

Heft R 507 (2000)

Informationstagung Turbinen, Frühjahr 2000, Frankfurt am Main

INSTITUT FÜR DAMPF- UND GASTURBINEN

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

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

Zwischenbericht über das Vorhaben FVV - Nr. 0666880

Thema : Aerodynamische Entlastung der Schaufelspalte durch Konturierung
des Meridiankanals

Kennwort : Spaltentlastung II, Turbine

Laufzeit : 01.03.1998 bis 31.03.2000

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

Bearbeiter : Dipl.-Ing. H. Funke
Dipl.-Ing. N. Sürken

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

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 Potential, 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" und "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, steht in diesem Vorhaben die numerische Auslegung und Optimierung eines geeigneten Meridionalkanals im Vordergrund. Dazu werden mit dem institutseigenen Strömungslöser **CHT-flow** sowohl 1-stufige als auch 4-stufige Berechnungen der kompletten Versuchsmaschine (3D, reibungsbehaftet, vollkompressibel, inkl. Radialspalte) mit dem Ziel der Geometrieoptimierung durchgeführt.

Die numerisch gewonnenen Ergebnisse bezüglich einer optimierten Kanalkontur der Versuchsturbine müssen von experimenteller Seite validiert werden. 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" und "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 /9/ wurde dazu bereits im Vorhaben "Spaltentlastung" der institutseigene Strömungslöser **CHT-flow** ausgewählt.

4.1 1-stufige Auslegungs- und Optimierungsrechnungen

Aufbauend auf den einstufigen Berechnungen des Vorhabens "Spaltentlastung" werden eine Reihe von verschiedenen Gehäuse- und Nabenkonturierungen untersucht (Bild 2). Dabei werden 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 wird geometrisch dahingehend optimiert, dass die komplex zu beschreibende

Sinuskurve durch Kreisbögen angenähert wird. Das Durchmesser Verhältnis von Klein- zu Großkreis ist im untersuchten Fall konstant und beträgt 1:10. Die daraus resultierende auf die Profilschneidlänge bezogene Einschnürung des Meridiankanals beläuft sich auf 12.1% (s. auch Bild 9 und Bild 11). Mit den beiden Kennzahlen, Durchmesser Verhältnis und relative Einschnürung, erhält man zwei Geometrie Größen, welche die Grundlage für zukünftige Parameterstudien darstellen.

Wie schon im Vorhaben "Spaltentlastung" wurden für die 1-stufigen Berechnungen die Kronenschärfung sowohl bei der Leitschaufel als auch 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.

Um die Auswirkungen der Konturierung zu visualisieren, wurde vom Institut für Dampf- und Gasturbinen im Rahmen dieses Vorhabens ein neues Differenzenanalyseverfahren entwickelt, das die 3-dimensionalen Strömungsfelder über eine Umfangsmittelung auf 2-dimensionale repräsentative Meridionalschnitte reduziert. In einem weiteren Schritt können diese Felder voneinander abgezogen werden, um vor allem kleine lokale Effekte zu visualisieren. Dies ermöglicht eine detaillierte Untersuchung der zugrundeliegenden Strömungsphänomene. Bild 3 zeigt oben schematisch die Vorgehensweise bei der Differenzenanalyse. Betrachtet man beispielsweise den differentiellen statischen Druck für die Kreisbogen-Gehäusekonturierung, so fällt auf, dass die Auswirkung der Konturierung auf das radiale Druckfeld bis über die Kanalmitte hinausreicht. Besonders ausgeprägt sind die Effekte im Bereich der Laufschaufel-vorderkante in Gehäusenähe, wo durch die vergrößerte Axialgeschwindigkeit und die veränderte Anströmung der Schaufel der mittlere Druck absinkt. Analysiert man den differentiellen Umfangswinkel, so hat die Konturierung offensichtlich großen Einfluss auf die Strömung im Spalt selbst. Bei gleichzeitig vermindertem Axialgeschwindigkeitsniveau innerhalb des Laufschaufelradialspaltes belegt ein Differenzwinkel von bis zu 20° eine stark reduzierte Spaltströmung vor allem im mittleren und hinteren Spaltbereich. Diese Effekte lassen sich für alle untersuchten Meridionalkanalkonturierungen nachweisen.

Analysiert man die Abströmung der dritten Stufe mit Hilfe des Balance-Based-Mittelungsverfahrens nach Kreitmeyer, so erhält man für alle Konturierungen reduzierte Inhomogenitäten der Strömung, die sich auf die Reduzierung der Spaltströmung zurückführen lassen. Dies lässt sich am einfachsten mit Hilfe der Radialverteilung des Verlustkoeffizienten darstellen, der beim Übergang von der reversiblen zur irreversiblen Mittelung /7, 8/ generiert werden kann (Bild 4). Klar erkennbar ist die Verbesserung der Strömung im gehäusenahen Bereich für alle Konturierungen. Allerdings lassen sich in ca. 75% der Kanalhöhe neue Verluste zeigen. Vergleicht man die beiden Konturierungen mit wellenförmiger Geometrie, erkennt man den positiven Einfluss der Nabenkonturierung, der sich auch bei der Rückführung der 3-dimensionalen auf 1-dimensionale Verlustkoeffizienten bemerkbar macht. Der Radialverlauf des

Verlustkoeffizienten bei der kreisbogenförmigen Gehäusekonturierung hat eine bauchigere Form als die Wellenkontur, liegt aber 1-dimensional gemittelt in der gleichen Größenordnung und ist somit für weitere Untersuchungen qualifiziert. Bei dem Mittelungsverfahren wird von einem Ausgleichsprozess ausgegangen, bei dem die Strömung in einem gedachten Ausgleichsraum mit infinitesimaler Ausdehnung unter Beachtung der strömungsmechanischen und thermodynamischen Bilanzgleichungen räumlich homogenisiert wird.

4.2 4-stufige Auslegungs- und Optimierungsrechnungen

Trotz der Reduzierung der Spaltströmung und der resultierenden Verbesserung der Homogenität der Abströmung lassen sich numerisch bei 1-stufigen Berechnungen keine erhöhten Stufenwirkungsgrade belegen. Dies würde sich aus dem Umstand erklären lassen, 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 wird die 1-stufig untersuchte Kreisbogenkontur (Bild 2d) auf die Maschine 4-stufig übertragen (Bild 2f). Durch dieses Vorgehen 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 müssen auch kleine Wirkungsgradveränderungen signifikant nachweisbar sein.

Das Berechnungsgebiet ist mit ca. 1,4 Mio Gitterpunkten vernetzt und in 42 Blöcke aufgeteilt (Bild 5). Wiederum wird die Kronenschärfung der Laufschaufeln diskretisiert. Die Kronenschärfung der Leitschaufel 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 6 zeigt den radialen Verlauf des normierten Totaldruckes im Relativsystem hinter den jeweiligen Laufgittern. Bei der dargestellten Kenngröße wird vom lokalen umfangsgemittelten Totaldruck zunächst der 1-dimensional gemittelte statische Druck abgezogen, bevor diese Differenz mit dem doppelten mittleren dynamischen Druck normiert wird. Die Abweichung vom Idealwert 0.5 ist ein Maß für die Beurteilung verlustbehafteter Strömungen. Deutlich erkennbar sind jeweils die verlustbehafteten Randzonenströmungen. Auch wenn die Minima der gehäusenahen Verläufe im konturierten Fall schwächer ausgeprägt sind, so ist dennoch die größere radiale Erstreckung des spaltströmungsinduzierten Totaldruckabfalles in Gehäusenähe sichtbar. Dies korrespondiert auch mit den 1-stufigen Berechnungen.

Insgesamt lässt sich auch mit den 4-stufigen Berechnungen keine Wirkungsgradverbesserung über die gesamte Maschine oder über einzelne Stufen nachweisen. Der Grund hierfür liegt in einer für diese Beschauung ungünstigen Gehäusekontur, was anhand von gehäusenahen Profildruckverteilungen der dritten Laufschaufel (Bild 7) gezeigt werden kann. In Bild 7a sind die Profildruckverteilungen von Referenzfall und der Kreisbogenegehäusekonturierung einan-

der gegenübergestellt. Wie beabsichtigt, kommt es durch die Konturierung insbesondere im vorderen Schaufelbereich zu einer Absenkung des Druckniveaus. Ebenfalls wird eine Verringerung der treibenden Druckdifferenz über dem Spalt im mittleren und hinteren Profilbereich erzielt. Dies korrespondiert zu der oben im Rahmen der Differenzenanalyse 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 Schaufelbereich 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.

Ein möglicher Lösungsweg liegt in der Verlagerung der gehäusenahen Schaufelbelastung nach hinten anstatt, wie bisher, nach vorne. Dies führt konsequenterweise auf eine geometrische Gestaltung des Gehäuses, die als invers zur bisher verfolgten Kontur angesehen werden kann (Bild 2g und Bild 7). Auch diese Meridionalkanalkonturierung wird, zunächst numerisch, mit Hilfe einer aufwendigen 4-stufigen Vernetzung numerisch analysiert und bewertet. Auswertungen der Profildruckverläufe zeigen, dass es in der Tat gelingt, die Schaufelbelastung in gehäusenahen Regionen nach hinten zu verlagern. Dabei wird eine verschlechterte Anströmung der gehäusenahen Regionen sowie eine vergrößerte Spaltströmung im hinteren Schaufelbereich bewusst in Kauf genommen, da die Spaltströmung insbesondere im vorderen und mittleren Schaufelbereich signifikant reduziert werden kann. Es wird erwartet, dass diese Maßnahme zu einer merklichen Anhebung des Maschinenwirkungsgrades führen wird.

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 Kreisbogenkonturierung am Gehäuse für die Versuchsturbine konstruktiv umgesetzt. Das Bildungsgesetz und die konstruktive Umsetzung im Bereich der 3. Stufe zeigt Bild 9.

Die konstruktive Umsetzung der 4-stufigen Gesamtkonturierung in der Turbine wurde im

Bereich der Leitschaufeln durch neue Distanzstücke zwischen den Schaufeln realisiert. Der Fertigungsprozess bis hin zur Fertigung von Konturierungsprobestücken dieser komplexen 5-Achs-CNC-Fräswerkstücke ist überprüft und vorbereitet für die Komplettfertigung. 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. Alle erforderlichen Fertigungsschritte der externen Bearbeitung bis hin zur Konturierung der Laufschaufeln des Rotors und Einarbeitung der Kronenschärfung sind überprüft und kostenoptimiert und können nach Festlegung der engültigen, numerisch optimierten Konturierung sofort starten. Somit kann in kurzer Zeit auch die neue inverse Kreisbogenkonturierung, Bild 11, an der Versuchsturbine kostengünstig umgesetzt werden. 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. 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 werden mit Hilfe des institutseigenen NS-Strömungslösers **CHT-flow** durchgeführt und ausgewertet. Dabei zeigt sich, dass die Konturierung des Meridionalkanals grundsätzlich das Potential 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 erwartet, dass der Maschinenwirkungsgrad mit einer auf das spezifische Schaufelprofil abgestimmten Gehäusekonturierung ansteigt. Die konstruktive Umsetzung sowie der Ablauf sämtlicher Fertigungsprozesse einer Meridionalkanalkonturierung ist am Beispiel einer kreisbogenförmigen Gehäusekonturierung bis hin zur Fertigung von Probestücken durchgeführt und auf verfahrenstechnische Schwachstellen hin analysiert. Sobald der numerische Nachweis eines gestiegenen Wirkungsgrades erbracht ist, kann der optimierte fertigungstechnische Umsetzungsprozess für die auf das spezifische Schaufelprofil abgestimmte Gehäusekonturierung zeit- und kostenoptimal durchgeführt werden. Nach der anschließenden Fertigung wird mit der schon erprobten Messtechnik das Strömungsfeld vermessen und mit den Messungen der Referenzkontur sowie den numerischen Ergebnissen verglichen. Damit ist das Ziel eines in das Vorhaben integrierten Designprozesses erreicht.

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. K. Kusterer und Dipl.-Ing. N.Sürken für die Durchführung des Vorhabens. Das Vorhaben wird von einem Arbeitskreis der FVV unter der Leitung von Herrn Dipl.-Ing. F. Kreitmeier, ABB Alstom Power begleitet. Diesem Arbeitskreis gebührt unser Dank für die große Unterstützung.

7. Literaturverzeichnis

- /1/ Bohn, D. Entwicklung und Einsatz von Miniaturmeßtechnik
Schnittfeld, T. 3. Statusseminar der Arbeitsgemeinschaft 'Hochtemperaturgasturbine'
Schulz, M. DLR, Köln, 1992
- /2/ Bohn, D. The Dynamic Response of Capillary Tubes for the Use in Miniature
Schnittfeld, T. Pressure Probes, Proceedings of the 11th Symposium on Measuring
Techniques for Transonic and Supersonic Flow in Cascades and
Turbomachines, München, 1992
- /3/ Zeschky, J. Experimentelle Untersuchung der dreidimensionalen instationären
Rotorströmung einer axialen Kaltluftturbine
- /4/ Koschel, W. Turbine Tip Clearance Studies, Final Report
Pollak, H. Aachen, April 1996
Bikker, S.
Nagler, J.
- /5/ Bohn, D. Validation of a Numerical Model for the Coupled Simulation of Fluid
Bonhoff, B. Flow and Diabatic Walls with Application to Film-cooled Turbine
Schönenborn, H. Blades; VDI-Berichte 1186, Turbomachinery - Fluid Dynamics and
Wilhelmi, H. Thermodyn. Aspects, 1st European Conf., Erlangen, 1995
- /6/ Walraevens, R.E. Testcase 6 - 1-1/2 Stage Axial Flow Turbine;
Gallus, H.E. ERCOFTAC Testcase 6, 1996, IST (RWTH Aachen)
- /7/ Kreitmeier, F. Space-Averaging 3D Flows using strictly formulated Balance
Equations in Turbomachinery
- /8/ Kreitmeier, F. A new Time-Averaging Procedure for Compressible, Unsteady
Turbulent Flows, ASME-Paper 87-GT-83, 1987
- /9/ Bohn D. Aerodynamische Entlastung der Schaufelspalte durch Konturierung
Lamping M. des Meridiankanals
Kusterer K. Abschlussbericht zum FVV-Forschungsvorhaben Nr. 066280
Aachen, 1998

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

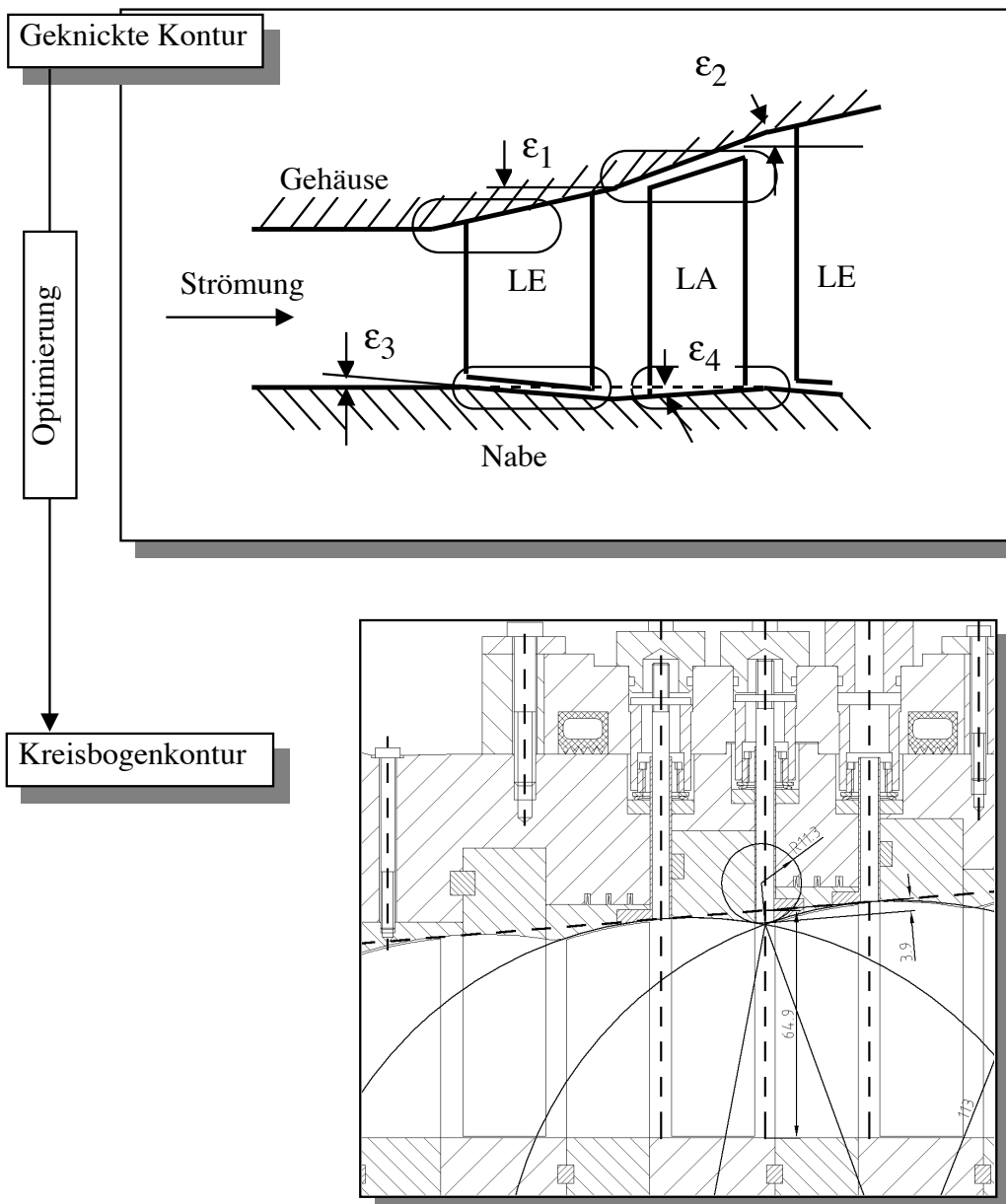
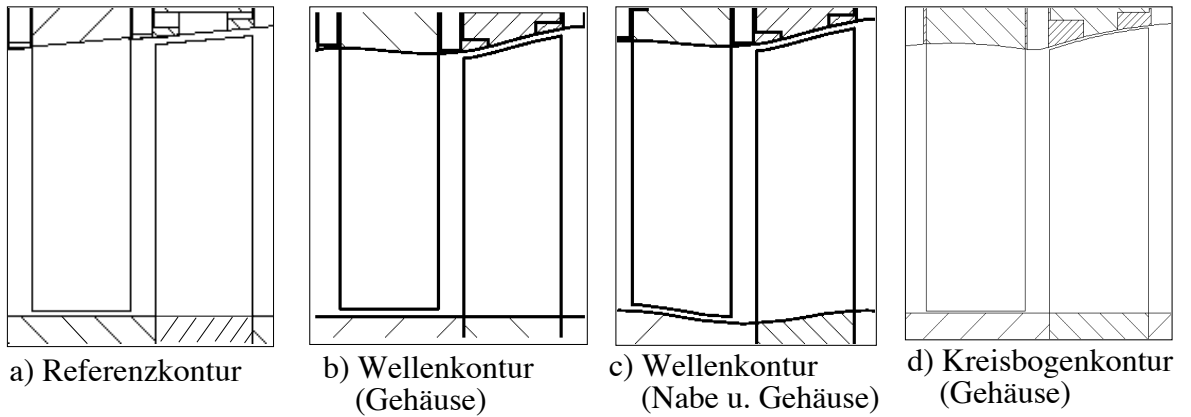


Bild 1: Ziel des Vorhabens und Vorgehensweise

Numerisch untersuchte 1-stufige geometrische Konfigurationen:



Numerisch untersuchte 4-stufige geometrische Konfigurationen:

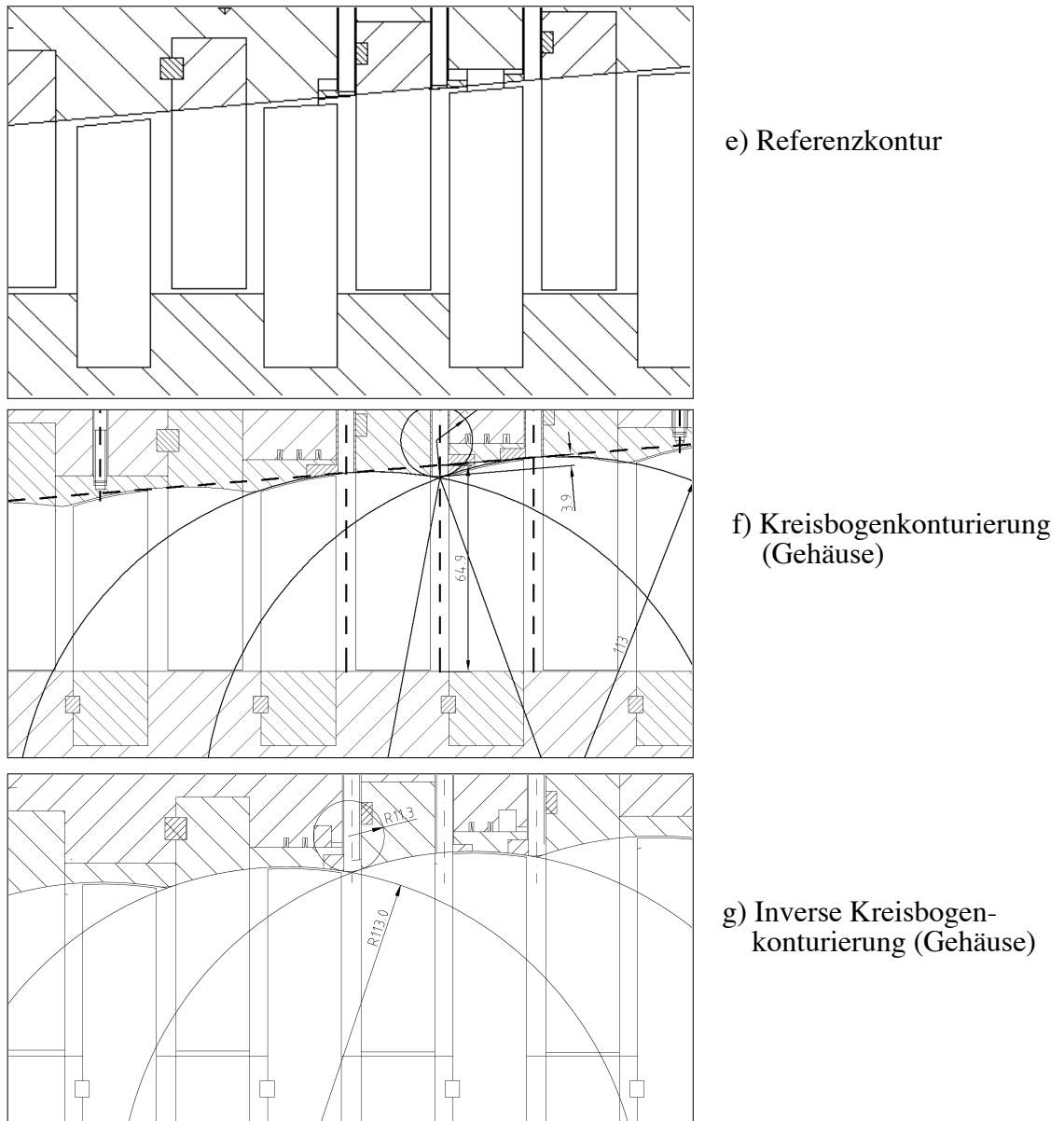
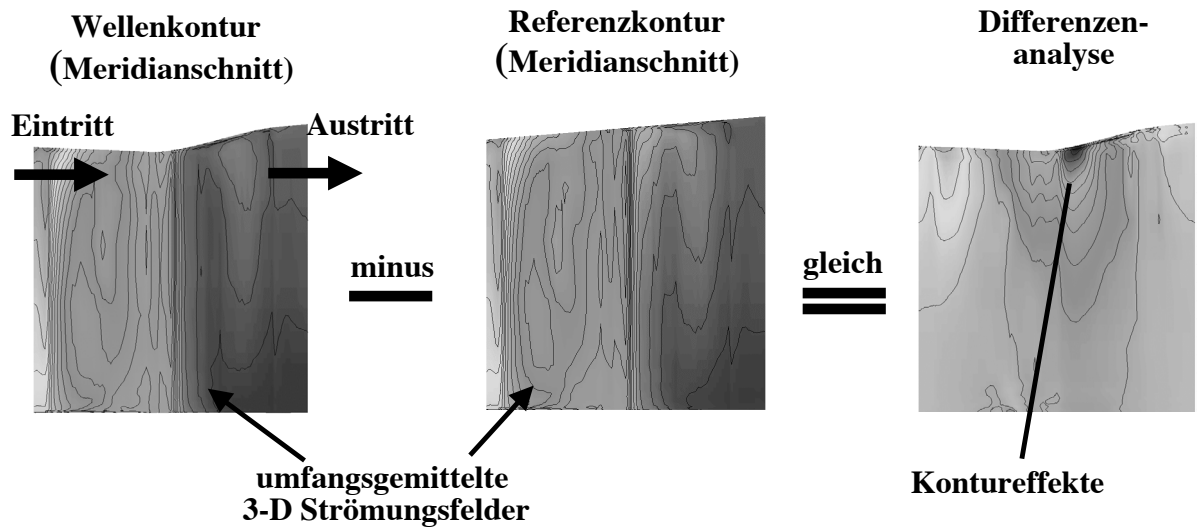


Bild 2: Numerisch untersuchte Meridiankonturen

Differenzenanalyse einer Stufe (schematisch):



Differenzenanalyse der 3. Stufe: Kreisbogenkontur

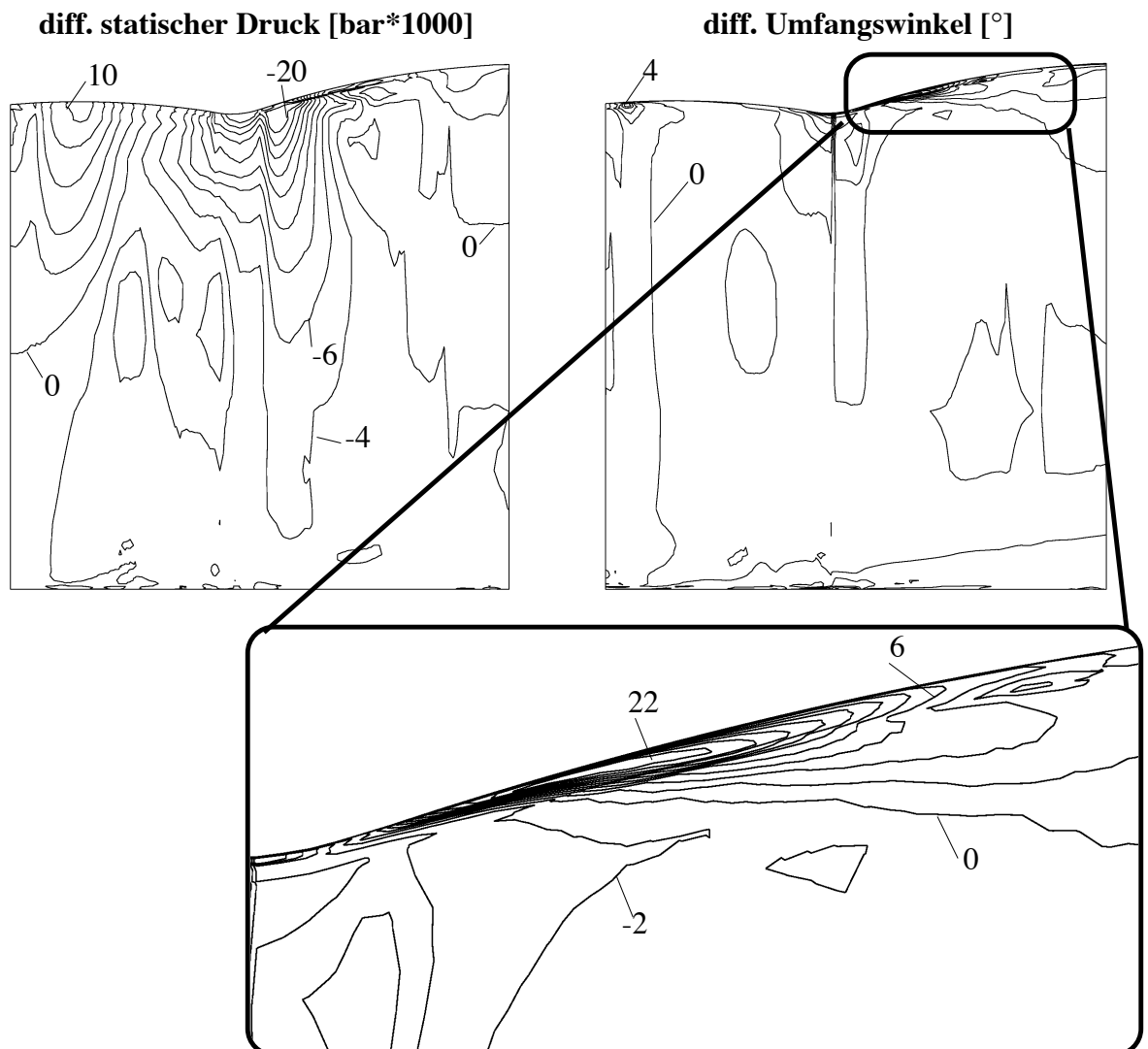


Bild 3: 1-stufige Berechnungen (3. Stufe) - Differenzenanalyse

Balance-Based Mittelung (Austritt 3. Stufe):

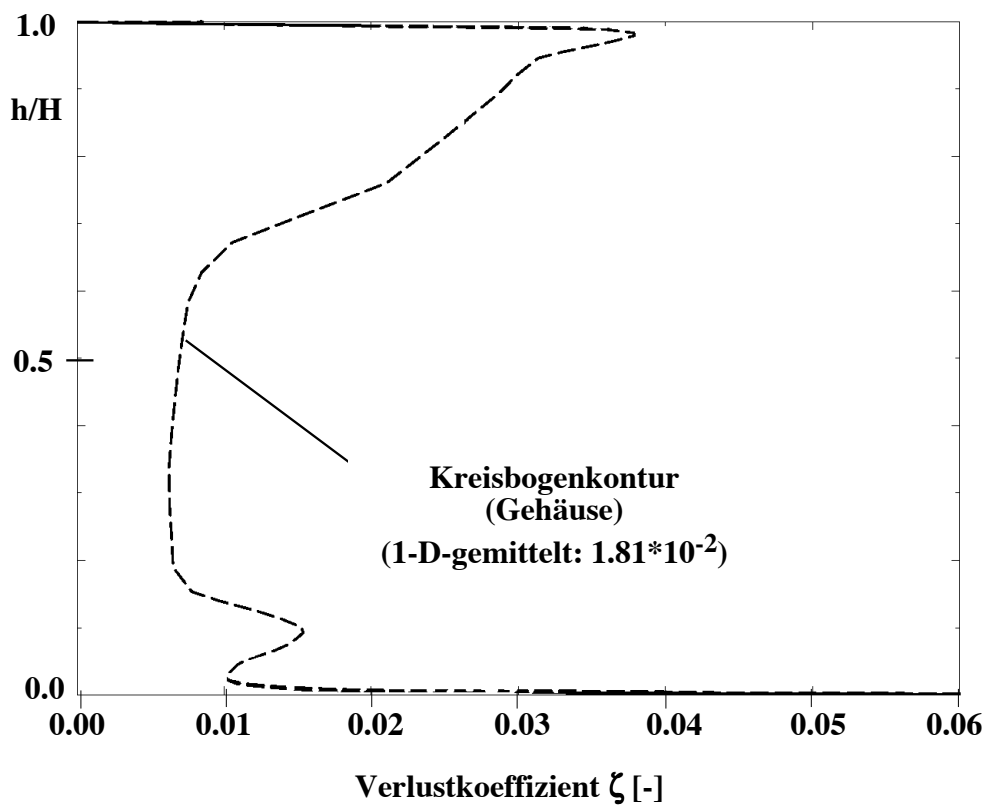
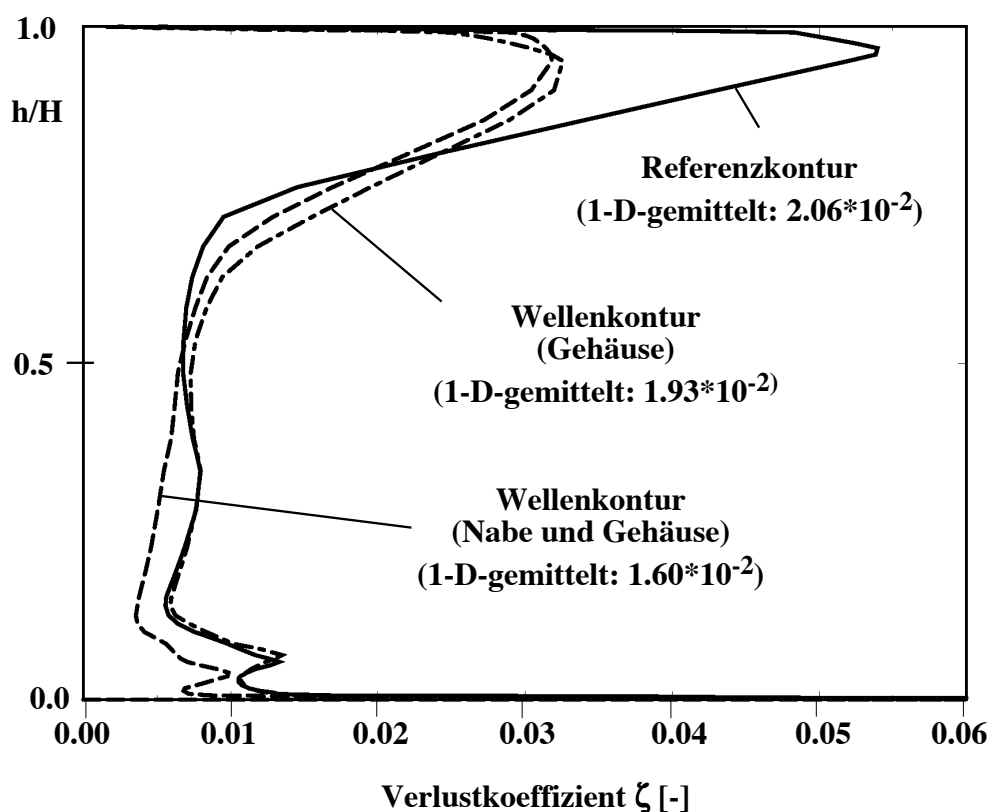
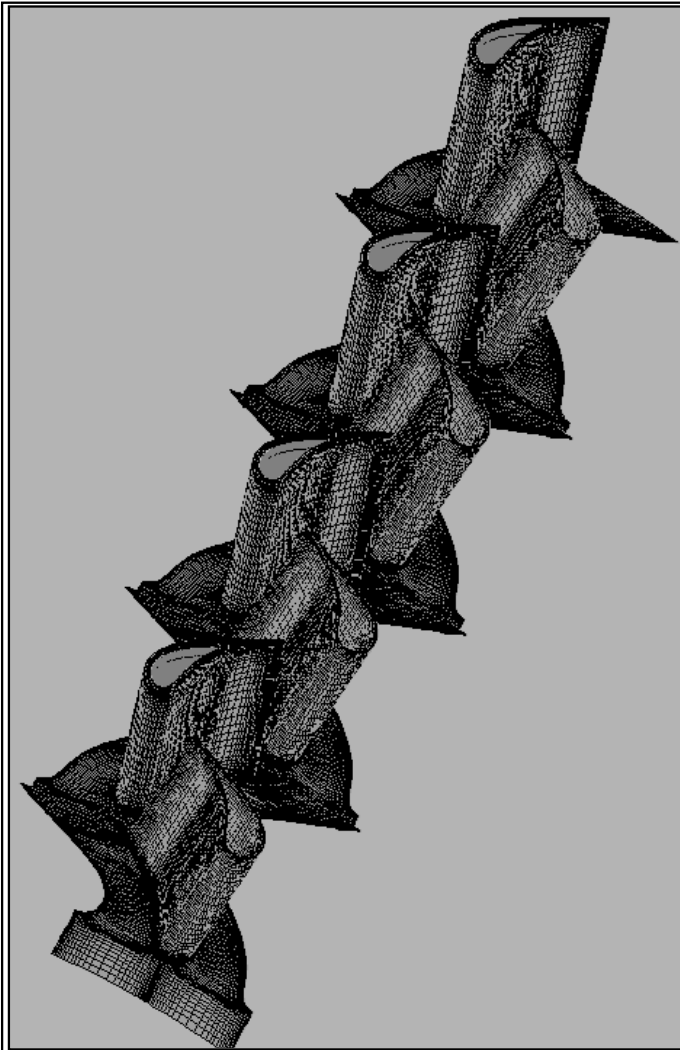
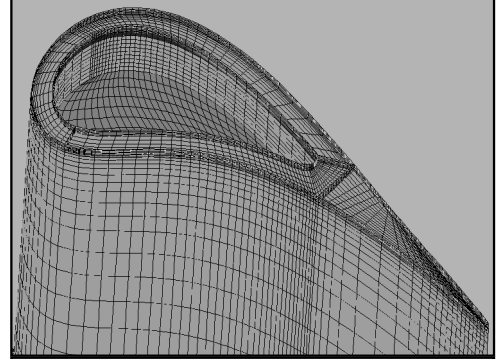


Bild 4: Balance-Based Mittelung nach /7, 8/ - Radialverteilung der Verlustkenngröße für die verschiedenen geometrischen Konfigurationen (1-stufige Berechnungen)



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 5: Berechnungsnetz und Randbedingungen der 4-stufigen Berechnungen

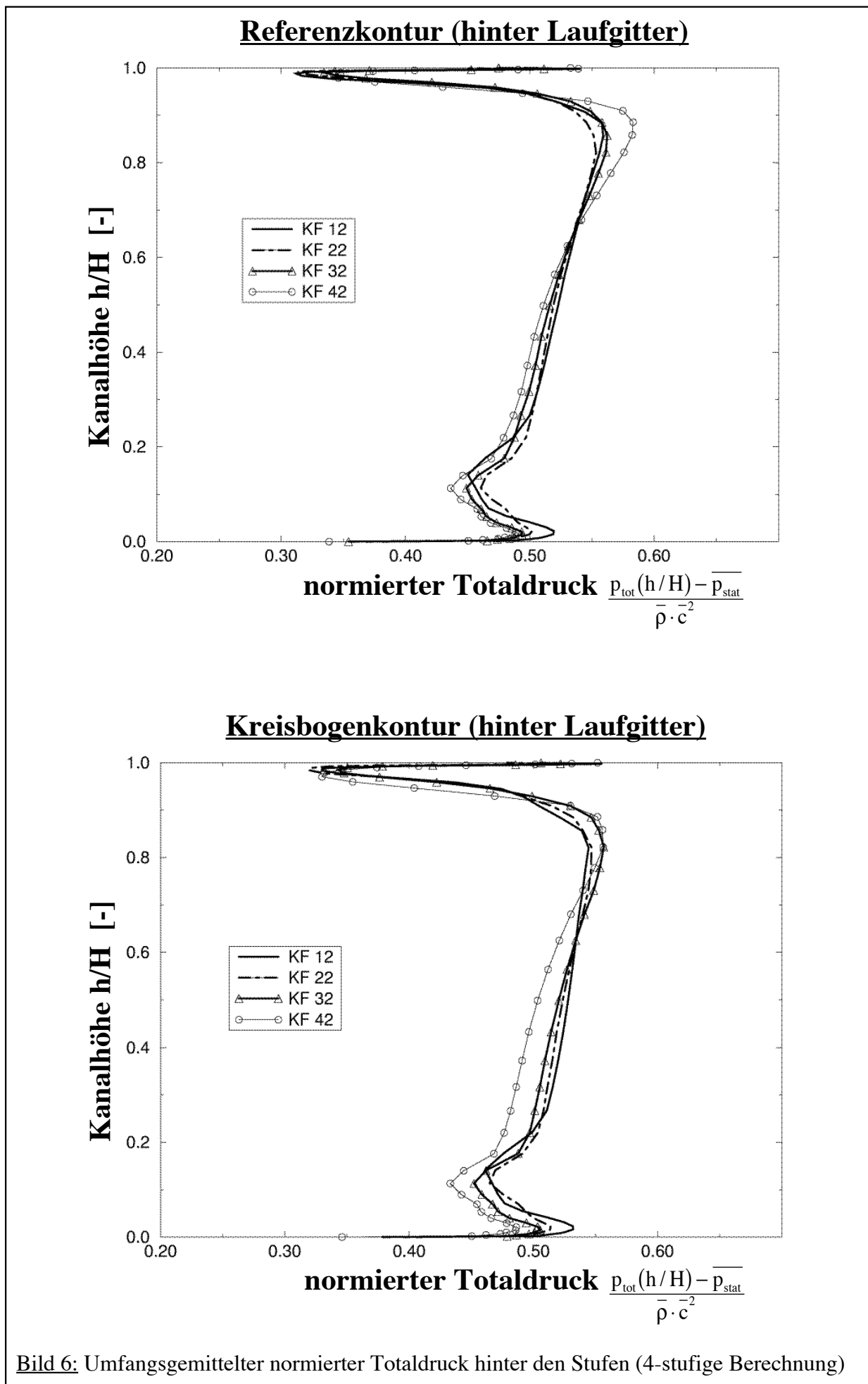
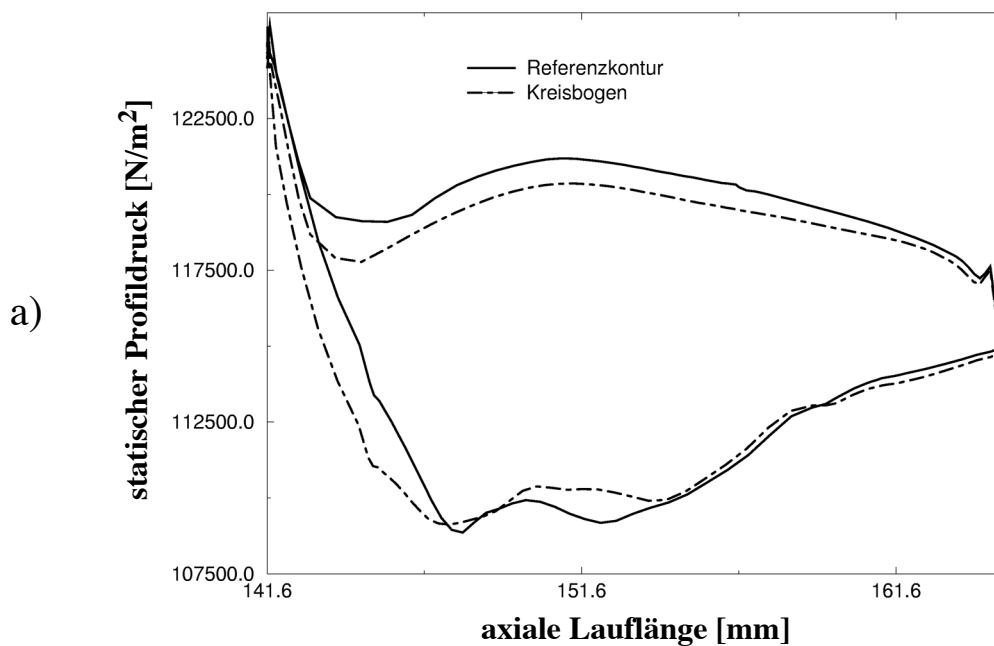


Bild 6: Umfangsgemittelter normierter Totaldruck hinter den Stufen (4-stufige Berechnung)

Vergleich: Profildruckverteilung Referenz-Kreisbogenkontur



Vergleich: Profildruckvert. Referenz-Kreisbogenkontur (invers)

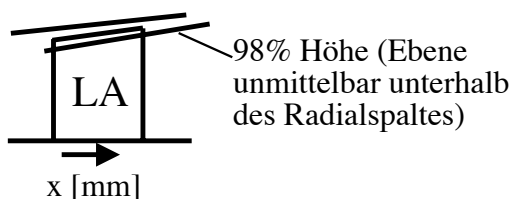
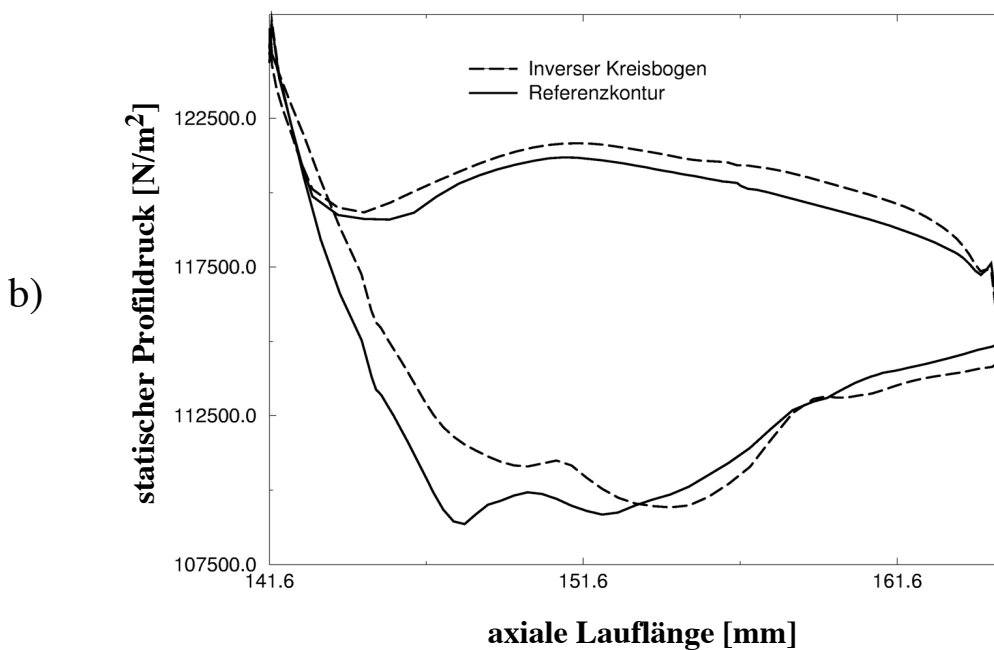
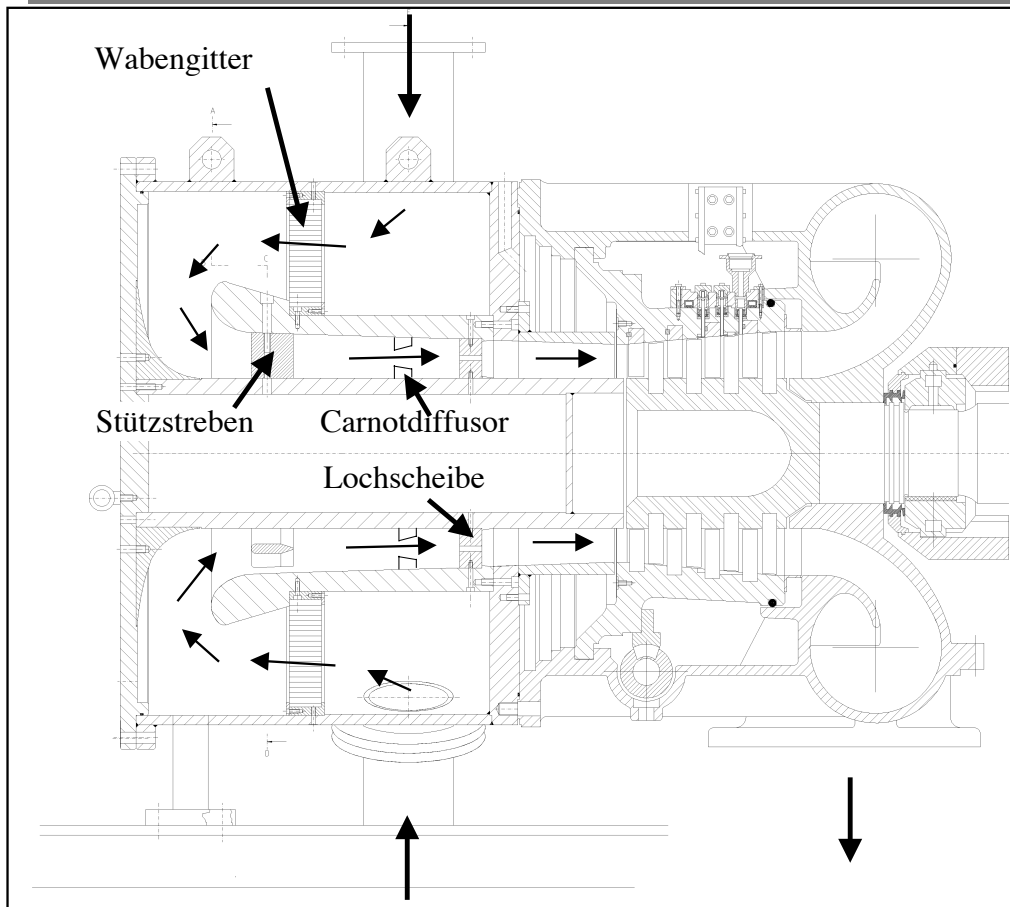


Bild 7: Profildruckverteilung unmittelbar unterhalb der Kronenschärfung der 3. Laufschaufel (4-stufige Berechnungen)

Versuchsstand Regula mit Einströmgehäuse



Kontrollflächen und Messtechnik

KF 10 Stationäre 5-Loch- sonde, Hitdraht	KF 30 Stationäre und Instationäre 5/3-Loch- sonde	KF 32 Stationäre und Instationäre 5/3-Loch- sonde	KF 42 Stationäre 5-Loch- sonde
---	---	---	--

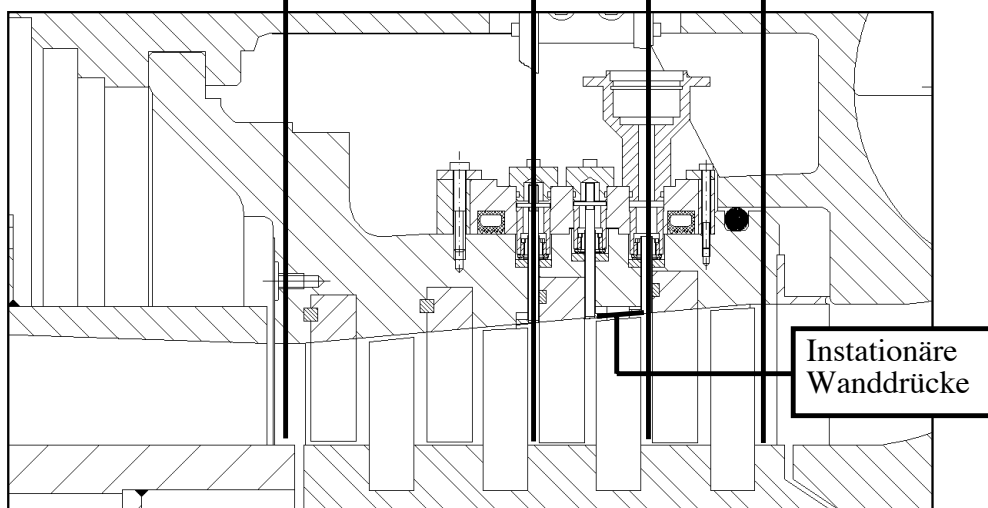
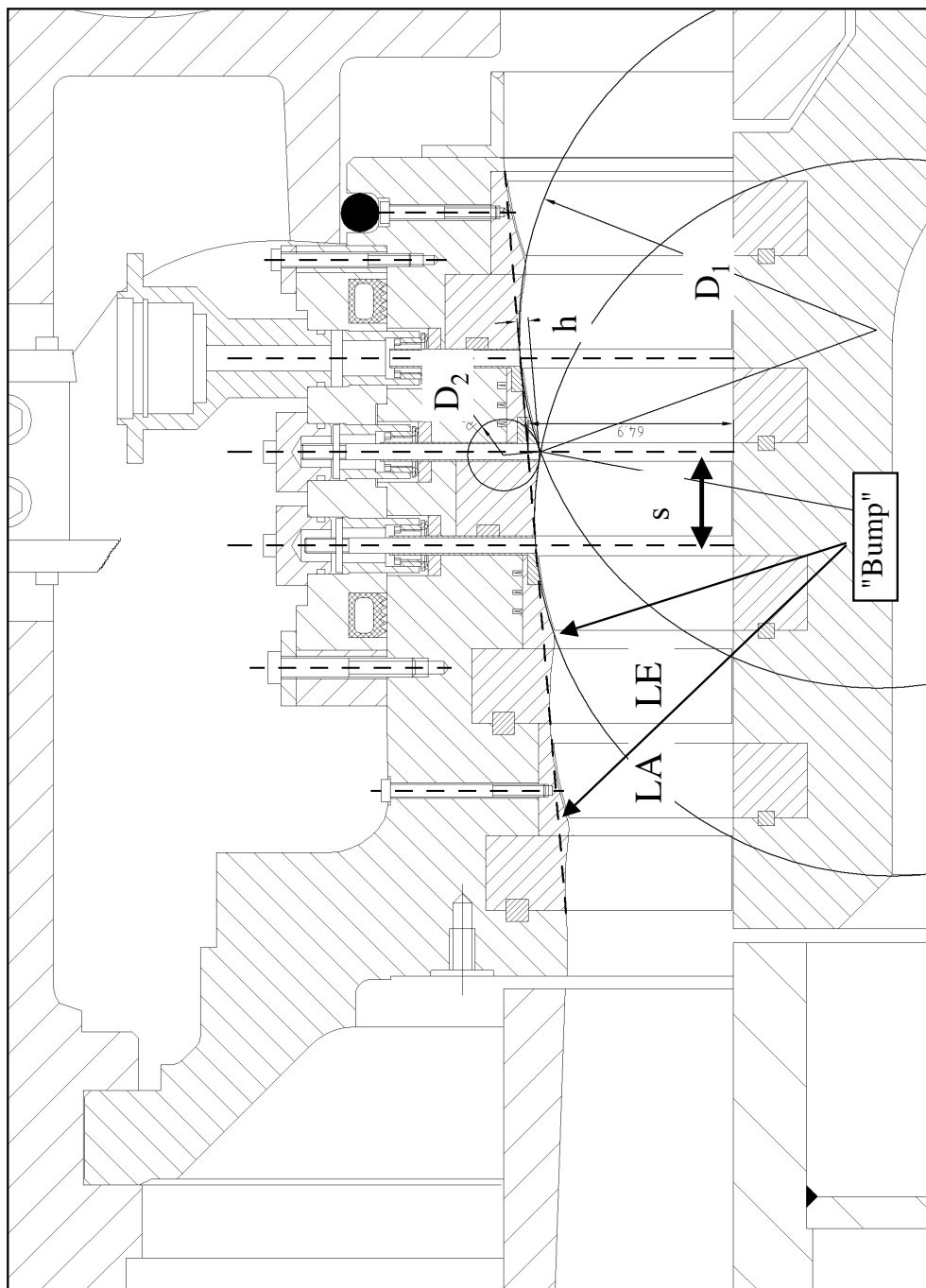


Bild 8: Versuchsaufbau, Kontrollflächen und eingesetzte Messtechnik



**Sanfte Wellenform,
aus Kreisen gebildet**

Sanfte Übergänge zwischen Lauf- und Leitrad werden mit Kreisbögen realisiert. Der "Bump" vor dem Lauf- und Leitrad hat eine starke Ausprägung, um Effekte klar separieren zu können. Die maximale Einschnürung befindet sich jeweils zwischen Leit- und Lauf- und Leitrad (innerhalb einer Stufe).

Durchmesserverhältnis

$$D_1/D_2 = 10$$

Einschnürung zu Sehnenlänge:

$$h/s = 12.1 \%$$

Sehnenlänge: 32.4 mm

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

Bild 9: Bildungsregel der Kreisbogenkonturierung

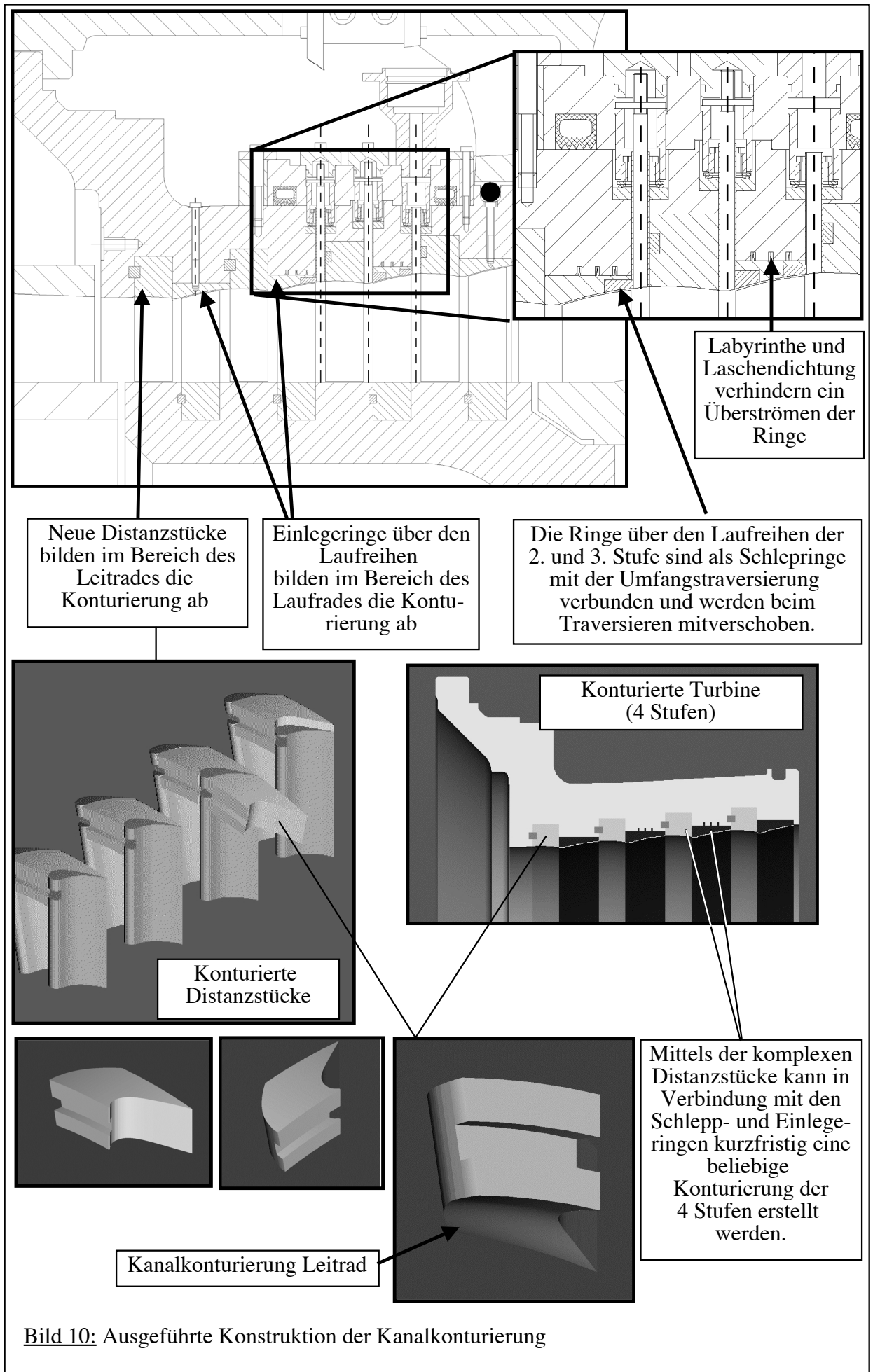
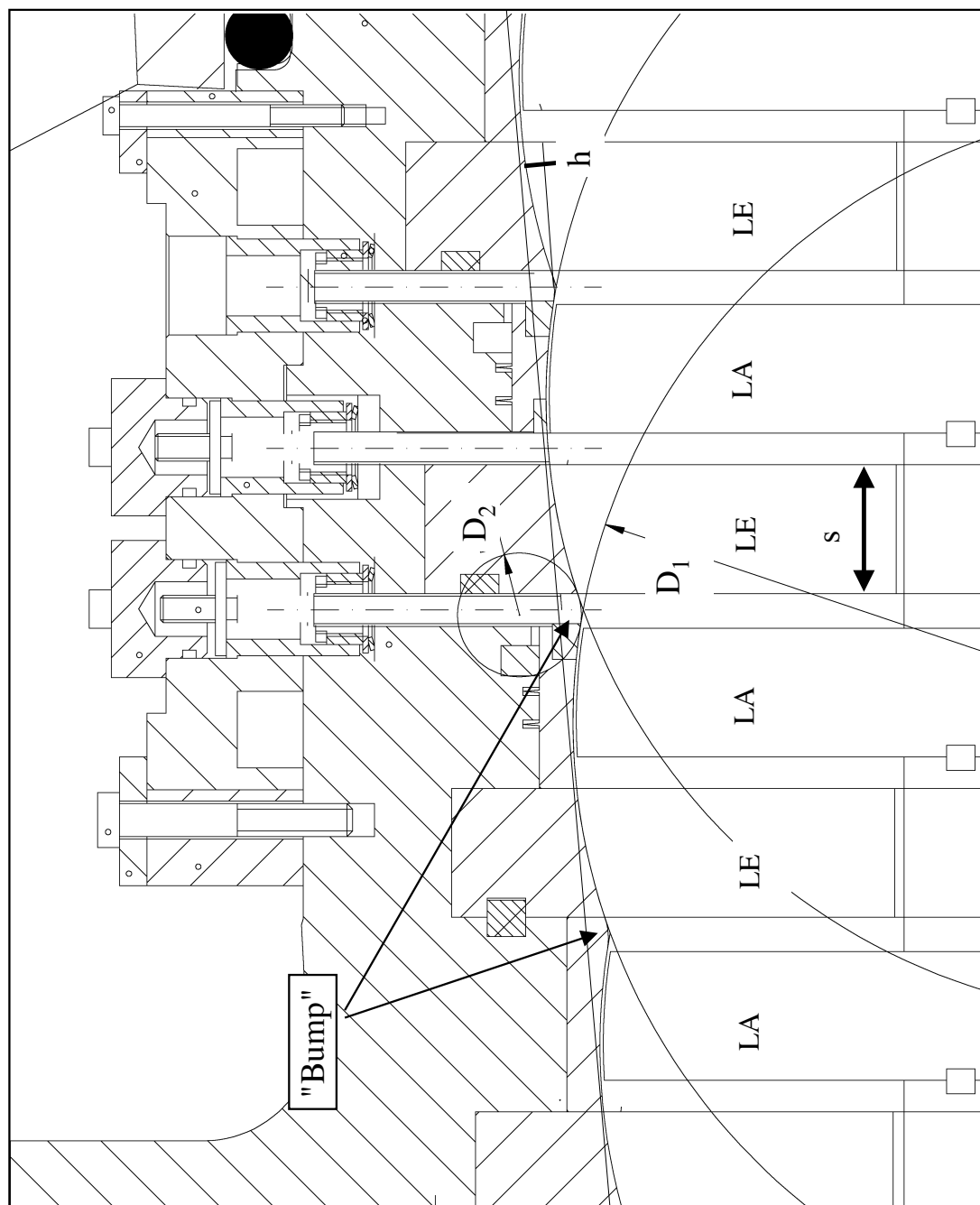


Bild 10: Ausgeführte Konstruktion der Kanalkonturierung



**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, inverses Design).

Durchmesserverhältnis

$$D_1/D_2 = 10$$

Einschnürung zu Sehnenlänge:

$$h/s = 12.1 \%$$

Sehnenlänge: 32.4 mm

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

Bild 11: Inverse Kreisbogenkonturierung