

Heft R 516 (2002)

Informationstagung Turbinen, Frühjahr 2002, Frankfurt-Möhrfelden

INSTITUT FÜR DAMPF- UND GASTURBINEN

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Bohn

Abschlussbericht über das Vorhaben Nr. 688 (FVV-Nr. 066880)

Thema : Aerodynamische Entlastung der Schaufelspalte durch Konturierung
des Meridiankanals

Kennwort : Spaltentlastung II/II+, Turbine

Laufzeit : 01.04.2000 bis 31.03.2001

Obmann : Dipl.-Ing. F. Kreitmeier, Alstom Power, Baden (CH)

Bearbeiter : Dipl.-Ing. H. Funke
Dr. rer. nat. M. Wolff
Dipl.-Ing. N. Sürken

Vortragender : Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Bohn

1. Einleitung

Zwischen den stehenden und den rotierenden Teilen einer Turbomaschine sind aus Gründen der Betriebssicherheit Radialspalte erforderlich. Innerhalb dieser Spalte stellt sich eine Durchflussströmung aufgrund des herrschenden Druckgradienten ein. Der Verlustanteil durch die Spaltströmung ist bei frei endenden Schaufeln in der Regel größer als jeder andere Einzelverlust und hat somit einen starken Einfluss auf den Wirkungsgrad einer solchen Strömungsmaschine. Die dreidimensionalen Eigenschaften der Strömung in und zwischen den einzelnen Schaufelreihen beeinflussen dabei direkt die auftretenden Profil-, Spalt-, Konizitäts- und Sekundärströmungsverluste.

Eine Maßnahme zur Reduzierung der Spaltströmungsverluste besteht in der Verwendung von Labyrinthen im Spaltbereich. Dazu ist jedoch die Verwendung eines Deckbandes erforderlich, was zu zusätzlichen Reibungsverlusten und erhöhter Materialbeanspruchung insbesondere bei den Laufschaufeln führt. Einem verminderten Spaltmassenstrom stehen somit höhere Fertigungskosten und erhöhte Reibungsverluste gegenüber.

Ziel muss es daher sein, durch entsprechende Beeinflussung des 3-dimensionalen Strömungsfeldes wie z.B. bei der sog. Bow-Beschaufelung, in Zukunft eine Reduzierung der Spalt- und Sekundärströmungsverluste im Hinblick auf eine wirkungsgrad- und kostenoptimierte Gestaltung der Maschine zu erreichen.

2. Aufgabenstellung und Ziel des Vorhabens

Ausgehend von den bisher angewandten Lösungen zur Minimierung der Spaltverluste wird in diesem Forschungsvorhaben ein neuer Weg beschritten (Bild 1). Als eine Alternative zur fertigungstechnisch aufwendigen Bow-Schaufel besitzt die Konturierung des Meridionalkanals das Potenzial, die Strömungsführung so beeinflussen zu können, dass die verlustreichen Randzonenströmungen reduziert und somit die Radialspalte entlastet werden. Die mit hohen Verlusten behaftete Strömung im Radialspalt und die ebenfalls verlustbehafteten Wechselwirkungen der Spaltströmung mit anderen Sekundärströmungsphänomenen werden demnach verringert.

Mit Hilfe einer geeigneten Kanalkonturierung in der Gehäusekontur im fertigungstechnisch einfach zu verändernden schaufelfreien Raum wird durch die Änderung der Stromlinienkrümmung Einfluss im Sinne einer besseren Energieumsetzung in den wandnahen Bereichen des Strömungsfeldes genommen. Die Konturierung beeinflusst lokal das wandnahe Strömungsfeld so, dass mehr kinetische Energie in den energiearmen Wandbereichen verbleibt. Es ergibt sich ferner eine positive Beeinflussung des radialen Druckfeldes. Dabei wird die treibende Druckdifferenz über dem Radialspalt reduziert und der Spalt aerodynamisch entlastet. Als Folge werden die durch die Spaltströmung induzierten Inhomogenitäten des Strömungsfeldes vermindert und der Wirkungsgrad der Maschine verbessert.

Das langfristige Ziel der Vorhaben "Spaltentlastung", "Spaltentlastung II" sowie "Spaltentlastung II+" ist die Etablierung und praktische Umsetzung eines in das Vorhaben integrierten Design-Prozesses.

3. Vorgehensweise

Der Design-Prozess ist von einer eng verzahnten numerischen und experimentellen Vorgehensweise geprägt (Bild 1). Ziel der numerischen Optimierungsrechnungen ist der Nachweis der Homogenisierung des Strömungsfeldes innerhalb der Maschine und somit einer Verbesserung des Turbinenwirkungsgrades. Diese Homogenisierung resultiert aus der Verminderung der Spaltströmung und der damit verbundenen parasitären Sekundärströmungen infolge der Beeinflussung der radialen Druckverteilung durch eine geeignete Konturierungsgeometrie.

Aufbauend auf dem Vorhaben "Spaltentlastung", in dem die experimentellen Methoden und numerischen Tools hinsichtlich einer Untersuchung der Spaltströmung optimiert worden sind, sowie dem Vorhaben "Spaltentlastung II", in dem mit Hilfe intensiver numerischer Studien eine erfolgversprechende Meridiankontur entworfen worden ist, steht in diesem Vorhaben, neben einer vertieften numerischen Analyse der gewählten Konturierung, der experimentelle Nachweis der numerisch vorhergesagten Wirkungsgradveränderung im Vordergrund. Dazu wird die aufgrund der numerischen Rechnungen gewählte Kontur auf alle vier Stufen der Versuchsturbine übertragen und mit dieser Modifikation erneut vermessen. In Verbindung mit den numerischen Untersuchungen lässt sich auf diese Weise der Wirkungsmechanismus der Konturierung umfassend untersuchen.

4. Theoretische Arbeiten

Die Bearbeitung des theoretischen Projektteils erfordert die Anwendung eines dreidimensionalen Navier-Stokes-Lösers mit einem zuverlässigen und genauen Rechenchema. Aufgrund der sehr guten Ergebnisse bezüglich der Nachrechnung einer kompletten Turbinenstufe /1/ wurde dazu bereits im Vorhaben "Spaltentlastung" der institutseigene Strömungslöser **CHT-flow** ausgewählt.

Aufbauend auf den einstufigen Berechnungen des Vorhabens "Spaltentlastung" wurden eine Reihe von verschiedenen Gehäuse- und Nabenkonturierungen untersucht (Bild 2). Dabei wurden im Vorhaben Spaltentlastung II zunächst 1-stufige Konfigurationen mit hoher lokaler Auflösung analysiert. Die unveränderte Maschinengeometrie dient hierbei als Referenzkontur (Bild 2a).

Die ursprünglich vorgesehene geknickte Gehäusekontur (Bild 1) wurde nach ersten Untersuchungen vom Arbeitskreis aus der grundsätzlichen Überlegungen heraus, dass Knicke zu Ablösungen führen und damit die positiven Effekte der Meridiankonturierung zunichte machen würden, zugunsten einer sinuswellenförmigen Kontur (Bild 2b und 2c) aufgegeben. Diese Kontur wurde geometrisch dahingehend optimiert, dass die komplex zu beschreibende Sinuskurve durch Kreisbögen angenähert wird. Das Durchmesserverhältnis von Klein- zu Großkreis ist im untersuchten Fall konstant und beträgt 1:10. Die daraus resultierende auf die Profilhöhenlänge bezogene Einschnürung des Meridiankanals beläuft sich auf 12.1%. Mit den beiden Kennzahlen, Durchmesserverhältnis und relative Einschnürung, erhält man zwei

Geometrie Größen, welche die Grundlage für zukünftige Parameterstudien darstellen.

Wie schon im vorhergehenden Vorhaben "Spaltentlastung II" wurden für die 4-stufigen Berechnungen die Kronenschärfung bei der Laufschaufel diskretisiert. Auf diese Weise können wesentliche Strömungsphänomene, wie beispielsweise die Spaltwirbel und deren Interaktion mit den Kanalwirbeln, erfasst werden. Die Netze für die verschiedenen geometrischen Konfigurationen sind im Hinblick auf die Anzahl der Gitterpunkte und deren auf die Schaufelhöhe bezogenen Verteilung identisch. Diese Maßgabe ist sinnvoll und notwendig, um eine optimale Vergleichbarkeit der berechneten Strömungsfelder zu erhalten.

Trotz einer Reduzierung der Spaltströmung und der resultierenden Verbesserung der Homogenität der Abströmung lassen sich numerisch für die verschiedenen 1-stufigen Berechnungen keine erhöhten Stufenwirkungsgrade belegen. Dies lässt sich aus dem Umstand erklären, dass sich die erreichte Homogenisierung erst in den nachfolgenden Stufen positiv auswirkt.

Aus diesem Grund werden 4-stufige Berechnungen der Gesamtmaschine durchgeführt, wobei wiederum die ursprüngliche Maschinengeometrie als Referenzfall dient (Bild 2e). Zur Analyse der Konturierungseffekte wurde zunächst die 1-stufig untersuchte Kreisbogenkontur (Bild 2d) auf die Maschine 4-stufig übertragen (Bild 2f) und in einem letzten Optimierungsschritt um ein Schaufelgitter axial verschoben (Off-set Kreisbogenkontur, Bild 2g). Durch die 4-stufigen Berechnungen ist sichergestellt, dass die dritte Stufe im Stufenverbund mit der homogenisierten Strömung aus der zweiten Stufe angeströmt und nicht, wie bei den 1-stufigen Berechnungen, mit der Anströmung aus dem Referenzfall konfrontiert wird. Auf diese Weise lassen sich auch kleine Wirkungsgradveränderungen signifikant nachweisen.

Das Berechnungsgebiet für jede der drei untersuchten Konturierungen ist mit jeweils ca. 1,4 Mio Gitterpunkten vernetzt und in 42 Blöcke aufgeteilt (Bild 3). Hierbei sind die Kronenschärfung der Laufschaufeln diskretisiert. Die Kronenschärfung der Leitschaufeln wird vernachlässigt, da lediglich der Einfluss der Gehäusekonturierung untersucht wird. Um durch die Konturen hervorgerufene Effekte separieren zu können, werden für die Designrechnungen für alle 4-Stufenanalysen gleiche und konstante Randbedingungen am Ein- und Austritt vorgeschrieben. Für die nachgelagerte Validierungsrechnung der Off-set Kreisbogenkontur werden abschließend Randbedingungen aus dem entsprechenden Experiment verwendet.

Wie bereits im vorangegangenen Zwischenbericht /5/ ausführlich dargestellt und diskutiert, lässt sich für die Kreisbogenkontur (Bild 2f) auch mit 4-stufigen Berechnungen keine Wirkungsgradverbesserung über die gesamte Maschine oder über einzelne Stufen nachweisen. Die Untersuchungen führen schließlich zu einer geometrischen Gestaltung des Gehäuses, bei der die kreisbogenförmige Kontur um ein Schaufelgitter axial verschoben angebracht wird (Off-set Kreisbogenkontur, Bild 2g). Dadurch wird die gehäusenaher Laufschaukelbelastung in Richtung Schaufelhinterkante verlagert und die durch Spalt- und Sekundärströmungen induzierten Inhomogenitäten im Strömungsfeld reduziert sowie letztendlich der Stufenwirkungsgrad verbessert. Bild 4 zeigt hierzu exemplarisch die berechneten radialen Verläufe des statischen polytropen Wirkungsgrades für die zweite und die dritte Stufe. Deutlich zu erkennen ist die durch die Off-set Kanalkonturierung bewirkte Verbesserung der Homogenität der Strömung in Gehäusenähe, oberhalb 80% der relativen Kanalhöhe.

5. Konstruktive Umsetzung der Kanalkonturierung

Ziel der experimentellen Untersuchungen ist die Umsetzung der numerisch optimierten Gehäusekonturierung an der Versuchsturbine. Somit können sowohl die strömungsmechanischen und wirkungsgradmäßigen Konturierungseffekte messtechnisch belegt als auch die numerischen Optimierungsrechnungen validiert werden. Bild 5 zeigt die Versuchsturbine mit Einströmgehäuse zur Homogenisierung der Anströmung des 4-stufigen Turbinenteils, sowie die Kontrollflächen und die dort verwendete Messtechnik. Diese Messtechnik wurde bereits bei der Strömungsfeldvermessung der unveränderten Referenzkontur im Vorhaben "Spaltentlastung" erfolgreich eingesetzt.

Der begleitende Arbeitskreis kam darin überein, dass ein experimenteller Nachweis der numerisch gezeigten Konturierungseffekte nur dann gelingen kann, wenn eine Konturierung über der gesamten Lauflänge der 4-stufigen Versuchsturbine und somit über jeder einzelnen Stufe im Leit- und Laufschaufelbereich vorgenommen wird. Hierfür wurde die numerisch simulierte Off-set Kreisbogenkonturierung am Gehäuse für die Versuchsturbine konstruktiv umgesetzt (Bild 6).

Die fertigungstechnische Umsetzung der 4-stufigen Gesamtkonturierung in der Turbine wurde im Bereich der Leitschaufeln durch neue Distanzstücke zwischen den Schaufeln realisiert (Bild 7: Mitte). In einem aufwendigen Prozess wurden die Distanzstücke auf einer 5-Achs-CNC-Fräsmaschine gefertigt und anschließend einzeln an die Leitschaufeln angepasst. Die Distanzstücke bilden mit den Einlegeringen und den Schleppringen über den Laufrädern die neue Kontur der Turbine (Bild 7). Hierbei sind die Schleppringe mit den Sondendurchführungen über eine Teilung hinweg relativ zum Schaufelträger traversierbar. Somit lässt sich in der 3. Stufe der Versuchsturbine eine für mehrstufige Turbinen typische Strömung detailliert vermessen.

Für die Anpassung der Geometrie der Laufschaufelenden wurde ein spezielles Fertigungsverfahren entwickelt, das es ermöglichte, die neue Konturierung in der geforderten Genauigkeit zu realisieren. Bei diesem Verfahren wurden die Schaufelblätter im eingebauten Zustand an der Drehbank mit speziell konturierten Schleifscheiben überarbeitet. Um die Genauigkeit der Schleifbearbeitung zu gewährleisten, wurden Prüfverfahren zur Kontrolle der Konturierung jeder einzelnen verwendeten Schleifscheibe sowie der genauen Positionierung und Ausrichtung der Scheiben zu den Rotorschaufeln entwickelt. Insbesondere die Bestimmung des exakten Durchmessers des Rotors während des Schleifvorganges erforderte aufgrund der ungeraden Schaufelzahl pro Stufe einen hohen Aufwand.

Neben diesen Anpassungen der Kanalkonturierung und der Beschaukelung wurden die Eintritts- und Austrittsgeometrie der Turbine an die geänderte Geometrie der Turbine angepasst. Die für die experimentellen Untersuchungen benötigte Messtechnik und Auswertung ist bereits im Laufe des Vorhaben "Spaltentlastung" erfolgreich eingesetzt worden und stellt in Verbindung mit den Strömungsdaten der Referenzkontur die Basis für den quantitativen Vergleich in Bezug auf das Wirkungsgradpotential der Konturierung sowie die phänomenologische Untersuchung des Einflusses der Konturierung auf die Spaltströmung dar.

6. Experimentelle Untersuchungen an der neuen Off-set Kreisbogenkontur

An der Turbine mit der neuen Konturierung wurden mit stationären 1-Lochsonden und 5-Lochsonden Experimente zur Strömungsfeldbestimmung sowie zur Kennlinienbestimmung durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen ist ein Vergleich der Wirkungsgrade der Off-set Kreisbogenkontur mit der Referenzkontur sowie der Vergleich der Strömungsfelder.

Bild 8 zeigt die Charakteristiken der Maschine, die polytrophen Wirkungsgrade und die Durchflusskennzahl ϕ bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen, sowohl für die Referenz- als auch für die Off-set Kreisbogenkontur. Die Kreise stehen hier für die Referenzkontur, die Quadrate für die Off-set Kontur. Die ausgefüllten Kreise und Quadrate bezeichnen die entsprechenden Werte, die aus den 4-stufigen Designberechnungen ermittelt wurden. Alle gemessenen Wirkungsgrade und Durchflusskennzahlen sind auf die entsprechenden Messungen der Referenzkontur bei 5000 U/min bezogen. Die numerisch berechneten Werte sind auf die numerischen Werte der Referenzkontur bezogen.

Die experimentell bestimmten Wirkungsgrade wurden zusätzlich einer Korrektur unterzogen: Aufgrund der Wärmeausdehnung von Gehäuse und Rotor kommt es beim Aufheizen zu Verschiebungen in den axialen Schaufelpositionen relativ zum Gehäuse. Diese führen zu Änderungen in den Radialspalten (Bild 9). Daher wurde der axiale Versatz des Rotors zusätzlich zu den vorgesehenen Arbeiten experimentell untersucht.

Es wurde eine spezielle Messeinrichtung konzipiert und gefertigt, die die Messung der Veränderung des Axialspiels zwischen Rotor und Einströmgehäuse im Betrieb ermöglichte. Die Messungen ergaben Verschiebungen der axialen Schaufelpositionen von 0,31 mm, woraus eine relative Vergrößerung des Radialspaltes von 0,04 mm der Off-set-Kontur gegenüber der Referenzkontur (Bild 9, unten) resultiert. D.h., die Radialspalte der Referenzkontur nehmen im Betrieb ab, die der Off-set Kreisbogenkontur dagegen zu. Eine entsprechende Berechnung der hierdurch verursachten Wirkungsgradänderung wurde anhand vom Industriepartner zur Verfügung gestellter Rechenvorschriften durchgeführt. Das Ergebnis ist in Bild 8 durch Kreuze, bezeichnet mit "Off-set Exp. korrigiert", dargestellt. Der dargestellte korrigierte Wirkungsgradverlauf der Off-set Kreisbogenkontur ist folgerichtig auf den korrigierten Wirkungsgrad der Referenzkontur bei 5000 U/min bezogen.

Bereits die unkorrigierten experimentell bestimmten Wirkungsgrade liegen bei der Off-set Kreisbogenkontur, bis auf den Wirkungsgrad bei $\Psi_y = -1,8$, gegenüber der Referenzkontur höher. Durch die Berücksichtigung der Radialspaltänderungen steigt der Wirkungsgrad der Off-set Kreisbogenkontur gegenüber der Referenzkontur noch einmal an. Das Wirkungsgradmaximum unter Berücksichtigung der Korrektur der Radialspalte ist für die Off-set-Kontur etwas höher als für die Referenzkontur. Der entsprechende Betriebspunkt ist zu höheren Schaufelbelastungen und niedrigeren Rotordrehzahlen (5800 U/min anstatt 6200 U/min) verschoben. Der numerisch untersuchte Betriebspunkt bei 5000 U/min hat typische Teillastbedingungen, bei der die Konturierungseffekte signifikant stärker sind als im Bestpunkt. Der numerisch vorhergesagte reversibel gemittelte und bezogene Wirkungsgradgewinn von ca. 0.9 % und die experimentell gemessene, korrigierte und bezogene Wirkungsgradsteigerung von 0.8 % bei gleicher Druckkenngröße stimmen gut überein.

Die Konturierung der Maschine führt bei konstanter Druckkenngröße zu höheren polytropen Wirkungsgraden und höheren Durchflusskennzahlen, was einem höheren Geschwindigkeitsniveau in der Maschine entspricht. Ein Vergleich der beiden Konturierungen bei konstanter Durchflusskennzahl führt zu reduzierten Druckkenngrößen bei höherer Drehzahl für die Off-set Kontur. Dies bedeutet geringere Umlenkungen bei beträchtlich erhöhtem Wirkungsgrad in weiten Bereichen der Charakteristik.

Die Ergebnisse der Strömungsfelduntersuchungen vor (KF22) und hinter (KF32) der dritten Stufe sowie der Vergleich mit den entsprechenden numerischen Designberechnungen sind in Bild 10 am Beispiel der umfangsgemittelten Radialverteilungen des auf den dynamischen Druck bezogenen Totaldruckes C_p und des Umfangswinkels der Strömung dargestellt. Die Kreise bezeichnen die umfangsgemittelten Messwerte für die Referenzkontur, die Rauten repräsentieren die entsprechenden Messwerte für die Off-set Kontur. Die durchgezogenen bzw. gestrichelten Linien zeigen die berechneten Radialverteilungen für die Referenz- bzw. Off-set-Kontur.

Der Umfangswinkel α ist definiert als der Winkel zwischen dem Vektor der Rotation des Rotors und der Projektion des Strömungsvektors auf eine Radialebene. Ein 90° -Winkel der Strömung entspricht hier einer drallfreien Strömung. Ein Vergleich der Umfangswinkelverteilungen zeigt in der numerischen Simulation wie im Experiment oberhalb 70% relativer Kanalhöhe in Gehäusenähe eine Änderung des Umfangswinkels der Strömung um bis zu 10° für die Off-set Kontur. Die Strömung ist hier für die Off-set Kontur nahezu drallfrei. Die für eine prismatische Schaufel typische Umfangswinkelverteilung der glatten Referenzkontur wird demnach günstig beeinflusst.

Der Vergleich der gemessenen bezogenen Totaldruckverläufe zeigt für die Off-set Kontur einen konstanteren Verlauf über der Kanalhöhe und damit eine homogenisierte Strömung im Vergleich zur Referenzkontur. Dieses Phänomen ist auch in den numerischen Designberechnungen zu finden.

Der in den Messungen der Referenzkontur in KF22 vergleichsweise niedrige Totaldruck in Nabennähe muss als lokales Phänomen im Messsegment der Sonde angesehen werden, da es in den nachfolgenden Stufen nicht nachweisbar ist.

Unter Berücksichtigung der für die numerischen Simulationen verwendeten konstanten Randbedingungen zeigen die vorhergesagten Totaldruckverteilungen und die Umfangswinkelverteilungen in allen Messebenen eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Besonders die berechnete Verbesserung der Zuströmung in die jeweils nächste Stufe wird durch die Messungen bestätigt. Durch die nicht modellierten Radialspalte der Leitschaufeln wird in den numerischen Simulationen das Totaldruckniveau im Nabebereich für alle Messebenen wie erwartet überbewertet.

Aufgrund des geringen Axialabstandes der einzelnen Gitter der Turbine von 6 mm befindet sich die Messposition der 5-Lochsonde in einem Abstand von ca. 0,5 mm hinter den Laufschaufeln. Um zu klären, ob und inwiefern die Messergebnisse durch eine Störung der Strömung am Messort durch die Sonde selbst verfälscht werden, wurden Vergleichsmessungen der Totaldrücke mit einer Miniatur-1-Loch-Totaldrucksonde durchgeführt. Diese hat

aufgrund ihrer deutlich geringeren Baugröße eine kleinere Störung der Strömung zur Folge. In Bild 11 ist das Ergebnis des Vergleichs für die Messebenen KF22 und KF32 exemplarisch für je eine Umfangsposition direkt vor der Vorderkante einer nachfolgenden Leitschaufel und in der Mitte der Leitschaufelteilung dargestellt. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung der mit den beiden Sonden gemessenen Totaldrücke. Bis auf die Bereiche in Nabennähe beträgt die Abweichung zwischen 5-Lochsonde und 1-Lochsonde auf den Traversen 2 und 6 in Ebene KF22 und auf Traverse 2 in der Ebene KF32 weniger als 1 mbar. Dies liegt im Bereich der Messunsicherheit. Die etwas größeren Abweichungen von 2 mbar auf Traverse 6 in Ebene KF32 sind auf leichte Betriebspunktschwankungen während der Messung zurückzuführen. Die Abweichungen der Totaldrücke in Nabennähe der Traverse 6 in KF22, unmittelbar vor der nachfolgenden Leitschaufelvorderkante, sind auf in diesem Bereich sehr großen Umfangswinkel zurückzuführen: Die Umfangswinkel α liegen dort aufgrund der in diesem Bereich hohen Gradienten von α lokal außerhalb des zuverlässigen Messbereichs der 5-Lochsonde, so dass die Totaldrücke der 5-Lochsonde mit einer Unsicherheit versehen sind.

Da Sondenmessungen durch lokale Phänomene um so stärker beeinflusst werden, je größer die Sonde ist, ist den Messungen der 1-Lochsonde eher zu trauen als denen der 5-Lochsonde. Daher ist es in jedem Fall sinnvoll, 1-Lochsonden für die Messung der Totaldrücke zu verwenden. Um die durch die 5-Lochsondenmessungen zusätzlich gelieferten Daten zu erhalten, gibt es zwei Möglichkeiten. Einerseits können, wie im vorliegenden Fall, mit der 5-Lochsonde durchgeführte Messungen um Totaldruckmessungen mit der 1-Lochsonde ergänzt werden. Alternativ wäre eine Messung mit einer sehr kleinen 5-Lochsonde denkbar.

Eine ähnliche, jedoch schwächere, Abweichung wie in Traverse 6 in Ebene KF22 findet sich auch im Nabenbereich auf Traverse 2. Hier liegen die Umfangswinkel im Randbereich der Kalibrierung der 5-Lochsonde.

In Bild 12 sind die Abweichungen $\Delta\alpha$ der gemessenen lokalen Umfangswinkel vom umfangsgemittelten Umfangswinkel sowie die bezogenen Totaldruckverläufe C_p in KF32 gezeigt. Die schwarze Linie zeigt die Position der Leitschaufelvorderkante der nächsten Stufe. Beide Geometrien zeigen das selbe Schema der Umfangswinkelabweichung vom Mittelwert. Die Schlüsselinformation dieser Abbildung liegt in Gehäusenähe. Dort ist der Homogenisierungseffekt der Off-set Kontur deutlich in der geringeren Variation des Umfangswinkels über die Teilung zu erkennen (siehe auch Bild 14). Dies bedeutet eine homogenere Anströmung der nächsten Stufe bei gleichzeitig günstigerem Umfangswinkel der Strömung. Auch die bezogenen Totaldruckverläufe über den Umfang zeigen für beide Geometrien den gleichen charakteristischen Verlauf. Ein deutlicher Unterschied ist nahe dem Gehäuse zu erkennen, wo die Off-set Kreisbogenkontur eine deutliche Homogenisierung der bezogenen Totaldrücke über den Umfang gegenüber der Referenzkontur zeigt.

Die Randbedingungen der numerischen Designberechnungen, anhand derer die im Experiment untersuchte Off-set Kreisbogenkontur ausgelegt wurde, wurden für beide Konturen (Referenz und Off-set) in Anlehnung an die Messergebnisse für die Referenzkontur angenommen. Diese Simulationen sagten den im Experiment ermittelten Wirkungsgrad-

gewinn näherungsweise voraus. In einem abschließenden Schritt wird die Simulation mit den Randbedingungen des Experiments für die Off-set Kontur wiederholt. Auf diese Weise können die Auswirkungen der realen Anströmbedingungen in den numerischen Simulationen berücksichtigt werden. Die experimentell bestimmten für die numerische Nachrechnung nötigen Einströmbedingungen sind anhand von Totaldruck- und Temperaturverteilung in Bild 13 dargestellt. Zusätzlich wurde für die numerische Simulation die Verteilung des statischen Druckes am Austritt benötigt, deren gemittelte Radialverteilung ebenfalls in Bild 13 aufgetragen ist.

Exemplarisch sind in Bild 14 die radialen Verteilungen des umfangsgemittelten Umfangswinkels α sowie die Totaldruckverteilung in absoluten Größen in KF 32 hinter der dritten Stufen dargestellt. Die ausgefüllten Rauten stellen hierbei die umfangsgemittelten Messergebnisse auf den jeweiligen Radialpositionen dar. Die Pluszeichen links und rechts der Rauten kennzeichnen die Schwankungsbreite der Messergebnisse über dem Umfang. Generell wird wie schon bei der Berechnung der Referenzkontur /5/ sowohl das Niveau als auch der Verlauf der Strömungsfeldgrößen in der Nachrechnung sehr gut getroffen. Im Nabebereich wird wiederum das Verlustgebiet durch den nicht modellierten Nabenspalt der Leitschaufeln nicht erfasst. Insgesamt bestätigt auch diese Nachrechnung die Annahme, dass das gewählte Vorgehen und der gewählte Strömungslöser **CHT-flow** zu belastbaren Simulationsergebnissen führt.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Abschlussbericht werden die wissenschaftlichen Ergebnisse der numerischen und experimentell/konstruktiven Forschungsarbeiten im Rahmen des FVV-Forschungsvorhabens "Aerodynamische Entlastung der Schaufelpalte durch Konturierung des Meridiankanals" zusammengefasst.

Umfangreiche numerische Auslegungs- und Optimierungsberechnungen wurden mit Hilfe des institutseigenen NS-Strömungslösers **CHT-flow** durchgeführt und ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass die Konturierung des Meridiankanals das Potenzial besitzt, das dreidimensionale Strömungsfeld positiv zu beeinflussen und die Spaltströmung sowie die damit verbundenen Sekundärströmungsverluste zu reduzieren. Inhomogenitäten im Strömungsfeld werden reduziert und es wird numerisch und experimentell gezeigt, dass unter den untersuchten Randbedingungen der Maschinenwirkungsgrad mit einer auf das spezifische Schaufelprofil abgestimmten Gehäusekonturierung ansteigt.

Die Experimente zur Kennlinienbestimmung der Turbine mit geänderter Konturierung zeigen die numerisch vorhergesagte Wirkungsgradverbesserung. Für die Off-set Kreisbogenkonturierung wurde gegenüber der Referenzkontur eine Homogenisierung der Strömung in Umfangsrichtung nahe dem Gehäuse festgestellt. Die Strömung ist in Gehäusenähe gegenüber der Referenzkontur mit deutlich geringerem Drall in Umfangsrichtung behaftet. Unter Berücksichtigung der Radialspaltänderungen im Betrieb ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Experimente mit der Numerik.

Das Ziel dieses Projektes, in einem numerischen Designprozess die verlustreichen Radialspaltströmungen zu analysieren, durch eine Variation der Gehäusekonturierung positiv zu beeinflussen und dies im Experiment umzusetzen, wurde erreicht. Die Ergebnisse der numerischen Rechnungen konnten vom Experiment bestätigt werden. Somit konnte das Potenzial einer Optimierung des Meridiankanals aufgezeigt werden. Da in diesem Projekt nur die Konturierung des Gehäuses untersucht wurde, ist durch Konturierung des Nabenprofils ein weiteres großes Potenzial zur Spaltverlustminderung und somit zur Wirkungsgradsteigerung gegeben.

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis eines Forschungsprojektes, welches von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV, Frankfurt) gestellt und am Institut für Dampf- und Gasturbinen an der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Bohn bearbeitet wurde. Das Institut für Dampf- und Gasturbinen dankt der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen für die finanzielle Förderung des Vorhabens. Die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen dankt Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Bohn und den wissenschaftlichen Bearbeitern, Dipl.-Ing. H. Funke, Dipl.-Ing. N. Sürken und Dr. rer. nat. M. Wolff für die Durchführung des Vorhabens. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis der FVV unter der Leitung von Herrn Dipl.-Ing. F. Kreitmeier, Alstom Power, begleitet. Diesem Arbeitskreis gebührt unser Dank für die große Unterstützung.

7. Literaturverzeichnis

- /1/ Bohn D. Aerodynamische Entlastung der Schaufelspalte durch Konturierung
Lamping M. des Meridiankanals
Kusterer K. Abschlussbericht zum FVV-Forschungsvorhaben Nr. 066280
 Aachen, 1998
- /2/ Bohn, D. E. Influence of Endwall Contouring in Axial Gaps on the Flow Field in
Kusterer, K. a Four-Stage Turbine
Sürken, N. ASME-paper 2000-GT-472
Kreitmeier, F. Munich, Germany, 2000
- /3/ Bohn, D. E. Numerical and Experimental Investigation on of Endwall Contouring
Funke, H. in a Four-Stage Turbine
Sürken, N. ASME-paper 2001-GT-481
Kreitmeier, F. New Orleans, USA, 2001
- /4/ Bohn, D. E. Leakage Loss Reduction by Endwall Contouring
Sürken, N. AIAA-paper 2001-2663
Kreitmeier, F. Anaheim, USA, 2001
- /5/ Bohn, D. Zwischenbericht über das Vorhaben Nr. 688 "Aerodynamische Ent-
Funke, H. lastung der Schaufelspalte durch Konturierung des Meridiankanals",
Sürken, N. Heft R 514 (2001), Informationstagung Turbinen, Herbst 2001,
Wolff, M. Dresden-Radebeul

Problemstellung:

Alternative Möglichkeiten zur Reduzierung der Spaltverluste.

Lösungsansatz:

Konturierung der Meridiankontur in Turbinen

Vorgehensweise:

In das Vorhaben integrierter Designprozess:

- Gekoppelte experimentelle und numerische Untersuchung zur Ermittlung einer optimierten Kontur
- Numerische Optimierung der Meridiankontur
- Praktische Umsetzung an der Versuchsturbine und Validierung

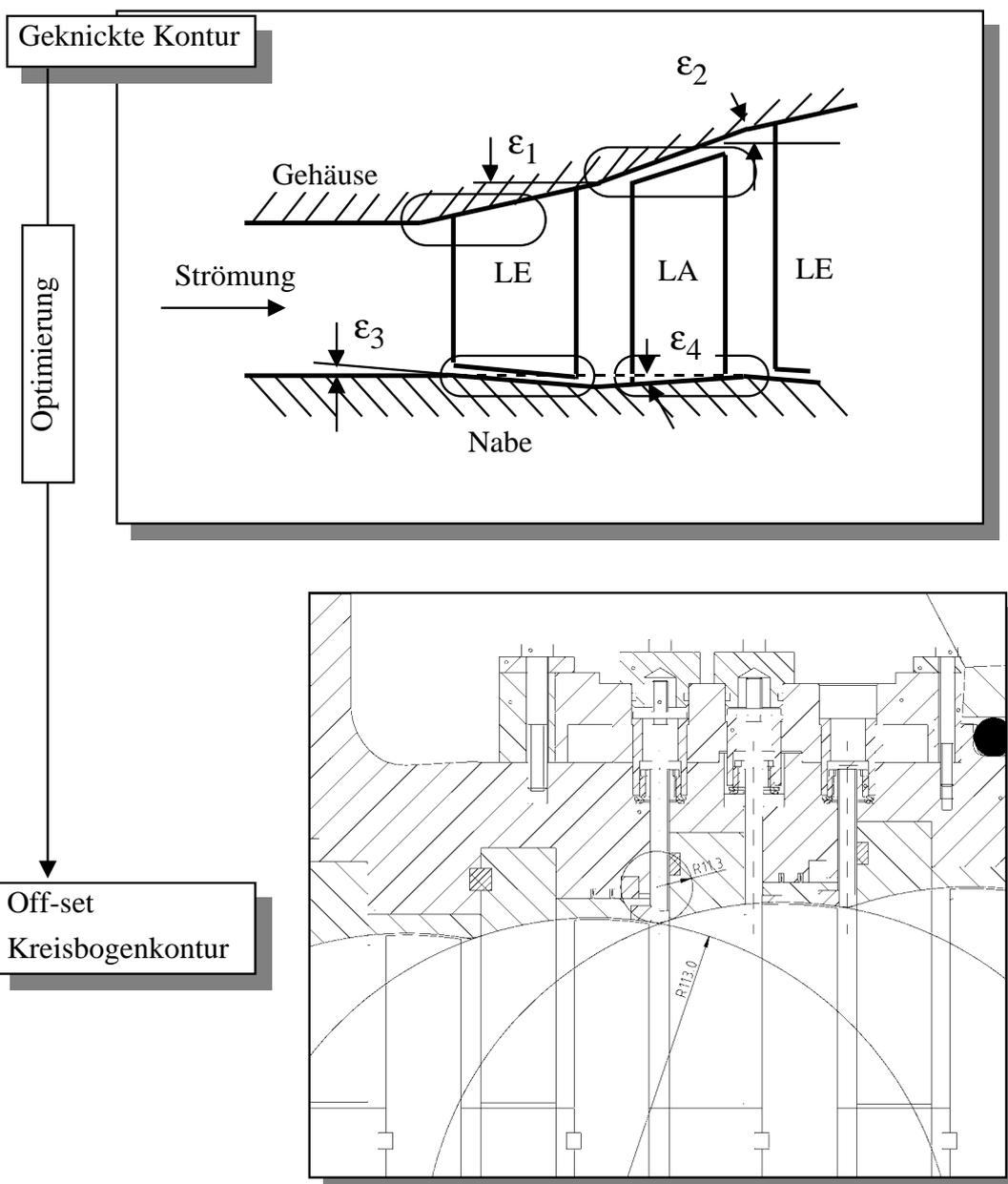
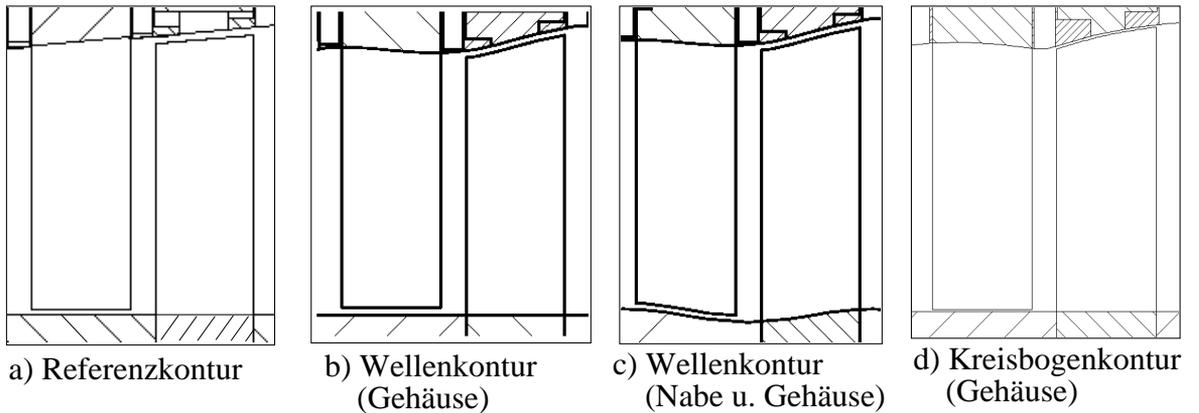


Bild 1: Ziel des Vorhabens und Vorgehensweise

Numerisch untersuchte 1-stufige geometrische Konfigurationen:



Numerisch untersuchte 4-stufige geometrische Konfigurationen:

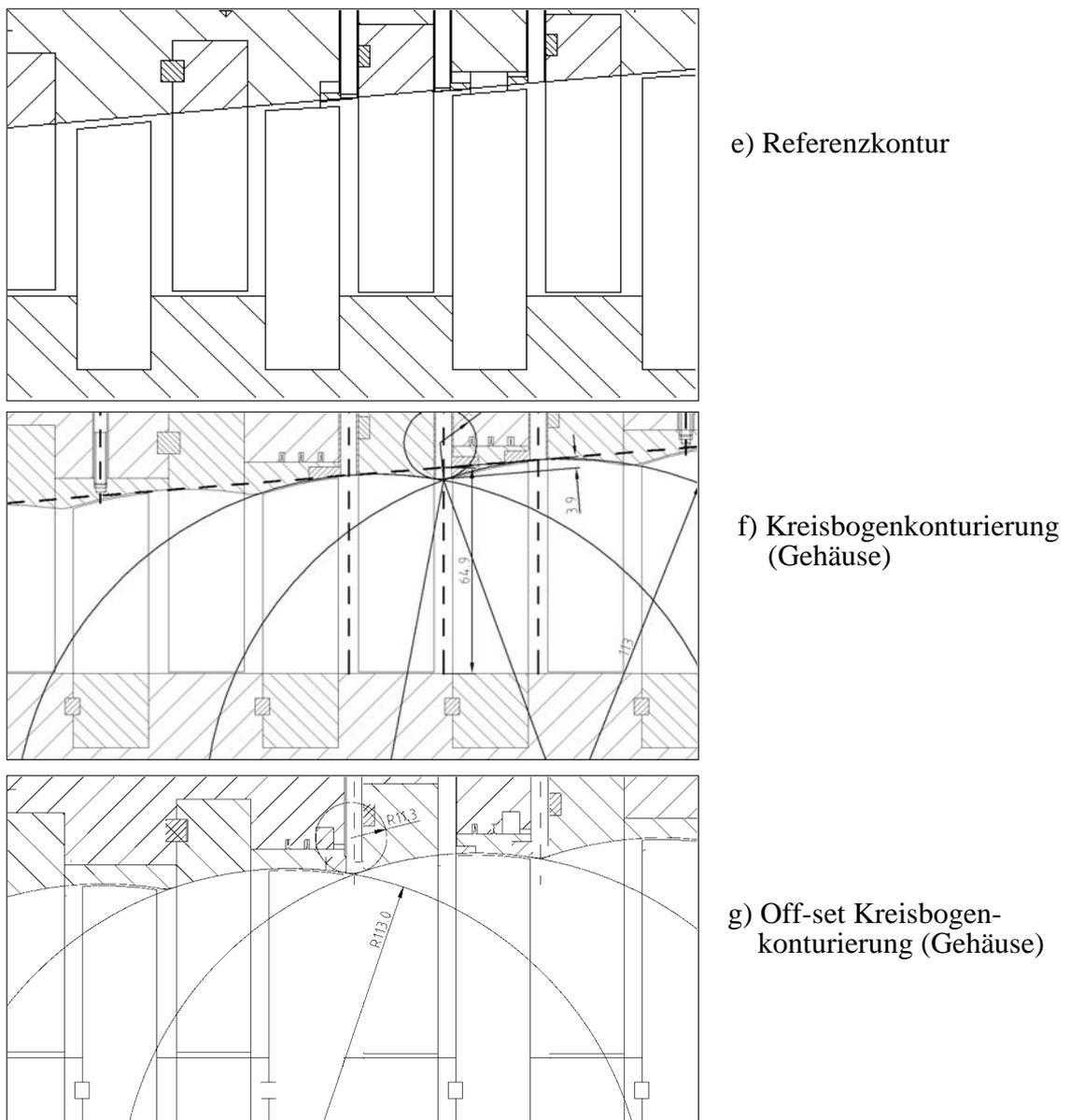
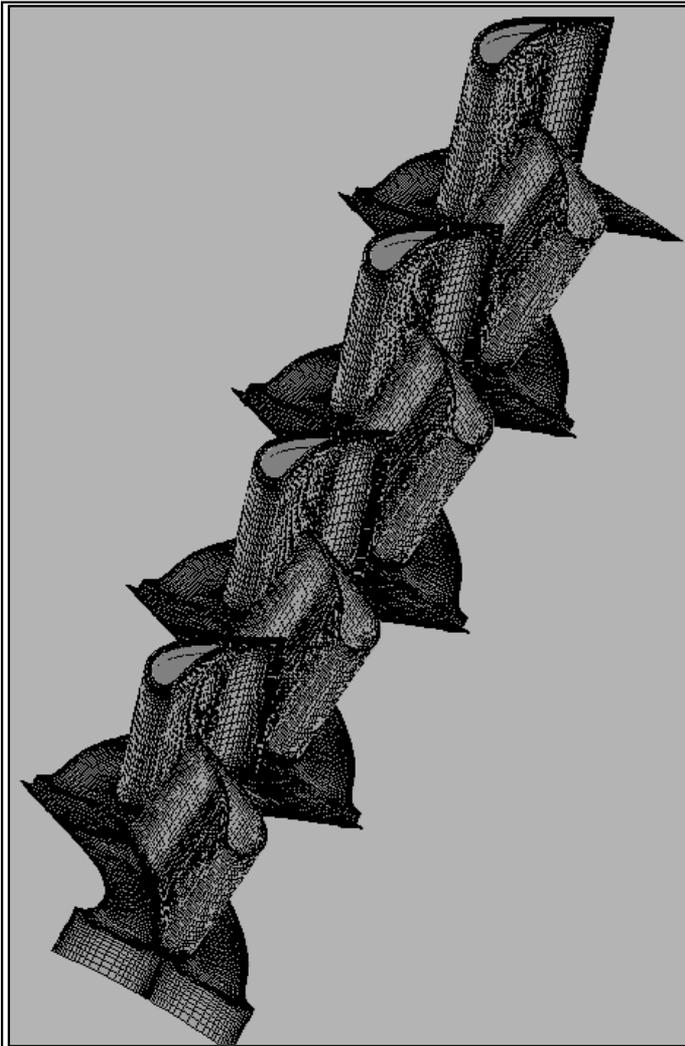
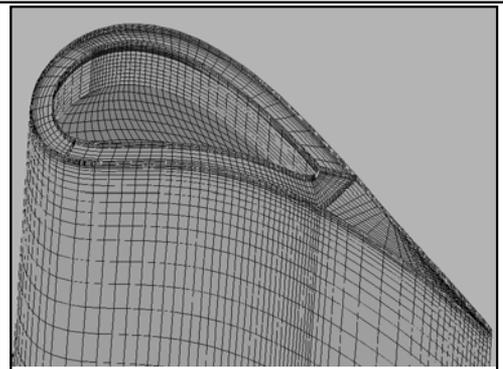


Bild 2: Numerisch untersuchte Meridiankonturen



Netzdaten:

- ca. 1,4 Mio Netzknoten
- Multiblockgitter mit 42 Blöcken (je 3 für ein Leitgitter, 7 je Laufgitter, An- und Abströmblock)
- H-Netz-Topologie für die Strömungskanäle
- Abbildung und Vernetzung der hochkomplexen Geometrie mit kommerziellem 3D-CAD/Vernetzungs-Tool
- identische Netztopologie sowohl für Referenzkontur als auch für die kreisbogenförmig konturierten Gehäusekonturen



Detail: Kronenschärfung

- Vernetzung der Kronenschärfung und des Radialspaltes (6 Knotenebenen) für die Laufschaufeln (1 Quasi-O-Netz, 2 H-Netze)

Randbedingungen für die Berechnungen:

- Drehzahl: 4995 U/min

Design:

- Drallfreie Anströmung
- Totaler Eintrittsdruck $p_{\text{tot}} = 1.52 \text{ bar} = \text{konst.}$
- Tot. Eintrittstemperatur $T_{\text{tot}} = 352,4 \text{ K} = \text{konst.}$
- Stat. Austrittsdruck $p_s = 1.0538 \text{ bar} = \text{konst.}$

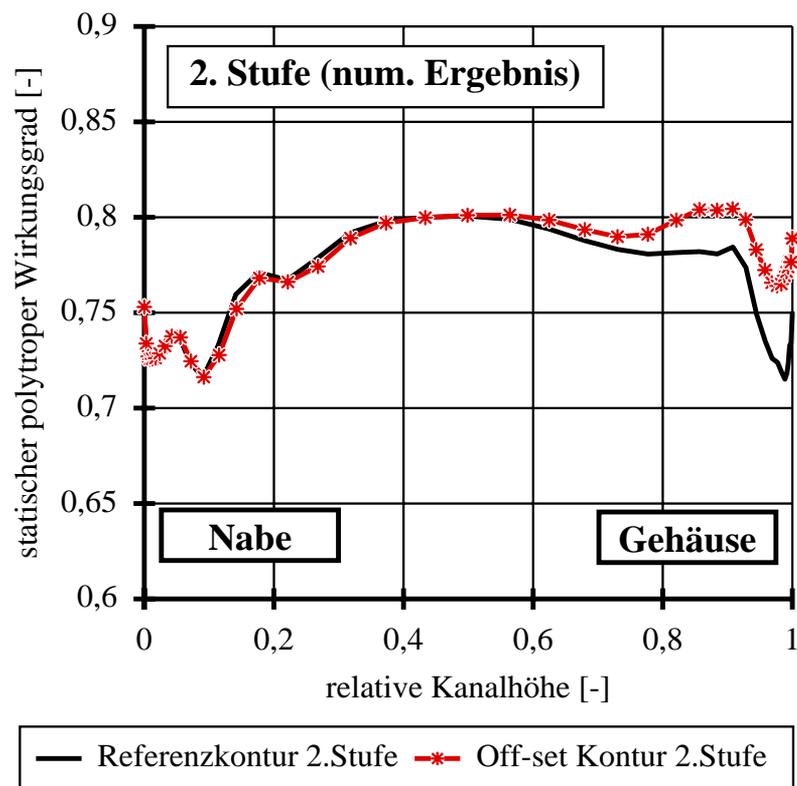
=> Durch die Vorgabe konstanter Randbedingungen an Ein- und Austritt können durch eine Gehäusekonturierung hervorgerufene Effekte separiert werden.

Validierung (Off-set Kontur):

- Randbedingungen aus dem Experiment

Bild 3: Berechnungsnetz und Randbedingungen der 4-stufigen Berechnungen

Vergleich: Radiale Wirkungsgradverläufe (2. Stufe)



Vergleich: Radiale Wirkungsgradverläufe (3. Stufe)

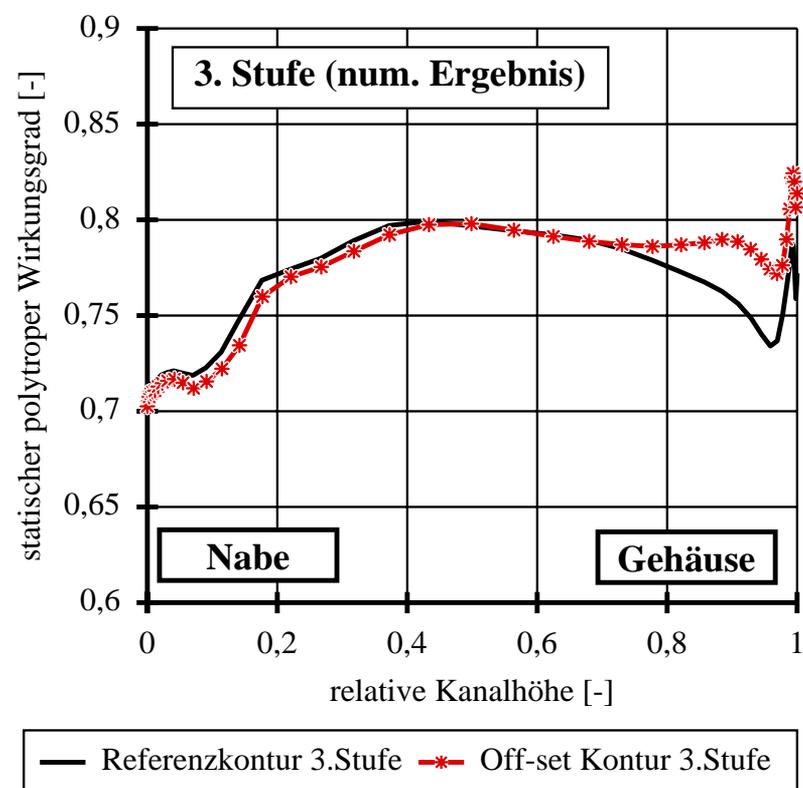
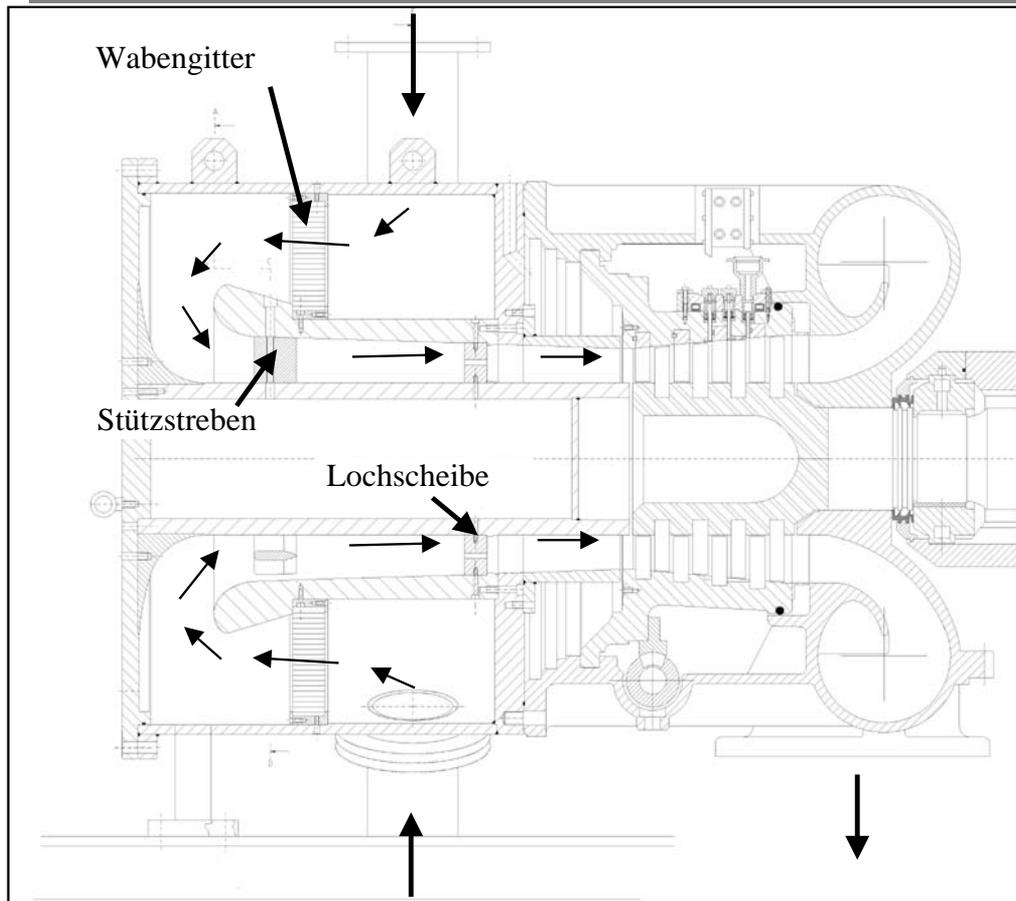


Bild 4: Radiale Wirkungsgradverläufe für die zweite und dritte Stufe (4-stuf. Berechnungen)

Versuchsstand Regula mit Einströmgehäuse



Kontrollflächen und Messtechnik

KF 10 Stationäre 5-Loch- sonde T-Sonde	KF 22 Stationäre 5-Loch- sonde Totaldruck- sonde	KF 32 Stationäre 5-Loch- sonde Totaldruck- sonde	KF 42 Stationäre 5-Loch- sonde T-Sonde
---	--	--	---

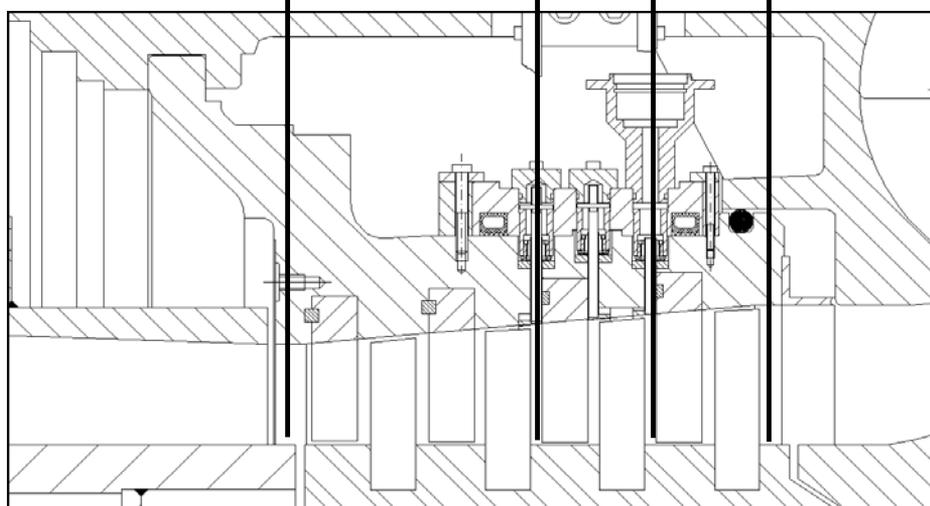
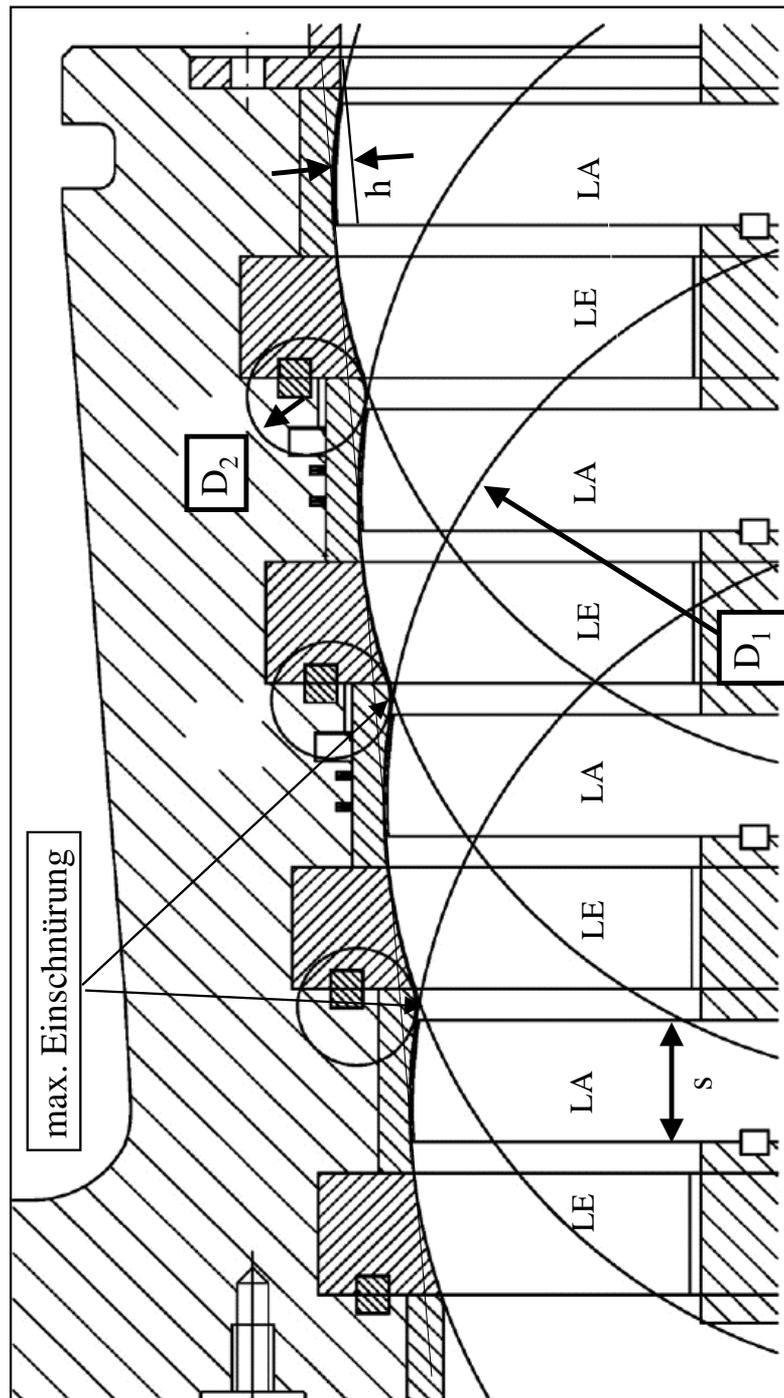


Bild 5: Versuchsaufbau, Kontrollflächen und eingesetzte Messtechnik



**Sanfte Wellenform,
aus Kreisen gebildet**

Sanfte Übergänge zwischen Lauf- und Leitrad werden mit Kreisbögen realisiert. Die maximale Einschnürung befindet sich jeweils zwischen Lauf- und Leitrad (zwischen zwei Stufen, Off-set Design).

Durchmesserverhältnis

$$D_1/D_2 = 10$$

Einschnürung zu Sehnenlänge:

$$h/s = 12.1 \%$$

Sehnenlänge: 32.4 mm

$$(s_{LE} = s_{LA})$$

Bild 6: Off-set Kreisbogenkonturierung

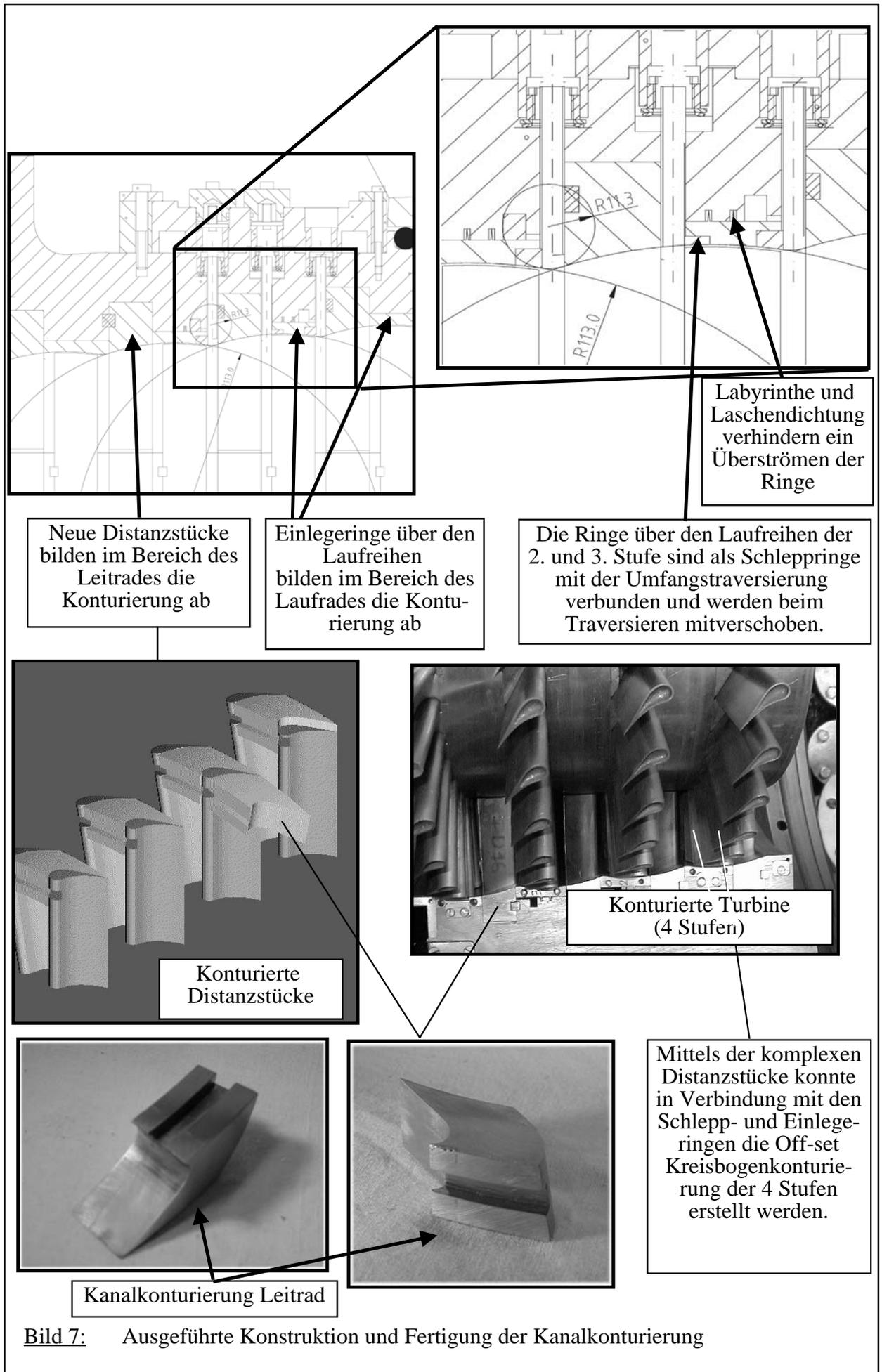


Bild 7: Ausgeführte Konstruktion und Fertigung der Kanalkonturierung

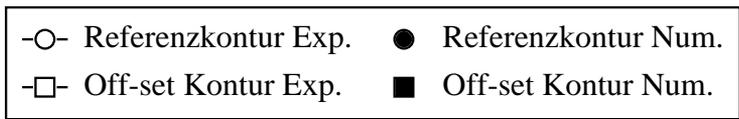
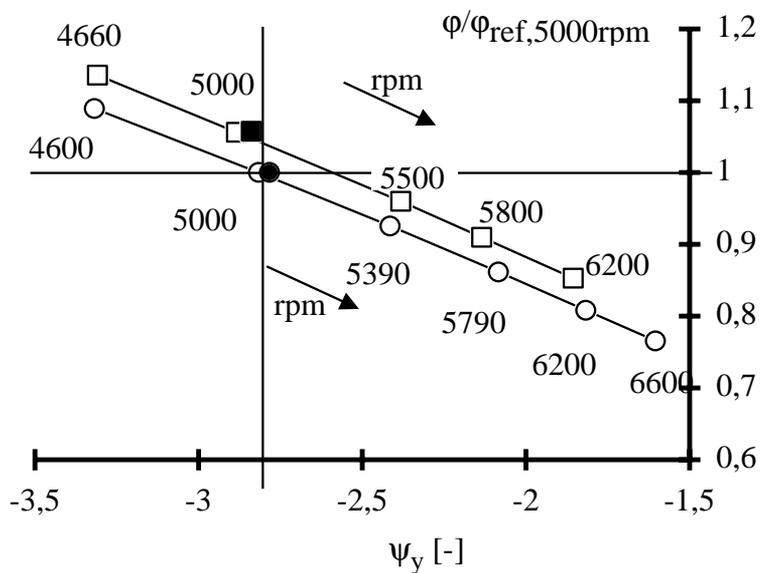
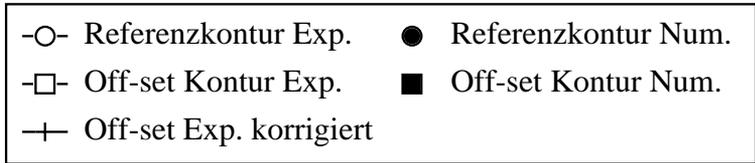
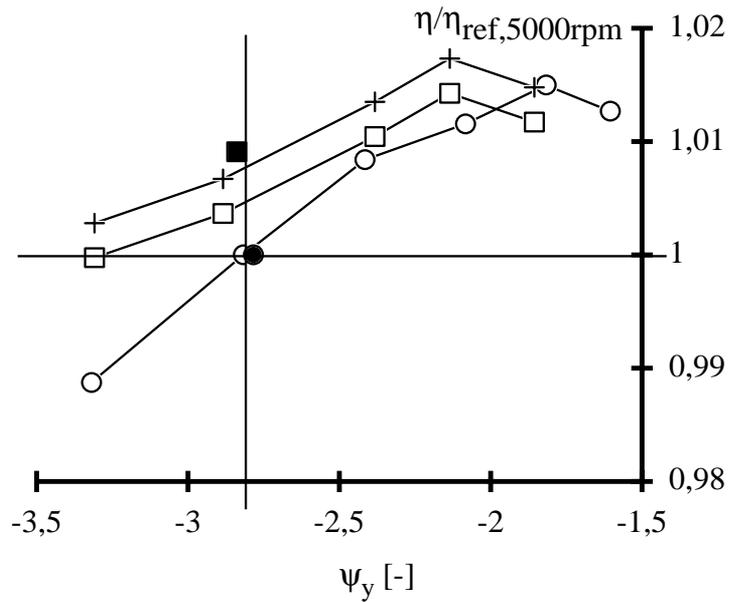


Bild 8: Betriebscharakteristiken der Off-set- und der Referenzkontur: Korrigierte Wirkungsgrade berechnet nach ALSTOM-Radialspielkorrelationen für eine axiale Verschiebung der Rotoren (Off-set und Referenzkontur) um 0.31 mm

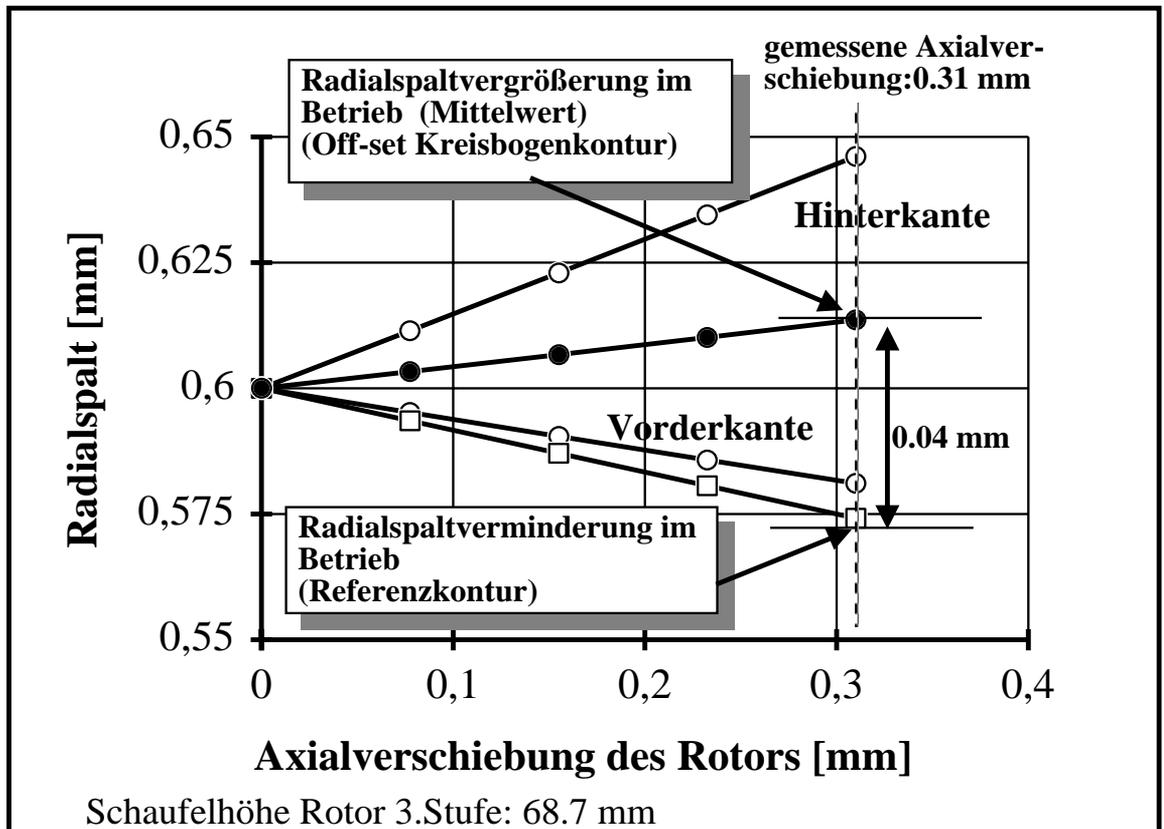
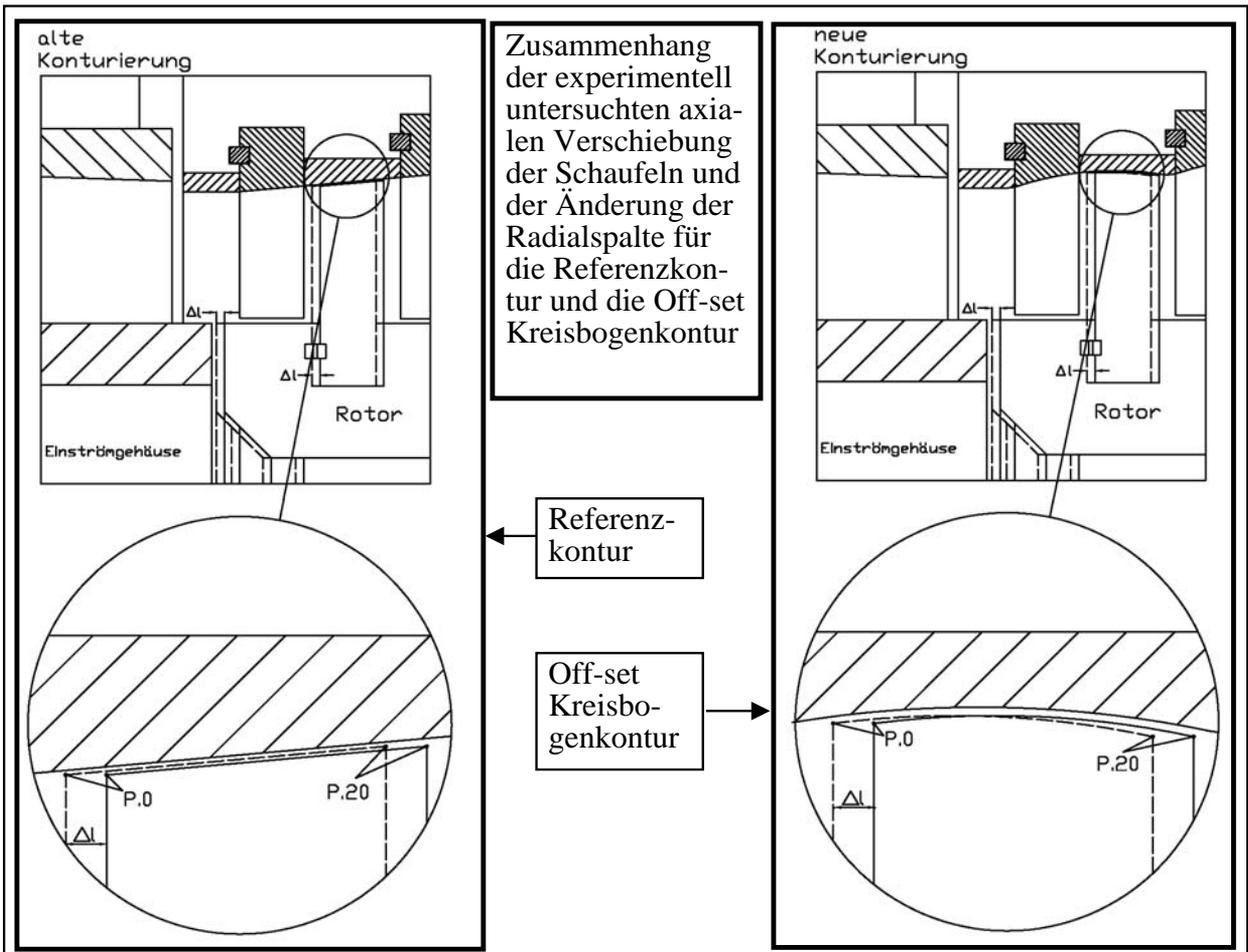
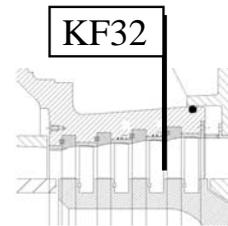
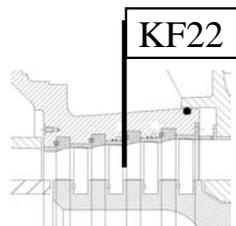
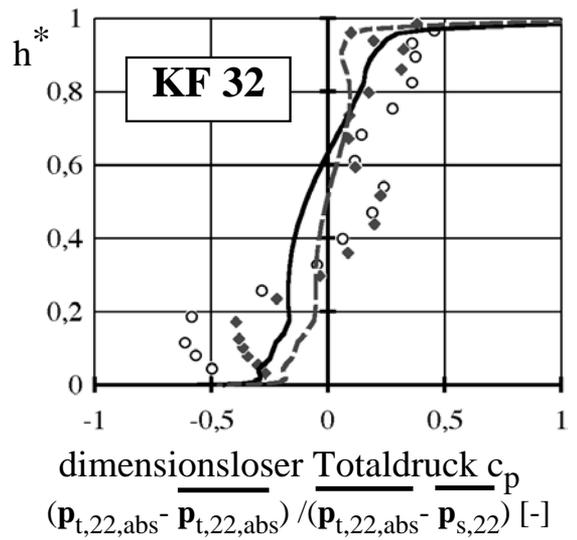
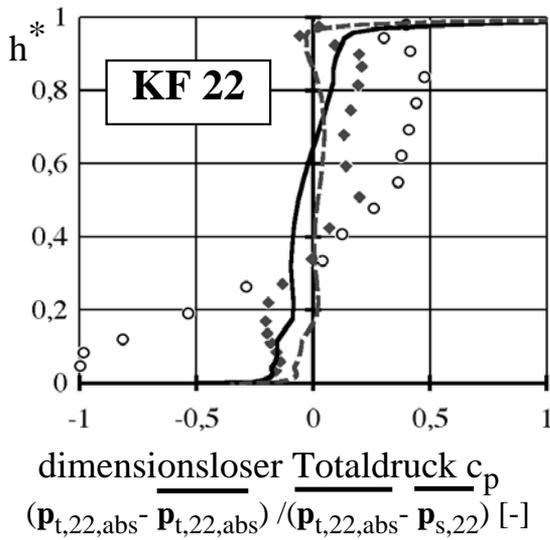
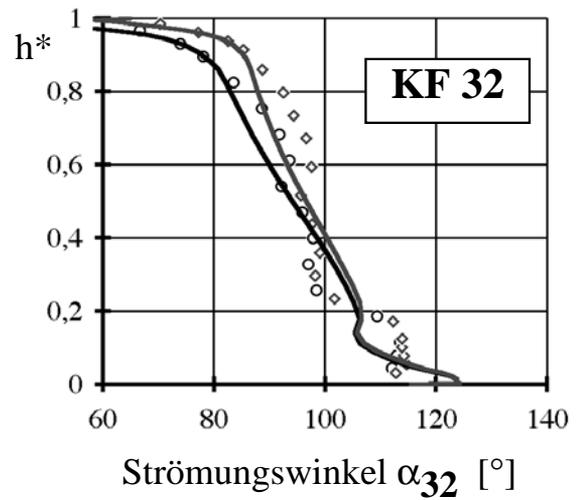
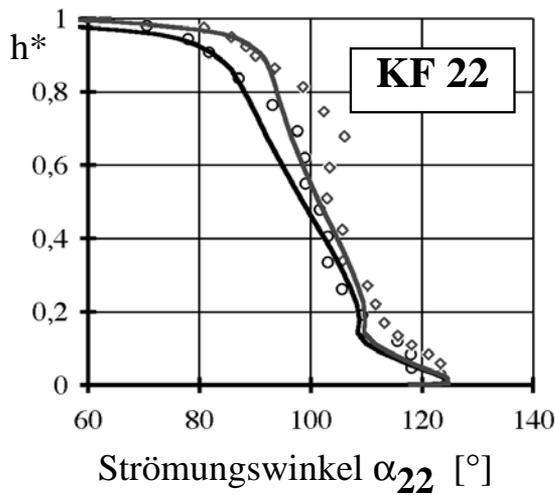


Bild 9: Untersuchung der Radialspaltänderung durch relative axiale Verschiebung des Rotors beim Aufheizen der Turbine



- über den Umfang gemittelter experimenteller Wert (Referenzkontur)
- numerische Simulation (Referenzkontur)
- ◆ über den Umfang gemittelter experimenteller Wert (Off-set Kreisbogenkontur)
- - - numerische Simulation (Off-set Kreisbogenkontur)

Bild 10: Vergleich der numerischen Simulationen und der experimentellen Ergebnisse der stationären Sondenmessung bei 5000 U/min

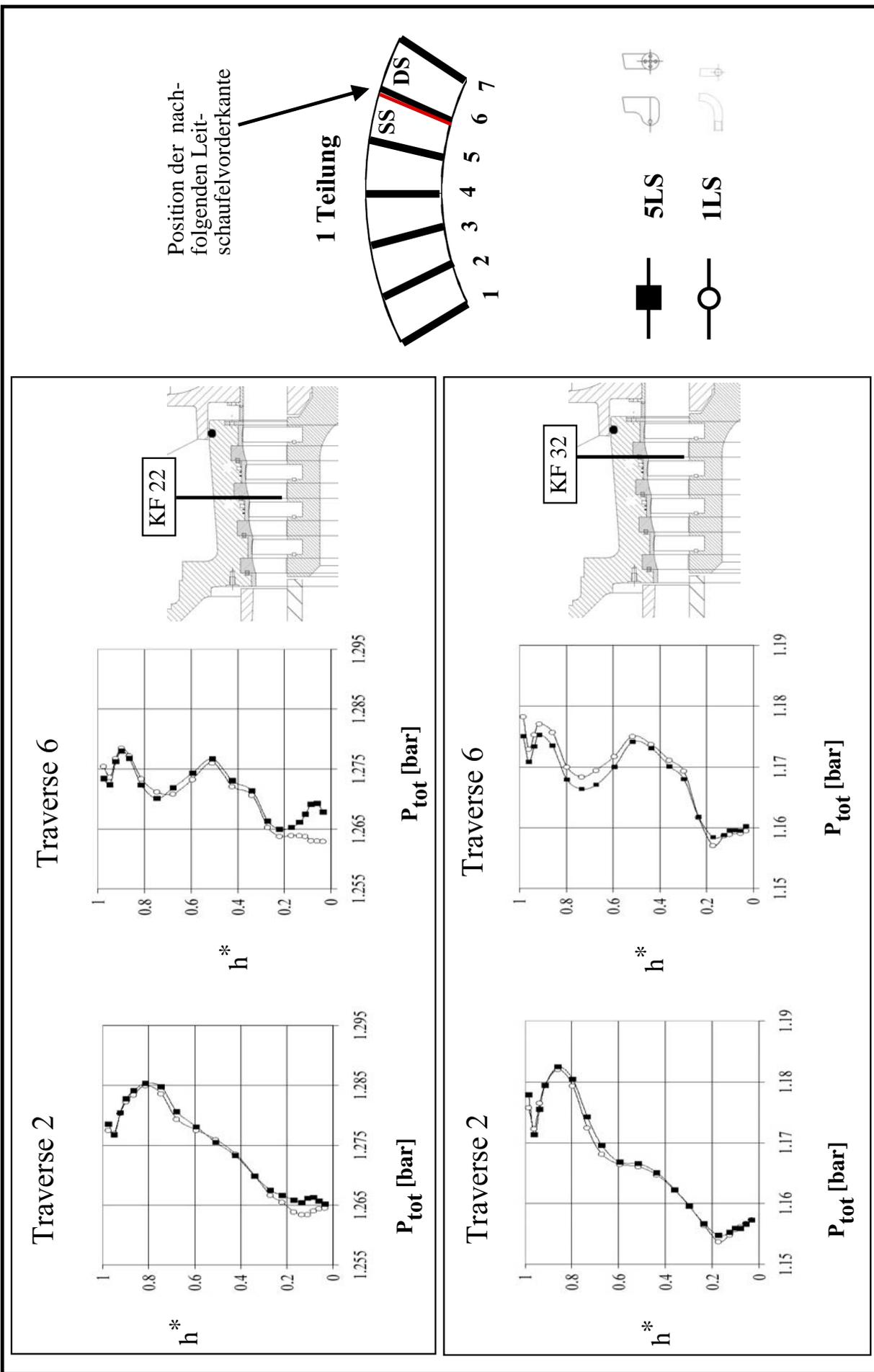
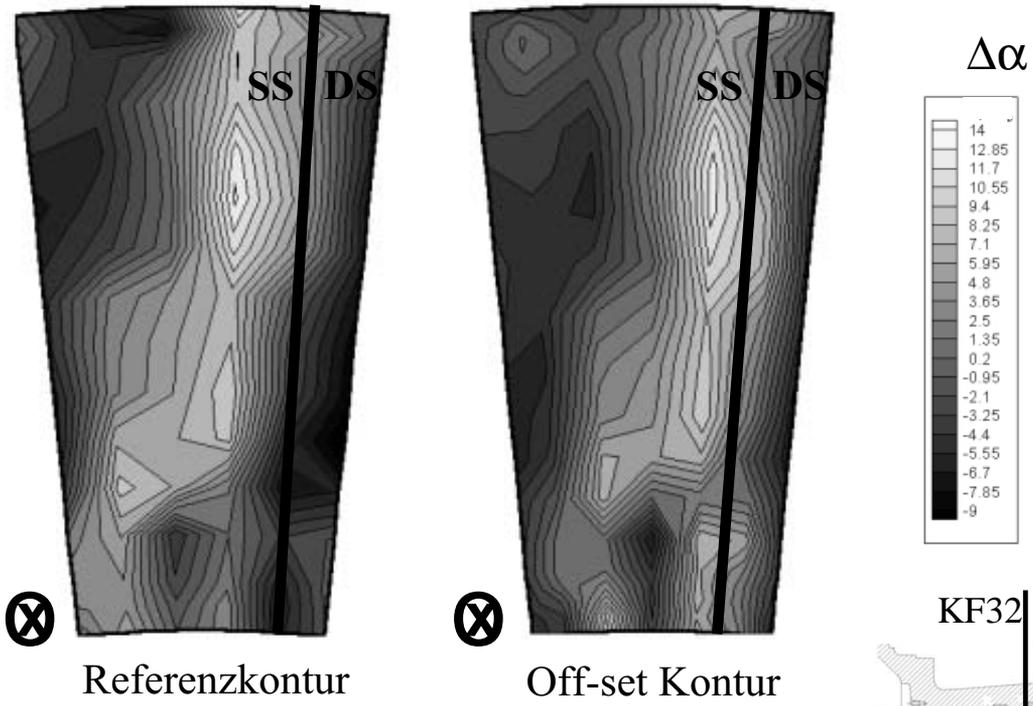


Bild 11: Vergleich der Totaldrücke in KF22 und KF32, gemessen mit 5-Lochsonde und 1-Lochsonde, in je einer Umfangsposition vor der nächsten Leiterschaukelvorderkante und in der freien Strömung für KF22 und KF32.

Messebene KF32



Messebene KF32

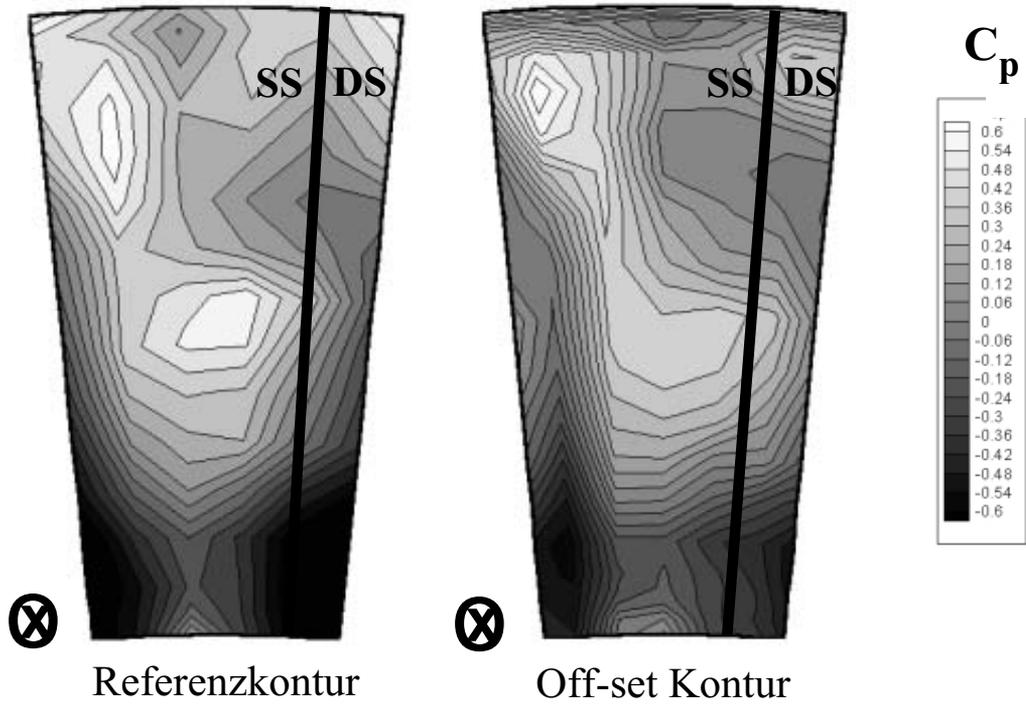


Bild 12: Abweichung des lokalen Umfangswinkels α vom Mittelwert (oben) und bezogener Totaldruckverlauf C_p (unten) über eine Teilung in Messebene KF32. links: Referenzkontur, rechts: Off-set Kreisbogenkontur

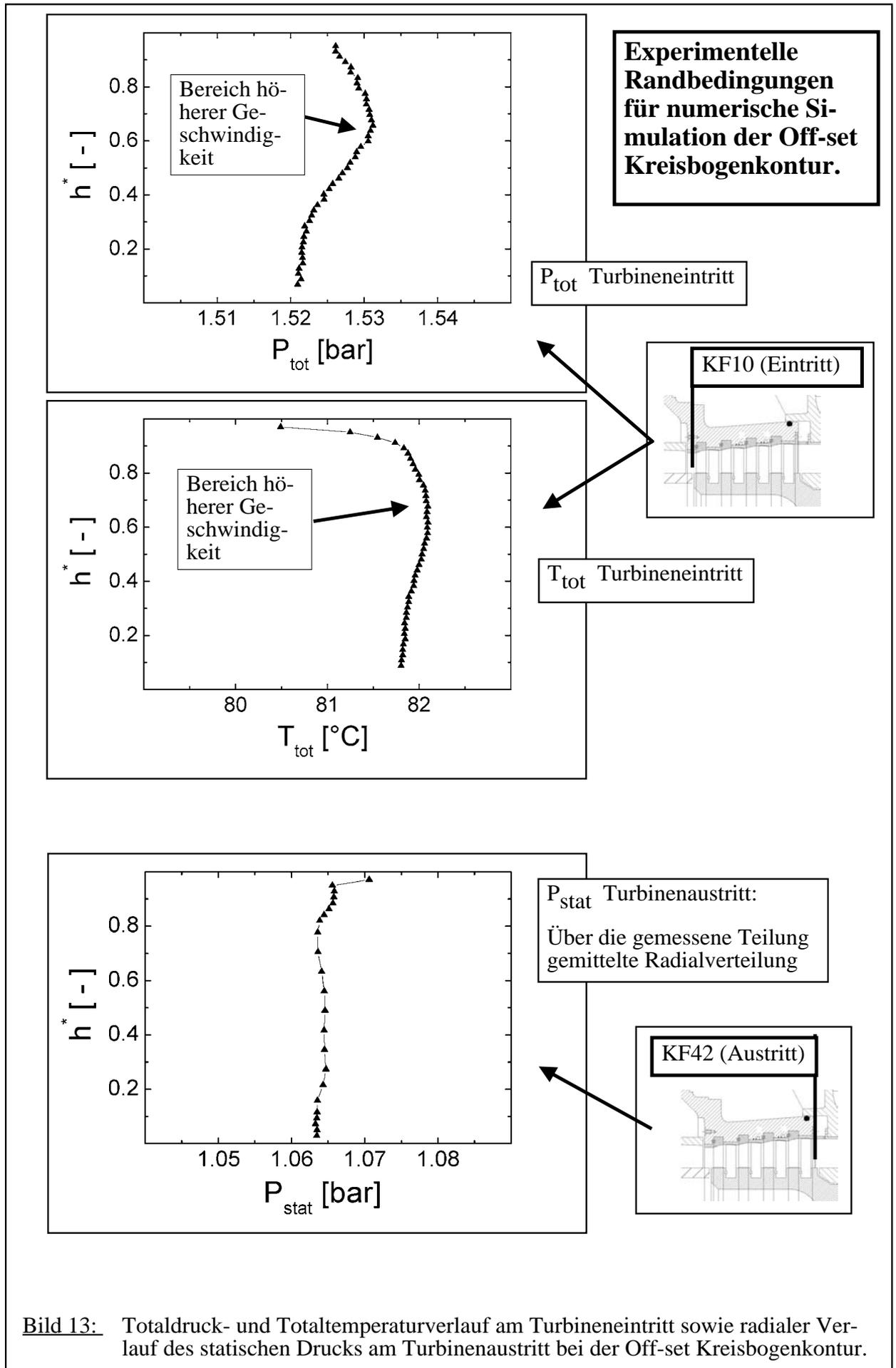
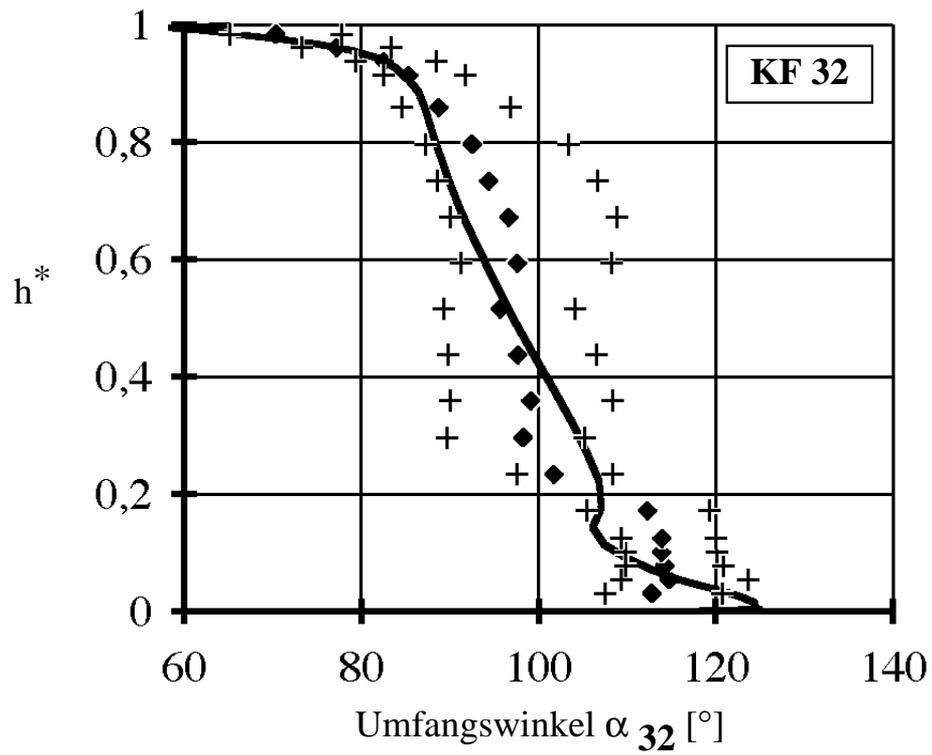
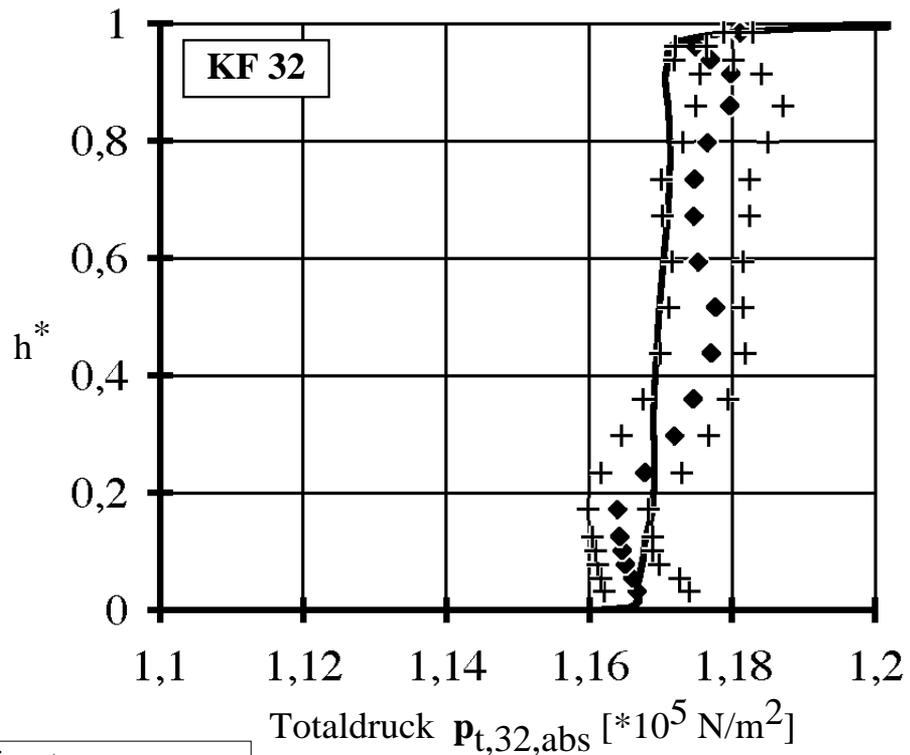


Bild 13: Totaldruck- und Totaltemperaturverlauf am Turbineneintritt sowie radialer Verlauf des statischen Drucks am Turbinenausritt bei der Off-set Kreisbogenkontur.

Umfangswinkel α :



Totaldruckverteilung:



- ◆ Experiment
- + Experiment min/max
- Numerische Simulation

Bild 14: Ergebnisse der Validierungsrechnungen zum Vergleich von Numerik und Experiment hinter der dritten Stufe für die Off-set Kreisbogenkontur