

Heft R 504 (1999)

Informationstagung Turbinen, Herbst 1999, Heidelberg

INSTITUT FÜR DAMPF- UND GASTURBINEN

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

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

---

Abschlussbericht 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 31.10.1999

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

Bearbeiter : Dipl.-Ing. H. Funke

Dipl.-Ing. J. Gier

Dipl.-Ing. T. Heuer

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 Beschaukelungen 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 Spalträume 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 Turbinenbeschaukelung 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, 3-dimensional 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

##### 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. 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 aufgeprägt werden, Bild 2. Dadurch können Strömungs- und Temperatenausgleichsvorgänge voneinander entkoppelt untersucht werden. Die gradientenfreie Erhitzung der Zuluft des 20% Sektors wird durch eine meanderförmige Strömungsführung und diverse Einbauten im Strömungserhitzer gewährleistet, sowie durch eine am Institut entwickelte Regelung der übertragenen Heizleistung.

Die Überströmkanalkontur ist so gewählt, dass die Ungleichförmigkeit möglichst ungestört an die Stufengruppe übergeleitet wird. Dabei wird durch den grossen Umlenkradius am Eintritt in den vollbeaufschlagten Teil einer Strömungsablösung in Gehäusenähe vorgebeugt. Zur 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 Beschauelungsteils sind vor und hinter dem vollbeaufschlagten Teil und in 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 die installierte Messtechnik der Turbine zeigt Bild 2. Die Positionen 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 Messanordnung ist um 90° versetzt viermal auf dem Umfang angeordnet, wodurch komplette Umfangsmessungen durch Verdrehen des Leitschaufelträgers inklusive der Messtechnik möglich sind. Bild 4 zeigt die zwei Typen der Mehrebenen-Zylindersonden, die zur Vermessung des Strömungsfeldes 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 sehr feiner Auflösung über dem gesamten Umfang und der Kanalhöhe in den Ebenen vor und hinter dem vollbeaufschlagten Teil und der gesamten ersten Stufe möglich.

##### Experimentelle Ergebnisse

Ziel bei den Untersuchungen zur Temperaturungleichförmigkeit ist es, den Verlauf einer dem vollbeaufschlagten Teil aufgeprägten Temperatursträhne und eines Massendefektes in der Stufengruppe zu verfolgen und Ausgleichs- und Mischungsmechanismen zu analysieren. Um die Einflüsse von Störungen im Verlauf der Stufengruppe analysieren zu können, werden Referenzfälle bei Vollbeaufschlagung, Temperaturstörungen und Massendefekte bei unterschiedlichen Betriebszuständen (Mit- und Gegendrallvariation um den drallfreien Auslegungspunkt unter Repetierbedingung) in der Stufengruppe untersucht, Tabelle 1.

### Analyse der Eintrittsbedingung

Für die Untersuchungen zum Strömungs- und Temperatursausgleich im 4-stufigen Turbinenteil ist die genaue Kenntnis des Strömungsfeldes am Eintritt nötig. Bild 5a zeigt die Massenstromdichte für Vollbeaufschlagung ( $\epsilon=100\%$ ) und den Massendefektfall ( $\epsilon=80\%$ ) bei drallfreier Abströmung aus der Regelstufe. Aufgrund der Geometrie der Regelstufe und des Überströmkanals stellt sich in Umfangs- und Radialrichtung ein ungleichförmiges Strömungsfeld ein. Der Querschnitt oberhalb der Kanalmitte ist stärker durchströmt als im unteren Teil. Die Sektortrennstellen der Regelstufe zeichnen sich als radial verlaufende Einbrüche in der Massenstromverteilung ab, die oberhalb der Mitte senkrecht und in der unteren Kanalhälfte gegen die Drehrichtung versetzt verlaufen. Es stellt sich aufgrund der Zuströmgeometrie der Düsengruppe am Beginn jeder Sektorströmung (in Drehrichtung) ein höherer Massendurchsatz ein. Die maximale lokale Massenstromdichte findet sich in der oberen Kanalhälfte bei ca. 80-90% der Kanalhöhe.

Bei Teilbeaufschlagung, Bild 5b, wird das Gebiet stromab des geschlossenen Sektors A (20% Massendefekt) nur schwach durchströmt. Hierbei kommt es aufgrund der Zuströmverhältnisse in der Regelstufe zu einem maximalen Massendurchsatz an der Trennstelle zwischen dem unbeaufschlagten Sektor A und dem Sektor D. Die Sektortrennstellen zeichnen sich wieder als schwach durchströmte Bereiche über der gesamten Kanalhöhe ab. Der Hauptanteil des Massentransports verlagert sich bei Teilbeaufschlagung durch die geringere Masse bei einem unverändertem Ausgleichsraum bedingt mehr zur Kanalmitte hin.

Bild 6a zeigt die Umfangsverteilungen der 2-D-Geschwindigkeitsvektoren auf 7 radialen Höhenschnitten bei Vollbeaufschlagung und bei Teilbeaufschlagung. Insgesamt zeigt sich ein inhomogenes und ungleichförmiges Geschwindigkeitsfeld, das nur im Bereich der maximalen Massenstromdichte die geringsten Winkeländerungen aufweist. Bei Vollbeaufschlagung ist in Nabennähe sehr gut das "Aufplatzen" der getrennten Sektoren aufgrund der Massendefekte an den Trennstellen zu beobachten. In Nabennähe zeigen sich stärkere Winkeländerungen und Massendurchsätze im Bereich der Trennstellen aufgrund der Strömungsvorgänge im Überströmkanal.

Anhand des Vektorplots, Bild 6b, ist sehr gut zu sehen, wie die Strömung an den Rändern von Sektor A bestrebt ist, den aufgeprägten Massendefekt auszugleichen. Hierbei liegt in Gehäusenähe an den Rändern des Sektors A geprägt durch die Strömungsführung in der Regelstufe ein unterschiedliches Ausgleichsverhalten vor. Im Bereich der ungestörten Strömung (Sektor C) zeigt sich ein vergleichbares Strömungsprofil wie bei Vollbeaufschlagung.

### Temperaturungleichförmigkeiten in Umfangsrichtung

Durch Aufheizen des Sektors A um 20K wird der vollbeaufschlagten Stufengruppe ein ungleichförmiges Temperaturprofil bei Vollbeaufschlagung aufgeprägt. Bild 7a zeigt die Temperatur- und Totaldruckverteilung für den Fall bei 100% Beaufschlagung und erhitzten Sektor A. Hierbei werden die drei Höhenschnitte in Gehäusenähe (80%, 90% und 95%) und die drei Höhenschnitte in Nabennähe (5%, 10%, 20%) flächengewichtet gemittelt dargestellt. Das Totaldruckprofil ist stark vom Einfluss der Sektortrennstellen und der Zuströmgeometrie der Regelstufe gekennzeichnet.

Die Temperatursträhne, die der Regelstufe als Blockprofil aufgeprägt wird, zeigt aufgrund der Ausgleichsvorgänge in der Regelstufe und im Überströmkanal eine leichte Glättung der

Randzonen der Strähne, aber die Strähne wird sehr kompakt an den vollbeaufschlagten Teil übergeleitet. In der Temperaturverteilung ist auch deutlich der Einfluss der Sektortrennstellen als Temperaturerhöhung über der gesamten Kanalhöhe zu erkennen. Diese Strähnen sind die Folge einer verminderten lokalen Energieumsetzung in der Regelstufe und von Dissipation an den Trennstellen. Diese Temperaturerhöhungen können durch den Überströmkanal nicht ausgeglichen werden.

Im Falle des Massendefektes bei Teilbeaufschlagung, Bild 7b zeigt sich zusätzlich zur ungleichförmigen Totaldruckverteilung ein ungleichförmiges Temperaturprofil über dem Umfang. Diese asymmetrische Temperaturstörung entsteht aufgrund der Strömungsvorgänge in der Regelstufe abhängig von Überexpansion und Verlusten in der Regelstufe. Die Totaldruckverteilung zeigt im Bereich des unbeaufschlagten Sektors A einen deutlichen Einbruch. An den Rändern von Sektor A zeigt sich ein sehr unterschiedliches Ausgleichsverhalten. An der Trennstelle B-A wird der Ausgleich stark begünstigt, da die Leitschaufeln Material aus Sektor B in den unbeaufschlagten Sektor A lenken und dieses Fluid an der Energieumsetzung teilnehmen kann. Dies zeigt sich sowohl in der Totaldruckverteilung als auch in der Temperaturverteilung als lokales Minimum (Überexpansion). Anders verhält sich die Strömung an der Trennstelle A-D. Hier wird die Strömung vom unbeaufschlagten Sektor A weggelenkt, was sich in einer sehr scharfen Trennung sowohl in der Totaldruck- als auch in der Temperaturverteilung und somit in einem schlechten Ausgleichsverhalten zeigt. Hierbei ist im Bereich des steilen Totaldruckanstiegs auch der sehr steile Abfall der Temperatur zu erkennen. Diese Phänomene führen zu dem lokalen Massenstrommaximum an der Trennstelle A-D. In Nabennähe zeigt sich sowohl in der Totaldruck- als auch in der Temperaturverteilung der beste Ausgleich durch den Überströmkanal.

Die Entwicklung dieser Temperaturungleichförmigkeiten im 4-stufigen Turbinenteil ist in Bild 8a und 8b für den Auslegungspunkt der Stufengruppe ( $\Psi_{ysg}=-2,3$ ) dargestellt. Hierbei zeigt sich für die beiden betrachteten Fälle, dass die Temperatursträhne am Austritt aus der Stufengruppe (Ebene 04) immer noch vorhanden ist und sich nur die Form der Strähne für beide Fälle vergleichbar geändert hat. Der Einfluss der Sektortrennstellen ist hinter der ersten Stufe (Ebene 12) und sehr abgeschwächt am Austritt aus der Stufengruppe (Ebene 04) zu erkennen. Zusätzlich ist die Temperaturverteilung in Ebene 04 stark von der Geometrie des asymmetrischen Abströmgehäuses beeinflusst. Dies zeigt sich in einer Temperaturungleichförmigkeit über dem Umfang mit dem Minimum im unteren Bereich zwischen  $200^\circ$  und  $340^\circ$ . Prinzipiell lässt sich feststellen, dass sich die Temperatursträhnen im 4-stufigen Turbinenteil nur sehr langsam ausgleichen.

#### Analyse der radialen Temperaturungleichförmigkeit

In den Randbereichen einer Temperaturungleichförmigkeit werden Turbinenschaufeln mit starken Temperaturgradienten über der Kanalhöhe beaufschlagt. In einem ersten Schritt der 2-D Datenreduktion zur Analyse dieser radialen Temperaturungleichförmigkeit gibt die flächengewichtete Standardabweichung der Temperatur Aussagen über die Entwicklung der radialen Temperaturgradienten. In Bild 9 ist die Standardabweichung des radialen Temperaturfeldes des Referenzfalles ( $\epsilon=100\%$ ), sowie des Falles mit Temperatursträhne ( $\epsilon=100\%$ ,  $\Delta T=20K$ ) beispielhaft für Ebene 12 hinter der ersten Stufe dargestellt. Um die prinzipiellen Strömungseffekte innerhalb der Stufengruppe von den ausschliesslich temperatur-

getriebenen Effekten zu separieren, wird die Standardabweichung des Temperatursträhnenfalls auf den Referenzfall bezogen. Somit ist es möglich die rein temperaturgetriebenen Phänomene in der mehrstufigen Stufengruppe zu analysieren.

Die bezogene radiale Ungleichförmigkeit, Bild 10 zeigt am Eintritt in die Stufengruppe in Ebene 03 für alle drei Drallfälle (T1, T2 und T3) identische Einflüsse. Somit lässt sich feststellen, dass bei der Eintrittsbedingung keine Stromaufwirkung der 4-stufigen Stufengruppe in Abhängigkeit vom Drall auf die Eintrittsbedingung erfolgt. Somit ist die Voraussetzung für eine Analyse im weiteren Verlauf der Expansion bei gleichen Eintrittsbedingungen gegeben. Die stärksten Abweichungen sind im Bereich der Ränder der Strähne zu finden. Hier treten in radialer Richtung aufgrund der Schrägstellung der Strähne, bedingt durch die Regelstufe und den Überströmkanal, die stärksten Temperaturgradienten auf. Im weiteren Verlauf der Expansion sinkt die radiale Ungleichförmigkeit bezogen auf den Referenzfall durch den fortschreitenden Ausgleich der Strähne. Hinter der ersten Stufe ist festzustellen, dass mit steigender Schaufelbelastung (T1->T3) die Breite der Ungleichförmigkeit in Umfangsrichtung zunimmt. Gleichzeitig steigt die bezogene Ungleichförmigkeit an. Im Kernbereich der Strähne sinkt die radiale Ungleichförmigkeit sogar unter das Niveau des Referenzfalls, da hier aufgrund der erhöhten Temperatur die radiale Profilierung des Temperaturfeldes durch die Expansion in der Stufe in den Hintergrund tritt. Am Austritt aus dem 4-stufigen Turbinenteil (Ebene 04) ist die radiale Ungleichförmigkeit stärker geglättet und somit der Ausgleich weiter fortgeschritten.

#### Analyse der Strähnenentwicklung im 4-stufigen Turbinenteil

Um die Ausgleichvorgänge im 4-stufigen Turbinenteil untersuchen zu können, eignet sich zur Analyse der Ungleichförmigkeiten im Zuge einer 1-D Datenreduktion die flächengewichtete Standardabweichung der Temperaturfelder in den untersuchten Bilanzebenen.

Bild 11 zeigt die Standardabweichungen der Temperatur in den einzelnen Bilanzebenen für alle untersuchten Fälle. Hierbei zeigt sich, dass die Ungleichförmigkeit des gesamten Temperaturfeldes beim Referenzfall im Verlauf der Expansion stetig ansteigt. Insbesondere nach der ersten Stufe ist ein Anstieg der Ungleichförmigkeit aufgrund der radialen Profilierung des Strömungsfeldes durch die Expansion in der Stufe zu erkennen. Durch Normierung auf die Eintrittsungleichförmigkeit ist eine vergleichende Betrachtung aller untersuchten Fälle möglich. Es zeigt sich für alle untersuchten Betriebspunkte und Störungen ein schlechterer Ausgleich für die erste Stufe im Vergleich zu den folgenden des Stufenverbandes.

In den Fällen mit Temperatursträhne ist es möglich, durch Normierung der Temperatur auf den Referenzfall und den maximalen Temperaturunterschied am Eintritt in die Stufengruppe ( $T_{red}$ ), temperaturgetriebene Ausgleichsvorgänge von den prinzipiellen Maschineneffekten zu separieren, Bild 12. Somit kann man den ausschliesslich temperaturgetriebenen Ausgleich analysieren. Zusätzlich erlaubt die normierte Temperatur eine Betrachtung des Formfaktors der maximalen Amplitude  $h$  und somit der maximalen Temperaturbelastung. Betrachtet man bei der Temperaturstörung diese reinen Temperaterausgleichsvorgänge, so zeigt sich für die erste Stufe ein besseres Ausgleichsverhalten der Temperatur aufgrund der stärkeren, den Ausgleich treibenden Temperaturgradienten. Der Einfluss des Schaufelbelastung (Drall) ist hierbei als Einfluss gering. Analysiert man allerdings die normierte Amplitude, zeigt sich hinter der ersten Stufe ein deutlich vom Drall abhängiger Einfluss. Hier sind

die Temperaturspitzen im Auslegungspunkt (Drallfrei) am geringsten. Für die grösste Schaufelbelastung (Gegendrall) zeigt sich auch die maximale Temperaturspitze.

Bei den untersuchten Temperaturstrahlen und Drallfällen lässt sich feststellen, dass die Ungleichförmigkeit am Austritt nach 4 Stufen auf 71-73% der Eintrittsungleichförmigkeit ausgeglichen ist. Die normierte Amplitude  $h$  fällt ebenfalls auf ca. 73% der Eintrittsamplitude ab und lässt somit auf einen gleichmässigen Ausgleich in den hinteren Stufen schliessen. Dies lässt sich allgemein auch auf Maschinen mit grösseren Stufenzahlen übertragen.

## 5. Theoretische Arbeiten

### Numerisches Verfahren

Die Strömung in der 4-stufigen Turbine wurde mit Hilfe des am Institut für Dampf- und Gasturbinen entwickelten Strömungslösers **CHTflow** (**C**onjugate **H**eat **T**ransfer and **f**low) untersucht. **CHTflow** ist in der Lage, gekoppelte Strömungs- und Wärmeübertragungsprobleme simultan zu lösen. Auf der Grundlage eines impliziten Verfahrens werden die vollständigen, kompressiblen, Reynolds-gemittelten Navier Stokes Gleichungen in konservativer Form für stehende und rotierende Koordinaten berechnet. Hierzu wird ein strukturiertes Finite-Volumen Verfahren angewandt. Um auch komplexe Geometrien analysieren zu können, arbeitet der Rechencode mit konturangepassten Koordinaten in Verbindung mit einem Multi-Block Verfahren. Die Einteilung des wahlweise 2- oder 3-dimensionalen Rechengebietes in mehrere Blöcke bietet ausserdem die Möglichkeit Fluidbereiche und Festkörperbereiche gekoppelt in einem Iterationsschritt zu berechnen. **CHTflow** ist mit verschiedenen Turbulenzmodellen ausgestattet. Verwendet wurde hier das bewährte algebraische Baldwin-Lomax Turbulenzmodell. Um eine stationäre Lösung in einer mehrstufigen Turbomaschine zu berechnen, sind die Leit- und Laufräder miteinander über Mischungsebenen gekoppelt.

### Analyse des Ausgleichsvorganges

Das Ziel dieser Untersuchung ist es, Mechanismen, die den Ausgleich von Heissgasstrahlen beeinflussen, zu erfassen und zu analysieren. Hierzu wird zunächst ein Referenzfall experimentell und numerisch untersucht, um die Genauigkeit des numerischen Verfahrens für den Anwendungsfall der vierstufigen Turbine zu überprüfen.

Die vier Reaktionsstufen werden mit Hilfe von 8 H-Blöcken (1 Block pro Kanal) und insgesamt etwa 650.000 Zellen diskretisiert, Bild 13. Jeder Block repräsentiert den Kanal einer Schaufelreihe der vierstufigen Maschine, wobei die Blöcke über Mischungsebenen miteinander gekoppelt sind. Um den Rechenaufwand überschaubar zu halten, sind die Radialspalte der Leit- und Laufräder nicht vernetzt worden. Stattdessen werden die Erhaltungsgrössen an diesen Spalten über periodische Randbedingungen übergeben.

### Referenzfall

Im Referenzfall entspricht der Betriebspunkt dem Auslegungspunkt mit nahezu inzidenzfreier Anströmung im Mittelschnitt ( $\alpha=0^\circ$ ) aufgrund der Repetierbedingung der vier Reaktionsstufen, Bild 14. Die Temperaturverteilung in Ebene 03 ist weitestgehend isotherm bei einem Totaldruck von 1.9 bar und einem Druckverhältnis von 1.61. Die Reynoldszahl am Eintritt ist 122.000 und die Drehzahl beträgt  $6.550 \text{ min}^{-1}$ .

Die Ergebnisse aus dem Experiment und der 3D-Rechnung sind in Bild 15 dargestellt. Sowohl der Abströmwinkel als auch der Totaldruck stimmen zwischen dem Gehäuse und der Hauptströmung gut überein. Da im Bereich der Schaufelspitze die kinetische Energie etwas zu niedrig berechnet wird, werden der Abströmwinkel und der Totaldruck geringfügig unterschätzt, die generelle Form der Radialverteilung wird dennoch erfasst. Daher werden auch die Effekte in der Hauptströmung berücksichtigt, die den Ausgleichsvorgang dominieren, wie z.B. der Strahlenwirbel. Die Temperaturverteilung in Ebene 04 trifft die in den Experimenten ermittelte Verteilung qualitativ exakt und quantitativ mit einer Abweichung von 2K und stellt damit ein sehr gutes Ergebnis für die vierte Turbinenstufe dar. Die Temperaturverteilung hinter der 1. Stufe (Ebene 12) stimmt sehr gut mit dem Experiment überein, so dass das numerische Verfahren insgesamt betrachtet, ungeachtet des vereinfacht modellierten Radialspaltes und des algebraischen Turbulenzmodells, als geeignet angesehen werden kann, die physikalischen Strömungsphänomene hinreichend genau zu erfassen.

### Temperatursträhne

Auf Grundlage des Referenzfalles wurden drei unterschiedliche radiale Temperatursträhnen untersucht, deren Temperatúrausgleich von verschiedenen Mechanismen beeinflusst wird, Tabelle 2. Da in Strömungen hoher Re-Zahlen, wie z.B. in Turbinen, der Wärmetransport durch Diffusion und Leitung nur geringen Einfluss verglichen mit dem Energietransport durch konvektive Transportprozesse hat, wird der Temperatúrausgleichprozess im wesentlichen durch Sekundärströmungen und turbulente Mischungsvorgänge bestimmt. Die Sekundärströmungen werden wiederum durch die Temperatursträhnen beeinflusst. In den Fällen S2 und S3 beträgt die Temperatur das 1.5-fache der Referenztemperatur, um signifikante Sekundärströmungen zu induzieren. Bild 16 zeigt Sekundärströmungsvektoren und Temperaturisolines für ausgewählte Axialschnitte.

Im ersten Leitrad tritt ein nennenswerter Kanalwirbel lediglich in Nähe der Schaufelspitze auf, wo er im Uhrzeigersinn dreht. Im Nabenbereich dagegen verhindert ein starker Radialspaltwirbel die Entstehung eines entsprechenden Kanalwirbels. Da in dieser Maschine ausschliesslich unverwundene Schaufeln eingesetzt sind und diese an der Schaufelvorderkante aufgefädelt sind, sind deren Hinterkanten bezogen auf die radiale Richtung geneigt. Diese Neigung bewirkt zusammen mit der Kanalaufweitung ab ca. 50% Sehnenlänge die Entstehung eines neuen Wirbels, der hier als Neigungswirbel bezeichnet werden soll. Dieser Wirbel ist stark genug, um die Temperatursträhne entgegen dem Uhrzeigersinn zu drehen (Tilting Effekt). Sobald die Strähne das Leitrad verlässt und in den Rotor eintritt, wird sie zusätzlich durch diesen Neigungswirbel ausgemischt. Durch die geringere Dichte in der heissen Temperatursträhne wird die Strömung im 1. Leitrad stärker beschleunigt, so dass das 1. Laufrad mit positiver Inzidenz druckseitig angeströmt wird. Dieser Effekt wird in der Literatur als Karrebrock-Mikolajezak Effekt bezeichnet. Die Anströmung mit positiver Inzidenz bewirkt, unterstützt durch den Tilting Effekt und den Radialspaltwirbel des 1. Leitrades, eine Sekundärströmung von der Saugseite zur Druckseite im Bereich der Temperatursträhne. Stromab bleibt dieses Phänomen deutlich erhalten. Ausserdem ist in den Schnitten  $x/b = 0.55$  und  $0.95$  die Entstehung des Radialspaltwirbels zu erkennen, hervorgerufen durch den Spalt

zwischen Schaufelspitze und Gehäuse. Der Wirbel, der durch die Temperatursträhne verursacht wird, staucht durch seinen Drehsinn entgegen des Uhrzeigers die Temperatursträhne auf der Saugseite zusammen und zieht sie auf der Druckseite in Gehäuse-richtung auseinander, wodurch ein Hot Spot auf der Druckseite nach oben wandert. Der Strähnenwirbel ist so stark, dass der Neigungswirbel nicht mehr in Erscheinung tritt.

Im zweiten Leitrad werden die Sekundärströmungen wesentlich vom 1. Laufrad beeinflusst. Die Aufweitung der Temperatursträhne ist hier etwas weniger ausgeprägt, da bereits ein Strömungsausgleich stattgefunden hat. Der Strähnenwirbel bewirkt auch hier auf der Druckseite eine Verzerrung der Temperatursträhne in Richtung der Schaufelspitze. Er wird verstärkt durch den Radialspaltwirbel an der Schaufelspitze des 1. Laufrades. Der Radialspaltwirbel in Nabennähe ist verstärkt durch den Radialspaltwirbel des 1. Leitrades und durch den Strähnenwirbel im 1. Laufrad.

Im 3. Laufrad herrschen die gleichen Sekundärströmungsphänomene vor wie im 1. Laufrad, der Temperatursausgleich ist jedoch schon viel weiter fortgeschritten wie die aufgeweiteten Isotemperaturlinien anzeigen. Der Strähnenwirbel stellt den bedeutendsten Unterschied zum Referenzfall dar.

Das Auftreten dieser Strömungsphänomene harmoniert mit der umfangsgemittelten Strömungswinkelverteilung, Bild 17. Stromab des dritten Leitrades weist der S2-Fall im Vergleich zum isothermen Referenzfall eine Minderumlenkung von mehr als 2 Grad im Mittelschnitt und eine Mehrumlenkung von mehr als 1° bei 20% und 80% der Kanalhöhe durch den Strähnenwirbel auf. Die kältere, gleich geformte S1-Strähne zeigt den gleichen Trend, jedoch mit schwächerer Ausprägung. Für den Fall S3 mit radialer parabolischer Temperatursträhne ist die Verteilung glatter.

Stromab des 3. Laufrades ist der Abströmwinkel für die kältere Temperatursträhne (20K) fast deckungsgleich mit der Kurve des Referenzfalles. Lediglich im Bereich mittlerer Kanalhöhe führt das höhere Geschwindigkeitsniveau in der Strähne zu kleineren Abströmwinkeln. Für die heißen Strähnen ist dieses Verhalten wesentlich ausgeprägter. Da das Geschwindigkeitsniveau der parabolischen Strähne S3 insgesamt höher ist als das der Blocksträhne, ergeben sich hier kleinere Abströmwinkel als für den Fall S2. An der Nabe ist der Abströmwinkel ca 10° kleiner. Hier führt die Anwesenheit einer Temperatursträhne zu einer Veränderung des Betriebspunktes. Ein vergleichbarer Effekt lässt sich auch bei den experimentellen Untersuchungen einer Strähne in Umfangsrichtung nachweisen, Bild 18. Hier kommt es hinter der ersten Stufe zu einer druckseitigen Inzidenz im Bereich der Temperatursträhne, die abhängig von der Stärke der Strähne ist (vergleichbar: Karrebrock-Mikolajezak Effekt).

Die Beobachtungen bei der Analyse des Abströmwinkels decken sich mit der Entwicklung der radialen Temperaturverteilung in der 4-stufigen Turbine, Bild 19. Es wurden die beiden heißen Strähnen mit unterschiedlichen Ausgangstemperaturprofilen untersucht. Die Gestalt beider Profile ähnelt stromab immer mehr der einer Glockenkurve. Während die blockförmige Temperatursträhne jedoch bereits im Ausgangszustand eine ähnliche Form hat, muss das parabolische Profil zunächst im Naben- und Gehäusebereich seine Form ändern, so dass es in diesen Bereichen zu einem Überschwingen kommt. Hinter dem 2. Leitrad sinkt das Temperaturniveau nicht nur im Kanalmittelschnitt, sondern auch in den Randbereichen nach jedem weiteren Schaufelreihe ab und

die Temperatur gleicht sich merklich aus.

Die Ausgleichsvorgänge lassen sich gut anhand der normalisierten Standardabweichung analysieren, Bild 20. Der Ausgleich ist für die heissen Temperaturstrahlen stärker, da hier die Sekundärströmungsphänomene aufgrund des höheren Dichteunterschiedes in der Strömung sehr viel ausgeprägter sind. Durch die Formänderung des Temperaturprofils von einer Parabel zur Glockenkurve und durch die Ausdehnung der Strähne in die sekundärwirbelbehafteten Randzonen findet im Fall S3 eine stärkere Strömungsdurchmischung statt, wodurch die normalisierte Standardabweichung der statischen Temperatur im 1. Laufrad unterhalb von S2 fällt. Da die normalisierten Standardabweichungen der Fälle S2 und S3 anschliessend parallel verlaufen, wird die Strömung ab der 2. Stufe gleich stark ausgeglichen. Die wesentlichen Unterschiede in den Ausgleichsmechanismen finden also im ersten Laufrad statt.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Eine ungleichförmige Massenstrom- und Temperaturverteilung verursacht zusätzliche Mischungs- und Ausgleichsvorgänge in einer mehrstufigen Turbine. Im experimentellen Teil des Vorhabens ist als Eintrittsbedingung eine ungleichförmige Strömung mit definierten Störungen in Temperatur und Massenstrom über dem Umfang vorgegeben.

Es ist festzustellen, dass eine ungleichförmige Massenstromverteilung bei Teilbeaufschlagung aufgrund der Regelstufe auch Temperaturstörungen induziert. Der Verlauf der reinen Temperaturstörungen im mehrstufigen Turbinenteil zeigt, dass diese auch nach 4 Stufen nur schwach ausgemischt sind. Betrachtet man die temperaturgetriebenen Effekte in der Stufengruppe zeigt die erste Stufe die grösste Ausgleichswirkung. Hier zeigt sich auch eine Abhängigkeit der maximalen Temperaturspitze vom Betriebspunkt. Am Austritt aus dem 4-stufigen Turbinenteil ist die Ungleichförmigkeit sowie die maximale Temperaturspitze der Störung für alle untersuchten Fälle auf ca. 72-73% Ihres Eintrittswertes abgesunken und zeigt keinen Einfluss vom Betriebspunkt

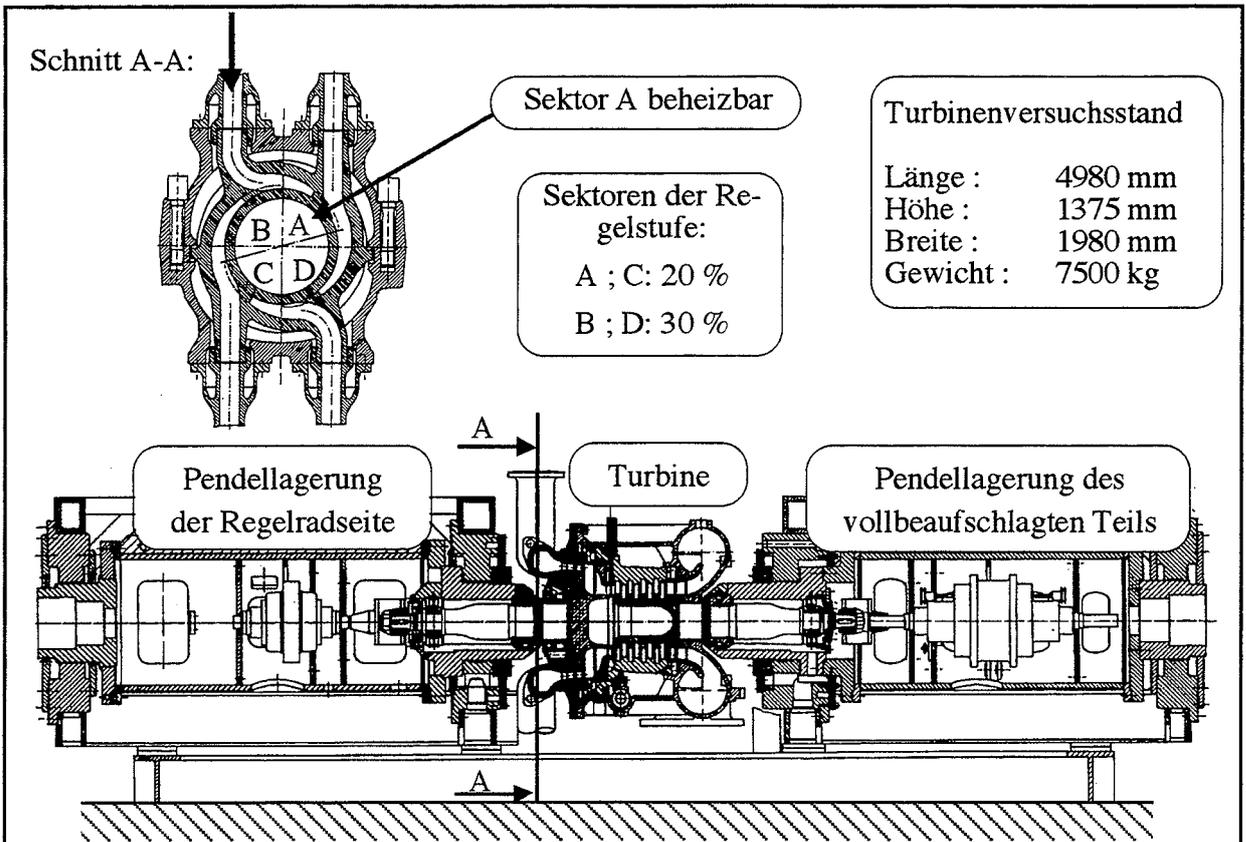
Im numerischen Teil wurde die Entwicklung einer radialen axialsymmetrischen Temperatursträhne in einer 4-stufigen Turbine untersucht. Zur Validierung des Rechenverfahrens wurde ein Referenzfall mit isothermen Eintrittsbedingungen mit den experimentell gewonnenen Daten einer 4-stufigen Versuchsturbine gleicher Geometrie verglichen. Während die Sekundärströmungen im ersten Leitrad kaum mit der Temperatursträhne in Wechselwirkung stehen induziert die Strähne im ersten Laufrad Sekundärströmungen, welche die Form der Strähne über alle folgenden Stufen nachhaltig ändert.

In weiteren detaillierten experimentellen Untersuchungen wird es künftig nötig sein, die Entwicklung einer radialen Temperatursträhne im mehrstufigen Turbinenteil zu analysieren, um die numerischen Erkenntnisse dieses Vorhabens geeignet validieren und vertiefen zu können. Im Gegenzug ist eine numerische Untersuchung einer ungleichförmigen Temperatur- und Massenstromverteilung in Umfangsrichtung in einer mehrstufigen 3-D Berechnung über dem gesamten Umfang von grossem Interesse. Aus der Verknüpfung der experimentellen und numerischen Ergebnisse kann schliesslich ein belastbares Modell erarbeitet werden, dass Ausgleichsvorgänge und physikalischen Phänomene in mehrstufigen Turbinen detailliert beschreibt.

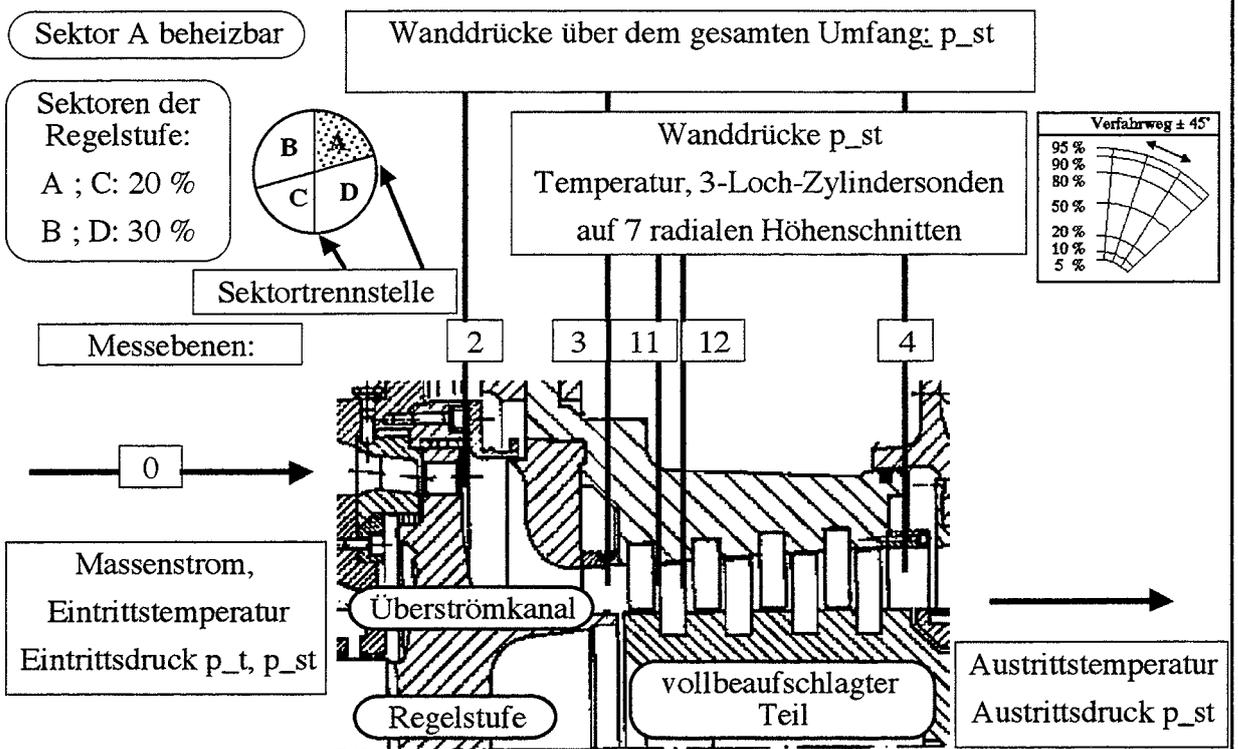
Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis eines Forschungsprojektes, welches von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV, Frankfurt) gestellt und am Institut für Dampf- und Gasturbinen an der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing D. Bohn bearbeitet wurde. Die Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft (BMW, Bonn) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF, Köln, AiF-No. 10780) finanziell gefördert. Die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen dankt Univ.-Prof. Dr.-Ing D. Bohn und den wissenschaftlichen Bearbeitern, Dipl.-Ing. H. Funke, Dipl.-Ing. J. Gier, Dipl.-Ing. T. Heuer, für die Durchführung des Vorhabens sowie dem BMW und der AiF für die finanzielle Förderung. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis der FVV unter der Leitung von Herrn Dr.-sc.tech. J. Bütikofer, ABB Power Generation AG begleitet. Diesem Arbeitskreis gebührt unser Dank für die grosse Unterstützung.

## 7. Literaturverzeichnis

- Bohn, D. Abschlussbericht zum FVV- Forschungsvorhaben Nr. 575 Überströmgehäuse  
Drexler, C. Untersuchung von verschiedenen Überströmgehäusen auf das Ausgleichsverhalten des ungleichmässig angeströmten mehrstufigen Teils einer Turbine mit Teilbeaufschlagung, Heft R 478 (1994), Heft 594 (1995)
- Drexler, C. Strömungsvorgänge und Verlustanteile in ungleichförmig beaufschlagten Turbinenstufen, Diss. RWTH Aachen, 1996
- 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  
Wachter, J. Wechselbeanspruchung einer Turbinenschaufel durch ungleichförmige  
Zuströmung, VDI-Bericht, Nr. 361, 1980, S. 71-79
- Kerrebrock  
Mikolajczak "Intra Stator Transport of Rotor Wakes and its Effect on Compressor  
Performance", *ASME J. of Engineering for Power*, Oct. 1970
- D. Bohn,  
J. Gier: Experimental and Theoretical Investigations on the Flow Equalization in the  
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,  
J. Gier,  
K. Kusterer Comparison of Characteristic Flow Properties in a Turbine Nozzle for Turbu-  
lence Models of Different Complexity, Proceedings of the 3rd Summer Con-  
ference 'Numerical Modelling in Continuum Mechanics', Prag, September 1997
- D. Bohn  
H. Funke  
J. Gier Numerical and Experimental Investigations on the Flow in a 4-Stage Turbine  
with Special Focus on the Development of a Radial Temperature Streak,  
99-GT-27, ASME Turbo Expo '99, Indianapolis, USA, June 1999
- D. Bohn  
H. Funke  
J. Gier Temperature Jet Development in a Cross-Over Channel,  
ECT, London, Great Britain, March 1999
- Dorney, D.J. Numerical Simulations of Hot Streak Migration in a 1-1/2 Stage Turbine,  
AIAA-Paper 95-0181
- Dring, R.P., Radial Mixing in an Axial Turbine, ASME-Paper 94-GT-137



**Bild 1:** Versuchsaufbau



**Bild 2:** Messebenen und Messgrößen

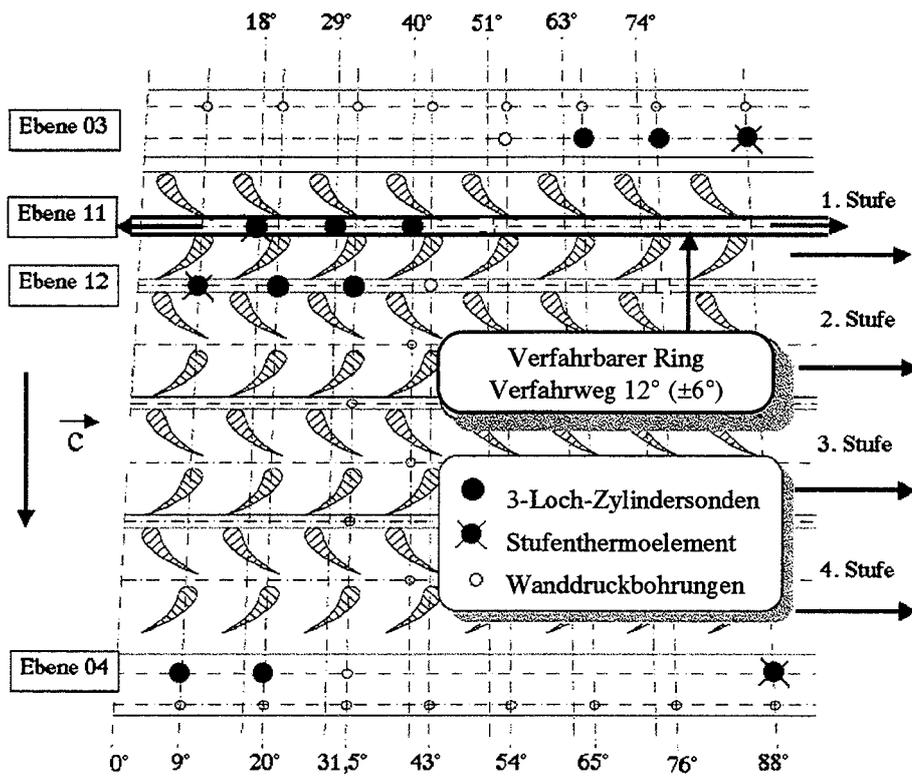


Bild 3: Messstellenplan eines Quadranten

3 Höhenschnitte 4 Höhenschnitte 7 Höhenschnitte

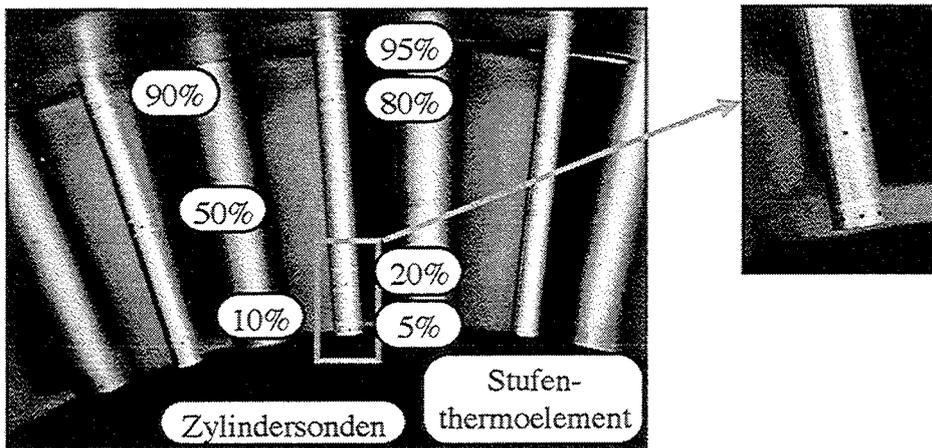
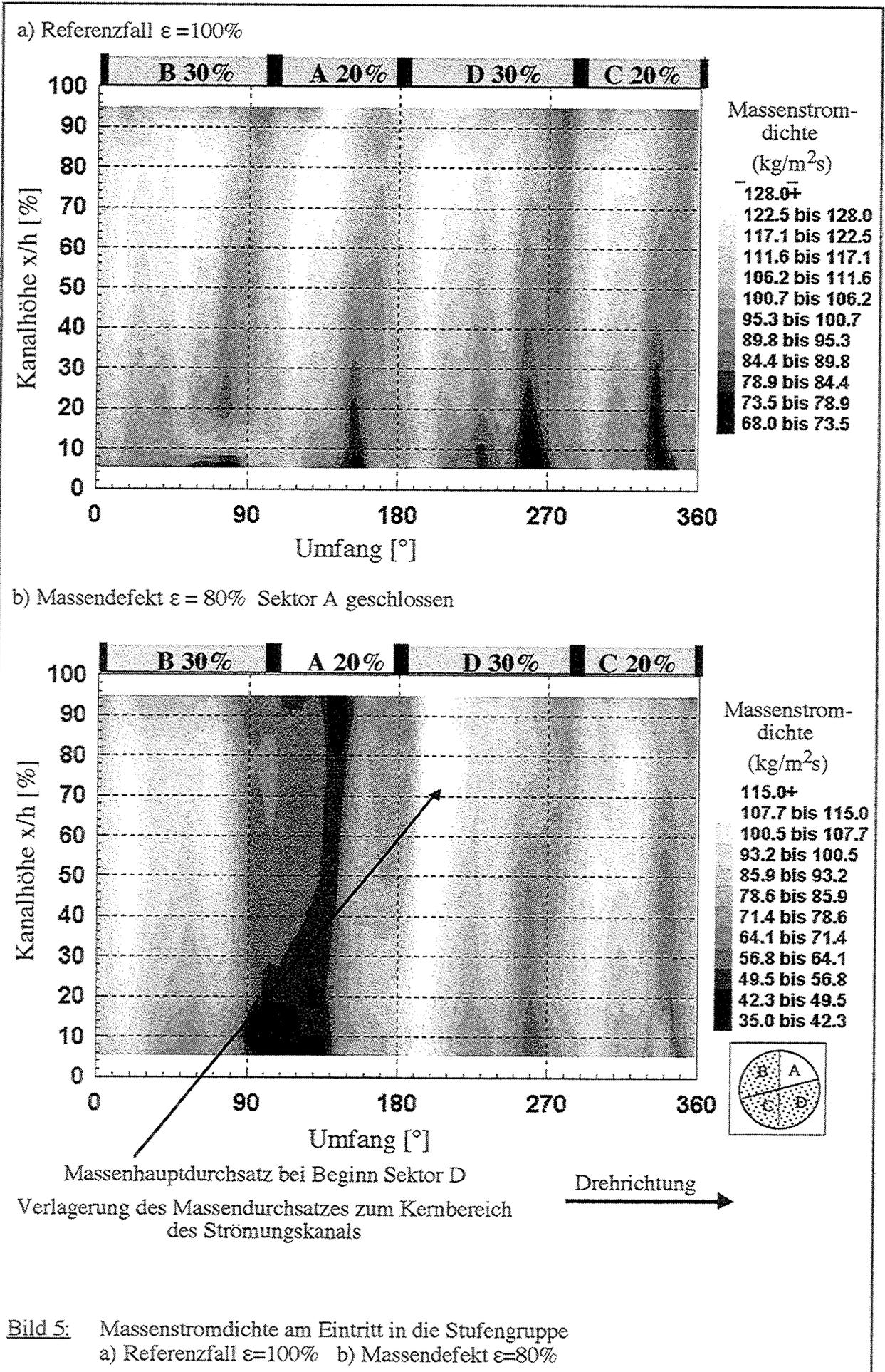


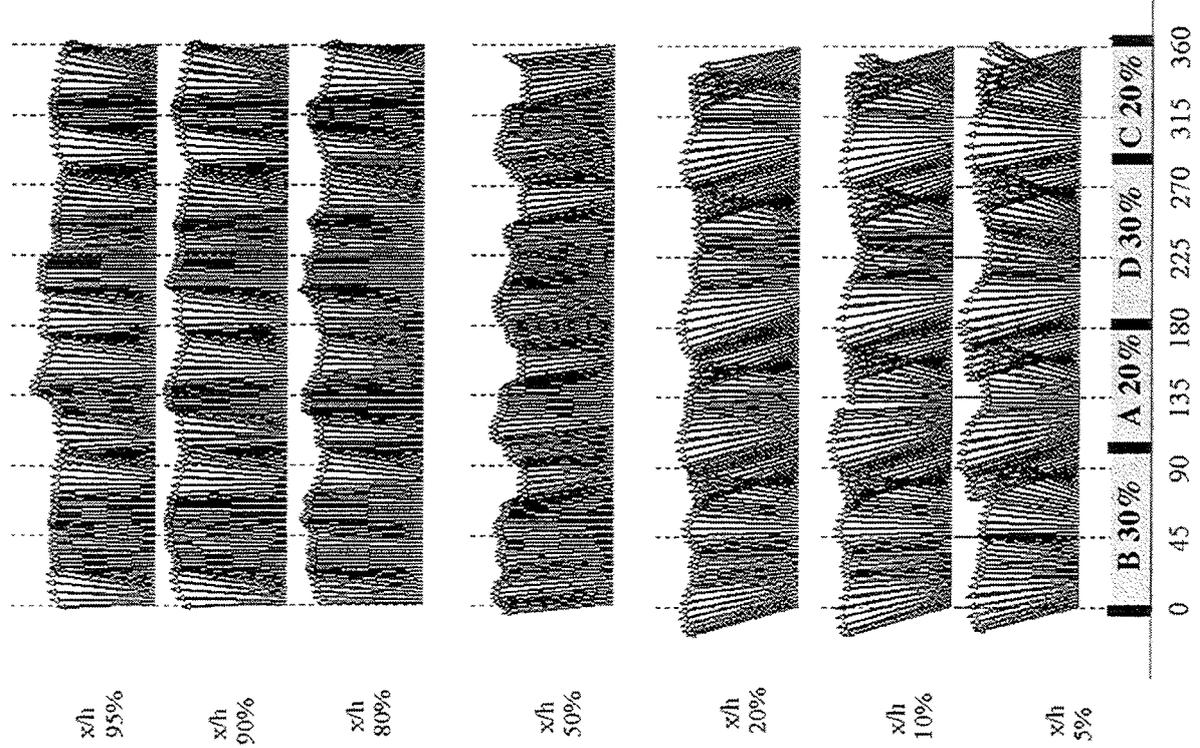
Bild 4: 3-Loch Zylindersonden (2 Typen) und Stufenthermoelement

| Nr | Versuch  | $\epsilon$ | $\pi_{SG}$     | $\psi_{y,SG}$ |      |      |
|----|--|------------|----------------|---------------|------|------|
|    |  |            |                | -2            | -2,3 | -2,6 |
| R  | Referenzfall                                     | 100%       | 1,61           | R1            | R2   | R3   |
| T  | Sektor A erhitzt ( $\Delta T_A = 20 \text{ K}$ ) | 100%       | 1,61           | T1            | T2   | T3   |
| TS | Sektor A erhitzt ( $\Delta T_A = 30 \text{ K}$ ) | 100%       | 1,61           | TS1           | TS2  | TS3  |
| M  | Sektor A geschlossen                             | 80%        | $\approx 1,34$ | M1            | M2   | M3   |

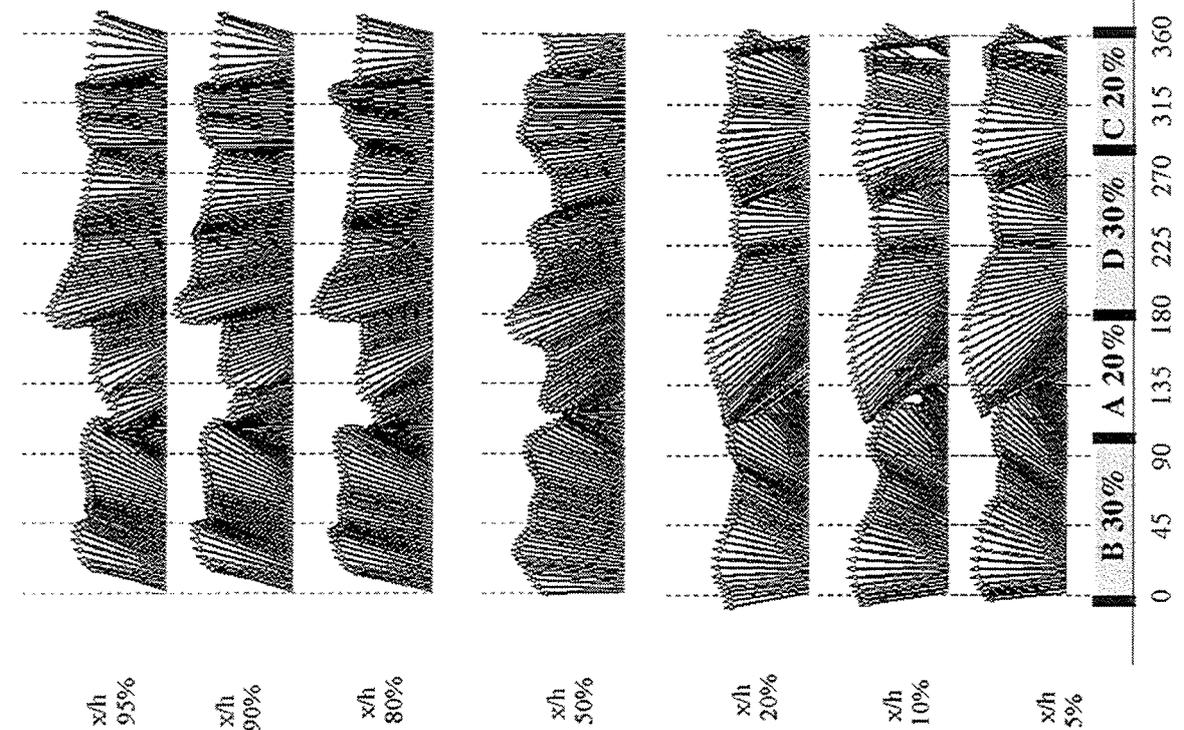
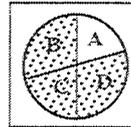
Tabelle 1 Versuchsplan mit Versuchsnomenklatur



a) Referenzfall  $\epsilon = 100\%$

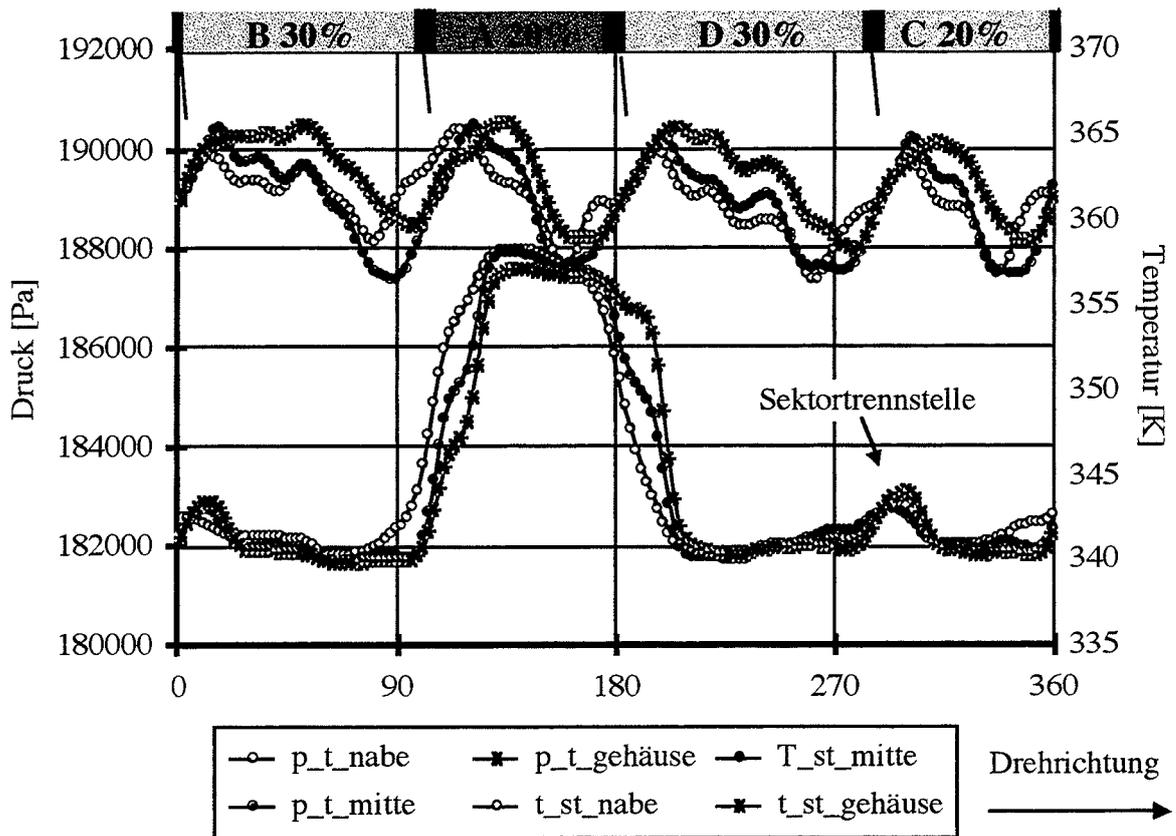


b) Massendefekt  $\epsilon = 80\%$  Sektor A geschlossen



**Bild 6:** Geschwindigkeitsvektoren der Eintrittsebene drallfreie Abströmung der Regelstufe  
 a) Referenzfall  $\epsilon = 100\%$  b) Massendefekt  $\epsilon = 80\%$

a) Temperatursträhne  $\epsilon = 100\%$  Sektor A erhitzt ( $\Delta T = 20K$ )



b) Massendefekt  $\epsilon = 80\%$  Sektor A geschlossen

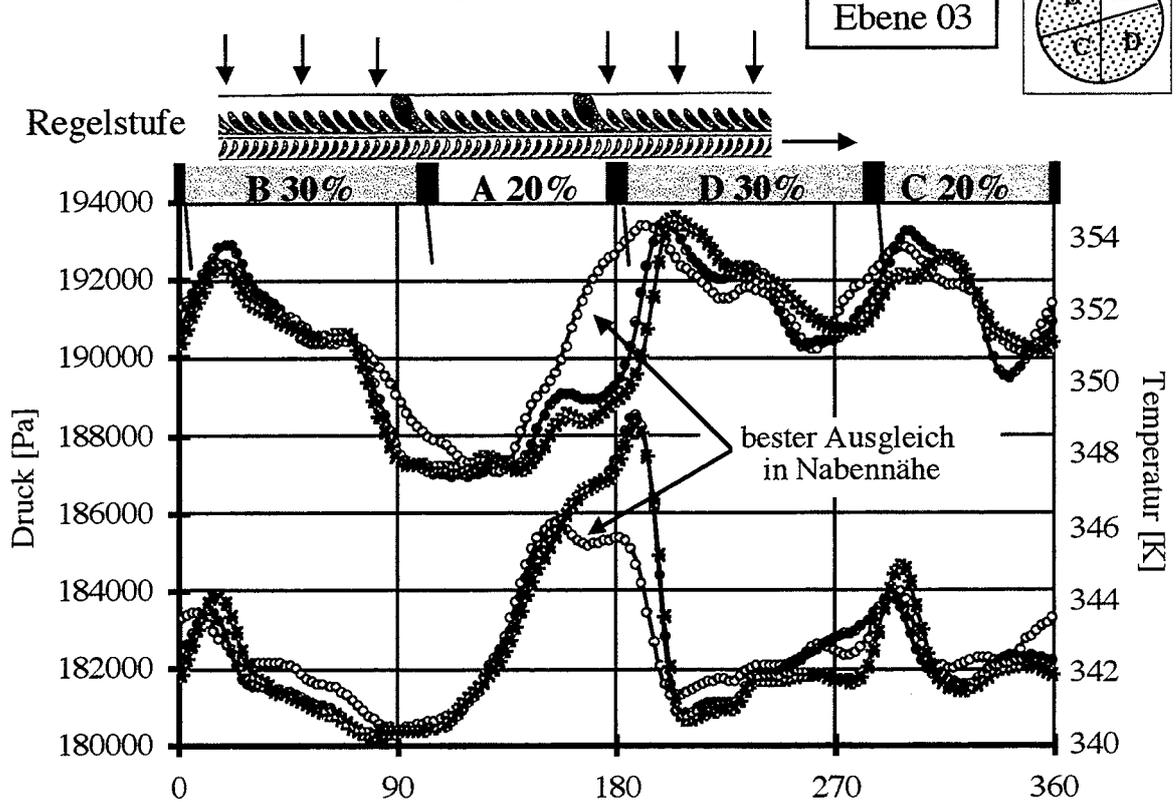
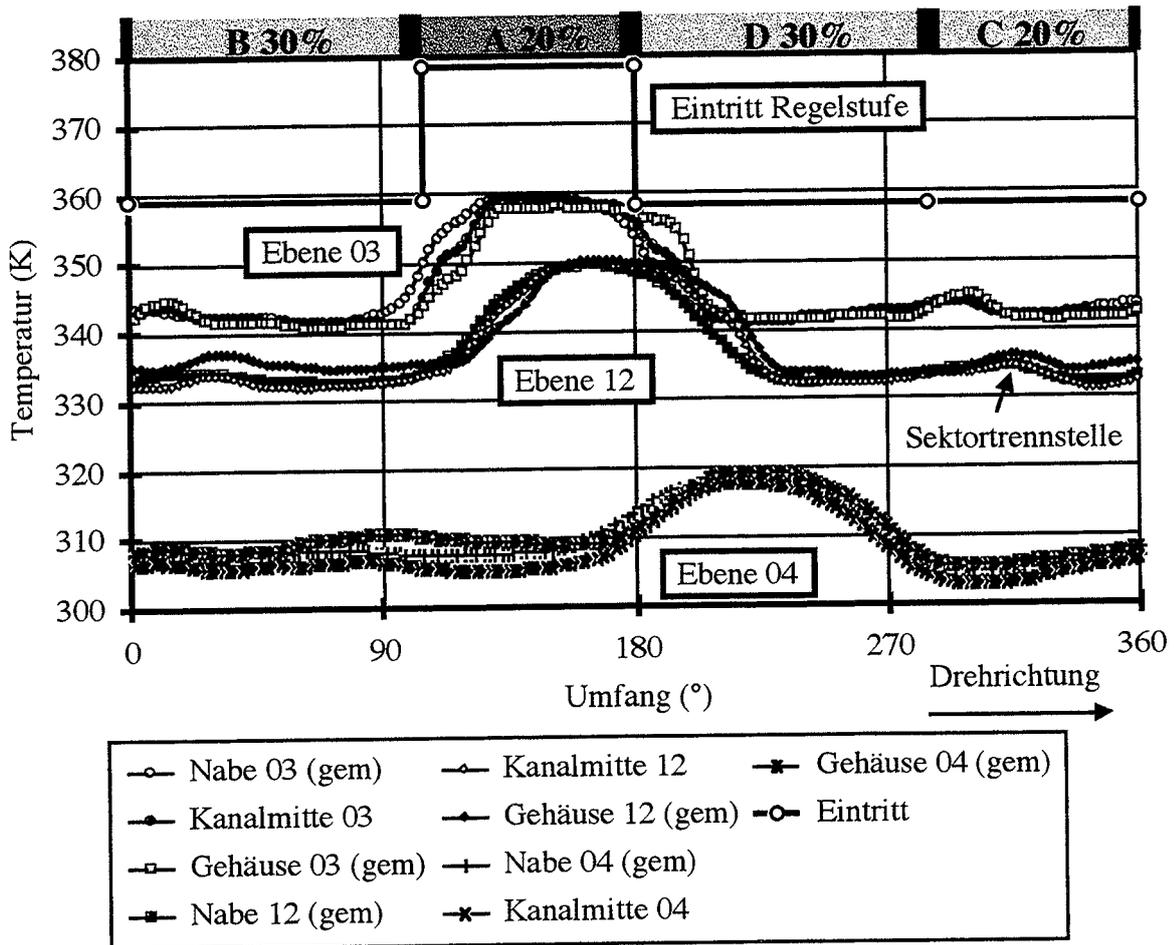
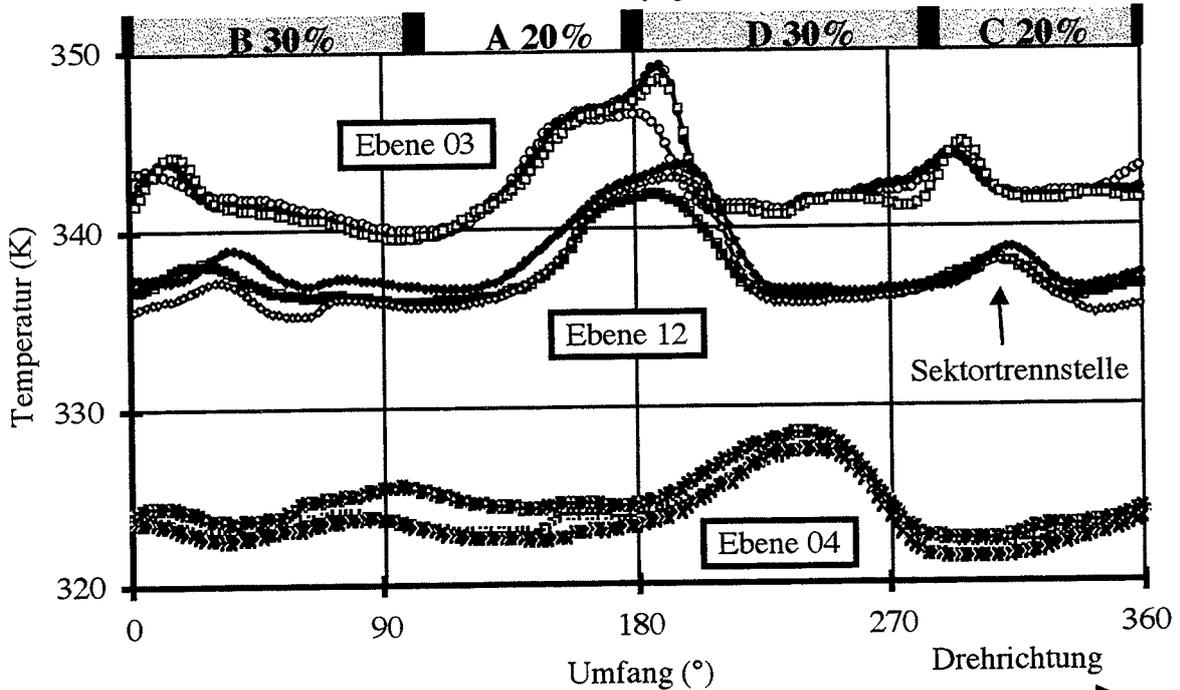


Bild 7: Totaldruck- und Temperaturverteilung Eintrittsebene des 4-stufigen Teils  
a) Temperatursträhne  $\epsilon=100\%$  ( $\Delta T = 20K$ ) b) Massendefekt  $\epsilon=80\%$

a) Temperatursträhne  $\epsilon = 100\%$  Sektor A erhitzt  $\psi_{y_{sg}} = -2,3$



b) Massendefekt  $\epsilon = 80\%$  Sektor A geschlossen  $\psi_{y_{sg}} = -2,3$



**Bild 8:** Entwicklung der Temperaturverteilung im 4-stufigen Turbinenteil  $\psi_{y_{sg}} = -2,3$   
 a) Temperatursträhne  $\epsilon = 100\%$   $\Delta T = 20K$ , b) Massendefekt  $\epsilon = 80\%$

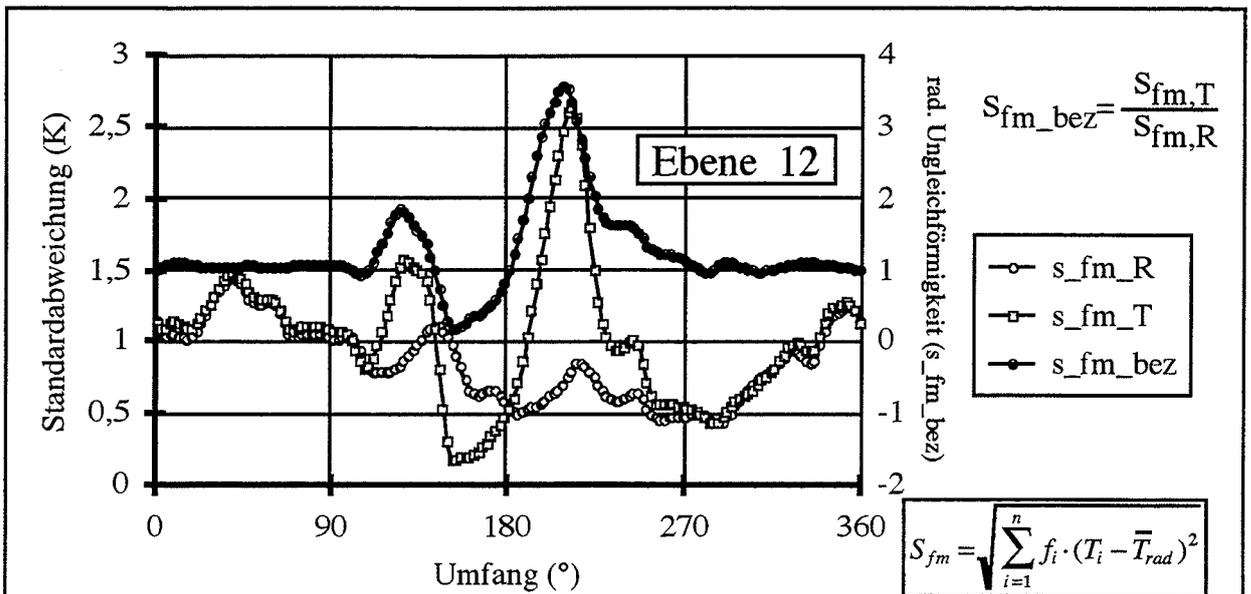


Bild 9: Radiale Ungleichförmigkeit Temperatur - Verfahren

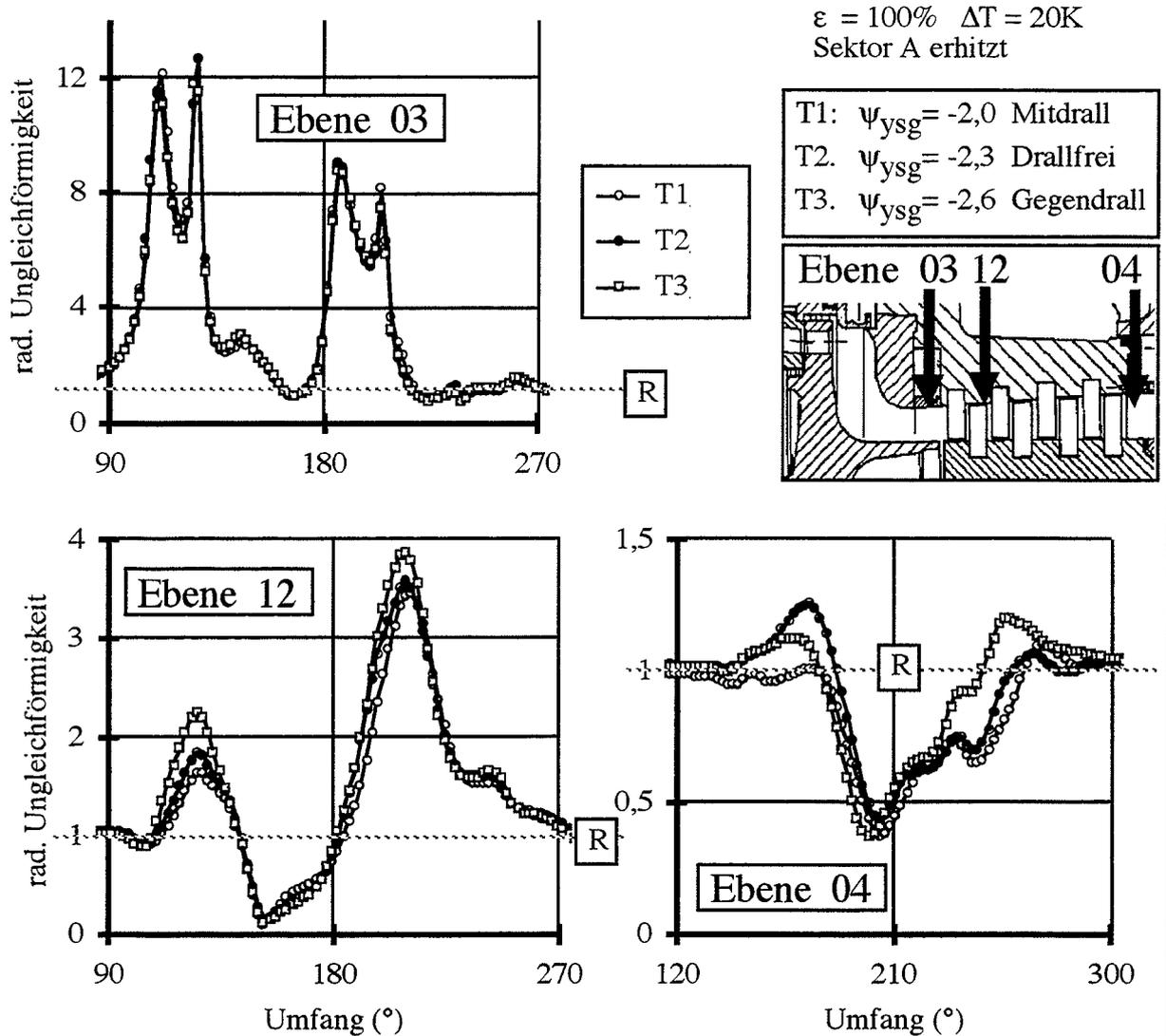


Bild 10: Radiale Ungleichförmigkeit  $S_{fm\_bez}$  - Temperatursträhne T1, T2, T3

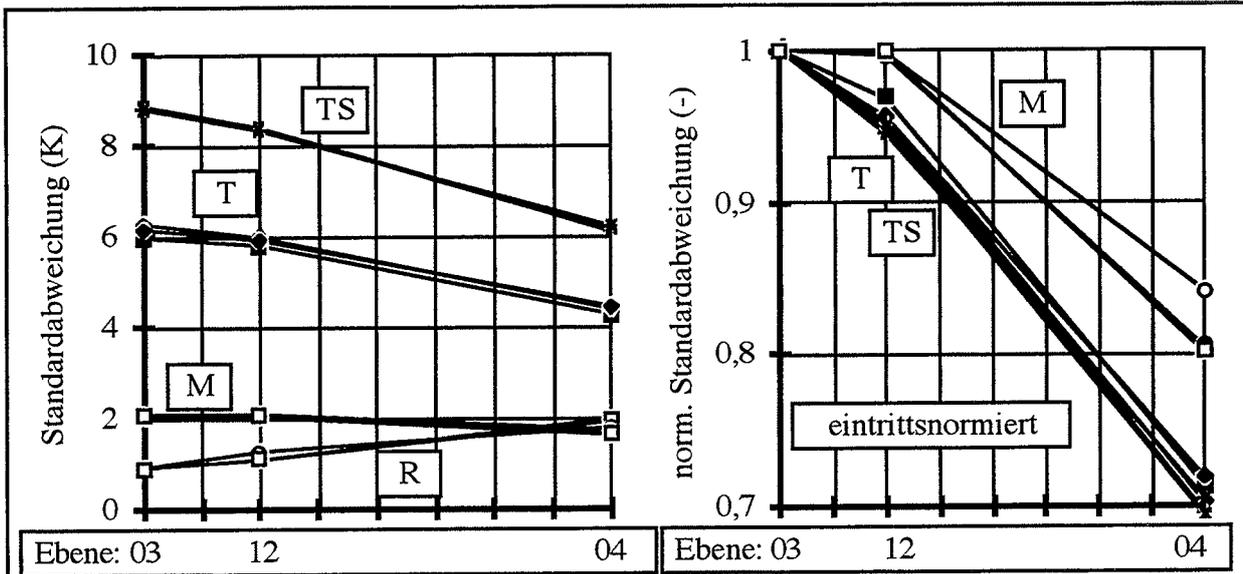


Bild 11: Entwicklung der Temperaturungleichförmigkeit im 4-stufigen Turbinenteil  
Referenzfall - Massendefekt - Temperaturströhne T und TS

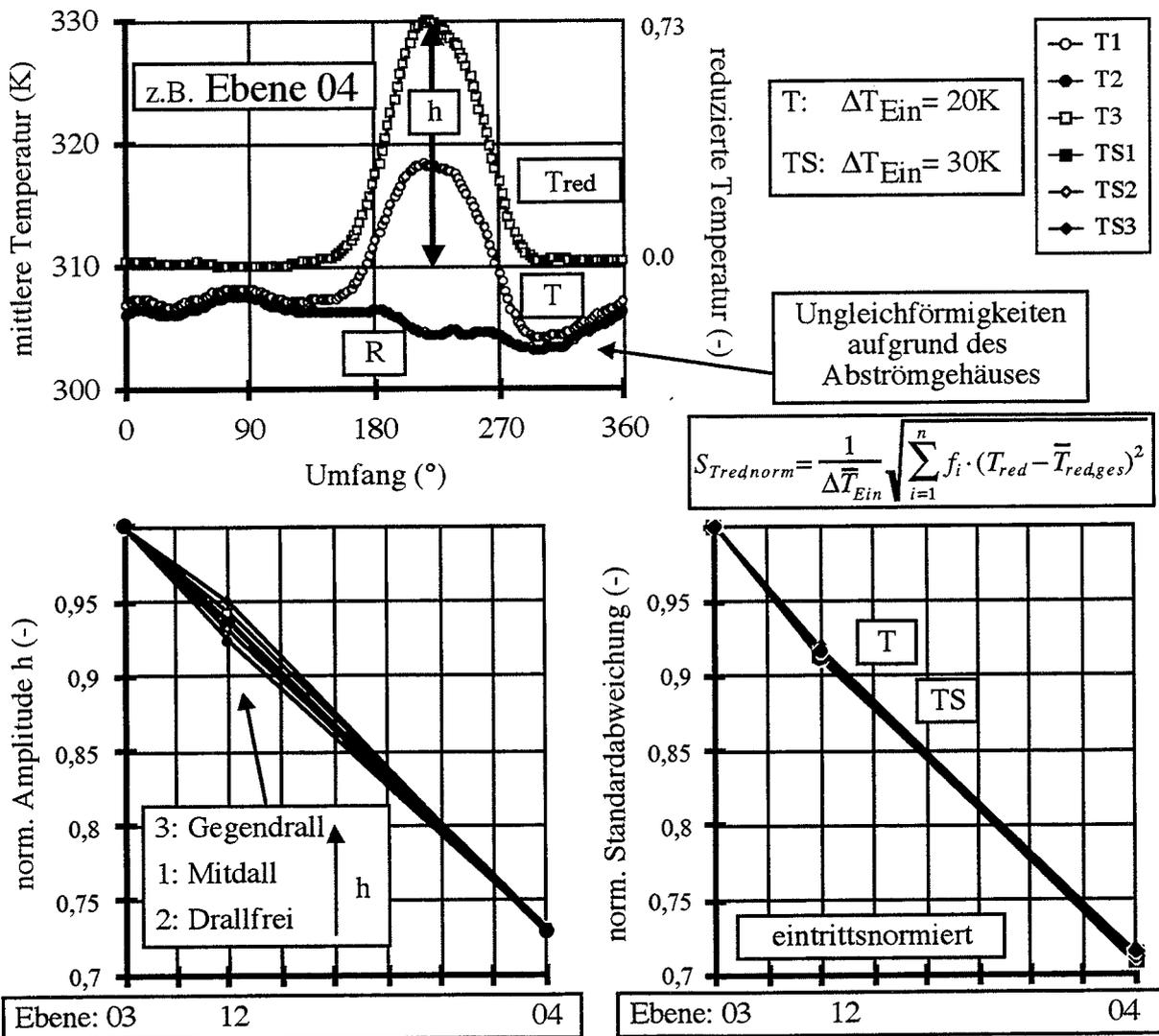


Bild 12: Temperaturgetriebene Ausgleichseffekte - normierte Amplitude  
Ungleichförmigkeit im 4-stufigen Turbinenteil - Referenznormiert

|   | S1    | S2  | S3  |
|---|-------|-----|-----|
| $T_{\text{Strähne.max}} / T_{\text{ref}}$ | 1.058 | 1.5 | 1.5 |

Tabelle 2 Temperaturverhältnisse der Strähne und der kalten Strömung

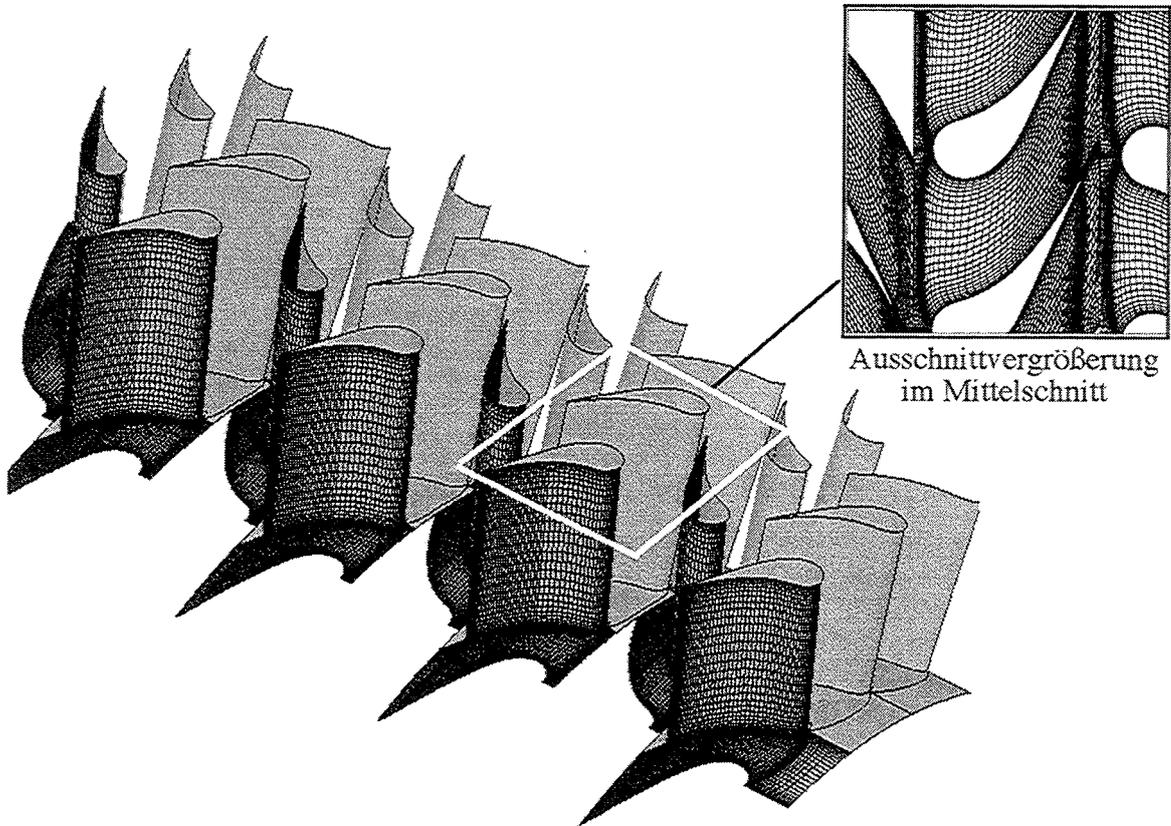


Bild 13: Vernetzung der 4-stufigen Regula Versuchsturbine

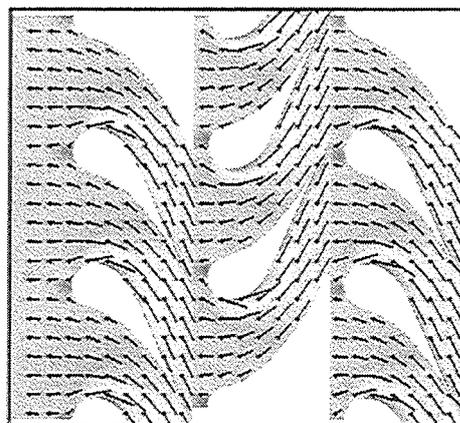


Bild 14: Strömungsvektoren ( $\vec{v}$ ) und Machzahlverteilung im Mittelschnitt der ersten drei Turbinenreihen

- + Umfangsvariation der Meßgröße im Experiment
- Umfangsgemittelter Wert im Experiment
- Rechnung (Baldwin-Lomax)

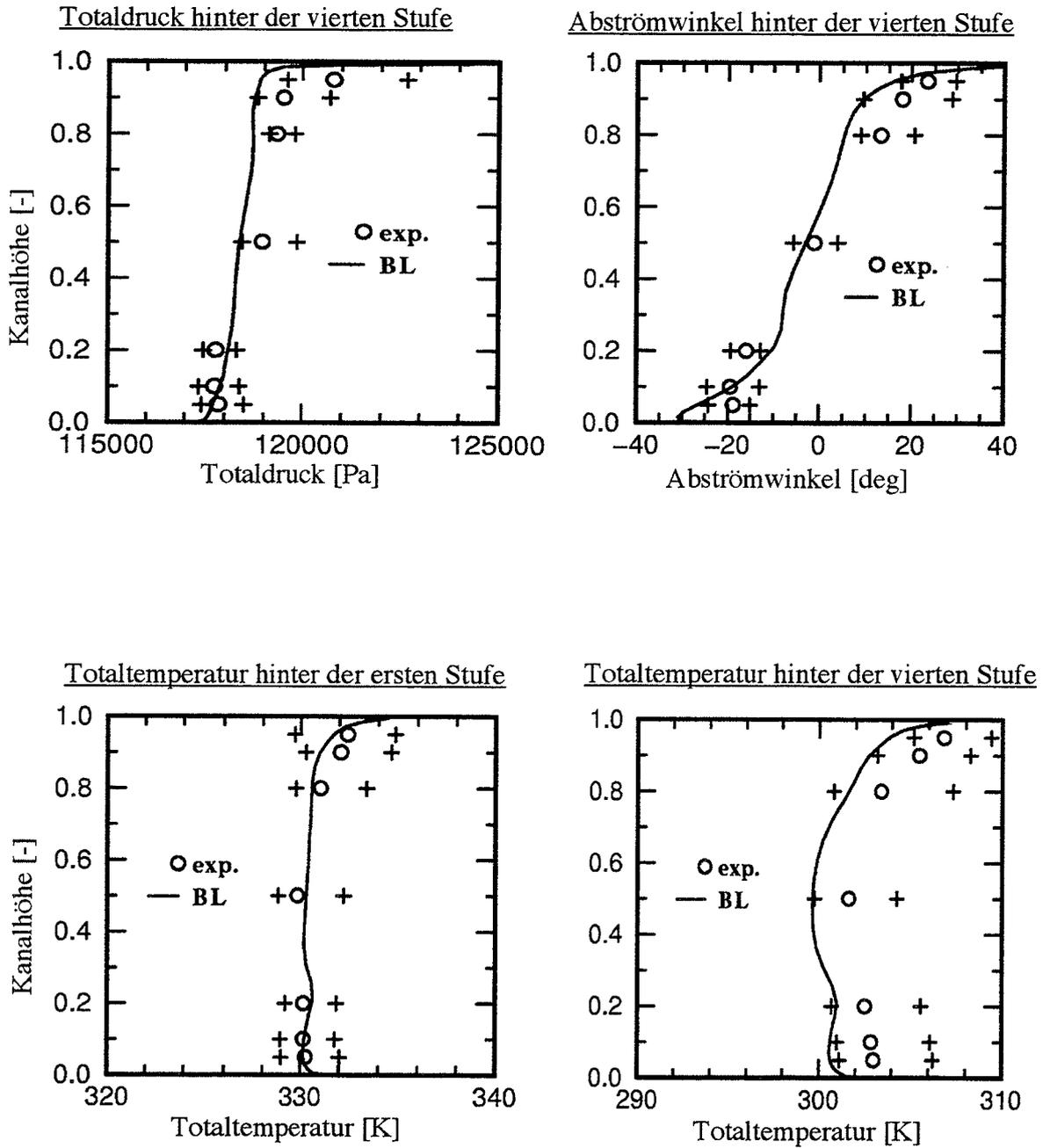


Bild 15: Radialverteilungen für  $\alpha$ ,  $p_t$  und  $T_t$  hinter der ersten und vierten Stufe

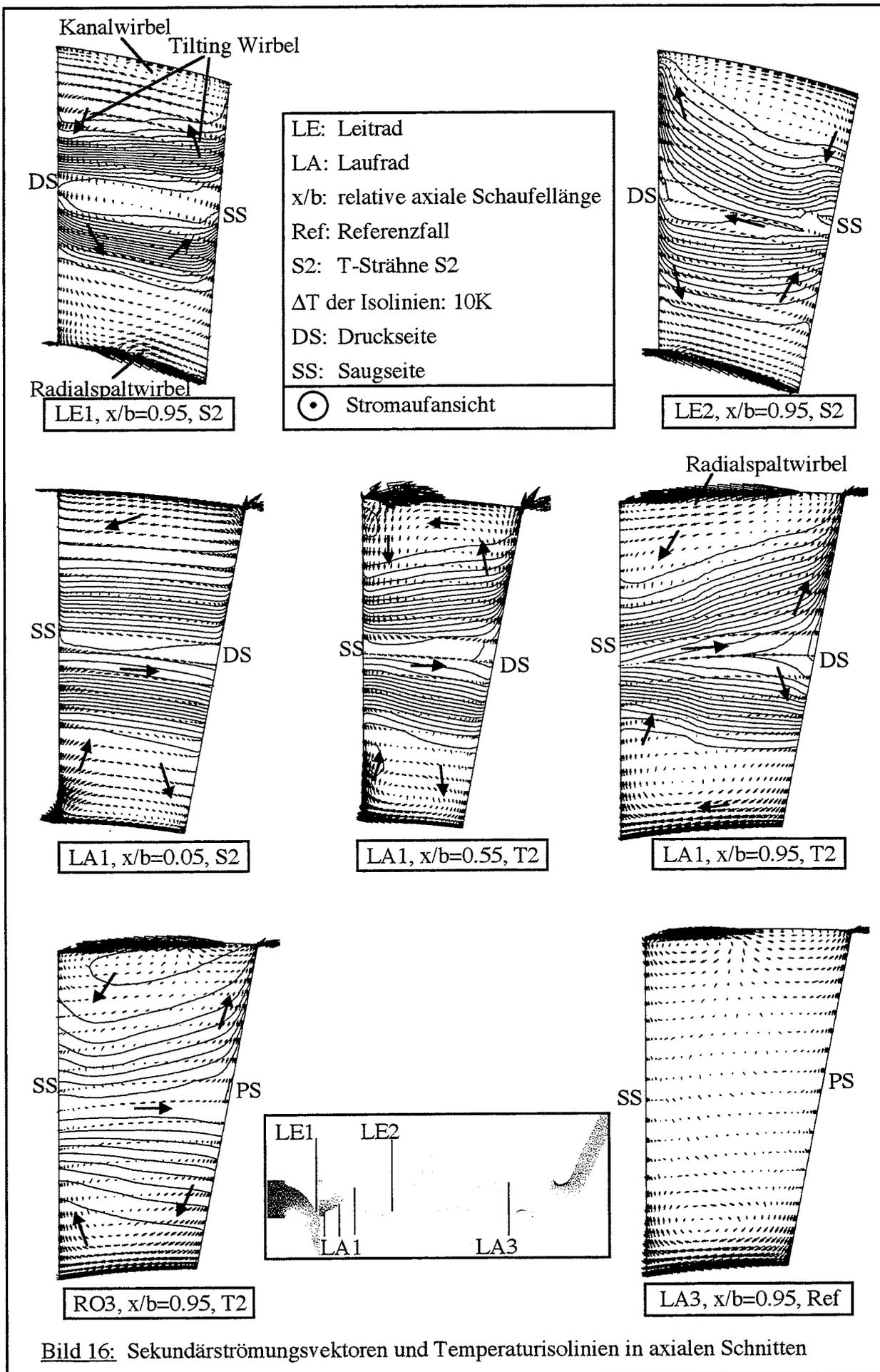


Bild 16: Sekundärströmungsvektoren und Temperaturisolines in axialen Schnitten

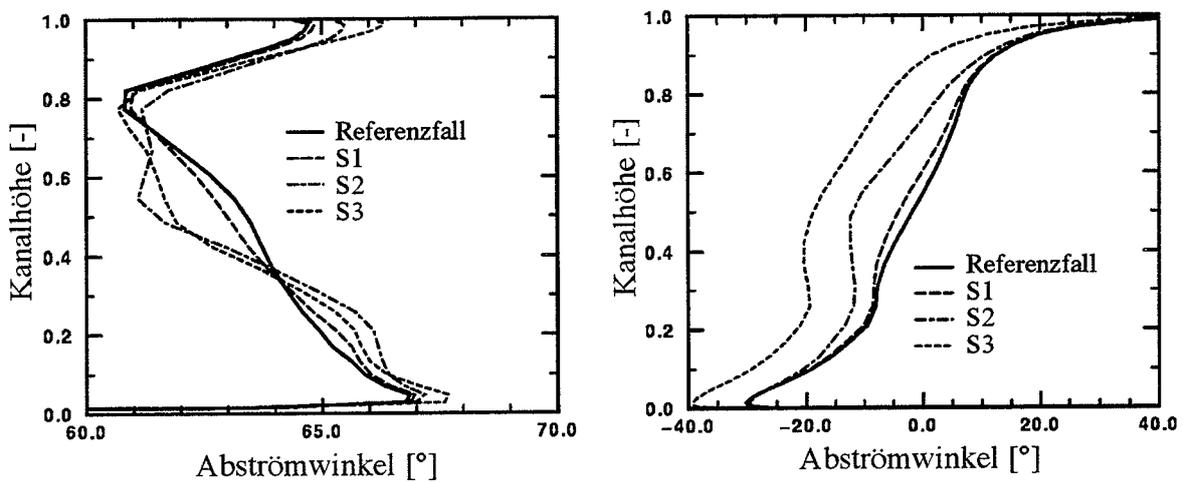


Bild 17: Radialverteilung des Abströmwinkel stromab des 3. Lauf- bzw. Leitrades

Temperatursträhne  $\varepsilon = 100\%$   $\psi_{y\text{sg}} = -2,3$  ;  $\pi_{\text{sg}} = 1.61$  Sektor A erhitzt

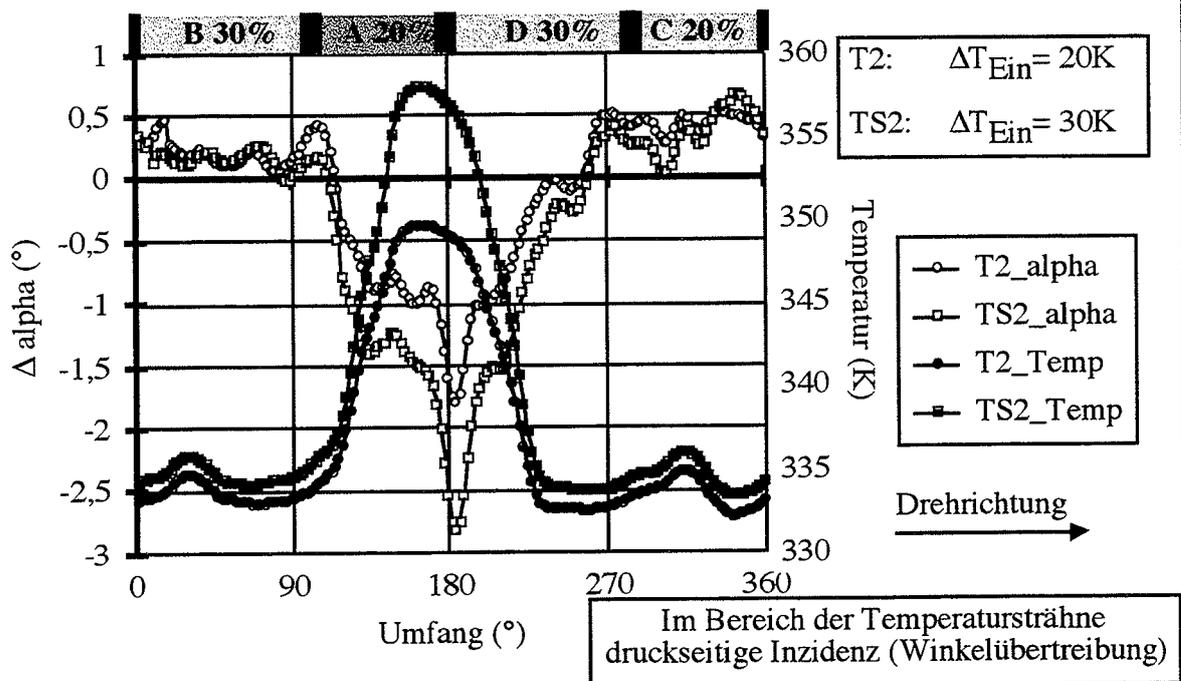


Bild 18: Änderung des Laufradabströmwinkels nach der ersten Stufe ( $\psi_{y\text{sg}} = -2,3$ )  
 Vergleich Temperatursträhne - isothermer Referenzfall (R)

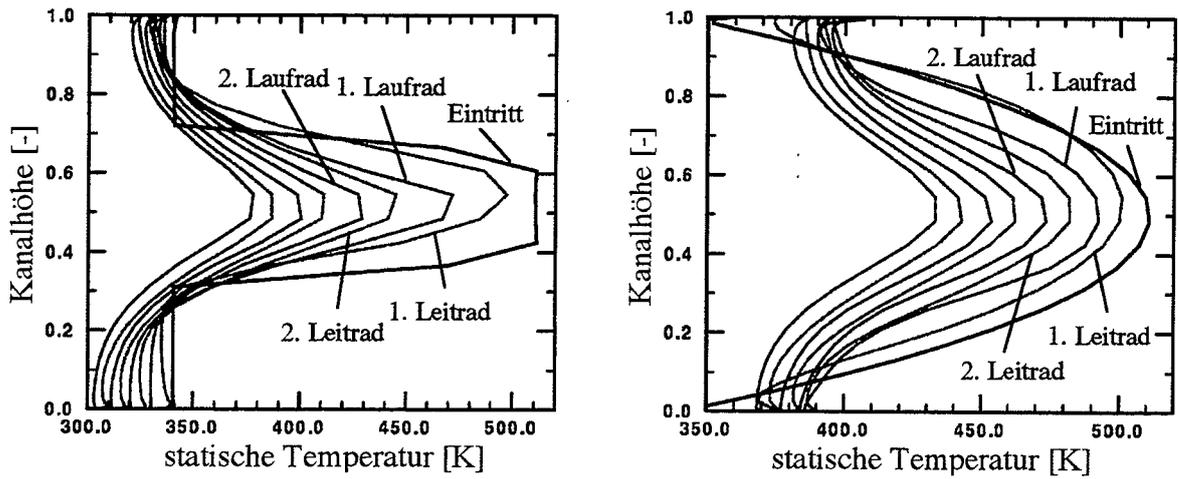


Bild 19: Entwicklung der radialen Temperaturverteilung in der 4-stufigen Turbine

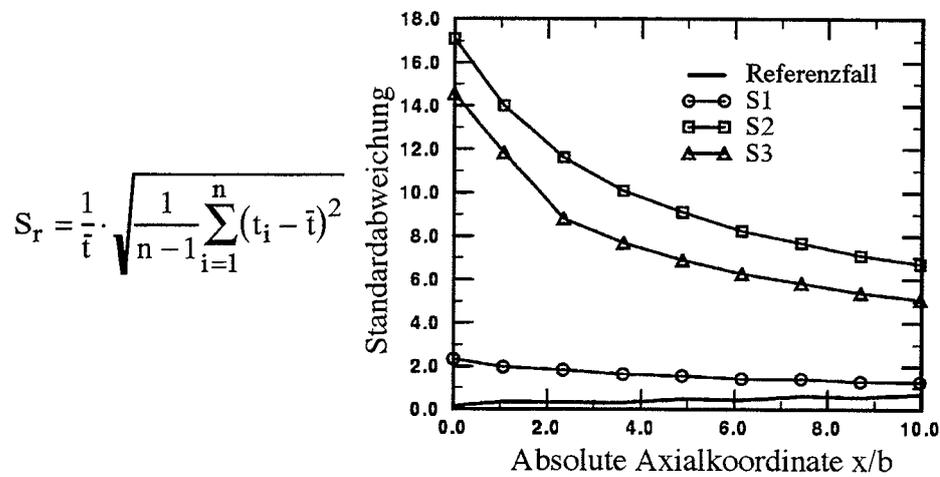


Bild 20: Standardabweichung der statischen Temperatur in Axialschnitten der Turbine vor und hinter einer Reihe

