

Heft R 498 (1998)

Informationstagung Turbinen, Frühjahr 1998, Frankfurt

INSTITUT FÜR DAMPF- UND GASTURBINEN

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

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

Zwischenbericht über das Vorhaben FVV - Nr. 665 (AIF - Nr. 10780)

Thema : Untersuchung des Strömungsausgleichs in den Schaufelreihen ungleichförmig angeströmter Turbomaschinen

Kennwort : Strömungsausgleich, Turbine

Laufzeit : 01.08.1996 bis 31.7.1999

Obmann : Dr.-sc.tech. J. Bütikofer, ABB Kraftwerke Baden (CH)

Bearbeiter : Dipl.-Ing. H. Funke

Dipl.-Ing. J. Gier

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

1. Einleitung

In Turbomaschinen verursacht eine ungleichförmige, nicht rotationssymmetrische Massenstrom- und Temperaturverteilung mit zusätzlich radialer Profilierung Zusatzbelastungen in den Beschauelungen und Wirkungsgradverluste in den einzelnen Stufen. Besonders deutlich tritt dieses Phänomen bei Turbinen mit Düsengruppenregelung auf. Im Teillastfall wird in diesen Maschinen dem der Regelstufe nachfolgenden mehrstufigen Teil eine besonders in Umfangsrichtung ungleichförmige Strömung zugeführt. Strömungs- und vor allem Temperaturungleichförmigkeiten treten auch bei Gasturbinen auf und haben einen erheblichen Einfluß auf die Auslegung der Maschine. Diese Ungleichförmigkeiten sind bei der Strömung im Gegensatz zur Temperatur am Austritt aus einer Stufengruppe nahezu ausgeglichen. Es ist bis heute nicht geklärt, wie dieser Ausgleich innerhalb der Schaufelgitter und der Spalt-räume der Stufengruppe abläuft und welche unterschiedlichen Mischungsvorgänge dabei auftreten.

2. Aufgabenstellung und Ziel des Vorhabens

In diesem Vorhaben sollen das grundsätzliche Prinzip des Strömungs- und Temperaturlausgleichs sowie der Ablauf in den einzelnen Schaufelreihen untersucht werden. Insbesondere ist dabei die Ausgleichswirkung der ersten Stufe sowie der Einfluß der Zuströmverhältnisse zur ersten Stufe im Vergleich zu den anderen des Stufenverbandes genauer zu betrachten. Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wird mit einer dreidimensionalen Berechnung die numerische Simulation des Ausgleichsvorganges im ersten Leitrad, in der gesamten ersten Stufe und schließlich auch im Verband mehrerer Stufen erarbeitet und anhand der Meßergebnisse verifiziert. Die Ergebnisse dienen der verbesserten Auslegung der einzelnen Schaufelreihen im Hinblick auf eine Wirkungsgradsteigerung sowie einer Verminderung der Belastungen der einzelnen Schaufelreihen und des Rotor bzw. dessen Lagerung.

3. Vorgehensweise

Bei diesem Forschungsvorhaben werden gezielte Messungen zwischen einzelnen Schaufelreihen zur Erfassung der Ausgleichsvorgänge in dem vollbeaufschlagten vierstufigen Teil durchgeführt. Diese Meßergebnisse bilden die Grundlage für eine numerische Berechnung der Strömung und für die Entwicklung eines Modells zur Übertragung auf Ausführungen mit mehr als vier Stufen. Es muß neben einer Vielzahl von Drücken, Temperaturen und Geschwindigkeiten für die genaue Bestimmung der Ungleichförmigkeiten auch die von der Turbinenbeschauelung abgegebene Leistung gemessen werden. Dabei werden Durchflußverhalten und Strömungs- und Temperaturlausgleich in den Schaufelreihen des vollbeaufschlagten Teils bei veränderten Zuströmbedingungen durch die Regelstufe und den Überströmkanal untersucht. Um einen sehr detaillierten Einblick in die Ausgleichsvorgänge zu erhalten, werden diese parallel zum experimentellen Teil mit einem bestehenden, dreidimensional rechnenden Verfahren im ersten Leitgitter, dann in der ersten Stufe und schließlich im gesamten Stufenverband numerisch simuliert. Eine Verifizierung der Ergebnisse wird mit Hilfe der gemessenen Daten vorgenommen.

4. Experimentelle Arbeiten

Die experimentellen Arbeiten gliedern sich auf in:

- Anpassung des vorhandenen Turbinenversuchsstandes an das Projekt und entsprechender Umbau.
- Entwicklung, Bau und Einsatz der Sonden- und Temperaturmeßtechnik
- Umfangreiche Netzmessungen feiner Auflösung des Temperatur- und Strömungsfeldes über dem Umfang und der Kanalhöhe auf mehreren Durchströmungsebenen

4.1 Aufbau des Versuchsstandes

Dem Institut für Dampf- und Gasturbinen steht eine mit Luft betriebene Versuchsturbine für die experimentellen Untersuchungen zur Verfügung, Bild 1. Sie enthält zwei jeweils fliegend gelagerte Wellen, von denen eine das Laufrad der Regelstufe, die andere die vier Laufreihen der vollbeaufschlagten Stufengruppe trägt. Beide Rotoren geben unabhängig voneinander ihre Leistungen an verschiedene Wasserbremsen ab. Am Institut selbst entwickelte Pendelrahmen mit hydrostatischer Lagerung, in denen jeweils eine Wasserbremse und auch die entsprechende Rotorlagerung zusammen aufgenommen werden, ermöglichen eine genaue Bestimmung der in den entsprechenden Rotor eingeleiteten Turbinenmomente. Die Regelstufe besteht aus 4 Sektoren mit 2x 20% und 2x 30% der Ringkanalfläche.

Zur Untersuchung der Strömungs- und Temperatenausgleichsvorgänge können dem vollbeaufschlagten Teil gezielt Massenstromstörungen durch Schliessen einzelner Sektoren und Temperaturstörungen durch Erhitzen eines 20% Sektors (Bild 2; Sektor A) aufgeprägt werden. Dadurch können Strömungs- und Temperatenausgleichsvorgänge voneinander entkoppelt untersucht werden. Die gradientenfreie Erhitzung der Zuluft eines Sektors wird durch eine meanderförmige Strömungsführung und diverse Einbauten in dem Strömungserhitzer gewährleistet, sowie durch eine am Institut entwickelte Regelung der an das Fluid übertragenen Heizleistung.

Die Überströmkanalkontur ist so gewählt, daß die Ungleichförmigkeit möglichst ungestört an die Stufengruppe übergeleitet wird. Dies wird dadurch erreicht, daß die Umlenkung in die zentripetale Richtung bereits an der dem Regelradaustritt gegenüberliegenden Wand eingeleitet und die Strömung mit mäßiger Umlenkung wieder in die axiale Richtung umgelenkt wird. Dabei wird durch den großen Umlenkradius am Eintritt in den vollbeaufschlagten Teil einer Strömungsablösung in Gehäusenähe vorgebeugt.

Zur kompletten Vermessung der Strömungsfelder über dem gesamten Umfang und der Kanalhöhe auf 7 radialen Höhenschnitten im Ein- und Austrittsbereich sowie der gesamten ersten Stufe des mehrstufigen Beschaukelungsteils sind vor und hinter dem vollbeaufschlagten Teil und nach dem Leit- und Laufrad der ersten Stufe 3-Loch-Zylindersonden sowie Stufenthermoelemente installiert. Zusätzlich sind hinter jeder Schaufelreihe der vier Stufen Wanddruckbohrungen in das Gehäuse eingebracht. Die Meßgrößen und installierte Meßtechnik der Turbine zeigt Bild 2. Die Meßpositionen der 3-Loch-Zylindersonden, Stufenthermoelemente und Wanddruckbohrungen vor und hinter der Stufengruppe und in der ersten Stufe sind für einen Quadranten in Bild 3 dargestellt. Diese Meßpositionen sind um 90° versetzt viermal auf dem Umfang verteilt angeordnet, wodurch komplette Umfangsmessungen durch Verdre-

hen des Leitschaufelträgers inklusive Messtechnik möglich sind. Bild 4 zeigt die zwei Typen der Mehrebenen-3-Loch-Zylindersonden, die zur Vermessung des Strömungsfeldes auf 7 radialen Höhenschnitten verwendet werden. Der Leitschaufelträger des vollbeaufschlagten Teils ist über ca. 100 Grad verdrehbar, um die darin integrierte Meßtechnik in Umfangsrichtung zu verfahren. Somit sind Netzmessungen des Temperatur- und Strömungsfeldes mit feiner Auflösung über dem gesamten Umfang und die Kanalhöhe in den Ebenen vor und hinter dem vollbeaufschlagten Teil und in der gesamten ersten Stufe hinter dem Leit- und dem Laufrad möglich. Um die Netzmessungen für jede Position des Leitschaufelträgers über die Teilung hinter dem ersten Leitrad zu komplettieren, kann die hinter der ersten Leitreihe installierte Messtechnik relativ zum verdrehbaren Leitschaufelträger um mehr als eine Teilung stufenlos mittels einer Kegelradverzahnung verfahren werden, Bild 5. Dabei ist die Meßtechnik auf einem umlaufenden Ring montiert, wodurch die Strömungskontur im Kanal erhalten bleibt.

4.2 Ergebnisse

Ziel bei den Untersuchungen zur Temperaturungleichförmigkeit ist es, den Verlauf einer dem vollbeaufschlagten Teil aufgeprägten Temperatursträhne in der Stufengruppe zu verfolgen und Ausgleichs- und Mischungsmechanismen zu analysieren. Dafür ist die Kenntnis des am Eintritt in die Stufengruppe vorliegenden Temperaturprofils und eine Analyse der durch die Regelstufe und den Überströmkanal bedingten Effekte nötig.

Der Regelstufe wird im Bereich eines Sektors ein blockförmiges um 20°C erhöhtes Temperaturprofil aufgeprägt. Dafür wurde als Voruntersuchung das Temperaturfeld bei leichten Änderungen des von der Regelstufe aufgeprägten Gegendralls durch Feldmessungen über dem halben Umfang in 3 Grad Schritten im Bereich eines erhitzten und eines unbeheizten Sektors auf 7 radialen Höhenschnitten aufgenommen und analysiert, Bild 6.

Einfluß der Regelstufe auf die Temperatursträhne

Die Abbildung zeigt eine geringe Aufweitung der Strähne in den Randbereichen, jedoch wird das Temperaturprofil sehr kompakt durch den Überströmkanal an den vollbeaufschlagten Teil übergeleitet. Diese Aufweitung ist großteils durch den Übergang zwischen Leit- und Laufreihe der Regelstufe und der nachfolgenden Expansion an den durch die Sektortrennstellen aufgeprägten Druckstörungen bedingt.

Ebenso lassen sich die Sektortrennstellen zwischen den beiden unbeheizten Sektoren 30% und 20% gut auflösen. Die leichte Temperaturerhöhung in diesem Bereich ergibt sich durch die Wärmeleitung im warmen Außengehäuse der Regelstufe an den Sektortrennstellen. Es liegt dort ein guter Wärmeübergang von der Wand zum Fluid durch die trennstellenbedingte Verwirbelung statt.

Einfluß des Überströmkanals auf die Temperatursträhne

Bei der Umlenkung der Strömung hinter dem Regelrad zum vollbeaufschlagten Teil durch den Überströmkanal in die zentripetale und danach wieder in die axiale Richtung kommt es

abhängig vom Abströmdrall zu einer radialen Profilierung des Geschwindigkeits- und Temperaturprofils. Dies bedingt in Drallrichtung die radiale Verzerrung der Temperatursträhne zur Nabe hin.

Beim Austritt aus dem Regelstufenlaufrad kommt es im Bereich der un stetigen Kanalerweiterung durch die starke Umlenkung beim Eintritt in den Überströmkanal zur Ablösung und somit zu einem den ganzen Überströmkanal über dem Umfang durchziehenden Wirbelsystem. Die in Drallrichtung im Wirbelsystem transportierte erhitzte Strömung wird durch die von der folgenden Sektortrennstelle induzierte Druckstörung im Nabebereich der kälteren Hauptströmung des unbeheizten Sektors zugeführt. Dort kommt es deshalb zur Ausbildung eines wärmeren Bereichs in Nabennähe bis zu ca. 40% der Kanalhöhe entgegen der Drehrichtung (Bild 6). Dieser Mechanismus kann mittels der numerischen Simulation detaillierter analysiert werden (s. Kap. 5).

Insgesamt wird die Temperatursträhne sehr kompakt zum Eintritt in den vollbeaufschlagten Teil übergeleitet, es existiert also kein gravierender Ausgleich der Temperatur im Überströmkanal. Auf dieser Grundlage werden Untersuchungen des weiteren Verlaufs der Strähne in der Stufengruppe und der damit verbundenen Ausgleichs- und Mischungsvorgänge durchgeführt.

5. Theoretische Arbeiten

Ein wesentlicher Arbeitspunkt der theoretischen Arbeiten bestand in der Berechnung des für das Vorhaben in der Maschine eingebauten Überströmkanals. Dazu wurde der Kanal ohne die angrenzenden Schaufelreihen dreidimensional diskretisiert. Das hierzu eingesetzte Rechennetz besteht aus 4 Blöcken und zusammen ca. 350000 Gitterzellen. Die zur Simulation eines Betriebspunktes notwendige Rechenzeit betrug ungefähr 2 Monate auf sehr leistungsstarken Rechnern. Neben dem vollbeaufschlagten Referenzfall, bei dem alle 4 Einströmsektoren geöffnet sind und die gleichen Eintrittsbedingungen haben, wurde auch, wie in der experimentellen Voruntersuchung, der vollbeaufschlagte Fall mit einem aufgeheizten Sektor (Temperatursträhne) berechnet. Da zum Zeitpunkt der Berechnung noch keine aktuellen Meßwerte zur Verfügung standen, sind als Randbedingungen Meßergebnisse des Vorgängervorhabens "Überströmkanal" (nur leichter Gegendrall, $\psi_{y,R} = -4,6$) herangezogen worden und ein 20%-Sektor um 20 °C aufgeheizt.

Das Ergebnis der Berechnungen mit Temperatursträhne ist in Bild 7 dargestellt. Stromlinien, die auf mittleren und größeren Radien in den Kanal eintreten (SL 1 - 5) strömen mit leichtem drallbedingtem Versatz in Umfangsrichtung durch den Kanal. Sie behalten dabei im wesentlichen ihre Temperatur, d.h. sie erfahren nur eine beschleunigungsbedingte Abkühlung.

Dagegen wird lokal Strömungsmaterial in dem Bereich der Nabe in den großen Kanalwirbel hineingezogen und erst nach einem Transport in Drallrichtung im Bereich der nächsten (SL6) und übernächsten (SL7) Sektortrennstelle der Hauptströmung beigemischt. Über diese Strömung findet bei Temperaturerhöhung in einem Sektor ein konvektiver Transport wärmeren Fluids statt. Dieser Mechanismus führt zu den Bereichen erhöhter Temperatur außerhalb der eigentlichen Temperatursträhne. Dieses Ergebnis stimmt qualitativ bemerkenswert gut mit dem experimentellen Ergebnis für Gegendrall überein.

Außerdem wurde zur Erfassung der dem Temperatursausgleich in der Beschau felung beeinflussenden Effekte eine Temperatursträhne in der Leitbeschau felung der Versuchsturbine berechnet. Dazu wurde die Strömung in 3 Leitschau felkanälen simuliert, wobei der mittlere mittig mit einer ca. 60 % der Teilung einnehmenden Temperatursträhne (+20 °C) zugeströmt wird. Das verwendete Rechennetz verfügt über 77760 Knoten pro Kanal, was einen Kompromiß zwischen Netzauflösung und Rechenzeitbedarf darstellt.

In von Sekundärströmungen kaum beeinflussten Kernbereich der Strömung bleibt die Temperatursträhne erhalten. Der seitliche Übergang (Umfangsrichtung) zu kälteren Temperaturbereichen wird nur etwas durch Wärmediffusion geglättet, Bild 8.

In Bild 9, in welcher ein Axialspalt kurz vor der Hinterkante dargestellt ist, ist dies ebenfalls zu erkennen. In der Ecke E1 ist ein Bereich mit kühlerem Strömungsmaterial festzustellen. Hier ist durch die Wirkung des Kanalwirbels kühleres Material unter die Temperatursträhne geführt worden. Dies wird auch in Bild 10 deutlich, in dem die Stromlinien im Kanal dargestellt sind. Während die Stromlinien im Hauptströmungsbereich parallel durch den Kanal führen und die Temperatursträhne sich dadurch in ihrer Form nicht ändert, legt sich in Nabennähe die druckseitige, kühlere Strömung (Stromlinie 1) durch den Kanalwirbel unter die Temperatursträhnenströmung (Stromlinie 2).

Dies bedeutet zusammenfassend, daß sich die Temperatursträhne kaum durch Wärmediffusion (Wärmeleitung) ausgleicht und dadurch vorwiegend durch Sekundärströmungseffekte in ihrer Form und Ausdehnung geändert wird.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Der Versuchsstand wurde so modifiziert, daß der Stufengruppe Temperaturstörungen aufgeprägt und das Strömungs- und Temperaturfeld vor und hinter dem vollbeaufschlagten Teil und der gesamten ersten Stufe mit feiner Auflösung vermessen werden kann.

Sowohl die experimentelle als auch die numerische Untersuchung der Strömung im Überströmkanal bei Vorgabe einer Temperatursträhne haben gezeigt, daß die Strähne nur leicht verformt in die nachfolgende Beschau felung eintritt, weil die Wärmediffusion relativ schwach ist. Außerdem wurde bei beiden Untersuchungen festgestellt, daß der große Kanalwirbel im Überströmkanal einen konvektiven Transport von wärmer Strömung in kühlere Bereiche bewirkt, was sich in lokal erhöhter Temperatur niederschlägt.

Bei der Simulation der Strömung in der Leitbeschau felung zeigt sich auch, daß die Temperatursträhne vollständig erhalten bleibt. Lediglich in Seitenwandnähe findet durch die Einwirkung der Sekundärströmungen eine gewisse Vermischung bzw. Verzerrung der Temperatursträhne statt.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen werden Strömungs- und Temperaturungleichförmigkeiten im vollbeaufschlagten Teil entkoppelt voneinander betrachtet. Es wird unabhängig voneinander im gleichen Sektor eine Temperaturstörung oder Massenströmstörung aufgeprägt. Dabei wird insbesondere der Ausgleich in der ersten Stufe durch umfassende Feldmessungen und numerische 3-D Simulationen der Strömungsvorgänge untersucht. Ferner wird die Verteilung der Strömung hinter der letzten Stufe vermessen und die Ausgleichsintensität in den unterschiedlichen Stufen bewertet.

7. Literaturverzeichnis

- Bohn, D. Auswirkungen ungleichmäßiger Beaufschlagung auf die Durchströmung der
Drexler, C. anschließenden Turbinenstufen I + II, Tagungsberichte zum FVV - Forschungs-
 vorhaben Nr. 470 und 532, Heft R 468 (1992), Heft R 475 (1993)
- Bohn, D. Abschlußbericht zum FVV- Forschungsvorhaben Nr. 575 Überströmgehäuse
Drexler, C. Untersuchung von verschiedenen Überströmgehäusen auf das Ausgleichsverhal-
 ten des ungleichmäßig angeströmten mehrstufigen Teils einer Turbine mit Teil-
 beaufschlagung, Heft R 478 (1994), Heft 594 (1995)
- Ohlsson, G. Partial-Admission Turbines, Journal of the Aerospace Science, Vol. 29,
 Sept.1962,No.9, pp. 1017-1028
- Wallace, F.J. Performance of Inward Radial Flow Turbines Under Unsteady Flow Condition
Miles, J. with Full and Partial Admission, Institution of Mechanical Engineers, London,
 Proc Vol. 185, Paper n 77/71, 1970-71, pp. 1091-1105
- Walzer, P. Teilbeaufschlagung von Dampfturbinenregelstufen, Diss. RWTH Aachen, 1970
- Dibelius, G. Verlustquellen und Strömungsausgleich in teilbeaufschlagten Turbinenstufen
Reimer, P. Abschlußbericht zum FVV - Forschungsvorhaben Nr. 353, Aachen 1991
- Marx, N. Zur Frage der Laufschaufelbelastung bei teilbeaufschlagten Axialturbinen
 Konstruktion 25. Jahrgang, Dez. 1973, Heft 12
- Beckmann Wechselbeanspruchung einer Turbinenschaufel durch ungleichförmige
Wachter, J. Zuströmung, VDI-Bericht, Nr. 361, 1980, S. 71-79
- Rothstein, E. Experimentelle und theoretische Untersuchung der Strömungsvorgänge in Rück-
 führkanälen von Radialverdichterstufen, insbesondere solcher mit geringen Kan-
 nalbreiten Diss. RWTH Aachen, 1984
- Bansod, P. The Flow in S-shaped Ducts
Bradshaw, P. Aeronautical Quarterly, May 1972
- D. Bohn, Experimental and Theoretical Investigations on the Flow Equalization in the
J. Gier: Cross-Over Channel and the Multistage Part of a Control Stage Turbine,
 VI Latin American Turbomachinery Congress & Exposition, Mexico-City,
 Mexico, Februar 1997
- D. Bohn, Comparison of Characteristic Flow Properties in a Turbine Nozzle for Turbu-
J. Gier, lence Models of Different Complexity, Proceedings of the 3rd Summer Con-
K. Kusterer ference 'Numerical Modelling in Continuum Mechanics', Prag, September 1997

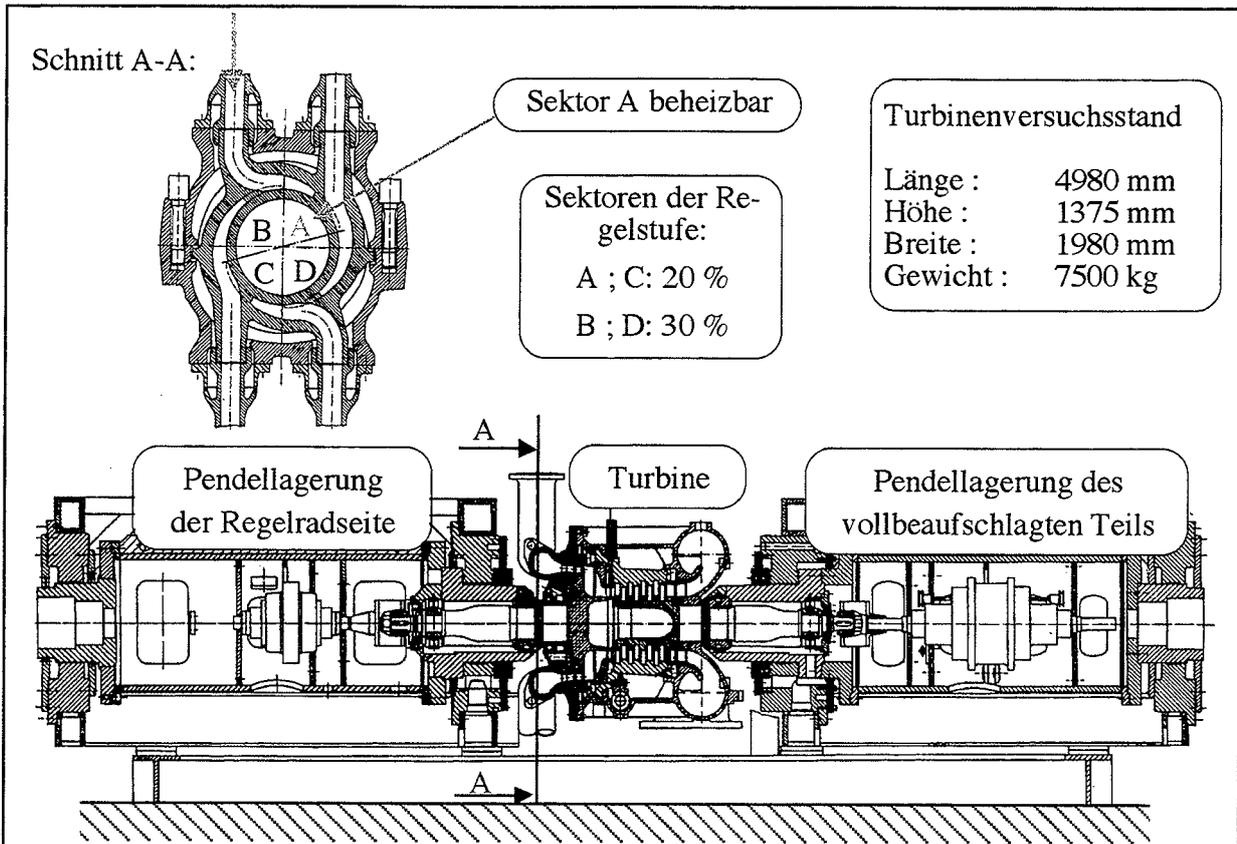


Bild 1: Versuchsaufbau

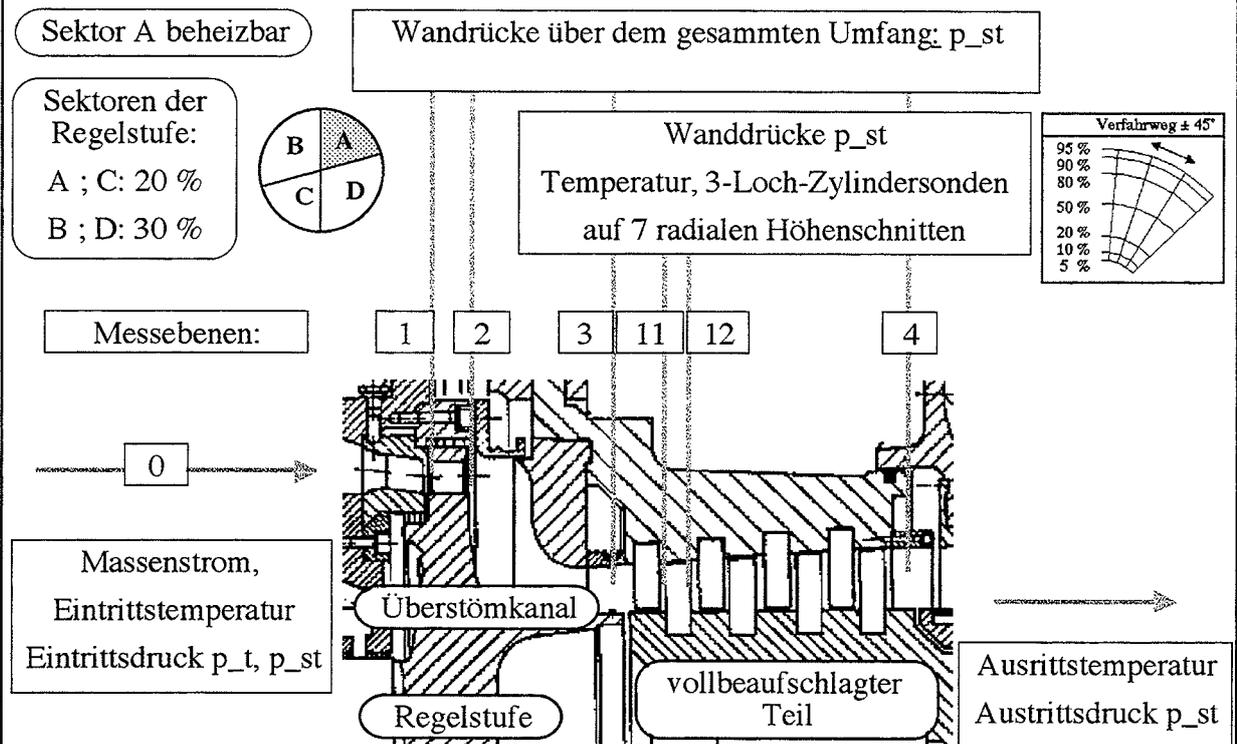


Bild 2: Messebenen und Messgrößen

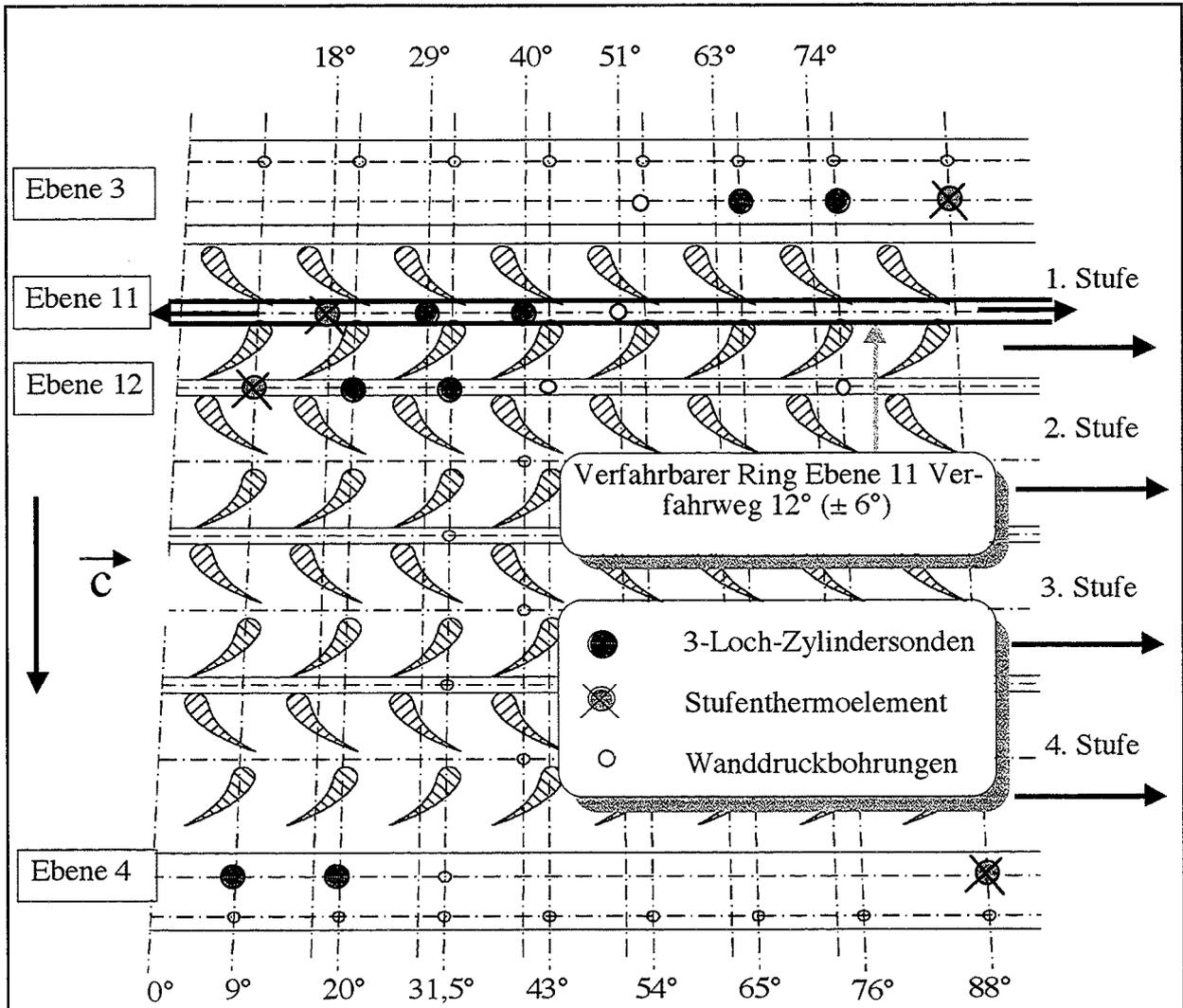
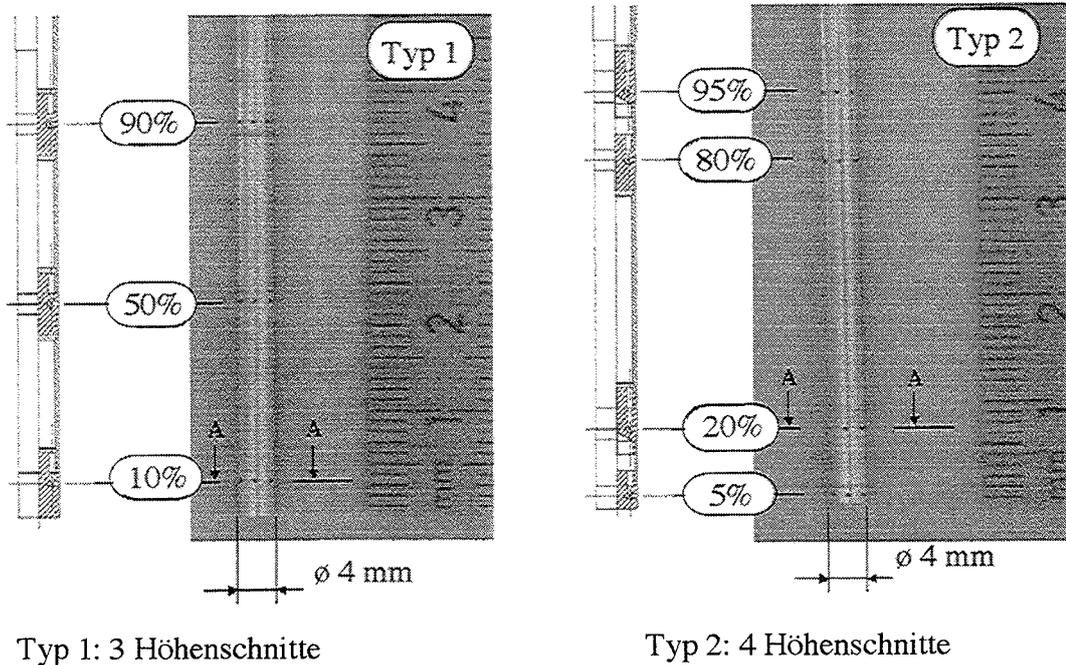


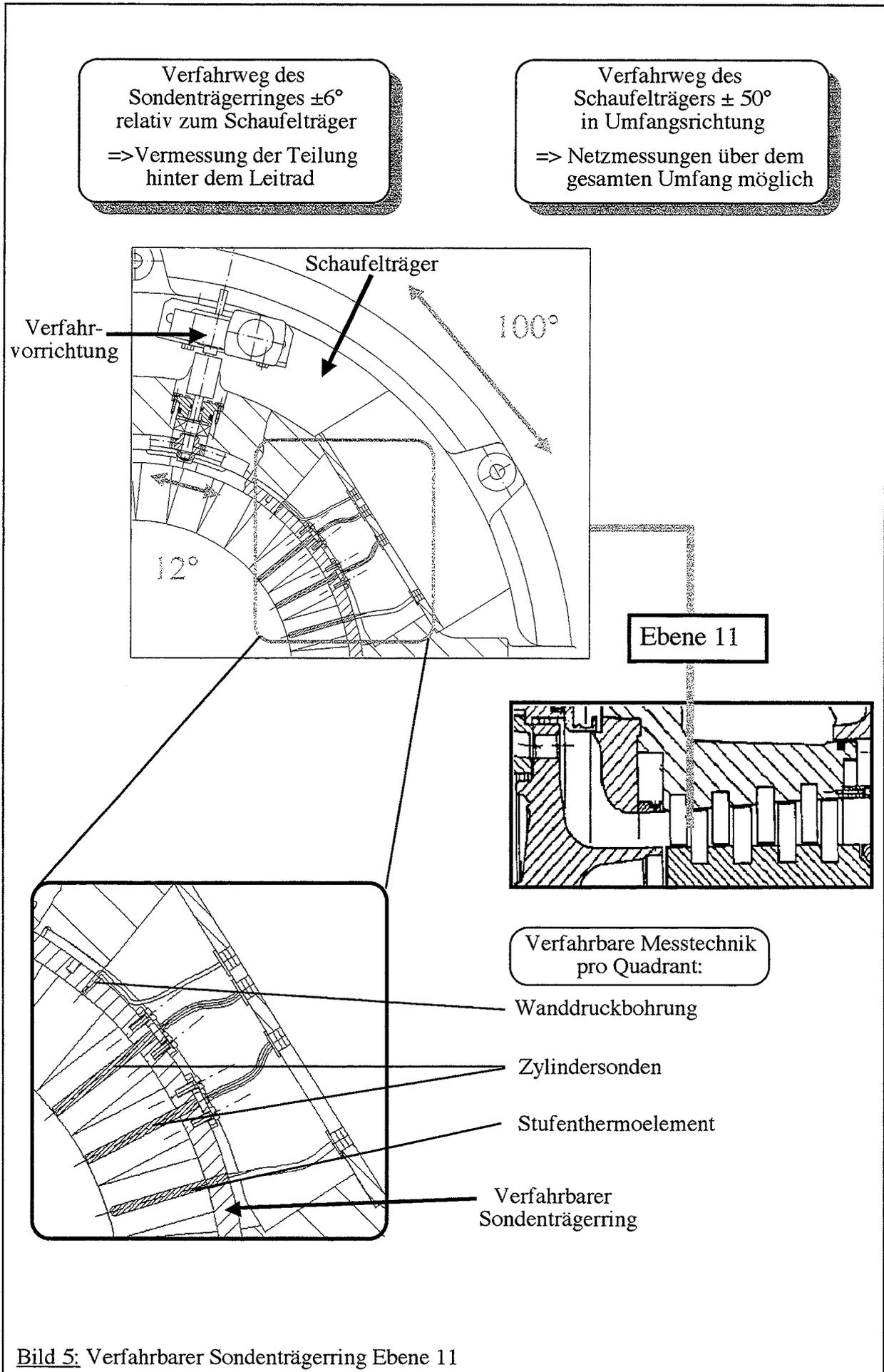
Bild 3: Meßstellenplan eines Quadranten



Typ 1: 3 Höhengschnitte

Typ 2: 4 Höhengschnitte

Bild 4: 3-Loch Zylindersonden (2 Typen)



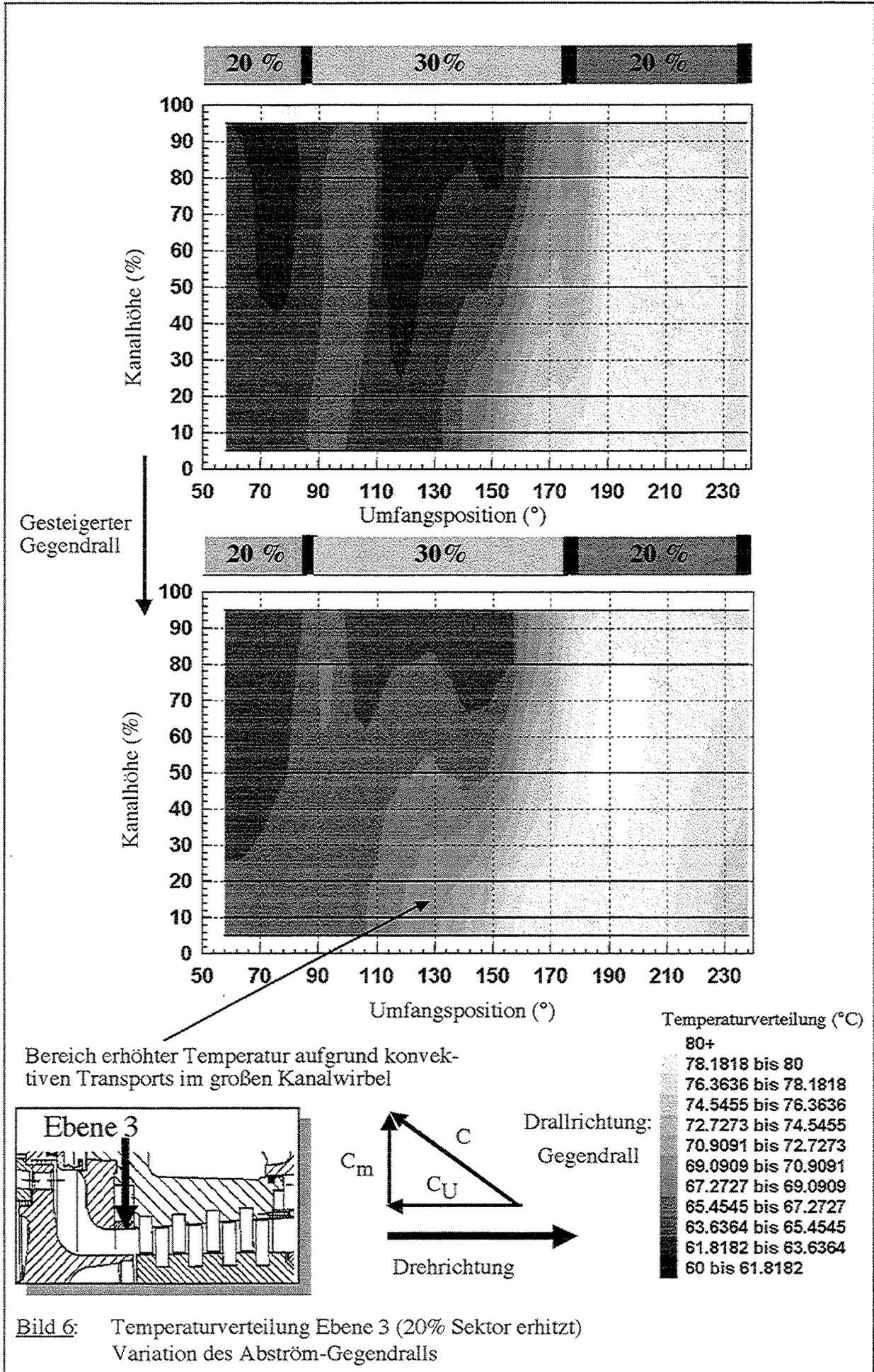


Bild 6: Temperaturverteilung Ebene 3 (20% Sektor erhitzt)
Variation des Abström-Gegendralls

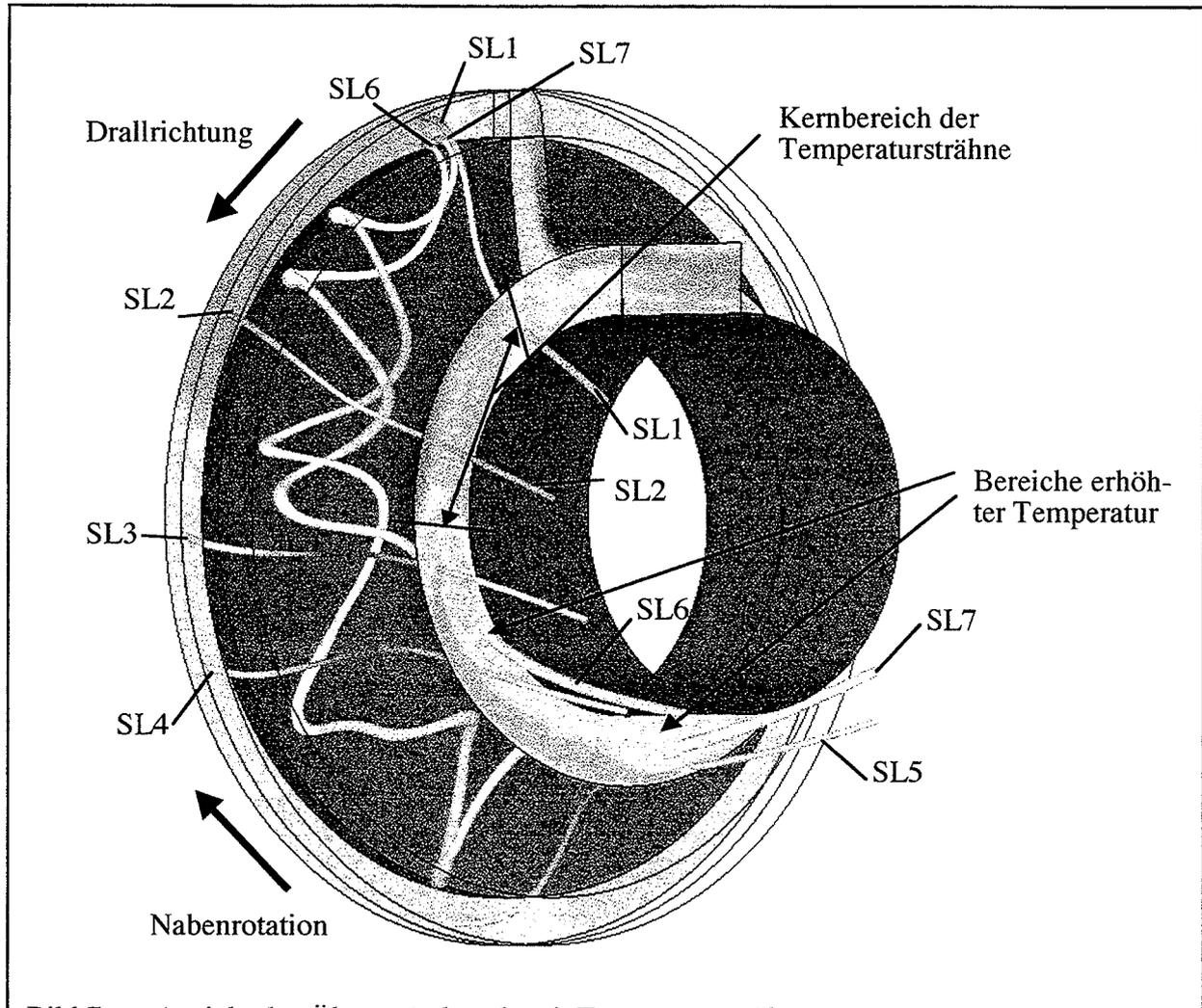


Bild 7: Ansicht des Überströmkanals mit Temperatursträhne
Temperaturverteilung und Stromlinien im Kanal

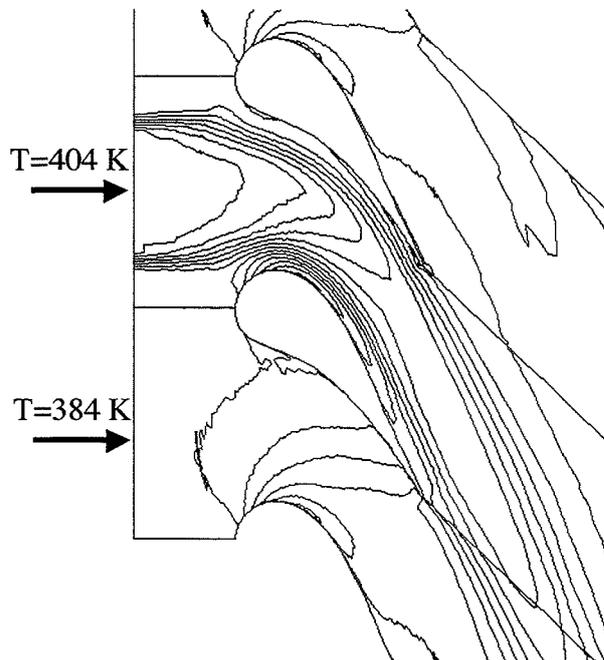


Bild 8: Leitbeschaufelung im Mittelschnitt mit Temperatursträhne
Isothermen

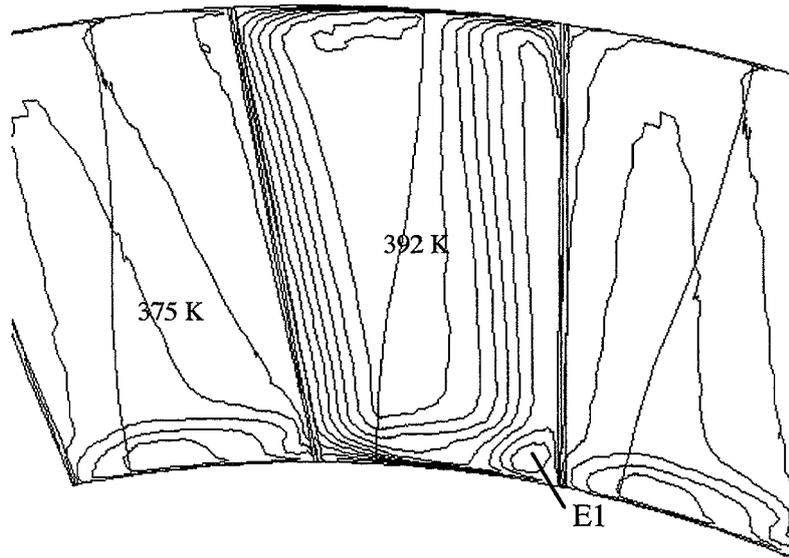


Bild 9: Axialschnitt kurz vor Hinterkante im Leitkanal
Isothermen

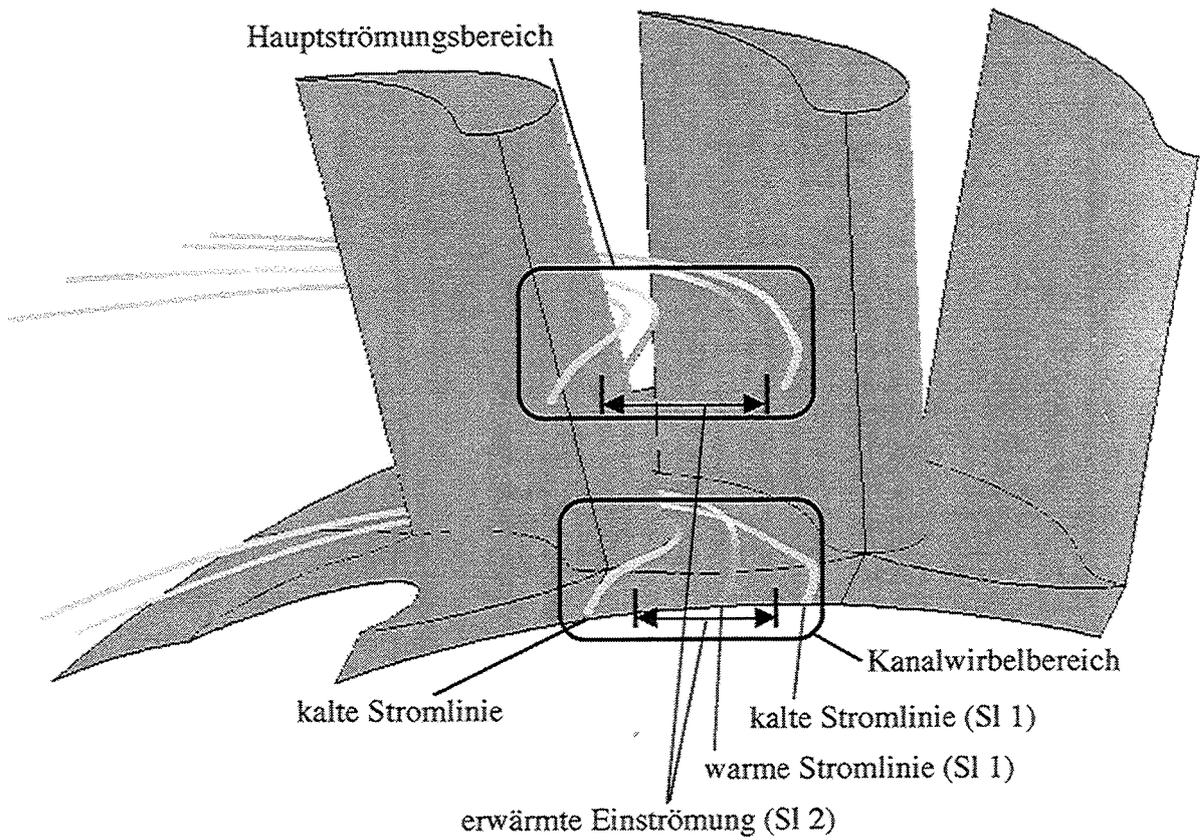


Bild 10: Stromlinien im Leitkanal mit Temperatursträhne