

Heft R 514 (2001)

Informationstagung Turbinen, Herbst 2001, Dresden-Radebeul

INSTITUT FÜR DAMPF- UND GASTURBINEN

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

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

---

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

Thema : Aerodynamische Entlastung der Schaufelspalte durch Konturierung  
des Meridiankanals

Kennwort : Spaltentlastung 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-Beschaukelung, 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-Schaukel 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 ermittelte Kontur auf die Versuchsturbine 4-stufig übertragen und mit dieser Modifikation erneut vermessen. In Verbindung mit den numerischen Untersuchungen lässt sich auf diese Weise der Wirkungsmechanismus der Konturierung umfassend untersuchen.

Somit kann das langfristige Ziel der Vorhaben "Spaltentlastung", "Spaltentlastung II" sowie "Spaltentlastung II+", die praktische Umsetzung eines in das Vorhaben integrierten Design-Prozesses, erreicht werden.

### 4. Theoretische Arbeiten

Die Bearbeitung des theoretischen Projektteils erfordert die Anwendung eines dreidimensionalen Navier-Stokes-Lösers mit einem zuverlässigen und genauen Rechenschema. 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, Durchmesser Verhältnis 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 Verteilung, auf die Schaufelhöhe bezogen, 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 lässt sich numerisch bei 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 werden soll. Diese Strömungssimulation liegt damit von der Größe und vom zeitlichen Aufwand an der Grenze des auf dem Landeshöchstleistungsrechners des Rechenzentrums der RWTH Aachen machbaren.

Bild 4 zeigt Ergebnisse der Nachrechnung der Referenzkontur im Vergleich zu dem entsprechenden Experiment. Hierbei werden in den Kontrollflächen nach der zweiten, der dritten sowie hinter der vierten Stufe jeweils der Totaldruck und der Abströmwinkel über der relativen Kanalhöhe ausgewertet. Die Kreise stellen hierbei umfangsgemittelte Messergebnisse auf den jeweiligen Radialpositionen dar. Die Pluszeichen links und rechts vom Kreis sind ein Maß für die Schwankungsbreite der Messergebnisse über dem Umfang. Generell wird sowohl das Niveau als auch der Verlauf der Strömungsfeldgrößen sehr gut getroffen. Im Nabenbereich werden die Verlustgebiete durch den nicht modellierten Nabenspalt der Leitschaufeln erwartungsgemäß nicht erfasst. Insgesamt bestätigt diese Nachrechnung die Annahme, dass das gewählte Vorgehen und der gewählte Strömungslöser zu belastbaren Simulationsergebnissen führt.

Für die Kreisbogenkontur lässt sich auch mit 4-stufigen Berechnungen keine Wirkungsgrad-

verbesserung über die gesamte Maschine oder über einzelne Stufen nachweisen. Der Grund hierfür liegt in einer für diese Beschau felung unter den gewählten Randbedingungen ungünstigen Gehäusekontur, was anhand von gehäusenahen Profildruckverteilungen der dritten Laufschau fel (Bild 5) gezeigt werden kann. In Bild 5a sind die Profildruckverteilungen von Referenzfall und der Kreisbogengehäusekonturierung einander gegenübergestellt. Wie ursprünglich im Vorhaben "Spaltentlastung" beabsichtigt, kommt es durch die Konturierung insbesondere im vorderen Schau felbereich zu einer Absenkung des statischen Druckniveaus. Ebenfalls wird ein Verringerung der treibenden Druckdifferenz über dem Spalt im mittleren und hinteren Profilbereich erzielt. Dies korrespondiert zu der bereits im Vorhaben Spaltentlastung II nachgewiesenen verminderten Spaltströmung. Allerdings wird durch die druckseitigere Anströmung des durch eine verhältnismäßig dicke Vorderkante charakterisierten Profils (Erhöhung der Axialkomponente der Geschwindigkeit), die treibende Druckdifferenz im vorderen Schau felbereich z.T. stark vergrößert, so dass die Spaltströmung hier forciert wird. Der Spaltwirbel wird daher bereits früher generiert und kann in Interaktion mit anderen Sekundärströmungsphänomenen treten. Insgesamt überwiegen also für diese geometrische Konfiguration die nachteiligen Effekte.

Die Verlagerung der gehäusenahen Schau felbelastung nach hinten anstatt, wie bisher, nach vorne bietet hier Abhilfe. Dieser Ansatz führt auf eine geometrische Gestaltung des Gehäuses, bei der die bisherige Kontur um ein Schau felgitter axial verschoben angebracht wird. (Bild 2g). Auswertungen der Profildruckverläufe zeigen, dass es in der Tat gelingt, die Schau felbelastung in gehäusenahen Regionen noch hinten zu verlagern (Bild 5). Dabei wird ein verschlechterte Anströmung der gehäusenahen Regionen sowie eine vergrößerte Spaltströmung im hinteren Schau felbereich bewusst in Kauf genommen, da die Spaltströmung insbesondere im vorderen und mittleren Schau felbereich signifikant reduziert werden kann. So zeigt eine Sekundärströmungsanalyse im saugseitig gehäusenahen Bereich der Laufschaufel, dass der Spaltwirbel bei der Off-set Kreisbogenkontur im Vergleich zum Referenzfall und zur ersten Kreisbogenkontur wesentlich später gebildet (Bild 6) und der damit verbundenen Sekundärströmungsverlust reduziert wird.

Bild 7 (oben) zeigt den resultierenden radialen Verlauf des Totaldruckes im Absolutsystem hinter dem Laufgitter der dritten Stufe für die drei untersuchten Konturierungen. Für die zunächst untersuchte Kreisbogenkontur ergibt sich eine Verschlechterung des Strömungsfeldes, der Totaldruckverlauf erhält eine geringere Steigung über der Kanalhöhe verglichen mit der Referenzkontur. Deutlich erkennbar ist der homogenisierte Totaldruckverlauf im Fall der Off-set Kreisbogenkontur, der sich in einem vergleichsweise konstanteren Wert über der Kanalhöhe insbesondere in Gehäusenähe widerspiegelt. In der Folge wird die nachfolgende Stufe homogener angeströmt, was zu einem auf den Referenzfall bezogenen Wirkungsgradgewinn von ca. 1,5% führt (Bild 7, unten). Darüberhinaus lässt sich Bild 7 (unten) entnehmen, dass die Berechnungen weitestgehend auskonvergiert sind, da das Kriterium des isentropen Wirkungsgrades über die gesamte Beschau felung aufgetragen über der Iterationszahl ein strenges Konvergenzkriterium für Mehrstufen-Simulationen darstellt.

## 5. Konstruktive Umsetzung der Kanalkonturierung

Ziel der experimentellen Untersuchungen ist die Umsetzung und Etablierung des numerisch optimierten Designprozesses. Somit können sowohl die strömungsmechanisch und wirkungsgradmäßigen Konturierungseffekte messtechnisch belegt als auch die numerischen Optimierungsberechnungen validiert werden. Bild 8 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. Das Bildungsgesetz und die konstruktive Umsetzung im Bereich der 3. Stufe zeigt Bild 9.

Die fertigungstechnische Umsetzung der 4-stufigen Gesamtkonturierung in der Turbine wurde im Bereich der Leitschaufeln durch neue Distanzstücke zwischen den Schaufeln realisiert. Im Anschluss an die Prüfung des Fertigungsprozesses der komplizierten 5-Achs-CNC-Fräswerkstücke wurden diese gefertigt und abschließend aufwendig einzeln an die Laufschaufeln angepasst. Die Distanzstücke bilden mit den Einlegeringen und den Schleppringen über den Laufrädern die neue Kontur der Turbine, Bild 10. Hierbei sind die Schleppringe mittels der Sondendurchführungen über einer Teilung 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 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 für den Test der Konturierung jeder einzelnen verwendeten Schleifscheibe, der genauen Ausrichtung der Scheiben zum Rotor und die Bestimmung der exakten Anschleifpositionen der Schleifscheiben an den Schaufeln entwickelt. Insbesondere die Bestimmung des exakten Durchmesser des Rotors während des Schleifvorganges erforderte aufgrund der ungeraden Schaufelzahl pro Stufe einen hohen Aufwand. Neben diesen Anpassungen wurden die Eintritts- und Austrittsgeometrie der Turbine an die geänderte Geometrie der Turbine angepasst.

Bei der Fertigung der neuen Konturierungen kam es aufgrund von verspäteten Lieferungen und Fehllieferungen der bei externen Firmen gefertigten komplizierten 5-Achs-CNC-Fräswerkstücke und der konturierten CNC-Schleifscheiben zu mehrmonatigen Verzögerungen. Weitere Verzögerungen ergaben sich aufgrund der notwendigen Einzelanpassung der Distanz-

stücke an die Leitschaufeln sowie die sehr aufwendigen Prüfverfahren, die teilweise während der Fertigung noch weiter optimiert wurden. Durch diese Maßnahmen wurde die notwendige Genauigkeit der Kontur erzielt.

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 unveränderten 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

Nach Inbetriebnahme der Turbine mit der neuen Konturierung wurden Experimente zur Kennlinienbestimmung durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen ist ein Vergleich der Kennlinien der Off-set Kreisbogenkontur mit der Referenzkontur zur Validierung der numerischen Rechnungen. Um eine optimale Vergleichbarkeit der Messungen mit alter und mit neuer Geometrie zu gewährleisten, wurde die Messtechnik der ursprünglichen Untersuchungen unverändert übernommen. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass die systematische Charakteristik der Messtechnik unverändert in den Experimenten an der Referenzkontur als auch bei der neuen Konturierung reproduziert wird. Erste Messungen zur Kennlinienbestimmung der neuen Konturierung zeigten eine Wirkungsgradverschlechterung bezogen auf die Referenzkontur. Dieses Ergebnis wurden mit dem begleitenden Arbeitskreis diskutiert. Man kam überein, dass dieses Ergebnis eingehend geprüft werden muss. Ein wichtiger Teil dieser Prüfung war die Untersuchung der Radialspalte über den vier Stufen im Betrieb. Aufgrund der Wärmeausdehnung von Gehäuse und Rotor kommt es beim Aufheizen zu Verschiebungen in den axialen Schaufelpositionen. Diese führen zu Änderungen in den Radialspalten. Da diese Änderungen aufgrund der unterschiedlichen Geometrie von Referenzkontur und Off-set Kreisbogenkontur unterschiedlich ausfallen, wurde der axiale Versatz des Rotors zusätzlich zu den vorgesehenen Arbeiten experimentell untersucht. Es wurde eine spezielle Messeinrichtung konzipiert und gefertigt, die die Messung des Axialspiels zwischen Rotor und Leitrad (Gehäuse) beim Betrieb ermöglichte. Die Messungen ergaben Verschiebungen der axialen Schaufelpositionen von weniger als 0,35 mm und eine daraus resultierende Veränderung des Radialspaltes von kleiner 0,05 mm (Abb. 11). Die Auswirkung der Spaltänderung wird derzeit noch eingehender mit von der Industrie zur Verfügung gestellten experimentell ermittelten Korrelationen untersucht.

Zeitgleich wurden die Messwerverfassung und Datenreduktion geprüft. Dabei zeigte sich ein Fehler in der Bestimmung des sehr sensiblen Austrittsdruckes, wodurch der Betriebspunkt nicht ausreichend exakt gefahren werden konnte und die Wirkungsgrade nicht mit der notwendig hohen Genauigkeit bestimmt werden konnten. Zwischenzeitlich wurde die notwendigen Verbesserungen eingebaut. Nach Wiederinbetriebnahme der Versuchsturbine wurde in der 35. KW erneut die Kennlinie der Off-set Kreisbogenkontur vermessen. Abb. 12 zeigt den Ver-

gleich der Wirkungsgrade der Off-set Kreisbogenkontur und der Referenzkontur. Hierbei ergab sich eine Verbesserung des Wirkungsgrades bei der Off-set Kreisbogenkonturierung gegenüber der Referenzkontur im mit dem Arbeitskreis abgestimmten Referenzzustand von rund 0,6 %. Die numerische Vorrausrechnung ergab rund 1,3 %. Die Interpretation der Daten ist derzeit noch nicht abgeschlossen, es handelt sich bei den Ergebnissen um vorläufige Resultate, die noch eingehend ausgewertet werden müssen.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Zwischenbericht wird der derzeitige wissenschaftliche Stand der numerischen und experimentell/konstruktiven Forschungsarbeiten im Rahmen des FVV-Forschungsvorhabens "Aerodynamische Entlastung der Schaufelspalte durch Konturierung des Meridionalkanals" 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 Meridionalkanals 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 gezeigt, dass unter den untersuchten Randbedingungen der Maschinenwirkungsgrad mit einer auf das spezifische Schaufelprofil abgestimmten Gehäusekonturierung ansteigt.

Erste Experimente zur Kennlinienbestimmung der Turbine mit geänderter Konturierung wurden durchgeführt. Dabei zeigte sich die erwartete Verbesserung des Wirkungsgrades. Weitere Analysen der Ergebnisse findet derzeit statt, bei den dargestellten Ergebnissen handelt es sich um vorläufige Resultate. Als nächstes werden gezielt ausgewählte Messserien zur Untersuchung des Strömungsfeldes durchgeführt und mit den Messungen der Referenzkontur sowie den numerischen Ergebnissen verglichen.

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Zwischenergebnis 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 wird. 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 wird 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

**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

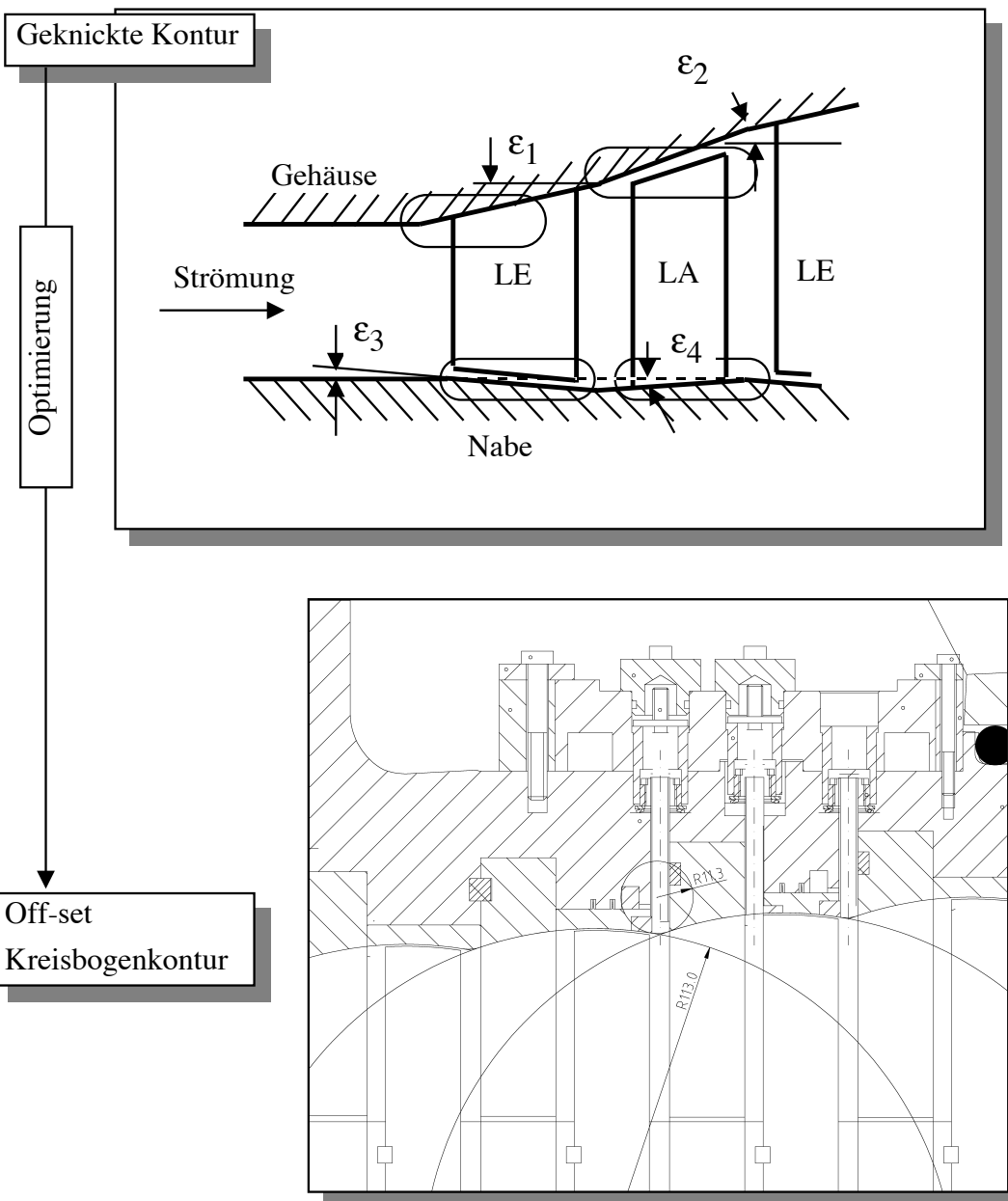
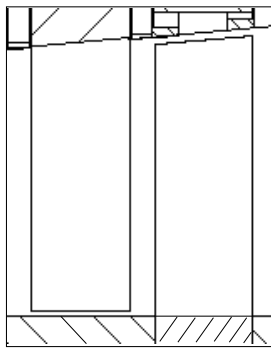
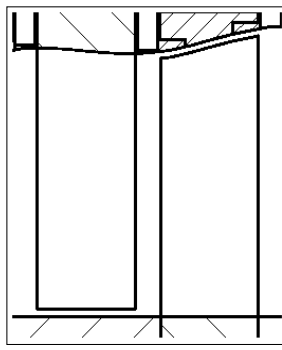


Bild 1: Ziel des Vorhabens und Vorgehensweise

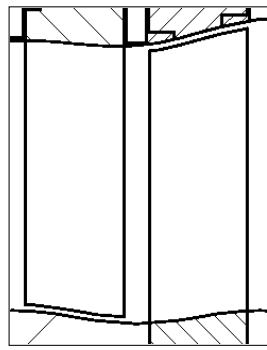
**Numerisch untersuchte 1-stufige geometrische Konfigurationen:**



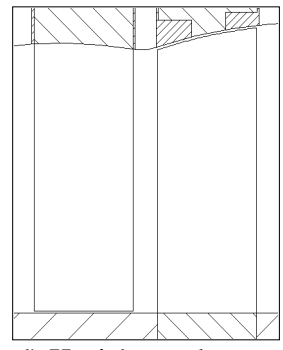
a) Referenzkontur



b) Wellenkontur  
(Gehäuse)

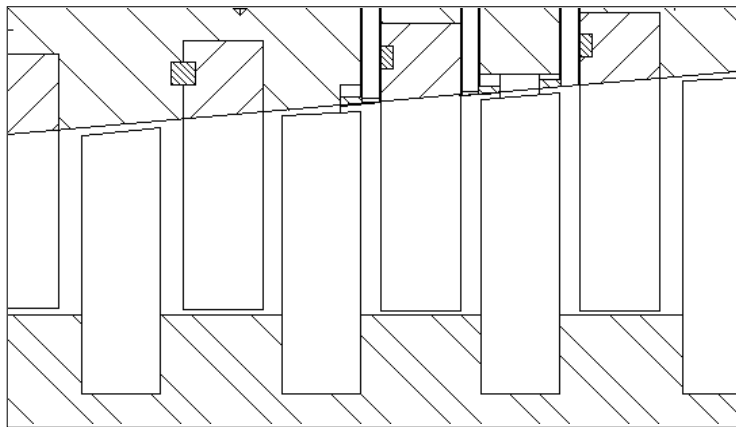


c) Wellenkontur  
(Nabe u. Gehäuse)

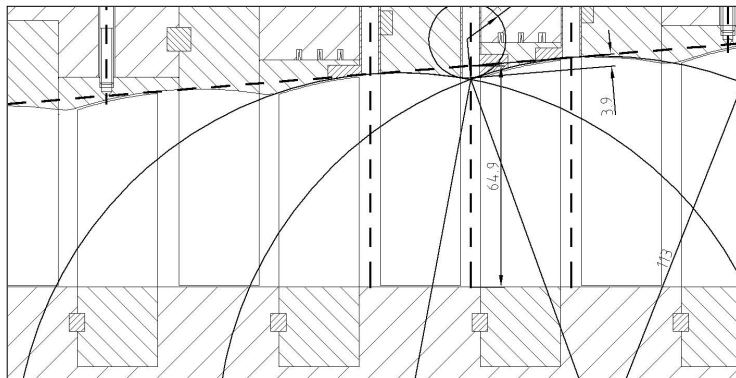


d) Kreisbogenkontur  
(Gehäuse)

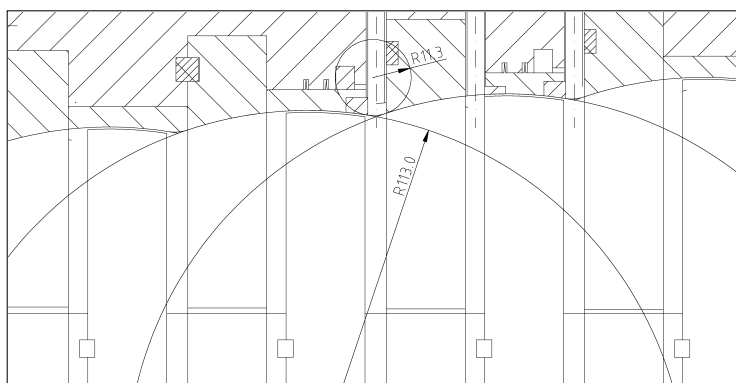
**Numerisch untersuchte 4-stufige geometrische Konfigurationen:**



e) Referenzkontur

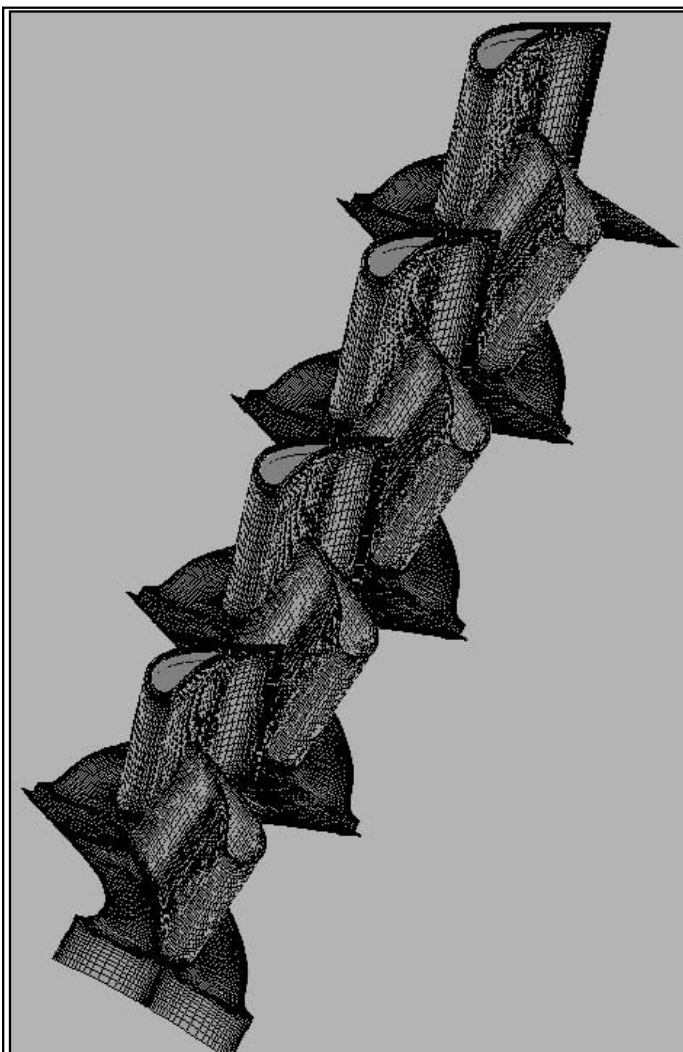


f) Kreisbogenkonturierung  
(Gehäuse)



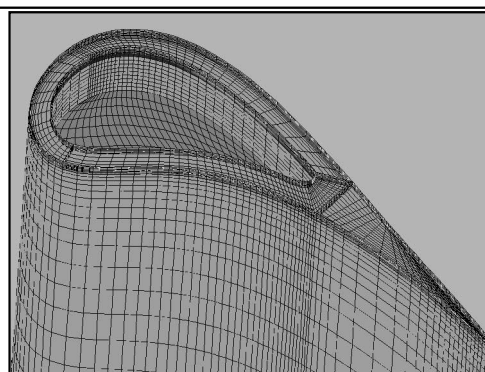
g) Off-set Kreisbogen-  
konturierung (Gehäuse)

**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**

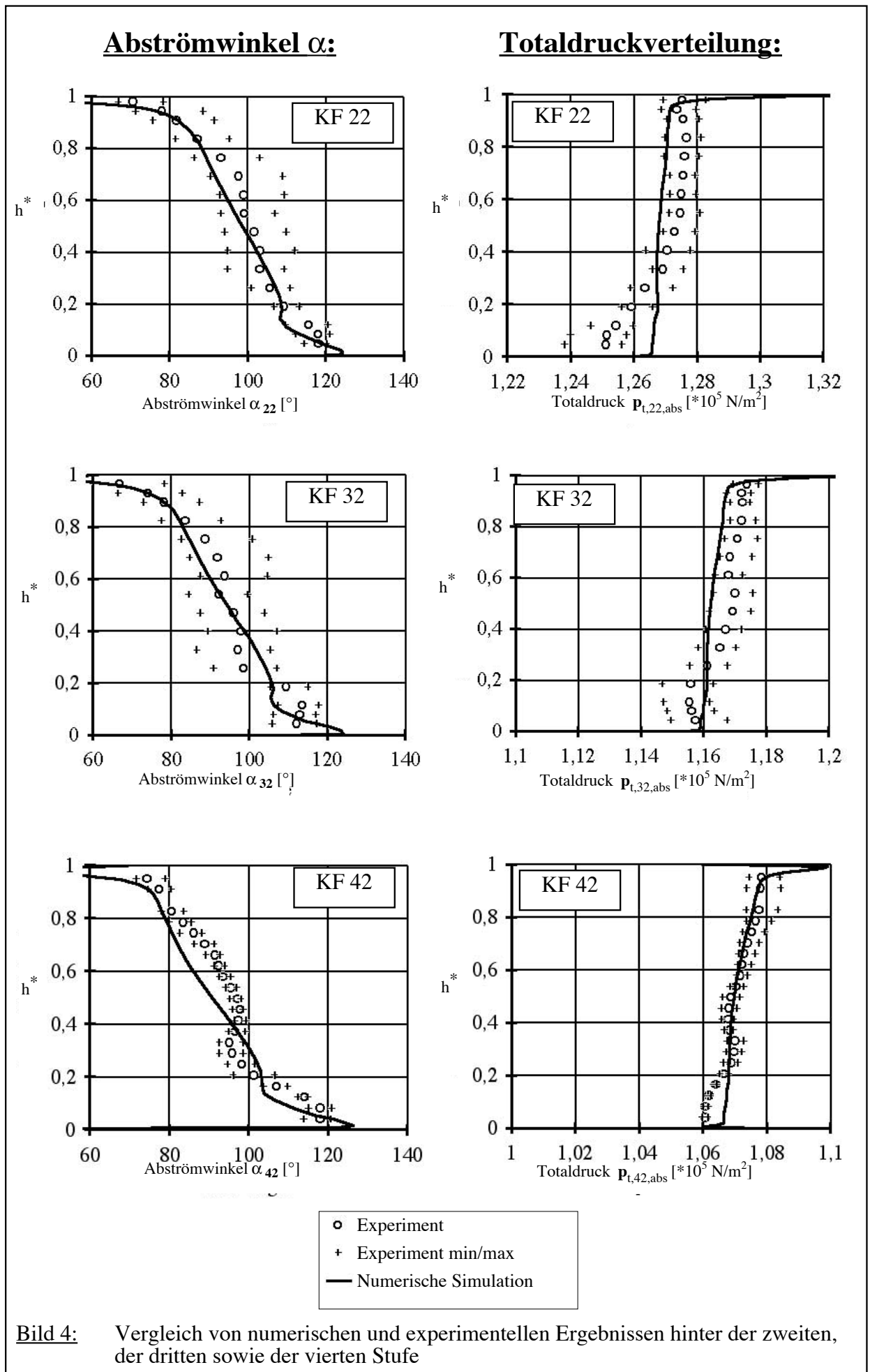
- Vernetzung der Kronenschärfung und des Radialspaltes (6 Knotenebenen) für die Laufschaufeln (1 Quasi-O-Netz, 2 H-Netze)

**Randbedingungen für die Berechnungen:**

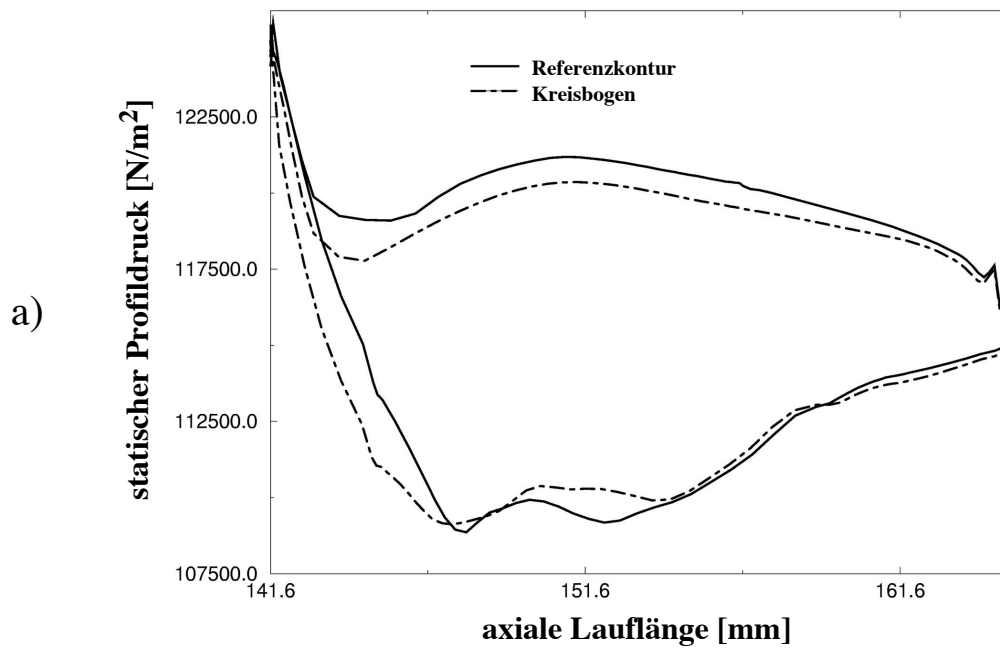
- Drehzahl: 4995 U/min
- Drallfreie Anströmung
- Totaler Eintrittsdruck  $p_{\text{tot}} = 1.52 \text{ bar} = \text{konst.}$
- Tot. Eintrittstemperatur  $T_{\text{tot}} = 352,4 \text{ K} = \text{konst.}$
- Stat. Austrittsdruck  $p_s = 1.0538 \text{ bar} = \text{konst.}$

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

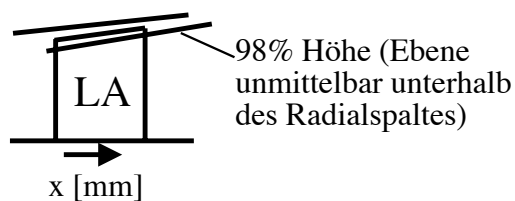
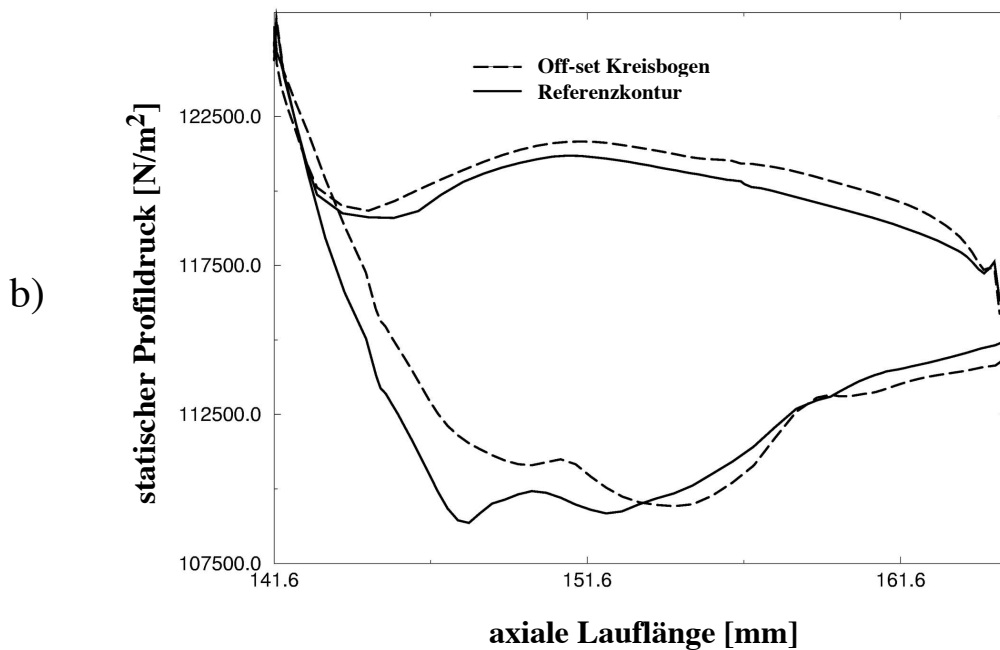
Bild 3: Berechnungsnetz und Randbedingungen der 4-stufigen Berechnungen



### Vergleich: Profildruckverteilung Referenz-Kreisbogenkontur



### Vergleich: Profildruckvert. Referenz-Offset-Kreisbogenkontur



**Bild 5:** Profildruckverteilung unmittelbar unterhalb der Kronenschärfung der 3. Laufschaufel (4-stufige Berechnungen)

## Sekundärströmungsanalyse (Laufschaufel, Radialspalt, 3.Stufe):

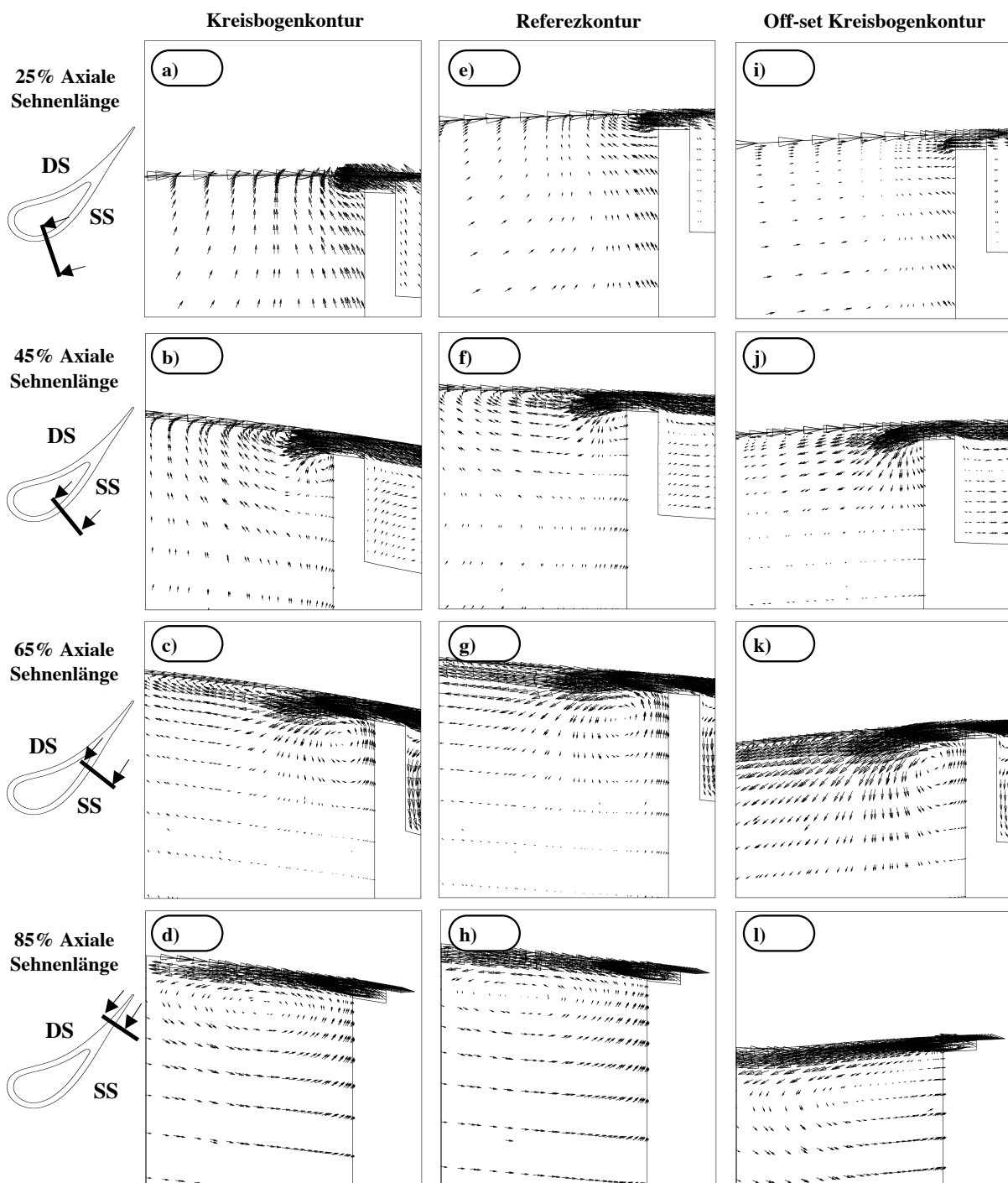
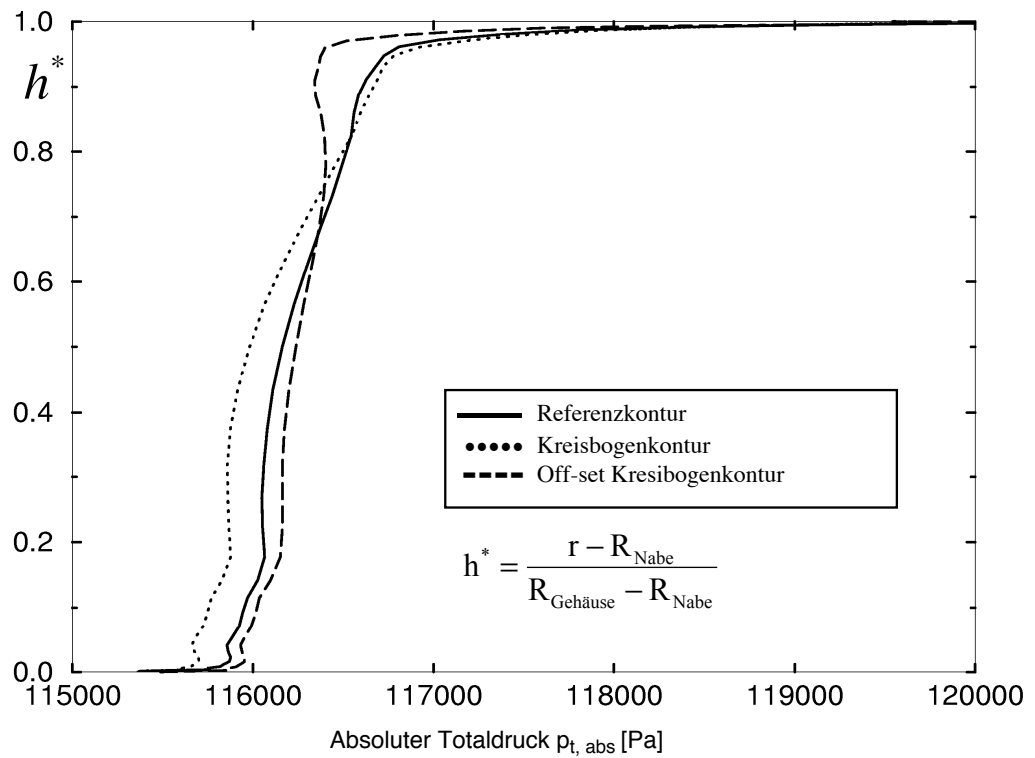


Bild 6: Vergleich der Spaltwirbelentwicklung für die verschiedenen Gehäusekonturierungen

### Radiale Totaldruckverteilung



### Konvergenzverlauf

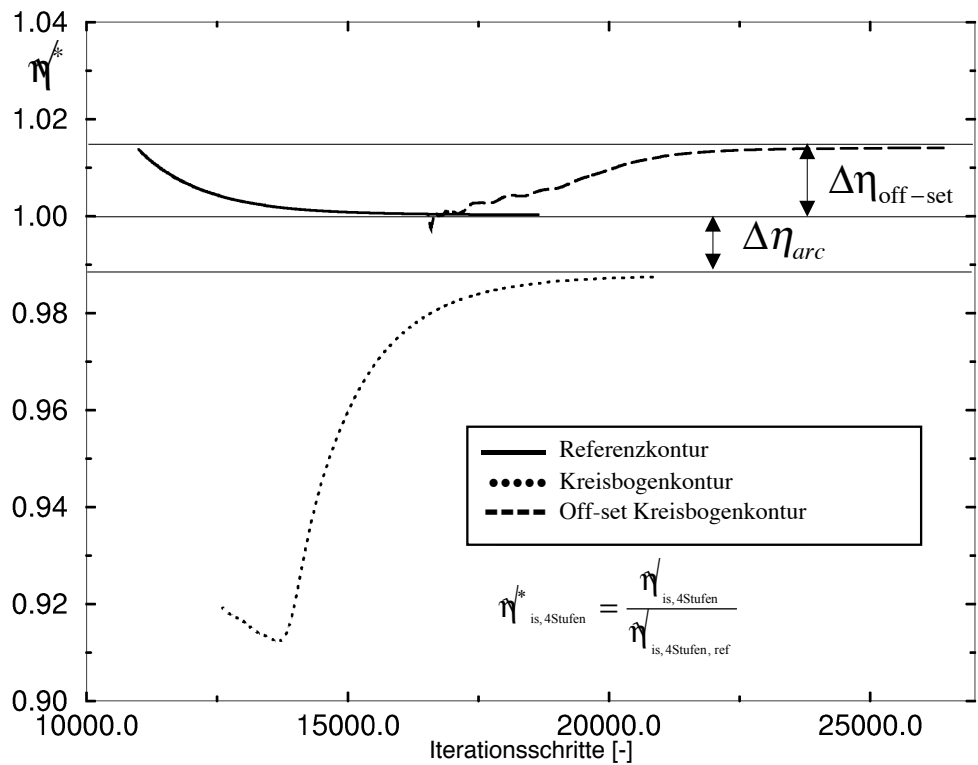
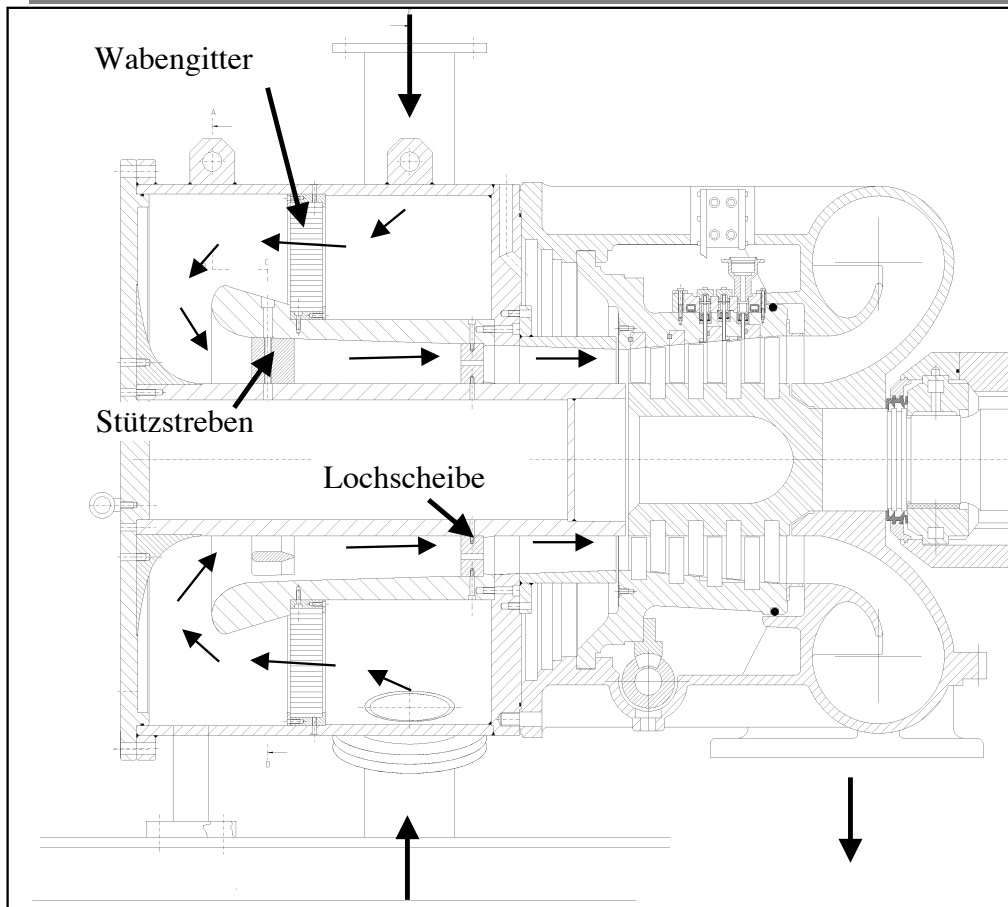


Bild 7: Radialer Totaldruckverlauf und Wirkungsgrade

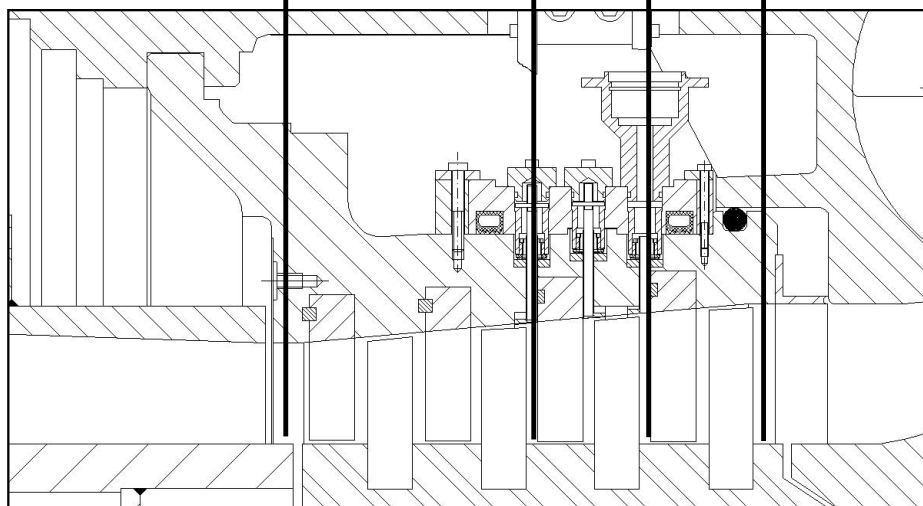


### Versuchsstand Regula mit Einströmgehäuse

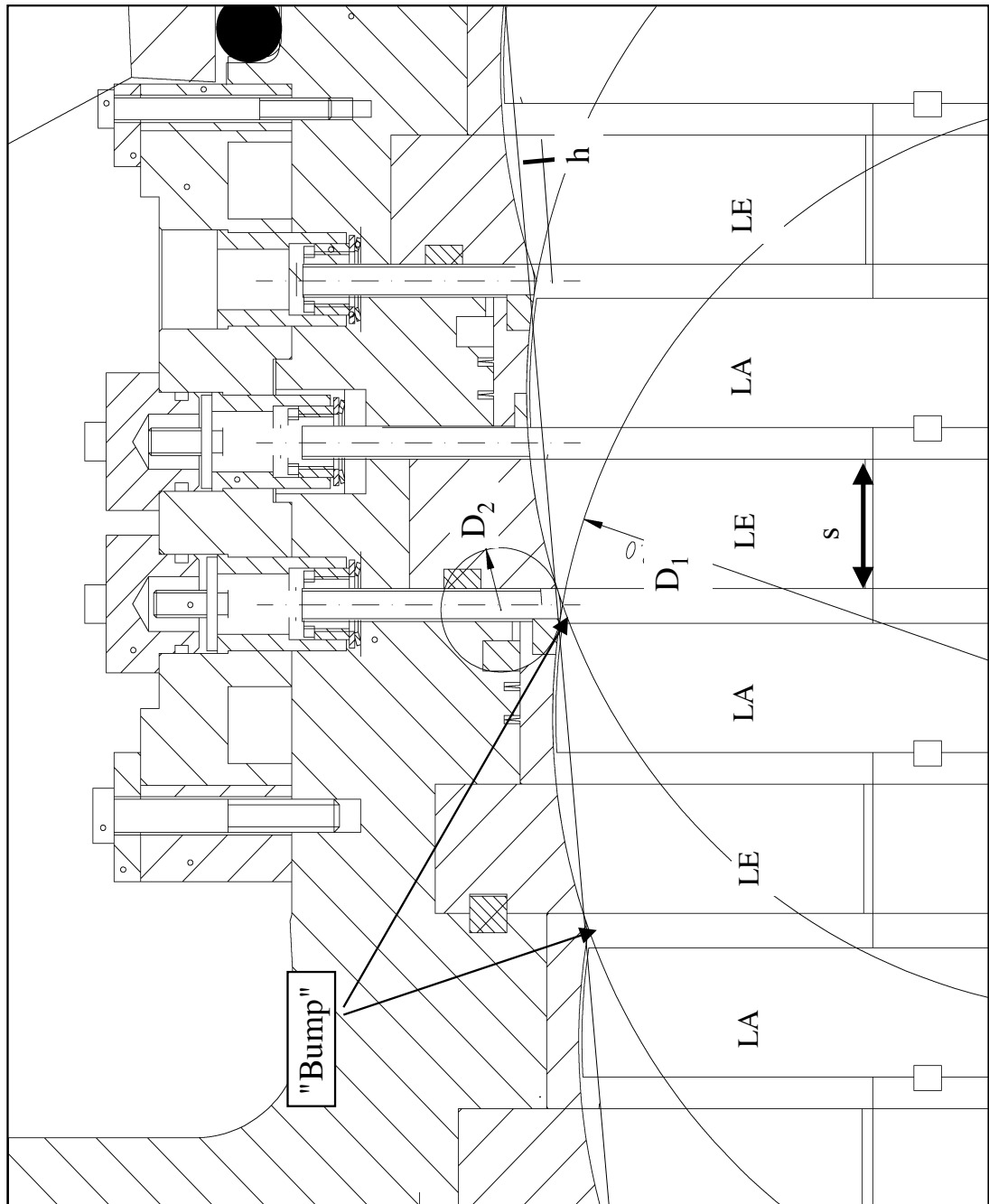


### Kontrollflächen und Messtechnik

<b>KF 10</b> Stationäre 5-Loch- sonde	<b>KF 30</b> Stationäre 5-Loch- sonde Totaldruck- sonde	<b>KF 32</b> Stationäre 5-Loch- sonde Totaldruck- sonde	<b>KF 42</b> Stationäre 5-Loch- sonde
--	--	--	--



**Bild 8:** Versuchsaufbau, Kontrollflächen und eingesetzte Messtechnik



**Sanfte Wellenform,  
aus Kreisen gebildet**

Sanfte Übergänge zwischen Lauf- und Leitrad werden mit Kreisbögen realisiert. Der "Bump" vor dem Laufrad hat eine starke Ausprägung, um Effekte klar separieren zu können. 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 9: Off-set Kreisbogenkonturierung

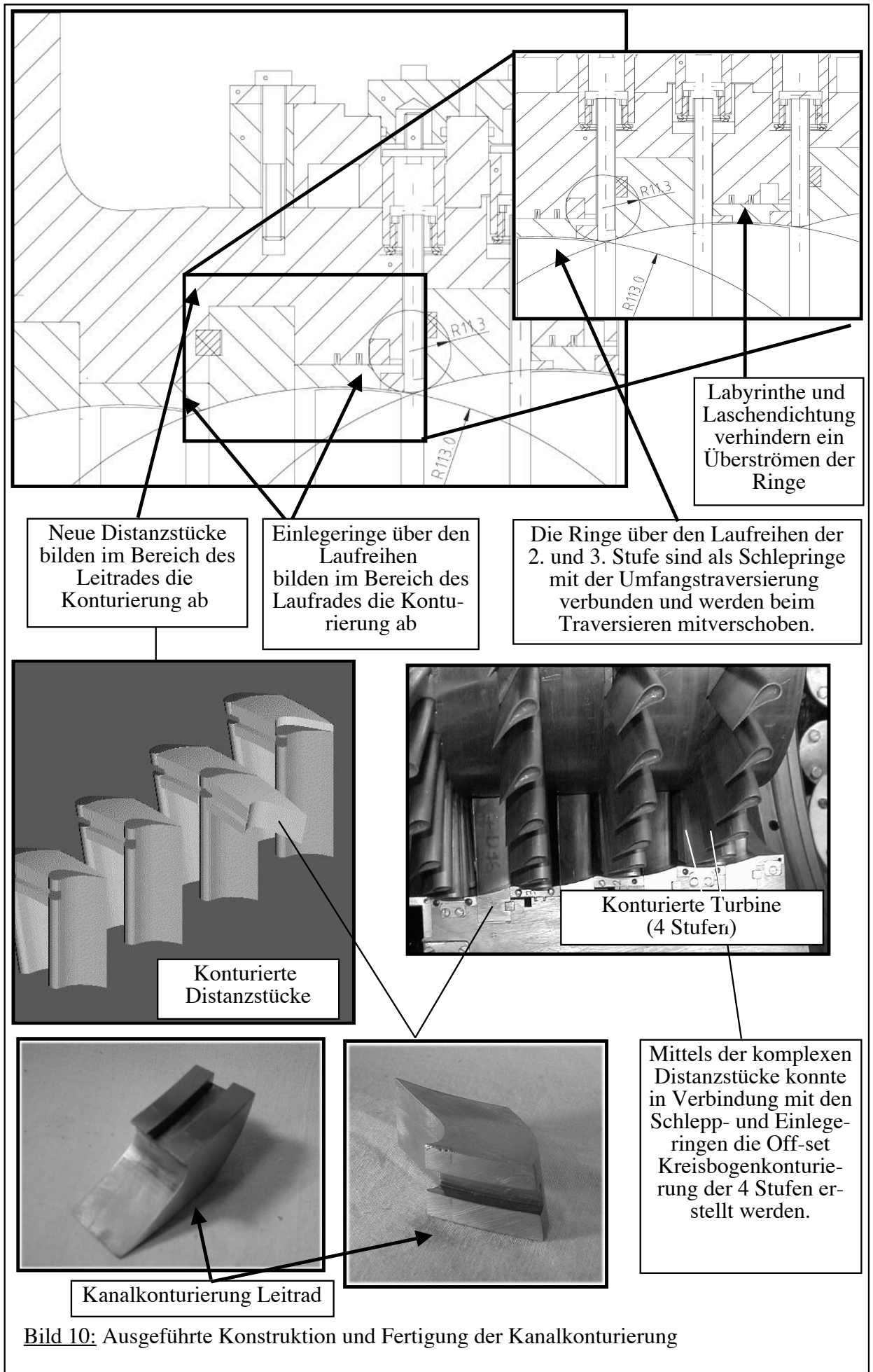
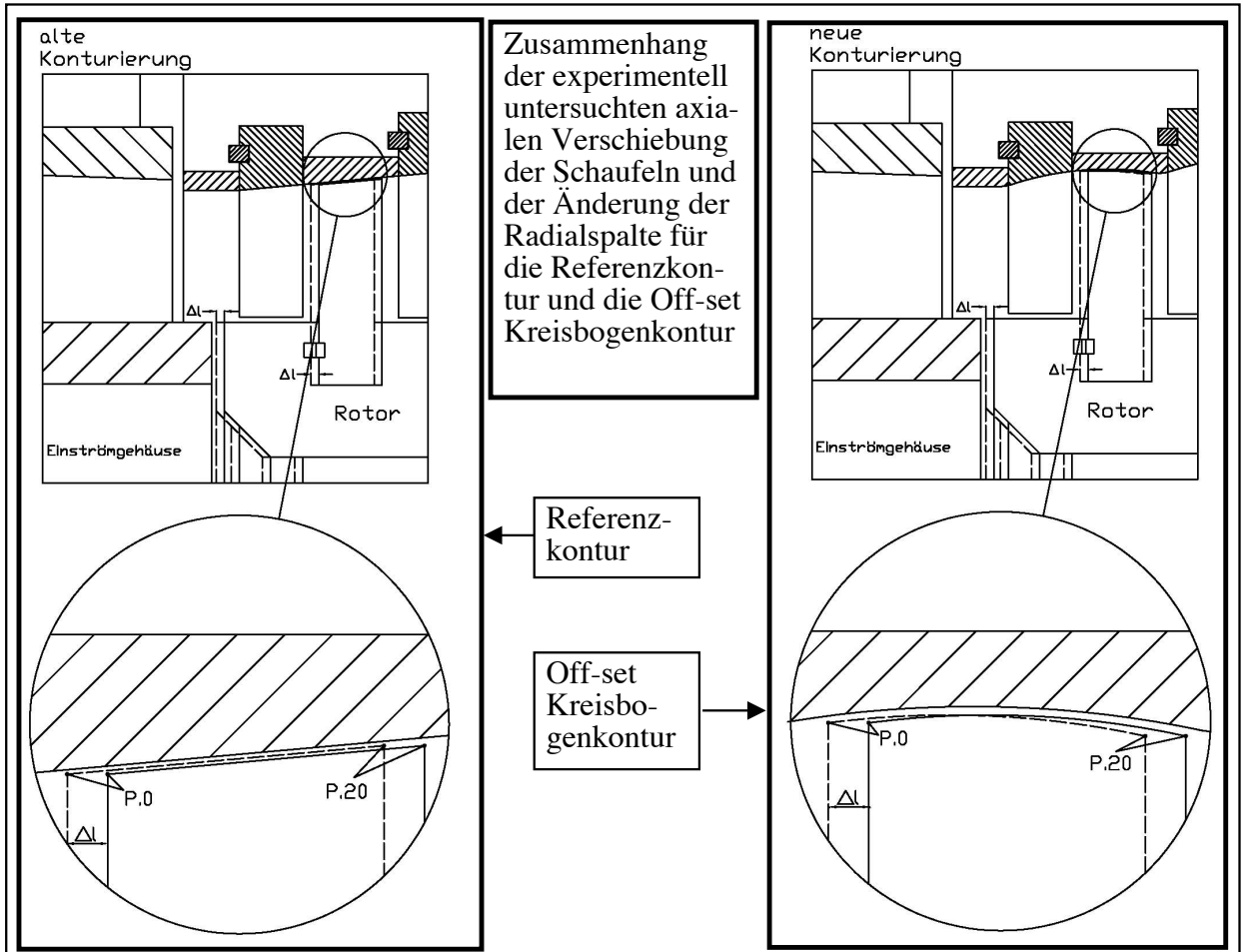


Bild 10: Ausgeführte Konstruktion und Fertigung der Kanalkonturierung



Aus den experimentellen Ergebnissen der axialen Verschiebung beim Aufheizen der Turbine erhaltenen Radialspaltänderungen

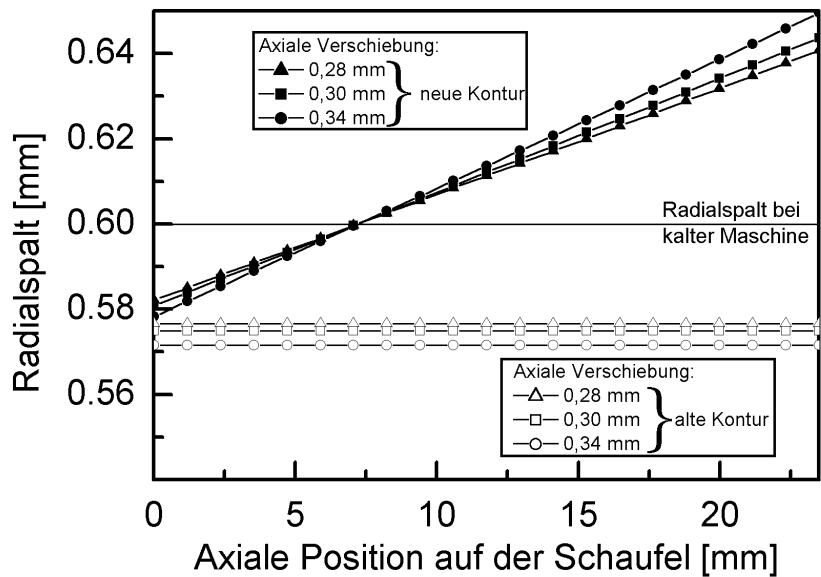
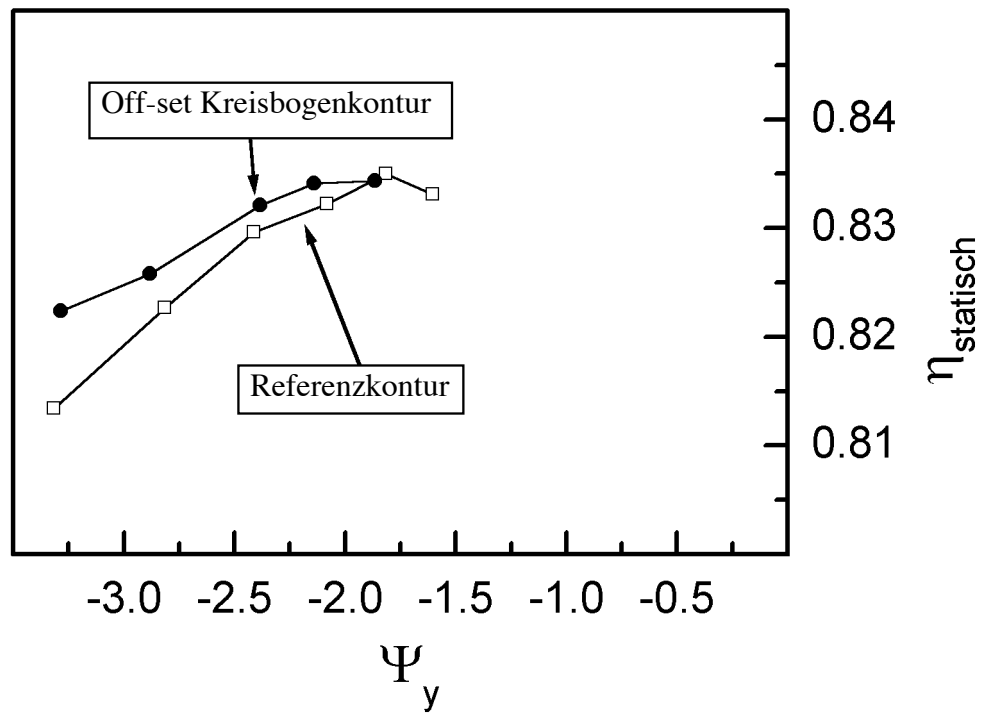


Bild 11: Untersuchung der Radialspaltänderung durch axiale Verschiebung des Rotors beim Aufheizen der Turbine



	Referenzkontur		Off-set. Kreisbogenkontur
$T_{\text{ein}}$	81.6 °C	→	81.3 °C
$P_{\text{aus}}$	1,06 bar	→	1,06 bar
$\Pi$	1,416	→	1,416

**Bild 12:** Vergleich der Wirkungsgrade der alten und neuen Konturierung. (Erste Messergebnisse)