Drucks auf den Plattformen der Leitschaufeln zur Folge hat.

	G	N	PG	PN	KG	KN
ME 4.1	8	8	-	-	-	-
ME 6.1	4	4	-	-	-	-
ME 7.1	-	-	3	3	-	-
ME 7.3	-	-	10	10	3	3
ME 9.1	-	-	10	10	3	3
ME 9.3	-	-	10	10	3	3
ME 10.5	3	3	-	-	-	-
ME 13.1	6	6	-	-	-	-
ME 14.0	3	3	-	-	-	-

TAB 3: Statische Druckmessstellen im Nabeng- und Gehäusebereich des NDT-Moduls

Die Instrumentierung einiger Leitschaufeln der ersten und zweiten Leitschaufelreihe mit statischen Druckmessstellen auf der Druck- und Saugseite entlang von Stromlinien dient der Darstellung des sich bei der Umströmung der Schaufeln einstellenden Geschwindigkeitsprofils auf verschiedenen Kanalhöhen. Drei Leitschaufeln jedes Leitschaufelkranzes sind auf Höhe von jeweils einer der drei in BILD 2 dargestellten Stromlinien (2, 6, 10) mit sieben statischen Druckmessstellen auf der Profiloberfläche der Druckseite, von der Schaufelvorderkante zur Schaufelhinterkante entlang der jeweiligen Stromlinie instrumentiert. Je Leitschaufelkranz sind drei weitere, direkt an diese Leitschaufeln angrenzende Schaufeln, auf jeweils gleicher Höhe mit zehn statischen Druckbohrungen auf der Profilsaugseite, ebenfalls entlang der betreffenden Stromlinie, versehen. Zusammen mit den Messwerten der Kielkopfinstrumentierung an den Profilvorderkanten, die zur Bestimmung des thermodynamisch totalen Zustands (T_t, p_t) in ME 7.1 und ME 9.1 auf jeweils der Höhe der untersuchten Stromlinien dient, erfolgt die Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung. In spezifischen Betriebspunkten der Turbine entstehende transitionelle Ablöseblasen werden durch diese Art der Instrumentierung und einer entsprechenden Darstellung (vgl. [8]) in einem Diagramm bereits während des Versuchs erkennbar.

2.3. Rig-Austritt

Das zu einer Demontage am Prüfstand konzipierte Nachleitrad (NLR) mit geteiltem Gehäuse [9], ist direkt vor den sechs profilierten Rippen des Austrittsterns positioniert, damit sich keine Rückwirkungen auf die Austrittsinstrumentierung des NDT-Moduls durch Aufstauung ergeben. Es dient dazu, die durch den Austrittsdrall der Turbine entstehende Fehlanströmung des Austrittsterns zu verhindern. Eine Falschanströmung dieser Rippen kann pulsierende Ablöseerscheinungen zur Folge haben, die instationäre Druckschwankungen am Turbinenaustritt verursachen und dadurch eine Vermessung der Turbine in einem stationären Betriebspunkt unmöglich machen.

Drei der 58 Schaufeln des NLR sind in ME 15.1 auf halber Kanalhöhe mit Kielköpfen zur Kontrolle des Totaldrucks am Eintritt in das NLR instrumentiert. In ME 20.0 wird die Austrittstemperatur der Fluids, im Bereich der Luftsammlermündung des Höhenprüfstands, auf drei Kanalhöhen über jeweils eine Messstelle ermittelt.

Die Rotorwelle ist über zwei Kugellager (Fest- und Loslager) mit dem Austrittstern verbunden. Dadurch erfolgt die Kraftübertragung auf das Außengehäuse des Versuchsträgers und damit auf die Einspannung des ATRD-Rigs auf der Messstrecke zwei des Höhenprüfstands. Die Versorgung der Wellenlagerung mit Öl und die Ölforschung aus der Lagerkammer werden über in die Profilstreben des Austrittsterns integrierte Leitungen bewerkstelligt.

2.4. Integration am Höhenprüfstand

Auf BILD 3 ist eine vereinfachte schematische Darstellung der beim Betrieb des ATRD-Rigs auf dem Stuttgarter Höhenprüfstand zum Einsatz kommenden Komponenten zu sehen. Zur Erzeugung der beim ATRD-Rig gewünschten niedrigen Absolutdrücke in der Messstrecke, die für die im Saugbetrieb geschalteten Verdichter des Höhenprüfstands bei der Erzeugung der Druckdifferenz über die Turbine wiederum einen niedrigen Energiebedarf bedeuten, wird der Prüfstand teilweise geschlossen betrieben. Über eine Vielzahl von Drosseln, Kühlern und einem Luftherzter wird der geforderte Ein- und Austrittszustand des Fluids am Versuchsträger stationär eingestellt und durch Regelung stabilisiert. Die Leistungsdaten des Höhenprüfstands, die den Betriebsbereich des ATRD-Rigs vollständig abdecken, können [10] entnommen werden.

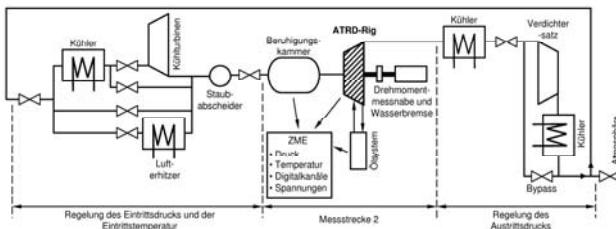


BILD 3: Vereinfachte schematische Darstellung der Integration des ATRD-Rigs am Höhenprüfstand

Die Beruhigungskammer vor dem Versuchsträger hat ein um ein vielfaches größeres Volumen als das nachfolgende

Rohrsystem zum Prüfling, weswegen die fortwährend über Rohre in die Kammer des Höhenprüfstands geförderte Luft, wie in einem unter Druck stehenden Kessel, als ruhend angesehen werden kann. Die Abströmung in den Prüfling geschieht über eine kalibrierte Mengenmessdüse aus Aluminium, in deren engstem Querschnitt der dort auftretende statische Druck gemessen wird. Mit einer Messung des Kesselzustands in der Beruhigungskammer und den spezifischen Düsenkennwerten kann so nach [11], unter der Annahme der Luft als ideales Gas, der durch die Messstrecke strömende Luftmassenstrom bestimmt werden.

Die vom Versuchsträger generierte Wellenleistung wird von einer mit der Rotorwelle verbundenen, für den Drehmoment- und Drehzahlbereich des ATRD-Rigs ausgelegten Serienwasserbremse, in Wärme dissipiert. Eine Messung des Wellendrehmoments und der Wellendrehzahl erfolgt zusätzlich zu den bestehenden Messeinrichtungen im Rig und der Wasserbremse über eine zwischengeschaltete hochpräzise Drehmomentmessnabe.

Die Versorgung der Lagerung des ATRD-Rigs mit Öl wird über ein speziell für Turbinenversuche am Höhenprüfstand ausgelegtes Ölsystem realisiert. Über dieses werden drei temperierbare und separat regelbare Öl volumenströme zur Versorgung des Loslagers, des Festlagers und der Gleitringdichtungen des Versuchsträgers bereitgestellt. Am Ölsystem des Höhenprüfstands gemessene Drücke, Temperaturen und Volumenströme stehen als Messwerte über die zentrale Messwert erfassungsanale (ZME) zur Verfügung.

Die Wandlung aller am Versuchsträger, innerhalb der Messstrecke 2 und an allen weiteren zusätzlichen Instrumentierungen am Höhenprüfstand gemessenen Drücke, Temperaturen und Spannungen werden über die ZME digitalisiert und zusammen mit den Werten der übrigen digitalen Messkanäle zur Verfügung gestellt. Als Schnittstelle zwischen ZME und der im folgenden Kapitel beschriebenen Datenerfassung dient auf Prüfstandsseite der sogenannte „Verse-PC“. Er stellt alle Daten mit der durch die ZME vorgegebenen Aktualisierungsrate per Ethernet zur Verfügung.

3. BESCHREIBUNG DER DATENERFASSUNG UND ANGEWENDETER RECHENMODELLE

Zur Erfassung und Auswertung der über die ZME gemessenen Größen, wurde ein entsprechendes Computerprogramm (ATRD-System) in der Programmiersprache LabView® erstellt. Das Programm bewerkstelligt während des Turbinentestlaufs auf drei unter Windows XP® betriebenen Computern die Aufgaben der Datenerfassung, der Prüflingsüberwachung, der Online-Auswertung, der Ansteuerung der SVG und der Umfangsverstellungen und der Datenspeicherung. In das bestehende System können problemlos weitere Computer mit weiteren Unterprogrammen über vorhandene Schnittstellen integriert werden (vgl. [12]). Darüber hinaus besteht eine Schnittstelle zu PULS, über die ein Datensatz mit über ein vorgegebenes Zeitintervall gemittelten Messgrößen (Scan) übergeben werden kann. In BILD 4 ist die Verknüpfung der einzelnen Systembausteine, zum besseren Verständnis der folgenden Abschnitte, schematisch dargestellt. Eine Synchronisation der Computer des

ATRD-Systems und deren Unterprogramme wird über die Änderung eines globalen Zeitstempels realisiert, der vom „Verse-PC“ nach jeder Messwertaktualisierung der ZME neu generiert wird. Berechnungs-, Speicherungs- und Aktualisierungsprozesse von Anzeigen werden auf den ATRD-Computern nur dann abgearbeitet, wenn ein neuer Zeitstempel im System vorliegt. Dies führt zu einer enormen Einsparung von Systemressourcen und gewährleistet die Ausbaufähigkeit des Systems auf den bestehenden Computern.

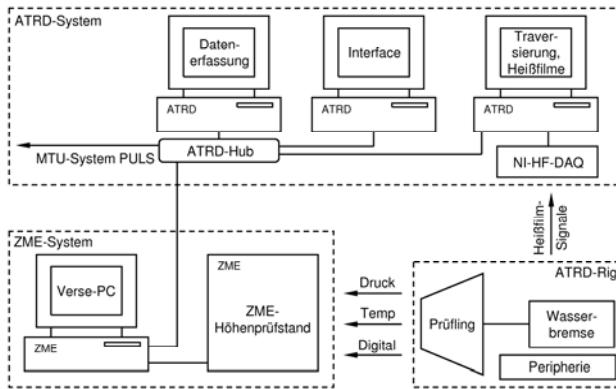


BILD 4: Schematische Darstellung der Verknüpfung der bei der Datenerfassung beteiligten Systeme [13]

Um bereits während des Versuchs aus den Messungen eine Vielzahl von Strömung- und Leistungskenngrößen mit qualitativ hochwertigem Ergebnis automatisiert berechnen zu können, sind im ATRD-System verschiedene Rechenmodelle hinterlegt, die in diesem Kapitel neben der Erläuterung der Funktionsweise des Systems beschrieben werden.

3.1. Beschreibung der ATRD-Datenerfassung

Die Aufbereitung der Messwerte und alle Berechnungen, die im ATRD-System auf den Daten der ZME basieren, erfolgen, mit Ausnahme der Auswertung und Ansteuerung der Traversierung, auf dem „Interface-Computer“. Folgende Aufgaben werden hier bewerkstelligt:

- Korrektur einzelner Messwerte mit Kalibrierkurven
- Korrektur einzelner Messwerte mit Recovery-Tabellen
- Berechnung von arithmetischen Mittelwerten
- Berechnung von flächengemittelten Werten
- Berechnung von massengemittelten Werten
- Berechnung der reduzierten Solldrehzahl aus einer prozentualen Drehzahlvorgabe
- Überwachung des Dralls am Turbineneintritt und Turbinenaustritt bezüglich einer Fehlanströmung der Kammmesssonden
- Berechnung aller Strömungskenngrößen und Leistungsparameter der Turbine
- Kontinuierliche Speicherung aller Mess- und Rechenwerte in textbasierten Log-Dateien
- Bereitstellung aller Mess-, Mittel- und Rechenwerte für die anderen Computer des ATRD-Systems

Auf dem „Datenerfassungs-Computer“ erfolgt die Visualisierung der aufbereiteten Messwerte mittels numerischer Anzeigen und in Diagrammen. Folgende Anzeigen sind realisiert:

- Rig-Überwachung mit Grenzwertalarm und automatisierter Kennfelddarstellung
- Diagramme zur Darstellung der Geschwindigkeitsprofile der ersten und zweiten Leitschaufelreihe
- Darstellung der Totaltemperatur- und Totaldruckprofile der Kammsonden und Kielköpfe, aufgetragen über dem Umfang
- Gegenüberstellung der Messwerte der statischen Kammerdrücke und der statischen Plattformdrücke
- Verlaufsdiagramm für acht frei definierbare Kanäle

Weiter existieren auf dem „Datenerfassungs-Computer“ zwei Unterprogramme, durch welche die Auslösung der bereits beschriebenen Scans möglich ist. Nach jedem abgeschlossenen Scan wird automatisch der Mittelwert der „gescannten“ Einzelmessungen und die Standardabweichung jedes Messwerts bezüglich dessen Mittelwert berechnet und an das Dateiende der erzeugten Textdatei angehängt. Die Protokollierung der Mittelwerte erfolgt darüber hinaus zeilenweise in eine textbasierte Log-Datei zur Erleichterung der Auswertungen nach dem Versuch.

Der „Traversierungs-Computer“ erhält Daten von zwei verschiedenen Quellen. Wie bei der Datenerfassung werden ZME-Messwerte vom „Interface-Computer“ bezogen und weiter verarbeitet. Darüber hinaus kann der „Traversierungs-Computer“ von der Hochfrequenzmessanlage (NI-HF-DAQ), die zur Messung von instationären Effekten via Heißfilmen am ATRD-Rig eingesetzt wird, Daten zur Online-Auswertung, Speicherung und Visualisierung beziehen. Weitere Unterprogramme auf dem „Traversierungs-Computer“ dienen der manuellen und automatisierten Steuerung der SVG und der Umfangsverstellung. Dadurch werden automatisierte Flächentraversierungen und mit Hilfe von hinterlegten Sondenkalibrierdateien, eine automatisierte Datenauswertung (siehe Kapitel 4.2), Visualisierung und Speicherung der Ergebnisse während des Versuchs ermöglicht.

3.2. Verwendetes Fluidmodell

Der Begriff Fluid beschreibt ein homogenes Kontinuum aus Atomen und/oder Molekülen mit sehr kleinen Kohäsionskräften zwischen den einzelnen Fluidteilchen, so dass eine relative Verschiebung der Fluidteilchen zueinander sehr leicht bewirkt werden kann. Daher wird die Bezeichnung Fluid als ein übergeordneter Begriff für Flüssigkeiten und Gase in der Strömungsmechanik verwendet. Dabei unterscheidet man zwischen kompressiblen und inkompressiblen Fluiden. Als inkompressibel gelten vereinfacht alle Flüssigkeiten und als kompressibel alle Gase und Dämpfe. Für die mathematische Beschreibung der physikalischen Eigenschaften eines Fluids müssen eine Vielzahl der beobachtbaren physikalischen Phänomene vernachlässigt oder vereinfacht dargestellt werden. Dies führt, je nach dem Grad der Vereinfachung bei der mathematisch-physikalischen Beschreibung des Stoffverhaltens, zur Bildung mehr oder weniger komplexer theoretischer Systeme, die Modelle genannt werden.

Für die Berechnung thermodynamischer Größen, der Strömungskenngrößen und der Leistungsparameter der Turbine aus den am Prüfstand gemessenen Werten, wird das den Prüfling durchströmende Fluid als kompressibles, einphasiges, ideales Gas-Dampf-Gemisch angenommen. Folgende temperaturabhängige Zustandsgrößen für die Komponenten trockene Luft (Index $_{\text{trL}}$) und gasförmiges Wasser (Index $_{\text{H}_2\text{O}}$), sind für Berechnungen in einem Temperaturbereich von 200K bis 1000K in Schritten von einem Kelvin in Tabellenform im Hauptspeicher des ATRD-Systems als Fluidmodell hinterlegt:

- c_p spezifische Wärmekapazität
- h spezifische Enthalpie
- ϕ auf den absoluten Nullpunkt bezogene relative Entropie
- η dynamische Viskosität

Alle tabellierten Werte für trockene Luft und gasförmiges Wasser, sowie die genormte Gaszusammensetzung von Luft, sind dem frei verfügbaren FORTRAN-Code CEA2 der NASA entnommen [14]. Dieser ermöglicht die Berechnung von Zustandsgrößen beliebiger Fluide in Abhängigkeit der Temperatur und in beliebigen Mischungsverhältnissen [15]. Zwischenwerte werden aus den Tabellenwerten linear interpoliert.

3.3. Berücksichtigung der Luftfeuchte

Bei einer hochgenauen Vermessung der Strömung kann eine Missachtung der Luftfeuchtigkeit zu einer erheblichen Minderung der Qualität der Ergebnisse führen. Deshalb wird die Luftfeuchtigkeit im Bereich der Ansaugung während den Versuchen fortlaufend gemessen und entsprechend bei der Berechnung der Stoffwerte berücksichtigt.

Das Gemisch „feuchte Luft“ (Index $_{\text{gas}}$) besteht aus trockener Luft und dem in ihr enthaltenen Wasser, das für die Randbedingungen der ATRD-Versuche ausschließlich gasförmig in Form von Wasserdampf auftritt. Trockene Luft kann als einheitlicher Stoff angesehen werden, der sich als ideales Gas verhält. Der Wasserdampf hat im technisch interessanten Temperatur- und Druckbereich nur sehr kleine Partialdrücke und verhält sich daher ebenfalls wie ein ideales Gas.

Nach dem Daltonschen Gesetz folgen ideale Gase in einem Gasgemisch ihrer jeweiligen Zustandsgleichung in der Art, als ob die anderen Komponenten nicht vorhanden sind. Ein direkter gegenseitiger Einfluss wird ausgeschlossen. Ideale Gase können daher in beliebigen Verhältnissen gemischt werden, vorausgesetzt sie befinden sich genügend weit von ihrer jeweiligen Verflüssigungstemperatur entfernt. Der Wasserdampf hat in der feuchten Luft einen derart niedrigen Partialdruck, dass das Daltonsche Gesetz bis zu dessen Verflüssigung gilt. Während der Versuche ist dies zu keinem Zeitpunkt der Fall, da die relative Luftfeuchtigkeit immer unter 100% liegt. Eine Anwendung des Daltonschen Gesetzes ist für ein derartiges Gemisch von idealen Gasen nach [16] zulässig.

Der Partialdruck kann am Messort der Luftfeuchte nach [17] bis zu einer Temperatur von 100°C nach folgender empirischer Formel bestimmt werden:

$$(1) \quad e_{\text{H}_2\text{O}} = \varphi \cdot \begin{pmatrix} -6094,4642 \cdot T_{s,\varphi}^{-1} + 21,1249952 \\ -2,724552 \cdot 10^{-2} \cdot T_{s,\varphi} + 1,6853396 \cdot T_{s,\varphi}^2 \\ + 2,4575506 \cdot \ln(T_{s,\varphi}) \end{pmatrix}$$

Die spezifische Luftfeuchtigkeit errechnet sich nach [18] aus:

$$(2) \quad X_{\text{gas}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{gas}}} = \frac{R_{\text{trL}} \cdot e_{\text{H}_2\text{O}}}{R_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (p_{s,\varphi} - e_{\text{H}_2\text{O}}) + R_{\text{trL}} \cdot e_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Über die spezifische Luftfeuchte kann der Einfluss des Wasserdampfes auf die physikalischen Stoffkennwerte der feuchten Luft mit dem Prinzip der Massengewichtung bestimmt werden [19]. In (3) ist dies exemplarisch am Beispiel der spezifischen Gaskonstante gezeigt. Das Vorgehen gilt analog für alle im Fluidmodell hinterlegten Zustandsgrößen.

$$(3) \quad \begin{aligned} R_{\text{gas}} &= \frac{m_{\text{trL}}}{m_{\text{gas}}} \cdot R_{\text{trL}} + \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{gas}}} \cdot R_{\text{H}_2\text{O}} \\ &\Rightarrow R_{\text{gas}} = X_{\text{gas}} \cdot (R_{\text{H}_2\text{O}} - R_{\text{trL}}) + R_{\text{trL}} \end{aligned}$$

Im ATRD-System wird der Einfluss des Feuchtegehalts der Luft durch die permanente Messung der relativen Luftfeuchtigkeit und deren Einbindung, in der in diesem Kapitel beschriebenen Weise, bei der Anwendung des Fluidmodells berücksichtigt.

3.4. Anwendung der Entropiefunktion

Gleichung (4) gilt, nach gängigen Lehrmethoden, für die mathematische Beschreibung einer isentropen Zustandsänderung eines idealen Gases von einem beliebigen, sich im thermodynamischen Gleichgewicht befindlichen Zustand 1, zu einem beliebigen, sich ebenfalls im thermodynamischen Gleichgewicht befindlichen Zustand 2.

$$(4) \quad T_{2,\text{is}} = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Die Herleitung der Gleichung beruht auf einem konstanten Isentropenexponenten, der für Luft als betrachtetes Medium oftmals zu 1,4 angenommen wird. Durch die iterative Lösung der Gleichung über eine Bestimmung des Isentropenexponenten aus der Mitteltemperatur $(T_{2,\text{is}} + T_1)/2$ wird die Qualität des Ergebnisses verbessert. Dies entspricht aber immer noch einer Annäherung, beruhend auf der Annahme einer alleinigen Abhängigkeit des Isentropenexponenten von einer konstanten Mitteltemperatur.

Um die Qualität der Auswertungen nochmals entscheidend zu verbessern, werden fehlende Größen bei isentropen Zustandsänderungen über die in [20, 21] hergeleitete Entropiefunktion (5) bestimmt.

$$(5) \quad \phi(T) = \frac{1}{R} \int_0^T \frac{c_p(T)}{T} \cdot dT$$

Die integralen Werte dieser Entropiefunktion relativ zu einer Bezugstemperatur (hier der absolute Nullpunkt) sind im Fluidmodell des ATRD-Systems in Schritten von einem Kelvin hinterlegt (siehe Kapitel 3.2). Der Wert der Entropiefunktion kann so für beliebige Temperaturen abgelesen, beziehungsweise bei Zwischenwerten linear interpoliert werden. Ebenso kann die Rückrechnung eines auf den Nullpunkt bezogenen Entropiewertes auf die zugehörige Temperatur erfolgen. Für eine isentrope Zustandsänderung gilt somit, unter Anwendung des Fluidmodells, folgender mathematischer Zusammenhang:

$$(6) \quad \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \phi(T_2) - \phi(T_1)$$

Gleichung (6) ermöglicht es im ATRD-System, zusammen mit dem hinterlegten Fluidmodell, alle Berechnungen, die die Isentropenbeziehung oder diese in abgewandelter Form beinhalten, ohne iterative Rechenschritte oder der Annahme eines konstanten Isentropenexponenten durchzuführen.

3.5. Demonstration der Leistungsfähigkeit der Datenerfassung

500 Messwerte werden vom ATRD-System, mit der durch den Zeitstempel der ZME vorgegebenen Aktualisierungsrate von derzeit 4Hz erfasst, korrigiert und konvertiert. Aus diesen Größen werden synchron 100 Mittelwerte bestimmt. Parallel dazu erfolgt in derselben Geschwindigkeit die Berechnung von weiteren 100 Strömungs- und Leistungskenngrößen und deren Speicherung zusammen mit den Messwerten und Mittelwerten. Eine Beschreibung aller durchgeföhrten Berechnungen würde den Rahmen der Abhandlung sprengen. Aus diesem Grund wird exemplarisch die Bestimmung des Wirkungsgrads erörtert.

Insgesamt kann der Gesamtwirkungsgrad der Turbine, mit der in Kapitel 2 beschriebenen Instrumentierung des Versuchsträgers auf drei verschiedene Arten bestimmt werden:

- Methode 1: Berechnung über die gemittelten Totaltemperaturen und Totaldrücke in ME 4.2 und ME 13.2
- Methode 2: Berechnung über das mit der Drehmomentmessnabe gemessene Drehmoment, die gemittelte Totaltemperatur in ME 4.2 und die gemittelten Totaldrücke in ME 4.2 und ME 13.2
- Methode 3: Ist äquivalent zu Methode 2, jedoch basiert die Bestimmung der benötigten Totaldrücke auf einer Berechnung aus den gemittelten statischen Drücken in ME 4.1 und ME 13.1, sowie der Strömungswinkel in Umfangsrichtung in diesen Messebenen und den zugehörigen Querschnittsflächen

Diese Methoden werden in [22] ausführlich diskutiert. Auf Basis von Genauigkeitsabschätzungen kommen die Autoren in dieser Ausführung zu dem Schluss, dass mit Methode 2 der Wirkungsgrad am exaktesten bestimmt werden kann. Methode 1 und 3 sind dagegen bezüglich

der zu erwartenden Genauigkeit der Ergebnisse vergleichbar, da im ersten Fall die Temperaturnessung und im zweiten Fall die Winkelbestimmung aus Sondenmessdaten mit großen Ungenauigkeiten behaftet sind. Durch die beschriebene Instrumentierung des ATRD-Rigs können während des Versuchs die Ergebnisse aller drei Methoden gleichzeitig angezeigt, gespeichert und somit im Auswertungsprozess nach dem Versuch gegenübergestellt und beurteilt werden.

Beim ersten, unter Leitung der MTU durchgeföhrten Lauf des Versuchsträgers, ergab sich die Möglichkeit das ATRD-System und alle implementierten Verfahren zu testen und die Ergebnisse mit denen des MTU-Systems zu vergleichen. Die Turbine wurde hierfür stationär in einem willkürlich gewählten Betriebspunkt betrieben. Die größten auftretenden Abweichungen der Ergebnisse im Vergleich zum MTU-System lagen bei drei Promille. Für zum Beispiel den in Methode 1 beschriebenen thermischen Wirkungsgrad ergab sich eine Abweichung von 0,01%. Diese Abweichung resultiert zum Einen aus den unterschiedlichen hinterlegten Fluidmodellen und kann durch eine Angleichung der Modelle reduziert werden. Zum Anderen sorgen unterschiedliche Abbruchbedingungen bei Iterationen oder unterschiedliche angewendete Interpolationsalgorithmen für eine Differenz der Ergebnisse. Die Ergebnisse der Testmessung bestätigen, trotz kleiner Abweichungen, die Güte der in diesem Kapitel beschriebenen und allen übrigen angewendeten Berechnungsverfahren. Dadurch besitzt das ILA die Fähigkeit, eigenständig Versuchsturbinen mit dem ATRD-Rig auf dem Höhenprüfstand zu vermessen und die gewonnenen Daten synchron zur Erfassung am Versuchsstand präzise auszuwerten.

4. KALIBRIERUNG VON FÜNFLOCHSONDEN UND AUSWERTUNG DER SONDENMESSDATEN AM PRÜFSTAND

Zur Nutzung der zahlreichen am Versuchsträger vorhandenen Zugänge für Traversierungen mit Sonden (siehe Kapitel 2.2) wurden vom ILA sechs baugleiche Fünfloch-Kegelkopfsonden mit 3mm Kopfdurchmesser, 10mm Schaftdurchmesser und einem Meter Schaftlänge beschafft. Durch diese Sonden erfolgt am ATRD-Rig, mit am Institut vorhandenen Sondenverstellgeräten und dem in Kapitel 3.1 beschriebenen „Traversierungs-Computer“, eine automatisierte Vermessung der Strömung in Betrag und Richtung in unterschiedlichen Messebenen.

Um während des Versuchs aus den über die ZME gemessenen fünf Drücken pro Sonde die am jeweiligen Sondenkopf auftretende Machzahl und Anströmrichtung bestimmen zu können, muss je Sonde ein entsprechendes Kalibrierfeld als Textdatei im ATRD-System hinterlegt sein. Zur Erzeugung solcher Kalibrierdateien wurde am ILA ein Unterschallkalibrierkanal aufgebaut, strömungstechnisch optimiert und ein System bereitgestellt, das eine halbautomatisierte Kalibrierung von Sonden ermöglicht.

Für die Auswertung der Sondenmessdaten über die Kalibrierdatei am Prüfstand wurde ein im Vergleich zu gängigen Methoden alternatives genaueres Auswerteverfahren entwickelt und am Kalibrierkanal auf dessen Zuverlässigkeit geprüft.

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die geleistete Entwicklungsarbeit am Kalibrierkanal und das im ATRD-System hinterlegte Auswerteverfahren für Messdaten von Fünflochsonden.

4.1. Beschreibung des Kalibrierkanals

In BILD 5 ist eine schematische Darstellung mit Angaben zu den Abmessungen des am ILA zur Sondenkalibrierung, aus rotationssymmetrischen Komponenten aufgebauten Kalibrierkanals zu sehen. Die Strömung im Kanal wird durch eine Drehschiebervakuumpumpe (DVP) im Saugbetrieb erzeugt. Die Machzahl der Strömung im Bereich des Sondenkopfes wird durch ein Stellglied vor der DVP eingestellt. Aufgrund der kritischen Durchströmung des Stellglieds an der Ansaugung (Schiebeblende), kann das Druckniveau im Kanal durch eine Änderung dieses kritischen Querschnitts variiert werden. Dies erlaubt neben der Regelung der Machzahl die Einstellung verschiedener Reynoldszahlen im Bereich des Sondenkopfs.

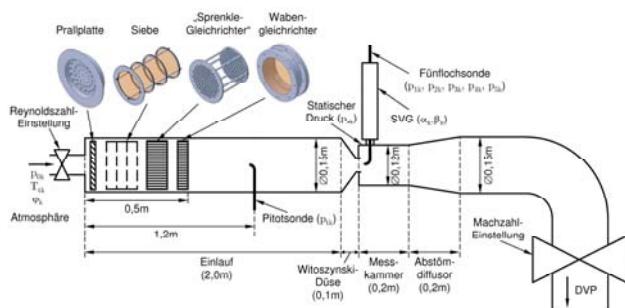


BILD 5: Schematische Darstellung des Kalibrierkanals am ILA zur Sondenkalibrierung

4.1.1. Kanaleinlauf

Die Ansaugung der Luft erfolgt am Kanaleintritt aus der Umgebung. Im Bereich der Ansaugung werden die Luftfeuchtigkeit, die Umgebungstemperatur und der Umgebungsdruck gemessen. Dadurch kann der Einfluss der Luftfeuchtigkeit bei Berechnungen während der Sondenkalibrierung, nach dem in Kapitel 3.3 beschriebenen Verfahren, unter Nutzung des Fluidmodells berücksichtigt werden. Die gemessene Umgebungstemperatur entspricht, durch deren Messung in ruhendem Fluid, der Totaltemperatur der im Kanal strömenden Luft und wird auf der gesamten Messstrecke als konstant angenommen. Diese Annahme ist für eine Durchströmung von gleich dem Strömungsmedium temperierten Rohrsystemen begrenzter Lauflänge ohne Energiezufuhr, nach [23] zulässig. Um den Drall und den Turbulenzgrad der nach der Schiebeblende in den Einlauf einströmenden Luft auf kurzer Strecke zu homogenisieren, wurde mit Hilfe dreidimensionaler, stationärer Strömungsrechnungen eine Optimierung dieses Teils des Kanals durchgeführt. Die zur Strömungsgleichrichtung, Drallminderung und Turbulenzgradsenkung verbauten und in BILD 5 dargestellten Komponenten (Prallplatte, Siebe, „Sprengle-Gleichrichter“ nach der Norm DIN-EN-ISO-5167-1 und Wabengleichrichter), sind in ihren Geometrien anhand der Berechnungen optimiert.

Weiter stromab wird der Totaldruck der Strömung über eine Pitotsonde gemessen. Eine Vermessung des Strö-

mungsprofils an dieser Stelle durch eine Traversierung mit der Sonde in radialer Richtung in Schritten von einem Millimeter, hat für mehrere Mach- und Reynoldszahlen gezeigt, dass die Rohrströmung in allen Fällen voll ausgebildet ist. Die erfolgreiche Optimierung des Einlaufs auf Basis der durchgeführten Strömungsrechnungen konnte damit bestätigt werden.

4.1.2. Düse und Messkammer

In 80cm Entfernung zur Pitotsonde wird die Strömung über eine konvergente Witoszyński-Düse [24, 25] beschleunigt. Der Austrittsquerschnitt der Düse beträgt 3,2cm. Dadurch entsteht in der Messkammer ein Freistrahrl in einem begrenzten Raum, innerhalb welchem der zu kalibrierende Fünflochsondenkopf mittig, in einem Abstand von 5cm zur Düsenaustrittsfläche platziert ist. In der Austrittsebene des Freistrahls erfolgt auch die Bestimmung des am Sondenkopf auftretenden statischen Drucks, der über drei statische Bohrungen in der Gehäusewand der Messkammer gemessen und arithmetisch gemittelt wird. Die Machzahl am Sondenkopf wird aus diesem gemittelten Druck, der am Eintritt gemessenen Totaltemperatur und dem Totaldruck der Pitotsonde im Einlauf mit der Annahme einer adiabaten Beschleunigung in der Düse unter der Verwendung des Fluidmodells und der Berücksichtigung der gemessenen Luftfeuchtigkeit berechnet. Die Bestimmung der Reynoldszahl erfolgt mit denselben Messwerten und unter gleichen Annahmen. Der Bezugsquerschnitt für die Reynoldszahl ist der Sondenkopfdurchmesser.

Die Düse und die Messkammer wurden durch Strömungsrechnungen eingehend untersucht. Es erfolgten sowohl stationäre als auch instationäre Berechnungen der Düsenströmung bei mehreren Machzahlen und einer konstanten Reynoldszahl von 10000, bei einem Kopfdurchmesser der Fünflochsonde von 3mm. Diese Einstellungen entsprechen den im Auslegungspunkt des ATRD-Rigs erwarteten Strömungsbedingungen bei einer Traversierung in ME 13.2.

In den Ergebnissen der stationären Strömungs simulationen ist zu erkennen, dass der durch die Pitotsonde entstehende Nachlauf keinen Einfluss auf das sich nach der Düse ausbildende Strömungsprofil hat. Das Profil ist an der Position der zu kalibrierenden Sonde für einen Machzahlbereich von 0,2 bis 0,8 über den gesamten Düsendurchmesser konstant. Durch eine Traversierung mit einer Pitotsonde in Schritten von einem Millimeter an der Kalibrierposition, konnten die Ergebnisse der Strömungssimulation bestätigt werden. Für die Messungen kam ein Differenzdruckaufnehmer mit einer Messgenauigkeit von 15Pa zum Einsatz. Als Referenzdruck wurde der an der Pitotsonde anliegende Druck verwendet. Der pro angefahrenen Punkt auftretende Druck wurde aus mehreren aufeinander folgenden Einzel messungen gemittelt, um Messschwankungen zu eliminieren und einen Vergleich mit den Ergebnissen der stationären Strömungsrechnung zu ermöglichen.

Mit demselben Messaufbau konnte der durch die Lauflänge zwischen Pitotsonde und Kalibrierstelle entstehende Totaldruckverlust vermessen und der Strömungssimulation gegenübergestellt werden. Die größte Abweichung zwischen den Simulations- und Mess ergebnissen bei einer Traversierung innerhalb des

Freistrahls für Machzahlen von 0,2 bis 0,8, eingestellt in Schritten von 0,1, beträgt 5Pa, bei einem maximal gemessenen Totaldruckabfall von 45Pa (gemessen bei Machzahl 0,8). Innerhalb der Messgenauigkeit des Druckaufnehmers bedeutet dies, dass die Strömungssimulation sehr genaue Ergebnisse im Bereich der Kalibrierstelle liefert.

Zur Verbesserung der Genauigkeit der Kalibrierung wurden anhand der bestätigten Strömungssimulation auf Exponentialfunktionen basierende Korrekturkurven für den über die Pitotsonde im Einlauf gemessenen Totaldruck und den über die Messkammer gemessenen statischen Druck generiert. Diese Korrekturfunktionen sind in der in LabView® erstellten Software, die am Kalibrierkanal zur halbautomatisierten Erstellung von Kalibrierdateien dient, integriert und werden bei der Mach- und Reynoldsahlberechnung berücksichtigt.

Um den Einfluss von bei Freistrahlen in begrenzten Räumen auftretenden instationären Effekten [26] auf die Sonde beurteilen zu können, war eine instationäre Strömungsrechnung notwendig. In den Ergebnissen dieser Strömungssimulationen ist, ab einem Abstand von 0,1m von der Düse, eine deutliche Oszillation des Freistrahls in den Frequenzbereichen 16Hz bis 41Hz und 0,6kHz bis 3,5kHz in Abhängigkeit der eingestellten Machzahl zu erkennen. Der oszillierende Bereich des Freistrahls liegt weit hinter dem Kalibrierbereich, weswegen in den Resultaten der Berechnungen kein Einfluss auf die zu kalibrierende Sonde festzustellen ist. Die Sonde wird im Kalibrierbereich in allen Betriebspunkten des Kanals mit einem voll ausgebildeten Strömungsprofil stationär beaufschlagt.

Bei allen in diesem Kapitel beschriebenen Strömungsrechnungen kam das Softwarepaket ANSYS-CFX® zum Einsatz. Die Generierung der für die Berechnungen verwendeten hybriden Rechennetze erfolgte mit der Software CENTAUR®. Bei allen stationären und instationären Berechnungen wurde den Konvergenzkriterien, die für eine repräsentative Strömungssimulation notwendig sind, Rechnung getragen. Die Diplomarbeit nach [27] beschreibt die Durchführung und Ergebnisse der Strömungsrechnungen, das Vorgehen bei der Generierung der hierfür notwendigen Randbedingungen und die durchgeführten Messungen im Detail.

4.1.3. Generierung von Kalibrierdateien

Die zu kalibrierende Sonde wird am Kalibrierkanal in ein SVG eingespannt. Damit kann die Sonde über einen Computer, der das SVG ansteuert, um ihre Längsachse gedreht werden (Gierwinkel α_k). Über die Einstellung der Mach- und Reynoldsahl am Kanal wird so eine definierte Anströmung des Sondenkopfes bei verschiedenen Gierwinkeln der Sonde realisiert. Eine Variation des Nickwinkels β_k wird durch Kippen des SVGs ermöglicht. In BILD 6 ist der Sondenkopf einer Kegelkopfsonde schematisch aus drei verschiedenen Blickrichtungen dargestellt. Daraus wird die Nummerierung der Druckbohrungen ersichtlich, die eine Zuordnung der gemessenen fünf Drücke zu den eingestellten Winkeln, Mach- und Reynoldsahlen ermöglicht.

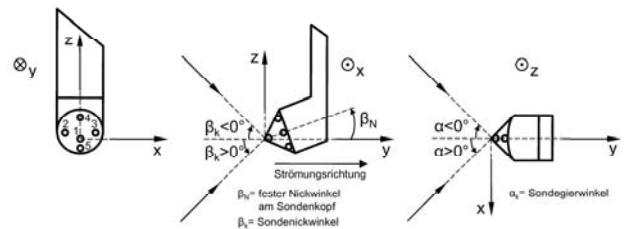


BILD 6: Schematische Darstellung des Sondenkopfs einer Fünflochsonde mit Winkelkonventionen

In TAB 4 sind die bei der Kalibrierung einer Sonde mit konstanter Reynoldsahl am Kanal eingestellten Zustände aufgelistet. Die über Differenzdruckaufnehmer gegen die Pitotsonde im Kanaleinlauf an den Druckmessbohrungen der Sonde gemessenen Drücke (p_{1k}, \dots, p_{5k}), werden zusammen mit den eingestellten Winkeln und Strömungskenngrößen sowie allen am Kanal gemessenen Größen zeilenweise in eine textbasierte Kalibrierdatei geschrieben.

	unterer Wert	oberer Wert	Schrittweite	Schrittanzahl
α_k	-25°	+25°	5°	11
β_k	-15°	+25°	5°	9
Ma_k	0,2	0,9	0,1	8

TAB 4: Eingestellte Kalibrierpunkte am Kalibrierkanal bei konstant gehaltener Reynoldsahl

Zusätzlich werden die für Kegelkopfsonden üblichen Kalibrierfaktoren [28] für jeden der 792 eingestellten Messpunkte nach Gleichung (7), (8), (9) und (10) aus den fünf gemessenen Sondendrücken berechnet und in der entsprechenden Zeile der Kalibrierdatei hinterlegt. Über die Kalibrierfaktoren C_{α_k} und C_{β_k} sind die Empfindlichkeiten gegenüber dem Gier- bzw. dem Nickwinkel sowie über C_{Mak} gegenüber der Machzahl berücksichtigt. Die Faktoren nehmen für jeden Kalibrierpunkt unterschiedliche Werte an, wodurch jeder Kombination die eindeutige Zuordnung eines Strömungszustands in Betrag und Richtung erfolgen kann.

$$(7) \quad P_{Mk} = \frac{P_{2k} + P_{3k}}{2}$$

$$(8) \quad C_{\alpha_k} = \frac{P_{2k} - P_{3k}}{P_{1k} - P_{Mk}}$$

$$(9) \quad C_{\beta_k} = \frac{P_{4k} - P_{5k}}{P_{1k} - P_{Mk}}$$

$$(10) \quad C_{Mak} = \frac{P_{1k} - P_{Mk}}{P_{Mk}}$$

Die in dieser Art am Kanal erzeugte Kalibrierdatei ist für jede Sonde im „Traversierungs-Computer“ des ATRD-Systems hinterlegt.

4.2. Beschreibung des im ATRD-System integrierten Verfahrens zur Auswertung von Fünflochsondenmessdaten

Bei einer Messung mit einer der beschriebenen Fünflochsonden im ATRD-Rig, bezieht der „Traversierungs-

Computer“ die Messwerte der an den fünf Bohrungen des Sondenkopfs anliegenden Drücke über die ZME. Zur Vermeidung einer Verfälschung des Messergebnisses durch instationäre Effekte wird jeder Druck über ein einstellbares Zeitintervall gemittelt. Mit den Gleichungen (7), (8), (9) und (10) werden darauf aus den gemittelten Drücken die Koeffizienten berechnet, welche die am Messpunkt auftretende stationäre Strömung charakterisieren. Durch diese Koeffizienten erfolgt über die in der Kalibrierdatei hinterlegten Kalibrierkoeffizienten eine Rückrechnung auf die Strömungskenngrößen im Messpunkt und deren Speicherung im System.

Gängige, in der Literatur einschlägig beschriebene Verfahren, nutzen zur Auswertung der Sondenmessdaten den Ansatz eines funktionalen Zusammenhangs zwischen den Koeffizienten und den Strömungskenngrößen, der aus den Kalibrierdaten erzeugt wird (vgl. [29]). Dabei werden nach der Sondenkalibrierung aus der Kalibrierdatei drei Polynomfunktionen über die Methode der kleinsten Quadrate generiert, die bei der Messung folgende Auswertung ermöglichen:

$$(11) \quad \alpha_m = f_1(C_{\alpha m}, C_{\beta m}, C_{M m})$$

$$(12) \quad \beta_m = f_2(C_{\alpha m}, C_{\beta m}, C_{M m})$$

$$(13) \quad M_{\alpha m} = f_3(C_{\alpha m}, C_{\beta m}, C_{M m})$$

Bei diesem Ansatz der Auswertung kommen überwiegend Polynome dritter Ordnung zum Einsatz (vgl. [30]). Es ist unschwer zu erkennen, dass eine solche Polynomfunktion bei einer Kalibrierdatei mit 792 Kalibrierpunkten, wie sie im beschriebenen Fall vorliegt, niemals alle diese Punkte ohne Abweichung zuordnen kann. Vielmehr handelt es sich um die bestmögliche Anpassung der Funktion an das Kalibrierfeld. Vor allem bei Strömungswinkeln relativ zum Sonden-KOS, die größer als 5° sind, kommt es beim „Polynomansatz“ zu großen Abweichungen der Ergebnisse vom tatsächlichen Strömungszustand. Eine Messung in diesen Bereichen wird deshalb in der Praxis oftmals durch ein Nachstellen der Sonde in Richtung kleinerer Anströmwinkel vermieden. Dieses Vorgehen ist extrem zeitintensiv und führt so im Versuch zu einer starken Zunahme der Kosten bei der Durchführung von Traversierungsmessungen am Prüfling.

Ein alternatives, im ATRD-System integriertes Vorgehen zur Rückrechnung auf die Strömungskenngrößen aus den bei einer Messung bestimmten Koeffizienten, ist die Anwendung einer Kombination aus Suchalgorithmus und linearer Interpolation innerhalb der Kalibrierdatei. Dabei wird die gesamte Kalibrierdatei in einem ersten Schritt Zeile für Zeile in der Spalte durchsucht, welche die $C_{\alpha k}$ -Koeffizienten enthält. Sobald die Suchfunktion zwei Zeilen findet, für die $C_{\alpha m}$ in der durchsuchten Spalte einen Zwischenwert darstellt, werden alle Größen der Zeilen spaltenweise zueinander bezüglich $C_{\alpha m}$ linear interpoliert. Bei jeder gefundenen Übereinstimmung ergibt sich daraus eine neue Zeile, bei der $C_{\alpha k}$ gleich $C_{\alpha m}$ ist. Im nächsten Schritt wird die Spalte der $C_{\beta k}$ -Werte dieser interpolierten Zeilen durchsucht und mit $C_{\beta m}$ verglichen. Die Zeilen der gefundenen „Nachbarwerte“ werden erneut nach $C_{\beta m}$ spaltenweise zueinander interpoliert. Dasselbe Vorgehen gilt für den Koeffizienten $C_{M m}$ bei einer Durchsuchung der aus dem vorherigen Schritt interpolierten Zeilen. Übrig bleibt eine Zeile, bei der alle drei Koeffizienten mit den aus der Messung berechneten Koeffizienten überein-

stimmen. Die ebenfalls bei jedem Schritt interpolierten Strömungskenngrößen der Ergebnissezeile sind die gesuchten Werte im mit der Sonde gemessenen Punkt.

Das Verfahren ist für den Auswertungscomputer wesentlich zeitintensiver als die Berechnung von drei bereits bei der Kalibrierung bestimmten Polynomen. Die Auswertungsdauer für einen Messpunkt beträgt auf dem „Traversierungs-Computer“ durchschnittlich 140 Millisekunden. Verglichen mit der gesamten benötigten Messdauer in einem Traversierungspunkt, die in der Größenordnung von 15 Sekunden liegt und für ein Einpendeln des Druckniveaus in den Druckmessleitungen der an den Druckmessschrank angeschlossenen Messsonde notwendig ist, sind 140 Millisekunden jedoch akzeptabel. Des Weiteren erfolgt die Auswertung nach der Messung in einem traversierten Punkt parallel zur Verstellung der Sonde auf einen neuen Messpunkt im Traversieraster. Dadurch ist der entstehende Zeitverlust bei einer Auswertung durch das beschriebene Verfahren praktisch gleich Null.

Der wesentliche Vorteil des vorgestellten Verfahrens ist jedoch die direkte Zuordnung des Strömungszustands über die aus den Messwerten berechneten Koeffizienten zu den Kalibrierkoeffizienten in der Kalibrierdatei. Dadurch entsteht beim Schritt der „Rückrechnung“, entgegen der beschriebenen Durchführung mit einer dem Kalibrierfeld approximierten polynominalen Funktionen, kein Fehler.

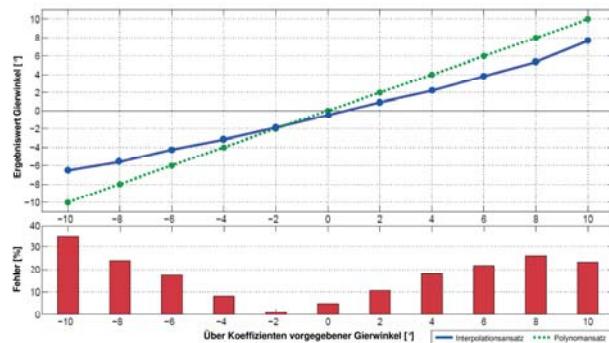


BILD 7: Beispiel für den entstehenden Fehler bei der Verwendung eines „Polynomansatzes“ dritten Grades, unter der direkten Vorgabe verschiedener Gierwinkel über die Koeffizienten, bei konstantem Nickwinkel und konstanter Machzahl

In BILD 7 ist zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts ein Diagramm zu sehen. Zur Erstellung des Diagramms wurde exemplarisch aus einer beliebigen Sondenkalibrierdatei mit der Methode der kleinsten Quadrate ein Polynom dritten Grades erstellt, das eine Berechnung des Strömungswinkels α_m nach Gleichung (11) ermöglicht. Nickwinkel und Machzahl werden bei diesem Beispiel konstant gehalten. Die errechneten Winkel, die sich durch das Polynom bei der Vorgabe von bekannten Koeffizienten verschiedener Gierwinkel aus dem Kalibrierfeld ergeben, sind im Diagramm über dem Erwartungswert aufgetragen (volle Kurve). Die gestrichelte Kurve stellt das Ergebnis für eine Auswertung über den vorgestellten „Interpolationsansatz“ dar. Alle vorgegebenen Winkel werden in diesem Fall im Gegensatz zum „Polynomansatz“ exakt ausgewertet. Im unteren Teil des Diagramms ist der durch die Anwendung des

„Polynomansatzes“ bei der Auswertung entstehende prozentuale Fehler für die durch die Koeffizienten vorgegebenen Winkel in Form eines Balkendiagramms dargestellt. Beim „Interpolationsansatz“ tritt dieser Fehler nicht auf.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorliegende Abhandlung beschreibt den von der MTU und dem ILA entwickelten Versuchsträger zur Vermessung von zweistufigen Niederdruckturbinen und dessen Instrumentierung bei den ersten beiden Messkampagnen. Auf Basis der im Detail erläuterten Instrumentierung werden die Komponenten und deren Funktion der hierfür am ILA aufgebauten Datenerfassungsanlage beschrieben und die darin integrierten Auswerteverfahren diskutiert und bewertet.

Weiter werden die im Rahmen des ATRD-Projekts am ILA durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in punkto Sondenkalibrierung und Auswertung von Fünfflochsondenmessdaten diskutiert. Insbesondere werden der am Institut aufgebaute Unterschallkalibrierkanal und die daran durchgeführten Optimierungsarbeiten beschrieben. Zur Beurteilung der Messdaten von Fünfflochsonden bei Messungen am Versuchsträger wird ein alternativer, im ATRD-System integrierter Ansatz zur Auswertung der Sondenmessdaten vorgestellt und dessen Leistungsfähigkeit bewertet.

Auf Basis des Datenerfassungssystems besitzt das ILA die Möglichkeit, zweistufige Turbinen im beschriebenen Versuchsträger bei einem Testlauf auf dem Höhenprüfstand eigenständig zu vermessen und die gewonnenen Messwerte auszuwerten. Durch die geplante Einbindung von Strömungs- und Leistungsrechnungsprogrammen, wird das Datenerfassungssystem weiter ausgebaut und dessen Leistungsfähigkeit optimiert. Das ATRD-Rig ist damit ein einzigartiger Versuchsträger im Hochschulforschungsbetrieb, an welchem zukünftig die Durchführung von grundlegenden Forschungsprojekten an Niederdruckturbinenbeschauflungen möglich ist.

6. DANKSAGUNG

Diese Abhandlung entstand im Rahmen des „Advanced Turbine Research and Demonstration“-Projekts. Für die fundierte beratende Unterstützung aller beteiligten Mitarbeiter der MTU Aero Engines GmbH sei an dieser Stelle gedankt.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] N. Schinko
Rig 455 B02A - Spezifikation
1. Ausgabe
Institut für Luftfahrtantriebe
Stuttgart 2009
- [2] A. Heisler
Rig 455 Instrumentierungsspezifikation B01
3. Ausgabe
MTU Aero Engines GmbH
München 2007
- [3] M. Kürner
Rig 455 Instrumentierungsspezifikation B02A
1. Ausgabe
Institut für Luftfahrtantriebe
Stuttgart 2009
- [4] H.I.H Saravanamutto
Recommended Practices for Measurement of Gas Path Pressures and Temperatures for Performance Assessment of Aircraft Turbine Engines and Components
Report of the Propulsion and Energetics Panel Working Group 19, AGARD-AR-245
Essex 1990
- [5] A. Heisler
NDT-Rig Spezifikation
2. Augabe
MTU Aero Engines GmbH
München 2007
- [6] W. Nitsche, A. Brunn
Strömungsmesstechnik
Springer-Verlag, Berlin 2006
- [7] W. Wüst
Pressure and Flow Measurement
Flight Test Instrumentation Series, AGARD-AG-160, Volume 11
Essex 1980
- [8] H. Schlichting, E. Truckenbrodt
Aerodynamik des Flugzeuges, Aerodynamik des Tragflügels (Teil I)
2. Auflage
Springer-Verlag, Berlin 1967
- [9] F. Lippl
Rig 455 / ATRD-Rig
Präsentation
MTU Aero Engines GmbH
München 2008
- [10] K. Kuhn
Stuttgart Altitude Test Facility, ATF-Fact-Sheet
Institut für Luftfahrtantriebe
Stuttgart 2008
- [11] H.D. Baehr
Thermodynamik
2. Auflage
Springer-Verlag, Berlin 1966

- [12] E. Preisenberger, J. Mitterhuber
Anforderungen an die Systeme der neuen Generation zur Datenerfassung und Überwachung an Triebwerksprüfstände
DGLR-Jahrbuch 2001
Hamburg 2001
- [13] N. Schinko
Rig 455 Performance Validation Document
1. Ausgabe
Institut für Luftfahrtantriebe
Stuttgart 2009
- [14] B.J. McBride, S. Gordon
Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, Part I Analysis
NASA Technical Report 1311
NASA, Ohio 1994
- [15] B.J. McBride, S. Gordon
Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, Part II Users Manual and Program Description
NASA Technical Report 1311
NASA, Ohio 1996
- [16] A. Frohn
Einführung in die Technische Thermodynamik
3. Auflage
Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1998
- [17] D. Sonntag
Formeln verschieden Genauigkeitsgrades zur Berechnung des Sättigungsdampfdruckes über Wasser und Eis und ihre Anwendung auf einige praktische Feuchtemeßaufgaben
1. Auflage
Akademie-Verlag, Berlin 1982
- [18] W. Weischet
Einführung in die Allgemeine Klimatologie
7. Auflage
Verlag Gebrüder Borntraeger, Stuttgart 2008
- [19] J.P Duponchel, J. Loisy, R. Carrillo
Steady and Transient Performance Calculation Method for Prediction, Analysis and Identification
Steady and Transient Performance Prediction of Gas Turbine Engines, AGARD-LS-183, Kapitel 3, S.1-21
Essex 1992
- [20] J. Kurzke
About Simplifications in Gas Turbine Performance Calculations
ASME Turbo Expo 2007, GT2007-27620
Montreal 2007
- [21] H.G. Münzberg, J. Kurzke
Gasturbinen - Betriebsverhalten und Optimierung
Springer-Verlag, Berlin 1977
- [22] F. Rodi, M. Varetti, R. Tomat
Low Pressure Engine Testing
Turbine Engine Testing, AGARD-CPP-293,
Kapitel 30, S.1-13
Essex 1980
- [23] D. Surek, S. Stempin
Angewandte Strömungsmechanik
Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2007
- [24] E. Witoszyński
Über Strahlerweiterung und Strahlablenkung
Vorträge aus dem Gebiet der Hydro- und Aerodynamik (Innsbruck 1922), S.240-247,
Th. v. Kármán, T. Levi-Civita
Springer-Verlag, Berlin 1924
- [25] V.A. Kužmin, V.N. Khazhuev
Measurement of Liquid or Gas Flow (Flow Velocity) Using Convergent Channels With a Witoszynski Profile
Measurement Techniques, Volume 36, Number 3, S.288-296
Springer-Verlag, New York 1993
- [26] P. Rinaldi
Über das Verhalten turbulenter Freistrahlen in begrenzten Räumen
Dissertation, Lehrstuhl für Hydraulik und Gewässerkunde TU München
München 2003
- [27] A. Kupke
Strömungstechnische Analyse und Optimierung und mechanische Neukonstruktion eines Kalibrierkanals für Mehrlochdruckmesssonden
Diplomarbeit, Institut für Luftfahrtantriebe
Stuttgart 2009
- [28] L. Völker
Neue Aspekte der aerodynamischen Gestaltung von Niederdruck-Endstufen-Beschaufelungen
Dissertation, Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium der Universität Stuttgart
Stuttgart 2006
- [29] K. Rubner, D. Bohn
Verfahren für die Auswertung der Meßergebnisse von Strömungssonden durch mehrdimensionale Approximation der Eichkurven und Eichflächen
Zeitschrift für Flugwissenschaften, 20. Jahrgang, Januar/Februar, Heft 1/2, S.36-42
Verlag Friedrich Vieweg & Sohn GmbH, Braunschweig 1972
- [30] K. Wörlein
Kalibrierung von Fünflochsonden
Skriptum, Gasturbinen und Flugantriebe TU Darmstadt
Darmstadt 1990