

Heft R 511 (2001)

Informationstagung Turbinen, Frühjahr 2001, Frankfurt

INSTITUT FÜR DAMPF- UND GASTURBINEN
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Bohn

Abschlussbericht über das Anschlussvorhaben zu FVV - Nr. 665 (AIF-Nr. 10780)

Thema : **Sonden-Schaufel-Interaktion bei stationären Messungen mit pneumatischen Strömungssonden in engen Axialspalten**

Kennwort : Strömungsausgleich II

Laufzeit : 01.08.1999 bis 31.07.2000

Obmann : Dr.-sc.tech. J. Bütikofer, Alstom Power, Baden (CH)

Bearbeiter : Dipl.-Ing. H. Funke
Dipl.-Ing. T. Heuer

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

1. Einleitung

Dieses Vorhaben ist die Anknüpfung an das laufende Vorhaben "Strömungsausgleich", in dem das grundsätzliche Prinzip des Strömungs- und Temperatursausgleichs sowie der Ablauf in den einzelnen Schaufelreihen untersucht wird. Hierbei sollen nicht nur die Ausgleichsvorgänge in der ersten Stufe im Vergleich zu den folgenden des Stufenverbandes zwischen den Stufen, sondern darüber hinaus auch zwischen Leit- und Laufrad der ersten Stufe untersucht werden. Dadurch kann die Ausgleichswirkung von Leit- und Laufrad getrennt voneinander erfasst und analysiert werden.

In Turbomaschinen wird der Einsatzbereich von pneumatischen Strömungssonden bei Strömungsmessungen in engen Spalten -insbesondere bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten- allerdings durch die Wechselwirkungen zwischen Sonde, Strömung und Beschau felung stark eingeschränkt. Diese Wechselwirkungen beeinflussen und verfälschen das Messergebnis und dessen Auswertung, woraus eine sinkende Messgenauigkeit oder -bei vorgegebener Messgenauigkeit- eine Einschränkung des Einsatzbereiches pneumatischer Strömungs sonden resultiert. Die Qualität der Ausmessung eines Strömungsprofils hängt somit entscheidend von diesen Wechselwirkungen ab. Daher müssen diese Wechselwirkungen erfasst und entsprechend korrigiert werden, um die Ausgleichsvorgänge im Leitrad genau analysieren und somit die Ergebnisse aus dem Vorhaben "Strömungsausgleich" aufwerten zu können.

2. Aufgabenstellung und Ziel des Vorhabens

Ziel ist die phänomenologische Untersuchung und Korrektur dieser durch die Sonden-Schau fel-Interaktion und Versperrungseffekte bedingten Wechselwirkungen. Dadurch kann dann eine exakte Analyse der Ausgleichsvorgänge im Leitrad der ersten Stufe aus den im Vorhaben "Strömungsausgleich" gewonnenen Ergebnissen durchgeführt werden. Hierzu soll insbesondere der Wand einfluss der Beschau felung und der Versperrungseffekt der Sonde auf die Sonden umströmung und die daraus gewonnenen Strömungsgrößen genauer betrachtet werden. Die Ergebnisse dienen dem Verständnis der dabei auftretenden grundlegenden Strömungsphänomene und werden zur Erarbeitung geeigneter Korrekturvorschriften verwendet. Mittels dieser Korrektur können dann die im laufenden Vorhaben gewonnenen Messwerte hinter der ersten Leitreihe entsprechend korrigiert und richtig interpretiert werden. Dadurch ist die sinnvolle und notwendige Aufwertung der Erkenntnisse des Vorhabens "Strömungsausgleich" möglich und die Analyse der Ausgleichsvorgänge in der ersten Stufe kann entscheidend verbessert werden.

3. Vorgehensweise

Zwischen Leit- und Laufrad der ersten Stufe des vierstufigen Turbinenteils einer mit Luft betriebenen zweiwelligen Versuchsturbine, Bild 1, 2 werden stationäre Sondenmessungen zur Erfassung der Interaktionseffekte durchgeführt. Hierbei wird eine speziell entwickelte Miniatur-Sonde (3-Loch-Sonde simuliert durch verfahrbare 1-Loch-Sonde) relativ zum 1. Leitrad über eine Teilung stufenlos verfahren, Bild 3, 4. Das Ziel beim Konzept der

Miniatursonde mit variabler Kopfposition ist es, eine geringe Beeinflussung der Strömungsgrößen durch kleinstmögliche Abmessungen von Messkopf und Schaft zu erreichen. Im Abgleich mit den Messergebnissen hinter dem ersten Leitrad aus dem vorangegangenen Vorhaben "Strömungsausgleich" gewinnt man eine Korrekturfunktion für die Sondenmesswerte in Abhängigkeit der Sondenposition innerhalb der Leitradteilung und Betriebspunkt. Dabei werden durch die experimentell gewonnenen Ergebnisse Korrekturfunktionen, die den Zusammenhang zwischen dem Messfehler durch die Interaktion der Sonde beim Einsatz in engen Axialspalten und den wichtigsten Einflussparametern beschreibt, bereitgestellt. Es wird bei Vollbeaufschlagung (R-Fall, $\varepsilon = 100\%$) und Teilbeaufschlagung (M-Fall, $\varepsilon = 80\%$) je ein Betriebspunkt mit den Miniatursonden vermessen, um den Strömungsausgleich in der ersten Stufe bewerten zu können. In Verbindung mit der daraus abgeleiteten Korrektur kann die Auswertung der Ausgleichsvorgänge innerhalb der ersten Stufe entscheidend aufgewertet werden.

4. Sondeninteraktion

Zur phänomenologischen Analyse der Sondeninteraktion wurden die Interaktionsvorgänge durch eine 2D-Rechnung des Leitrades mit und ohne Sonde simuliert. Vergleicht man die Machzahlverteilung der ungestörten Strömung und der Strömung mit Sonde in Bild 5, so fällt auf, dass durch die Versperrungswirkung der Sonde die Strömung zwischen den jeweiligen Hinterkanten und der Sonde zusätzlich beschleunigt wird. Im rechten Teil von Bild 5 ist die Stromaufwirkung der Sonde bis in den Schaufelkanal deutlich zu erkennen. Diese Interaktionsvorgänge bewirken eine leichte Minderumlenkung der Abströmung.

Der statische Druck zwischen 2 Schaufelhinterkanten über einer Teilung zeigt eine Druckerhöhung durch die Aufstauung im unmittelbaren Bereich vor der Sonde. Zur saug- bzw. druckseitigen Hinterkante ist der statische Druck jedoch niedriger als im ungestörten Fall ohne Sonde, Bild 6. Dies führt zu einer asymmetrischen Druckverteilung an der Sonde, d.h. zur Druckseite fällt der statische Druck bei dieser Sondenstellung langsamer ab als zur Saugseite. Diese Tendenz spiegelt sich auch in Bild 7 wieder, in dem die Druckverteilung der Zylinderumströmung der Sonde dargestellt ist. Zu negativen Winkeln hin befindet sich die Profilsaugseite des benachbarten Leitprofils, wo durch die Sonden-Schaufel-Interaktion der Druck auf dieser Seite der Sonde gegenüber einer freien Umströmung angehoben ist, was zu einer beeinflussten Druckverteilung um die Sonde führt. Das Messprinzip der Zylindersonde basiert auf der gradientenfreien, ungestörten und gerichteten Kalibrierströmung, was bei einer in dieser Weise beeinflussten Zylinderdruckverteilung zu einer Fehlinterpretation der ausgewerteten Strömungsgrößen führt.

Durch den Einsatz der feststehenden Zylindersonden und Stufenthermoelemente im Axialspalt hinter dem ersten Leitrad kam es hier infolge der erhöhten Versperrung und Sonden-Interaktionsvorgänge zu leichten Betriebspunktschwankungen der Turbine. Diese Schwankungen traten periodisch in Abhängigkeit von der Sondenposition innerhalb der Leitradteilung auf, Bild 8. Die Position der Leitradhinterkante ist schematisch gehäuse- und nabenseitig angegeben, da sie zu den radial ausgerichteten Strömungssonden aufgrund der vorderkantent-

aufgefädelten zylindrischen Schaufelprofile eine Schrägstellung zur Rotorachse aufweist. Prinzipiell beeinflussen die Sonden die Strömung in der Ebene 11 hinter dem ersten Leitrad. Diese Störung wirkt sich auf die gesamte Stufengruppe aus. Durch Veränderungen der Betriebscharakteristik der Stufengruppe wird aber durch das gekoppelte Regelverhalten von Regelstufe und Stufengruppe auch der Betriebspunkt der Regelstufe geändert.

Die Anwesenheit der Sonden hinter dem ersten Leitrad bewirkt je nach Position in der Leitradteilung eine unterschiedliche Versperrung des Strömungskanals. Diese Versperrung ist am stärksten, wenn die Sonden in der Kanalmitte stehen und mit Ihrer vollen Fläche das ausgeprägte Geschwindigkeitsprofil in der Leitradabströmung versperren. Durch diesen Druckaufstau steigt auch der Druck in Ebene 03 und damit bei fest aufgeprägtem Austrittsdruck in Ebene 04 (Bild 8 e) auch das Druckverhältnis der Stufengruppe (Bild 8 a). Das Druckverhältnis der Regelstufe läuft entgegengesetzt dem Verlauf der Stufengruppe, da die Druckschwankungen in Ebene 03 das Expansionsverhältnis zwischen Regelstufe und Stufengruppe beeinflussen. Hierdurch kommt es auch zu einer geringen Temperaturänderung in Ebene 03 aufgrund der veränderten Regelstufenexpansion (Bild 8 f).

Stehen die Sonden saugseitig im Bereich der Schaufelhinterkante, so findet im Bereich zwischen Schaufel und Sonden lokal eine Drucküberhöhung aufgrund der Interaktion der Sonden mit Schaufel als Begrenzungswand statt.

Die geringste Versperrung des Strömungskanals besteht, wenn die Sonden sich im Nachlauf der Schaufel befinden. Mit zunehmender Versperrung des Strömungskanals steigen auch die Verluste in der Stufengruppe. Dies führt zu einer schlechteren Expansion (Erhöhung der Austrittstemperatur, Verminderung des Temperaturverhältnisses der Stufengruppe) und damit zu einem Wirkungsgradeinbruch (Bild 8 d). Der Verlauf der Drehzahländerung folgt dem Temperaturverlauf. Aufgrund der verminderten Expansion infolge erhöhter Verluste erzeugt die Turbine eine niedrigere spezifische Arbeit. Da jedoch das Bremsmoment der Wasserbremsen konstant bleibt, ändert sich die Drehzahl der Maschine. Der Wirkungsgrad der Stufengruppe erreicht seinen höchsten Wert bei geringer Schaufelbelastung, wenn die Sonden im Nachlauf der Leitschaufeln stehen. In allen Interpretationen verhält sich die Regelstufe aufgrund der engen Kopplung des Expansionsverhaltens an die Stufengruppe entgegengesetzt. Die Messungen der Zylindersonden sind durch Interaktions- und Versperrungsvorgänge beeinflusst. Es müssen sich also über die bereits diskutierten Beeinflussungen hinaus zusätzliche sondenspezifische Effekte nachweisen lassen.

Bild 9 zeigt die radial gemittelten Strömungsgrößen der Zylindersonden- und der Miniatursondenauswertung repräsentativ für eine Leitradteilung bei Vollbeaufschlagung ($\epsilon = 100\%$).

Die Sonde versperrt durch ihre räumliche Ausdehnung den Strömungskanal. Es entsteht ein Druckaufstau vor der Sonde und eine Beschleunigung der Strömung in der Sondenebene aufgrund des durch die Sonden verminderten Strömungsquerschnittes im Axialspalt. Steht die Sonde zusätzlich saugseitig in Schaufelnähe, so entsteht vor der Sonde lokal ein Druckaufstau durch die Interaktion mit der Schaufel als Begrenzungswand. Alle diese Einflüsse wirken auf die sich durch die Anströmung ausbildende Druckverteilung an der Sonde. Die Kalibrierung

der Sonde basiert aber auf der Druckverteilung am Zylinder in einer gradientenfreien, gerichteten Strömung ohne beeinflussende Begrenzungswände. Daher kommt es infolge der beeinflussten Druckverteilung zu einer Fehlinterpretation der sich an der Sonde einstellenden Druckverteilung und damit zu einer verfälschten Auswertung der Strömungsgrößen.

Durch den Druckaufstau infolge der Versperrung bestimmt Bohrung 3 einen erhöhten Druck. An den Bohrungen 2 und 1 wird hingegen ein verminderter Druck aufgrund der Beschleunigung in der Sondenebene bestimmt. Dies verändert die Zylinderdruckverteilung insoweit, als eine nicht vorhandene Minderumlenkung der Strömung ausgewertet wird. Die von den Miniatursonden gemessenen Abströmwinkel entsprechen nahezu dem Metallwinkel der Beschaukelung und einer für diese Profilart typischen Variation innerhalb einer Teilung. Im Gegensatz dazu zeigen die Zylindersondenmessungen eine ausgewertete Minderumlenkung von etwa 4° gegenüber den Miniatursondenmessungen. Stehen die Sonden in Nähe der Saugseite des Profils, kommt es in dieser Position zu einer zusätzlichen Mehrumlenkung um weitere 2° infolge der Interaktion der Sonden mit der Leitradschaukel. Betrachtet man den statischen Druck, so wird durch die Versperrung des Strömungsquerschnittes durch die Sonden die Strömung in der Sondenebene beschleunigt, sodass es im Fall der Zylindersonden zu einer Erniedrigung des statischen Druckniveaus kommt. Zusätzlich zeigt sich in der statischen Druckverteilung der Zylindersonden auch der schon bei der Minderumlenkung diskutierte Druckaufstau vor der Sonde in einer lokalen Erhöhung des statischen Druckes, wenn die Sonde auf der Saugseite der Leitschaukel steht. Steht die Sonde im Bereich der Schaukelhinterkante, wird außerdem lokal ein zu niedriger Totaldruck mit den Zylindersonden bestimmt. Die Effekte in der Druckverteilung infolge der Versperrungswirkung und Sonden-Schaukel-Interaktion wirken sich konsequenterweise auch auf die Bestimmung der Machzahl aus. Hier wird von den Zylindersonden ein zu hohes Geschwindigkeitsniveau infolge der Beschleunigung der Strömung in der Sondenebene bestimmt.

In Bild 10 sind die radialen Verläufe für den Strömungswinkel, die Machzahl und die statischen und totalen Drücke hinter dem ersten Leitrad für die numerische Simulation der 4-stufigen Turbine und die Messungen mit der Miniatursonde und den Zylindersondenmessungen angegeben. Für den Anströmwinkel zeigt sich im Vergleich zwischen Miniatursonde und Zylindersondenmessungen die bereits diskutierte Minderumlenkung über der gesamten Kanalhöhe. Die Abströmwinkelverteilung der Miniatursondenmessungen wird von der numerischen Simulation sehr gut wiedergegeben. Prinzipiell liegt eine leichte Neigung des Abströmwinkelverlaufes hin zu einer stärkeren Umlenkung in Nabennähe vor. Dies ist durch die engere Fächerung der Beschaukelung und somit bessere Strömungsführung hin zur Nabe begründet. In den Randbereichen von Gehäuse und Nabe wird das Abströmwinkelprofil durch Sekundärströmungsphänomene wie den Kanalwirbel und in Nabennähe zusätzlich durch den Spaltwirbel beeinflusst.

Die Totaldruckverteilung weist für die Miniatursondenmessungen und die numerische Simulation eine gute Übereinstimmung auf. Die Totaldruckverluste werden von der numerischen Simulation etwas unterschätzt. Auch hier sind die Einflüsse der Sekundärströmungen in

den Randbereichen des Strömungskanals in der Totaldruckverteilung als Totaldruckverluste im Verlauf gut zu erkennen. Vergleicht man die Verläufe der Zylindersondenmessungen mit den Miniatursonden und der numerischen Simulation, so zeigt sich zur Nabe hin aufgrund der dort verstärkten Versperrungs- und Interaktionsvorgänge eine erhöhte Beeinflussung der Zylindersondenwerte im Verlauf über der Kanalhöhe.

Der statische Druckverlauf zeigt eine expansionsbedingte Neigung bei den Miniatursondenmessungen und der numerischen Simulation. Aufgrund der geringeren Fächerung und somit besserer Strömungsführung führt die damit verbundene bessere Expansion auch zu einer Erniedrigung des statischen Druckes zur Nabe hin, und somit zu einer Schrägstellung der statischen Druckverteilung über der Kanalhöhe. Wie bereits diskutiert, wird der statische Druck bei den Zylindersondenmessungen generell zu niedrig bestimmt.

Diese Effekte wirken sich auch auf die Geschwindigkeitsverteilung (Machzahl) hinter dem Leitrad aus. Hier kommt es wiederum aufgrund der besseren Umlenkung infolge der kleineren Fächerung zu einer stärkeren Beschleunigung der Strömung zur Nabe hin.

Bisher wurden die Interaktionseffekte anhand von radial oder umfanggemittelten Strömungsgrößen interpretiert. Allerdings muss man die Messungen hinter dem ersten Leitrad im gesamten Strömungsquerschnitt bewerten, da sich auch aufgrund des "Tiltings" der Hinterkanten nicht radial verlaufende Interaktionseffekte über dem Umfang einstellen.

Bild 11 zeigt die Differenzen des Abströmwinkels und der bezogenen Totaldruckunterschiede in den für die Miniatursonden zugänglichen Bereichen für den Fall der Vollbeaufschlagung (R-Fall; $\varepsilon = 100\%$). Der Einfluss der schräggestellten Leitschaufelhinterkanten ist hier deutlich zu erkennen. Die größten Unterschiede im Anströmwinkel finden sich saugseitig der Leitschaufel, wo insbesondere die Sonden-Schaufel-Interaktion stark ausgeprägt ist. Dieser Effekt lässt sich in jeder der 5 Teilungen an derselben Position der Sonde zur Leitschaufel wiederfinden. Auch im bezogenen Totaldruckunterschied können hier periodisch die größten Unterschiede festgestellt werden. Über der Kanalhöhe zeigt sich, dass die Differenzen verschieden stark ausgeprägt sind. Betrachtet man den Bereich des Umfangs, in dem diese Messungen durchgeführt wurden, so lässt sich feststellen, dass in der Nähe der Trennstellen B-A und A-D die Unterschiede infolge des reduzierten Massendurchsatzes etwas geringer ausgeprägt, aber weiterhin deutlich zu erkennen sind.

Im Fall des Massendefektes (M-Fall, $\varepsilon = 80\%$), Bild 12, sind die prinzipiellen Interaktionseffekte infolge des gegenüber Vollbeaufschlagung verringerten Durchflusses abgeschwächt, es zeigen sich aber weiterhin in der Abströmwinkel- und normierten Totaldruckdifferenz zur Vollbeaufschlagung vergleichbare teilungsperiodische Interaktionsphänomene. Durch den in Sektor A aufgeprägten Massendefekt kommt es in den Randbereichen der dargestellten 5 Teilungen zu einer leichten Veränderung der Interaktionsvorgänge infolge der dort vorherrschenden Ausgleichsvorgänge.

5. Korrektur der Leitradmessungen

Der Vergleich der Messungen der Miniatursonde mit den Zylindersonden hat gezeigt, dass deutliche Abweichungen in den Strömungsgrößen aufgrund der Sonden-Interaktionsvorgänge bestehen. Die Miniatursonde liefert aufgrund der wesentlich geringeren Versperrungs- und Interaktionsvorgänge im Vergleich mit der numerischen Simulation recht genaue Werte. Die Interaktionsvorgänge sind abhängig von der Position der Sonde innerhalb einer Teilung. Zusätzlich bewirkt die Schrägstellung der Leitradhinterkante eine Verschiebung der Differenzen über der Kanalhöhe.

Die Korrekturvorschrift muss also in Abhängigkeit vom Teilungswinkel ($5 \times 2.25^\circ$) und der Kanalhöhe (7 Höhenschnitte) aufgestellt werden.

Sowohl für den Fall der Vollbeaufschlagung (R-Fall, $\varepsilon = 100\%$) als auch für Teilbeaufschlagung (M-Fall, $\varepsilon = 80\%$) werden die Differenzen der Abströmwinkel und die bezogenen Druckdifferenzen zwischen der Miniatursonde und den Zylindersonden gebildet und teilungsperiodisch gemittelt.

Die entstandenen Korrekturmatriizen sind in Bild 13 für Vollbeaufschlagung grafisch dargestellt. In ihnen sind die bereits diskutierten Versperrungs- und Interaktionseffekte enthalten. Identische Korrekturfunktionen werden auch für die Teilbeaufschlagung aufgestellt. Als zusätzliche Korrekturvorschrift muss die durch die Sondeninteraktion veränderte Regelstufenexpansion für die exakte Bestimmung der Temperatur in Ebene 11 berücksichtigt werden. Die Korrektur wird auf die 32 Teilungen des gesamten Umfangs angewendet.

Die korrigierten Werte über dem Umfang können -zur Überprüfung der Güte der teilungsperiodischen Korrektur- den diskreten Messwerten der Miniatursonde und den ursprünglichen Zylindersondenmessungen gegenübergestellt werden. In Bild 14 ist deutlich zu erkennen, dass die korrigierten Zylindersondenwerte sich den Miniatursondenmessungen angeglichen haben und die teilungsperiodische Korrektur in beiden der Miniatursonde zugänglichen Bereichen von je 5 Teilungen (Sektor 1 und 2) über dem Umfang die Miniatursondenmessungen gut wiedergeben. Somit ist eine verbesserte Auswertung der Leitradmessungen erreicht. Insbesondere die Auswertung der Massenströme vor und hinter dem ersten Leitrad zeigt nun eine gute Übereinstimmung. Durch Anwendung der Korrektur auf die im Vorhaben "Strömungsausgleich" vermessenen Strömungsgrößen hinter dem ersten Leitrad können somit nun die Ausgleichsvorgänge hinter dem ersten Leitrad mit ausreichender Genauigkeit analysiert werden.

6. Abbau der Ungleichförmigkeiten in der ersten Stufe

Durch die Anwendung der Korrekturvorschriften aus den Miniatursondenmessungen ist es nun möglich die Zylindersondenmessungen über dem gesamten Umfang auszuwerten. Hierbei sind die Strömungsausgleichsvorgänge in der ersten Stufe von Interesse. Insbesondere der Verlauf der Geschwindigkeitsvektoren über der Kanalhöhe und dem gesamten Umfang gibt ein gutes Bild der auftretenden Ausgleichsvorgänge. Die Geschwindigkeitsvektoren sind auf den mittleren Abströmwinkel -also auf die Hauptströmungsrichtung- bezogen, um die

Abströmungleichförmigkeit hinter dem ersten Leitrad besser bewerten zu können.

Der Vektorplot bei Teilbeaufschlagung in Bild 16 am Eintritt in die Stufengruppe zeigt den starken Massendefekt im unbeaufschlagten Sektor A. Die Strömung an den Rändern ist bestrebt, die aufgeprägte Ungleichförmigkeit auszugleichen. Infolge der Strömungsführung in der Regelstufe liegt an den Trennstellen B-A und A-D ein unterschiedliches Ausgleichsverhalten vor. Im Bereich der ungestörten Strömung (Sektor C) zeigt sich ein der Vollbeaufschlagung vergleichbares Strömungsprofil.

Betrachtet man nun die Abströmung aus dem Leitrad unter Kenntnis der stark ungleichförmigen Anströmung, so lassen sich auch hinter dem ersten Leitrad noch Ausgleichsvorgänge im Bereich der Ränder des unbeaufschlagten Sektors A erkennen. Allerdings ist die Strömung schon weitgehend ausgeglichen. Es hat also aufgrund der starken Geschwindigkeitsgradienten vor dem ersten Leitrad hier schon ein massiver Ausgleich stattgefunden. Die Ungleichförmigkeit in Nabennähe ist bedingt durch Sekundärströmungsphänomene und die ungleichförmige Zuströmung am größten.

Ein Maß für den Strömungsausgleich in der ersten Stufe bei Teilbeaufschlagung ist die Änderung der auf den Referenzfall bezogenen Meridionalgeschwindigkeit über dem Umfang. Hierbei werden die radial flächengemittelten Meridionalgeschwindigkeiten des Massendefektfalles auf die des Referenzfalles bezogen. Somit zeigen sich in jeder Bilanzebene die in der Stufe vorliegenden Ungleichförmigkeiten in der Geschwindigkeit im Vergleich zum Referenzfall., Bild 15. Für die teilungsperiodischen Geschwindigkeitsschwankungen hinter dem ersten Leitrad sind zusätzlich die jeweils für eine Teilung (5 Umfangspositionen) repräsentativ gemittelten Werte hinter dem ersten Leitrad angegeben (Ebene 11 tm). Infolge der Teilbeaufschlagung bei geschlossenem Sektor A ($\epsilon = 80\%$) betragen alle Werte durch den Bezug auf den Referenzfall ($\epsilon = 100\%$) etwa 80% des Niveaus bei Vollbeaufschlagung. Deutlich zeigen sich die Ungleichförmigkeiten infolge der Sektortrennstellen und des Massendefektes in Sektor A am Eintritt. Diese starke Ungleichförmigkeit ist hinter der ersten Stufe schon weitestgehend ausgeglichen. Die teilungsgemittelte Verteilung hinter dem Leitrad (Ebene 11 tm) zeigt zwar noch einige Charakteristiken der ungleichförmigen Strömung (Massendefekt Sektor A) am Eintritt, ist aber schon mit der gut ausgeglichenen Umfangsverteilung in Ebene 12 vergleichbar. Es zeigt sich somit, dass der Hauptströmungsausgleich schon kurz vor dem ersten Leitrad stattgefunden haben muss. Hierbei ist zu beachten, dass die Sondenmessebene 03 noch 15 mm vor dem Leitradeneintritt liegt. Eine Modellvorstellung ist, dass die potentialtheoretische Stromaufwirkung des Leitradkranzes wie ein Sieb auf die Strömung wirkt und in Verbindung mit den starken Geschwindigkeitsgradienten in der Anströmung somit eine stark ausgleichende Wirkung hat. In diesem Fall wäre eine Optimierung der Ausgleichswirkung der ersten Leitreihe über eine Variation des Teilungs-Sehnenverhältnisses der Beschaukelung (t/s) in der ersten Leitreihe möglich.

Die ausschließlich auf den Massendefekt zurückzuführenden Massenumverteilungen sind als Bewertung für den Strömungsausgleich von Bedeutung. Um die betriebsbedingten Einflüsse

des Massendefektes von den prinzipiellen Maschineneffekten zu trennen, ist in Bild 17 die Massenstromdichtenverteilung des Massendefektfalles (M-Fall $\varepsilon = 80\%$) auf die Massenstromdichtenverteilung des Referenzfalles bei Vollbeaufschlagung (R-Fall $\varepsilon = 100\%$) bezogen dargestellt. Damit ist eine Bewertung der Massenumverteilung in der ersten Stufe getrennt nach Leit- und Laufrad möglich.

In der Eintrittsebene zeigt sich sehr deutlich der Massendefekt als Einbruch über der gesamten Kanalhöhe bis auf unter 40% des Massenstromes bei Vollbeaufschlagung. Am Übergang von Sektor A zu Sektor D liegt in der oberen Kanalhälfte (70-95%) erst ein ausgeprägter Einbruch im Massenstrom und weiter in Umfangsrichtung ein Bereich eines erhöhten Massendurchsatzes vor. Die im Vergleich zur oberen Kanalhälfte (65-90%) stärker durchströmten Bereiche in der Kanalmitte sind auf die Verlagerung des Massentransportes im Überströmkanal gegenüber der Vollbeaufschlagung aufgrund der geringeren Masse bei einem unveränderten Ausgleichsraum zurückzuführen. Im Bereich der an Sektor A angrenzenden Sektoren B und D zeigt sich in Nabennähe infolge des verstärkten konvektiven Transportes im Überströmkanalwirbelsystem ein Versatz des Sektortrennstelleneinflusses in Richtung des Massendefektes als stärkere Änderung der bezogenen Massenstromdichte über dem Umfang. Dieser Effekt ist in dem wenig beeinflussten Sektor C nur schwach wiederzufinden. Prinzipiell zeigt sich aber, dass der Strömungsausgleich trotz des großen Ausgleichsraumes und der relativ langen Ausgleichsstrecke im Überströmkanal nicht sehr stark fortgeschritten ist. Betrachtet man dagegen das Massenstromdichtenverhältnis des Massendefektfalles bezogen auf den Referenzfall nach der Expansion hinter dem ersten Leitrad (Ebene 11) zeigt sich ein im Vergleich zur Eintrittsebene gut ausgeglichenes Strömungsfeld. Das Strömungsfeld des Massendefektfalles ist im Mittel über dem gesamten Umfang auf ca. 80% des Massenstromes bei Vollbeaufschlagung ausgeglichen. Aufgrund der typischen Leitradabströmung liegt hinter der Leitreihe eine für 32 Teilungen periodische Schichtung des Massenstromes vor. Der maximale Einbruch in der Massenstromdichte im Bereich des Sektors A ist schon weit ausgeglichen und beträgt schon 70 % des Massenstromes bei Vollbeaufschlagung. Auch lassen sich wieder die schwachen Einflüsse der Sektortrennstellen in der Verteilung nachweisen. Der Bereich des erhöhten Massendurchsatzes an der Trennstelle A-D ist auch noch hinter dem ersten Leitrad zu erkennen. In der Austrittsebene der ersten Stufe (Ebene12) zeigen sich die Hauptstörungen im ansonsten gut ausgeglichenen Strömungsfeld vornehmlich in Nabennähe (5%- 40% der Kanalhöhe). Der maximale Einbruch in der Massenstromdichte im Bereich des geschlossenen Sektors A liegt wieder bei etwas unter 70% im Nabenbereich (5%- 50% der Kanalhöhe) und ist im Zuge der Expansion in der ersten Stufe in Umfangsrichtung versetzt. In Gehäusenähe (75%- 90% der Kanalhöhe) lässt sich der stärker durchströmte Bereich an der Übergangsstelle zwischen Sektor A und Sektor D (190° bis 250° des Umfangs) noch als Erhöhung im Massenstromdichteverhältnis erkennen. Dies zeigt, dass im Verlauf der Expansion in der ersten Stufe ein starker Strömungsausgleich stattfindet, der bereits nach dem Leitrad ein relativ homogenes Strömungsfeld zur Folge hat.

7. Zusammenfassung

In diesem Anschlussvorhaben wird aufbauend auf den Ergebnissen des Vorhabens "Strömungsausgleich" das grundsätzliche Prinzip des Strömungsausgleichs sowie dessen Ablauf in den einzelnen Schaufelreihen untersucht.

In den vorhergegangenen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Ergebnisse der Messungen hinter dem ersten Leitrad aufgrund der dort vorliegenden hohen Strömungsgeschwindigkeiten infolge von Versperrungs- und Interaktionseffekten der Strömungssonden mit der Leitbeschaufelung beeinflusst sind. Darüberhinaus kam es zu leichten Schwankungen des Betriebspunktes der Turbine infolge dieser Interaktionseffekte. Ziel ist die Erfassung und Korrektur dieser Wechselwirkungen, um die Ausgleichsvorgänge im Leitrad analysieren und somit die Ergebnisse aus dem Vorhaben "Strömungsausgleich" aufwerten zu können.

Zur systematischen Analyse der Versperrungs- und Interaktionsvorgänge wurde eine spezielle Miniatursonde entwickelt und in der mehrstufigen Versuchsturbine eingesetzt. Dadurch können die Versperrungs- und Interaktionsvorgänge minimiert und so die Interaktionsphänomene analysiert werden. Es wurde neben einem vollbeaufschlagten Referenzfall ($\epsilon = 100\%$) auch ein Massendefektfall ($\epsilon = 80\%$) bei Teilbeaufschlagung untersucht. Der Vergleich der Ergebnisse der feststehenden Zylindersonden mit denen der Miniatursonde zeigt, dass infolge der Versperrungswirkung der Sonden im Abströmwinkel eine Minderumlenkung ausgewertet wurde. Dieser Effekt wird im Bereich der Profilsaugseite durch die Interaktion der Sonde mit der Beschaufelung zusätzlich noch verstärkt. Dies ist in einer Beeinflussung der Druckverteilung an der Sonde begründet, was in einer begleitenden numerischen Studie ebenfalls nachgewiesen werden konnte. Durch die Versperrung des Strömungskanals wird darüber hinaus ein zu geringer statischer Druck von den Sonden ausgewertet. Der Verlauf der mit der Miniatursonde vermessenen Strömungsgrößen zeigt im Vergleich mit der numerischen Simulation der 4-stufigen Turbine eine gute Übereinstimmung.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden durch die Erfassung der Interaktionsvorgänge Korrekturfunktionen erarbeitet, um die 360° Netzmessungen des Vorhabens "Strömungsausgleich" korrigieren und analysieren zu können. Die Anwendung der Korrektur auf diese Messungen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Miniatursondenmessungen.

Die nun folgende Analyse des Strömungsausgleichs in der ersten Stufe zeigt bereits nach dem ersten Leitrad ein gut ausgeglichenes Strömungsprofil. Die geometriebedingten Einflüsse der gestörten Anströmung (Sektortrennstellen, Überströmkanalströmungen) lassen sich in der Geschwindigkeitsverteilung noch schwach nachweisen. Im Fall des Massendefektes bei Teilbeaufschlagung zeigt sich ein starker Ausgleich bereits nach dem ersten Leitrad. Der Hauptanteil des Strömungsausgleichs muss also noch kurz vor dem Eintritt in das erste Leitrad vollzogen worden sein. Hierbei ist davon auszugehen, dass die potentialtheoretische Stromaufwirkung des Leitradkranzes diesen Ausgleich herbeiführt. Im folgenden Laufrad wird die Störung in der Massenverteilung dann weiter reduziert.

Strömungsausgleich

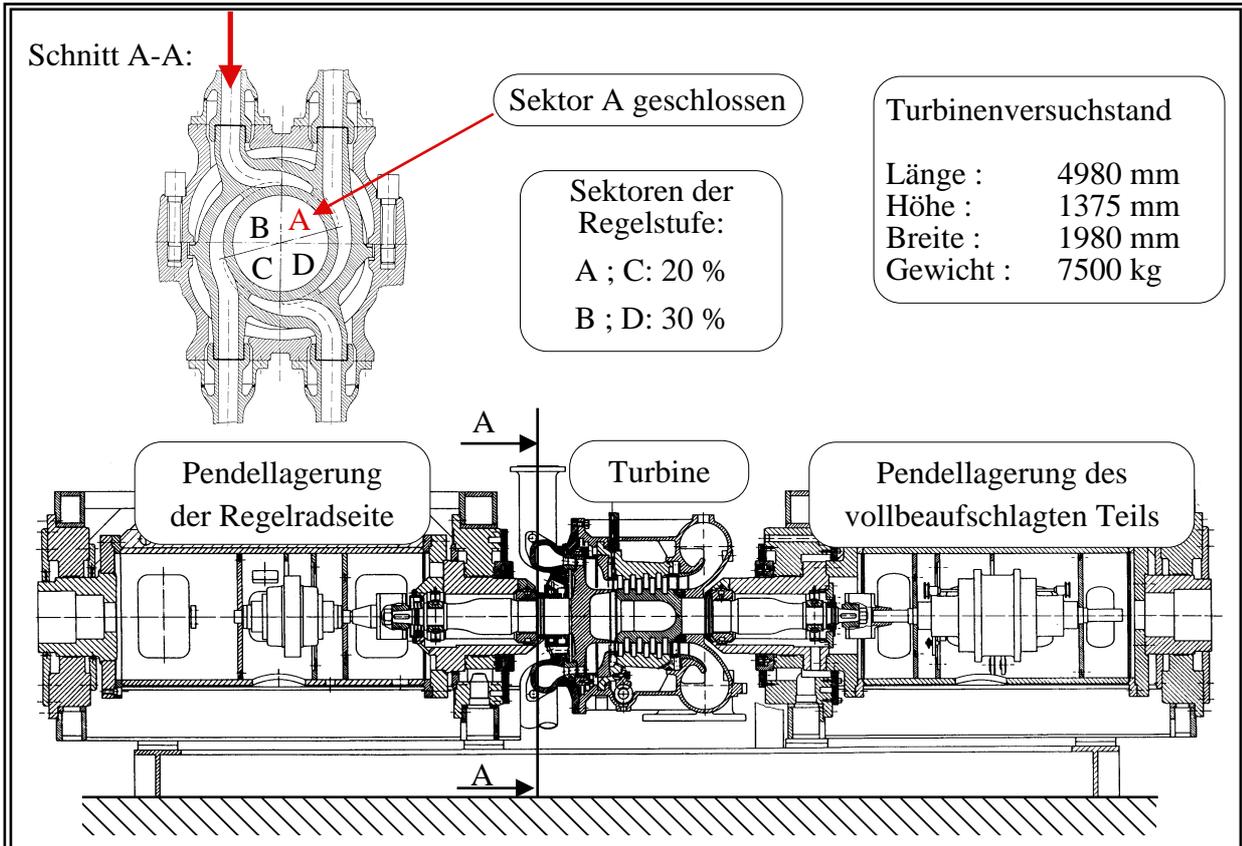


Bild 1 Versuchsaufbau

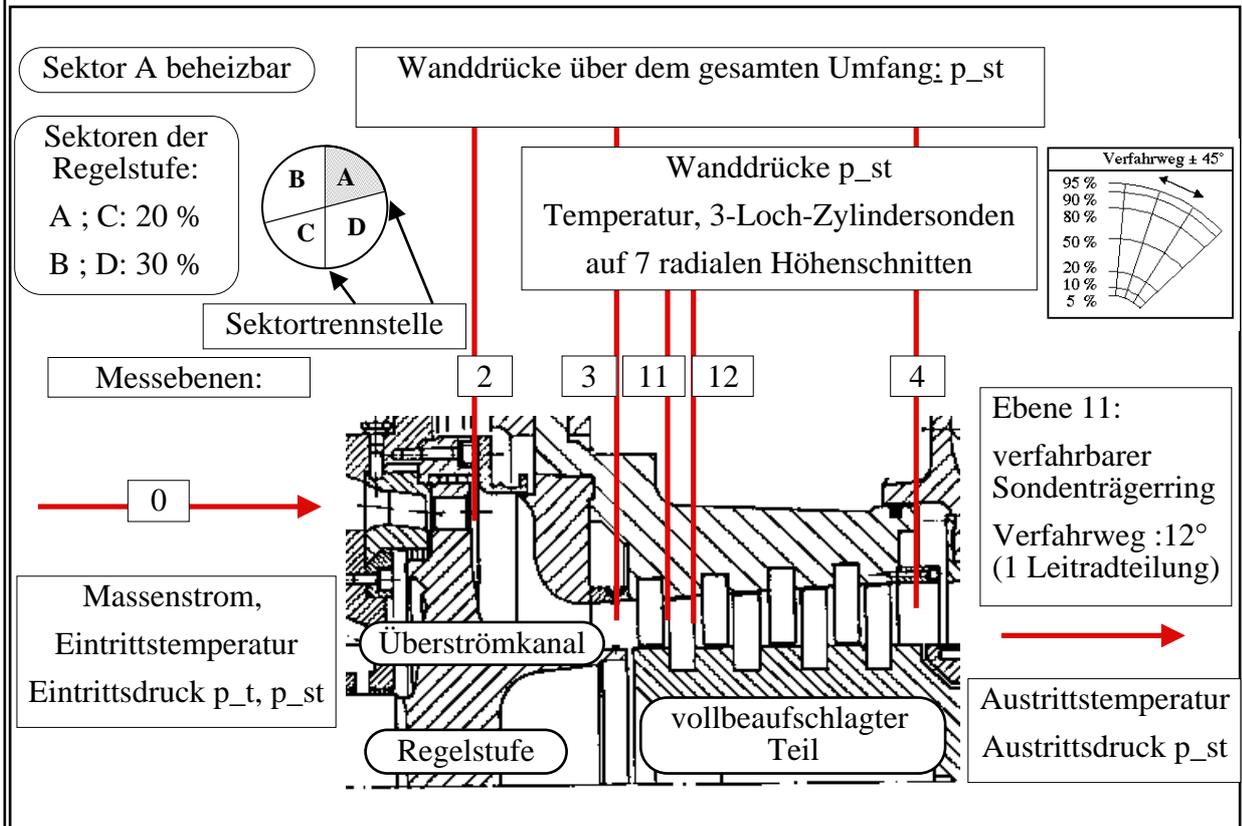


Bild 2 Messebenen und Messgrößen

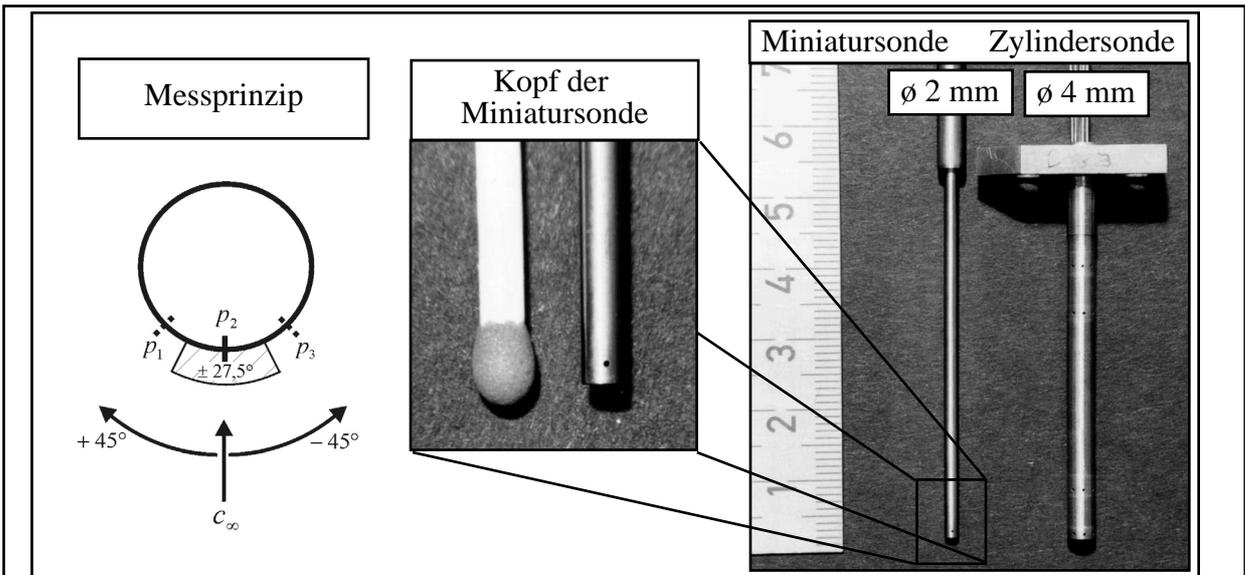


Bild 3 Ausgeführte Miniatursonde und Messprinzip

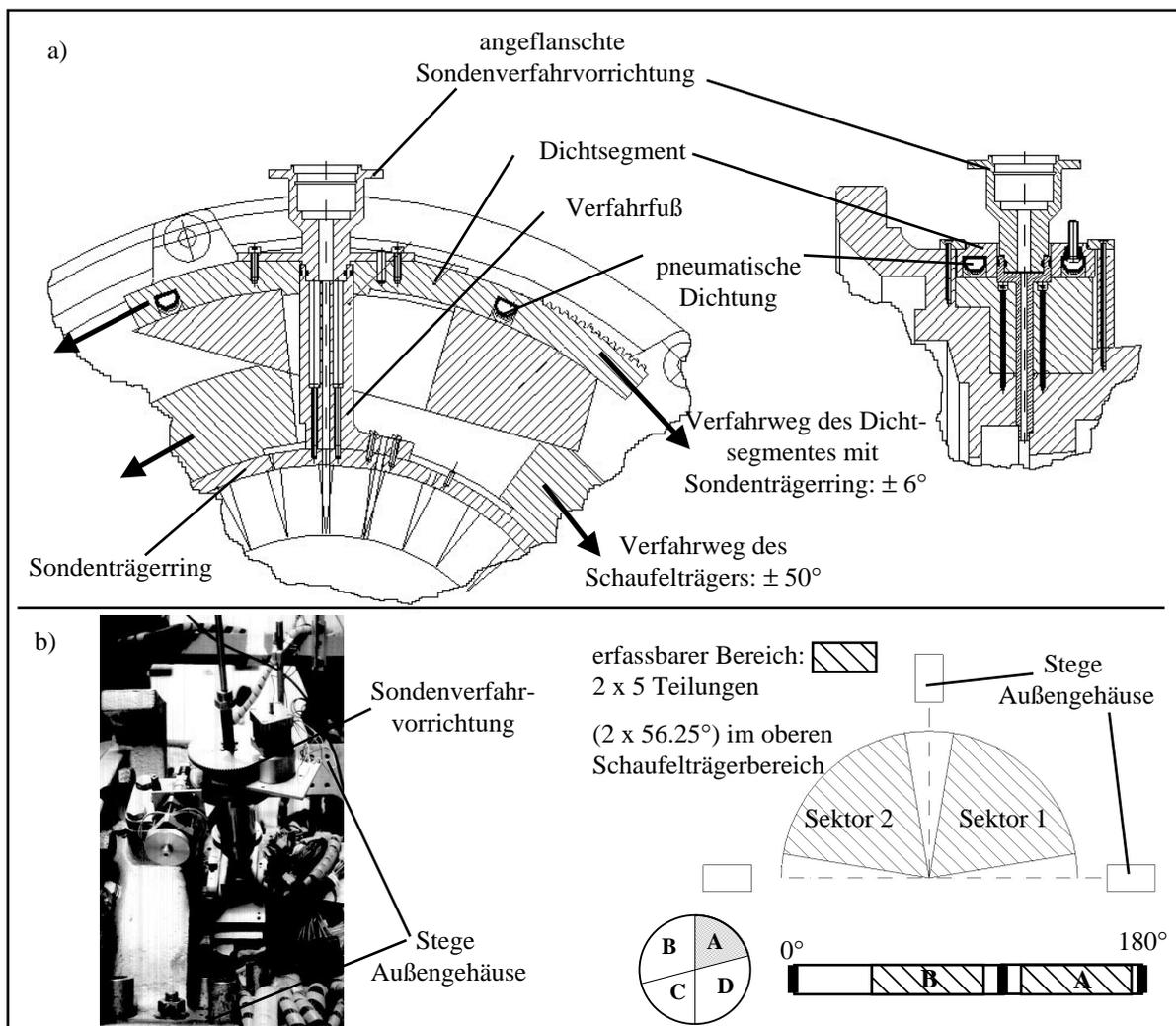


Bild 4 Verfahrvorrichtung für die Untersuchungen mit der Miniatursonde

Strömungsausgleich

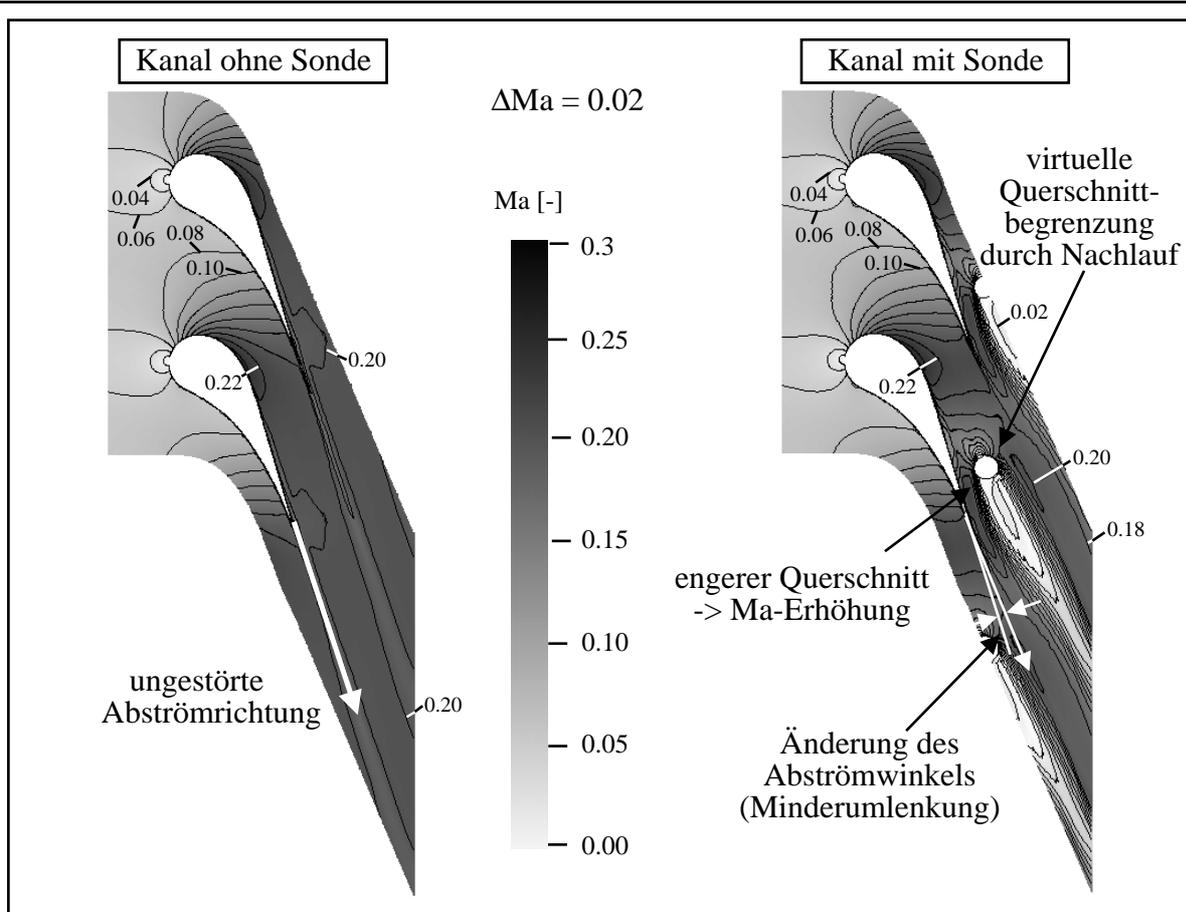


Bild 5 Machzahl: Vergleich Durchströmung mit und ohne Sonde

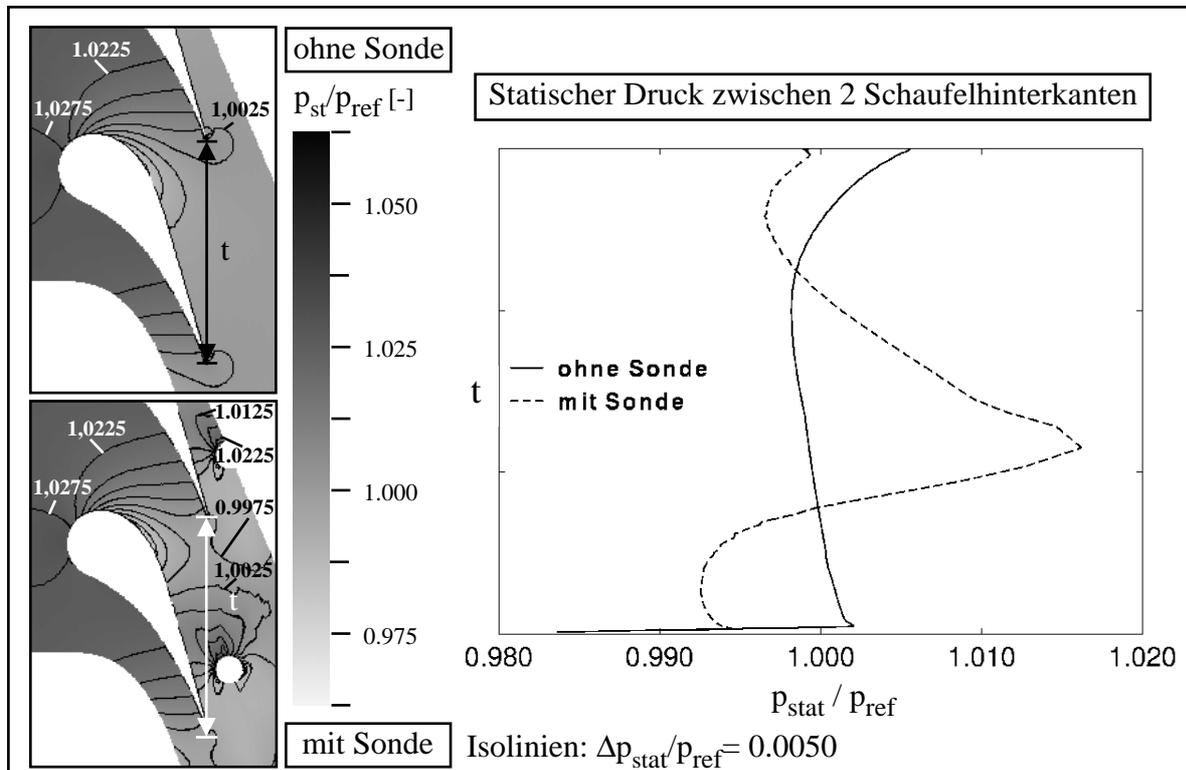


Bild 6 Statischer Druck an der Schaufelhinterkante

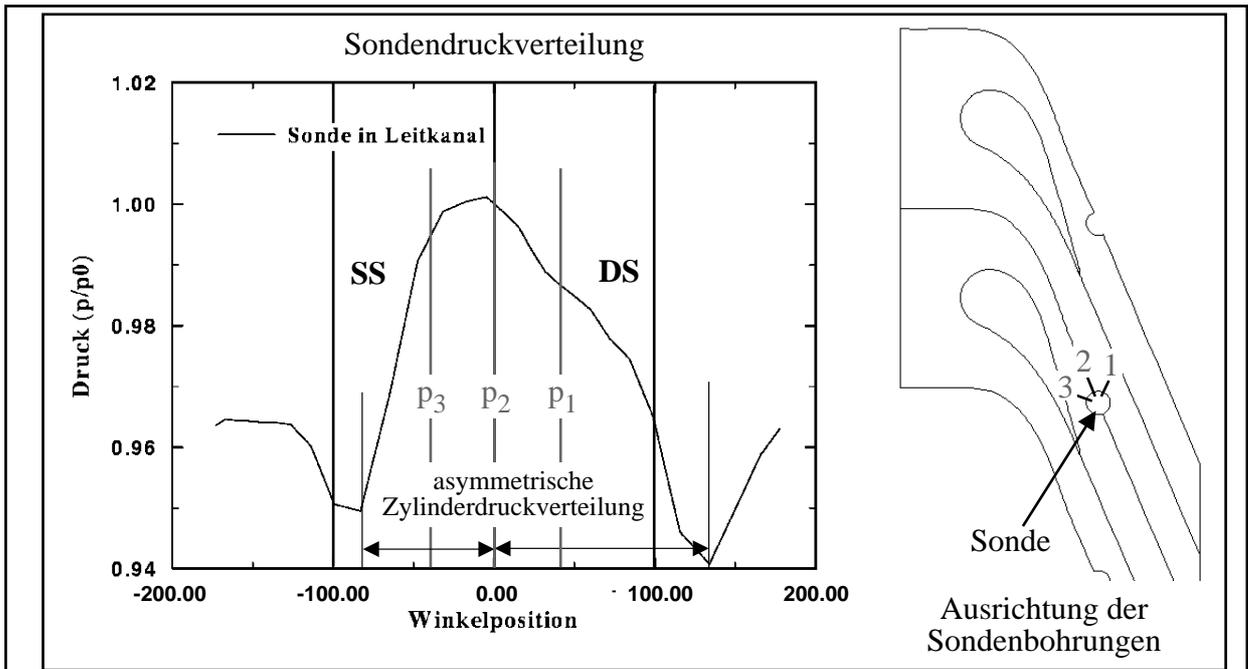


Bild 7 Sondendruckverteilung im Leitkanal

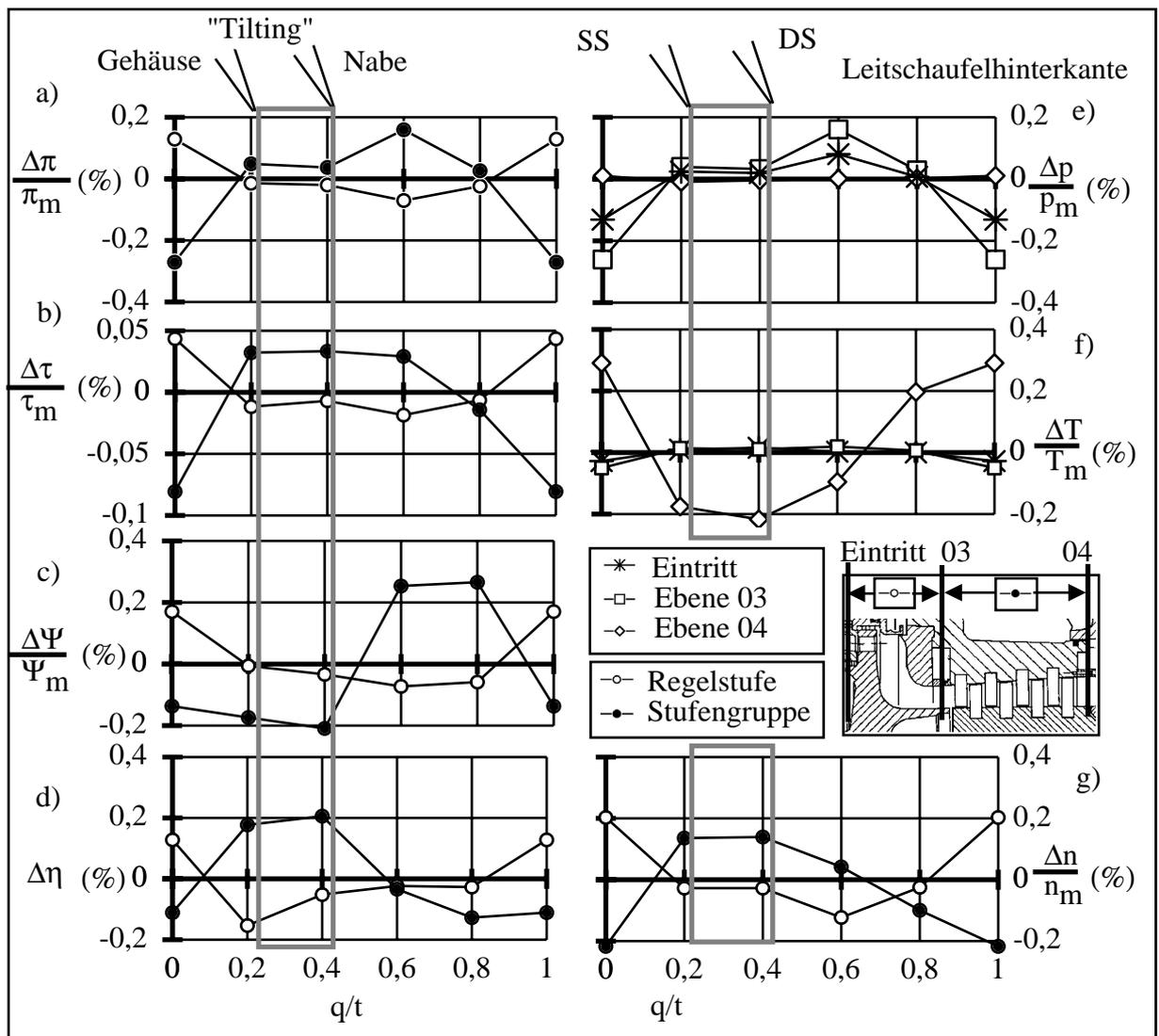


Bild 8 Schwankung der der Betriebskenngrößen in Abhängigkeit von der Position der feststehenden Zylindersonden zur Leitbeschauelung

Strömungsausgleich

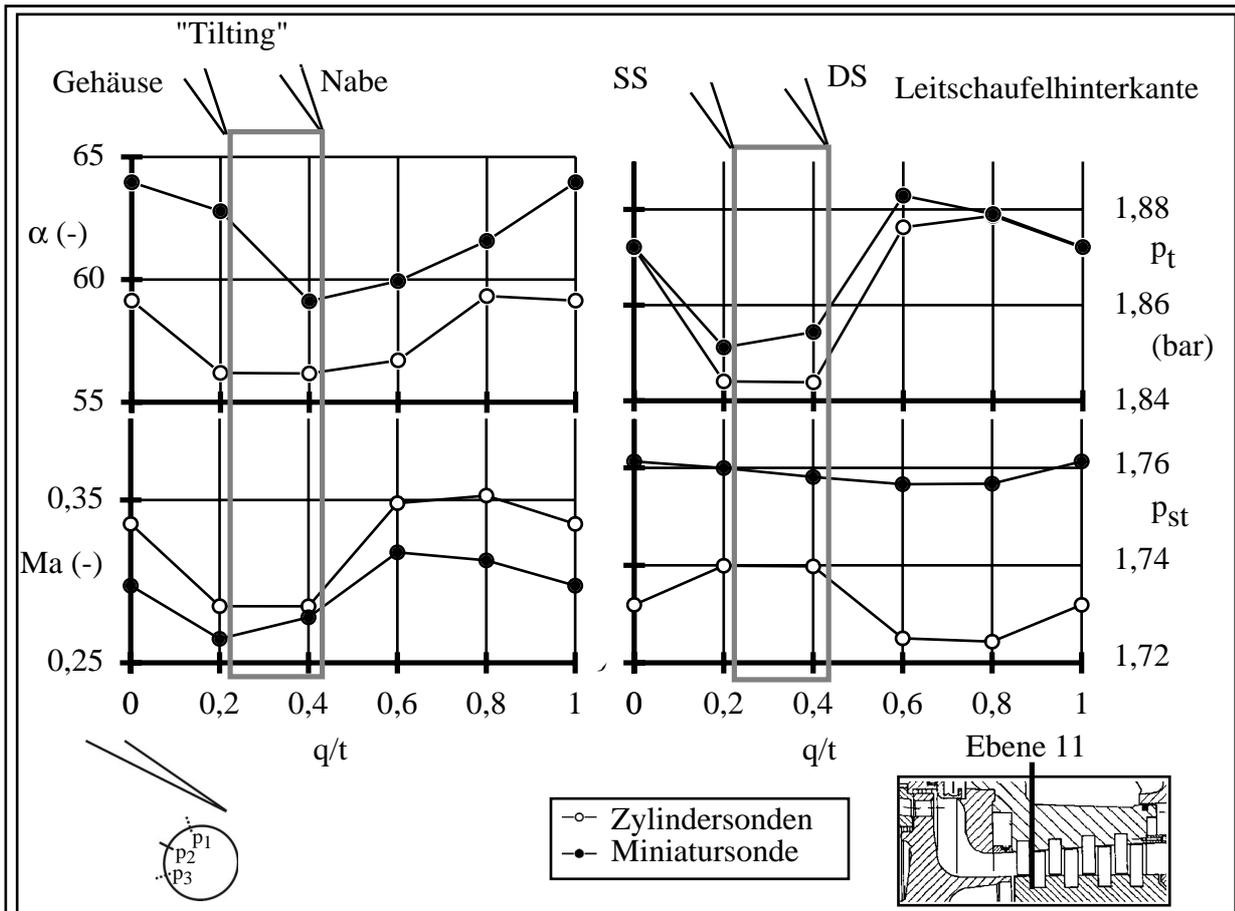


Bild 9 Vergleich der Zylindersondenmessungen mit der Miniatursondenmessung
 Radial gemittelte Verläufe über einer Leitradteilung

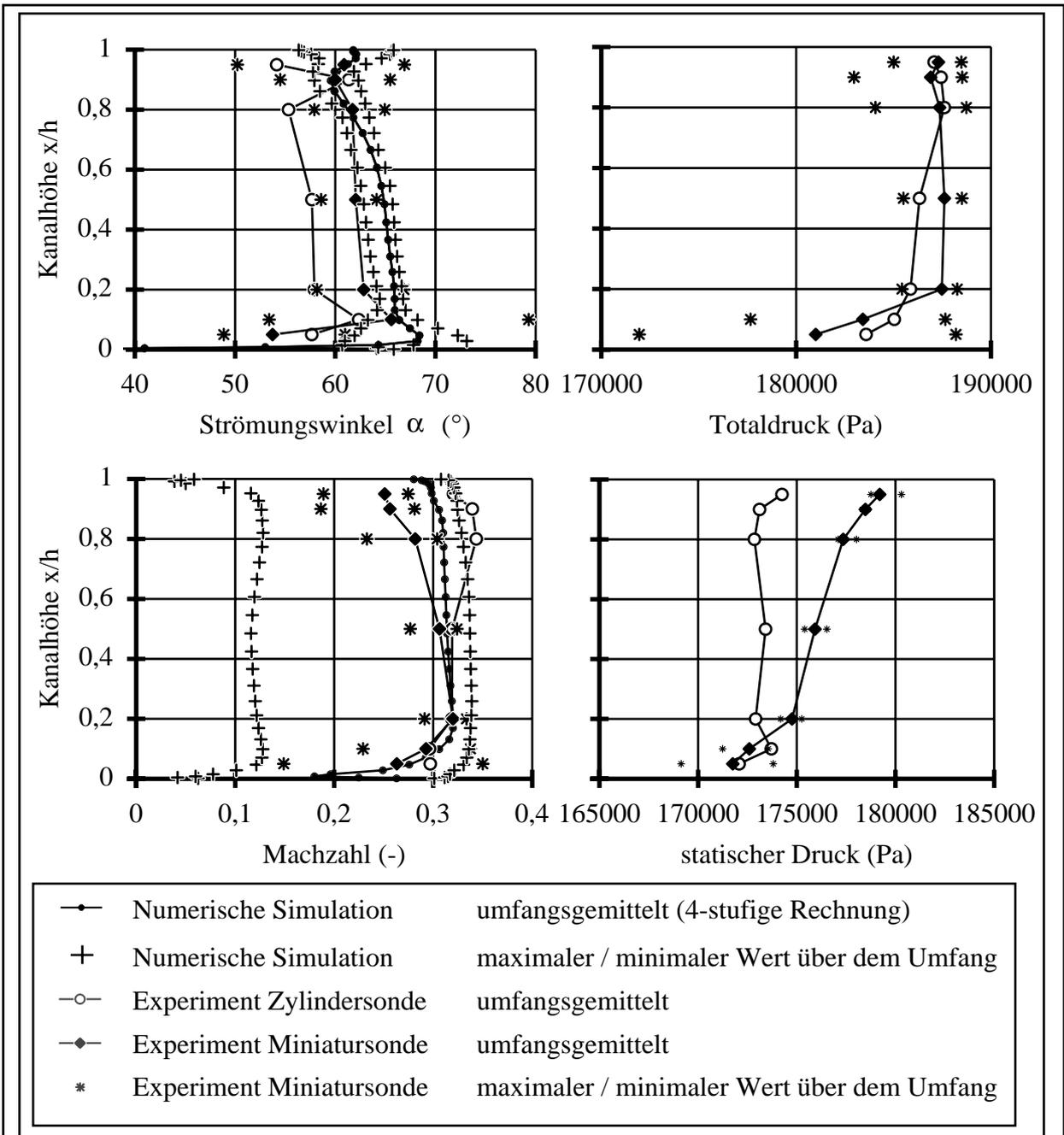
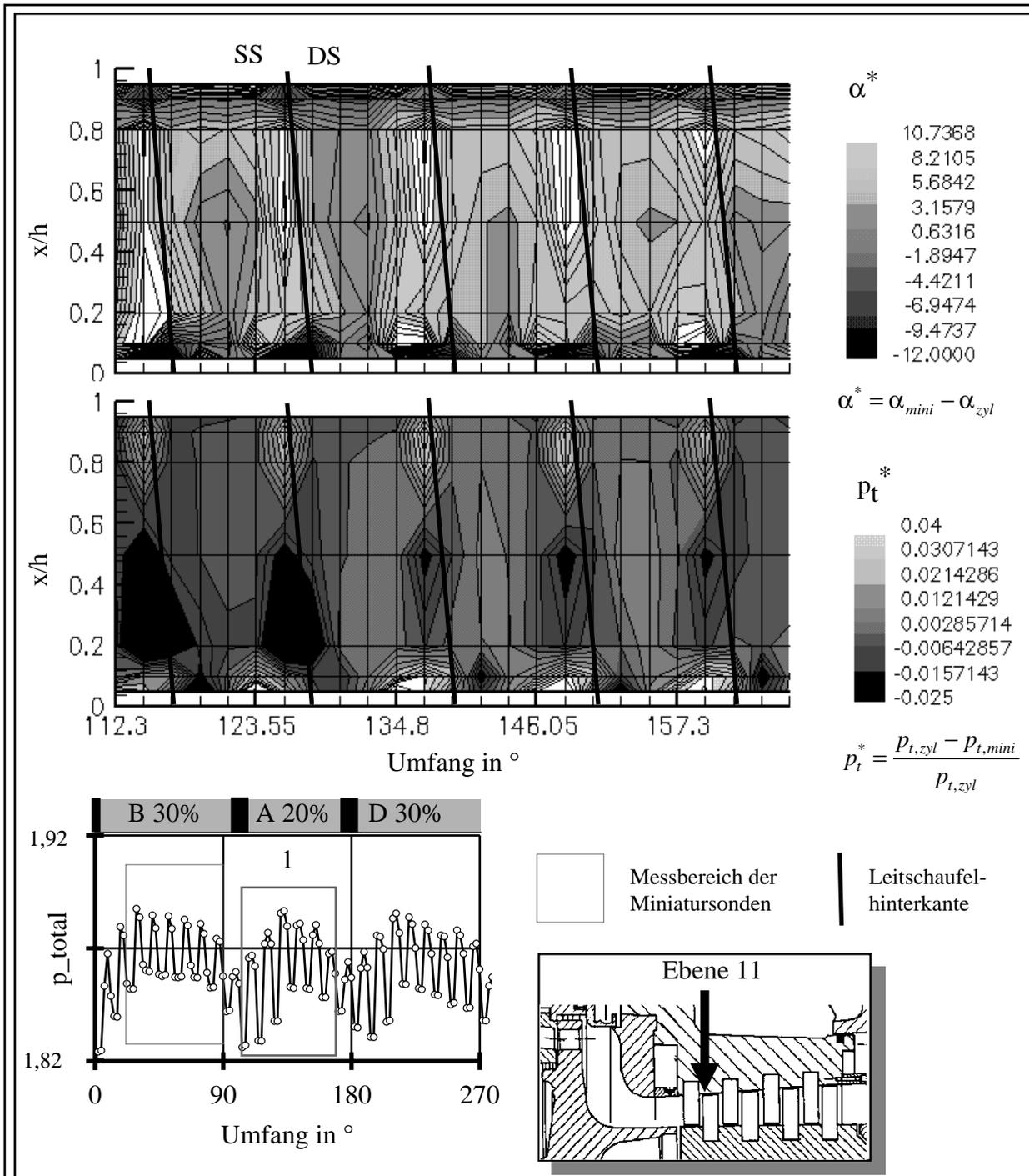


Bild 10 Vergleich der Zylindersonden- und Miniatursondenmessungen mit der numerischen Simulation der 4-stufigen Turbine

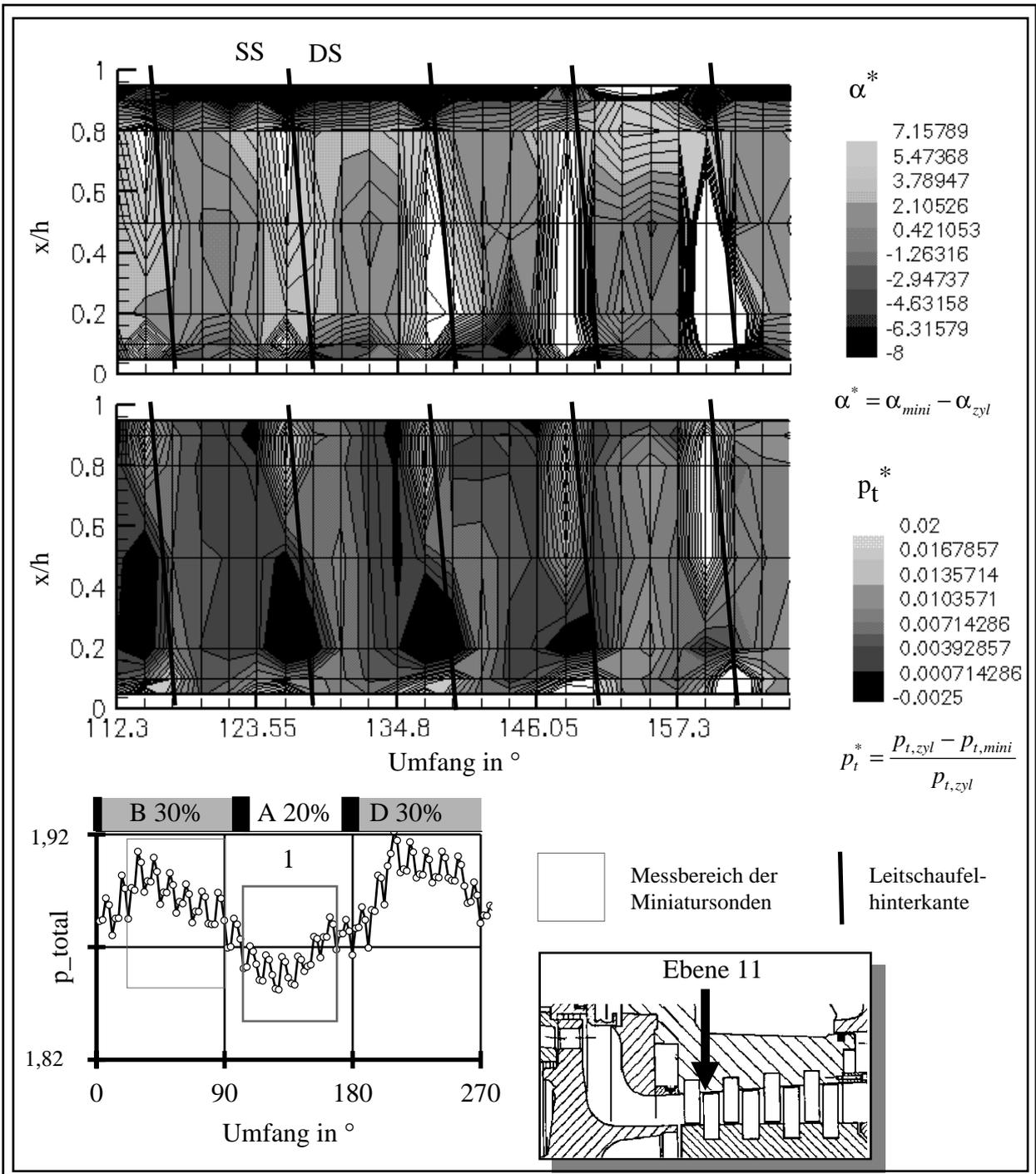
Strömungsausgleich



$\alpha^* = \alpha_{mini} - \alpha_{zyl}$ Abströmwinkeldifferenz

$P_t^* = \frac{P_{t,zyl} - P_{t,mini}}{P_{t,zyl}}$ bezogene Totaldruckdifferenz

Bild 11 Vergleich der Zylindersonden- und Miniatursondenmessungen im Sektor 1 für Vollbeaufschlagung (R-Fall, $\epsilon = 100\%$)



$$\alpha^* = \alpha_{mini} - \alpha_{zyl}$$

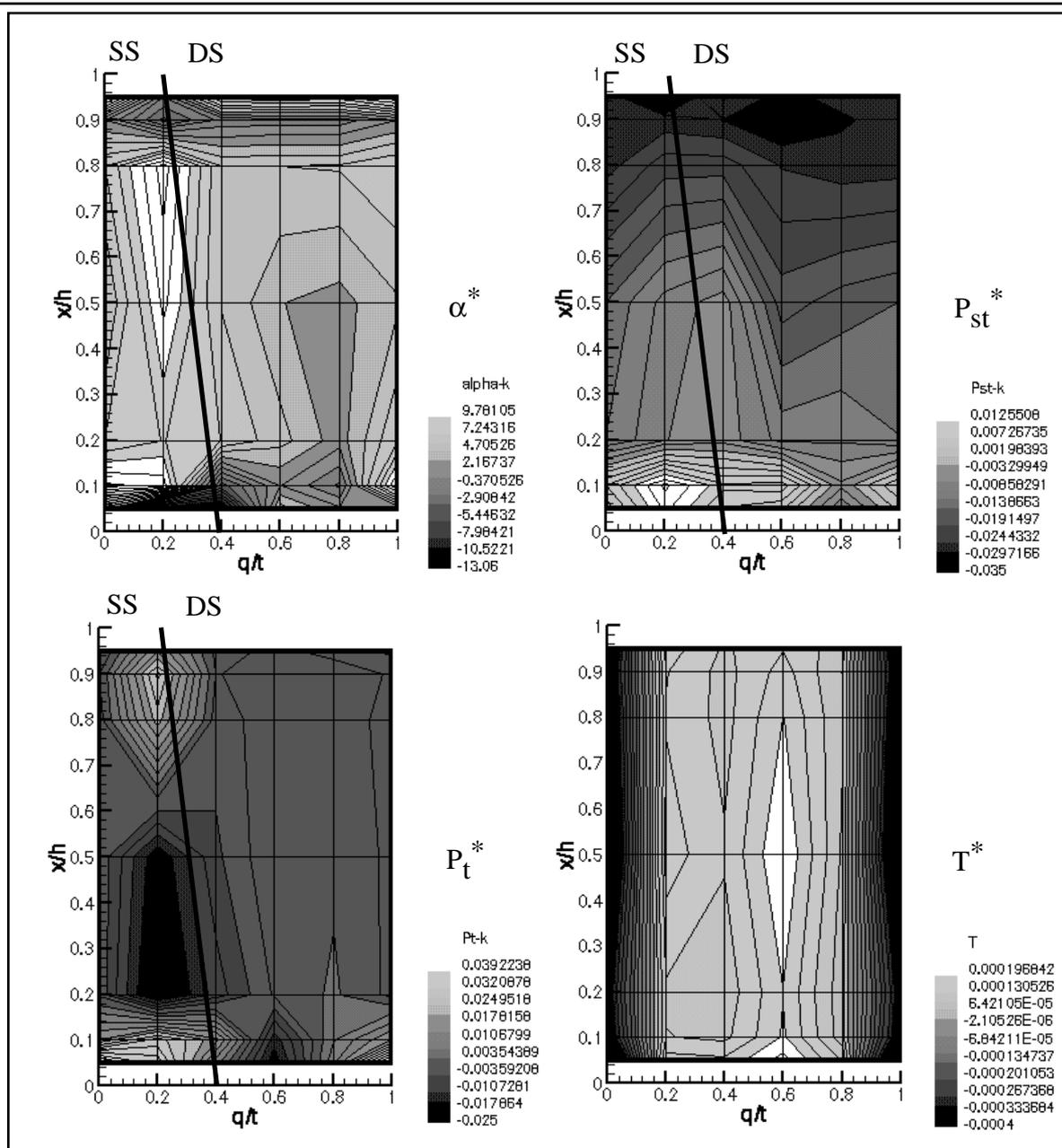
Abströmwinkeldifferenz

$$p_t^* = \frac{P_{t,zyl} - P_{t,mini}}{P_{t,zyl}}$$

bezogene Totaldruckdifferenz

Bild 12 Vergleich der Zylindersonden- und Miniatursondenmessungen im Sektor 1 für Teilbeaufschlagung (M-Fall, $\epsilon = 80\%$)

Strömungsausgleich



$$\alpha^* = \alpha_{mini} - \alpha_{zyl}$$

Abströmwinkelkorrektur

$$P_t^* = \frac{P_{t,zyl} - P_{t,mini}}{P_{t,zyl}}$$

Totaldruckkorrektur

$$P_{st}^* = \frac{P_{st,zyl} - P_{st,mini}}{P_{st,zyl}}$$

statische Druckkorrektur

$$T^* = \frac{T_{03,zyl} - \bar{T}_{03,zyl}}{\bar{T}_{03,zyl}}$$

Temperaturkorrektur der
Regelstufenexpansion

Bild 13 Korrekturfunktionen für Vollbeaufschlagung Referenzfall $\epsilon=100\%$
Anströmwinkel, statische und totale Drücke, Temperatur

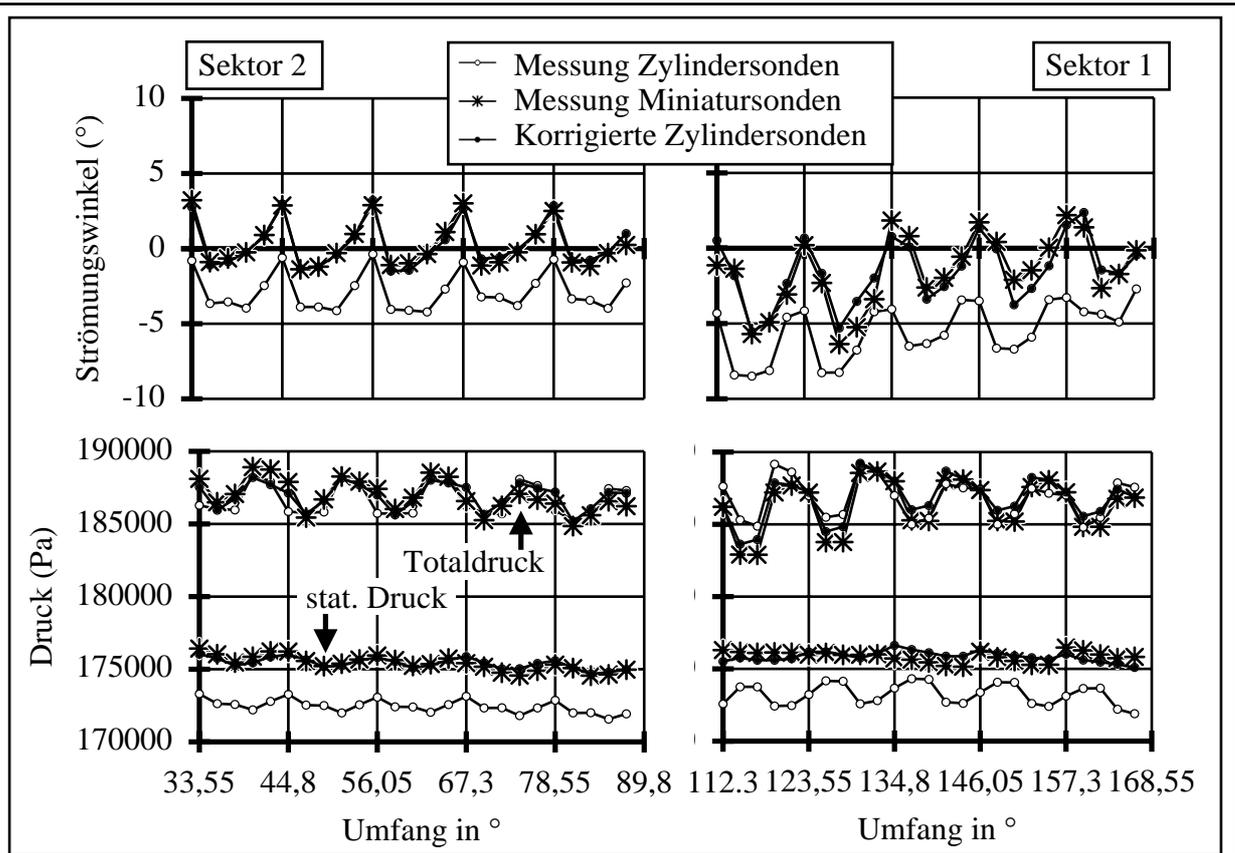


Bild 14 Anwendung der Korrekturfunktionen für den Referenzfall $\epsilon=100\%$
Vergleich mit Zylindersonden- und Miniatursondenmessungen

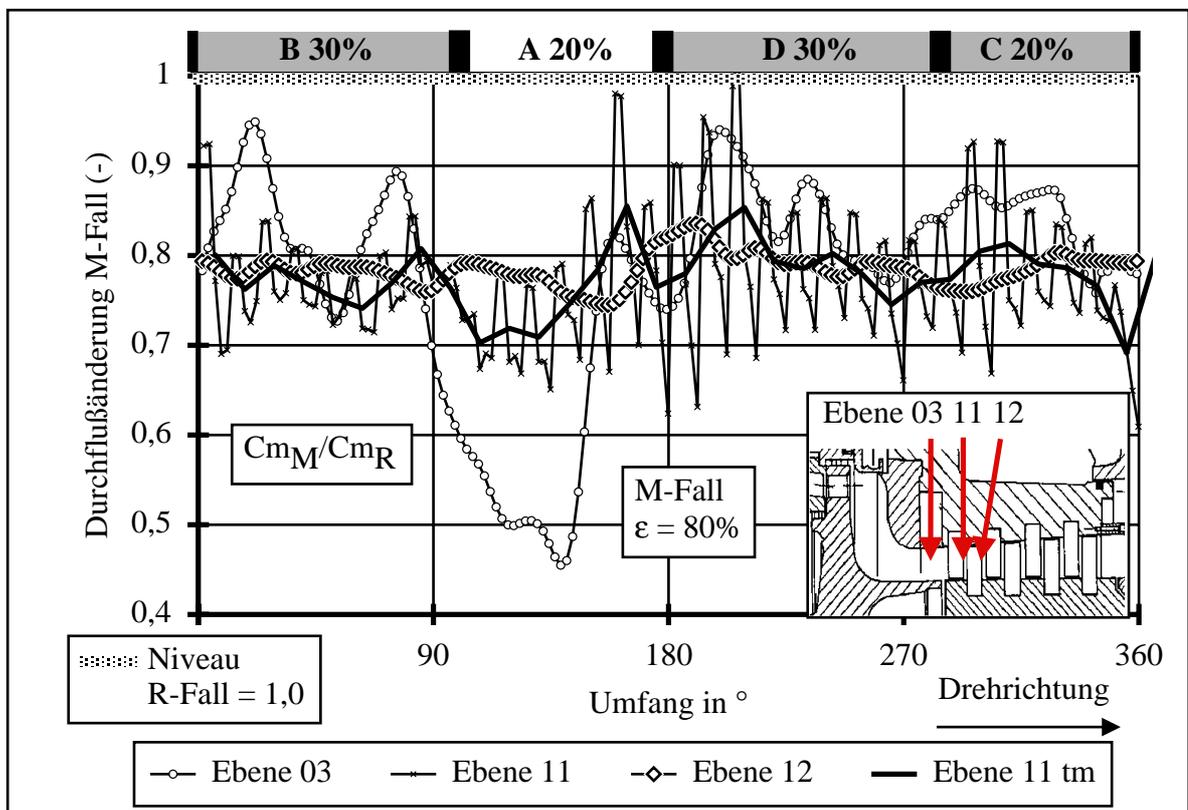


Bild 15 Strömungsausgleich in der ersten Stufe (Ebene 03 - 11 - 12)
bezogene Durchflußänderung Massendefektfall M2 $\epsilon = 80\%$

Strömungsausgleich

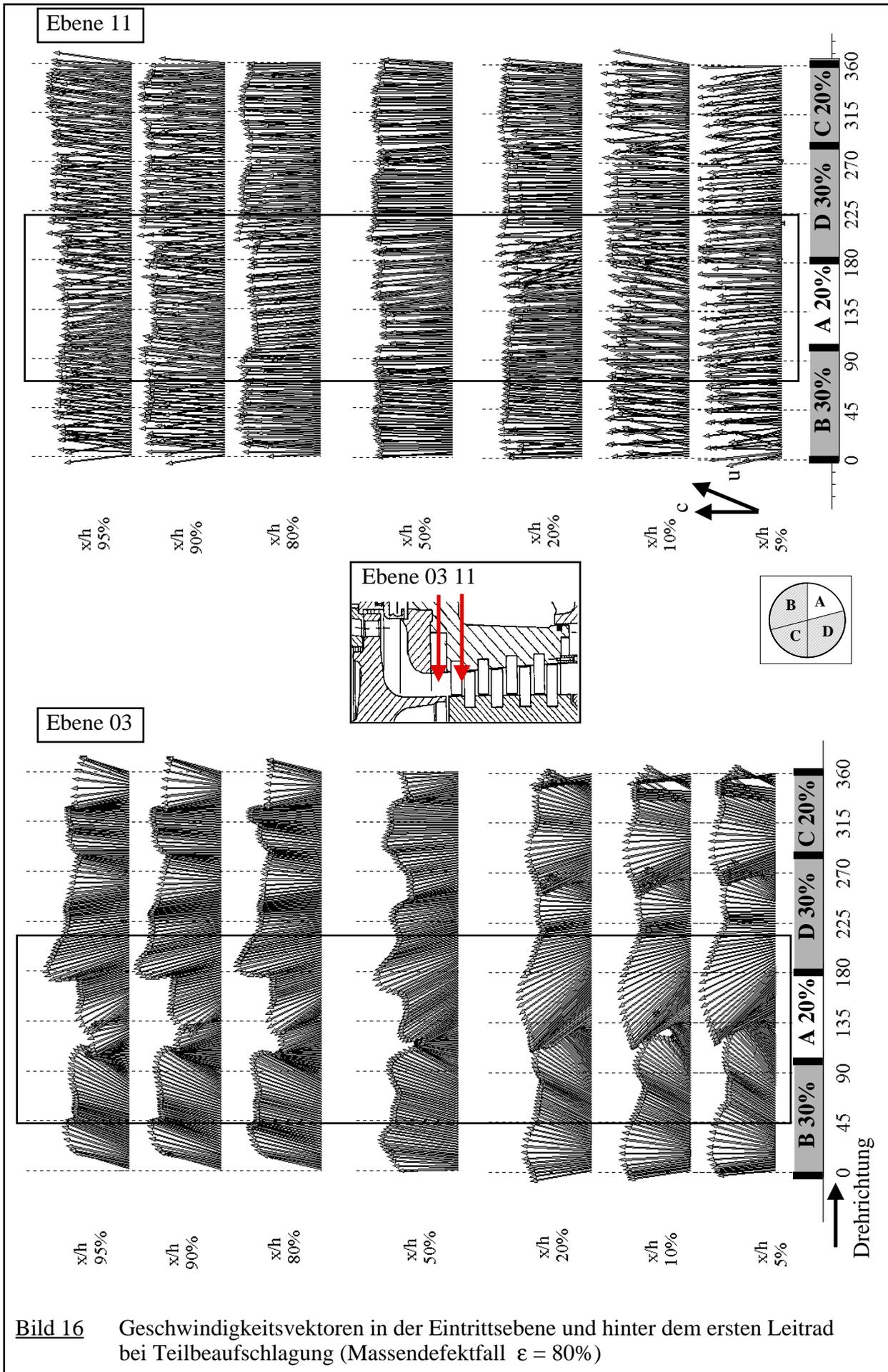


Bild 16 Geschwindigkeitsvektoren in der Eintrittsebene und hinter dem ersten Leitrad bei Teilbeaufschlagung (Massendefektfall $\epsilon = 80\%$)

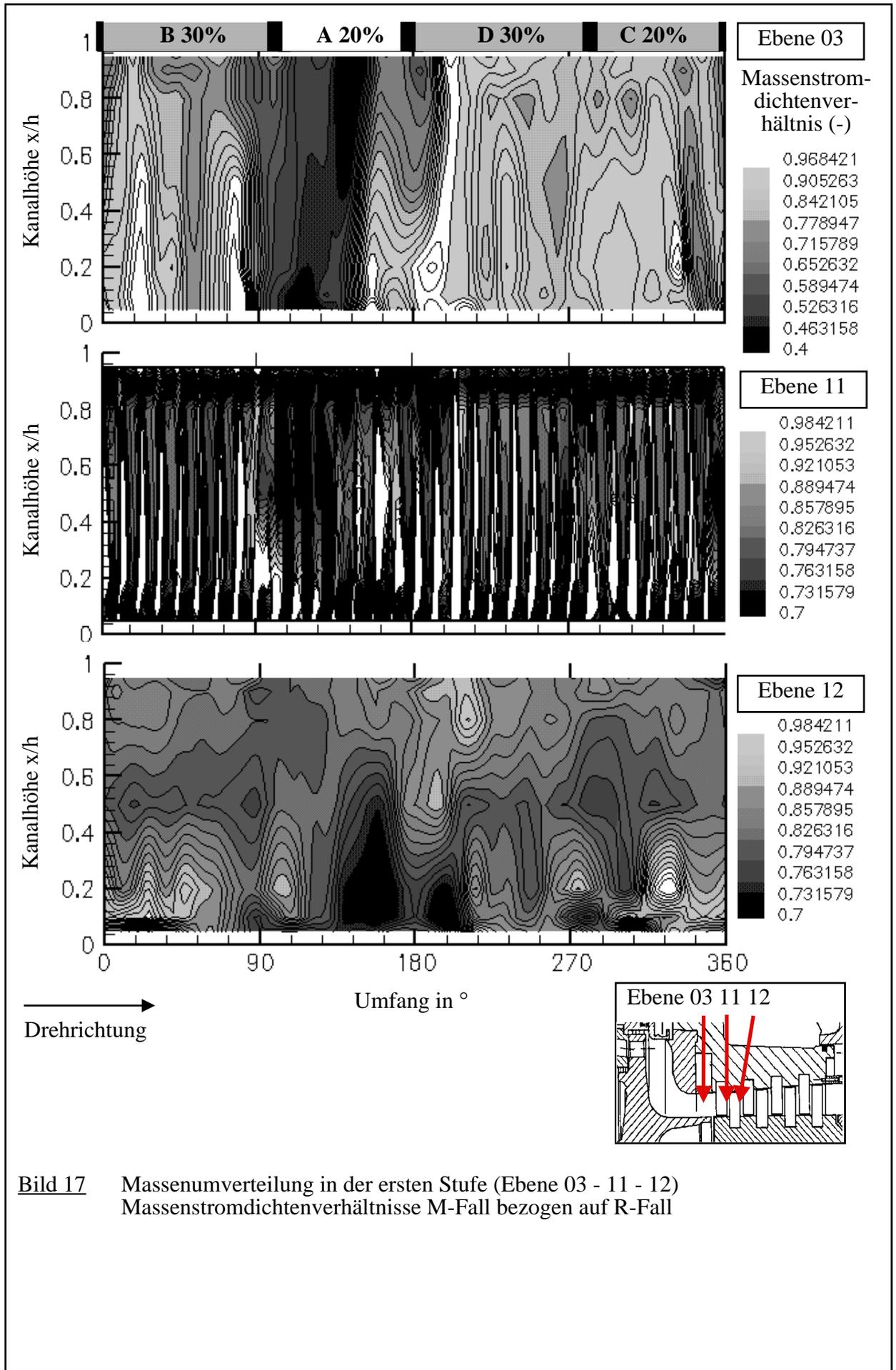


Bild 17 Massenumverteilung in der ersten Stufe (Ebene 03 - 11 - 12)
Massenstromdichtenverhältnisse M-Fall bezogen auf R-Fall