

# Theoretisch-Numerische Untersuchungen an Schlitzrotoren

A. Wick, T. Rung,

Hermann-Föttinger-Institut, TU Berlin

Berlin, September 1995

## Übersicht

Im Hinblick auf den Einsatz des Schlitzrotors als Windrotorblatt zielen die Untersuchungen auf die Verbesserung der aerodynamischen Güte von baulich einfach gestalteten Rotorblechen. Experimente haben gezeigt, daß Rotorblätter, bei denen die Blätter der Länge nach geschlitzt und ein wenig aufgebogen werden, einen höheren Wirkungsgrad des Rotors bewirken. Eine weitere Verbesserung soll nun durch Blattgeometrieänderungen erreicht werden, die auf Erkenntnissen von theoretisch-numerischen Untersuchungen der Umströmung des Rotors basieren. Im Rahmen von Modellkonfigurationen widmeten sich die Untersuchungen zunächst dem prinzipiell zweidimensionalen Strömungsproblem. Bislang gemachte Untersuchungen sind mit Hilfe eines Finite-Volumen Navier-Stokes Verfahrens für den laminaren und turbulenten Strömungsfall gemacht worden. Hierzu wurde zunächst ein Präprozessormodul implementiert, dessen Aufgabe die effiziente Generierung des numerischen Gitters unter Vorgabe einiger wesentlicher Geometrieparameter, wie z.B. Abmaße, Wölbungslage, maximaler Wölbungspfeil, Schlitzweite und -anzahl, Gesamtanstellwinkel etc., ist. Die inzwischen gewonnenen Ergebnisse geben einen Einblick in die Strömungsverhältnisse im Bereich des Schlitzes und zeigen auf, wie eine Leistungssteigerung erzielt werden kann.

## Lösungsansatz

Die vom Rotor erzeugte Leistung hängt praktisch nur von der Rotordrehzahl und der Kraftkomponente in Umfangsrichtung, welche durch die Strömung auf den Rotor wirkt, ab. Der Zusammenhang dieser beiden Größen mit der Strömung um den Rotor muß genauer untersucht werden, bevor die nutzbare Leistung durch eine Optimierung der Geometrie erhöht werden kann. Durch die zweidimensionale Betrachtung vereinfacht sich unsere Problemstellung auf die Umströmung von schräg angestellten Platten (mit unendlicher Ausdehnung senkrecht zur betrachteten Ebene). Die bisher betrachteten Konfigurationen unterscheiden sich durch die Drehzahl, Schlitzweite und -lage.

Wie aus Bild 2 ersichtlich ist, besteht zwischen Normalkraft und Umfangskraft die Beziehung  $F_{umfang} = F_{normal} \cdot \sin(\alpha)$ . Die Tangentialkraft an den Platten ist vernachlässigbar klein; sie leistet somit keinen Beitrag zur Umfangskraft. Für die Normalkraft gilt  $F_{normal} = 0.5 \cdot \rho v_{rel}^2 c_p A$  (mit  $A = 1 \cdot B$ ,  $B =$  Blattbreite);  $c_p$  wiederum ist eine Funktion des Winkels  $\gamma = \beta - \alpha$ , der Schlitzlage und der Schlitzweite. Aus der Beziehung zwischen Normalkraft und Umfangskraft wird klar, daß der Anstellwinkel möglichst groß gewählt werden sollte. Berücksichtigt man jedoch die

Abhängigkeit der Normalkraft vom Winkel  $\gamma$ , so stellt sich den Experimenten zufolge ein Leistungsmaximum bei einem relativ kleinen Anstellwinkel von etwa  $10^\circ$  ein. Ursache hierfür ist die Abnahme des Druckbeiwertes  $c_p$  mit kleiner werdendem Winkel  $\gamma$ . Aus diesen Überlegungen folgt, daß das Hauptaugenmerk unserer Untersuchungen dem  $c_p$ -Verlauf der einzelnen Konfigurationen gelten muß.

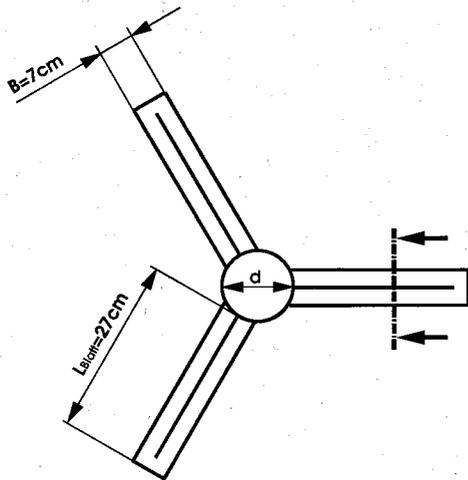


Bild 1 Skizze des Rotors

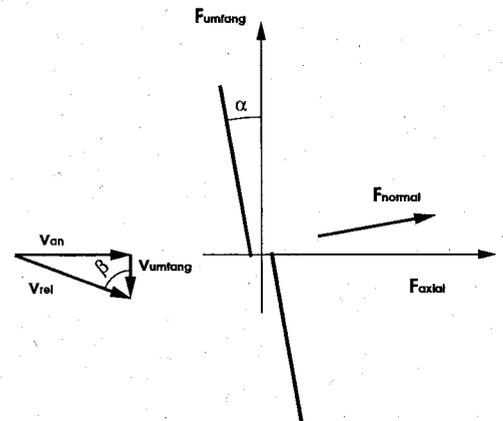


Bild 2 Vergrößerung des Schnittes aus Bild 1

Für die zweidimensionale Simulation wird ein für die Rotorumströmung charakteristischer Querschnitt, welcher bei etwa  $2/3 R$  ( $R$  = Rotorradius) liegt, gewählt. Aus der Umfangsgeschwindigkeit an dieser Stelle und der Anströmgeschwindigkeit läßt sich die resultierende Anströmung nach Betrag und Winkel bestimmen. Die Rotordrehzahl, die sich in der Realität aufgrund des Strömungszustandes und des Laufwiderstandes einstellt, muß bei der Rechnung vorgegeben werden. Es wird zunächst die Drehzahl verwendet, bei der experimentell die maximale Leistung ermittelt wurde ( $n = 12\text{Hz}$ ,  $Re_B \approx 20.000$ , Schlitzweite ca.  $B/16$ ), da zu erwarten ist, daß sich hierbei der gesuchte Effekt während der Versuche am stärksten bemerkbar machte. Das Rotorblatt wurde zunächst, in Anlehnung an die Form der Rotorblätter, die im praktischen Versuch getestet wurden, als mittig geschlitzt und ungewölbt angenommen (Konfiguration 2). Hiervon ausgehend wurde zum einen die Schlitzweite um das 2,5-fache vergrößert (Konfiguration K3) und zum anderen wurde der Schlitz versetzt, so daß sich ein Plattenbreitenverhältnis von 4:1 ergab (Konfiguration 4). Als Referenz dient die Konfiguration 1, eine ebene, ungeteilte Platte. Die Konfigurationen werden jeweils als Linksläufer (Anstellwinkel  $+\alpha$ ) und als Rechtsläufer (Anstellwinkel  $-\alpha$ ) betrachtet. Für alle Konfigurationen wurde die Drehzahl von 12 Hz wie folgt variiert:  $-100\%$  /  $-30\%$  /  $+30\%$  /  $+100\%$ . Die Anströmgeschwindigkeit  $v_{an}$  war in allen Fällen 4 m/sec.

## Numerisches Lösungsverfahren

Das verwendete Rechenverfahren basiert auf der Finite-Volumen-Approximation der Bilanzgleichungen für ein Newtonsches Fluid auf beliebig gestalteten Rechengittern [1]. Sämtliche Strömungsvariablen werden zellzentriert gespeichert. Der voll-implizite Lösungsalgorithmus verwendet ein Druckkorrekturverfahren zur Gewährleistung eines kontinuierlich verträglichen Druckfeldes. Um die Konvergenz der Rechnung sicherzustellen war es notwendig das Upwind-Schema anstelle von hochwertigeren Konvektionsschemata zu verwenden. Nachdem bei ersten Rechnungen mit einem (low-Re)  $k-\omega$  Turbulenzmodell Konvergenzprobleme auftraten, wurde dieses Modell für die dem Bericht zugrunde liegenden Rechnungen durch ein (high-Re)  $k-\epsilon$  Turbulenzmodell ersetzt. Sämtliche Rechnungen basieren auf einem 6-Block Rechengitter mit ca. 5500 Rechenknoten.

## Diskussion der Ergebnisse

Die Bilder 3 bis 10 und Bild 12 stellen die Druckbeiwertverteilung und einige charakteristische Stromlinien um den Schlitz dar. In den Abbildungen sind die Platten um den Anstellwinkel  $\alpha$  gedreht, so daß sie senkrecht liegen. Entsprechend ist die relative Anströmgeschwindigkeit  $v_{rel}$  um  $\alpha$  gedreht. Die Druckbeiwertverteilung ist wie folgt normiert:

$$-1.6 \leq C_p \leq 1.6$$

Tabelle der Gesamtdruckbeiwerte

$n/sec$	$\gamma/^\circ$	K1L	K2R	K2L	K3R	K3L	K4R	K4L
0	80	1.94	1.99	1.95	1.99	1.90	1.93	1.90
8.4	66	1.84	1.92	1.83	1.94	1.73	(1.87)	1.78
12	60	1.78	1.86	1.75	1.86	1.63	(1.81)	1.70
15.6	55	1.71	1.80	1.67	1.84	1.54	(1.76)	1.61
24	44	1.56	1.68	1.51	1.71	1.34	1.65	1.44

In der obigen Tabelle sind, in Abhängigkeit von der Drehzahl bzw. dem Winkel  $\gamma$ , die Gesamtdruckbeiwerte für die verschiedenen untersuchten Konfigurationen aufgeführt. Bei den in Klammern gesetzten Gesamtdruckbeiwerten traten bei der Rechnung Konvergenzprobleme auf. Im Vergleich zu anderen Rechnungen lag das Residuum einzelner Strömungsgrößen um etwa eine Zehnerpotenz höher. Diese Werte sind deshalb mit einem Fehler von etwa 0.1% behaftet. Dies fällt bei der Rundung auf zwei Nachkommastellen allerdings nicht ins Gewicht.

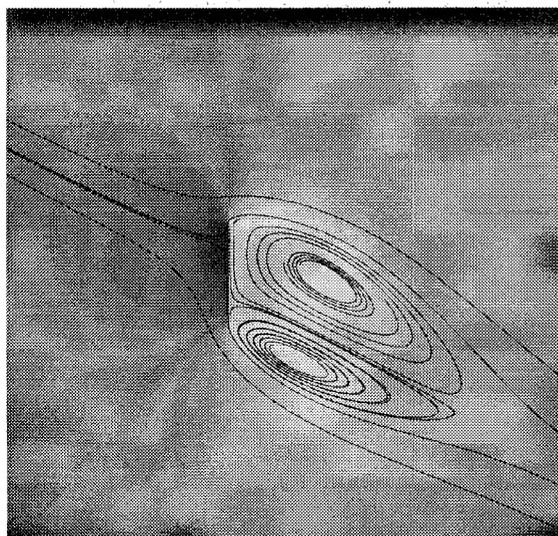
Ein Vergleich der Gesamtdruckbeiwerte zeigt, daß eine von schräg oben angeströmte, geteilte Platte (siehe Bild 3,5,7 und 9), die einem linkslaufenden Rotor entspricht, generell schlechter ist als eine ungeteilte Plat-

te. Die von schräg unten angeströmte, geteilte Platte weist hingegen größere Beiwerte auf als die ungeteilte Platte. Entscheidend ist aber, daß die Beiwerte bei großen Drehzahlen noch vergleichsweise groß sind. Das Maß für die erzielte Verbesserung ist die Leistung  $P = F_{umfang} \cdot v_{umfang}$ . Eine konservative Schätzung der mit optimierter Geometrie erzielbaren Wirkungsgradsteigerung ergibt sich wie folgt. Die Konfiguration K1L entspricht für  $n = 12Hz$  einem im praktischen Versuch getesteten Rotor. Der für die erreichbare Drehzahl maßgebliche Druckbeiwert von 1.84 bei der Konfiguration K3R ist größer als der Wert von 1.78 bei der Konfiguration K1L, somit ist sichergestellt, daß die Drehzahl  $n = 15.6Hz$  von dem geschlitzten Rotor erreicht wird. Die Leistung, die sich bei K3R und  $n = 12Hz$  ergibt, ist um 45% größer die bei K1L und  $n = 15.6Hz$ . Der Wirkungsgrad des gesamten Rotors wird sich um annähernd denselben Betrag erhöhen, wenn die Strömungsverhältnisse über die gesamte Blattlänge gleich optimiert werden können wie im betrachteten Schnitt. Die Ursache für die positive Auswirkung des Schlitzes bei der rechtslaufenden Konfiguration ist die Unterdruckspitze, die an der Rückseite der oberen Platte auftritt (siehe Bild 11). Nachdem die Strömung den Schlitz passiert hat, baut sich der Unterdruck an der Plattenrückseite wieder ab, da das Wirbelgebiet dieser Zone den Druck aufprägt. Es ist nun naheliegend, mehrere Schlitzze anzubringen um den Unterdruck an der Rückseite zu vergrößern. Andererseits tritt ein Druckabfall an der Vorderseite am Schlitz auf. Deshalb ist es ungewiß, ob sich die positive Wirkung des Schlitzes durch das Anbringen von mehreren Schlitzzen noch vergrößern läßt. Das Versetzen des Schlitzes nach unten hat den positiven Effekt deutlich verringert. Welche Auswirkung das Versetzen des Schlitzes nach oben hat, ist, ebenso wie die Auswirkung einer Mehrfachteilung des Rotorblattes, noch zu untersuchen.

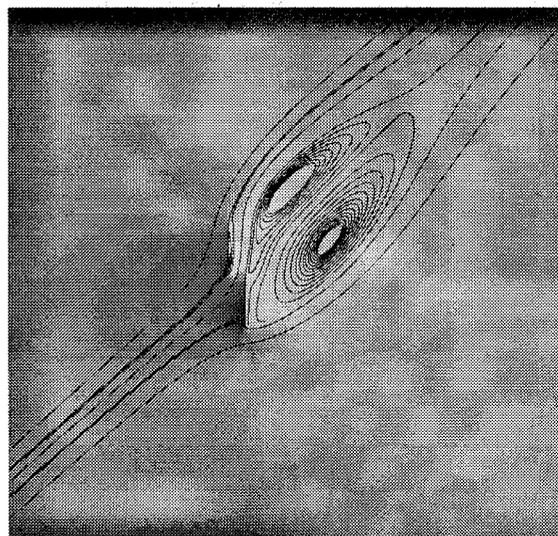
Bei allen Rechnungen war der dimensionslose Wandabstand der an der Vorderseite liegenden Kontrollvolumen für das gewählte high-Re Turbulenzmodell zu klein. Auch die Wahl eines größeren Gitters schafft hier keine Abhilfe. Bei künftigen Berechnungen sollte deshalb trotz des dadurch schlechter werdenden Konvergenzverhaltens ein low-Re Turbulenzmodell verwendet werden.

Prinzipiell ändert der Schlitz an der Art und Größe des Wirbelgebietes hinter der geteilten Platte nichts (siehe Bilder 3 bis 10), der Schlitzrotor ist deshalb, ebenso wie ein Rotor mit ebenem, ungeteiltem Blatt, ein Widerstandsläufer. Aufgrund seines Konstruktionsprinzips gehört der Schlitzrotor zur Klasse der Langsamläufer [2]. Er ist hinsichtlich der erreichbaren Schnellaufzahl Rotoren mit Profilflügeln deutlich unterlegen. Langsamläufer zeichnen sich durch vergleichsweise geringe Leistung, aber hohes Drehmoment aus. Um ein großes Drehmoment zu erreichen, muß die Blattzahl erhöht werden. Bei dieser Art von Rotoren muß das Blatt eine konstante Breite aufweisen oder sich sogar zur Blattwurzel hin verjüngen, um der nach Betz bzw. Schmitz maximal erzielbaren Leistung nahe zu kommen. Der Beitrag, den die infinitesimale Umfangskraft  $dF_{umfang}$ , die an einem bestimmten Radius angreift, zur Leistung und zum Drehmoment leistet, nimmt mit dem Radius linear zu. Aus diesem Grunde ist es wichtig, daß die Strömungsverhältnisse zur Spitze hin optimiert werden. Eine deutliche Wirkungsgradsteigerung ist durch eine einfach herstellbare Verwindung des Rotorblattes zu erwarten. An der Blattwurzel ist ein sehr viel größerer Anstellwinkel möglich als an der Blattspitze. Eine Möglichkeit, Verluste durch Blattspitzenwirbel zu verringern, wäre es eventuell die im Flugzeugbau bekannten Winglets anzubringen. Dies ist besonders interessant, da sich Winglets durch Abkanten der Blattspitzen leicht herstellen lassen.

Eine theoretisch-numerische Untersuchung derartiger Verbesserungen und ebenfalls die Validierung der zweidimensionalen Betrachtungen müßte durch eine 3D-Rechnung verwirklicht werden. Die Untersuchung der Wirkung von dreidimensionalen Effekten würde sehr aufwendige Rechnungen erfordern. Diese könnten wieder mit dem bei dieser Arbeit verwendeten Code durchgeführt werden, nachdem dieser zuvor für die Berechnung von bewegten Volumen und 3D-Strömungen erweitert wurde.



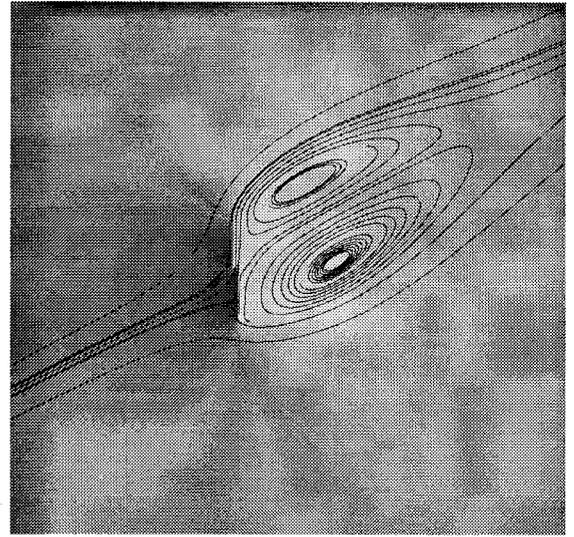
**Bild 3** Konfiguration K1L,  $\gamma = 60^\circ$



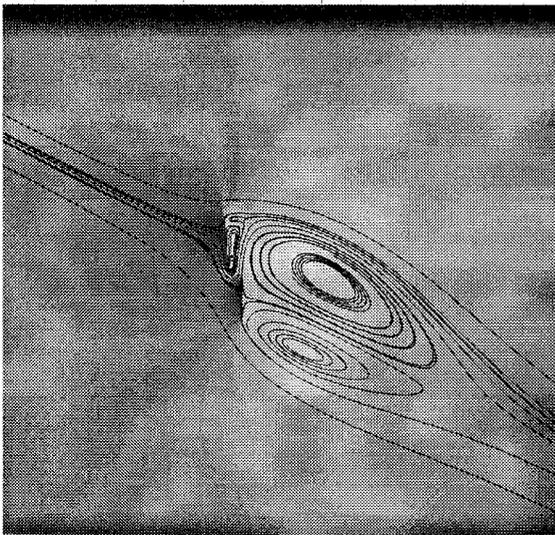
**Bild 4** Konfiguration K3R  $\gamma = 44^\circ$



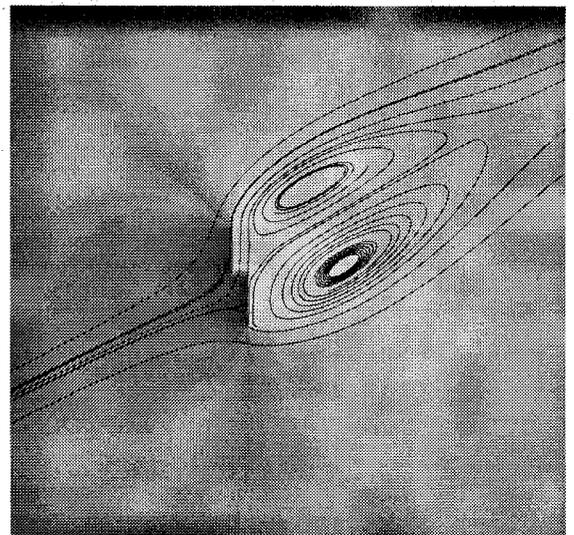
**Bild 5** Konfiguration K2L,  $\gamma = 60^\circ$



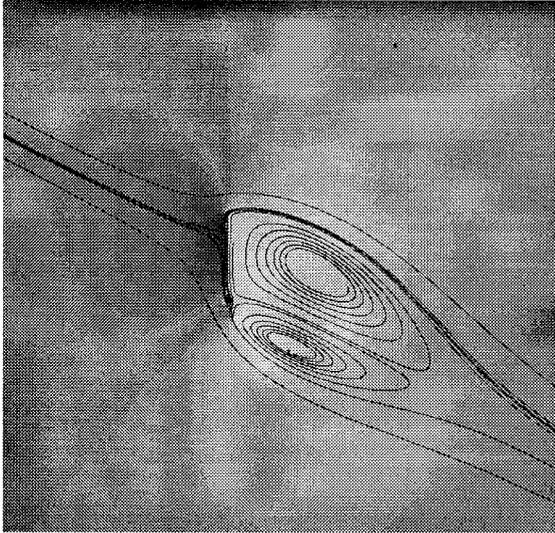
**Bild 6** Konfiguration K2R,  $\gamma = 60^\circ$



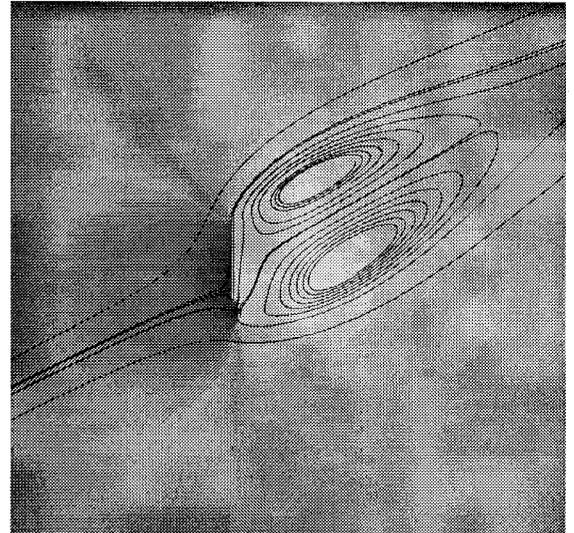
**Bild 7** Konfiguration K3L,  $\gamma = 60^\circ$



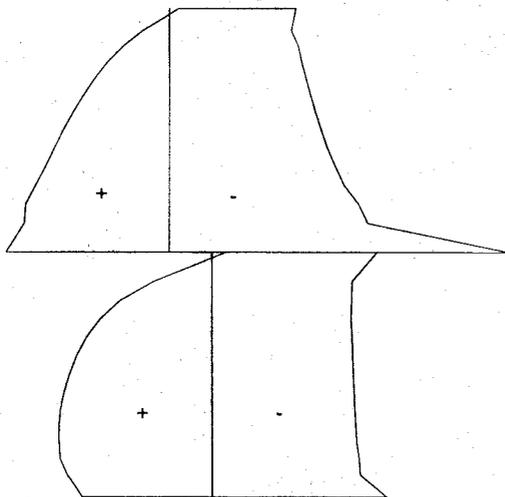
**Bild 8** Konfiguration K3R,  $\gamma = 60^\circ$



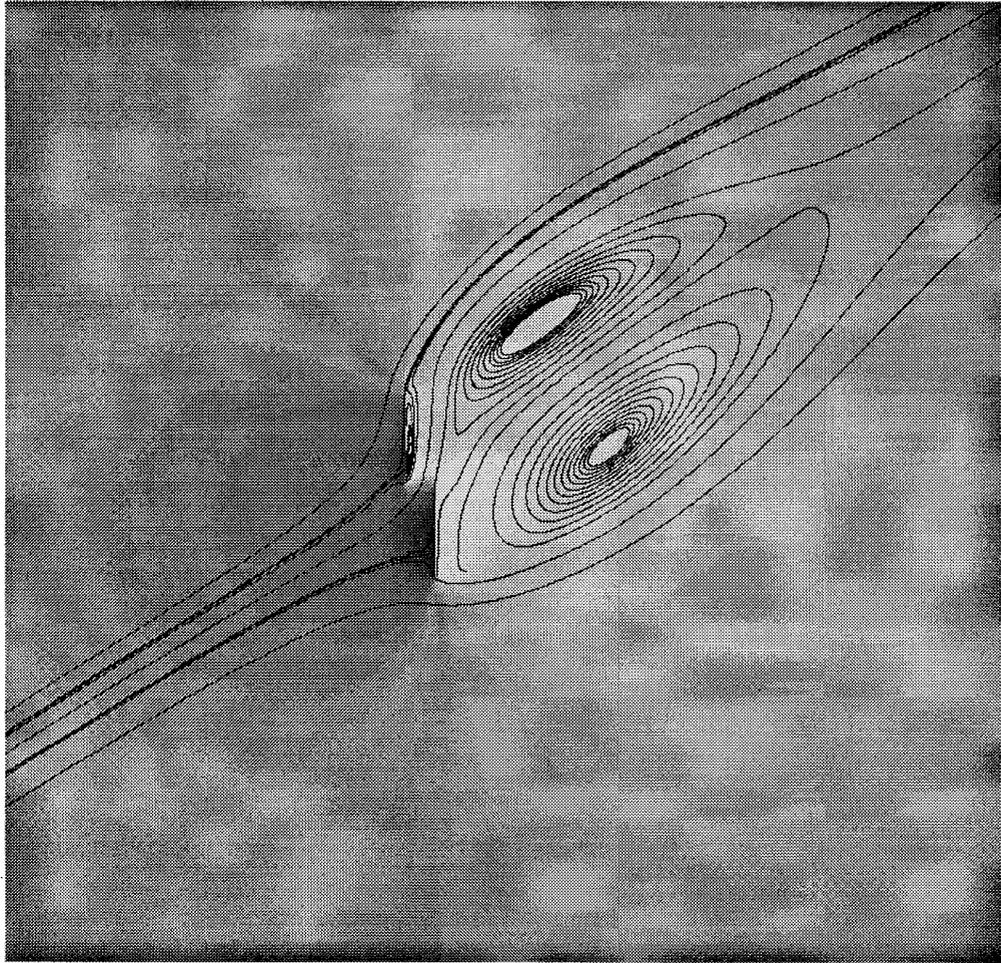
**Bild 9** Konfiguration K4L, mit  $\gamma = 60^\circ$



**Bild 10** Konfiguration K4R, mit  $\gamma = 60^\circ$



**Bild 11** Druckbeiwertverteilung bei Konfiguration K3R bei  $\gamma = 55^\circ$ , das Unterdruckmaximum hat den Wert -1.7



**Bild 12** Konfiguration K3R, mit  $\gamma = 55^\circ$

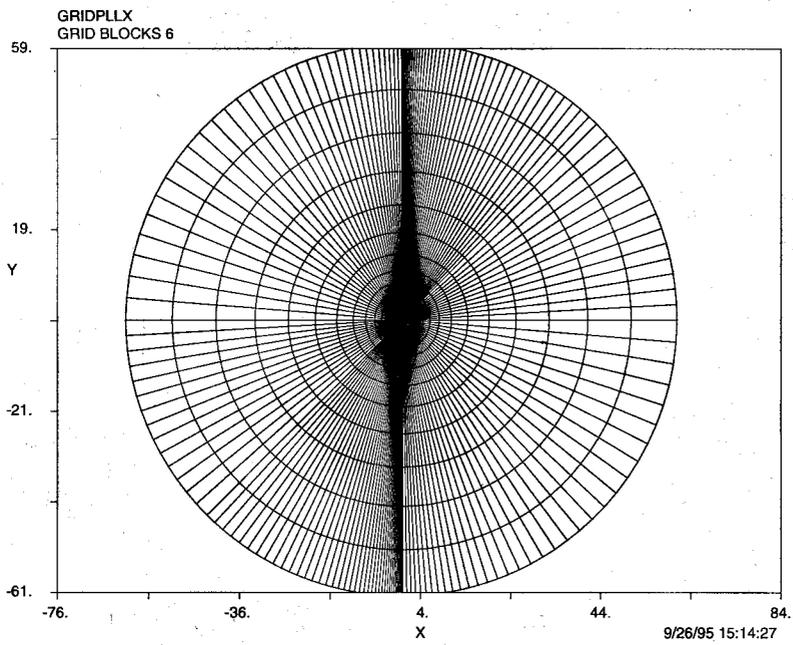


Bild 13 Rechengitter auf dem betrachteten Gebiet, Durchmesser =  $60 \cdot B$

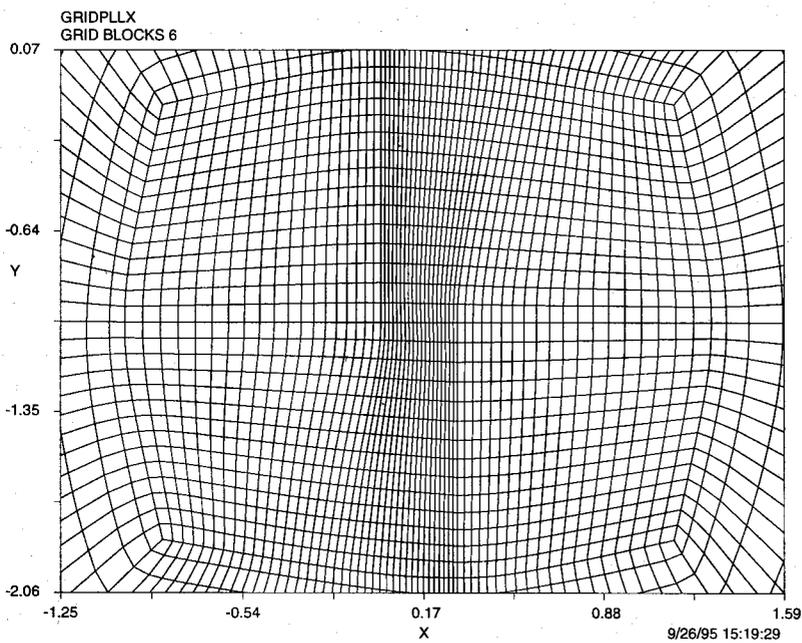


Bild 14 Ausschnitt des Rechengitters für K3R und K3L

## Literaturverzeichnis

- [1] *Schönung, B.*, Numerische Strömungsmechanik, Springer-Verlag 1990
- [2] *Gasch, R.*, Windkraftanlagen, B. G. Teubner Verlag Stuttgart 1993