

**Strömungsbeeinflussung  
bei Rotorblättern von Windenergieanlagen  
mit Schwerpunkt auf Grenzschichtabsaugung**

vorgelegt von

von Diplom-Ingenieurin

**Barbara Souza Heinzelmann**

aus Salvador, Brasilien

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme

der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der Ingenieurwissenschaften

– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. M. Möser

Berichter: Prof. Dr.-Ing. P. U. Thamsen

Berichter: Prof. Dr. rer. nat. A. P. Schaffarczyk

Berichter: Prof. em. Dr.-Ing. H. E. Siekmann

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 23. Juni 2011

Berlin 2011

D 83

## **Vorwort**

Die vorliegende Doktorarbeit entstand überwiegend im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Fluidsystemdynamik (FSD) - Strömungstechnik in Maschinen und Anlagen - der Technischen Universität Berlin.

Herrn Prof. P.U. Thamsen, Leiter des Fachgebietes Fluidsystemdynamik, gilt mein herzlicher Dank für die Möglichkeit bei ihm promoviert haben zu dürfen und für seine Anregungen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ich bedanke mich außerdem für die Möglichkeit Teil der FSD-Arbeitsgruppe gewesen zu sein und als „Multiplikatorin“ der Windenergie an der TU Berlin gewirkt zu haben.

Herzlichen Dank an Prof. A. P. Schaffarczyk für die bereitwillige Übernahme der zweiten Begutachtung sowie die interessierte, schnelle und kritische Durchsicht der vorliegenden Arbeit.

Bei Prof. H. E. Siekmann bedanke ich mich für die wichtige Unterstützung, auch über das Fachliche hinaus, und für die Übernahme der zusätzlichen Begutachtung der vorliegenden Arbeit.

Herrn Prof. M. Möser danke ich für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss und die Leitung der wissenschaftlichen Aussprache.

Den Herstellern REpower Systems und LM Wind Power, bei letzterem speziell dem damaligen leitenden Ingenieur Peter Fulgsang, gilt mein Dank für den Einblick in die industrielle Entwicklung und Optimierung von Rotorblättern im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet FSD.

Ein besonderes Dankeschön an die TU Delft, v.a. an Thanasis Barlas und Nando Timmer, für die Bereitstellung von Literatur und fachlicher Information.

Dem CFX-Supportteam in Berlin, v.a. Jan Hesse, gilt mein Dank für die fachlichen Hinweise und technische Betreuung, die zum Erfolg der numerischen Simulationen beigetragen haben.

Bei der Tischlerei der TU Berlin, v.a. Herrn Spielhagen und Herrn Jübelt, bedanke ich mich ganz herzlich für die professionelle und sorgfältige Fertigung des Profilmodells.

Hiermit bedanke ich mich auch bei den zahlreichen damaligen Studenten, heutigen Kollegen, die zur erfolgreichen Durchführung dieser Dissertation im Rahmen der von mir betreuten wissenschaftlichen Abschlussarbeiten beigetragen haben. Mein spezieller Dank gilt Bert Gollnick, Waldemar Traksel, Norman Peniak, Steffen Wenzel und Guido Weinzerl, die tatkräftige Beiträge zu dieser Arbeit geleistet haben.

Den Kollegen der TU Berlin danke ich für die gemeinsam erlebte Zeit. Ein spezielles und herzliches Dankeschön an meine Kollegen Sebastian Wulff, Frank Neuer und Robert Sorge.

Herzlichen Dank an Prof. Joachim Peinke, Leiter der Arbeitsgruppe CFSD des Fraunhofer-Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, für die wertvolle Unterstützung und motivierenden Impulse, die mir in der Abschlussphase der vorliegenden Arbeit sehr wichtig waren. Bei den KollegInnen der Forschungsgruppen IWES-CFSD, ForWind und TWiSt bedanke ich mich für die kollegiale und ermunternde Unterstützung vor der Verteidigung. Diese hat mir viel bedeutet.

Berlin, Juni 2011

Barbara Souza Heinzelmann

*Agradeço ao meu falecido querido pai Leon, à minha querida mãe Darcy e ao meu amado irmão Ricardo pelo apoio e incentivo durante os anos de estudo, trabalho e pesquisa na Alemanha.*

## Summary

This thesis is focused on flow control techniques for wind turbine rotors. Flow control enables aerodynamic, aeroelastic and aeroacoustic design optimization, which leads to, in most cases, an increase in efficiency and reduction of loads and noise emissions. An analysis of the flow on wind turbine blades, mostly based on numerical simulations, is presented and confirms the potential for optimization. This work includes an overview of the aim and functionality of flow control in the field of wind energy, along with a description of state-of-the-art technology and methods in research and industry, focused on passive techniques for aerodynamic design optimization. An experimental investigation into active boundary layer suction on a wind turbine airfoil forms the main body of the work.

Stalled and cross flows have been witnessed in the inboard area. The cross flow initiates in the hub and usually covers up to 30% of the span at the suction side of the blade. The geometrical forms of the blade-hub connection, spinner and nacelle, and Coriolis and centrifugal forces influence the development and expansion of this secondary flow. These well known 'radial effects' contribute to a stall delay and higher lift coefficients in the root area of wind turbine blades, in comparison to stationary two dimensional airfoil flows. However, investigations discussed in this thesis showed the possibility of a power improvement as a result of the radial limiting of this cross flow, for example through the use of the passive technique of boundary layer fences (also called stall barriers). In spite of the drag increase and lift loss in the immediate neighborhood of the fences, a slight rotor power increase was calculated for the design tip speed ratio.

Boundary layer suction, an active flow control method proven to increase the aerodynamic lift of airfoils, was chosen for further investigations on control of the stalled and cross flows. This technique is a suitable candidate for stabilizing the flow at the inboard area and optimizing wind turbine rotor efficiency in both design and off-design tip speed ratios.

With the aim of direct control of the stalled flow, 2D wind tunnel tests were conducted with discrete boundary layer suction. The selected airfoil was designed by the TU Delft to be placed at the root and middle sections of wind turbine blades. The results of the experiments were mostly positive, showing a reduction of the stalled area by surface flow visualizations. The suction peak grows wider and is intensified by applying boundary layer suction and a significant lift coefficient enhancement was measured.

According to investigations of flow control at the root area, however, the relative lift improvement is expected to be smaller in 3D than in the 2D case. Three-dimensional tests of suction systems at the inboard area are therefore important in further investigations to confirm that the expected improvement of rotor efficiency is significant. Further work may also show if the technique can be useful in sites with two significant wind velocity classes or with high turbulence intensity.

The results of this research encourage three-dimensional tests of a passive suction system at the root area coupled with exhaust at the tip blade region to explore the effects of centrifugal forces. By first estimation, the effective lowest suction coefficients considered in these experiments can be reached with this passive suction system solution on a megawatt wind turbine rotor.

## Kurzfassung

Der Inhalt dieser Arbeit ist die passive und aktive Strömungsbeeinflussung für Rotorblätter von Windenergieanlagen (WEA) mit Schwerpunkt auf aerodynamischer Optimierung. Die Strömungsbeeinflussung bietet die Möglichkeit der aerodynamischen, aeroelastischen und aeroakustischen Optimierung, die in den meisten Fällen einer Verbesserung der Gleitzahl und Reduzierung von Lasten und Schallemissionen entspricht. Die vorliegende Arbeit bietet eine Übersicht der Maßnahmen zur Strömungsbeeinflussung, die bei WEA bereits erprobt sind oder aktuell erforscht werden. Das Ziel und die physikalische Wirkungsweise werden erläutert, sowie der Stand der Forschung und die technischen Anwendungen wiedergegeben. Der Überblick konzentriert sich auf die passiven Maßnahmen. Schwerpunktmäßig wird die aktive Maßnahme der Grenzschichtabsaugung experimentell untersucht. Die Untersuchungen werden an einem dicken Profil durchgeführt, das für den Einsatz bei WEA speziell an der TU Delft ausgelegt wurde. Die Ergebnisse werden hier erläutert.

Eine auf numerischen Simulationen basierende Analyse der Umströmung von WEA-Rotorblättern wird dargestellt und weist auf Stellen mit Potential zur Strömungsoptimierung hin. Im Blattinnenbereich werden üblicherweise eine ausgeprägte abgelöste Strömung und eine Querströmung beobachtet. Diese erstrecken sich auf der Saugseite des Blattes bis zu 30% des Aussenradius beim Auslegungsbetriebspunkt. Die übliche zylindrische Form des Naben-Blatt-Anschlusses, die Wechselwirkung mit Gondel und Spinner, der Konturverlauf (Profiliefenverlauf) und die Verwindung des Blattes spielen bei der Entstehung und Ausbreitung der abgelösten Strömung eine entscheidende Rolle. Die mit dem Ablösungsgebiet verbundene Querströmung ergibt sich unter dem Einfluss der Rotation. Den dreidimensionalen Effekten im Nabenbereich werden eine Ablösungsverschiebung zur Blatthinterkante und eine Auftriebserhöhung zugeschrieben.

Eine spannweitige Begrenzung dieser Querströmung bspw. durch die Anwendung von Grenzschichtzäunen ergibt eine leichte Verbesserung des aerodynamischen Rotorleistungsbeiwertes nach den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen. Trotz Widerstandszuwachses und Auftriebseinbuße in unmittelbarer Nähe der Grenzschichtzäune wird eine leichte Verbesserung des Rotorleistungsbeiwertes für die Auslegungsschnellaufzahl berechnet.

Die aktive Maßnahme der Absaugung der Grenzschicht ist eine erprobte Technik zur Verbesserung des aerodynamischen Auftriebes und eine geeignete Möglichkeit zur Stabilisierung der Strömung und Optimierung des Rotorleistungsbeiwertes für verschiedene Betriebspunkte. Mit dem Ziel der direkten Ablösungskontrolle werden zweidimensionale Modellversuche im Windkanal mit diskreter Grenzschichtabsaugung bei einem dicken Profil, das häufig Einsatz in Naben- und Mittelblattbereichen von Mega- und Multimegawatt-WEA findet, durchgeführt. Die Absaugöffnungen werden bei 65% der Profiltiefe platziert. Die Ergebnisse sind überwiegend positiv und zeigen bei Farbanstrichversuchen eine Reduktion bzw. Vermeidung der Ablösung. Eine Auftriebsverbesserung wird aufgrund von Druckmessungen entlang des Profils errechnet.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die relativen Verbesserungen des aerodynamischen Auftriebes, die im 2D-Fall ermittelt werden, im 3D-Fall wahrscheinlich kleiner ausfallen werden, da im 3D-Fall im Nabenbereich aufgrund der Grenzschichtabschleuderung und des Gittereffektes bereits höhere Auftriebsbeiwerte auftreten. Dreidimensionale Versuche in Nachfolgearbeiten sollten daher zeigen, inwieweit der Einsatz der Grenzschichtabsaugung hinsichtlich der Leistungssteigerung einen signifikanten Effekt ergibt. Weitere Untersuchungen sollten klären, ob die Maßnahme der Grenzschichtabsaugung effektiv bei Standorten mit zwei signifikanten Windgeschwindigkeitsklassen oder mit hohem Turbulenzgrad ist. Bei den 3D-Versuchen wird empfohlen, die passive Lösung mit Absaugstelle im Nabenbereich und Auslassstelle im Blattspitzenbereich zu wählen, da nach ersten Abschätzungen die niedrigsten effizienten Absaugraten mit dem passiven System erreicht werden können.

## Nomenklatur

$a, a'$	Induktionsfaktoren
$A$	Auftriebskraft
$b$	Schlitztiefe bei Schlitzabsaugung
$c$	Profiltiefe
$c_A$	Auftriebsbeiwert
$c_p$	Druckbeiwert
$c_{PR}$	Rotorleistungsbeiwert
$c_Q$	Absaugrate
$c_S$	Schubbeiwert
$c_W$	Widerstandsbeiwert
$F_S$	Staudruckkraft
$F$	Referenzfläche
$l$	Schlitzlänge bei Grenzschichtabsaugung
$N$	Normalkraft
$p_x$	lokaler statischer Druck an der Profiloberfläche in der Messstelle
$p_\infty$	Umgebungsdruck, Druck der ungestörten Strömung
$P_R$	Rotorleistung
$P_W$	Windleistung
$r$	lokaler Radius
$R$	Rotorradius
$S$	Schubkraft
$T$	Tangentialkraft
$U$	Umfangskraft
$u(r)$	lokale Umfangsgeschwindigkeit
$u_w$	Absauggeschwindigkeit
$u_\infty$	Anströmgeschwindigkeit am Profil
$u_1$	Windgeschwindigkeit weit vor der Rotorebene
$u_2$	Windgeschwindigkeit in der Rotorebene
$\dot{V}$	Absaugvolumenstrom
$W$	Widerstandskraft

## Griechische Nomenklatur

$\alpha$	Anstellwinkel
$\Gamma$	Zirkulation
$\delta_2$	Impulsverlustdicke
$\varepsilon$	Gleitzahl
$\lambda$	Schnellaufzahl
$\nu$	kinematische Viskosität
$\rho$	Luftdichte
$\sigma$	Theoretische Absaugrate
$\varphi$	Anströmwinkel im dreidimensionalen Fall
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ziel</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Windenergieanlagen-Technologie</b> .....	<b>3</b>
3.1	Stand der Technik der Anlagenleistung .....	3
3.2	Technische Merkmale.....	3
3.3	Leistungsregelungskonzepte .....	5
3.4	Zeitliche Entwicklung und Stand der Technik der Anlagenkonzepte .....	7
<b>4</b>	<b>Aerodynamisches Design und Umströmung eines Rotorblattes</b> .....	<b>9</b>
4.1	Einleitende Bemerkung.....	9
4.2	Grundbegriffe .....	9
4.2.1	Rotorleistungsbeiwert.....	9
4.2.2	Aerodynamische Kräfte am Profil.....	10
4.2.3	Leistung eines Blattelementes .....	11
4.2.4	Schubbeiwerte .....	11
4.2.5	Induktionsfaktoren.....	12
4.2.6	Rotorblattbereiche.....	12
4.3	Aerodynamischer Entwurf eines Rotorblattes.....	15
4.3.1	Vorgehensweise.....	15
4.3.2	Übliche aerodynamische Profile.....	15
4.3.3	Korrektur der zweidimensionalen Profilpolaren.....	19
4.4	Umströmung des Rotorblattes .....	19
4.4.1	Einflussfaktoren.....	19
4.4.2	Großskalige Anströmbedingungen.....	20
4.4.3	Strömung im Nabenbereich .....	20
4.4.4	Umgestaltung des Nabenbereiches .....	23
4.4.5	Strömung im mittleren Blattbereich .....	24
4.4.6	Strömung an der Blattspitze.....	24
4.4.7	Optimierung der Blattspitzenform.....	24
4.4.8	Blatt-Turm-Interaktion .....	25
<b>5</b>	<b>Strömungsbeeinflussung an Rotorblättern von WEA</b> .....	<b>27</b>
5.1	Definition, Ziele und Klassifizierung .....	27
5.2	Strömungsbeeinflussung bei Windenergieanlagen.....	28
5.3	Passive Strömungsbeeinflussung bei WEA.....	30
5.3.1	Winglet .....	30
5.3.2	Gurney-Flap .....	33
5.3.3	Turbulator.....	34
5.3.4	Vortex-Generator .....	35
5.3.5	Grenzschichtzaun .....	38
5.3.6	Spoiler .....	42
5.3.7	Rückstromklappe .....	44
5.4	Aktive Strömungsbeeinflussung bei WEA.....	46

5.4.1	Aktive Wölbungsänderung und Hinterkanten-Konzepte .....	46
5.4.2	Aktive Maßnahmen zur Grenzschichtbeeinflussung .....	49
<b>6</b>	<b>Untersuchungen zur Grenzschichtabsaugung .....</b>	<b>51</b>
6.1	Einleitung .....	51
6.2	Stand der Technik .....	52
6.3	Grundlagen .....	53
6.3.1	Definition .....	53
6.3.2	Physikalische Effekte und Ziele .....	53
6.3.3	Lage, Art und geometrische Form der Absaugöffnungen .....	54
6.3.4	Absaugvolumenstrom und dimensionslose Kennzahlen .....	55
6.4	Vorgehensweise der Untersuchungen .....	57
6.4.1	Experimentelle Untersuchungen .....	57
6.4.2	Numerische Untersuchungen mit XFOIL .....	57
6.4.3	Numerische Untersuchungen mit der CFD Software CFX 11.0 .....	58
6.5	Versuchsaufbau und experimentelle Randbedingungen .....	58
6.5.1	Beschreibung des Windkanals .....	58
6.5.2	Aerodynamisches Profil .....	58
6.5.3	Modellbau, Modelldimensionen, Deckelvarianten und Absauganlage .....	60
6.5.4	Reynolds-Zahl .....	62
6.5.5	Zick-Zack-Band .....	65
6.5.6	Untersucher Anstellwinkelbereich .....	65
6.5.7	Messtechnik zur Bewertung der Grenzschichtabsaugung .....	65
6.6	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse .....	66
6.6.1	Messergebnisse zu den Referenzfällen und Vergleich mit XFOIL-Ergebnissen .....	66
6.6.2	Ergebnisse der Strömungsvisualisierung und Druckmessungen mit Absaugung .....	72
6.7	Schlussfolgerungen .....	81
6.8	Ausblick .....	82
6.8.1	Anmerkungen zur passiven Grenzschichtabsaugung bei WEA .....	82
6.8.2	Empfehlungen für Nachfolgeuntersuchungen .....	84
<b>7</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>86</b>
7.1	CFD Untersuchungen von Rotoren von WEA .....	86
7.1.1	Einleitende Bemerkung .....	86
7.1.2	Eingesetzte Software .....	86
7.1.3	Numerische Anlagenmodelle .....	86
7.1.4	Gittergenerierung und Strömungsgebiete .....	87
7.1.5	Randbedingungen der numerischen Simulationen .....	88
7.1.6	Validierung .....	90
7.2	CFD Untersuchungen der Profilmströmung mit Grenzschichtabsaugung .....	90
7.2.1	Ziel .....	90
7.2.2	Modellierung .....	92
7.2.3	Validierung .....	92
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>93</b>

## 1 Einleitung

Weltweit liegt gegenwärtig die Hauptanwendung von Windenergieanlagen (WEA) auf der Umwandlung der Windenergie in elektrische Energie zur Einspeisung in das Versorgungsnetz. Die Anlagen, die für diese Anwendung ausgelegt sind, die sogenannten netzgekoppelten WEA, spielen auf dem kommerziellen Weltmarkt und bei der Forschung die überwiegende Rolle.

Die Steigerung des Wirkungsgrades und der Verfügbarkeit der Anlagen, sowie die Reduzierung der Schallemissionen und der auf die Anlagen wirkenden strukturellen Belastungen sind wichtige und aktuelle Aufgaben der Industrie und Forschungseinrichtungen bei der kontinuierlichen technologischen Entwicklung der Windenergieanlagen.

Der Einsatz von passiven und aktiven strömungsbeeinflussenden Maßnahmen an Rotorblättern bietet die Möglichkeit, an gezielten Stellen des Rotorblattes aerodynamische, aeroelastische und aeroakustische Optimierungen zu erreichen. Bei kommerziell betriebenen WEA werden bereits passive Maßnahmen der Strömungsbeeinflussung (SB) an Rotorblättern am Beispiel von Vortex-Generatoren, Zick-Zack-Bändern, Grenzschichtzäunen und Spoilern eingesetzt. Die Nutzung solcher Strömungselemente kam zuerst durch Eigeninitiative des Betreibers zustande und zwar vorwiegend als Nachrüstung zum Zweck nachträglicher Leistungsoptimierung. Heute findet die Möglichkeit der Strömungsbeeinflussung zur Leistungssteigerung, Lastenkontrolle und Schallreduzierung bei Rotorblattherstellern und Forschungseinrichtungen enormes Interesse. Dabei ist ein Trend zur Nutzung der aktiven Strömungsbeeinflussungssysteme zweifelsohne festzustellen.

International wird eine Konzentration der Forschung zum Thema Strömungsbeeinflussung bei WEA bei einigen wenigen Einrichtungen beobachtet. Die Projekte umfassen umfangreiche experimentelle Untersuchungen in Windkanälen gekoppelt mit numerischen Strömungssimulationen. Beispiele sind das laufende Projekt „UpWind“ [1], das an „Smart Rotor Blades“ (s. Kap. 5.4) einen Schwerpunkt setzt, sowie die Projekte „AdapWing“ [2] und „Know-Blade“ [3]. In Deutschland werden die unterschiedlichen Maßnahmen zur Strömungsbeeinflussung durch verschiedene Firmen und Einrichtungen vereinzelt untersucht. Angaben zum realen Leistungsgewinn, Lasten- und Schallreduktion durch Nutzung von Strömungselementen sind häufig, wenn die Untersuchungen bei den Herstellern stattfinden, nicht öffentlich zugänglich.

Ein intensiver Wissensaustausch zwischen Forschungsinstitutionen und Anlagenherstellern wäre zu begrüßen. V.a. die aktiven Möglichkeiten der Strömungsbeeinflussung verlangen intensive Forschung in der Werkstoff-, Regelungs- und Messtechnik und bzgl. der Integration in das strukturelle Rotorblatt-Design die enge Zusammenarbeit mit Rotorblattherstellern. Dafür ist von enormer Bedeutung, sich einen Überblick der Möglichkeiten der Strömungsbeeinflussung zu verschaffen, die bei WEA bereits erprobt sind, bei Forschungseinrichtungen erforscht werden und einen effektiven Einsatz bei WEA versprechen. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag in dieser Richtung darstellen.

## **2 Ziel**

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Übersicht der Möglichkeiten der Strömungsbeeinflussung bei Rotorblättern von Windenergieanlagen. Die physikalische Wirkungsweise verschiedener Strömungselemente und Strömungsbeeinflussungssysteme und der Stand der Forschung und Erfahrungen werden wiedergegeben.

Es wird eine Technik der Strömungsoptimierung zur Erreichung eines höheren Rotorwirkungsgrades ausgewählt. Die ausgewählte Technik entspricht der aktiven Strömungsbeeinflussungsmaßnahme Grenzschichtabsaugung. Mittels zweidimensionaler Modellversuche im Windkanal und numerischer Strömungsberechnung soll in der vorliegenden Arbeit ein Beitrag zur Absaugtechnik bei einem für die Windenergieanlagen ausgelegten Nabenprofil geleistet werden.

### 3 Grundlagen der Windenergieanlagen-Technologie

#### 3.1 Stand der Technik der Anlagenleistung

Die Nennleistung entspricht der maximalen erreichbaren Anlagenleistung und wird bei der sogenannten Nennwindgeschwindigkeit erreicht. Die WEA werden bzgl. der Nennleistung nach [4] in sieben Leistungsklassen unterteilt. Die fünf größten Leistungsklassen werden in dieser Arbeit als 250 kW-, 600 kW-, Megawatt-, Multimegawatt- und Offshore-Klasse bezeichnet (s. Tabelle 3-1).

**Tabelle 3-1. Bezeichnung der Leistungsklassen**

Leistungsbereich nach [4]	Verwendete Benennung
von 130,1 bis 310 kW	250 kW-Klasse
von 310,1 bis 749,9 kW	600 kW-Klasse
von 750 bis 1.499,9 kW	Megawattklasse
von 1.500 bis 3.100 kW	Multimegawattklasse
Über 3.100 kW	Offshore-Klasse

Die kleinen netzgekoppelten WEA der 250 kW- und der 600 kW-Klassen sind nicht mehr marktrelevant [5]. Auf dem heutigen Markt sind die Megawatt- und Multimegawattklassen mit Rotordurchmessern zwischen 60 und 90 m vorherrschend [6]. Diese beiden Klassen entsprechen Ende 2009 in Deutschland mit 13.344 WEA 63% der installierten Anlagen und sind zu diesem Zeitpunkt mit einer installierten Leistung von über 20 GW vertreten [4].

Derzeit werden die leistungsfähigsten kommerziellen WEA mit Nennleistungen im Bereich von 5 MW und Rotordurchmessern von bis zu 130 m gebaut. Die größte Leistungsklasse von über 3.100 kW, auch wenn sie Offshore-Klasse genannt wird, wird bisher hauptsächlich auf dem Festland aufgestellt und ist Ende 2009 mit 71 WEA und einer installierten Leistung von 334 MW in Deutschland vertreten. Dies entspricht 0,3% der Anzahl der installierten Anlagen hierzulande und 1,7% des potenziellen jährlichen Windenergieertrages [4]. Aktuell sind in Deutschland lediglich drei Nearshore-WEA mit einer gesamten Nennleistung von 12 MW und 12 WEA mit insgesamt 60 MW Nennleistung in Offshore-Betrieb im Testfeld „alpha ventus“.

#### 3.2 Technische Merkmale

Unabhängig von der Leistungsklasse kann bei den netzgekoppelten Anlagen eine Standardbauform (s. Bild 3-1) erkannt werden, welche die unten aufgelisteten konstruktiven Merkmale beinhaltet. Die Anlagen

- sind Auftriebs- und Schnellläufer,
- werden luvseitig angeströmt,
- besitzen eine horizontale Triebstrangachse,
- drei Rotorblätter und

- ein aktives Windnachführungssystem.

Die Benennung Auftriebsläufer für diese Anlagen beruht auf der Tatsache, dass die aerodynamische Auftriebskraft für die Umwandlung der kinetischen Energie des Windes in Rotationsenergie des Rotors verantwortlich ist [7].

Die Schnelllaufzahl  $\lambda$  ist definiert als das Verhältnis von Umfangsgeschwindigkeit  $u(R)$  der Blattspitze zur Windgeschwindigkeit  $u_1$  weit vor der Rotorebene:

$$\lambda = \frac{u(R)}{u_1} \quad . \quad (3-1)$$

Bei aktuellen an das elektrische Energieversorgungsnetz gekoppelten WEA der Mega- und Multimegawattklasse mit drei Rotorblättern wird im Auslegungsbetriebspunkt der Anlagen üblicherweise eine Schnelllaufzahl  $\lambda = 6 \dots 9$  erreicht. Diese Anlagen werden in der Fachliteratur als Schnellläufer bezeichnet.

Abgesehen von Standardbauform-Merkmalen unterscheiden sich die WEA durch zahlreiche weitere technische Merkmale. Die wichtigsten werden in der Tabelle 3-2 zusammengefasst. Die Möglichkeiten der aerodynamischen Leistungsregelung (Stall-, Pitch- und Aktiv-Stall-Regelungen) werden im nächsten Kapitel 3.3 erläutert. Zu weiteren branchenüblichen Begriffen der Tabelle 3-2 sei auf die Grundlagenliteratur und fachspezifischen Magazine [4, 7, 8] verwiesen.



**Bild 3-1. Standardbauform einer WEA**

**Tabelle 3-2. Übersicht der Unterscheidungsmerkmale von WEA**

<b>Unterscheidungsmerkmale</b>	<b>Lösungsprinzipien</b>
<b>Aerodynamische Leistungsregelung</b>	Stall Aktiv-Stall Pitch
<b>Triebstrangaufbau</b>	aufgelöst teilintegriert integriert
<b>Betriebsregelung</b>	fester oder gestufter Drehzahlbetrieb drehzahlvariabler Betrieb
<b>Drehzahlübersetzung Rotor-Generator</b>	mit Getriebe 1:1 durch einen getriebelosen Aufbau
<b>Generatorart</b>	Asynchrongenerator Doppeltgespeister Asynchrongenerator Synchrongenerator

### **3.3 Leistungsregelungskonzepte**

Steigt beim Anlagenbetrieb die Windgeschwindigkeit über die Nennwindgeschwindigkeit hinaus, wird eine Regelung erforderlich. Drei aerodynamische Konzepte dienen der Begrenzung bzw. Regelung der Rotorleistung: Stall-, Aktiv-Stall- und Pitch-Konzepte. Zum besseren Verständnis der Pitch-Regelung wird das aerodynamische Stall-Konzept zuerst erläutert, auch wenn dieses nicht mehr markrelevant ist.

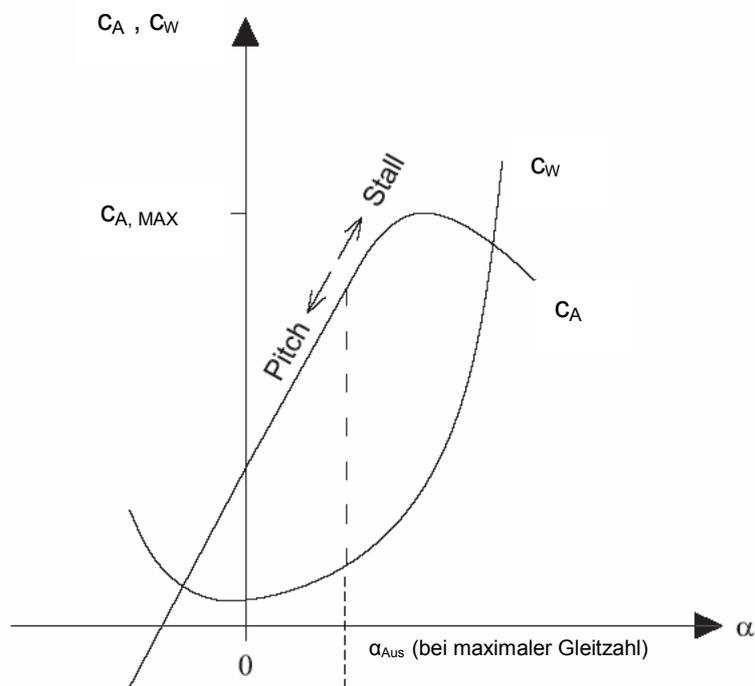
Bei den Stall-WEA erfolgt eine Leistungsbegrenzung aufgrund eines sich aus dem Strömungsabriss (stall) ergebenden Auftriebseinbruchs. Die Blattwinkelstellung ist starr. Die Anlage wird unabhängig von der vorherrschenden Windgeschwindigkeit bei einer festen Drehzahl betrieben, um die Umfangsgeschwindigkeiten konstant zu halten. Bei Überschreitung der Nennwindgeschwindigkeit steigen die Anstellwinkel für die unterschiedlichen Profile entlang des Blattes über die jeweiligen kritischen Winkel und maximalen Auftriebe hinaus. Ein Strömungsabriss kommt zustande, der Auftrieb sinkt und die Rotorleistung wird dadurch begrenzt. Bei der Variante Aktiv-Stall wird durch die Verstellung des Rotorblattes der Anstellwinkel aktiv erhöht und der Strömungsabriss hervorgerufen.

Die Pitch-Regelung oder Blattwinkelverstellung zum Zweck der Leistungsbegrenzung bedeutet eine Verstellung des Blattes zu niedrigen Anstellwinkeln. Auch hier ist ein Absinken des Rotorauftriebes bei zunehmenden Windgeschwindigkeiten die Folge. Auf vorübergehende Windgeschwindigkeitsvariationen reagieren die überwiegend drehzahlvariablen Pitch-Anlagen mit einer Änderung der Rotordrehzahl, da die Pitch-Regelung ursprünglich nicht für sehr kurzfristige Änderungen der Windgeschwindigkeit vorgesehen war. Die Pitchverstellung erlaubt eine schlankere und leichtere Blattkonstruktion und Entlastung der mechanischen Komponenten im Vergleich zum Stall-Konzept.

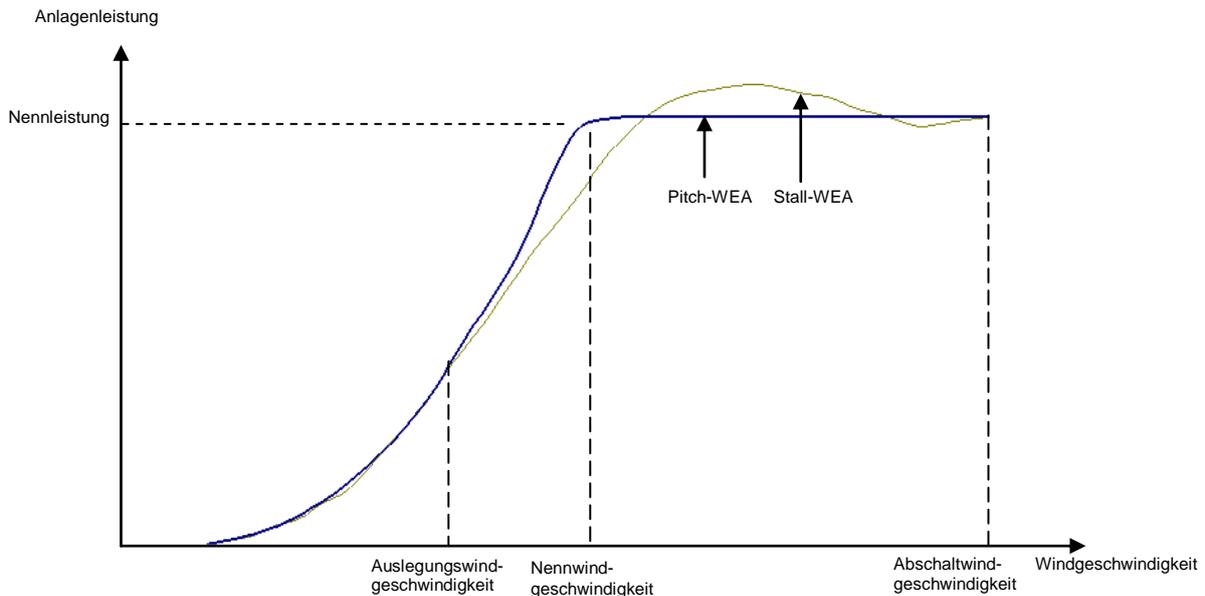
Bei den Aktiv-Stall- und Pitch-Konzepten verfügen die drei Blätter gewöhnlich über einen unabhängigen Verstellmechanismus, der üblicherweise elektromechanisch durch elektrische Motoren und Zahnkränze erfolgt. Stand der Technik ist, dass die drei Blätter trotz der Einzel-Pitchverstellung stets synchron und um einen einheitlichen Pitch-Winkel verstellt werden. Nach [9] wird die individuelle Pitch-Verstellung zum Zweck aeroelastischer Optimierung bereits bei einigen WEA eingesetzt. [10] bietet eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse von Untersuchungen zur individuellen Pitch-Verstellung.

Das Bild 3-2 erläutert die Richtung der Stall- und Pitch-Regelungen anhand einer qualitativen Darstellung eines aufgelösten Profilpolaragrammes. Bei einem aufgelösten Profilpolaragramm werden Auftriebsbeiwerte  $c_A$  und Widerstandbeiwerte  $c_W$  über die Anstellwinkel aufgetragen. Im Bild wird der Anstellwinkel  $\alpha_{Aus}$  der maximalen Gleitzahl  $\epsilon$ , d.h. des höchsten Verhältnisses zwischen Auftrieb- und Widerstandskraft, gezeigt.

Das Bild 3-3 zeigt den qualitativen Verlauf der Leistungskurven von WEA über unterschiedliche Windgeschwindigkeiten für die Stall- und Pitch-Varianten. Die Überschreitung der Nennleistung bei Stall-Anlagen aufgrund des unbeeinflussbaren Auftretens des Strömungsabrisses ist nicht auszuschließen und wird im Kurvenverlauf berücksichtigt.



**Bild 3-2. Qualitative Darstellung einer aufgelösten Profilpolare mit Hinweis auf die Stall- und Pitch-Verstellungsrichtungen**



**Bild 3-3. Qualitative Gegenüberstellung der Leistungskurven einer Stall- und einer Pitch-WEA über der Windgeschwindigkeit**

### 3.4 Zeitliche Entwicklung und Stand der Technik der Anlagenkonzepte

Wie die technischen Merkmale der Tabelle 3-2 zu einem Anlagenkonzept kombiniert werden, steht in direktem Zusammenhang zu dem Zeitpunkt der Markteinführung der Anlage, der Leistungsklasse und den Herstellern. Der kurze Marktzyklus der Leistungsklassen innerhalb der letzten 20 Jahre [11] entspricht auch einem raschen Marktzyklus für viele der entstandenen technischen Konzepte.

Ein grundlegendes Konzept der netzgekoppelten WEA, das sogenannte Dänische Konzept, ist durch die Stall-Leistungsbegrenzung, feste Drehzahl und den Einsatz von Getriebe und Asynchrongenerator charakterisiert. Der Betrieb der Anlage mit konstanter Rotordrehzahl lässt sich durch den Einsatz eines direkten Netzanschlusses realisieren. Überwiegend werden für einen direkten Netzanschluss Asynchrongeneratoren (ASG) und polumschaltbare ASG bevorzugt. Daraus ergibt sich, dass der Einsatz eines Getriebes erforderlich wird. Dieses drehzahlfeste und stallgeregelte Anlagenkonzept war überwiegend in den 80er und 90er Jahren in den 250kW- und 600kW-Klassen erfolgreich [12]. Auch drehzahlfeste Pitch-Varianten wurden in diesen beiden Leistungsklassen gefertigt, sowie drehzahlfeste Aktiv-Stall-Varianten in den Megawatt- und Multimegawattklassen.

Der Anteil an neuinstallierten WEA mit konstanter Rotordrehzahl hat allerdings seit der Markteinführung der Megawattklasse kontinuierlich abgenommen. Parallel dazu wird ab 1993 ein kontinuierlicher Zuwachs des Anteils der drehzahlvariablen WEA und der Pitch-

Leistungsregelung unter den kommerziell angebotenen Anlagentypen und aufgestellten WEA beobachtet. Werden die im ersten Halbjahr 2009 in Deutschland aufgestellten Anlagen betrachtet, wurde nach dem DEWI Magazin [4] eine einzelne drehzahlfixe Anlage im Vergleich zu 400 drehzahlvariablen WEA aufgestellt. Die Drehzahlvariabilität weist optimale Anströmverhältnisse am Rotorblatt im Teillastbetrieb und demzufolge ein besseres Teillastverhalten auf [7, 13].

Unterschiedliche Konzepte mit variabler Drehzahl werden heute von mehreren Herstellern in der 600 kW- bis zur Offshore-Leistungsklasse angeboten, die nicht ausschließlich aber überwiegend mit dem Pitch-Leistungsregelungsprinzip kombiniert sind. Die Varianten mit Asynchron- und doppeltgespeisten Asynchrongeneratoren benötigen ein Getriebe zur Drehzahlübersetzung, während die Varianten mit Synchrongeneratoren auch getriebeles gebaut werden können.

Bei der Auswahl der Triebstrangvariante v.a. bei hohen Leistungsklassen spielen die schwer kombinierbaren Faktoren Wartungszugänglichkeit und das sich ergebende Gewicht des Maschinenhauses eine wichtige Rolle. Aus einer Recherche der Marktübersichten ab 1989 bis 2009 und aus technischen Informationen der Hersteller lässt sich zusammenfassen, dass für die Triebstrangvariante, Generatorenart und Getriebeart in keiner Leistungsklasse eine klare Entwicklungstendenz feststellbar ist [14, 15]. Fast alle entstandenen Anlagenkonzepte sind mit Marktrelevanz weiterhin vertreten.

Zusammenfassend sind die in Deutschland aktuell angebotenen und neuinstallierten WEA neben der Standardbauform (s. Kap. 3.2), maßgebend Anlagen der Megawatt- und Multi-megawattklassen mit folgenden technischen Merkmalen:

- Pitch-Leistungsregelung und
- drehzahlvariabler Betrieb.

## 4 Aerodynamisches Design und Umströmung eines Rotorblattes

### 4.1 Einleitende Bemerkung

In dem vorliegenden Kapitel werden die Grundbegriffe der Aerodynamik einer WEA eingeführt. Anschließend wird ein Überblick des Aufbaus und des aerodynamischen Entwurfes eines Rotorblattes präsentiert. Auf diesem Wissen aufbauend wird das charakteristische aerodynamische Verhalten eines Rotorblattes von WEA erläutert, das dem aktuellen technischen Stand entspricht. Das übermittelte Wissen zum Aufbau eines Rotorblattes und zur Aerodynamik einer WEA dient der Identifizierung von Optimierungspotentialen.

### 4.2 Grundbegriffe

#### 4.2.1 Rotorleistungsbeiwert

In der Rotorebene findet die Energieumwandlung statt, die eine WEA als solche charakterisiert. Der Wirkungsgrad der Umwandlung der kinetischen Energie der Luft in Rotationsenergie der Rotorwelle wird Rotorleistungsbeiwert  $c_{PR}$  genannt [13]. Die Rotorleistung  $P_R$  wird mit der Windleistung  $P_W$ , der Leistung der ungestörten Luftströmung, verglichen:

$$c_{PR} = \frac{P_R}{P_W} \quad (4-1)$$

mit

$$P_W = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot u_1^3 \quad (4-2)$$

als Funktion des Rotorradius  $R$ , der Luftdichte  $\rho$  und der Windgeschwindigkeit  $u_1$  weit vor der Rotorebene.

Der maximale Rotorleistungsbeiwert wird im Auslegungspunkt bei der Auslegungsschnelllaufzahl (s. Gl. 3-1), erreicht. Diesem entspricht der optimale Betriebspunkt einer WEA. Im sogenannten Off-Design-Bereich, bei niedrigeren oder höheren Windgeschwindigkeiten als der Auslegungswindgeschwindigkeit, d.h. auch in Betriebspunkten der Nennleistung (s. Kap. 3.1), fällt der Rotorleistungsbeiwert.

Basierend auf den Energie-, Impuls-, und Massenerhaltungsgesetzen für eine eindimensional durchgeströmte Stromröhre, wobei der Rotor als Kontrollfläche betrachtet wird, lässt sich ein idealer Rotorleistungsbeiwert  $c_{PR}$  im Auslegungspunkt errechnen [7, 16, 17]. Dieser maximale Wert von 0,59 im Auslegungspunkt ist als Betz-Obergrenze (Betz-Limit) bekannt. Dabei werden die aerodynamischen Verluste aufgrund des Profilwiderstandes, der Spitzenumströmung und des Dralls vernachlässigt. Reale maximale Rotorleistungsbeiwerte  $c_{PR}$  von 0,48..0,51 werden bei marktüblichen WEA aktuell erreicht [5, 18].

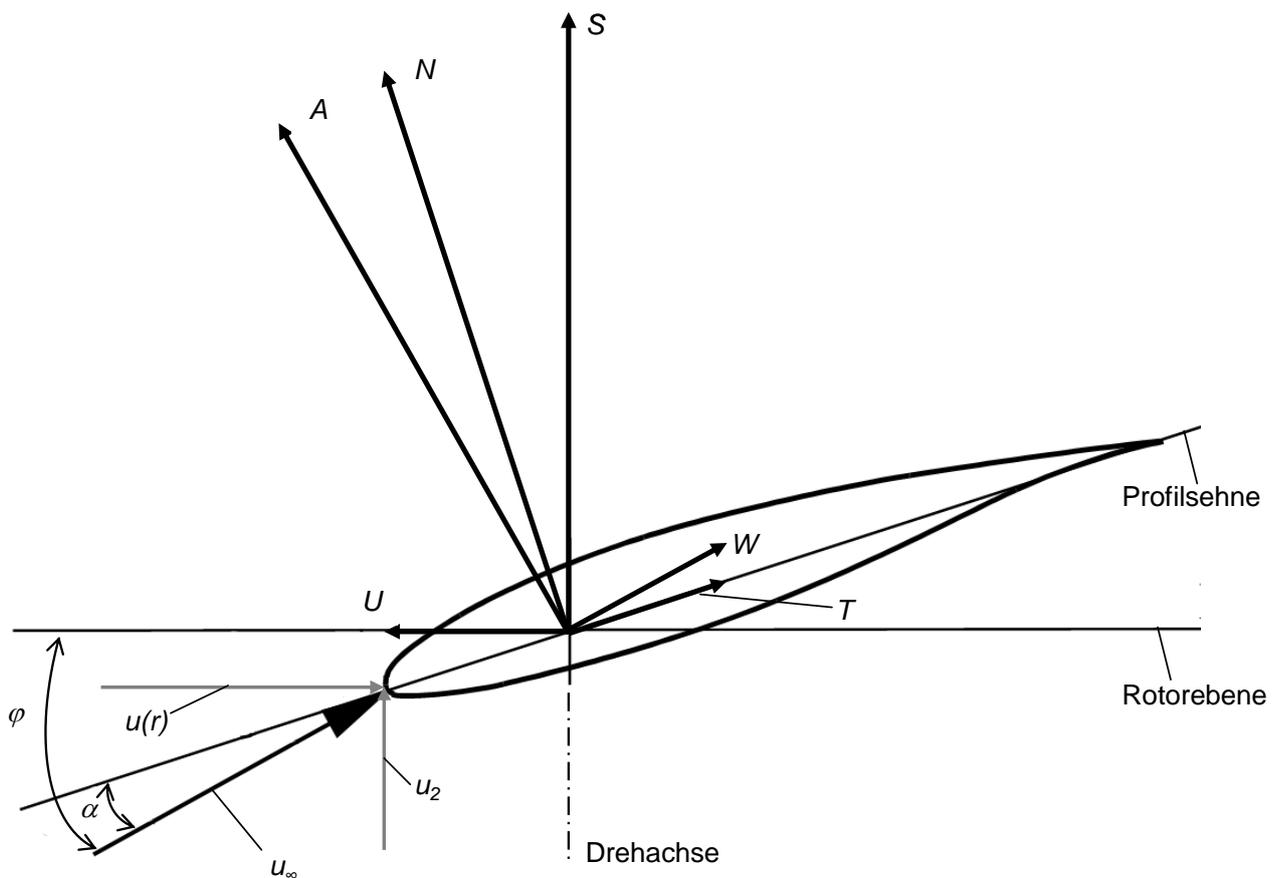
### 4.2.2 Aerodynamische Kräfte am Profil

Zwischen der Richtung der Anströmgeschwindigkeit  $u_\infty$  und der Profilsehne bzw. der Rotorebene wird der Anstellwinkel  $\alpha$  bzw. Anströmwinkel  $\varphi$  gebildet (s. Bild 4-1). Der Anströmwinkel  $\varphi$  beinhaltet den Anstellwinkel  $\alpha$  und den Blatteinstellwinkel, d.h. den Pitch- und Bauwinkel zusammen. Die Windgeschwindigkeit in der Rotorebene wird als  $u_2$  und die lokale Umfangsgeschwindigkeit als  $u(r)$  im Bild 4-1 bezeichnet.

Bei der zweidimensionalen Umströmung eines aerodynamischen Profils ergeben sich nach Definition eine Kraft parallel zur Richtung der Anströmgeschwindigkeit  $u_\infty$ , die Widerstandskraft  $W$  und eine Kraft quer dazu, die Auftriebskraft  $A$ . Beide bilden sich aus der vektoriellen Summe von der Tangentialkraft  $T$  und der Normalkraft  $N$  im Bezug auf die Profilsehne [19]:

$$A = N \cdot \cos \alpha - T \cdot \sin \alpha \tag{4-3}$$

$$W = N \cdot \sin \alpha + T \cdot \cos \alpha \tag{4-4}$$



**Bild 4-1. Qualitative Darstellung der auf ein Profil wirkenden aerodynamischen Kräfte**

In Anlehnung daran werden für einen WEA-Rotor die Schubkraft  $S$  quer zur Rotorebene und die Umfangskraft  $U$  in der Rotorebene definiert [7]:

$$S = A \cdot \cos \varphi + W \cdot \sin \varphi \quad (4-5)$$

$$U = A \cdot \sin \varphi - W \cdot \cos \varphi \quad (4-6)$$

Sind außerdem für ein aerodynamisches Profil die Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte  $c_A$  und  $c_W$  bekannt, lassen sich für eine Referenzfläche  $F$ , auf die die aerodynamischen Kräfte wirken, Auftriebskraft  $A$  und Widerstandskraft  $W$  berechnen [7, 19]:

$$A = \frac{\rho}{2} \cdot u_\infty^2 \cdot c_A(\alpha) \cdot F \quad (4-7)$$

$$W = \frac{\rho}{2} \cdot u_\infty^2 \cdot c_W(\alpha) \cdot F \quad (4-8)$$

Für die Berechnung

- des Anstellwinkels  $\alpha$ ,
- der Windgeschwindigkeit in der Rotorebene  $u_2$  und
- der sich ergebenden Anströmgeschwindigkeit  $u_\infty$

im Auslegungsfall, in Off-Design-Betriebspunkten, sowie unter Berücksichtigung der aerodynamischen Verluste wird an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen [7, 13, 16, 20].

#### 4.2.3 Leistung eines Blattelementes

Nach der Tragflügeltheorie unter Berücksichtigung des Profilverlustes und Vernachlässigung des Drallverlustes, ergibt sich für ein Blattelement mit der Fläche:

$$dF = c \cdot dr \quad (4-9)$$

entsprechend Profiltiefe  $c$  und Elementbreite  $dr$ , die Berechnung der Rotorleistung nach Gl. 4-10 (wie Gl. 5.40 in [7]). Die Rotorleistung ergibt sich aus dem Produkt von Rotordrehmoment  $M$  und Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ . Das Rotordrehmoment ist wiederum ein Produkt aus Umfangskraft  $U$  und Hebelarm. Mit Einbeziehung der Gln. 4-7 bis 4-9, ergibt sich:

$$dP_R = \frac{\rho}{2} \cdot u_\infty^2 \cdot \omega \cdot c \cdot r \cdot dr \cdot [c_A(\alpha) \cdot \sin \varphi - c_W(\alpha) \cdot \cos \varphi] \quad (4-10)$$

als Rotorleistung eines Blattelementes. Daraus sind die Eingangsgrößen, Ziele einer Beeinflussung der Strömung zur Verbesserung der Leistung, zu erkennen (s. Kap. 5.2).

#### 4.2.4 Schubbeiwerte

In Anlehnung an die Berechnung des Rotorleistungsbeiwertes wird der Schubbeiwert  $c_s$  als Funktion der Schubkraft  $S$  und der Staudruckkraft  $F_S$  nach [7] wie folgt definiert:

$$c_s = \frac{S}{F_S} \quad (4-11)$$

mit

$$F_S = \frac{\rho}{2} \cdot u_1^2 \cdot \pi \cdot R^2 \quad (4-12)$$

#### 4.2.5 Induktionsfaktoren

In der internationalen Literatur werden häufig der axiale Induktionsfaktor  $a$  und der radiale Induktionsfaktor  $a'$  betrachtet [16, 20, 21]. Diese Faktoren drücken durch die axiale bzw. radiale Verzögerung der Luftströmung in der Rotorebene den Wirkungsgrad des Rotors aus. Mit der Windgeschwindigkeit in der Rotorebene  $u_2$  wird der axiale Induktionsfaktor (inflow factor) wie folgt definiert:

$$a = 1 - \frac{u_2}{u_1} \quad (4-13)$$

wobei der optimale Betriebspunkt durch einen Wert von  $1/3$  für  $a$  im idealen Fall charakterisiert wird. Wird die lokale Schnelllaufzahl  $\lambda_{\text{lokal}}$  eingeführt, wobei die lokale Radiusposition  $r$  den gesamten Radius  $R$  in der Gl. 3-1 ersetzt, kann der tangentielle Induktionsfaktor  $a'$  wie folgt definiert werden:

$$a' = \frac{a \cdot (1 - a)}{\lambda_{\text{lokal}}^2} \quad (4-14)$$

Nach der Impuls-Theorie (auf Englisch: Momentum theory) ergibt sich für den Leistungsbeiwert:

$$c_{PR} = 4a \cdot (1 - a)^2 \quad (4-15)$$

Diese Gleichungen können erweitert werden, um radiale Strömung, Naben- und Spitzenverluste und Profilwiderstand einzubeziehen [16, 20]. In der vorliegenden Arbeit wird, wie in der deutschen Literatur üblich, mit dem Rotorleistungsbeiwert gearbeitet.

#### 4.2.6 Rotorblattbereiche

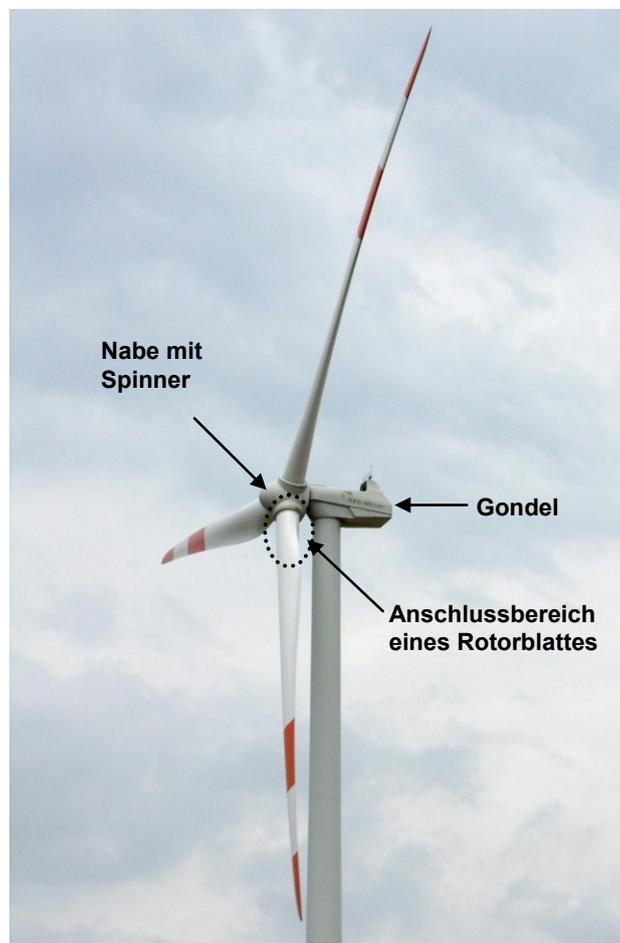
Das Rotorblatt einer WEA lässt sich aufgrund der Form und des Umströmungsbildes in drei Bereiche unterteilen:

- Naben- oder Innenbereich, bis etwa  $0,3R$ ,
- mittlerer Bereich, etwa von  $0,3R$  bis  $0,9R$  und
- Spitzen- oder Außenbereich, ab etwa  $0,9R$ .

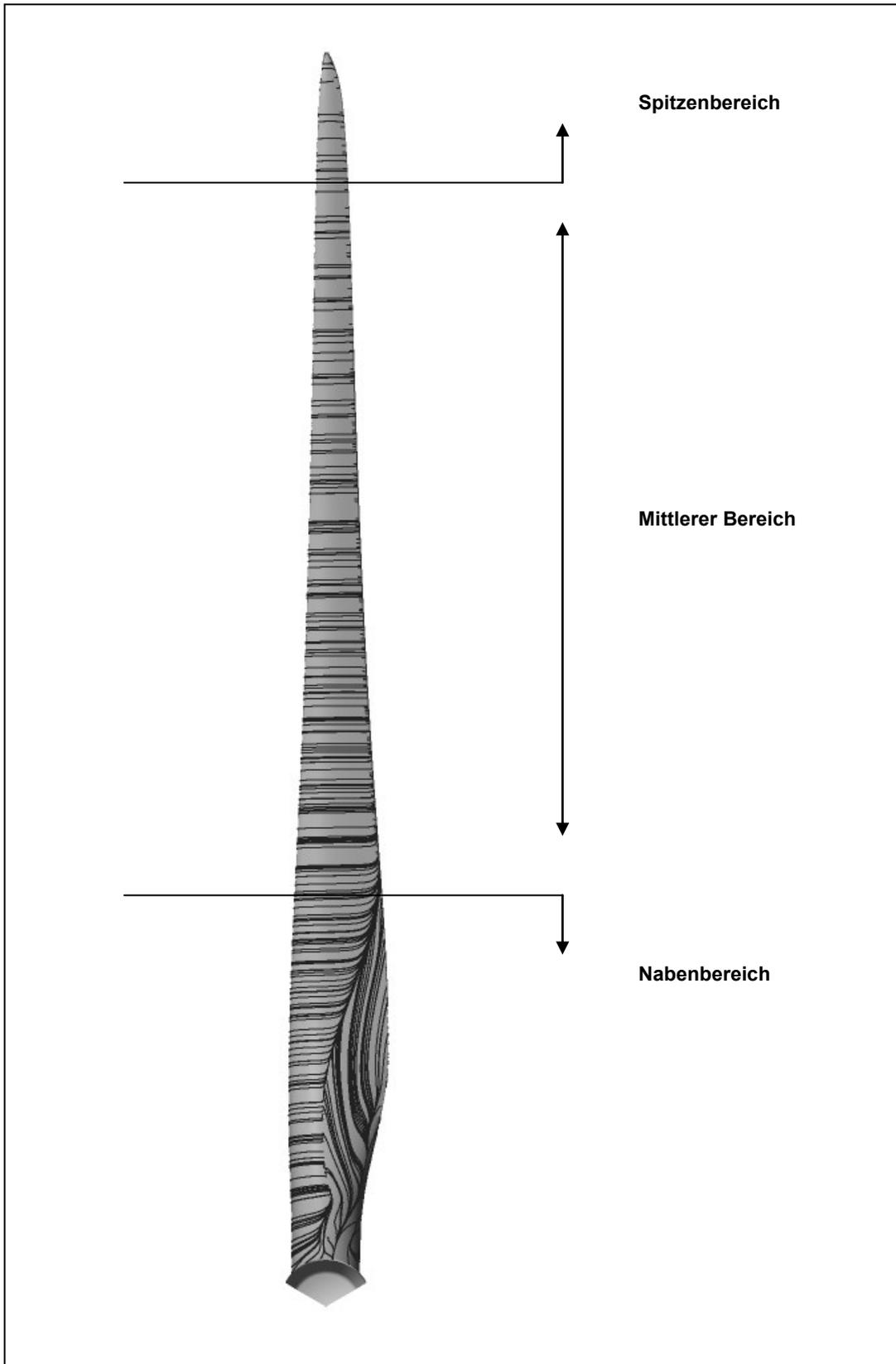
Im Innenbereich beginnt das Rotorblatt mit einem Anschlussbereich, der die strukturelle Verbindung mit der Nabe ermöglicht. Das Bild 4-2 zeigt diesen Anschlussbereich bei einer WEA der Multimegawattklasse. Im Anschlussbereich sind kreisförmige Profile üblich, da hier

Festigkeitsanforderungen im Vordergrund stehen. Anschließend an den Anschlussbereich, folgt ein Übergangsbereich mit dicken Profilen bis zum mittleren Bereich des Blattes, wo der Rotorleistungsanteil am signifikantesten ist.

Das Bild 4-3 illustriert diese Unterteilung eines Rotorblattes. Dargestellt im Bild ist die Saugseite eines Rotorblattes einer WEA der Multimegawattklasse mit den sich aus 3D-Simulationen berechneten Stromlinien auf der Blattoberfläche. Der Betriebspunkt der Simulation entspricht der Auslegungsschnelllaufzahl. Im Bild ist die Dreidimensionalität der Strömung im Nabenbereich zu erkennen. Die Randbedingungen der numerischen Simulation sind im Anhang beschrieben und gelten für alle Ergebnisse aus eigenen dreidimensionalen Untersuchungen, die in diesem und den nächsten Kapiteln präsentiert werden.



**Bild 4-2. WEA mit üblichem zylinderförmigen Rotorblattanschluss**



**Bild 4-3. Unterteilung eines Rotorblattes in drei Bereiche**

### 4.3 Aerodynamischer Entwurf eines Rotorblattes

#### 4.3.1 Vorgehensweise

Beim Entwurf eines Rotorblattes werden die aerodynamischen Profile ausgewählt, der Übergang zwischen ihnen gestaltet, die lokale Profiltiefe und Verwindung berechnet und somit die Geometrie des Rotorblattes festgelegt. Kommerzielle Rotorblätter bestehen aus mehreren aerodynamischen Profilen mit unterschiedlichen Dickenverhältnissen und aus verschiedenen Profildfamilien. Zwischen den vordefinierten Profilen sind Übergangsbereiche zu gestalten. Die aerodynamische Güte dieser Übergangsprofile wird nachträglich über numerische Berechnungsverfahren ermittelt.

Die Profillehnen der einzelnen Blattelemente werden mit einer Verwindung gestaltet, um den Einfluss des lokalen Radius auf Umfangsgeschwindigkeit und Anströmwinkel zu berücksichtigen. Die Verwindung wird durch einen Bauwinkel charakterisiert, der zwischen Profillehne und Rotorebene definiert und konstruktiv festgelegt wird [7, 13].

Der Entwurf eines Rotorblattes ist ein iterativer Prozess. Für die erste Leistungsberechnung eines neu entwickelten Blattes im Auslegungsbetriebspunkt und Off-Design-Bereich ist das auf der Blatt-Element-Impuls-Theorie (auf Englisch: Blade element - momentum (BEM) theory) basierende Verfahren weiterhin das häufigste [21-23]. Die BEM-Theorie ist eine Kombination der Blatt-Element- und Impulstheorie [16, 20]. Sie wird zur Berücksichtigung der Dreidimensionalität der Umströmung um das Blatt mit Korrekturen erweitert [21, 24]. Auf dieser Theorie basierende selbstgeschriebene Programme werden in der Forschung und Lehre aber auch beim industriellen Einsatz [23] benutzt. Kommerzielle Programme, die auf der BEM-Theorie aufbauen, sind bei WEA-Herstellern verbreitet, am Beispiel von GH Bladed, das die Leistungs- und Lastenberechnungen für die Entwicklung und Zertifizierung von WEA ermöglicht.

Aufgrund der notwendigen Vereinfachungen der eingesetzten Berechnungsmethoden zur Rotorauslegung finden nach Entwurf eines Rotors umfangreiche Messungen mit einem Anlagenprototyp statt, um den realen Rotorleistungsbeiwert  $c_{PR}$  des neuen Rotors zu bestimmen. Dreidimensionale numerische Simulationen bieten sich aufgrund des Zeitaufwandes zu Forschungszwecken und zur Optimierung ausgewählter Stellen kommerzieller Rotorblätter an. [24] vergleicht die Ergebnisse der mit verschiedenen Verfahren berechneten aerodynamischen Beiwerte eines kommerziellen Rotors.

#### 4.3.2 Übliche aerodynamische Profile

Am Anfang der kommerziellen Entwicklung der netzgekoppelten WEA haben die WEA-Hersteller auf die Profile der NACA-Familien zurückgegriffen [7, 13, 25, 26]. Darauf folgte bei Forschungseinrichtungen die Entwicklung der für WEA speziellen Profile, die die anwendungsbedingten Anforderungen berücksichtigen. Der Entwurf und die Auswahl der Profile für WEA-Rotoren müssen nämlich eine während des Betriebszeitraums zunehmende Oberflächenrauigkeit durch Sand, Eis, Salz, tote Insekten u.a., sowie Oberflächenerosion und Abrasionserscheinungen berücksichtigen. Außerdem müssen die im Vergleich zur

Luftfahrt niedrigeren Reynoldszahlen und erhöhte Dickenverhältnisse v.a. im Nabenbereich [25] beachtet werden. Bezüglich der Reynoldszahlen werden von innen nach außen bei Mega- und Multimegawattanlagen Werte von  $1 \times 10^6$ .. $1 \times 10^7$  erreicht. Der kommerzielle Rotorentwurf berücksichtigt zusätzlich zu aerodynamischen Ansprüchen noch Festigkeits- und Fertigungsanforderungen, die sich je nach Abschnitt des Blattes ändern.

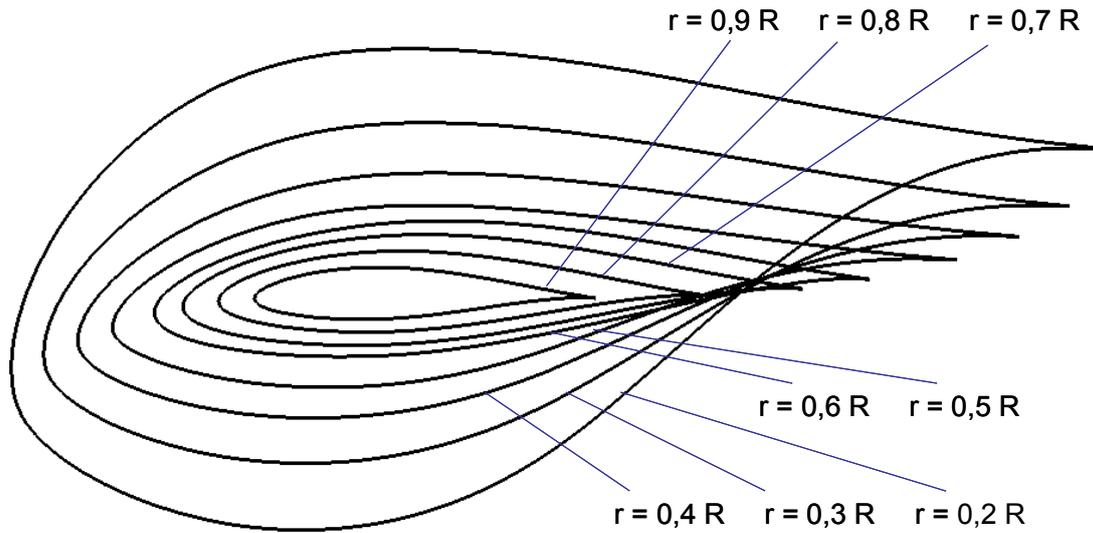
Die Auswahl der Profile und Gestaltung des Übergangsbereiches gehören zwangsläufig zum Know-How des Rotorblatt-Entwicklers. Die Tendenz zeigt, dass die Rotorblatthersteller zunehmend die bei Forschungseinrichtungen entwickelten Profile leicht modifizieren oder den Profilentwurf selbst vornehmen. Die Profilgüte wird anschließend in eigenen Windkanälen untersucht [27-30].

Aus einer auf Veröffentlichungen basierten Recherche wird entnommen, welche der öffentlich zugänglichen Profile bei WEA von Relevanz sind und wo die Platzierung an marktüblichen Rotorblättern vorgenommen wird. Die Recherche diente der Auswahl des exemplarischen Profils, das in dieser Arbeit bei den Untersuchungen zur Grenzschichtabsaugung benutzt wird (s. Kap. 6.5.2). Die Ergebnisse der Recherche werden in den Tabellen 4-1 und 4-2 zusammengefasst. Die Tabelle 4-1 nennt exemplarisch einzelne Profile und ihre Platzierung am Rotorblatt. Die Tabelle 4-2 präsentiert eine nach Entwicklern aufgeteilte Auflistung der Profilmfamilien.

Zusammenfassend werden im Nabenbereich kreisförmige Profile bis Profile mit relativen Dickenverhältnissen über 25% eingesetzt. Die Anforderung beim Design der Profile im Nabenbereich sind nach [31]:

- hoher maximaler Auftriebskoeffizient bei einem relativ hohen Anstellwinkel und
- Mitberücksichtigung der dreidimensionalen Effekte.

Die Profile in den mittleren und äußeren Bereichen sollen unempfindlich gegenüber erhöhter Rauigkeit sein und hohe Gleitzahlen besitzen. Im Bereich der Blattspitze werden unsymmetrische Unterschallprofile mit sehr guten aerodynamischen Eigenschaften, d.h. hohen Gleitzahlen und geringer Neigung zum Strömungsabriss eingesetzt. Hier sind Profile mit einem Dickenverhältnis von 15..18% üblich [13]. Das Bild 4-4 zeigt exemplarisch die Anordnung von Profilen mit unterschiedlichen Dickenverhältnissen und Verwindung bei einem Rotorblatt einer Multimegawatt-WEA.



**Bild 4-4. Anordnung von Profilen und Verwindung eines Rotorblattes (exemplarisch)**

**Tabelle 4-1. Zusammenfassung der nach [13, 25-41] bei WEA eingesetzten Profile**

Profile im Nabenbereich mit relativen Dickenverhältnissen über 25%	Profile im mittleren Bereich mit relativen Dickenverhältnissen von 19% bis 25%	Profile im Blattspitzenbereich mit relativen Dickenverhältnissen von 15% bis 18% bzw. 21%
NACA 63-430	NACA 63-421	NACA 63-215
FFA-W3-301	NACA 63-425	NACA 63-218
FFA-W3-331	S809	NACA 63-415
AH 93-W-300	S814	NACA 63-418
AH 94-W-301	FX66-S196-V1	DU 95-W-180
DU 97-W-300	AH 93-W-257	DU 96-W-180
DU 00-W-350	DU 91-W2-250	DU 93-W-210
DU 00-W-401		DU 93-W-212
		DU 00-W-212

**Tabelle 4-2. Auflistung von für WEA relevanten aerodynamischen Profilkfamilien**

<p>NACA-Familien</p> <p>Entwickler: National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), der Vorgängerinstitution der National Aeronautics and Space Administration (NASA), in den Vereinigten Staaten von Amerika. Verbreitet bei der Anwendung bei WEA sind nach [13, 25] die Serien mit laminaren Profilen NACA 44XX und NACA 230XX und nach [13, 32] die Profile der Familien 63-2XX, 63-4XX, 63-6XX, 64-4XX und 65-4XX.</p>
<p>NREL-Serie S8XX</p> <p>Entwickler: National Renewable Energy Laboratory (NREL) der Vereinigten Staaten von Amerika. In [33] sind die mittlerweile 36 Profile für die spezielle Anwendung bei WEA mit Auslegungsdaten zu finden. Ergebnisse experimenteller Untersuchungen der für den Naben- bis zum Mittelbereich des Blattes ausgelegten Profile S809 mit 21% Dickenverhältnis und S814 mit 24% wurden im RISØ-Profilkatalog für WEA-Rotoren [32] veröffentlicht. Insbesondere das Profil S814 taucht nach Recherchen in einer mittleren Position des Blattes (0,4R bis 0,6R) häufig auf.</p>
<p>FFA-Profile</p> <p>Entwickler: Flygtekniska Försöksanstalten Aeronautical in Schweden. Die Serien FFA W1-XXX, FFA W2-XXX und FFA-W3-XXX wurden für WEA entwickelt [34]. Bspw. finden die Profile FFA-W3-241, FFA-W3-301 und FFA-W3-331 im Nabenbereich Verwendung und wurden umfangreich experimentell und numerisch untersucht [32, 35].</p>
<p>FX- und AH-Profile</p> <p>Entwickler: die FX Profile sind von Professor Franz Xaver Wortmann entwickelt worden und Teil des bekannten Stuttgarter Profilkataloges I [36]. Die AH-Profile sind am Institut für Aerodynamik und Gasdynamik der Universität Stuttgart von Professor Dieter Althaus entwickelt worden. Die Koordinaten von zahlreichen Profilen der Familien FX77-W-XXX, FX79-W-XXX, FX83-W-XXX und FX84-W-XXX, sowie sechs Profile der Familie AH 93-W-XXX und das Profil AH 94-W-301 stehen in [37] als Profile zur Anwendung bei WEA zur Verfügung. Alle Profile sind im Stuttgarter Profilkatalog II enthalten [38].</p>
<p>DU- Profile</p> <p>Entwickler: TU Delft (Delft University of Technology) in den Niederlanden. Die DU-Profile sind in Anlagen von mehr als zehn verschiedenen Anlagenherstellern wiederzufinden [39]. Bei den Signaturen DU XX-W-XXX und DU XX-W2-XXX weisen die ersten Ziffern auf das Entwicklungsjahr und die letzten drei Ziffern auf das Zehnfache des relativen Dickenverhältnisses, W2 weist auf zwei unterschiedliche Entwürfe für dasselbe Dickenverhältnis im selben Entwicklungsjahr hin. Die Werte des relativen Dickenverhältnisses liegen zwischen 15% und 40%. Im Nabenbereich werden häufig die DU-Profile mit 30 bis 40% Dickenverhältnissen, wie bspw. DU 97-W-300, DU 00-W-350 und DU 00-W-401 verwendet.</p>
<p>Profile der RISØ-Serien</p> <p>Entwickler: RISØ National Laboratory in Dänemark. Es wurde zum Einsatz bei Windenergieanlagen die RISØ-A1-XX, sowie die P- und B1-XX-Serien entwickelt. Nach [40] wurde die Familie A1 zum Einsatz bei Stall- und Aktiv-Stall-WEA der Megawattklasse entwickelt, die Familie P für Pitch-WEA und die Familie B1 für drehzahlvariable Pitch-WEA der Mega- und Multimegawattklasse. Die B1-Profile weisen relative Dickenverhältnisse von 15% bis 53% auf [41]. Ergebnisse experimenteller und numerischer Untersuchungen zu Profilen RISØ-A1-XX stehen auf der RISØ-Website frei verfügbar.</p>

### 4.3.3 Korrektur der zweidimensionalen Profilpolaren

Die BEM-Methode benötigt die aerodynamischen Auftriebs- und Widerstandskoeffizienten der jeweiligen Profile als Eingangsgrößen. Die Dreidimensionalität der Umströmung im Naben- und Spitzenbereich bringt die Schwierigkeit mit sich, dass die aerodynamische Güte der Profile unter diesen Strömungsbedingungen nicht bekannt ist.

Der Unterschied zwischen 2D- und 3D-Strömungen bei WEA ist stark abhängig vom Verhältnis der Profiltiefe  $c$  zum lokalen Radius  $r$ , von der Verwindung des Blattes, vom Anstellwinkel und von der Erscheinung und Ausbreitung der Ablösung [42]. Außerdem summiert sich dazu, dass viele Polaren bei niedriger Reynoldszahl von  $1 \times 10^6$  gemessen werden und die am Blatt vorherrschende Reynoldszahlen zwischen  $1 \times 10^6$  und  $1 \times 10^7$  aktuell variieren. Aus diesen Gründen laufen seit mehreren Jahren Forschungsaktivitäten mit dem Zweck, ein besseres Verständnis der Strömungsbedingungen zu erarbeiten und Korrekturmodelle für die Berechnung des realen Anstellwinkels, Auftriebes und Widerstandes zur Verfügung zu stellen.

Die bekanntesten sogenannten 3D-Korrekturmodelle sind von Snel et al., Du und Selig, Chaviaropoulos und Hansen, Lindenburg sowie von Bak et al. entwickelt worden [43]. Der Stand der Technik ist allerdings, dass die aktuellen Modelle noch zu einer Über- oder Unterschätzung des Auftriebes im Vergleich zu Messungen führen. Weitergehend wird die Möglichkeit erforscht, die 3D-Profildaten aus CFD-Simulationen zu extrahieren [44]. Einen guten Vergleich der Berechnungen von Profil- und Anlagen-Charakteristika mit diesen Korrektur-Modellen zu 2D- und 3D-Messungen bietet [43].

Die Profilentwickler versuchen, die dreidimensionalen Effekte beim Entwurf der Profile und Berechnungen der aerodynamischen Güte zu berücksichtigen. Bspw. hat die TU Delft (Delft University of Technology) die dreidimensionalen Effekte ins Programm Xfoil [26, 31] integriert. Das modifizierte Programm wird Rfoil genannt und wird seit 1995 beim Entwurf von Profilen eingesetzt [26, 31].

## 4.4 Umströmung des Rotorblattes

### 4.4.1 Einflussfaktoren

Das bereits erwähnte Bild 4-2 zeigt auch die Gondel und die Nabe der Anlage. Die Verkleidung der Nabe wird Spinner genannt und ist im Bild zu sehen. Die aerodynamische Form des Spinners beeinflusst die Strömung am Blatt im Anschlussbereich und die Form der Gondelverkleidung den Nachlauf.

Viele weitere Faktoren beeinflussen die Strömung um ein Rotorblatt, die Auftriebserzeugung und den sich ergebenden Rotorleistungsbeiwert. Zusätzlich zur Auswahl und Platzierung der aerodynamischen Profile, Gestaltung der Übergangsbereiche zwischen den Profilen und der Verwindung des Blattes können u.a. folgende auf die Strömung einwirkenden Faktoren genannt werden:

- die atmosphärische Turbulenz und Grenzschicht am Standort,
- der Nachlauf von weiteren WEA in einem Windpark,

- die geometrische Form des Anschlussbereiches und der Rotorblattspitze,
- die Interaktion Blatt-Nabe-Gondel,
- die Beeinflussung des Nachlaufes der Blätter untereinander und
- die Interaktion Blatt-Turm.

Die Einflussfaktoren werden in den nächsten Abschnitten betrachtet.

#### 4.4.2 Großskalige Anströmbedingungen

Die atmosphärische Turbulenz und Grenzschicht, der Nachlauf (near and far wakes) und die Wechselwirkung von WEA in einem Windpark sind für die Planung und Berechnung des Energieertrages und Auslegung der einzelnen WEA von großer Relevanz. Die atmosphärische Turbulenz am Standort verursacht kurzfristige Änderungen des Anstellwinkels und kann zum instationären Strömungsabriss (dynamic stall) am Blatt führen [45], der sich wiederum auf die Struktur, Akustik und Aerodynamik auswirkt. Dreidimensionale atmosphäre Strömungsmodelle zur Berechnung der standortspezifischen Windverhältnisse sind von hoher Komplexität, v.a. für Offshore-Standorten und sogenannte „komplexe Gelände“. [46, 47] bieten einen guten Überblick des Standes der Technik zum Thema. Eine individuelle und kurzfristige Verstellung der Rotorblätter um unterschiedliche Pitch-Winkel und unabhängige Verstellung von Blattsegmenten sind bspw. aktuelle Themen von Forschungsvorhaben mit dem Ziel einer Lastenreduzierung bei Multimegawatt-WEA u.a. unter Bedingungen von hohen Turbulenzgraden [48].

#### 4.4.3 Strömung im Nabenbereich

Im Blattinnenbereich, wo Kreisform und relativ dicke Profile überwiegen, besteht ein breites Gebiet abgelöster Strömung in Verbindung mit einer Sekundärströmung [23, 24, 49, 50]. Über radiale Strömungseffekte bei Hubschraubern und Propellern wird seit mehr als 50 Jahren geforscht [51]. Bei WEA sind die radialen Effekte Objekt von wissenschaftlichen Untersuchungen der letzten 20 Jahre [42, 52-56]. Dennoch ist das Strömungsverhalten nicht vollständig erfasst.

Numerische Verfahren der Strömungsberechnung (in eng. Computational Fluid Dynamics mit Abkürzung CFD) haben sich in den letzten Jahren als ein gutes Werkzeug für weitere Untersuchungen zum Thema erwiesen, indem das beschriebene Strömungsbild nachgebildet wird (s. Kap. 7). Eigene numerische Untersuchungen wurden mit drei kommerziellen Rotorblättern der Mega- und Multimegawattklasse [50, 57] sowie einem nach BEM-Theorie selbst ausgelegten Rotor der 600 kW-Klasse durchgeführt. Die Erkenntnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

Im Bild 4-5 werden die Stromlinien auf der Saugseite einschließlich der Wirbelentstehung im Nabenbereich für den Auslegungspunkt dargestellt. Die dreidimensionale Strömung dehnt sich bei Multimegawattanlagen im Auslegungsbetriebspunkt bis zu 30% der Spannweite ( $0,3R$ ) aus. Am stärksten zeigt sich die Querströmung üblicherweise bei 20% der Spannweite ( $0,2R$ ), wo gewöhnlich die größte Profiltiefe eines Blattes zu finden ist.

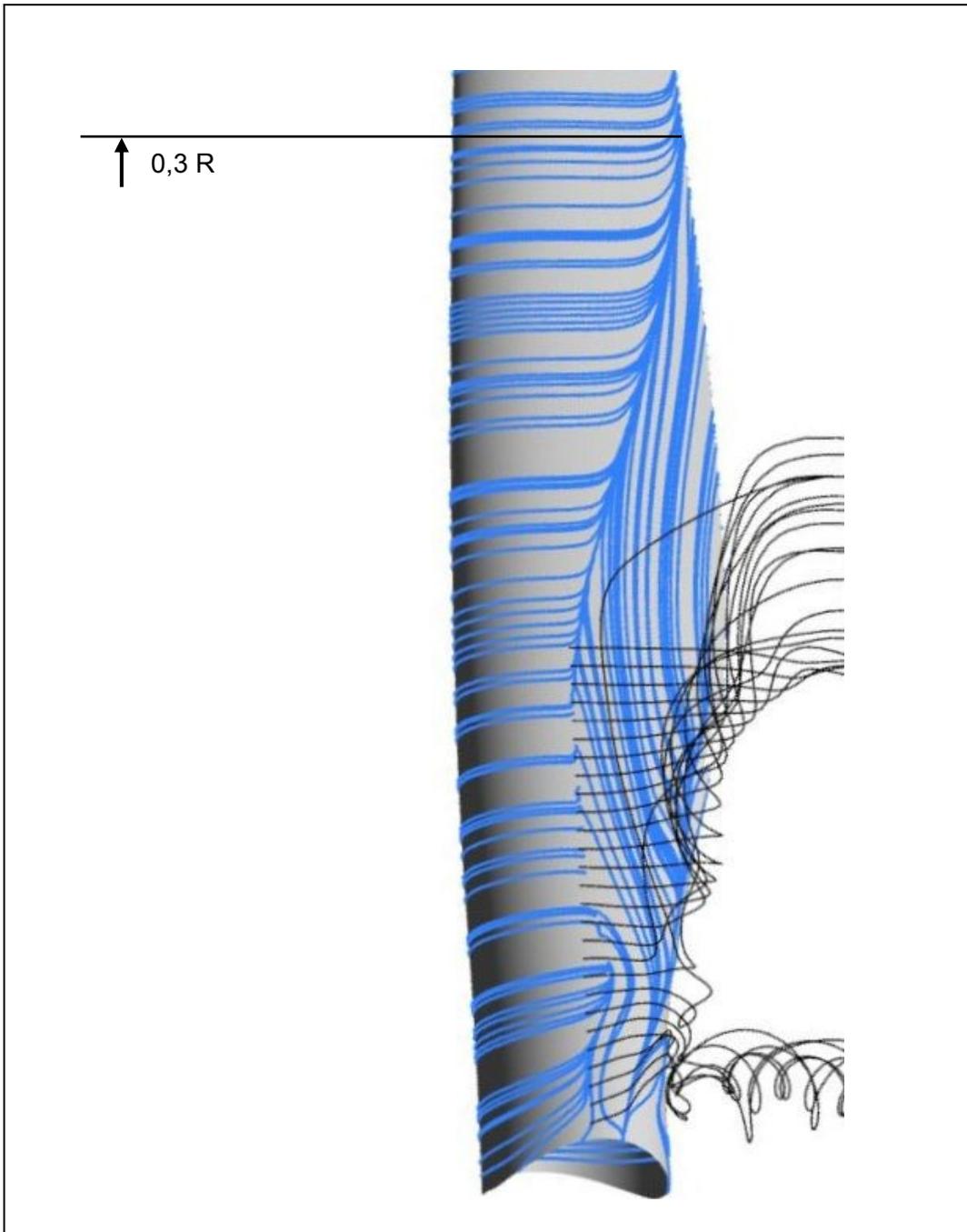
Zusätzlich zur üblichen zylindrischen Form des Anschlusses zwischen Rotorblatt und Nabe spielen bei Rotorblättern von WEA:

- die Wechselwirkung mit der Gondel und Spinner-Konstruktion und
- der Tiefenverlauf und die Verwindung des Blattes

für die Entstehung bzw. Ausbreitung dieses abgelösten Strömungsbereichs eine entscheidende Rolle. Eine mit dem Ablösungsgebiet verbundene spannungsvolle Strömung ergibt sich unter Einfluss radialer Beschleunigung aus der Rotation und Einbeziehung der Coriolis- und Zentrifugalkräfte.

Die Anströmung eines Blattes im Nabenbereich wird außerdem durch den Nachlauf des vorherigen Blattes des eigenen Rotors beeinflusst. Nach dem Biot-Savart-Gesetz [58] ist die induzierte Geschwindigkeit an einem Punkt direkt proportional zur Zirkulation  $\Gamma$  und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes der Wirbellinie zum Punkt. Die Beeinflussung der Rotorblätter untereinander ist somit aufgrund der lokalen engeren Abstände v.a. im Nabenbereich relevant. Dies führt zu einer Anstellwinkelerhöhung und einer damit verbundenen Erhöhung des Auftriebes [7].

In [43] werden mathematische Beziehungen zwischen Coriolis- und Zentrifugalkräften und Druckkräften am Rotorblatt, sowie radialer Geschwindigkeit und lokaler Umfangsgeschwindigkeit dargestellt, die zur Berechnung der 3D-Korrekturen (s. Kap. 4.3.3) genutzt werden. Den dreidimensionalen radialen Effekten im Nabenbereich werden eine positive Ablösungsverzögerung (stall delay) sowie eine Erhöhung des Auftriebes und Widerstandes im Vergleich zur zweidimensionalen Betrachtung der aerodynamischen Profilhüte zugeschrieben. Es wird eine Reduzierung des positiven Druckgradienten in Richtung Hinterkante im Vergleich zum nicht rotierenden Fall beobachtet. Auf dem Rotorblatt entsteht eine Saugwirkung, welche die Strömung im Nabenbereich kontinuierlich ins Ablösegebiet absaugt. Es ergibt sich eine Dickenminderung der Grenzschicht aufgrund der Abschleuderung der Strömung in die radiale Richtung.



**Bild 4-5. Stromlinien und Wirbel auf der Saugseite eines Rotorblattes im Nabenbereich und Auslegungspunkt**

#### 4.4.4 Umgestaltung des Nabenbereiches

Ein Neuentwurf des Nabenbereiches wurde von der Fa. Enercon durchgeführt und im Jahr 2005 auf den Markt gebracht [59]. In [60] werden die Geometrie des zylindrischen Blattsegmentes (vorherige Form) und des neuen Blattanschlusses einander gegenübergestellt. Die Ergebnisse einer wissenschaftlichen Untersuchung der Umgestaltung der üblichen Form des Nabenbereiches und der Auswirkung auf die Strömung wird in [24] dargestellt. Die Ausgangsfrage ist, ob eine Ausweitung der Profiltiefe und Verwindung im Nabenbereich (s. Bild 4-6), sowie eine unübliche große Spinner-Konstruktion zu einer Verbesserung des Leistungsbeiwertes beitragen können. Eine relativ kleine Erhöhung der lokalen Leistungs- und Schubbeiwerte wurde in den betroffenen spannweitigen Positionen (bis  $0,3R$ ), in Verbindung mit einer Verringerung dieser Werte im Bereich  $0,3R$  bis  $0,5R$ , festgestellt [24]. Der beschriebene Ablösungsbereich bei umgestaltetem Nabenbereich entsteht nicht [24].

Auch eigene Untersuchungen zeigen, dass eine kleine Optimierung des Leistungsbeiwertes durch eine spannweite Begrenzung des eben beschriebenen Ablösegebietes im Nabenbereich und der verbundenen Querströmung erreichbar ist. Die Begrenzung des Ablösegebietes wirkt sich auf den mittleren Rotorblattbereich positiv aus. Das Thema wird in den Kapiteln 5.3.5 und 6 vertieft.



**Bild 4-6. WEA der Fa. Enercon mit umgestaltetem Nabenbereich**

#### 4.4.5 Strömung im mittleren Blattbereich

Im mittleren Bereich des Rotorblattes ist die Umströmung im Auslegungsfall überwiegend zweidimensional (s. Bild 4-3). Bei Off-Design-Betriebspunkten mit höheren Windgeschwindigkeiten als die Auslegungswindgeschwindigkeit, wie z.B. im Nennlastfall, erweitert sich die im Nabenbereich entstandene Ablösung über den mittleren Blattbereich in Richtung Blattspitze. Außerdem werden Hinterkanten-Ablösungen, die entlang der gesamten Spannweite stattfinden können, in Off-Design-Betriebspunkten erwartet. Die Geometrie der Hinterkante im mittleren Blattbereich ist daher für das aeroakustische Verhalten von besonderer Relevanz.

#### 4.4.6 Strömung an der Blattspitze

Im Bereich der Rotorblattspitze ist die Strömung dreidimensional und durch Verwirbelung und Strömungsabriss, aerodynamische Verluste und damit verbundene Schallemission charakterisiert.

An der Blattspitze eines Rotorblattes kommt es zu einem Druckausgleich zwischen Saug- und Druckseite, der eine dreidimensionale Strömung hervorruft. Ähnlich wie bei Flugzeugtragflügeln ergeben sich freie Randwirbel, auch Spitzenwirbel oder Wirbelschleppen genannt. Dabei entsteht eine spannweite Komponente der Geschwindigkeit zum Blattinnenbereich auf der Saugseite und zum Außenbereich auf der Druckseite. Der Anstellwinkel tendiert zu kleineren Werten und eine Kraftkomponente wird in Anströmungsrichtung induziert. Letztere ist als induzierter Widerstand bekannt.

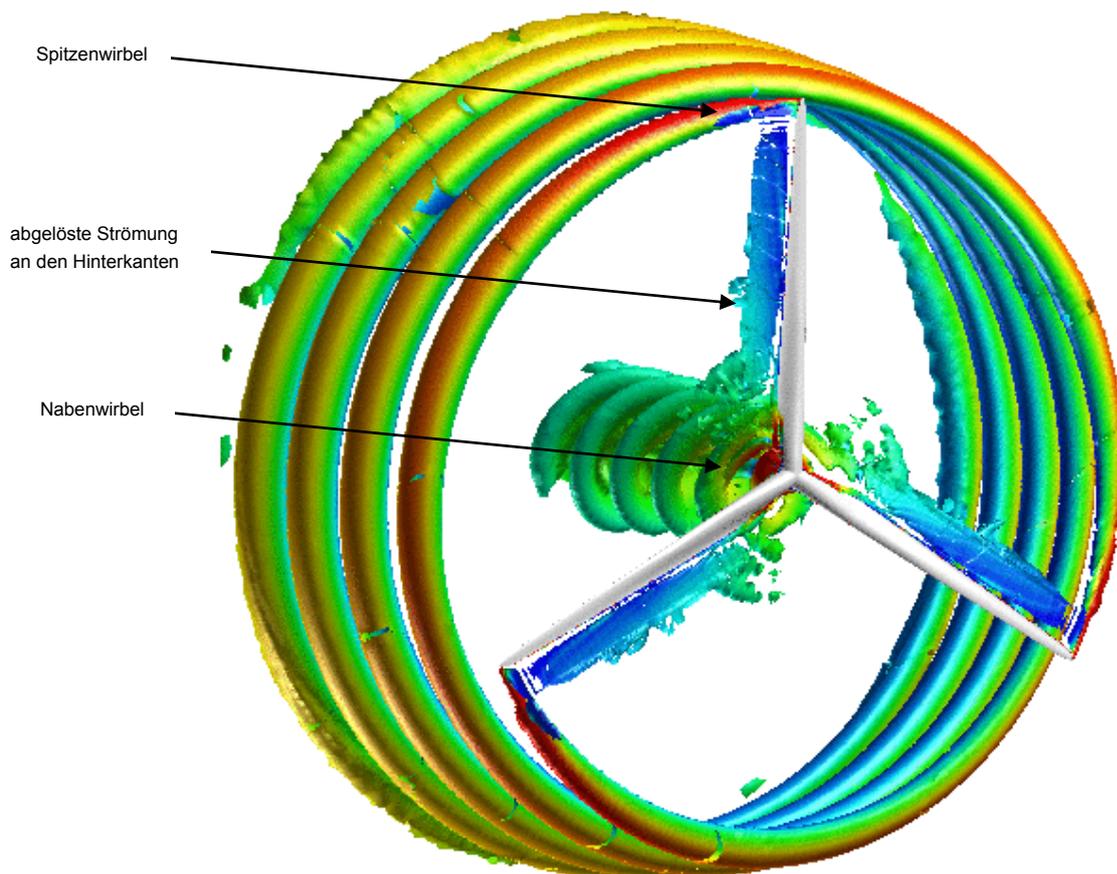
Auf dem Bild 4-7 aus [61] können Naben- und Spitzenwirbel im Nachlauf eines WEA-Rotors sowie die abgelöste Strömung an den Hinterkanten in mittleren Blattpositionen erkannt werden. Dabei ist die Erweiterung beider Spiralwirbel (helical vortex) sichtbar.

#### 4.4.7 Optimierung der Blattspitzenform

Nach [62] sind die aerodynamischen Schallemissionen einer WEA maßgebend auf den Bereich  $0,8R$  bis  $R$  eines Rotorblattes zurückzuführen, so dass eine Optimierung der Spitzenumströmung für die akustischen Emissionen von Relevanz ist. Die hohen Geschwindigkeiten der Strömung an der Blattspitze verursachen akustische Emissionen. Es ist dabei unklar, welches Gewicht die dreidimensionale Strömung, d.h. in diesem Fall die Randwirbel, tatsächlich hat [62].

Forscher und Hersteller beschäftigen sich intensiv mit der Optimierung der Blattspitzenform zur Verbesserung der Akustik und Aerodynamik [13]. Zahlreiche Untersuchungen beweisen eine Verminderung der Schallemissionen durch die Formoptimierung der Blattspitze und durch die Anbringung von Strömungsbeeinflussungselementen am Beispiel von Winglets (s. Kap. 5.3.1). Ohne Winglets werden einer zugespitzten Blattspitzenform die besten Ergebnisse zugewiesen [13, 62]. Nach [63] ergeben sich durch Modifikationen an der Spitze ab  $0,95R$  keine großen Auswirkungen auf die aerodynamische Leistung oder Schuberzeugung. Dies führt zur Schlussfolgerung, dass der Bereich  $0,95R$  bis  $R$  aufgrund

des gestörten Strömungsfeldes nicht in der Lage ist, maßgebend zur Energieumwandlung an der Rotorebene beitragen zu können [63]. Hingegen erhöht nach [13] eine breitere Spitze mit definierten aerodynamischen Profilen den Rotorleistungsbeiwert.



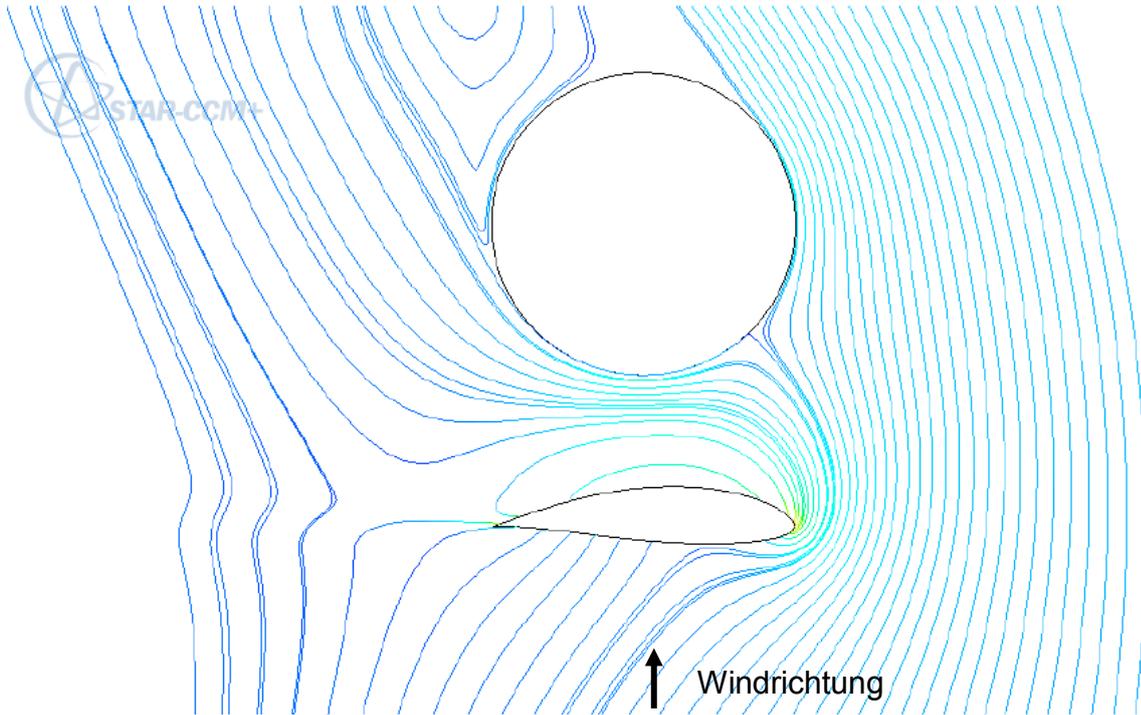
**Bild 4-7. Numerische Simulation des Nabenwirbels, der abgelösten Strömung an der Hinterkante und des Blattspitzenwirbels im Nachlauf eines WEA-Rotors [61]**

#### 4.4.8 Blatt-Turm-Interaktion

Die Blatt-Turm-Interaktion bei luvseitig angeströmten WEA und die Berücksichtigung ihrer Auswirkungen bei dem Entwurf und der Auslegung von Rotorblättern und Anlagen sind noch ein offenes Forschungsfeld. Das aufgrund der Passage des Rotorblattes vor dem Turm instationär gestörte Strömungsfeld des Turmes und des Blattes regt Blattschwingungen an und wirkt sich strukturell durch Wechsellasten [64] aus.

Die Blatt-Turm-Interaktion wird bei erweiterter BEM-Methode durch eine Korrektur des Anstellwinkels berücksichtigt, die auf eine Modellierung des Turmes als Zylinder in einer Potentialströmung zurückgreift. Anders zeigt das Bild 4-8 eine 2D CFD Simulation der Blatt-

Turm-Interaktion. Die Verschiebung des Staupunktes am Turm im Vergleich zu einer potentialtheoretischen Betrachtung wird durch die Darstellung der Stromlinien deutlich. Neuerliche Forschungsergebnisse zeigen, dass sich eine positive Auswirkung auf die Druckverteilung und Grenzschichtentwicklung auf der Saugseite des „passierenden“ Blattes ergibt, [64] empfiehlt daher eine Korrektur der Auftriebswerte für die Profile in der Position vor dem Turm.



**Bild 4-8. Stromlinien aus 2D CFD Simulationen verdeutlichen die Effekte der Blatt-Turm-Interaktion [64]**

## 5 Strömungsbeeinflussung an Rotorblättern von WEA

### 5.1 Definition, Ziele und Klassifizierung

Die Strömungsbeeinflussung (SB) bezeichnet Maßnahmen, die die Strömung in jeglicher Art beeinflussen, meistens, um die aerodynamische Leistung eines umströmten oder durchströmten Körpers zu verbessern oder Schwingungen, Verformungen oder Schallemissionen zu reduzieren. Die direkten Ziele bei Anwendung der Strömungsbeeinflussung sind häufig miteinander eng verbunden:

- Erhöhung des aerodynamischen Auftriebs,
- Minimierung des aerodynamischen Widerstandes,
- Verlagerung des Transitions- und Ablösepunktes stromabwärts,
- Laminarhaltung oder Relaminarisierung (s. unten),
- Ablösungsvermeidung und
- Verminderung von strömungsinduzierten Schallemissionen und Kräften.

Unter Laminarhaltung der Grenzschicht ist die Verhinderung der Transition zu verstehen [65]. Die Reduzierung des aerodynamischen Widerstandes eines Körpers wird auch durch eine Umkehrung von turbulenten in laminaren Strömungszustand erreicht [66]. Dafür sind u.a. die englischen Ausdrücke „Relaminarization“ und „Reverse Transition“ bekannt [66]. In dieser Arbeit wird der Begriff Relaminarisierung verwendet.

Die aerodynamischen Ziele erlauben eine Unterteilung der Maßnahmen in Handlungen zur Transitions- oder Ablösungsbeeinflussung. Die häufigste Klassifizierung unterscheidet die Möglichkeiten der Strömungsbeeinflussung in passive oder aktive Maßnahmen. Passive Maßnahmen benötigen im Gegensatz zu aktiven Elementen keine Leistungsbereitstellung zum Betrieb von Arbeitsmaschinen, mechanischer oder elektrischer Aktuatoren.

Die passive Strömungsbeeinflussung wird durch auf dem umströmten Körper angebrachte Strömungselemente realisiert und in verschiedenen technischen Anwendungen z.B. bei Flugzeugen, Fahrzeugen und Turbomaschinen seit Dekaden eingesetzt. Ein Beispiel eines passiven Elements sind Spoiler bei Automobilen. Unter den passiven Methoden kann auch die geschickte Geometriegestaltung berücksichtigt werden [67], wie bspw. im Fall eines Profils die Optimierung des Nasenradius und der Lage des Dickenmaximums [67]. Im Fall eines Rotorblattes kann die Gestaltung der Profil- und Rotorblattgeometrie, wie am Beispiel der Anbringung eines Winglets an der Blattspitze, als passive Methoden der Strömungsbeeinflussung verstanden werden.

Bei der aktiven Strömungsbeeinflussung werden gesteuerte oder geregelte technische Systeme angewendet. Die Messtechnik und Wartung sowie die konstruktive Integration solcher Systemen sind im Vergleich zu passiven Varianten aufwendiger. Eine aktive Methode zur Strömungsbeeinflussung ist bspw. die Grenzschichtabsaugung (s. Kap. 5.4.2 und 6).

## 5.2 Strömungsbeeinflussung bei Windenergieanlagen

Bei WEA können aktive oder passive Maßnahmen für die Beeinflussung der Umströmung der Rotorblätter, des Spinners, der Gondel oder des Turms eingesetzt werden. In dieser Arbeit werden nur Möglichkeiten bei Rotorblättern betrachtet. Ziele dabei sind:

- die aerodynamische Leistungssteigerung durch Reduzierung der aerodynamischen Verluste und Steigerung des aerodynamischen Wirkungsgrades der Blattelemente,
- die Reduzierung und bessere Kontrolle der strukturellen Lasten oder
- die Verminderung der strömungsinduzierten Schallemissionen.

Die Steigerung der Leistung wirkt sich positiv auf den Energieertrag einer WEA aus.

Eine verbesserte Lastenkontrolle führt zu Werkstoffeinsparungen an den Rotorblättern und an weiteren Komponenten wie Triebstrang und Turm. Sie erlaubt weiterhin eine Reduzierung von Schäden und die sich daraus ergebende Erhöhung der Verfügbarkeit und der Lebensdauer einer WEA.

Die Reduzierung der Schallemissionen verbessert die Akzeptanz der Windenergie auf dem Festland und entlastet die Standortproblematik in dichtbevölkerten Regionen.

Die aerodynamische Leistungsregelungen Aktive-Stall und Pitch sind Beispiele etablierter aktiver Maßnahmen zur Strömungsbeeinflussung bei WEA [68]. Das Bild 5-1 stellt eine Zusammenstellung über weitere ausgewählte Möglichkeiten der Strömungsbeeinflussung bei Rotorblättern von WEA dar. Von links nach rechts betrachtet, von passiven zu aktiven Varianten steigt die Komplexität des physikalischen Prinzips und der Steuer- und Regelungstechnik. Hierbei wird auch die Integration der Maßnahmen zur Strömungsbeeinflussung am Rotorblatt aufwendiger.

Bei der Windenergie wird von der Erfahrung mit der Technik der Strömungsbeeinflussung maßgebend aus dem Flugzeugbau gelernt. Eine direkte Übertragung auf rotierende Systeme ist aufgrund der ausgeprägten Dreidimensionalität der Strömung nicht möglich. Weitere anwendungsspezifische Eigenschaften sind zu beachten, insbesondere, dass im Fall der WEA die aerodynamische Leistungssteigerung durch eine Erhöhung des Antriebsmomentes zu erreichen ist, ohne dabei die Schubkraft signifikant zu erhöhen.

Aus der Gl. 4-10 der umgewandelten Rotorleistung im Kap. 4.2.3 werden die Einflussgrößen, die mittels einer Beeinflussung der Strömung zur Leistungsverbesserung beitragen können, erkannt:

- Anströmwinkel  $\varphi$  (s. Kap. 4.2),
- Rotordrehzahl  $n$ ,
- Rotorradius  $R$  und
- aerodynamische Eigenschaften der Profile  $c_A$  und  $c_W$ .



Für die Änderung der Profildicken ergeben sich bei Rotorblättern von WEA drei Bereiche, in denen der Einsatz von SB zur Leistungssteigerung, aeroelastischen Verbesserung oder Schallminimierung beitragen kann:

- starke Strömungsablösung im Nabenbereich des Blattes (s. Kap. 4.4.3),
- Hinterkantenablösung im mittleren Bereich des Rotorblattes und
- durch den Druckausgleich induzierte Tip-Verluste an der Blattspitze (s. Kap. 4.4.6).

Die Hinterkantenablösung und die induzierten Tip-Verluste sind mit Leistungsverlusten, Schwingungen und höheren Schallemissionen bei WEA verbunden. Die Kontrolle der Strömungsablösung im Nabenbereich kann zu einem verbesserten Strömungsverlauf im Naben- und mittleren Bereich und dadurch zu einer Leistungserhöhung beitragen.

Im Folgenden wird ein Überblick der Möglichkeiten der Strömungsbeeinflussung bei WEA gegeben, die bereits eingesetzt werden, Thema aktueller Forschungsarbeiten sind oder deren Einsatz als effizient bei WEA eingeschätzt wird.

### **5.3 Passive Strömungsbeeinflussung bei WEA**

Aktuell werden bei kommerziell betriebenen WEA, ausgenommen die aktiven Maßnahmen der Aktiv-Stall- und Pitch-Regelungen, lediglich passive Maßnahmen festgestellt. Folgende passive strömungsbeeinflussende Elemente wurden bzw. werden aktuell an Rotorblättern von WEA von mindestens einem oder mehreren verschiedenen Herstellern eingesetzt:

- Winglet,
- Gurney-Flap,
- Turbulator,
- Vortex-Generator,
- Grenzschichtzaun und
- starrer Spoiler.

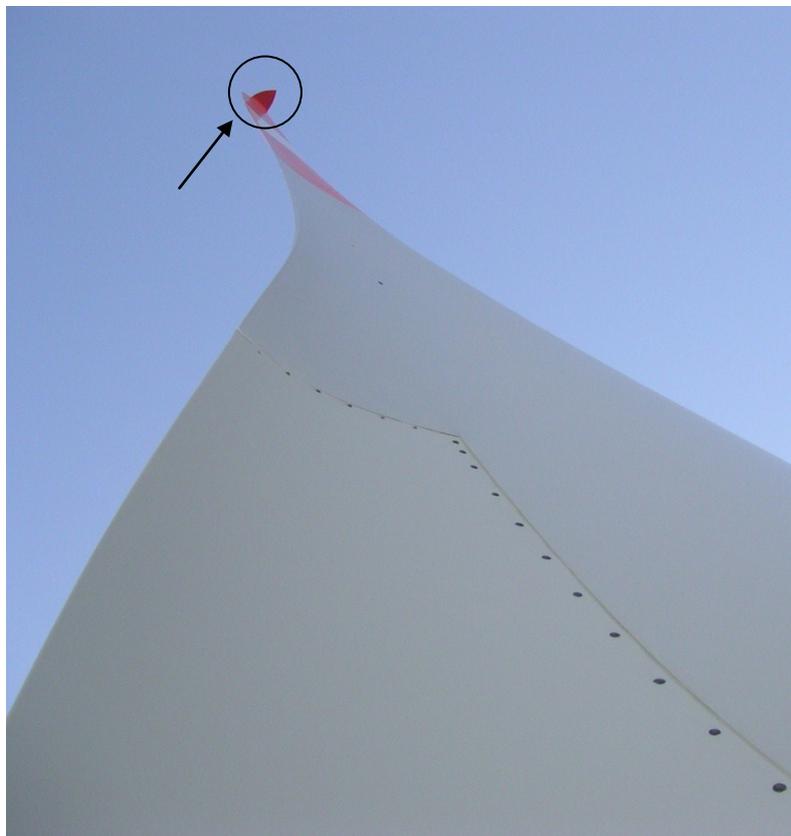
Diese Maßnahmen und noch die Maßnahme Rückströmklappe, die bei WEA noch keinen Einsatz fand, werden anschließend betrachtet. Die Diskussion zu den Elementen Grenzschichtzaun und starrer Spoiler werden durch eigene numerische Untersuchungen vertieft. Weitere Maßnahmen am Beispiel von gezahnten Blatthinterkanten, Riblets oder Delfinhaut, werden bei WEA aufgrund des relativ hohen Fertigungsaufwandes oder der Empfindlichkeit gegen Schmutzablagerungen für uneffizient gehalten und nicht betrachtet.

#### **5.3.1 Winglet**

Winglet ist eine Form von Endscheiben (s. Bilder 5-2 und 5-3), die an Blatt- oder Schaufelspitzen angebracht werden und somit einer Möglichkeit der geometrischen Optimierung der Blattspitze entspricht. Winglets dienen der Beeinflussung und im idealen Fall der Unterbindung des Druckausgleiches zwischen Druck- und Saugseite im Spitzenbereich. Dadurch wird eine Reduzierung des induzierten Widerstandes und der Spitzenverwirbelung erreicht [19, 69]. Sie bewirken eine Aufteilung von großen Wirbelstrukturen in kleinere und komplexere [70].



**Bild 5-2. Winglets an Rotorblättern einer WEA der Multimegawattklasse**



**Bild 5-3. Winglet am Rotorblatt einer WEA**

Bei Flugzeugen werden sie zur Reduzierung des induzierten Widerstandes und dadurch zur Treibstoffsparsnis, sowie zur Minimierung der Schallemissionen und des Nachlaufwirbels eingesetzt. Auch an Axialventilatoren und Hubschrauberrotoren werden Winglets eingesetzt.

Auch wenn die Form und Auswirkungen von Winglets intensiv und seit mehr als einem Jahrhundert erforscht werden, ist die Spitzenumströmung bei Rotorblättern von WEA nicht vollständig erfasst und daher werden weiterhin Untersuchungen zur Auswirkung und Optimierung der Geometrie von Winglets für WEA durchgeführt.

Bei Flugfahrzeugen sind ein- oder beidseitige Winglets verbreitet. Die einseitige Form wird zur Saugseite des Tragflügels gerichtet. Bei WEA werden Winglets stets einseitig gerichtet und in Richtung Druckseite (Iuvseitige Positionierung) eingebaut (s. Bild 5-2). In [69, 71] werden aerodynamische Untersuchungen mittels CFD von Winglet-Geometrien, die durch sechs Kriterien charakterisiert werden, sowie die lee- und Iuvseitige Positionierung dargestellt. Die Konfigurationen in der leeseitigen Positionierung brachten eine Leistungserhöhung von 1 bis 2,8% im Auslegungspunkt, die durch eine Erhöhung der Schubkraft von 1,2 bis 3,6% begleitet werden [69]. Die Positionierung zur Saugseite (leeseitige Positionierung) wäre hinsichtlich der Leistungsoptimierung vorteilhaft [71, 72]. Die leeseitige Positionierung ist allerdings bei starkem Wind mit resultierender erhöhter Schubkraft und gebogenen Rotorblättern aufgrund der Nähe zum Turm ungünstig.

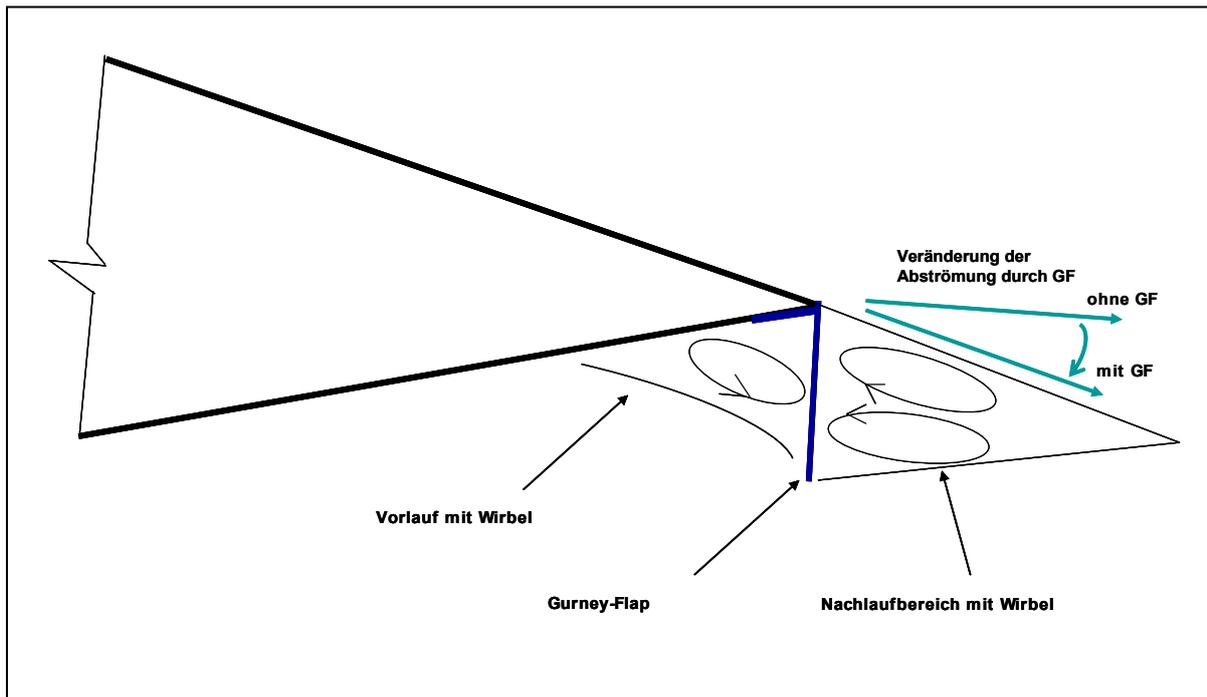
Leistungs- und Schubsteigerung sind proportional zur Winglethöhe [69]. Nach [72] ist die Leistungssteigerung auf die Reduzierung des Induzierten Widerstandes zurückzuführen. Die Schubsteigerung ist dem Verlust an Schlankheit des Blattes zuzuweisen, d.h. der Erhöhung des Verhältnisses zwischen Profiltiefe zu lokalem Radius [71]. Die aerodynamische Leistungsoptimierung durch Winglets wäre alternativ mit einer Erhöhung der Spannweite zu erreichen [72]. Aufgrund der strukturellen Lasten zeigen sich die Winglets vorteilhaft gegenüber einem längeren Blatt. V.a für die höheren WEA-Leistungsklassen, die aufgrund des größeren Radius höhere Umfangsgeschwindigkeiten aufweisen, kann die Längeneinsparung und die Schallreduzierung durch Winglets (s. Kap. 4.4.7) vorteilhaft sein.

Winglets werden bei WEA bei der ganzen Produktpalette der Fa. Enercon eingesetzt. Sie werden, wie bereits erwähnt, einseitig, in Richtung Druckseite und mit einer Höhe von ca. 1% der Rotorblattlänge eingebaut. Sie werden aus Guss-Aluminium gefertigt. Auch weitere Hersteller untersuchen aktuell den Einsatz von Winglets.

Zusammenfassend werden Winglets bei kommerziellen WEA eingesetzt. Insbesondere für WEA der Multimegawatt- und Offshore-Klassen (s. Kap. 3.1) können die Längeneinsparung und mögliche Schallreduzierung durch Winglets von Bedeutung sein. Eine Erhöhung der Leistung wird allerdings von einer Erhöhung der Schubkraft begleitet. Aus der Recherche zu Winglets bei WEA wird Forschungsbedarf im Bereich Geometrieoptimierung, die zur Unterbindung des Induzierten Widerstandes mit einer möglichst kleinen Erhöhung der Schubkraft führen, abgeleitet. Forschungsbedarf liegt zusätzlich im Bereich Akustik vor [70].

### 5.3.2 Gurney-Flap

Ein Profil mit Gurney-Flaps (GF) weist eine kleine, feste, abgewinkelte Hinterkante auf (s. Bild 5-4). Sie werden üblicherweise als rechtwinkliges Profil an den Hinterkanten des Blattes angebracht. Die Erfahrung bei weiteren technischen Anwendungen kommt v.a. aus der Fahrzeug- und Flugzeugindustrie. Bei Stall-WEA wurden GF häufig auch in Kombination mit Vortex-Generatoren (s. Kap. 5.3.4) eingesetzt [26].



**Bild 5-4. Schema der Hinterkantenumströmung mit Gurney-Flap**

Bei WEA sind Varianten von GF mit konstruktiven Winkeln von  $10^\circ$  bis zu  $90^\circ$  bekannt. Auch die Höhe des Elementes ist variabel, üblicherweise im Bereich von 0,5 bis 3% der Profiltiefe. Optimierte Formen von GF für WEA sind in [73] zu finden.

Die Strömung um GF ist durch einen Druckanstieg vor dem Flap und Druckabfall dahinter charakterisiert. Der erwünschte Effekt bei der Nutzung von GF ist die Zirkulationserhöhung. Der Abströmwinkel, definiert als der Winkel zwischen Profilsehne und Richtung der Abströmung (s. Bild 5-4), und der Umlenkwinkel, definiert als der Winkel zwischen Richtung der Anströmung und Abströmung, werden gesteigert. Der Ablösebereich wird hinter die Gurney-Flaps verlegt. Der erhöhte Auftrieb ist mit Widerstandszunahme und Nachlaufinstabilitäten verbunden. Die Wirkung ist vom Anstellwinkel und von der Re-Zahl unabhängig.

[26] stellt Ergebnisse der Untersuchungen an GF mittels zweidimensionaler Experimente im Windkanal für WEA-Profile der inneren und mittleren Bereiche vor. Es wurde eine Erhöhung

des maximalen Auftriebsbeiwertes, begleitet durch ein Absinken der maximalen Gleitzahl, bestätigt. Im Widerspruch dazu kamen weitere Untersuchungen zum Ergebnis, dass bei Begrenzung der Höhe der GF maximal auf die Grenzschichtdicke von einer nicht signifikanten Widerstandserhöhung auszugehen ist; ebenso wird an der Stelle von einer Verbesserung der Gleitzahlen berichtet [74].

Aufgrund der Verdickung der Hinterkante wird von einem negativen Effekt auf die Akustik ausgegangen. Nach Angaben von einem deutschen WEA-Hersteller im persönlichen Gespräch wurde in der Praxis durch den Einsatz von Gurney-Flaps keine Leistungssteigerung nachgewiesen.

Zusammenfassend soll die Bewertung der Nutzung von GF bei WEA die möglichen negativen Auswirkungen auf die Akustik [74] sowie die Widerstandszunahme [26] berücksichtigen. Da diese beide Nachteile für den Nabenbereich weniger signifikant als für den äußeren Bereichen sind [73], soll eine Nutzung von GF auf den Nabenbereich begrenzt werden [26]. Wissenschaftliche Untersuchungen, die eine Verbesserung des Rotorleistungsbeiwertes durch den Einsatz von GF bei WEA beweisen, sind nicht bekannt.

### 5.3.3 Turbulator

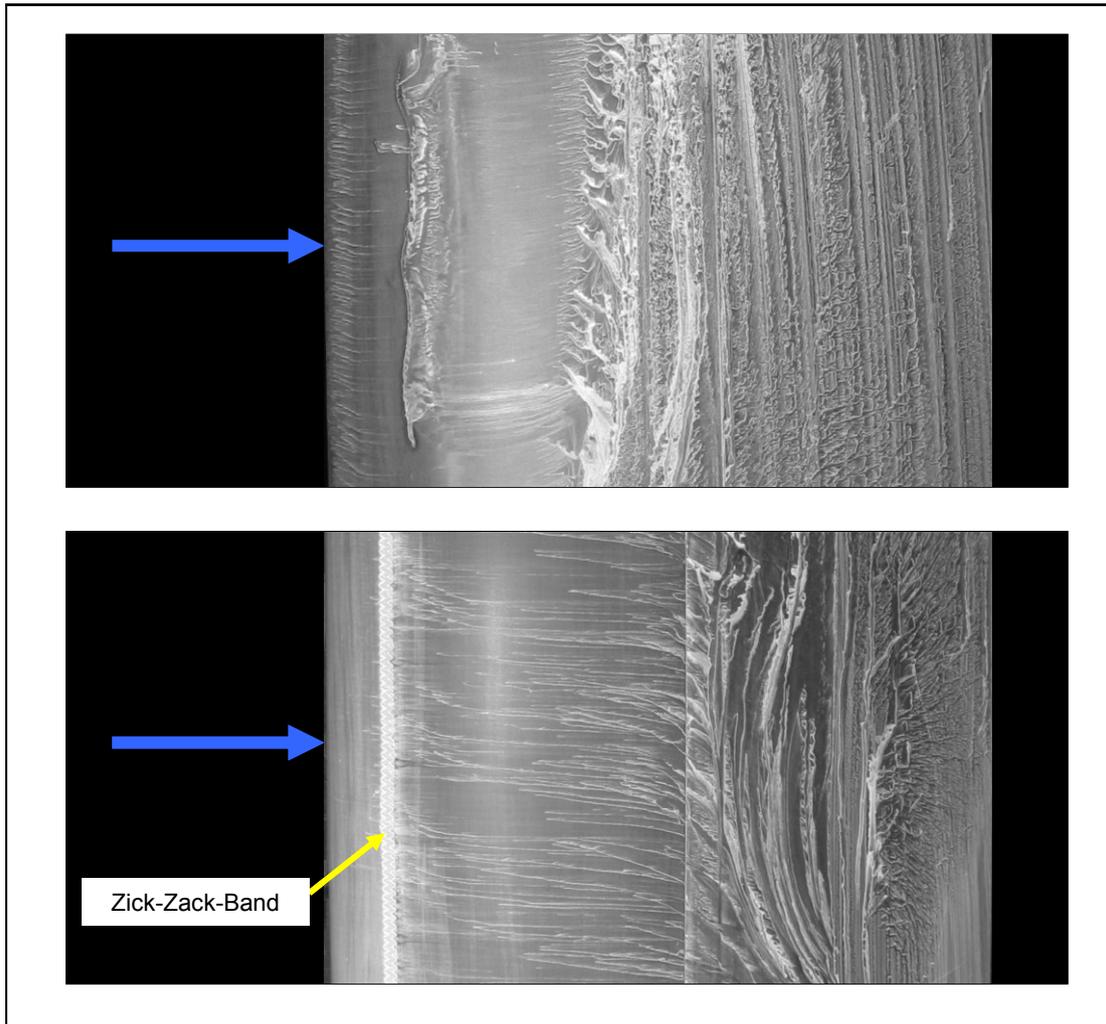
Beispiele von Turbulatoren sind Turbulenzstreifen (roughness trips), auch Transitionsstreifen genannt, und Zick-Zack-Bänder (zig-zag tapes). Drei Ziele können mit der Nutzung von Turbulatoren erreicht werden:

- Festlegung der Transitionsstelle,
- Vermeidung des Entstehens von laminaren Ablöseblasen und
- Verlagerung oder Verhinderung der Ablösung.

Die Turbulatoren erhöhen die Rauigkeit der Profiloberfläche und erzwingen somit die Transition. Dadurch wird die Ablösung stromabwärts verlagert oder sogar verhindert. Der Einsatz ist v.a. im niedrigen Re-Zahl-Bereich sinnvoll. Die Platzierung der Turbulatoren erfolgt überwiegend am Vorderkanten-Bereich (Profilnase) auf der Saug- sowie Druckseite. Turbulatoren entsprechen einer großen Störung in der Grenzschicht, die nicht unnötig stark verdickt werden soll. Die Literatur [66, 75] erklärt die Auswahl des geeigneten Typs, der Geometrie und Werkstoffe des Turbulators je nach Anwendungsfall.

Turbulatoren werden häufig bei Windkanal-Experimenten eingesetzt, um die Festlegung der Transitionsstelle zu ermöglichen und das Entstehen von laminaren Ablösungsblasen zu verhindern [75]. Der Einsatz ist, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, im Fall z.B. von Re-Zahl-Einschränkungen oder bei gegen Rauigkeit hoch empfindlichen Modellen von großem Vorteil. Betriebsbedingungen wie z.B. bei Belegungen mit Schmutzpartikeln wurden häufig durch Turbulatoren bei Modelluntersuchungen simuliert [31].

Auch in der vorliegenden Arbeit wurden Zick-Zack Bänder bei 10% der Profiltiefe des Profils bei den Windkanal-Experimenten eingesetzt (s. Kap. 6.5.5). Die Visualisierung mittels Farbanstrichversuche der Umströmung am Profilmmodell wird im Fall ohne Turbulator auf der oberen Aufnahme und mit Zick-Zack-Band auf der unteren Aufnahme am Bild 5-5 gezeigt. Die Saugseite des Profils wird hier dargestellt.



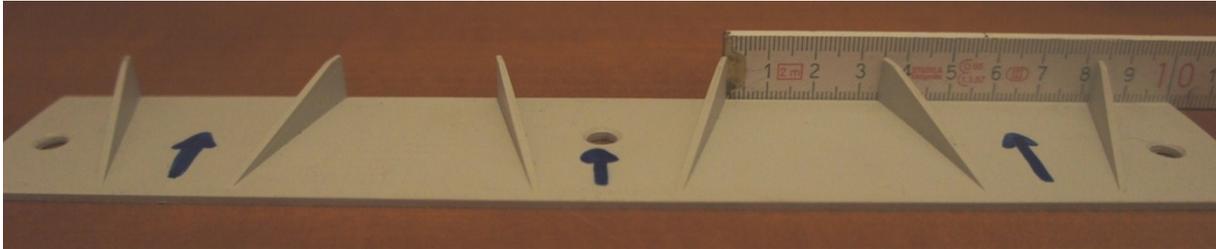
**Bild 5-5. Farbanstrich-Ergebnisse der Strömungsbeeinflussung durch Zick-Zack-Band am Profilmodell bei Windkanaluntersuchungen (oben ohne, unten mit Zick-Zack-Band)**

Turbulatoren werden bei kommerziellen WEA eingesetzt. Bei Stall-WEA waren sie nach [26] sehr verbreitet, um den Leistungspeak (s. Bild 3-3) abzugleichen. Sie werden bei WEA direkt an der Profilnase und von der Mitte bis zur Spitze des Rotorblattes eingesetzt [31]. Über eine Nutzung von Turbulatoren bei Pitch-WEA ab der Megawatt-Klasse ist derzeit nichts bekannt.

#### 5.3.4 Vortex-Generator

Vortex-Generatoren (VG), auch Wirbelgeneratoren genannt, sind auf der Oberfläche angebrachte Teile, häufig in Form von Dreiecken, die unter einem festen definierten Winkel zur Anströmrichtung stehen (s. Bild 5-6). Das Bild entspricht einem originalen VG-Element, das von einer WEA der 600kW-Klasse abgebaut worden ist. VG werden auf der Saugseite

üblicherweise im vorderen Bereich eines Profils platziert. Die übliche Position entspricht 10 bis 30% der Profiltiefe [76].



**Bild 5-6. Originaler bei WEA eingesetzter Vortex-Generator**

VG sind seit mehr als 60 Jahren bekannt und die Erfahrung bei anderen Anwendungen kommt v.a. aus dem Flug-, Segelflug- und Fahrzeugbau aber auch von Turbomaschinen [66]. Bei WEA wird seit knapp 20 Jahren am Thema VG geforscht.

Die Höhe der Elemente variiert bis zur Höhe der Grenzschichtdicke, aber auch über diese Höhe hinaus. Für Geometrieparameter und Auslegung von VG wird auf [66, 77, 78] verwiesen. Die Nutzung von sogenannten „Micro-VG“ oder „Sub-Boundary-Layer-VG“, die eine Höhe von 10% bis 50% der Grenzschichtdicke aufweisen, wird mehrfach als bessere Lösung hingewiesen.

VG erzeugen Wirbel und damit können sie Energie aus der Außenströmung in die turbulente Grenzschicht übertragen. Sie erhöhen den Turbulenzgrad, den Impuls und die Energie im wandnahen Strömungsbereich [66]. Dadurch ist die Strömung in der Lage, starken Druckanstieg ohne Ablösung zu überwinden. Die Grenzschicht wird dünner [77]. Die Ablösung wird stromabwärts verlagert oder gänzlich verhindert. Durch die Verhinderung der Ablösung kann zusätzlich zur aerodynamischen eine akustische Verbesserung erzielt werden. Die Nutzung von VG reduziert die Empfindlichkeit der Profile gegenüber Schmutzablagerungen [31].

Bei aerodynamischen Profilen wird der lineare Bereich der Auftriebsbeiwertskurve (s. Bild 3-2) durch den Einsatz von VG kaum beeinflusst. Jedoch wird eine Steigerung des maximalen Auftriebsbeiwertes  $c_{A,max}$  und des kritischen Anstellwinkels erreicht [26, 78]. Der Einsatz von VG ist somit bei hohen Anstellwinkeln sinnvoll. Dies begründet, dass VG bei Stall-WEA verbreitet eingesetzt wurden. Bei niedrigen Anstellwinkeln wird ein erhöhter Widerstand ohne Nutzen zum Auftrieb erzeugt und ergibt eine Verschlechterung der Gleitzahl. Werden die VG

auf Off-Design-Betriebspunkte ausgelegt, verschlechtert sich der Rotorwirkungsgrad aufgrund des zusätzlichen Widerstandes im Auslegungspunkt [66].

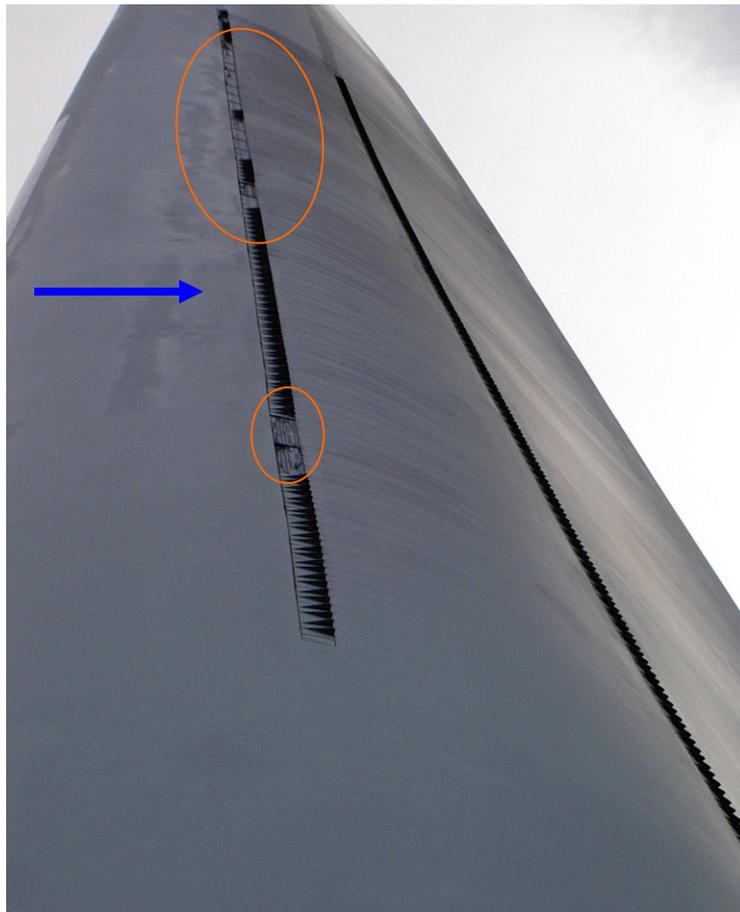
[31] zeigt Ergebnisse zweidimensionaler Experimente im Windkanal für WEA-Profilen mit Einbringung von VG allein oder kombiniert mit Zick-Zack-Band. Die Erhöhung des maximalen Auftriebsbeiwertes zusammen mit einem Absinken der maximalen Gleitzahl wurde gemessen. [31] beurteilt die Nutzung von VG positiv bei Stall-WEA im Naben- und mittleren Bereich. VG wurde als strömungsbeeinflussende Maßnahme bei dicken Profilen im Nabenbereich von Stall-WEA von der Firma LM Glasfiber bereits bei dem Blatt 19.1 eingesetzt. Durch die Anwendung in diesem Bereich sind nach Herstellerangabe 4 bis 6% Steigerung des jährlichen Ertrages mit der Nutzung von VG erreichbar [79]. Nach der Recherche beziehen sich die Werte auf Stall-WEA. Der Einsatz von VG ist noch aktuell [79].

Der Hersteller Vestas berichtet in [78] von Leistungsverbesserungen und aeroakustischen Optimierungen infolge der Verwendung von VG. Die Veröffentlichung ist aus dem Jahr 2010 und beweist somit die Aktualität des Themas. In [78] wird von Untersuchungen mittels RANS-Simulationen mit der sogenannten „Immersed Boundary Method“ berichtet. Von RANS 2D- und 3D-Simulationen wird in [76] berichtet.

Bei kommerziellen Pitch-WEA eines weiteren Herstellers werden VG entlang des ganzen Blattes platziert. Bei numerischen Untersuchungen dieser Anlage ergab sich ein breites Ablösegebiet entlang der ganzen Blattspannweite, d.h. auch für den mittleren und äußeren Blattbereich sowie für einen breiteren Windgeschwindigkeitsbereich inkl. Auslegungspunkt. Eine mögliche unzureichende Blattverwindung oder ein ungünstiger Pitchwinkel können Ursachen für die ausgeprägte Ablösung sein. Die Strömungsbeeinflussung mit VG stellt in solchen Fällen keine Lösung dar.

Auf die eingeschränkte Zugänglichkeit zu WEA-Rotorblättern zur Wartung und Inspektion muss geachtet werden. Dienstleistungsanbieter berichten, dass die VG sich stellenweise während des Betriebes von der Blattoberfläche lösen (s. Bild 5-7) oder durch Vereisung beschädigt werden. Dadurch bildet sich eine aerodynamische Ungleichmäßigkeit zwischen den drei Blättern, die Unwucht und Schwingungen verursachen.

Zusammenfassend wird die Maßnahme VG bei hohen Anstellwinkeln sinnvoll eingesetzt und in Naben- und mittleren Bereich v.a. bei Stall-WEA aufgrund einer Erhöhung des Auftriebes und Ertrages positiv beurteilt. Durch die Ablösungsvermeidung kann eine akustische Verbesserung erreicht werden. Numerische Untersuchungen von Rotorblättern mit VG entsprechen einem offenen Forschungsbedarf.



**Bild 5-7. Vortex-Generatoren auf dem Rotorblatt einer kommerziellen WEA mit Hinweis auf Stellen abgelöster Elemente [80]**

### 5.3.5 Grenzschichtzaun

Grenzschichtzäune (GSZ) sind Wände, die parallel zur Hauptströmung angebracht werden und somit als Hindernisse zur Querströmung wirken. Im Gegensatz zur Erwartung aufgrund der Benennung sind die GSZ keine direkte Maßnahme zur alleinigen Beeinflussung der Grenzschicht [19], da sie häufig ein Vielfaches der Grenzschichthöhe aufweisen. Nach [19] würde die mittlere Höhe der GSZ bei Flugzeugen etwa der Hälfte der Profildicke entsprechen. [81] zeigt mögliche verschiedene Geometrien für Grenzschichtzäune.

Der Grenzschichtzaun wurde vor mehr als 70 Jahren erfunden, um die Querströmung auf der oberen Seite von Pfeiltragflügeln zu begrenzen und eine Ausbreitung der Strömungsablösung zu vermeiden [81, 82]. Bei positiven gepfeilten Flügeln entsteht auf der Saugseite ein Druckabfall nach außen, der eine Querströmung der Grenzschicht hervorruft. Bei negativen gepfeilten Flügeln wird die Grenzschicht nach innen abgeströmt [19]. GSZ werden im Flugzeugbau vorwiegend bei Militärflugzeugen verwendet. Aktuell werden GSZ auch bei Ventilatoren und Gasturbinen zum Zweck der Reduktion der sekundären Strömung

eingesetzt [83, 84]. Auch bei WEA ist das Ziel des Einsatzes von GSZ, die im Anschlussbereich initiierte Querströmung zu unterbinden und einen Zuwachs der gesamten Leistung hervorzurufen.

Im Bild 5-8 sind zwei GSZ auf der Saugseite und ein Spoiler (s. Kap. 5.3.6) auf der Druckseite im Nabenbereich eines kommerziellen Rotorblattes einer WEA der Multimegawattklasse zu sehen [57, 85]. Von beiden passiven Maßnahmen wird bei WEA nach Recherche lediglich von einem Anlagenhersteller Gebrauch gemacht [86, 87].

Untersuchungen zu Grenzschichtzäunen wurden in [57, 87] am Beispiel von WEA-Rotoren der Multimegawattklasse durchgeführt. Die Untersuchungen basieren auf dreidimensionalen numerischen Simulationen und auf Beobachtungen und Messungen vom Hersteller im Betrieb. Die 3D-Simulation wurden für das Referenzblatt ohne strömungsbeeinflussende Maßnahmen und mit Einsatz von Grenzschichtzäunen durchgeführt. Simuliert wurden der Auslegungspunkt und ein ausgewählter Betriebspunkt bei Nennlast. Die folgende Betrachtung basiert auf veröffentlichten Erkenntnissen aus [57, 87] und eigene numerischen Untersuchungen (s. Anhang) bei einem selbst ausgelegten Rotorblatt.

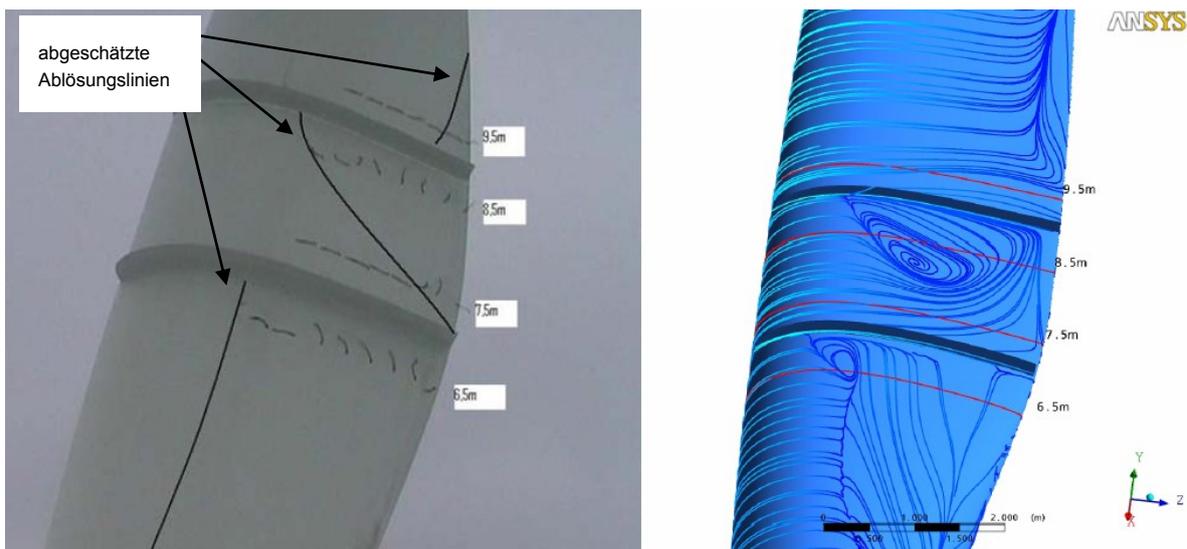
Das Bild 5-9 zeigt den Effekt der GSZ auf die Strömung durch Beobachtungen von aufgeklebten Wollfäden im Vergleich zu Ergebnissen von numerischen Simulationen im Auslegungsbetriebspunkt. Der innere GSZ ist bei  $0,17R$  und der äußere bei  $0,22R$  [57]. Die Lage der Wollfäden wird durch rote Linien auf dem Bild der CFD-Simulation gezeigt. Im Vergleich zum Bild ohne GSZ wird bei dieser Konfiguration eine Reduktion der Querströmung in Richtung des äußeren Grenzschichtzauns beobachtet. Ein Teil der Querströmung wird erfolgreich in die Hauptströmungsrichtung umgelenkt. Bei den Ergebnissen der Simulationen wurde, wie erwartet, das Entstehen von Wirbelstrukturen im Nachlauf der GSZ beobachtet.

Bei einer anderen Konfiguration wurde auf der äußeren Seite beider GSZ (zur Blattspitze) die Reduktion der Querströmung erreicht. Die Strömung erfährt eine starke Umlenkung, bleibt nach den numerischen Ergebnissen jedoch anliegend. Das Bild 5-10 zeigt CFD-Ergebnisse für die radiale Geschwindigkeit  $u_z$  auf der Saugseite des Blattes im Nabenbereich bei einer Iso-Oberfläche 10 mm und 100 mm über dem Blatt für den Referenzfall und mit GSZ im Betriebspunkt der Auslegungsschnelllaufzahl. Da die Koordinaten in Richtung Rotorachse definiert sind, zeigen die grauen Pfeile die tatsächliche Richtung der Strömung. Die Farbe rot weist auf fehlende Querströmung und die blaue Farbe in der Skala auf den höchsten Betrag der Querströmung. Eine Unterdrückung der Querströmung durch die GSZ lässt sich aus dem Bild erkennen.

In den Positionen der GSZ und in der unmittelbaren Nähe treten jeweils ein Auftriebseinbruch und eine Erhöhung des Widerstandes auf. Auf der äußeren Seite der GSZ werden nach den numerischen Ergebnissen im Vergleich zum Referenzblatt höhere Auftriebsbeiwerte berechnet. Insgesamt wurde eine minimale Leistungserhöhung von 0,6% berechnet [57].

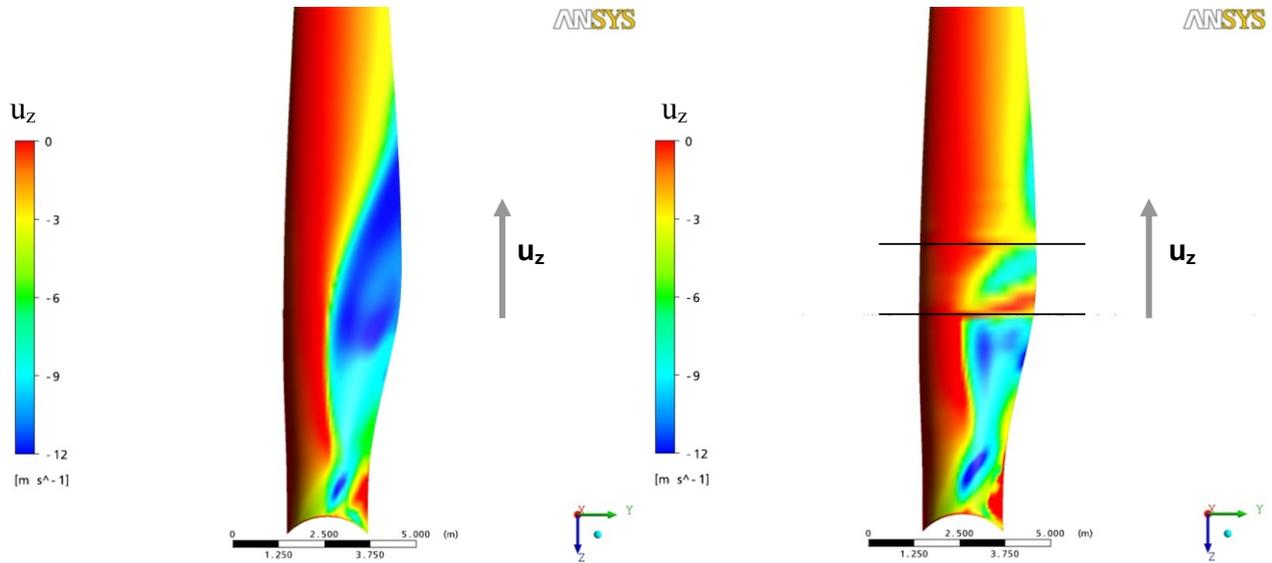


**Bild 5-8. Grenzschichtzäune auf der Saugseite und starrer Spoiler auf der Druckseite des Rotorblattes einer WEA der Multimegawattklasse [57,85]**

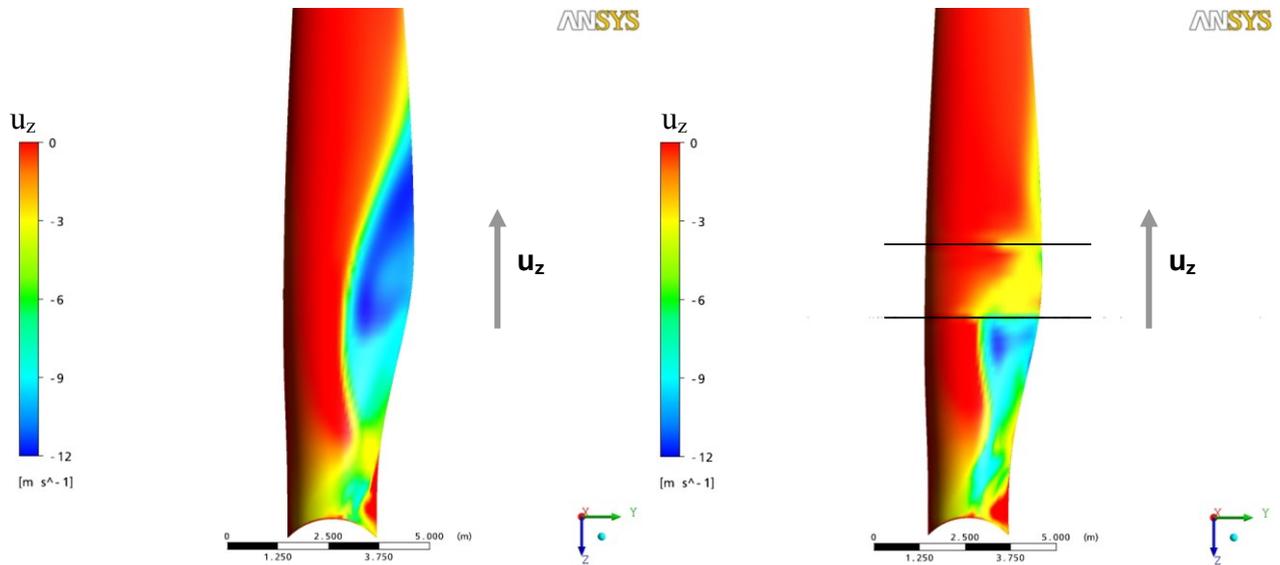


**Bild 5-9. Vergleich der Strömungsvisualisierung durch Wollfäden mit wandnahen Stromlinien aus der CFD Simulation bei Auslegungsschnellaufzahl [57]**

### 10 mm über die Rotorblattoberfläche



### 100 mm über die Rotorblattoberfläche



**Bild 5-10. Vergleich der Querströmung (Geschwindigkeit  $u_z$  in radialer Richtung) bei Auslegungsschnellaufzahl am Referenzblatt (links) und mit GSZ (rechts) bei Iso-Oberflächen 10 und 100 mm über die Rotorblattoberfläche, auf der Saugseite, im Nabenbereich (CFD Simulationen) [57,87]**

Es wird den dreidimensionalen und radialen Effekten eine positive Wirkung zugewiesen aufgrund der erhöhten Auftriebsbeiwerte und des erhöhten kritischen Anstellwinkels im Vergleich zu nicht rotierendem Fall. Die wichtige Erkenntnis aus den Untersuchungen zu GSZ ist allerdings, dass sich die Kontrolle der sekundären Strömung im Nabenbereich leicht positiv auf die Leistung auswirken kann. Dies deckt sich mit Ergebnissen von Untersuchungen zur unkonventionellen Nabenkonstruktion (s. Kap. 4.4.4).

### 5.3.6 Spoiler

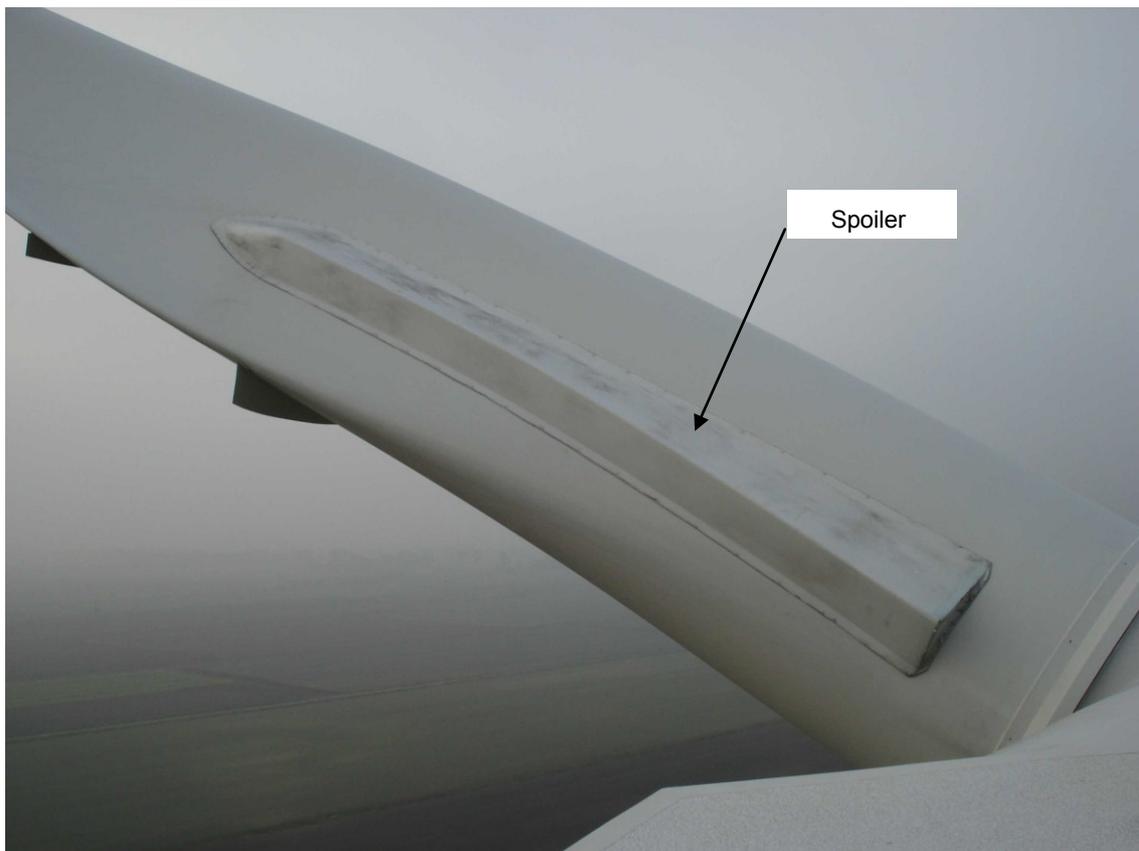
Bei Fahrzeugen entsprechen Spoiler starren Leitvorrichtungen (s. Bild 5-11) zur Verringerung des aerodynamischen Auftriebes und Widerstandes und werden als Front- und Heckspoiler eingesetzt [88]. Gewünscht ist v.a. die Erhöhung der Bodenhaftung und Fahrstabilität. Beim Flugzeugbau steht der Begriff für die wohlbekannte aktive strömungsbeeinflussende Maßnahme „Spoiler-Flap“, die bei Flugzeugflügeln auf der Saugseite angebracht wird, um den Auftrieb zu reduzieren und gleichzeitig den Widerstand zu erhöhen (s. Bild 5-11). Das Ziel ist eine rasche Verringerung der Fluggeschwindigkeit z.B. vor der Landung. Der Effekt zeichnet sich durch einen signifikanten Druckanstieg vor dem Spoiler und Verwirbelung im Nachlauf [89] aus. Auch bei WEA wurde der Begriff Spoiler bereits in Verbindung mit einer aktiven Klappe gebraucht, die auf der Saugseite des Profils zur Verminderung des Auftriebes angebracht wird [90].

Die für WEA hier betrachtete und untersuchte Konstruktion mit der Benennung Spoiler entspricht einem dreieckigen starren Körper (s. Bild 5-12), der auf der Druckseite des Rotorblattes im Nabenbereich angebracht wird. Die Konstruktion wird im Hinterkanten-Bereich positioniert. Die Benennung Spoiler richtet sich hier nach dem von einem WEA-Hersteller verbreiteten Begriff [87]. Die breiteste Seite des dreieckigen Körpers beträgt etwa 20% der lokalen Profiltiefe. Die Platzierung des Spoilers am Rotorblatt fängt bei etwa  $0,08R$  und endet bei  $0,17R$  [87]. Der Spoiler deckt somit in der Spannweite knapp unter 10% der Rotorblattlänge ab.

In Anlehnung zur GSZ, sind auch beim Spoiler Ziele des Einsatzes dieser passiven Maßnahme bei WEA die Auftriebserhöhung im Nabenbereich und die sich daraus ergebende Leistungsverbesserung. Ergebnisse von dreidimensionalen numerischen Simulationen zu dem starren Spoiler wurden in [57, 87] am Beispiel von WEA-Rotorblattsätzen der Multimegawattklasse veröffentlicht. Der starre Spoiler bewirkt bei einem WEA-Rotor eine starke Umlenkung der Strömung und eine Verlagerung der Ablösung in Richtung der Hinterkante bei den untersuchten Radiuspositionen. Aufgrund der Reduktion der abgelösten Strömung im Bereich der kreisförmigen und sehr dicken Profile wird die Strömung in der Weise beeinflusst, dass auf der Saugseite die Ausbreitung der Querströmung ebenfalls reduziert wird. Dies ist mit einer Reduzierung der Beträge der radialen Geschwindigkeiten verbunden. Der Abströmwinkel erfährt eine Erhöhung im Vergleich zum Referenzfall.



**Bild 5-11. Heckspoiler beim Personenfahrzeug (links) und Spoiler-Flap beim Flugzeug (rechts)**



**Bild 5-12. Starrer Spoiler bei WEA**

Exemplarisch wird das Profil bei 0,125R mit angebrachtem Spoiler für die Auslegungsschnelllaufzahl untersucht und mit dem Referenzblatt verglichen. Im Bild 5-13 sind im Profilschnitt 0,125R die Stromlinien, der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit um das Profil und der dimensionlose Druckbeiwert  $c_p$  über die Profiltiefe dargestellt. Es werden eine Druckerhöhung auf der Druckseite und eine ausgeprägte Saugspitze festgestellt. Höhere Druckbeiwerte werden auf der Saugseite des Profils beobachtet sowie die Verlagerung der Ablösung um 12% der Profiltiefe zur Hinterkante.

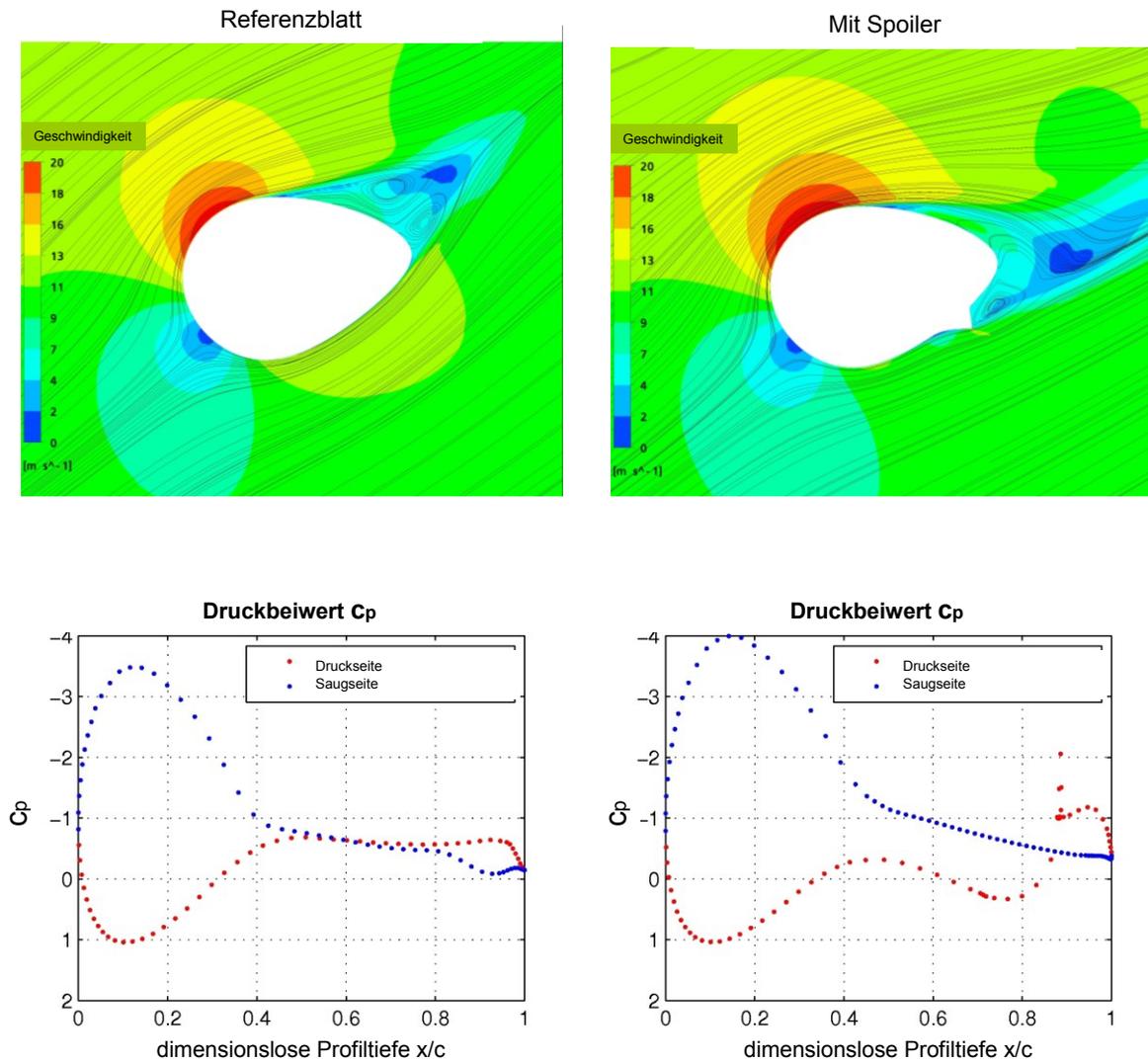
Nach [19] ist vor dem Auftreten ausgeprägter Saugspitzen zu warnen, da sie eine günstige Entwicklung der Grenzschicht am Profil stören, weil die Strömung einen sehr hohen Druckanstieg überwinden muss und dadurch zur Ablösung neigt. Im Gegensatz dazu wurde bei den durchgeführten Untersuchungen eine günstige Verlagerung der Ablösung Richtung Hinterkante beobachtet.

Im Vergleich zum Referenzblatt wird der Auftrieb im gesamten Spoiler-Spannbereich signifikant erhöht. Allerdings ist dies mit einer Verstärkung des Nachlaufwirbels und einer Erhöhung des Widerstandes und Schubes im Spoiler-Bereich verbunden. Insgesamt ergibt sich eine positive Auswirkung auf die Rotorleistungsbeiwerte im Spoiler-Bereich und benachbarten Bereiche in Richtung Blattspitze. Es ist zu bemerken, dass die Wirkung für die verschiedenen Betriebspunkte stark variiert. Ein Leistungsverlust bei Betriebspunkten in Nennlast ist möglich.

Nach den Ergebnissen numerischer Untersuchung war die Verbesserung bei der gleichzeitigen Nutzung von GSZ und Spoiler nicht signifikant höher als beim Einsatz der einzelnen Elemente, und die Schuberrhöhung lag bei etwa 3%.

### 5.3.7 Rückstromklappe

Die frei bewegliche Rückstromklappe ist ein passives strömungsbeeinflussendes Element, das eine Aufteilung des Ablösegebietes im Profilhinterkantenbereich bewirkt. Die Maßnahme ähnelt von der konstruktiven Seite her dem aktiven Spoiler-Flap-Konzept (s. Bild 5-11 rechts). Der physikalische Effekt ist allerdings umgekehrt, da hier eine Auftriebserhöhung erwünscht ist. Von einer örtlichen Begrenzung und Verminderung der Rückströmung und eine Stabilisierung des Nachlaufstroms bei relativ niedrigen Anstellwinkeln (bspw. im Bereich von  $8^\circ$  bis  $18^\circ$ ) wird in [91] berichtet. Wird die Rückstromklappe aktiv betätigt und dabei ungünstig eingestellt, verringert sich der Auftrieb wie beim Spoiler-Flap-Konzept [91]. Die Klappe ist frei beweglich und stellt sich aufgrund des im Vergleich zum Bereich vor der Klappe durch den aufgrund der Ablösung erhöhten Druck von allein auf. Frei bewegliche Rückstromklappen sind nur für Anwendungen geeignet, die keine Querströmungen aufweisen, sonst können sich die Klappen nicht selbst regulieren.



**Bild 5-13. Profilschnitt bei 0,125R: links Referenzblatt, rechts mit Spoiler  
Oben: Stromlinien und Betrag der Strömungsgeschwindigkeit um das Profil  
Unten: Darstellung des Druckbeiwertes  $c_p$  über die Profiltiefe**

## 5.4 Aktive Strömungsbeeinflussung bei WEA

Die Nutzung der aktiven Strömungsbeeinflussung bei WEA wird gegenwärtig intensiv erforscht. Die aktiven Maßnahmen werden maßgebend zur Lastenkontrolle konzipiert, d.h. strukturelle Entlastung des Rotors und der Anlage, und sind international unter dem englischen Ausdruck „Smart Rotor Control“ bekannt [9]. Ziel ist eine aktive Beeinflussung des aerodynamischen Auftriebes und des Anstellwinkels [68].

Bei einer WEA ist je nach Standort mit kurzfristigen und häufigen Änderungen der Anströmbedingungen zu rechnen. Dabei ändern sich die Anströmgeschwindigkeit, der Anstellwinkel und der Turbulenzgrad. Die aktiven Techniken der Strömungsbeeinflussung können auf solche Veränderungen der Anströmbedingungen reagieren, während die passiven Techniken üblicherweise an einem einzelnen Betriebspunkt optimale Auswirkung zeigen und bei weiteren Arbeitspunkten sich u.U. nachteilig auswirken.

Die konstruktive Integration der aktiven Maßnahmen am Rotorblatt ist im Vergleich zu passiven Strömungselementen aufwändiger. Hingegen ist die aerodynamische und aeroelastische Optimierung durch die Möglichkeit der Regelung und Steuerung vielversprechend. Die Forschung zum Thema verlangt daher eine enge Zusammenarbeit mit Rotorblattherstellern.

[9, 10, 68] bieten aktuelle und ausführliche Informationen zum Stand der weltweiten Forschung der „Smart Blade Control“-Techniken für die WEA. Die aktiven Maßnahmen werden daher im Folgenden nur kurz eingeleitet. Die aktiven Techniken der Strömungsbeeinflussung werden hier unterteilt in Maßnahmen zur aktiven Wölbungsänderung und Hinterkanten-Konzepte und Maßnahmen zur Grenzschichtbeeinflussung. Die Maßnahme Grenzschichtabsaugung wird im Kapitel 6 speziell betrachtet und vertieft.

### 5.4.1 Aktive Wölbungsänderung und Hinterkanten-Konzepte

Verschiedene Varianten werden aktuell zur aktiven Veränderung der Wölbung eines Profils untersucht. Das Ziel dabei ist die Reduzierung der strukturellen Wechsellasten am Rotorblatt, die nach [92] mit den unten aufgelisteten Konzepten effektiver zu erreichen ist als mit der traditionellen Pitch-Verstellung. Die Systeme werden, auch wenn die Belastung an der Blattwurzel zu reduzieren ist, für die Spitzen- und Mittelblattbereiche konzipiert. Die Konzepte bewirken eine signifikante Veränderung des Auftriebes, indem die Profilwölbung aktiv umgestaltet wird. Die Techniken können für kurzfristige Änderungen der Anströmbedingungen eingesetzt werden. Durch die Profilformänderungen wird schnell auf die lokalen Schwankungen der aerodynamischen Kräfte reagiert, die Schwingungen und Wechsellasten verursachen.

Die Konzepte beinhalten:

- Hinterkanten-Klappen (auch Wölbungsklappen), auf Englisch „Trailing Edge Flaps“ oder „Ailerons“,
- Elastische Wölbungsänderung, auf Englisch „Variable Camber“,

- Elastische oder Flexible Hinterkante, auf Englisch „Continuous Deformable Trailing Edges“,
- Mikroklappen, auf Englisch „Microtabs“ und
- Aktive Verwindung, auf Englisch „Active Twist“.

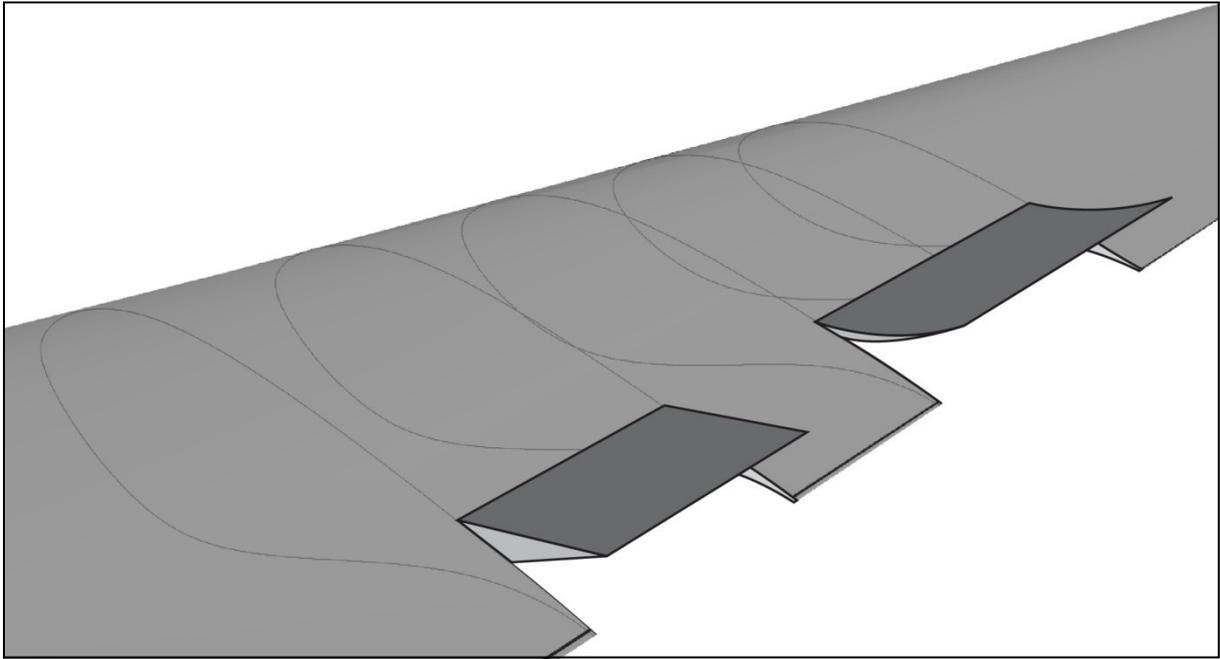
Die „Trailing Edge Flaps“ (TEF) sind aktiv bewegliche Hinterkanten-Klappen (s. Bild 5-14, nach Darstellung aus [7]). Die Klappe ersetzt die Hinterkante des Profils. Das Bild 5-15 zeigt ein Profilmodell zur experimentellen Untersuchungen [61, 92]. Die Länge der Klappen entspricht üblicherweise 10% der Profiltiefe. Wird die Klappe zur Druckseite bewegt, erhöht sich die Wölbung und folglich der maximale aerodynamische Auftrieb, und die aufgelöste Auftriebspolare (s. Bild 3-2) verschiebt sich nach links. Wird die Klappe in die entgegengesetzte Richtung bewegt, wird eine Reduzierung des Auftriebs erreicht. [10] fasst Ergebnisse von Untersuchungen zu diesem Thema zusammen. Im Allgemeinen ergab sich ein leichter Rückgang des Wirkungsgrades durch die Nutzung von TEF zur Lastenkontrolle bei Nennlast.

Bei der Technik der „Variable Camber“ (s. Bild 5-1) wird das ganze Profil und bei der Technik der „Continuous Deformable Trailing Edges“ (s. Bild 5-14, elastische Variante der Hinterkante-Klappe) lediglich die Hinterkante verändert. Die elastische Formänderung versucht den Knick in der Profilkontur zu vermeiden, der bei starren TEF einen Zusatzwiderstand verursacht [19]. Die Reduzierung von Strömungsablösungen mit der elastischen Variante im Vergleich zur starren Klappen wird bestätigt [92].

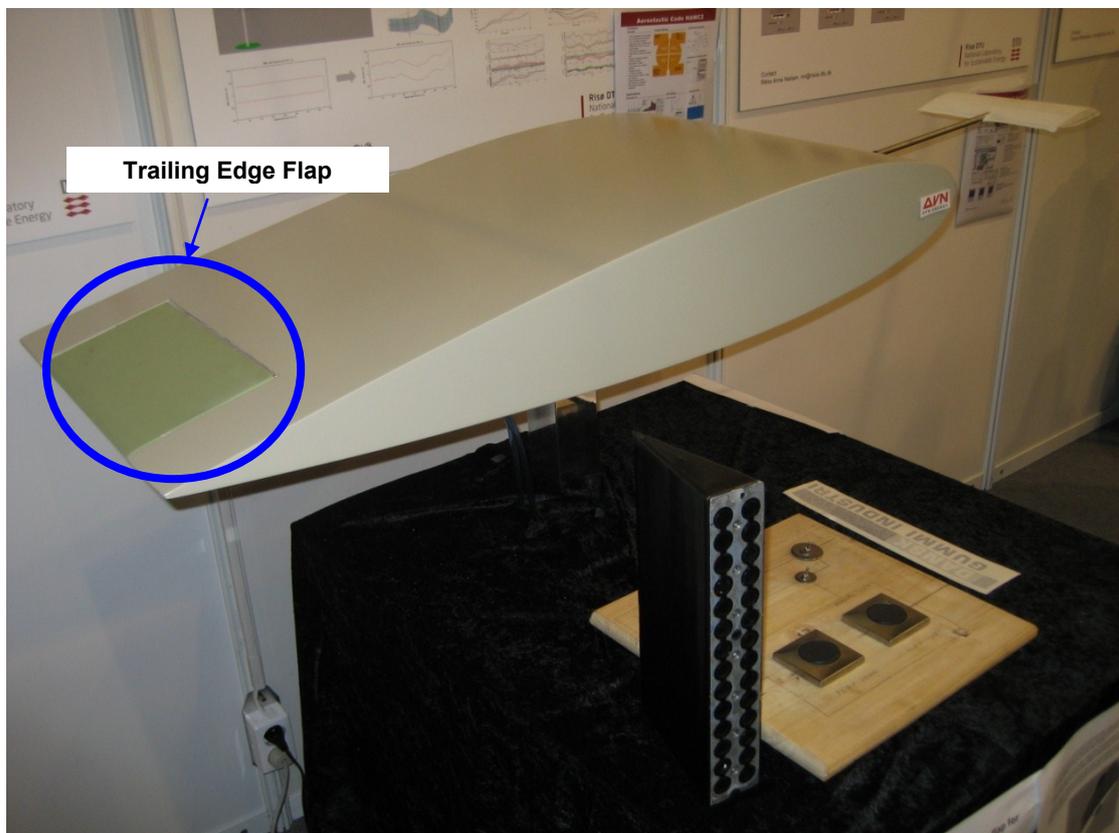
Das Bild 5-16 zeigt in welchem Bereich die Hinterkanten-Klappen an Rotorblättern von WEA positioniert werden können nach Ergebnissen aus [57]. Durch die Nutzung von 7 m elastischer Hinterkante an einem kommerziellen Rotorblatt mit 33 m Rotorradius wurde nach [92] 60% des Blattbiegemoment an der Wurzel (flapwise blade root moment) bei Anströmbedingungen mit 10% Turbulenzgrad reduziert.

Eine weitere Maßnahme, die Mikroklappen, stellt die aktive und optimierte Version der passiven Maßnahme Gurney-Flaps (s. Kap. 5.3.2) dar. Die Höhe der Mikroklappen entspricht üblicherweise 1% der Profiltiefe. Für die Geometriegestaltung muss noch berücksichtigt werden, dass die Mikroklappen ins Profil eingepasst werden, so können sie konstruktiv nicht direkt an der Profilhinterkante angebracht werden. Sie werden bspw. bei 95% der Profiltiefe installiert. Der Einsatz ist sowohl auf der Druckseite als auch auf der Saugseite möglich. Von einer Erhöhung der Auftriebsbeiwerte bis zu 50% wird in [10] berichtet. Vorteil gegenüber der passiven Maßnahme Gurney-Flap ist der geringere Widerstandszuwachs, da die Mikroklappen je nach Bedarf eingesetzt werden. Weiterhin bewirkt nach [10] der Einsatz von Mikroklappen eine signifikante und schnelle Reduktion der Blattspitzenbeugung (tip deflection), sowie eine Senkung der Extremlasten bzw. Wechsellasten um bis zu 9% bzw. 25%.

Bei „Active Twist“ (s. Bild 5-1) handelt sich um eine aktive Änderung der Verwindung des Rotorblattes entlang der ganzen Spannweite oder im äußeren Bereich. Der Anstellwinkel wird dadurch verändert. Aufgrund der Dimensionen der Rotorblättern von WEA und der Herausforderung des Entwurfes und der Fertigung eines auf Torsionsbeanspruchung leicht nachgebenden Blattes ist die Realisierung des Konzeptes fraglich [10].

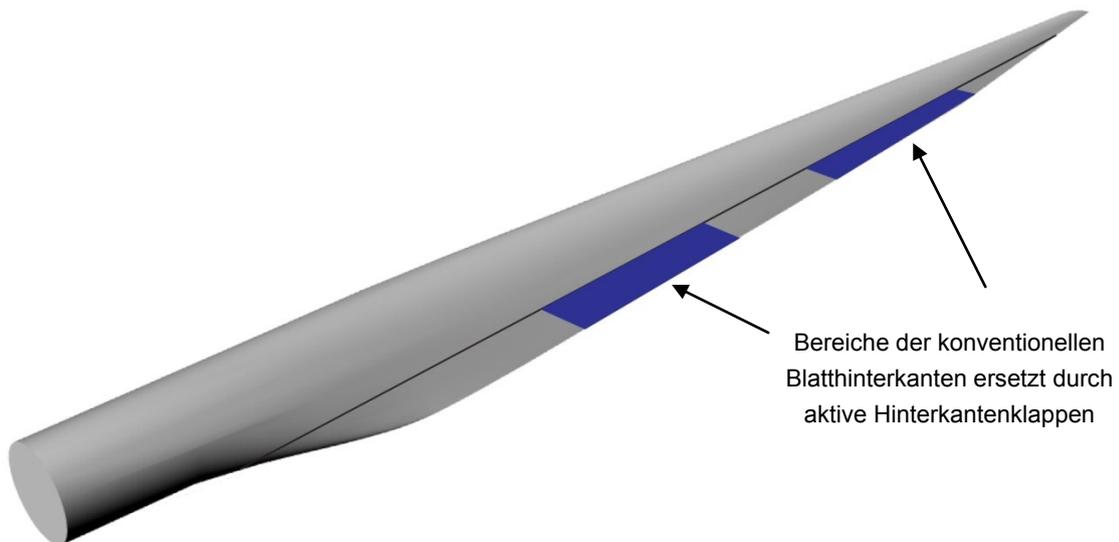


**Bild 5-14. Starre (links) und elastische (rechts) Varianten der Hinterkantenklappen (Trailing Edge Flaps)**



**Bild 5-15. Trailing Edge Flap (Hinterkantenklappe) am Profilmodell**

In [68] werden die konstruktiven Möglichkeiten der Realisierung unterschiedlicher Klappen-Konzepte und variabler Wölbung und Hinterkanten bei WEA erläutert, sowie die erforderliche Meß- und Regelungstechnik betrachtet.



**Bild 5-16. Exemplarisches Rotorblatt mit Trailing Edge Flaps**

#### 5.4.2 Aktive Maßnahmen zur Grenzschichtbeeinflussung

Aktive Maßnahmen zur Grenzschichtbeeinflussung, die bei WEA aerodynamische Optimierung versprechen, sind:

- kontinuierliches Ausblasen in die Grenzschicht,
- aktive Vortex-Generatoren, auf Englisch „Synthetic-Air-Jets“ und
- Absaugung der Grenzschicht.

Der Einsatz dieser Maßnahmen wird bei einigen WEA- und Rotorblattherstellern sowie Forschungseinrichtungen aktuell überprüft. Diese Untersuchungen und die Übertragung der Erfahrung aus anderen Anwendungsbereichen auf die WEA befinden sich jedoch noch im Anfangsstadium.

Das kontinuierliche Ausblasen von Luft in die Grenzschicht und Synthetic-Air-Jets (SAJ) sind Maßnahmen, bei denen Luft aus kleinen Öffnungen in der Profiloberfläche kontinuierlich oder pulsierend ausgeblasen wird, und dadurch entstehen Wirbel, die die Grenzschicht mit

Energie anreichern. Die Ablösung der Strömung kann somit verzögert bzw. vermieden werden, und eine Erhöhung des maximalen Auftriebsbeiwertes wird erreicht. Der Energieverbrauch der Aktuation beim periodischen Ausblasen ist geringer als für den kontinuierlichen Fall [93].

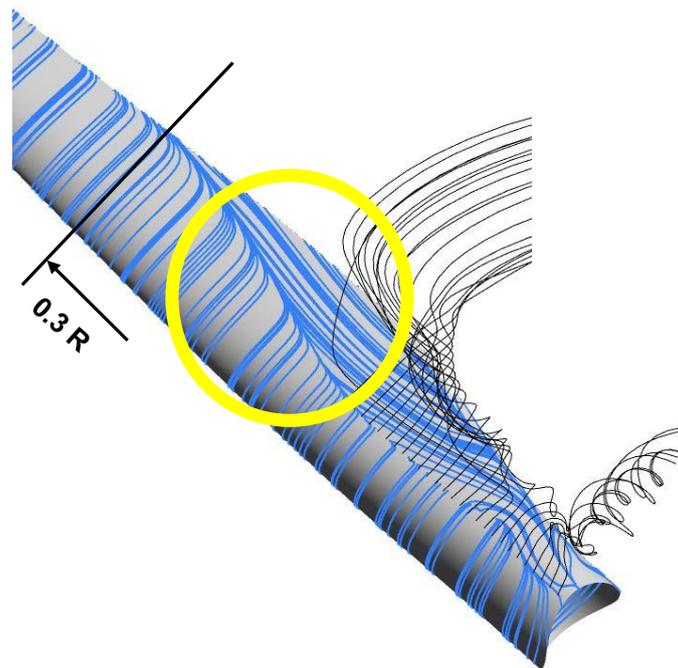
SAJ können Schwingungen, die sich aus dynamischer Ablösung ergeben, reduzieren [10]. Der Vorteil der SAJ gegenüber den passiven Vortex-Generatoren ist der geringere Widerstandszuwachs, v.a. bei geringeren Windgeschwindigkeiten. [78] bewertet allerdings die Nutzung von passiven Vortex-Generatoren aufgrund der Einfachheit der passiven Strömungselemente als vorteilig.

Die Absaugung der Grenzschicht wird im nächsten Kapitel behandelt. Aus den Ergebnissen der eigenen Untersuchungen mit Grenzschichtzäunen und starrem Spoiler entsteht eine positive Erwartung für den Einsatz der Grenzschichtabsaugung im Nabenbereich, welche im folgenden Kapitel ausführlich diskutiert wird. Das Ziel des Einsatzes der Grenzschichtabsaugung ist die Begrenzung der Ablösung im Nabenbereich.

## 6 Untersuchungen zur Grenzschichtabsaugung

### 6.1 Einleitung

Voruntersuchungen mit passiven strömungsbeeinflussenden Elementen im Innenbereich eines Rotorblattes zeigen die Möglichkeit der Steigerung des Rotorleistungsbeiwertes durch die spannweitige Begrenzung der Ablösung, die am Anschlussbereich des Rotorblattes entsteht (s. Kap. 4.4.3 und 5.3.5). Die Maßnahme der Absaugung könnte in der Lage sein, die abgelöste Strömung zu reduzieren, ohne zusätzlichen Widerstand und Schuberrhöhung zu erzeugen. Die konstruktive Integration der Maßnahme wird als beherrschbar bewertet. Der Einsatz von Grenzschichtabsaugung im betrachteten Innenbereich (s. Bild 6-1) ist daher eine Möglichkeit zur Verbesserung des Rotorwirkungsgrades in der Auslegungsschnelllaufzahl und im Teillastbereich. Die Maßnahme ist beispielsweise viel versprechend für Standorte mit zwei signifikanten Windgeschwindigkeitsklassen oder mit relativen hohen Turbulenzgraden.



**Bild 6-1. Mögliche Lage für den Einsatz von Grenzschichtabsaugung im Nabenbereich eines WEA-Rotorblattes**

Es sind wenige Untersuchungen zur dreidimensionalen Strömung bei Grenzschichtabsaugung vorhanden [94]. Weiter erlaubt die turbulente Umströmung eines aerodynamischen Profils mit ausgeprägtem abgelösten Bereich keine vollständige theoretische Behandlung [65, 94], weshalb diese meist durch Versuchsergebnisse unterstützt werden. Auch in dieser Arbeit wird dieser Weg verfolgt und zweidimensionale Windkanal-Experimente zur direkten Kontrolle der Ablösung mittels der Grenzschichtabsaugung bei einem für WEA ausgelegten aerodynamischen Profil durchgeführt. Die zweidimensionalen Versuche stellen gegenüber dem idealen Fall eines WEA-Prototyps oder Modells aufgrund der niedrigeren Kosten einen sinnvollen Ansatz dar.

## **6.2 Stand der Technik**

Die Grenzschichtabsaugung ist eine bekannte Methode zur Strömungsbeeinflussung, die aerodynamische, aeroelastische und akustische Optimierungen ermöglicht. Im Jahre 1904 hat Prandtl bereits die Grenzschichtabsaugung beim Kreiszyylinder erfolgreich angewendet [65]. Als technische Anwendung ist heute der Einsatz bei Windkanälen zu nennen. Die sogenannte Aktive Kanalwand (active wall-tunnel) wird mittels Ausblasen und Absaugen der Wandgrenzschicht durch poröse Wände gestaltet, mit dem Ziel, den Wandeinfluss zu einem Minimum zu reduzieren [75].

In der Luftfahrt berichtet Schrenk bereits im Jahr 1935 von Untersuchungen zum technischen Einsatz am Tragflügel. Es wird von einer Steigerung des Maximalauftriebes und einem Anliegen der Strömung bei höheren Anstellwinkeln im Vergleich zum Referenzfall ohne Absaugung berichtet [65]. Über positive Ergebnisse von verschiedenen Probeflügen mit Anwendung der Grenzschichtabsaugung bei Segelflugzeugen, militärischen Flugzeugen und Passagiermaschinen zum Zweck einer Widerstandsreduzierung wird in [66, 94, 95] ausführlich berichtet. Auch die weltweit größten Flugzeughersteller haben sich mit der Forschung zum Thema auseinander gesetzt [94].

Trotz der zahlreichen Versuche, die die Wirksamkeit der Maßnahme beweisen, ist ein serienreifer technischer Einsatz in der Luftfahrt nicht vorhanden [94]. Mehrere Faktoren, u.a. die Realisierung der Absaugsysteme, scheinen ein Hindernis darzustellen. Andererseits beweisen die zahlreiche Veröffentlichungen und die weltweiten Forschungsaktivitäten zur Grenzschichtabsaugung das weiterhin aktuelle Interesse der Wissenschaft an diesem Thema.

Speziell kann die Technik der Grenzschichtabsaugung zum Beheben des negativen Effektes der Grenzschichtabtragung in Richtung Flügelspitze bei positiven gepfeilten Flügeln (s. Kap. 5.3.5) eingesetzt werden [19, 94].

Bereits 1940 beschreibt [96] die Möglichkeit der Verhinderung der Ablösung für größere Anstellwinkel durch Schlitzabsaugung bei gepfeilten Flugzeugflügeln und schlägt konstruktive Lösungen vor, die eine passive Grenzschichtabsaugung ermöglichen und somit ein Absauggebläse ersetzen. Dabei werden Öffnungen an unterschiedlichen Stellen des Flügels miteinander verbunden und die Absaugung aus der sich ergebenden Druckdifferenz realisiert. Bei WEA kann eine passive Lösung mit einer Grenzschichtabsaugung im Nabenbereich und Ausblasen im Spitzenbereich gestaltet werden, indem die Öffnungen

leitend verbunden werden, so dass sich die Absaugung aus der Wirkung der Fliehkräfte ergibt [95].

Eine Realisierung der Grenzschichtabsaugung ist zum Zeitpunkt dieser Arbeit weder bei kommerziellen WEA, noch bei Anlagenprototypen umgesetzt worden. Anlagen- und Rotorblatthersteller zeigen jedoch reges Interesse für die Forschungsarbeiten zum Thema.

## 6.3 Grundlagen

### 6.3.1 Definition

Nach [65] handelt es sich um eine Grenzschichtabsaugung, wenn durch Öffnungen an der Körperwand der verzögerte Grenzschichtteil in das Innere des umströmten Körpers abgesaugt wird.

### 6.3.2 Physikalische Effekte und Ziele

Das Absaugen im Bereich des Druckanstieges verkleinert die Krümmung des Geschwindigkeitsprofils an der Wand, was im laminaren Fall eine Stabilisierung der laminaren Grenzschicht und damit eine Verschiebung der Ablösestelle nach hinten bedeutet [65]. Mit anderen Worten wird die Dicke der Grenzschicht durch eine Absaugung verringert und eine Heraufsetzung der Stabilitätsgrenze für das Geschwindigkeitsprofil mit Absaugung erreicht [65, 94]. Die Absaugung innerhalb der turbulenten Grenzschicht mindert die Dreidimensionalität der turbulenten Strukturen im wandnahen Bereich [94, 97]. Eine Verringerung einer Querströmung mittels Absaugung wird von [94] bestätigt, dabei trägt die Absaugung insgesamt zu einer Stabilisierung der Strömung bei.

Der übliche Effekt der Grenzschichtabsaugung ist die Laminarhaltung. Die Vergrößerung des laminaren Bereiches bei einem umströmten Profil oder eine Relaminarisierung der Strömung durch die Absaugung ergibt eine erwünschte Reduzierung des Reibungswiderstandes.

Der Einsatz der Grenzschichtabsaugung zur Verlagerung des abgelösten Bereiches in Stromabwärtsrichtung bzw. Vermeidung der Ablösung, die mit Auftriebseinbruch und Widerstandserhöhung verbunden ist, wird als direkte Kontrolle des abgelösten Strömungsbereiches klassifiziert. Diese wird in [66] als effektiv bewertet. Die Grenzschichtabsaugung innerhalb einer turbulenten Grenzschicht kann allerdings aufgrund der Erhöhung der Scherspannungen nicht als direkte Maßnahme zur Widerstandsreduzierung eingesetzt werden [65, 66].

Zusammenfassend sind die erwünschten Effekte einer Grenzschichtabsaugung bei umströmten aerodynamischen Profilen:

- die Verdünnung bzw. das Verhindern eines weiteren Zuwaches der Grenzschicht und
- der Aufbau eines völligen Geschwindigkeitsprofils (fuller velocity profile) der Grenzschicht [65, 94].

Ferner werden dadurch die:

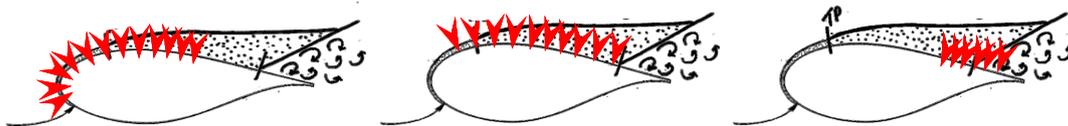
- Laminarhaltung,
- Relaminarisierung oder

- Verlagerung des Umschlags- und Ablösungspunkte stromabwärts erzielt.

Diese Arbeit richtet einen Fokus auf die technische Anwendung der Grenzschichtabsaugung. Für grundlegende Forschung zur Auswirkung der Grenzschichtabsaugung auf die Grenzschichtstruktur wird auf [94, 97] hingewiesen.

### 6.3.3 Lage, Art und geometrische Form der Absaugöffnungen

Zur Laminarhaltung wird die Absaugung vor die erwartete Transitionsstelle positioniert, wobei an der Druck- und Saugseite [19] oder lediglich an der Saugseite abgesaugt wird. Je weiter sich der Absaugungsbereich erstreckt, desto positiver ist der Einfluss auf die Grenzschicht, da kein abrupter Druckabfall durch die Absaugung erzeugt wird. Zur direkten Ablösungskontrolle kann die Lage der Absaugung im weiter entwickelten turbulenten Bereich vor oder sogar innerhalb des abgelösten Bereiches platziert werden (s. Bild 6-2).



TP: Umschlagpunkt (transition point)

**Bild 6-2. Mögliche Lage für den Einsatz von Grenzschichtabsaugung am Profil: Absaugbereich zur Transitionsbeeinflussung zum Zweck der Laminarhaltung (links und mitte), Absaugbereich zur Ablösungskontrolle (rechts).**

Eine Unterscheidung der Absaugart bzgl. der räumlichen Verteilung stellt die kontinuierliche und die diskrete Absaugung dar [65, 66, 94, 98]. Die kontinuierliche Absaugung wird durch eine poröse Wand realisiert. Bei der porösen Wand ist die Porengröße viel kleiner als die Grenzschichtdicke [66]. Die kontinuierliche Absaugung wird häufig im Zusammenhang mit einer homogenen Absaugung, die durch eine konstante Absauggeschwindigkeit in Strömungsrichtung definiert wird, sowie mit der Plattenumströmung in der Literatur aufgeführt. Der Einsatz von porösen Wänden stellt bei technischen Anwendungen strukturelle und produktionstechnische Herausforderungen dar [94].

Die diskrete Absaugung wird durch Schlitz- oder Lochabsaugung verwirklicht. Die Schlitzabsaugung kann durch einen einzelnen spannweiten Schlitz oder eine Reihe von spannweiten Schlitz in Stromrichtung realisiert werden. Bei der Lochabsaugung werden die Absauglöcher über eine breite Fläche verteilt, so dass von einer perforierten Absaugfläche mit niedriger bis höherer Porosität die Rede ist. Im Gegensatz zu einer porösen Wand weist die perforierte Fläche größere Lufteinlässe auf.

Ein Vergleich der Schlitz- und Lochabsaugung erfolgt in [66, 94, 99]. Untersuchungen zur diskreten Absaugung und zu dem Einfluss der Öffnungsform auf die nachlaufenden Wirbelstrukturen wurden in [94] durchgeführt. Vorteile ergaben sich bei der Nutzung der Absaugschlitze, da dreidimensionale instabile Störungen, die durch die Absaugkonfiguration selbst hervorgerufen werden, bei der Schlitzabsaugung im Vergleich zur Lochabsaugung weniger ausgeprägt sind. Dazu sind die Schlitze bezüglich der Strukturbeeinträchtigung auch von Vorteil. Nach [66] kann die diskrete Schlitzabsaugung, wenn über eine lange Strecke in der Strömungsrichtung realisiert, genauso effektiv sein wie eine kontinuierliche Absaugung.

Weitere Gestaltungsmöglichkeiten der Öffnungen, wie bspw. senkrechte oder tangentielle Absaugung, sind nach [100] aufgrund der Druckverluste wichtiger für den mechanischen Teil des Absaugungssystems als für die aerodynamische Optimierung. Die Gestaltung der Öffnungen spielt allerdings für die Akustik eine wichtige Rolle.

#### 6.3.4 Absaugvolumenstrom und dimensionslose Kennzahlen

Abhängig vom Absaugvolumenstrom kann zwischen einer schwachen Absaugung bis zur Überabsaugung unterschieden werden, wobei bei der schwachen Absaugung die Potentialströmung um die Grenzschicht unbeeinflusst bleibt [66]. Die schwache Absaugung entspricht dem niedrigsten Absaugvolumenstrom. Der Fall der Überabsaugung entspricht einer so starken Absaugung, dass eine vorzeitige Transition ausgelöst wird [94]. Diese frühzeitige Transition wurde bei Lochabsaugung beobachtet, wobei die stationäre Wirbelstruktur in Querrichtung zwischen benachbarten Löchern die Transition auslöst [94]. Auf die laminare Grenzschicht wirkt sich die Überabsaugung wie ein Turbulator aus [101].

Außerdem kann eine „Mindestabsaugmenge“ (Mindestabsaugvolumenstrom), die die größte Widerstandsminderung ermöglicht, definiert werden [65]. Wird mit der „Mindestabsaugmenge“ gearbeitet, ist auch eine Energieersparnis zur Bereitstellung des Unterdrucks bewerkstelligt und die Überabsaugung ausgeschlossen.

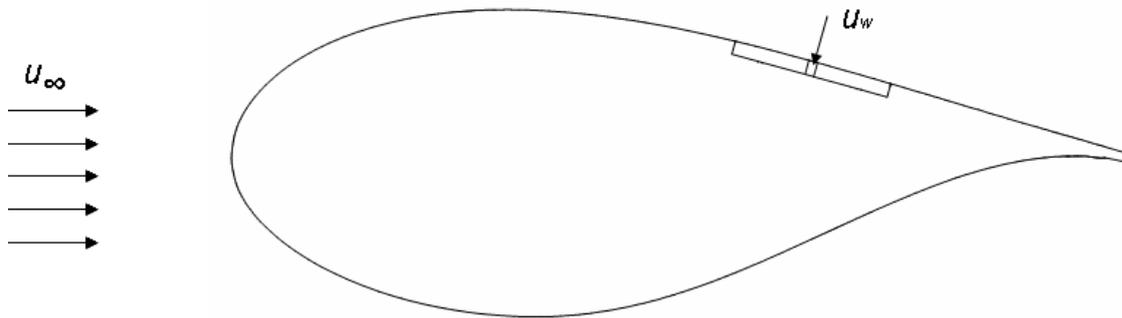
Die Absaugfläche, Absauggeschwindigkeit und der Absaugvolumenstrom sind voneinander abhängige Größen. Aufgrund der Übertragbarkeit der Ergebnisse und Reproduzierbarkeit von Versuchen und Simulationen sind dimensionslose Vergleichsgrößen von Vorteil. Im Folgenden werden zwei der bei Forschung zur Grenzschichtabsaugung häufig benutzten Kennzahlen erläutert.

#### **Absaugrate**

Nach [65, 66, 94, 97] wird als Absaugrate  $c_Q$  das Verhältnis zwischen der Absauggeschwindigkeit  $u_w$  (s. Bild 6-3), die senkrecht zur Wandoberfläche ist, und der ungestörten Anströmgeschwindigkeit  $u_\infty$  definiert:

$$c_Q = \frac{u_w}{u_\infty} . \tag{6-1}$$

In der englischsprachigen Literatur wird die Absaugrate als „suction rate“ oder „suction coefficient“ bezeichnet [66].



**Bild 6-3. Schematische Darstellung der definierten Absauggeschwindigkeit  $u_w$  und Anströmgeschwindigkeit  $u_\infty$**

### Theoretische Absaugrate

Symbolisiert mit  $\sigma$ , wird eine weitere dimensionslose Vergleichsgröße für die Schlitzabsaugung definiert, die in dieser Arbeit als „theoretische Absaugrate“ benannt wird. In der englischsprachigen Literatur am Beispiel von [97] wird  $\sigma$  genauso wie  $c_Q$  „suction rate“ benannt und wie folgend definiert:

$$\sigma = \frac{u_w \cdot b}{u_\infty \cdot \delta_2}, \quad (6-2)$$

wobei  $b$  der Schlitztiefe (in Hauptströmungsrichtung, senkrecht zu  $u_w$ ) und  $\delta_2$  der Impulsverlustdicke der Grenzschicht [58, 65, 66] der ungestörten Strömung in der Schlitzlage entsprechen. Es ist anzumerken, dass die Grenzschichtentwicklung durch die Absaugung gezielt beeinflusst wird und die Grenzschichtdicken somit im Absaugfall schmäler werden als die im Fall ohne Absaugung.

Nach [97] würde ein Wert von 10 für die theoretische Absaugrate  $\sigma$  zur Absaugung der vollständigen Grenzschicht führen. Weitere Orientierungswerte für die Absaugrate  $c_Q$  und die theoretische Absaugrate  $\sigma$  lassen sich v.a zum Zweck der Laminarhaltung oder Relaminarisierung für Experimente mit Plattenumströmung mit kontinuierlicher Absaugung in [70, 86, 87, 90] finden, allerdings nicht für den Fall der diskreten Absaugung zur direkten Ablösekontrolle bei Profilmströmung mit Druckgradient.

Da die Platzierung der Absaugstelle aufgrund des Grenzschichtzuwachses direkten Einfluss auf den benötigten Absaugvolumenstrom und die Absaugrate hat, ist zu erwarten, dass ein höherer Absaugvolumenstrom bei der Positionierung der Absaugstelle im Profilhinterbereich im Vergleich zur Nasenabsaugung erforderlich ist. Die effektiven Absaugraten sind Teil der Ergebnisse der experimentellen Versuche. Von Abweichungen zwischen der Einschätzung der Absaugraten und den empirischen Werten wird häufig berichtet, da die Absaugung die Entwicklung und die Dicken der Grenzschicht beeinflusst und in den Kennzahlen  $\sigma$ , wie

bereits erwähnt, die Werte der ungestörten Grenzschicht berücksichtigt wird [98]. Dies unterstützt die Notwendigkeit von begleitenden experimentellen Untersuchungen.

## 6.4 Vorgehensweise der Untersuchungen

### 6.4.1 Experimentelle Untersuchungen

Ein zweidimensionales Profilmmodell samt Absaugsystem wird ausgelegt, gefertigt und anschließend im Windkanal getestet. Ein im Innenblattbereich von WEA übliches aerodynamisches Profil wird dafür ausgewählt. Die Absaugöffnungen werden hier auf der Saugseite des Profilmodells im weit entwickelten turbulenten Bereich bzw. innerhalb des abgelösten Bereiches platziert. Eine direkte Ablösungskontrolle ist vorgesehen.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen besteht aus dem Vergleich des Strömungsverhaltens um das Profil ohne und mit Einsatz der Grenzschichtabsaugung. Die stromabwärtige Verlagerung bzw. Vermeidung des abgelösten Bereiches wird mittels Farbanstrichversuche überprüft. Dabei wird das Strömungsverhalten bei Variation der Anstellwinkel, Absaugvolumenströme und Öffnungsformen untersucht. Die Druckverteilung um das Profil wird gemessen und der Einfluss der Grenzschichtabsaugung auf den Auftriebsbeiwert daraus ermittelt.

### 6.4.2 Numerische Untersuchungen mit XFOil

Das frei verfügbare Programm XFOil wurde in der Version 6.9.6 benutzt. Die Software basiert auf der Panel-Methode mit Transitionsbestimmung nach einem  $e^n$ -Verfahren (Envelope-Method) [102-104]. Die Nutzung dieser Software ist bei Profil- und Rotorblattentwicklung und aerodynamischer Forschung verbreitet [32, 105].

Das Programm XFOil wurde in dieser Arbeit für drei Aufgaben eingesetzt. Zum Ersten wurden mit XFOil Abschätzungen der Transitions- und Ablösestelle für eine Variation der Anstellwinkel und Reynoldszahlen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in der Festlegung der Lage der Absaugstelle und des im Windkanal eingesetzten Transitionsstreifens berücksichtigt. Zweitens wurden die Berechnungen der Impulsverlustdicke für eine Variation der Anstellwinkel zur ersten Abschätzung des Absaugvolumenstromes benutzt. Die Schlitztiefe wurde mit 1% der Profiltiefe festgelegt. Hierbei wurde mit der „Theoretischen Absaugrate“  $\sigma$  gearbeitet. Daraus ergab sich die Absauggeschwindigkeit  $u_w$  und der Absaugvolumenstrom

$\dot{V}$  konnte mit:

$$\dot{V} = u_w \cdot b \cdot l \tag{6-3}$$

berechnet werden, wobei  $l$  die Schlitzlänge (quer zur Strömungsrichtung) entspricht. Für die Berechnungen zur Lochabsaugung wurde eine vergleichbare Schlitzfläche angenommen.

Drittens wurden die Messergebnisse in Referenzfällen (d.h. ohne Absaugung) mit Ergebnissen von XFOil verglichen. Dieser Vergleich wird im Kap. 6.6.1 dargestellt.

### 6.4.3 Numerische Untersuchungen mit der CFD Software CFX 11.0

Zweidimensionale CFD-Simulationen wurden zur Abschätzung des Absaugvolumenstromes für verschiedene Anstellwinkel im Vorfeld der Experimente durchgeführt. Details zu den Randbedingungen der Simulationen und Bewertungen zu den Ergebnissen werden im Anhang betrachtet.

## 6.5 Versuchsaufbau und experimentelle Randbedingungen

### 6.5.1 Beschreibung des Windkanals

Die Experimente wurden am Windkanal des Instituts für Strömungsmechanik und Technische Akustik der Technischen Universität Berlin durchgeführt. Der Windkanal ist eine für niedrige Geschwindigkeiten ( $Ma < 0,2$ ) und stationären Betrieb ausgelegte Versuchseinrichtung. In dieser Arbeit wurde er, wie üblich, als geschlossener Kanal (nach Göttinger Bauart) betrieben. Der geschlossene Kreislauf erfordert einen niedrigeren Leistungsbedarf als der offene.

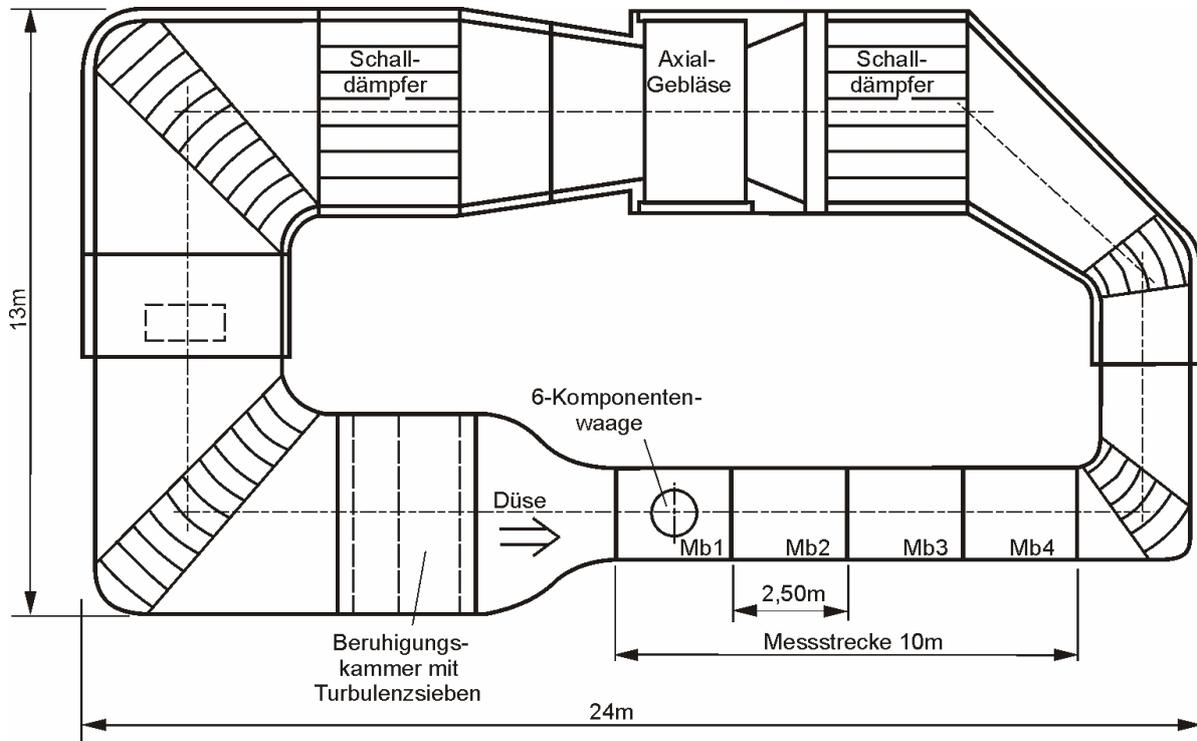
Eine Draufsicht des Windkanals ist in Bild 6-4 aus [106] zu sehen. Ein Axialgebläse mit einer Nennleistung von 500 kW kann Geschwindigkeiten von bis zu 40 m/s im stabilen Betrieb zur Verfügung stellen. Das Kontraktionsverhältnis entspricht 6,25:1. Der Turbulenzgrad des Kanals erreicht Werte bis maximal 1,5% [107]. Vier Positionen bei einer insgesamt 10 m langen Messstrecke sind auswählbar. Die zweite Messstrecke Mb2 wurde aufgrund der besseren optischen Zugänglichkeit gegenüber den weiteren Messstrecken bevorzugt. Der Querschnitt der Messstrecke ist 2,0 m breit und 1,4 m hoch. Ein Drehkranz erlaubt die Bewegung einer kreisförmigen Bodenplatte und damit die Einstellung des Anstellwinkels bei vertikaler Positionierung des Profils. Zwei Meter vor dem Modell in der ersten Messstrecke Mb1 wird die Anströmgeschwindigkeit mittels eines Prandtlrohres überprüft.

### 6.5.2 Aerodynamisches Profil

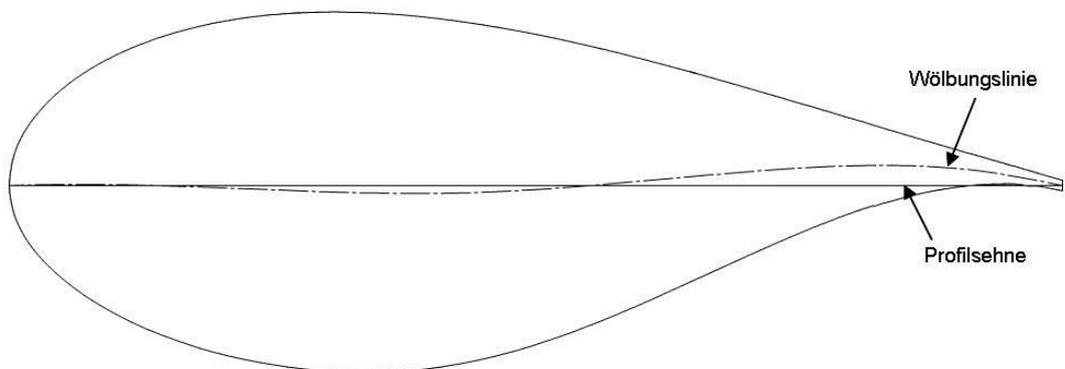
Die Auswahl eines exemplarischen Profils fiel auf das für Windenergieanlagen entwickelte dicke Profil DU-00-W2-350, das Einsatz im Innenbereich bis zur mittleren Lage der Rotorblätter verschiedener Hersteller findet und somit als Referenz für dicke Profile im Nabenbereich gilt (Kap. 3.4.2). Das Referenzprofil wurde für eine Re-Zahl von  $Re = 3 \times 10^6$  ausgelegt und weist ein relatives Dickenverhältnis von 35% bei 32% der Profiltiefe, eine maximale Wölbung von 2% bei 83% der Tiefe, sowie eine Hinterkantendicke von 1% auf (s. Bild 6-5). Die Geometriedaten des Profils DU-00-W2-350 wurden von der TU Delft nach Anfrage freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Die Versuche und Simulationen basieren exemplarisch auf dieser geometrischen Form.

Aerodynamische Messungen des Profils DU-00-W2-350 standen nicht zur Verfügung. Veröffentlichte Daten der ähnlichen Profilen DU-00-W-350 [31] und DU-97-W-351 [108] werden bei der Betrachtung der Ergebnisse einbezogen. Da Fertigungsungenauigkeiten beim Modellbau Formabweichungen verursachen können und auf eine spezielle Überprüfung der realisierten Geometrie hier verzichtet wurde, sind die hier dargestellten experimentellen Ergebnisse ohne eine Nachmessung des Modells nicht auf das Profil DU-

00-W2-350 direkt zu übertragen. Eine relative Betrachtung der Ergebnisse durch den Vergleich der Fälle mit und ohne Einsatz der Grenzschichtabsaugung wird hier vorgenommen.



**Bild 6-4. Draufsicht des Windkanals [106]**



**Bild 6-5. Form des Profils DU 00-W2-350 der TU Delft, mit Darstellung der Profelsehne und Wölbungslinie (Skelettlinie)**

### 6.5.3 Modellbau, Modelldimensionen, Deckelvarianten und Absauganlage

Ein zweidimensionales Modell des aerodynamischen Profils DU-00-W2-350 wurde in Spantkonstruktion aus Bauholz und Sperrholz gefertigt. Das Modell wird vertikal in der Messstrecke Mb2 platziert. Somit beträgt die Spannweite 1.400 mm. Die Modelltiefe  $c$  (Sehnenlänge des Profils) ist aus einem Kompromiss zwischen höchstmöglicher Re-Zahl und niedrigstmöglicher Verblockung des Kanals auf 500 mm festgelegt. Es wurde mit einer relativen Hinterkantendicke von 1% gearbeitet.

Die Konstruktion besteht aus zwölf Spanten, die in einer Nasenleiste aus Vollholz eingefügt und befestigt werden (s. Bild 6-6). Das Skelett wird mit 2 mm dickem Sperrholz beplankt. Querholme versteifen die Konstruktion und geben der Sperrholz-Beplankung Halt. Die Endleiste mit einer Dicke von 5 mm wird nachträglich aufgespachtelt.

Nach der Beplankung bleiben zwei Zugänge zum Inneren des Modells, um die Integration der Absaugung und Messtechnik zu ermöglichen. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit des Profils gegenüber erhöhter Rauigkeit wurde das Modell nach Einbau in den Windkanal mit einer speziellen schwarzen Folie, die bei vergleichbaren Profiluntersuchungen eingesetzt wird [109], überzogen. Nach jedem Deckelwechsel wird die Folie ausgetauscht.

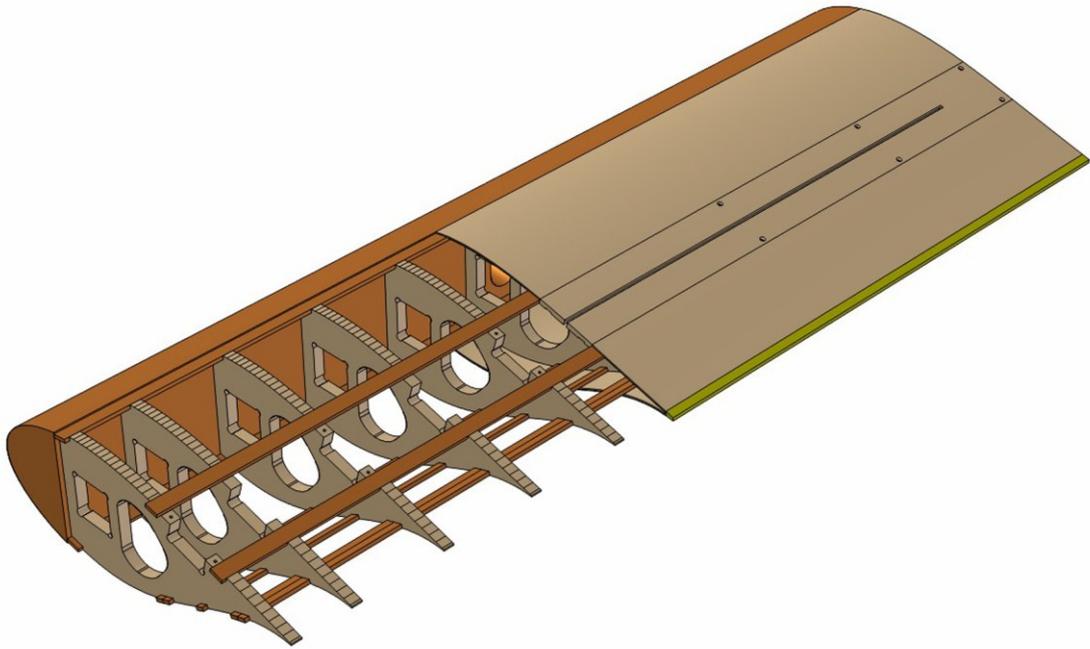
Das Bild 6-7 zeigt links ein Photo vom fertigen Modell ohne Absaugdeckel. Der blaue Pfeil weist auf die Strömungsrichtung der Absaugung hin. Rechts oben ist eine Abbildung der Druckseite des Modells zu sehen und rechts unten das Schema der Absaugung. Die Absaugung kann an der Spantholzkonstruktion ein- und abgebaut werden, ohne das Modell zu zerstören. Sie besteht aus dem Absaugdeckel, der Absaugkammer, dem Rohrsammler und Verbindungen zwischen Kammer und Sammler bestehend aus Kupferfittings.

Um eine homogene Absaugung entlang der Spannweite zu ermöglichen, wurden 20 Verbindungen über die Absaugkammer verteilt. Die Verbindungen wurden mit Abdichtungsmasse an Kammer und Sammler befestigt.

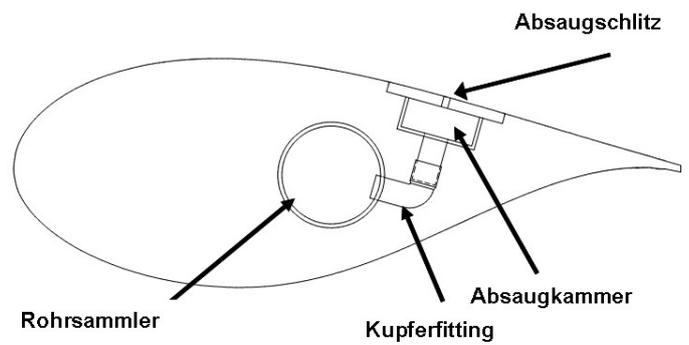
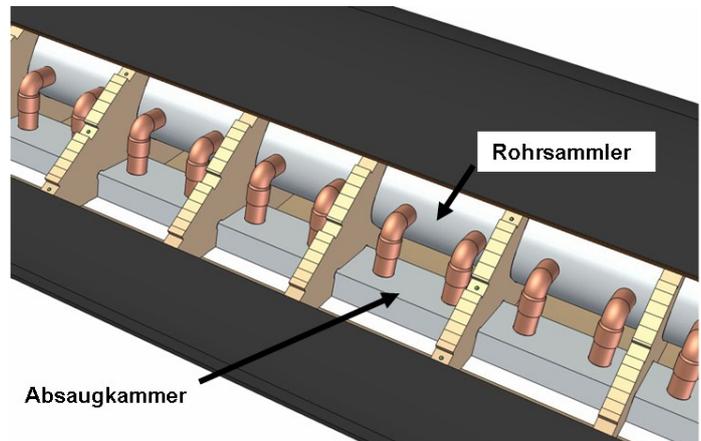
Die Absaugkammer besteht aus einem U-Profil aus Aluminium, das auf beiden Seiten mit Acrylplatten abgedichtet wurde. Die Kammer ist so lang wie das Modell, 62 mm breit und 25 mm hoch (Außendimensionen). Die Kupferrohrverbindungen weisen einen Innendurchmesser von 16 mm auf. Das Sammelrohr, ebenfalls aus Aluminium, hat einen Innendurchmesser von 76 mm. Die Bohrungen der Absaugkammer mit 18 mm Durchmesser sind 67 mm von einander entfernt.

Die hier untersuchten Varianten der Absaugung sind der geschlossene Deckel, ein Schlitzdeckel und ein perforierter Deckel. Jeder Deckel wurde mit einer Nut versehen, in die eine Gummidichtung eingeklebt wurde. Die Konstruktion hat sich als luftdicht erwiesen.

Im Fall der Schlitzabsaugung ist der Schlitz in spannweitischer Richtung 1.200 mm lang und in Strömungsrichtung 5 mm breit. Die Schlitzbreite entspricht 1% der Profiltiefe. Die Schlitzfläche entspricht  $6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  und somit 0,9% der Fläche der Modellssaugseite. Der Schlitzmittelpunkt ist bei 65% der Profiltiefe platziert (s. Bild 6-8). Der Schlitz weist eine senkrechte Öffnung auf. Ein einzelner Schlitz mit senkrechter Öffnung vereinfacht den Modellbau und die Gittervernetzung der CFD-Voruntersuchungen stark.



**Bild 6-6. Aufbau des Modells mit Spanten, Holmen und Bepunktung**



**Bild 6-7. Photo vom fertigen Modell ohne Absaugdeckel (links) und Schema der Absaugkonstruktion (rechts oben und unten)**

Für die Modellversuche wird zusätzlich zur Schlitzabsaugung die Lochabsaugung durch eine perforierte Fläche mit kreisförmigen Löchern untersucht. In diesem Fall bilden drei versetzte Reihen mit kreisförmigen Löchern à 3 mm Durchmesser und insgesamt 449 Löchern den perforierten Deckel. Die Fertigungsmöglichkeiten wurden bei der Festlegung der Löcherdimensionen mitberücksichtigt. Der Abstand zwischen den Lochmittelpunkten beträgt das Zweifache eines Lochdurchmessers. Die Lochabsaugöffnungen bilden 0,5% der Fläche der Modellsaugseite (s. Bild 6-9). Somit beträgt die Absaugfläche der Lochkonfiguration etwa die Hälfte der Schlitzfläche.

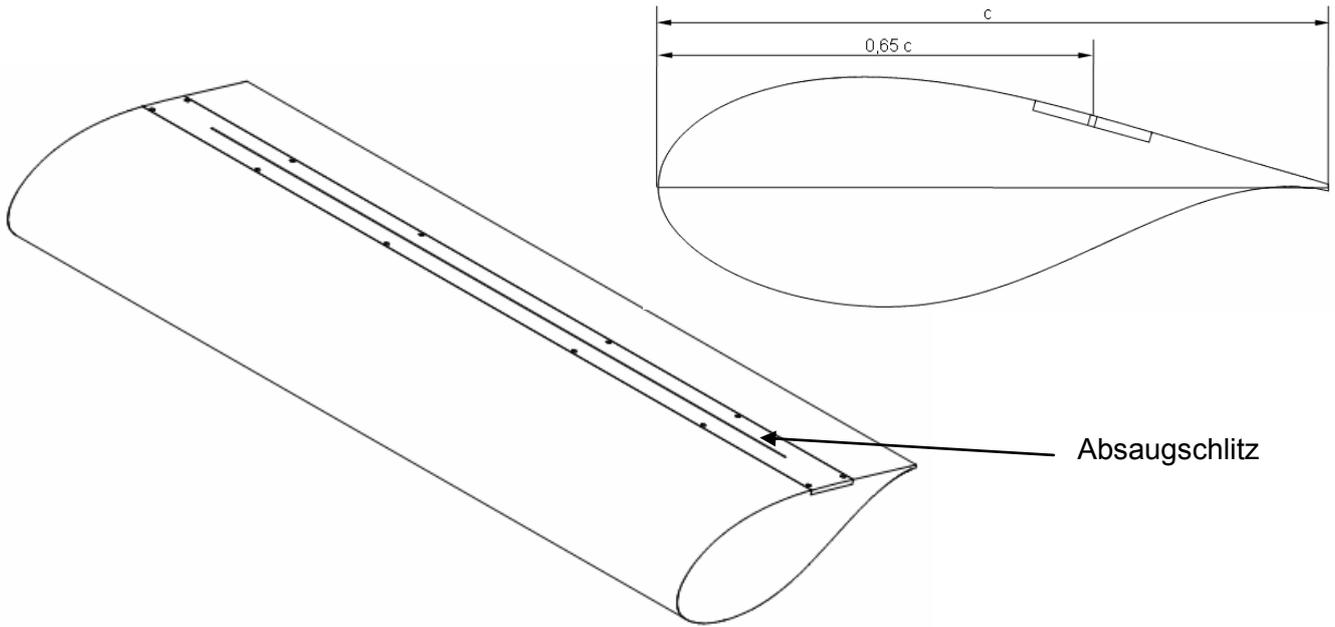
Zur Luftabsaugung wurden zwei Seitenkanalverdichter unterschiedlicher Leistungsklassen genutzt. Vom Sammelrohr im Modell wird die Luft über einen Saugschlauch zum Seitenkanalverdichter geführt. Das Bild 6-10 zeigt schematisch die Anlage zur Bereitstellung des Unterdruckes. Im Absaugsystem wird aufgrund von Volumenstromwerten und Bauteildimensionen von einer inkompressiblen Strömung ausgegangen. Im Bild sind ebenfalls ein Schwebekörper-Durchflussmesser und ein Drosselventil zur Steuerung des Volumenstroms zu erkennen.

#### 6.5.4 Reynolds-Zahl

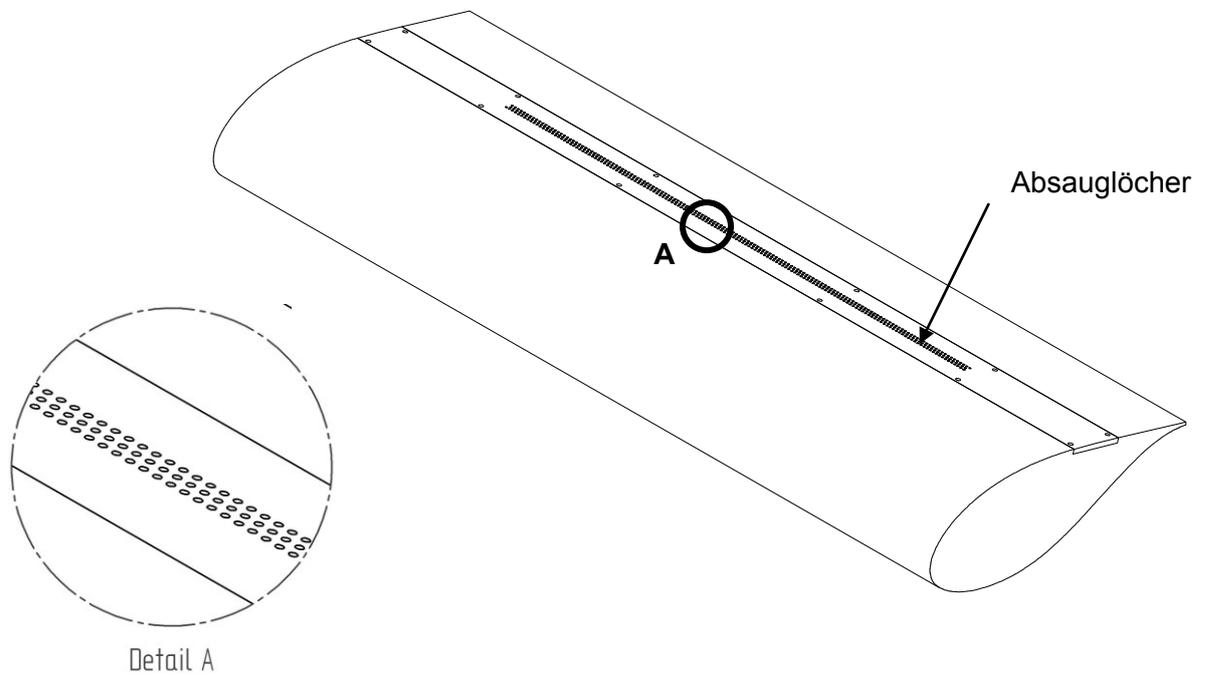
Für die hier durchgeführten Messungen mit einem zweidimensionalen Profilmodell im Windkanal ist die Ähnlichkeitszahl Reynoldszahl von Bedeutung. Diese ist wie folgt definiert:

$$\text{Re} = \frac{u_{\infty} \cdot c}{\nu} . \quad (6-4)$$

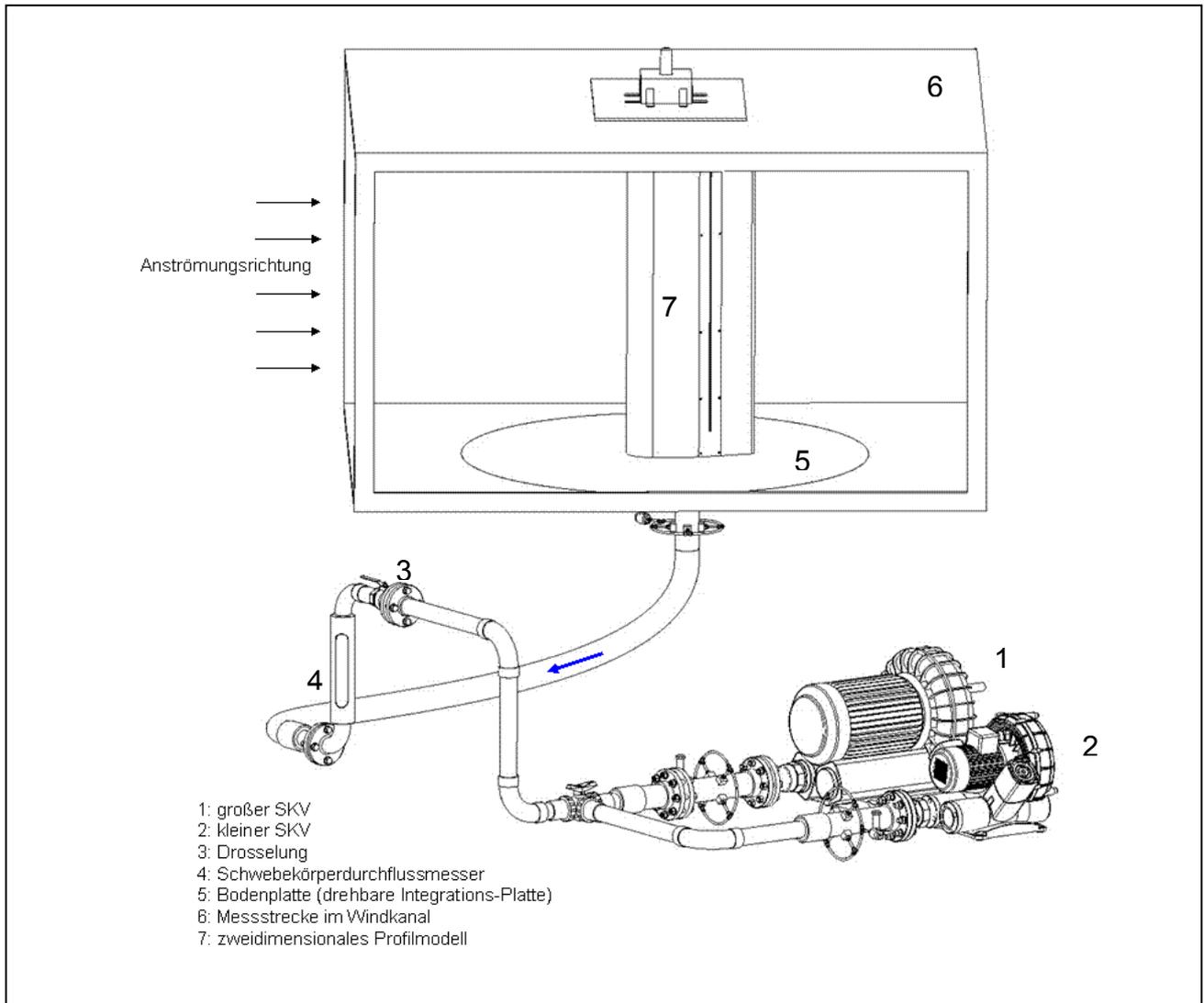
Dabei ist  $c$  die Profiltiefe (s. Kap. 6.5.3),  $\nu$  die kinematische Viskosität der Luft und  $u_{\infty}$  die Anströmgeschwindigkeit (s. S. 56). Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, wurde das ausgewählte Profil für eine Reynoldszahl von  $3 \times 10^6$  ausgelegt. Bei den experimentellen Untersuchungen wird diese Auslegungs-Reynoldszahl am verfügbaren Windkanal nicht erreicht. Gründe sind die Windkanaldimensionen, die damit verbundene maximale Modelltiefe und Verblockung des Kanals, sowie die maximal erreichbare Anströmgeschwindigkeit. Für die Messungen mit einem relativ dicken Profil im Stall-Bereich, wie hier der Fall, ist die Einstellung einer Anströmgeschwindigkeit von bis zu 35 m/s im betrachteten Windkanal zu empfehlen [107]. Die Modellversuche werden somit mit einer  $\text{Re} = 1 \times 10^6$  durchgeführt. Die Anströmgeschwindigkeit variiert um Werte von 30 m/s. Die numerischen Untersuchungen (s. Kap. 7.2) werden für Re-Zahlen von  $1 \times 10^6$  und  $3 \times 10^6$  durchgeführt.



**Bild 6-8. Lage des Schlitzes bei Schlitzabsaugung**



**Bild 6-9. Konfiguration der Lochabsaugung**



**Bild 6-10. Schema des Versuchsaufbaus**

#### 6.5.5 Zick-Zack-Band

Zur Erzeugung einer definierten Transitionsstelle wurde auf die Nutzung eines Zick-Zack-Bandes (s. Kapitel 5.3.3) mit 0.255 mm Dicke, 60° Spitzenwinkel und 6 mm Spitzenabstand zurückgegriffen. Dadurch konnte die Ablösung in einigen Fällen um mindestens 10% der Profiltiefe strömungsabwärts verschoben werden (s. Bild 5-5), und eine vermutete laminare Ablösungsblase wurde unterdrückt.

Die Nutzung eines Zick-Zack-Bandes trägt zu einem homogenen Strömungsbild entlang der Spannweite des Profilmodells bei. Zusätzlich ist aufgrund der hohen Empfindlichkeit des getesteten aerodynamischen Profils gegenüber Rauigkeit die Festlegung der Transitionsstelle von Vorteil.

Die Platzierung des Zick-Zack-Bandes wurde zuerst nach einer Parameterstudie mit XFOil für verschiedene Anstellwinkel geschätzt und anschliessend empirisch nach Ergebnissen der Strömungsvisualisierung im Windkanal auf 10% der Profiltiefe festgelegt. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit des Profils gegenüber Rauigkeit wurde auf eine Anpassung der Turbulatorstelle je nach Anstellwinkel verzichtet, um die Oberfläche durch die Klebetechnik geringstmöglich zu beschädigen.

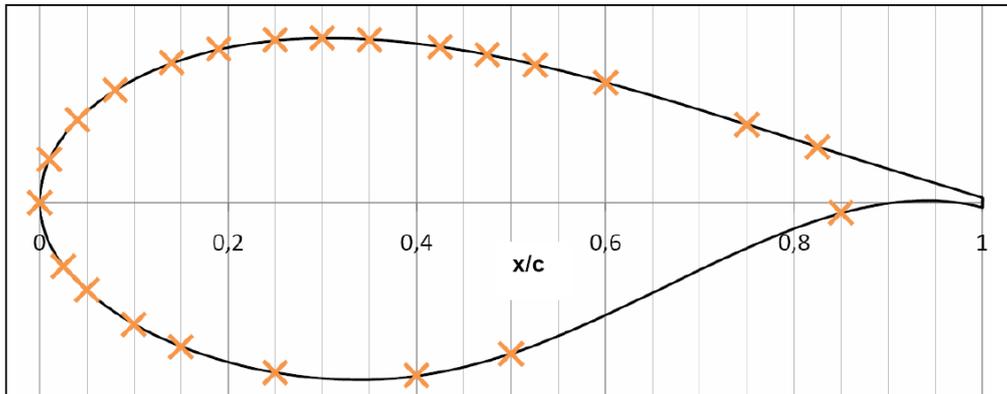
#### 6.5.6 Untersucher Anstellwinkelbereich

Die Anstellwinkel wurden nach Empfehlungen von Rotorblattherstellern und nach [105, 108] im Bereich von 5° bis 25° ausgewählt. Da bei den Simulationen und Experimenten der abgelöste Bereich auf der Profilsaugseite ab dem Anstellwinkel 16° sehr stark ausgeprägt war, wurde der Anstellwinkelbereich auf 5° bis 19° reduziert.

#### 6.5.7 Messtechnik zur Bewertung der Grenzschichtabsaugung

Zur Strömungsvisualisierung wurden Farbanstrichversuche mit einem Öl-Anstrichverfahren, d.h. einem Auftragen eines Gemisches aus Mineral-Öl und Titandioxid auf die Profiloberfläche, durchgeführt.

Die Druckverteilung um das Profil wird mittels 22 Druckmessstellen aufgenommen und der Einfluss der Grenzschichtabsaugung auf den Auftriebsbeiwert daraus ermittelt. Hierbei wurden piezokapazitive Differenzdrucksensoren eingesetzt [75]. Der Messbereich der Sensoren liegt bei 0 bis 200 mbar und die relative Messunsicherheit entspricht 0,5% des Endwertes. Zur Auswahl der Platzierung der Sensoren wurden die Druckverteilungen der XFOil-Ergebnisse als Grundlage benutzt, dabei wurden soweit wie möglich die Bereiche mit hohen Druckgradienten feiner bedeckt. Konstruktive Gegebenheiten, die die Platzierung von Sensoren erschweren wie die Absaugdeckel, wurden dabei berücksichtigt. Die Position der Druckbohrungen am Profil ist aus dem Bild 6-11 zu entnehmen. Der Sensor auf Position 0,6 x/c saugseitig kann nur bei der Variante geschlossene Deckel eingesetzt werden.



**Bild 6-11 . Lage der Druckmessstellen auf der Profilloberfläche des Modells**

## 6.6 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

### 6.6.1 Messergebnisse zu den Referenzfällen und Vergleich mit XFoil-Ergebnissen

Die gemessenen Druckwerte an den Druckbohrungen werden in dimensionslose Druckbeiwerte umgerechnet. Die Druckbeiwerte  $c_p$  werden nach:

$$c_p = \frac{p_x - p_\infty}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2} \quad (6-5)$$

berechnet. Dabei ist  $p_x$  der lokale statische Druck an der Profilloberfläche an der Messstelle und  $p_\infty$  und  $u_\infty$  sind Druck und Geschwindigkeit der Anströmung [19].

Die Messergebnisse der Referenzfälle, d.h. der Fälle ohne Einsatz der Grenzschichtabsaugung, werden als Druckbeiwertverlauf in den folgenden Bildern 6-12 bis 6-17 für die Anstellwinkel von  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $16^\circ$  und  $19^\circ$  exemplarisch dargestellt. Sie werden dabei mit Ergebnissen der Druckverteilungen aus XFoil-Rechnungen verglichen. Für die Anstellwinkel von  $5^\circ$  und  $16^\circ$  werden zusätzlich zum Fall mit erzwungenen Transition bei  $0,1 c$  noch der Fall mit freier Transition betrachtet. Da bei einigen Konfigurationen ein Abtrieb im mittleren Bereich der Profiltiefe vorkommt, werden bei den Diagrammen die Saug- und Druckseite von einander unterschieden.

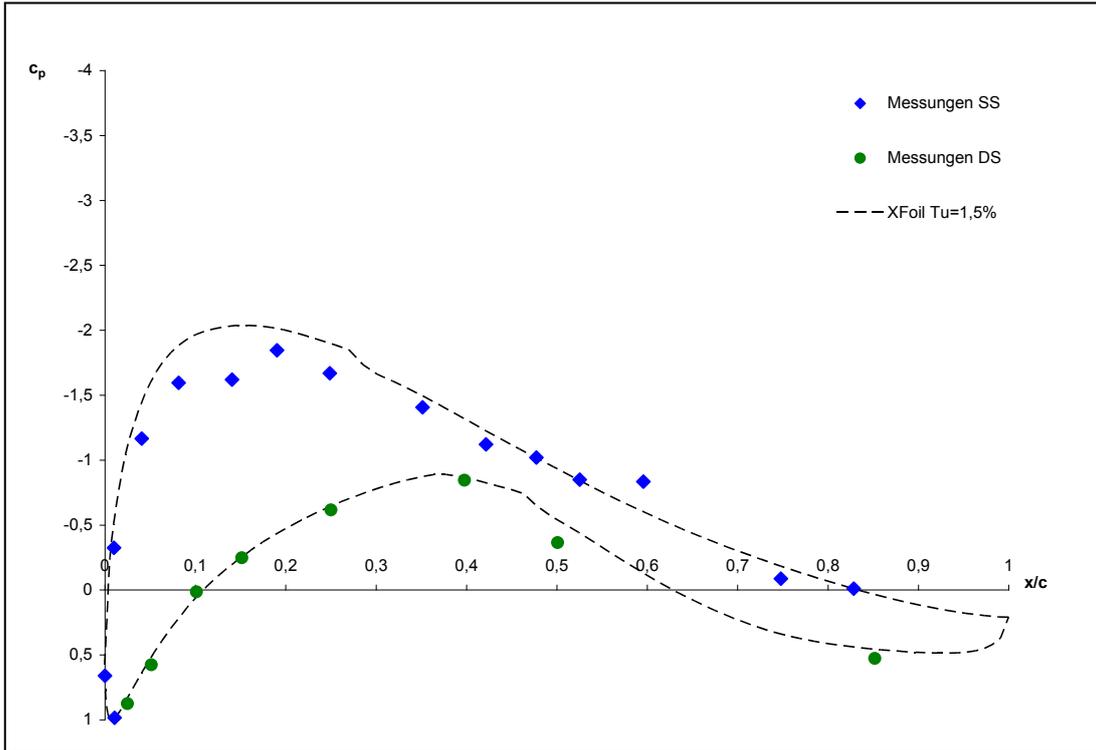
Zur Berechnung der Druckverteilungen mit XFoil wurde eine Parameterstudie mit Amplitudenfaktoren (amplitude factor)  $n$  von 1 bis 9, die dem unterschiedlichen Turbulenzgrad eines Windkanals entsprechen, durchgeführt. Es wurde mit einem Wert von 1,7, entsprechend einem Windkanal mit Turbulenzgrad von 1,5%, gearbeitet. Dieser Turbulenzgrad gibt den des benutzten Windkanals wieder, und damit wurden in der Tat die besten Übereinstimmungen mit den Messungen erreicht.

Nach [31] und nach eigenen CFD Simulationen tritt die Ablösung bei der Auslegungs-Reynoldszahl bei einem Anstellwinkel von  $12^\circ$  auf. Bei den Experimenten erfolgt die Ablösung auf der Saugseite des Profils bereits bei dem niedrigeren Anstellwinkel von  $5^\circ$ . Dies könnte einerseits auf die niedrige Reynoldszahl von  $1 \times 10^6$ , aber auch auf mögliche Modellgenauigkeiten und Windkanaleinflüsse zurückzuführen sein. Andererseits wurde in [108] für ein sehr ähnliches dickes Profil bei einer Re-Zahl von  $6 \times 10^6$  von der Ablösung bei einem ähnlich niedrigeren Anstellwinkel von  $7^\circ$  berichtet. Die Untersuchungen fanden in einem modernen Windkanal [27] mit niedrigen Turbulenzgrad von  $Tu=0,1\%$  statt. Dieser Vergleich unterstützt die Plausibilität der hier dargestellten Messergebnisse.

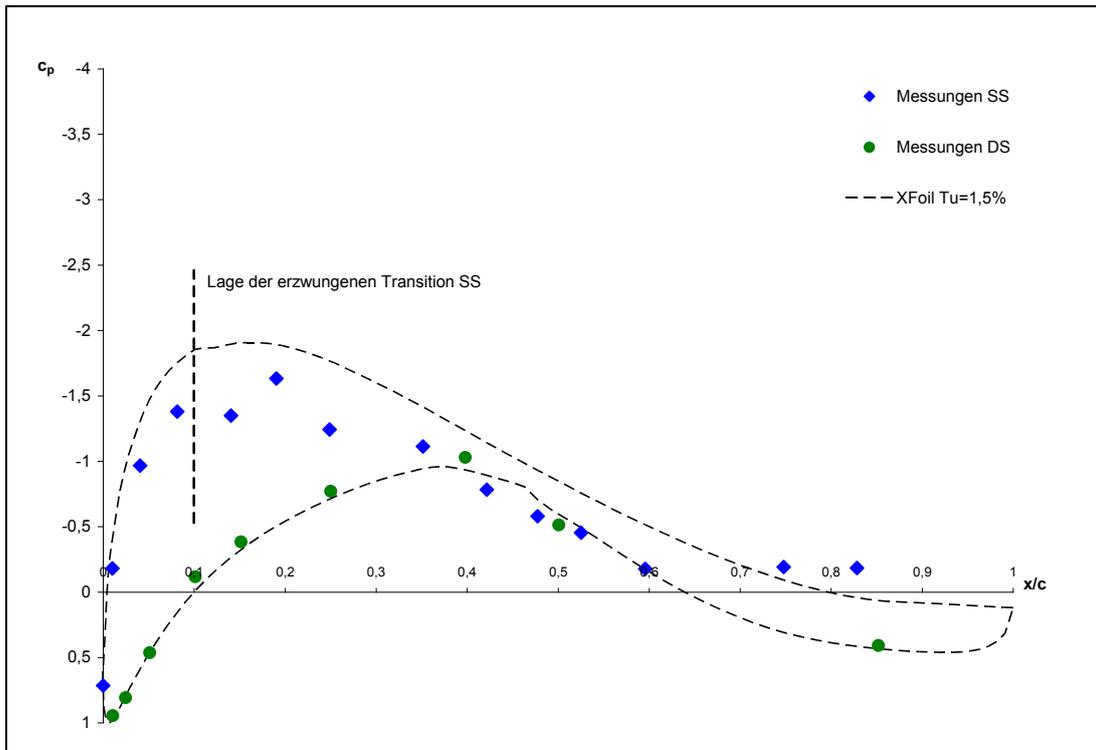
Trotz der Tendenz der Überwertung der Saugspitze bei XFoil-Rechnungen im Vergleich zu Messungen wurde in den meisten Fällen eine gute Übereinstimmung des Kurvenverlaufes aus den Messergebnissen und numerischen Ergebnissen gefunden. Die gemessenen und mit XFoil berechneten Druckverteilungen haben v.a. bei dem freien Transitionsfall mit einem Anstellwinkel von  $5^\circ$  und im erzwungenen Transitionsfall mit  $16^\circ$  (s. Bilder 6-12 und 6-16) auch quantitativ gute Übereinstimmung mit den daraus berechneten Auftriebsbeiwerten.

Die Überbewertung des Auftriebes bei XFoil ist bei höheren Anstellwinkeln stärker ausgeprägt (s. Bild 6-17). In erzwungenen Transitionsfällen wird die im Windkanal beobachtete Ablösung nach XFoil-Rechnung nicht wiedergegeben. Da solche Tendenzen bereits festgestellt und dokumentiert worden sind [32, 105], können hiermit durch diesen Vergleich grobe Messfehler bei den Windkanaluntersuchungen und große Modellverformungen ausgeschlossen werden. Die Plausibilität der Ergebnisse wird damit unterstützt.

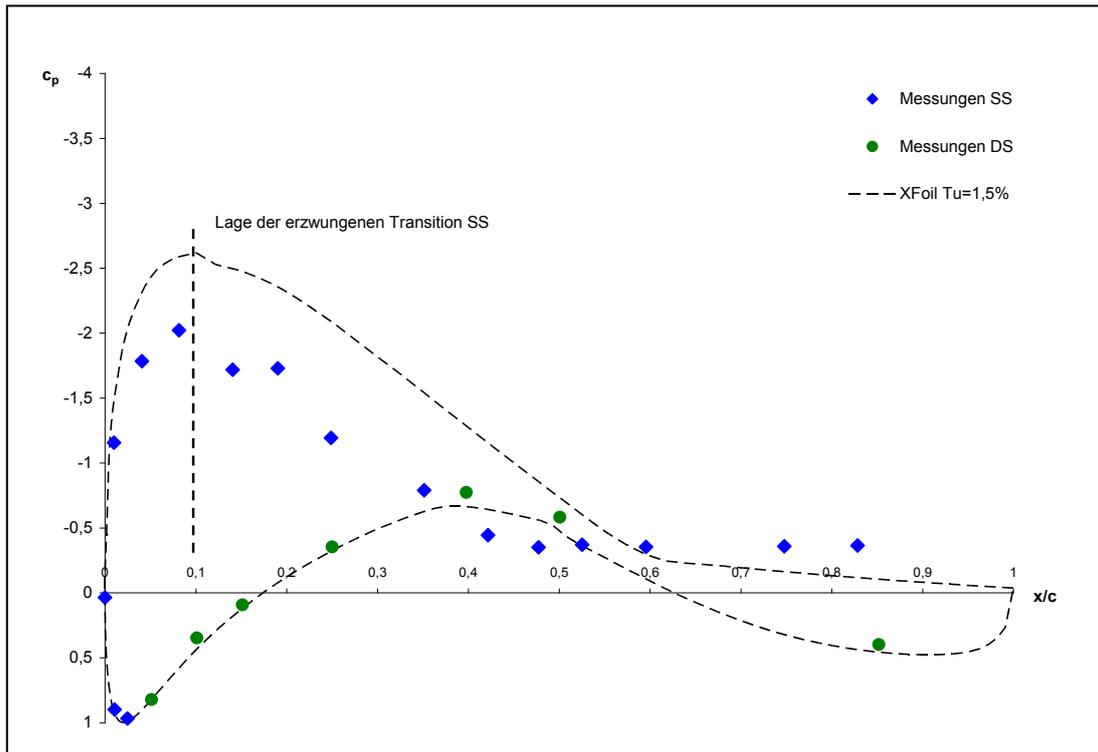
Aufgrund der hohen Empfindlichkeit des ausgewählten aerodynamischen Profils gegenüber erhöhter Rauigkeit wurde nur eine einzelne Position für die Transitionsstreifen realisiert, um die Oberfläche durch die Klebtechnik geringstmöglich zu beschädigen (s. Kap. 6.5.5). Der Einbruch des Auftriebes nach dem erzwungenen Umschlag ist für den Anstellwinkel von  $5^\circ$ ,  $7,5^\circ$  und  $10^\circ$  allerdings signifikant. Diese Tendenz wurde auch in [108] festgestellt. Der Vergleich zwischen den gemessenen Druckverteilungen mit freier Transition und mit festem Umschlagspunkt, erzwungen durch die Nutzung eines Zick-Zack-Bandes, deuten darauf hin, dass bei Nachfolgeuntersuchungen die Lage und Höhe des Streifens für die unterschiedlichen Anstellwinkel angepasst werden muss.



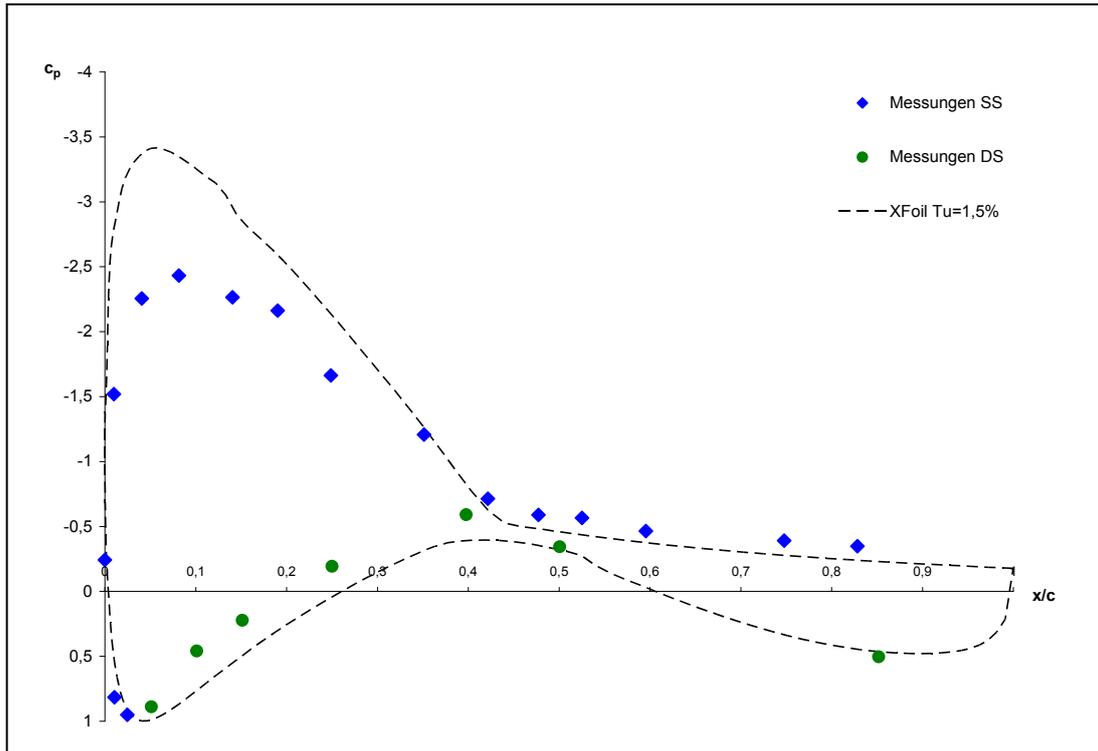
**Bild 6-12. Druckverlauf um das Profil nach Messergebnissen für den Anstellwinkel von 5° mit freier Transition im Referenzfall und im Vergleich mit XFOil-Ergebnissen**



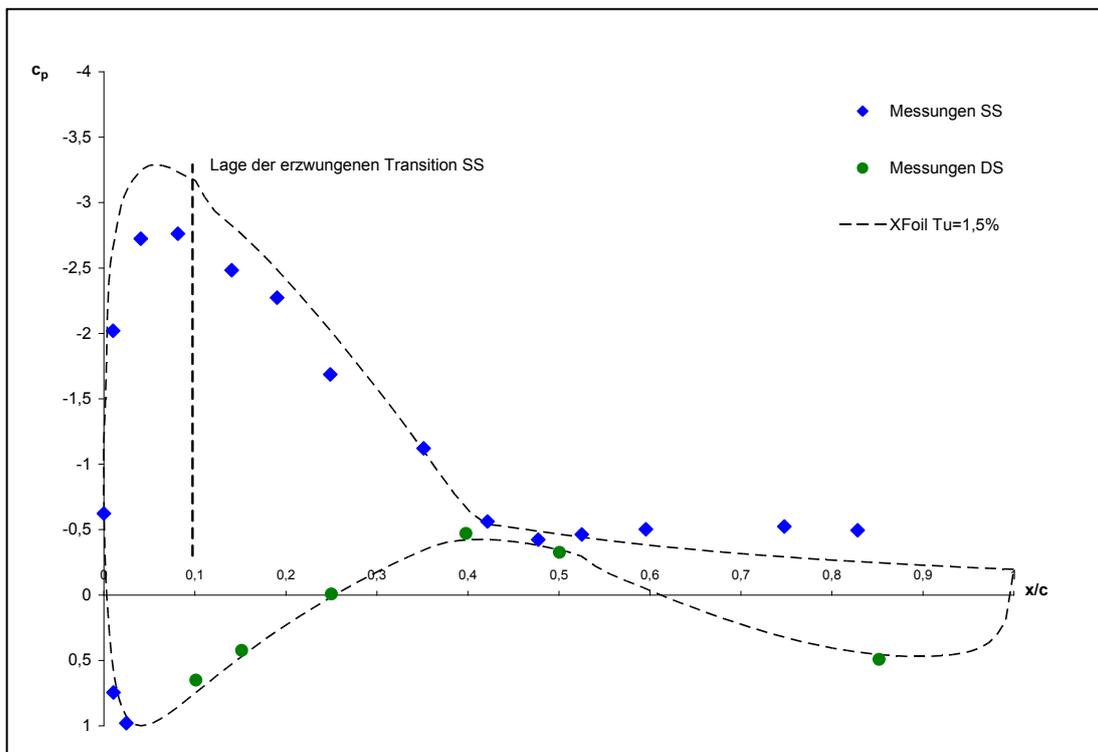
**Bild 6-13. Druckverlauf um das Profil nach Messergebnissen für den Anstellwinkel von 5° mit erzwungener Transition im Referenzfall und im Vergleich mit XFOil-Ergebnissen**



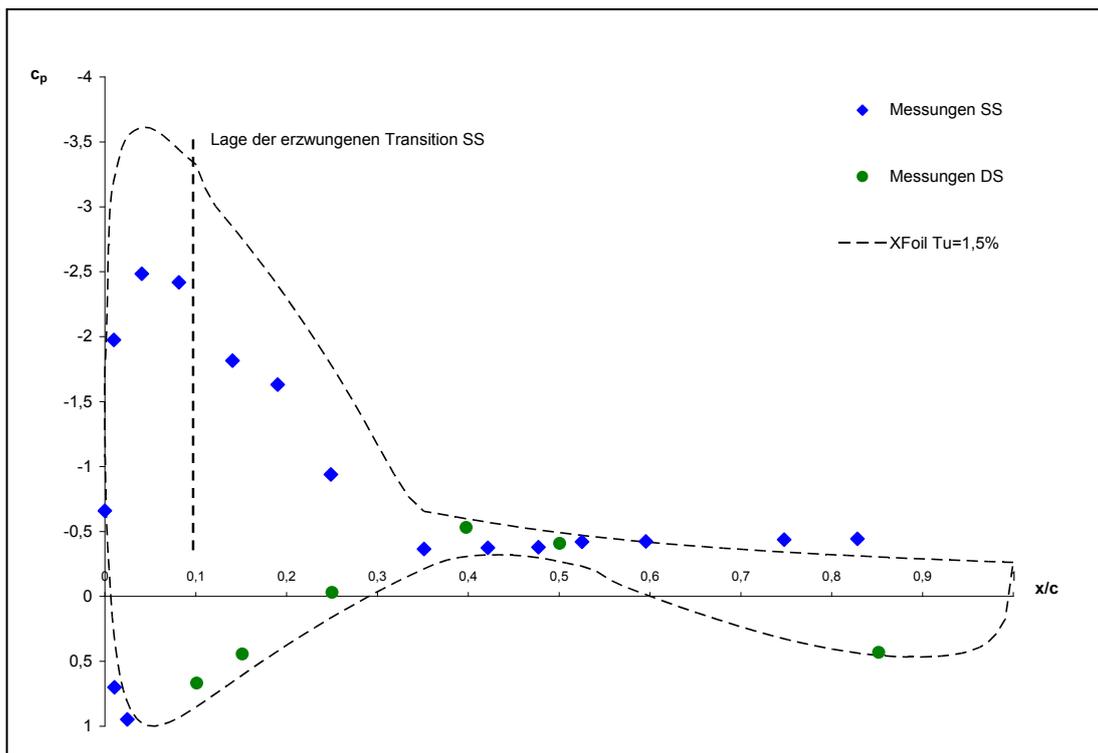
**Bild 6-14. Druckverlauf um das Profil nach Messergebnissen für den Anstellwinkel von  $10^\circ$  mit erzwungener Transition im Referenzfall und im Vergleich mit XFOil-Ergebnissen**



**Bild 6-15. Druckverlauf um das Profil nach Messergebnissen für den Anstellwinkel von  $16^\circ$  mit freier Transition im Referenzfall und im Vergleich mit XFoil-Ergebnissen**



**Bild 6-16. Druckverlauf um das Profil nach Messergebnissen für den Anstellwinkel von  $16^\circ$  mit erzwungener Transition im Referenzfall und im Vergleich mit XFoil-Ergebnissen**



**Bild 6-17. Druckverlauf um das Profil nach Messergebnissen für den Anstellwinkel von  $19^\circ$  mit erzwungener Transition im Referenzfall und im Vergleich mit XFOIL-Ergebnissen**

### 6.6.2 Ergebnisse der Strömungsvisualisierung und Druckmessungen mit Absaugung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Strömungsvisualisierung mit Farbanstrichversuchen sowie die dazugehörigen Druckverläufe um das Profil (s. Bilder 6-18 bis 6-24) exemplarisch dargestellt. Bei den Bildern der Farbanstrichversuche wird die Saugseite des Profils gezeigt und oben sind stets die Referenzfälle ohne Grenzschichtabsaugung zu sehen. Außerdem wird nur das mittlere Drittel der Modellspannweite dargestellt, so dass der Einfluss von Eckwirbeln und der Windkanalgrenzschicht auf das Farbanstrichbild soweit als möglich ausgeschlossen ist.

Bild 6-18 zeigt die Ergebnisse der Strömungsvisualisierung für den Anstellwinkel von  $5^\circ$  und Schlitzabsaugung bei der geringsten Absaugrate  $c_Q$  von 0,15 und einem etwas höheren Wert von 0,25. Die niedrigste Absaugrate entsprach hier einem Absaugvolumenstrom von  $0,025 \text{ m}^3/\text{s}$ . Aus der Strömungsvisualisierung ist eine Verlagerung der Ablösungsstelle zur Hinterkante des Profils bereits bei  $c_Q=0,15$  zu beobachten. Bei derselben Konfiguration und erhöhtem  $c_Q = 0,25$  konnte die Ablösung bei Schlitzabsaugung vermieden werden.

Das Bild 6-19 zeigt die entsprechenden gemessenen Druckverteilungen. Es kann ein größerer Unterdruck auf der Saugseite des Profils für den Fall der Absaugung beobachtet werden, damit ist eine Verbesserung des Auftriebs erreicht. Die Erhöhung der Absaugrate von 0,15 auf 0,25 brachte keine weitere signifikante Verbesserung.

Es ist zu bemerken, dass mit Einsatz der Absaugung aufgrund der Deckelkonstruktion ein breiter Bereich zwischen ca. 0,55 und 0,75  $x/c$  nicht gemessen werden konnte. Dies erklärt die Unterbrechung der Kurven der Saugseiten bei den betrachteten Druckverläufen. Weiterhin ist zu beachten, dass aufgrund der Modellkonstruktion der Bereich der Hinterkante mit Drucksensoren nicht versehen werden konnte. Dies erklärt, wieso sich der Unterschied zwischen abgelöster und anliegender Strömung am Diagramm im Hinterkantenbereich nicht widerspiegelt, da die Druckmessungen bis ca. 0,85  $c$  auf beiden Profildseiten reichen.

Desweiteren zeigen die Bilder 6-18 und 6-20 die Auswirkung der Schlitz- und Lochabsaugung auf die Strömung für die Absaugrate von 0,25. Aus den Bildern der Farbanstrichversuche ist zu erkennen, dass bei der Lochabsaugung die Ablösung zur Hinterkante verlagert wird, während bei der Schlitzabsaugung die Strömung anliegt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Absaugfläche der Lochkonfiguration etwa die Hälfte der Schlitzabsaugung darstellt. Dies bedeutet, dass für dieselben Absaugrate unterschiedliche Volumenströme aus der Grenzschicht entfernt werden. Eine vergleichende Bewertung zwischen Loch- und Schlitzabsaugung (s. Kap. 6.3.3) soll in dieser Arbeit nicht erfolgen. Für einen solchen Vergleich ist die hier betrachtete Absaugrate nicht die geeignete Kenngröße [99]. Bei den hier durchgeführten Experimenten haben sich beide Möglichkeiten Loch- und Schlitzabsaugung als vertretbar bewiesen.

Bild 6-21 zeigt exemplarisch die Strömungsvisualisierung für die Lochabsaugung für die Absaugrate von 0,5 und für die höchste eingesetzte Absaugrate von 1,75 mit in beiden Fällen anliegender Strömung. Im Bild 6-22 werden die Druckverteilungen für die

Konfiguration der Lochabsaugung bei dem Anstellwinkel von  $5^\circ$  mit erzwungener Transition für die vier untersuchten Absaugraten von 0,25, 0,5, 0,8 und 1,75 dargestellt. Während für die ersten drei Beiwerte die Auftriebsverbesserung mit zunehmenden Absaugvolumenstrom annähernd gleich sind, hat  $c_Q = 1,75$  einen deutlichen Auftriebszuwachs ermöglicht.

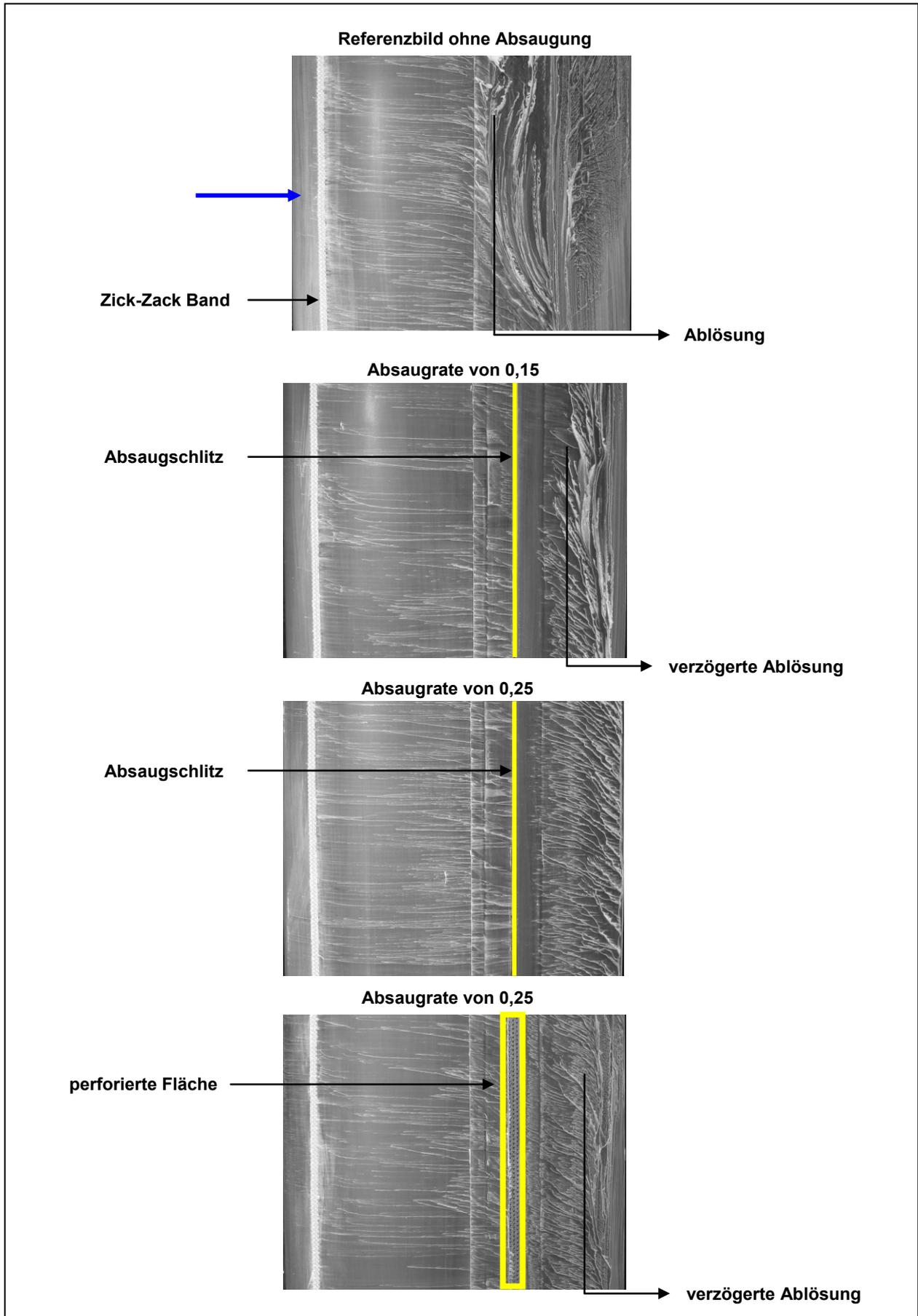
Die gemessenen und mit XFoil berechneten Druckverteilungen haben im Fall der freien Transition für den Anstellwinkel von  $5^\circ$  eine sehr gute Übereinstimmung (s. Bild 6-12). Die Konfiguration hat allerdings bei der Strömungsvisualisierung ein ausgeprägtes dreidimensionales Bild entlang der Modellspannweite ergeben. Die Absauguntersuchungen wurden daher in diesem Fall trotz der guten Übereinstimmung mit XFoil nicht weiter verfolgt.

Auch die Konfiguration im erzwungenen Transitionsfall bei  $16^\circ$  zeichnet sich durch eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem numerischen und gemessenen Druckverlauf (s. Bild 6-16) aus. Allerdings zeigt sich auch hier bei der Strömungsvisualisierung ein stark dreidimensionales Bild entlang der Modellspannweite. Außerdem hat sich im Fall von  $16^\circ$  und erzwungener Transition keine Verbesserung durch die Absaugung ergeben. Die Absauguntersuchungen wurden daher auch für diesen Fall nicht weiter verfolgt.

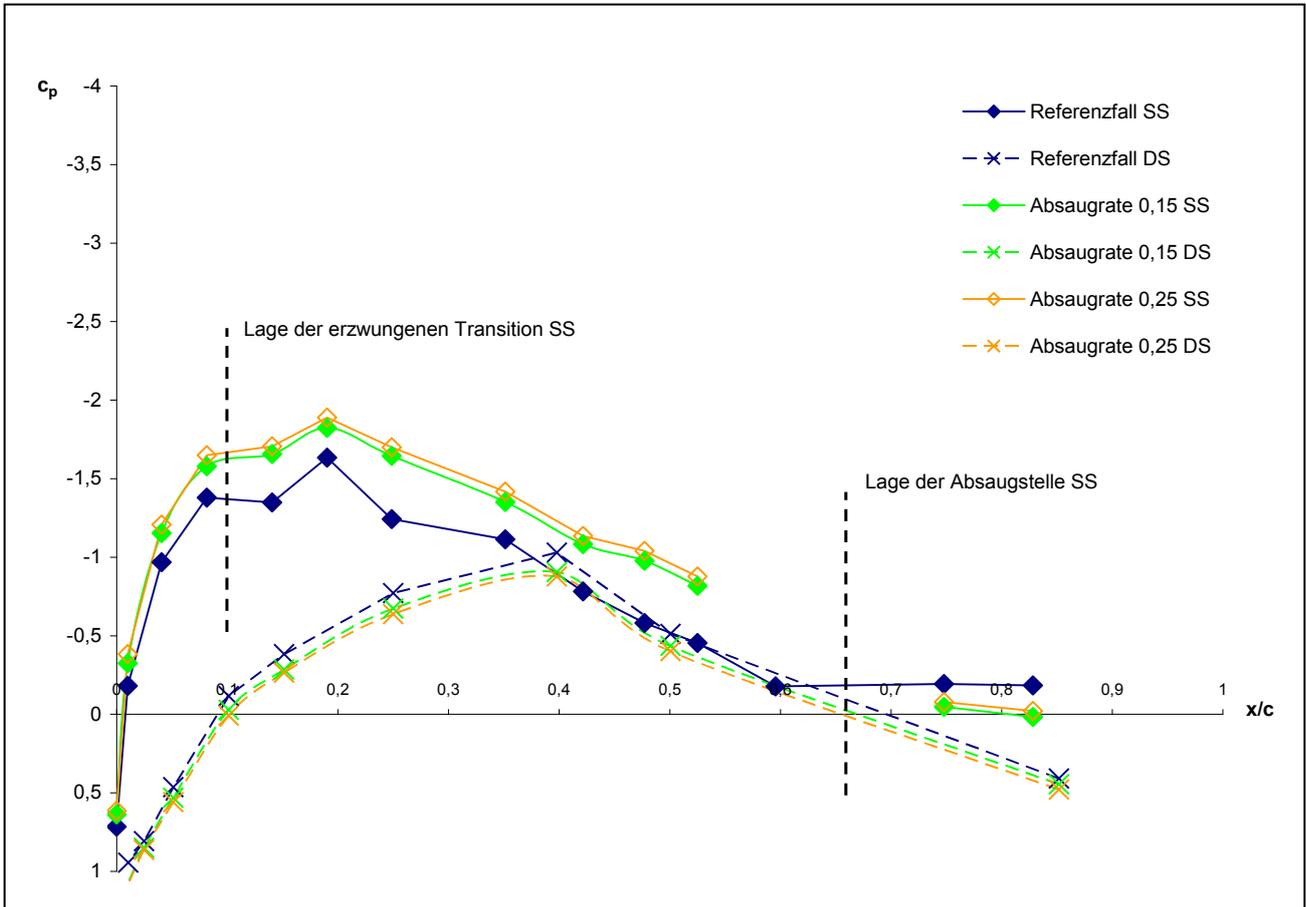
Die Bilder 6-23 und 6-24 zeigen die Ergebnisse der Lochabsaugung für den Anstellwinkel von  $16^\circ$  im Fall der freien Transition, d.h. ohne Einsatz eines Zick-Zack-Bandes. Die Absaugrate von 1,75 brachte die Strömung zum Anliegen. Hingegen erzielte  $c_Q = 0,8$  noch keine Strömungsverbesserung. Bei welchem Wert zwischen beiden die Mindestabsaugmenge für diese Konfiguration lag, konnte aufgrund der eingesetzten Messtechnik der Durchflussmessung nicht ermittelt werden. Das Bild 6-24 stellt den zu  $c_Q = 1,75$  gehörigen Druckverlauf dar.

Außerdem wird im Bild 6-24 noch eine zusätzliche Information vermittelt: Es wurden Versuche durchgeführt, indem die Absaugung bei unterschiedlichen Zeitpunkten eingeschaltet wurde. Der Hintergrund ist, dass der Windkanal eine gewisse Zeit braucht, um die Luft in Bewegung zu bringen und die erwünschte Re-Zahl zu erreichen. Dabei wurde die Absaugung eingeschaltet, sobald der Kanal ein Drittel der erwünschten Anströmgeschwindigkeit erreicht hatte. Das Ergebnis ist, dass die frühere Einschaltung eine bessere Auswirkung zeigt. Dies deckt sich mit der veröffentlichten Erfahrung, dass, wenn die Strömung einmal abgelöst ist, eine höhere Absaugleistung notwendig ist, um ein Anliegen der Strömung zu bewirken [99].

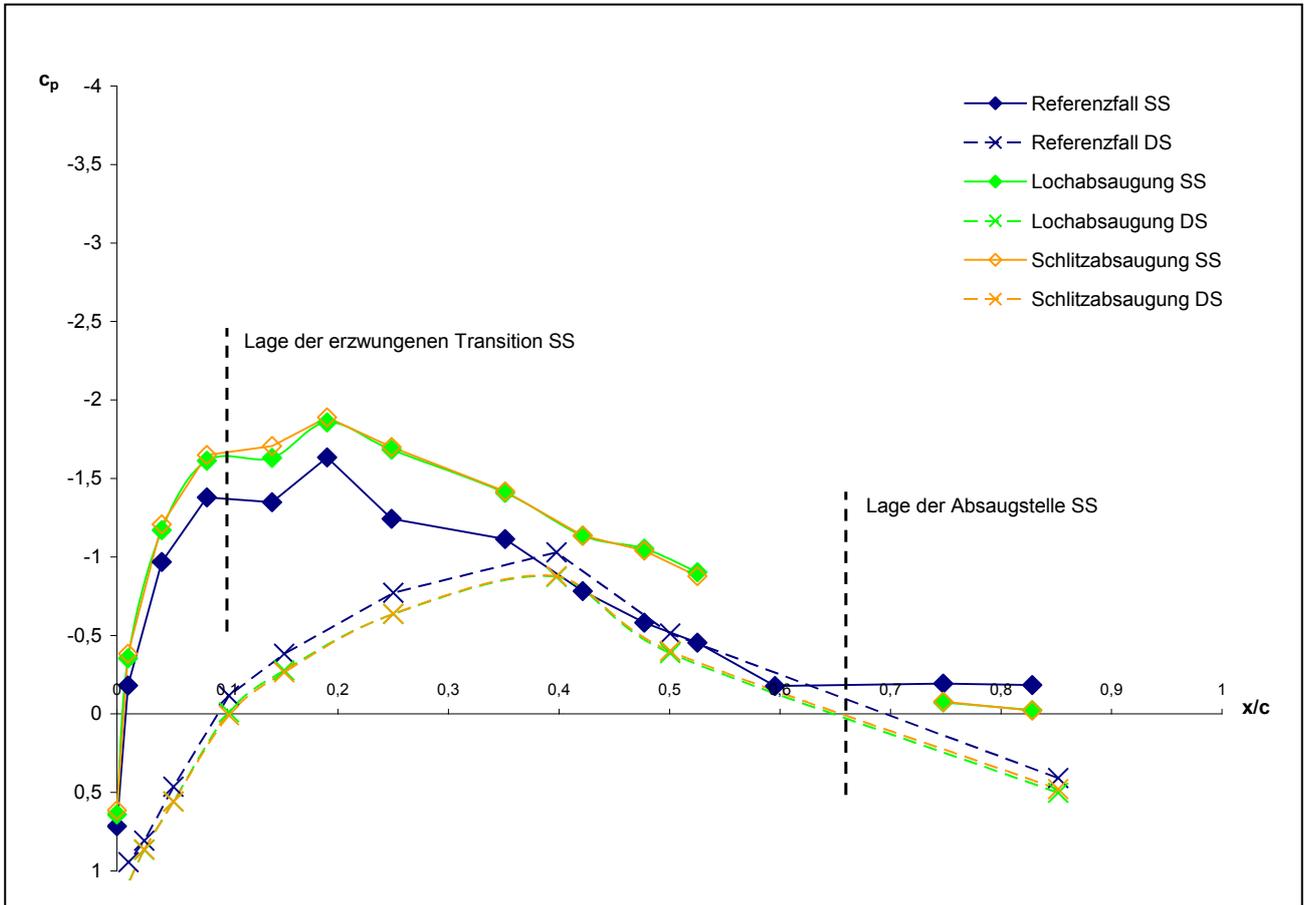
Aus der unter der  $c_p$ -Kurve liegenden Fläche errechnet sich die Normalkraft  $N$  [19], die mit Hilfe der Gleichung 4-3 zur Auftriebskraft führt. Dabei wird das Produkt aus Tangentialkraft und Sinus des Anstellwinkels als vernachlässigbar klein angenommen. Es ergibt sich aus der Berechnung je nach Anstellwinkel und Absaugrate ein Zuwachs der Auftriebsbeiwerte mit der Absaugung von bis zu 136%. Die Tabelle 6-1 stellt exemplarisch die aus XFoil berechneten Auftriebsbeiwerte und die aus den gemessenen lokalen statischen Drücken um das Profil berechneten Auftriebsbeiwerte mit und ohne Einsatz der Absaugung dar. Wie im Kapitel 6.5.2 erläutert, handelt es sich hier um eine vergleichende Untersuchung; so sollen die Auftriebsbeiwerte nicht einzeln, sondern nur relativ zu einander betrachtet werden.



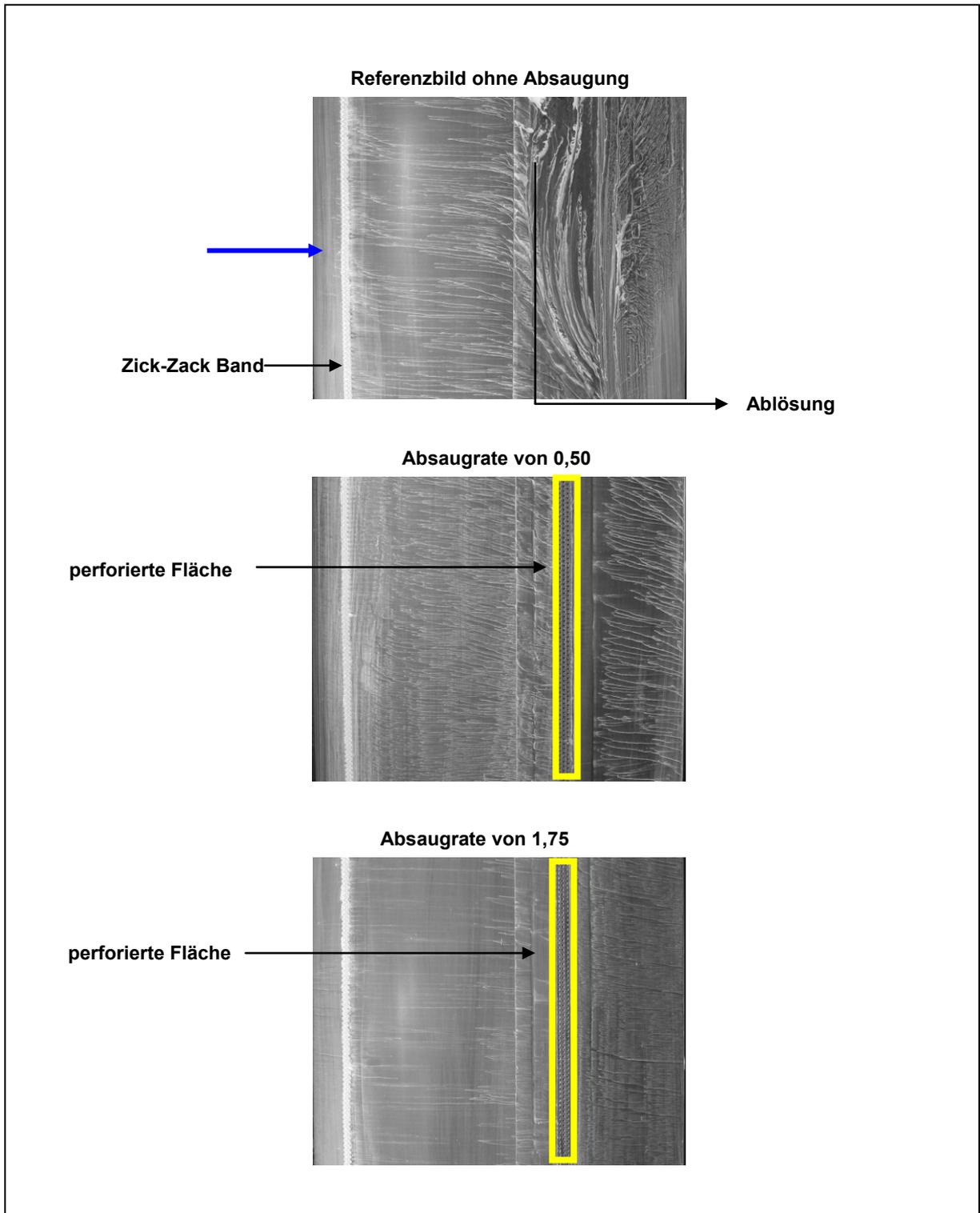
**Bild 6-18. Strömungsvisualisierung im Referenzfall und in Fällen der diskreten Schlitzabsaugung und der diskreten Lochabsaugung beim Anstellwinkel von 5°**



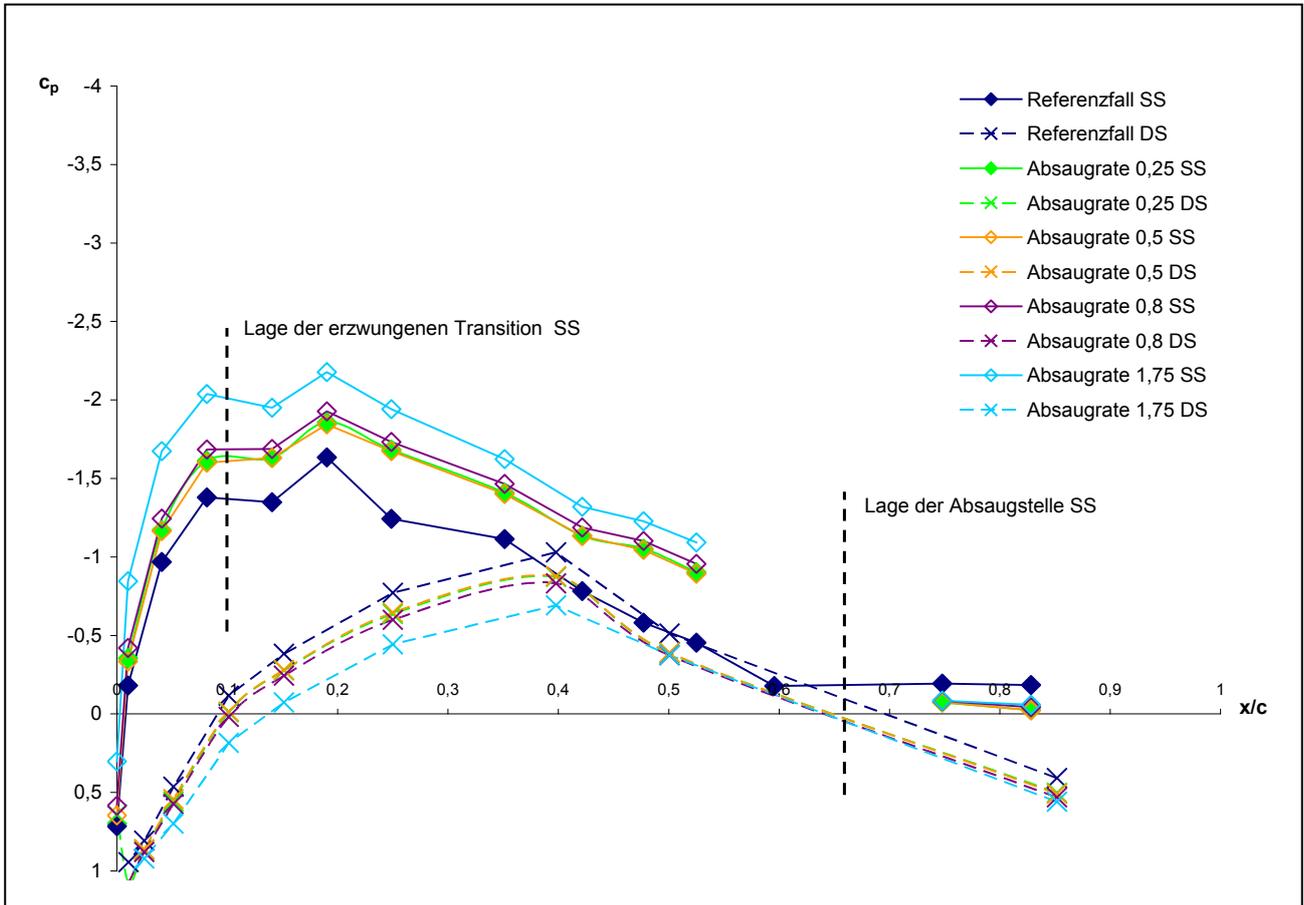
**Bild 6-19. Druckverlauf um das Profil nach Messergebnissen für den Referenzfall und in Fällen der diskreten Schlitzabsaugung bei verschiedenen Absaugraten beim Anstellwinkel von  $5^\circ$**



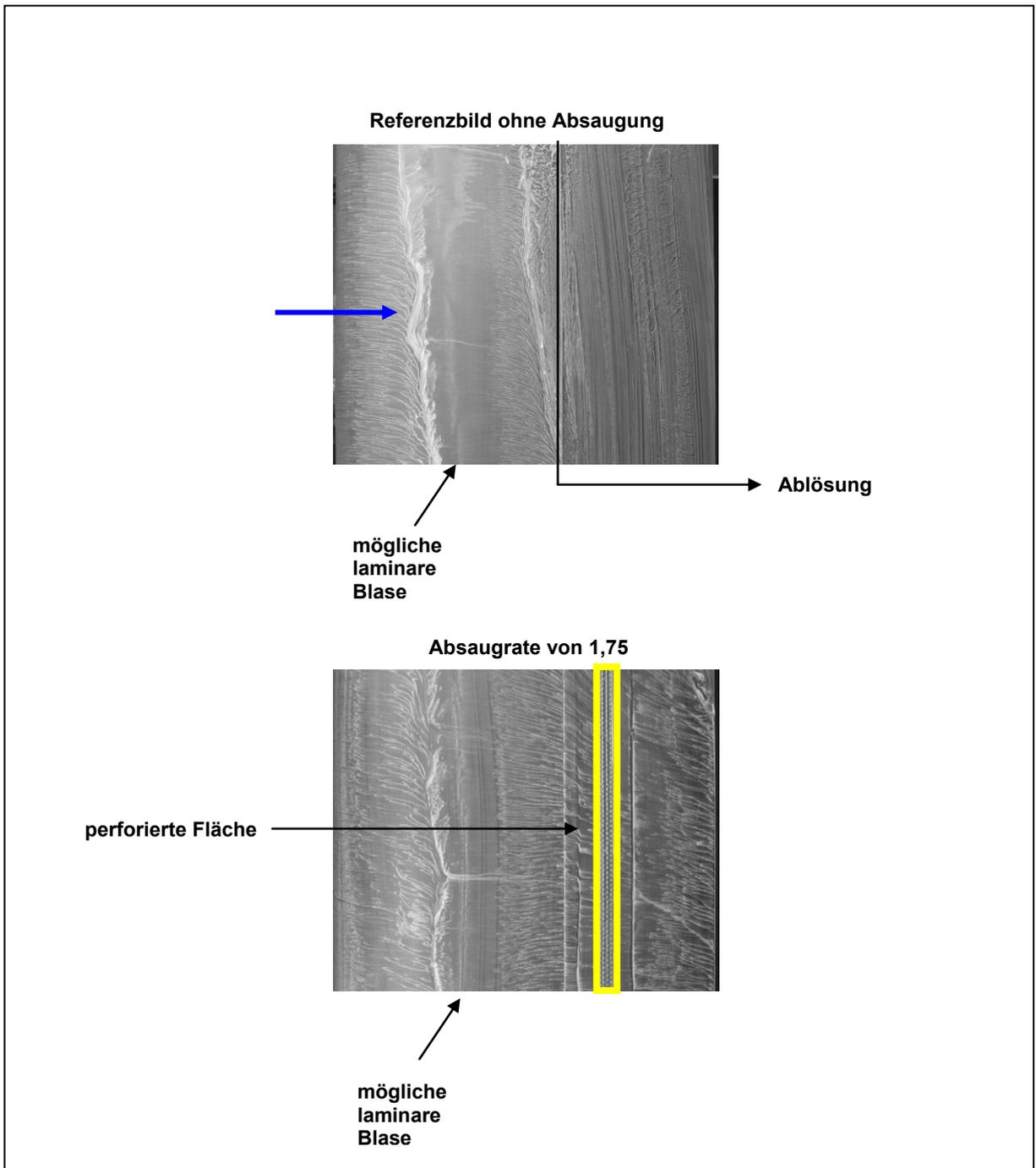
**Bild 6-20. Druckverlauf um das Profil nach Messergebnissen für den Referenzfall und in Fällen der diskreten Loch- und Schlitzabsaugung beim Absaugraten von 0,25 beim Anstellwinkel von 5°**



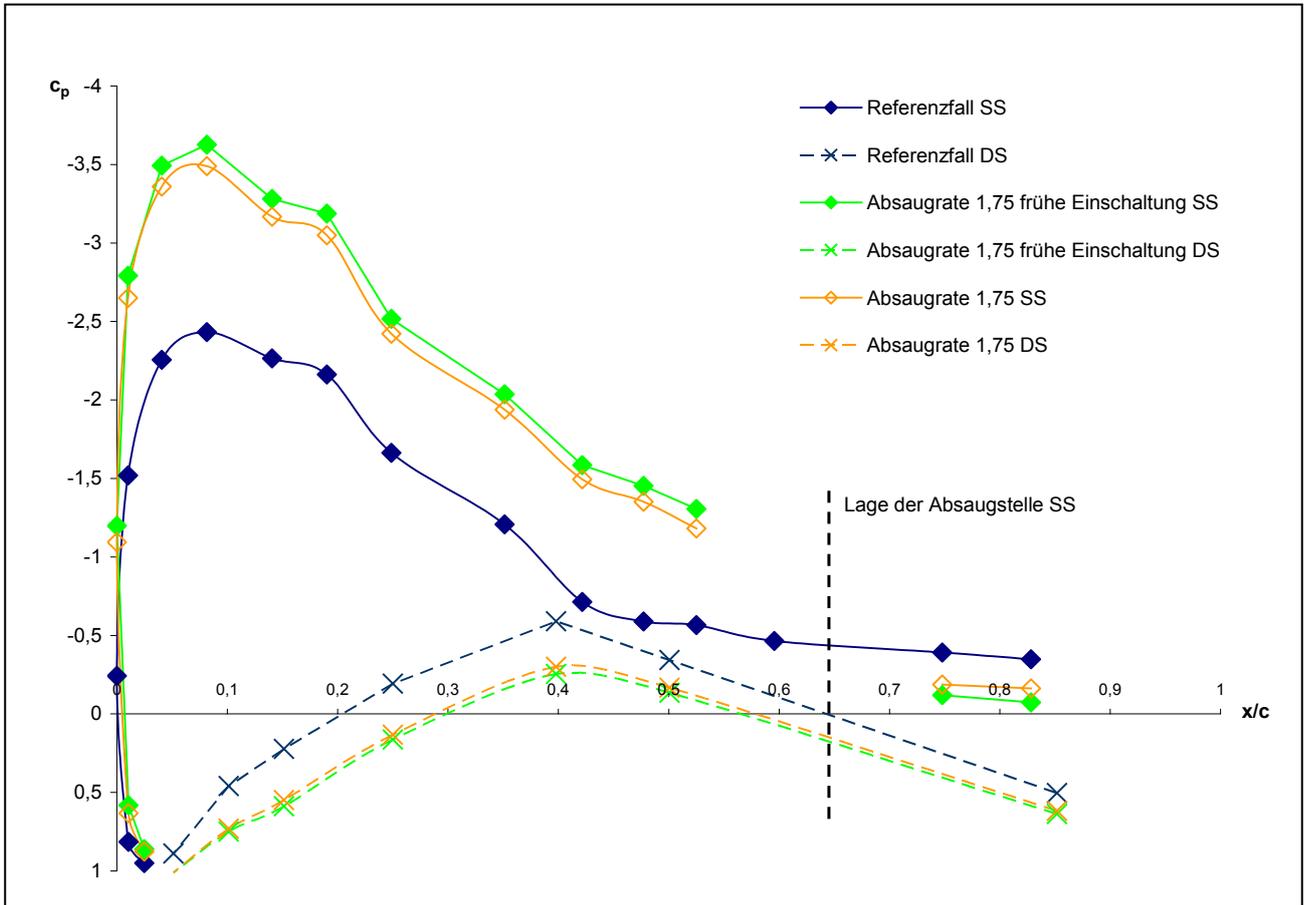
**Bild 6-21. Strömungsvisualisierung im Referenzfall und in Fällen der diskreten Lochabsaugung bei dem Anstellwinkel von 5°**



**Bild 6-22. Druckverlauf um das Profil nach Messergebnissen für den Referenzfall und in Fällen der diskreten Lochabsaugung bei verschiedenen Absaugraten beim Anstellwinkel von 5°**



**Bild 6-23. Strömungsvisualisierung im Referenzfall und im Fall der diskreten Lochabsaugung bei dem Anstellwinkel von 16°**



**Bild 6-24. Druckverlauf um das Profil nach Messergebnissen für den Referenzfall und in Fällen der diskreten Lochabsaugung bei einer Absaugrate von 1,75 für den Anstellwinkel von 16°**

**Tabelle 6-1. Exemplarische Auftriebsbeiwerte  $c_A$  nach Messergebnissen mit und ohne Einsatz der Grenzschichtabsaugung**

Anstellwinkel	Fall	Transition	Absaugrate	$C_A$	$C_A$ -Zuwachs im Vergleich zum Referenzfall
5°	Referenz	erzwungene	-	0,50	
5°	Schlitzabsaugung	erzwungene	0,15	0,80	+60%
5°	Lochabsaugung	erzwungene	0,25	0,89	+78%
5°	Lochabsaugung	erzwungene	0,8	0,96	+92%
5°	Lochabsaugung	erzwungene	1,75	1,18	+136%
16°	Referenz	freie	-	1,12	
16°	Lochabsaugung/ spätere Einschaltung	freie	1,75	1,77	+58%
16°	Lochabsaugung	freie	1,75	1,87	+67%

## 6.7 Schlussfolgerung

Die Farbanstrichversuche im Windkanal mit dem zweidimensionalen Modell eines für den Nabenbereich von WEA ausgelegten aerodynamisch dicken Profils zeigen, dass die abgelösten Strömungsbereiche bei verschiedenen Anstellwinkeln und Absaugraten durch Schlitz- oder Lochabsaugung reduziert oder vermieden werden können. Dabei wurde ein Auftriebszuwachs um bis zu etwa 140% im Vergleich zum Referenzfall gemessen. Widerstandsmessungen wurden aus konstruktiven und messtechnischen Gründen nicht durchgeführt. Basierend auf der im Windkanal gemessenen Auftriebserhöhung ist von einer Erhöhung des Rotorleistungsbeiwertes beim Einsatz der Grenzschichtabsaugung auszugehen. Die Erhöhung des Rotorleistungsbeiwertes muss quantitativ im Bezug auf eine vordefinierte Rotorgeometrie und Absaugkonfiguration weiter untersucht werden.

## 6.8 Ausblick

### 6.8.1 Anmerkungen zur passiven Grenzschichtabsaugung bei WEA

Denkbar wäre, eine Absaugstelle im Nabenbereich mit einer Auslassstelle an der Rotorblattspitze über ein Leitungssystem zu koppeln, die im Inneren des Blattes verläuft. Diese Grenzschichtabsaugung wird als passives System bezeichnet [66, 95, 96]. Das Bild 6-25 zeigt schematisch, wie der Entwurf aussehen kann. Es sind Absaugöffnungen im Nabenbereich dargestellt (um den Punkt **B**). Die Dimensionen der Löcher sind im Bild 6-25 nicht maßstabsgerecht gezeichnet. Der Punkt **C** entspricht der Auslassstelle an der Rotorblattspitze.

Es erfordert weitere Untersuchungen, ob eine Druckdifferenz zwischen den Punkten einen effektiven Absaugvolumenstrom zur Ablösekontrolle für ein passives Absaugsystem zur Verfügung stellen kann und die sich ergebende Absaugrate zu einer signifikanten Verbesserung der Leistung beiträgt und somit den Einsatz kompensiert. Einige Vorüberlegungen werden im Folgenden dokumentiert.

Eine Abschätzung der Machbarkeit der passiven Absaugung wurde für eine WEA der Megawattklasse exemplarisch durchgeführt. Es werden für eine WEA der Megawattklasse ein Rotorradius von 32 m und eine Drehzahl von  $20,7 \text{ min}^{-1}$  in der Auslegungsschnelllaufzahl angenommen. Dabei wird erwartet, dass das Profil DU-00-W2-350 um die Position  $0,25 R$  eingesetzt wird, wobei die Profiltiefe im Bereich von 3 bis 4 m bei dieser Rotorposition liegen kann. Das Windkanalmodell entspricht somit bzgl. der Profiltiefe einer Reduzierung von 1:6 bis 1:8. Die Leitung von den Absaugöffnungen (Absaugstelle **B**) bis zur Auslassstelle **C** wird als zylindrisches Rohr mit konstantem Durchmesser angenommen. Die Dichte der Luft bleibt dabei konstant. Es wird eine Geschwindigkeit der abgesaugten Luft theoretisch und ideal nach dem Impuls- und Drallsatz im beschleunigten Bezugssystem nach [58, 110] berechnet. Es wird angenommen, dass an der Rotorblattspitze ein Auslass mit einem Durchmesser von 40 mm vertretbar ist. Der sich ergebende Druckunterschied zwischen den Positionen **B** und **C** (von ca.  $2.700 \text{ N/m}^2$ ) ermöglicht für die exemplarische WEA eine passive Absaugung.

Quantitative Angaben zu Absaugraten sind von Dimensionen und vom Design der Rotorblätter und der Absaugkonfiguration abhängig. Eine quantitative Aussage ist somit bezogen auf eine konkrete WEA und Absaugkonfiguration sinnvoll, da Profile, Verwindung, vorherrschende Anstellwinkel und Druckverluste am Absaugsystem berücksichtigt werden müssen, um beurteilen zu können, ob die sich ergebende Absaugrate einen positiven Effekt bewirkt. Druckverluste an der Absaug- und Auslassstelle sind empirisch zu ermitteln.

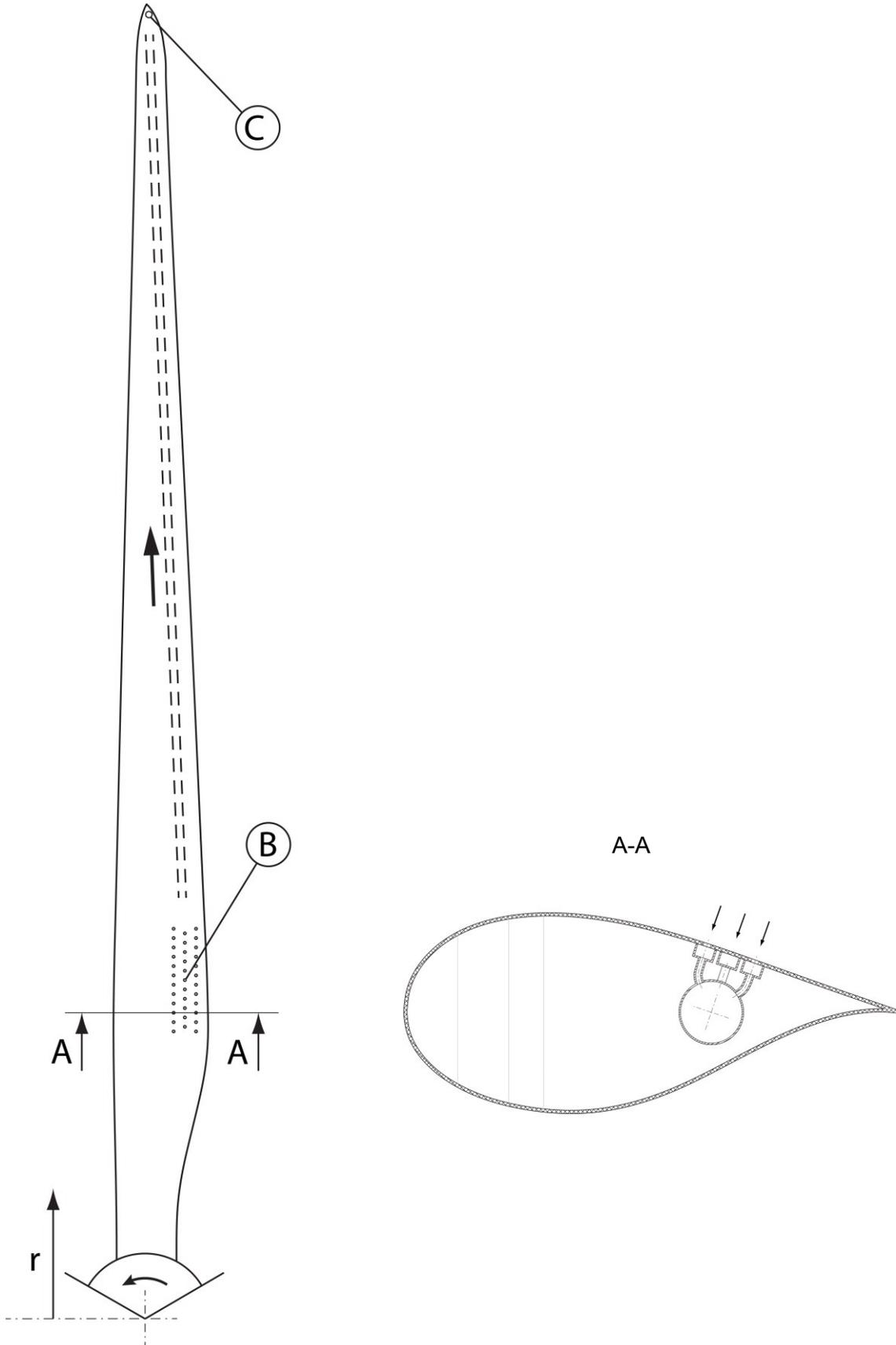


Bild 6-25. Entwurf eines passiven Grenzschichtabsaugungssystems für WEA

Es ist zu beachten, dass nicht nur eine Auftriebserhöhung und Widerstandsminderung im Naben- bis Mittelbereich erwünscht ist, sondern auch, dass die Auslässe im Spitzenbereich keine Störung der Energieumwandlung darstellen dürfen, da letztendlich ein Leistungszuwachs beabsichtigt ist. Zusätzlich, wie im Kapitel 4.4.7 bereits erwähnt, sind die aerodynamische Schallemissionen einer WEA maßgebend auf den Bereich  $0,8 R$  bis  $R$  eines Rotorblattes zurückzuführen [62], so dass eine Optimierung der Spitzenumströmung auf die akustischen Emissionen einen großen Einfluss ausübt. Insofern müssen bei der passiven Grenzschichtabsaugung die Luftauslässe an der Rotorblattspitze intensiv hinsichtlich des Leistungseinflusses und akustischer Emissionen untersucht werden. Untersuchungen zu Luftauslässen wurden für andere technische Anwendungen schon durchgeführt [66, 96] und können als Referenz dienen.

### 6.8.2 Empfehlungen für Nachfolgeuntersuchungen

Das hier zu den Modellversuchen ausgelegte Absaugsystem mit Kammer, Sammler und Rohrverbindungen kann für Nachfolgearbeiten konzeptionell genutzt werden. Die Absauganlage wurde bei der vorliegenden Arbeit derartig konstruiert, um Geräteanschaffungen zu minimieren, auch da es sich um eine erste Untersuchung handelte. Aus energiewirtschaftlichen Gründen und um die Gefahr einer Überabsaugung auszuschließen, soll die niedrigste Absaugmenge eingestellt werden, die einen positiven Effekt gewährleistet. Es wird empfohlen, die Mindestabsaugmenge aufgrund der Druckverluste im Absaugsystem experimentell zu ermitteln. Dafür ist die entsprechende Messtechnik zur Erfassung des Volumstromes erforderlich.

Bei Erfassung der Mindestabsaugmenge muss auf den frühen Zeitpunkt der Einschaltung der Absaugung geachtet werden, da die Absaugung die Grenzschichtstruktur in der Weise beeinflusst, dass sich Grenzschichtdicken verringern. Im Fall, dass die Absaugung bereits bei einem geringen Anstellwinkel aktiviert wird, kann u.U. ein gleich bleibender Absaugvolumenstrom auch für höhere Anstellwinkel ausreichen, um eine Ablösung zu vermeiden. Mit anderen Worten, eine Absaugung zum frühen Zeitpunkt respektiv bei geringern Anstellwinkel verlangt niedrigen Volumenstrom und verstärkt den positiven Effekt der Grenzschichtabsaugung.

Erwartungsgemäß ist mit einer Reynoldszahlabhängigkeit bei Anwendung einer Grenzschichtabsaugung zu rechnen. Es ist somit ggf. empfehlenswert, die Modellversuche bei höherer Re-Zahl durchzuführen.

Neben den Fragen der optimalen Öffnungsform hinsichtlich der Aerodynamik und der Beeinträchtigung der Struktur des Rotorblattes sind bei WEA-Rotorblättern noch Lösungen bezüglich des Schutzes gegen Verstopfung durch Insekten, Luftverunreinigungen und Vereisung einzubeziehen. Zum letzten Thema können Untersuchungen aus der Luftfahrt zum Einsatz der Grenzschichtabsaugung bei niedrigen Flughöhen behilflich sein [66].

Eine optimierte Konfiguration zur Grenzschichtabsaugung wird für einen definierten Design- oder Offdesign-Betriebspunkt einer Maschine üblicherweise ausgelegt. Die Ablösungsstelle, sowie die Grenzschichtstruktur ändern sich u.a mit dem Anstellwinkel. Die auf einen

Anstellwinkel optimierte Absaugkonfiguration kann sich für weitere Anstellwinkel als nicht optimal erweisen bzw. für höhere Winkel größere Absaugvolumenströme erforderlich machen. Die Grenzschichtabsaugung im Nabenbereich kann für einen einzelnen Betriebspunkt im Teillastbereich ausgelegt werden, dies kann u.U. bei Standorten mit zwei signifikanten Windgeschwindigkeitsklassen von Interesse sein.

Soll die Absaugung bei mehreren Betriebspunkten Einsatz finden, da die Rotorblätter aufgrund der Betriebsweise kurzfristigen Änderungen der Anströmbedingungen unterliegen, ist es empfehlenswert, das Konzept so weit wie möglich flexibel zu gestalten. Dies bedeutet, Variationen des Absaugvolumenstromes und der Lage der Absaugstelle bei der Auslegung vorzusehen. Denkbar wären Schlitzreihen oder perforierte Flächen, die nach Bedarf vom Anstellwinkel und der Reynoldszahl abhängig regulierbar wären. Auch bei der passiven Lösung zur Absaugung könnte durch Regelung der Auslässe an der Blattspitze die Absaugmenge reguliert werden.

Wird die Absaugung über einen breiteren Bereich in Strömungsrichtung realisiert, wie im Fall einer Schlitzreihe oder weitläufiger perforierter Fläche, wird die durch die Absaugung erzeugte lokale Störung der Grenzschicht minimiert und eine stabile Neuentwicklung der Grenzschicht unterstützt [111]. In Nachfolgeuntersuchungen sollte die diskrete Absaugung mit einer Reihe schmalere Schlitze untersucht werden.

Praxisrelevante Fragestellungen, ob z.B. die untersuchte Platzierung der Absaugstelle aufgrund der Blattstruktur und des Blattaufbaus realisierbar ist, müssen für jede Blattkonstruktion einzeln überprüft werden. Außerdem ist die Integration des Absaugsystems in die Serienproduktion von Rotorblättern sicherlich herausfordernd und verlangt Nachfolgearbeiten und enge Zusammenarbeit mit Rotorblattherstellern.

## 7 Anhang

### 7.1 CFD Untersuchungen von Rotoren von WEA

#### 7.1.1 Einleitende Bemerkung

Zum Erreichen der aerodynamischen, aeroelastischen und akustischen Optimierung ist eine fundierte Kenntnis der Strömungszustände beim Betrieb einer WEA erforderlich. Die Beobachtung der Umströmung rotierender Rotorblätter mit 40 bis 60 m Länge stellt bei Freifeld-Untersuchungen eine große Herausforderung dar. Erkenntnisse aus dreidimensionalen Modellversuchen sind häufig aufgrund beschränkter Modelldimensionen nicht auf die realen WEA übertragbar.

Numerische Verfahren der Strömungsberechnung können einen wichtigen Beitrag zum verbesserten Verständnis der Umströmung eines WEA-Rotors leisten und ermöglichen eine aerodynamische Optimierung der Rotorblätter in einer methodischen Vorgehensweise. Zur Untersuchung des Einsatzes von strömungsbeeinflussenden Maßnahmen an Rotorblättern können numerische Simulationen eine große Hilfe bieten.

#### 7.1.2 Eingesetzte Software

Die numerischen Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit entsprechen den aktuellen technischen Fortschritten bei Untersuchungen mit kommerziellen CFD-Codes [21, 23, 60, 112, 113]. Sie wurden mit der kommerziellen Software ANSYS CFX 11.0 und für die Gittergenerierung mit ANSYS ICEM CFD durchgeführt. Fluideigenschaften und Randbedingungen werden vom Bediener je nach Anwendung eingestellt. Integrierte Turbulenzmodelle können ausgewählt werden.

Es handelt sich um eine RANS-basierte Software, das das Finite-Volumen-Verfahren einsetzt [114]. Die Abkürzung RANS steht für den englischen Ausdruck Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation. Dabei werden die turbulenten Schwankungsgrößen in der Strömung herausgemittelt und ein zeitgemittelt Strömungsfeld aus den Erhaltungsgleichungen simuliert [115]. Zu Grundlagen des RANS-Gleichungsmodells wird auf [58, 116] hingewiesen.

Das Energiespektrum wird mit sogenannten Turbulenzmodellen modelliert [117]. Bei einem der für diese Arbeit durchgeführten Simulationsfälle wurde das Wirbelviskositätsturbulenzmodell  $k-\epsilon$  angewendet [114], wobei  $k$  für die turbulente kinetische Energie und  $\epsilon$  für die turbulente Dissipationsrate stehen [116]. Bei weiteren drei Fällen wird das vermehrt eingesetzte  $k-\omega$  Shear Stress Transport (SST)-Modell von Menter [118] angewendet, wobei  $\omega$  der turbulenten Frequenz entspricht [116]. Ein Vergleich beider Modelle für dasselbe Rotorblatt wurde nicht durchgeführt.

### 7.1.3 Numerische Anlagenmodelle

Es wurden Simulationen für drei kommerzielle Rotoren und einen selbst ausgelegten Rotor durchgeführt. Der selbst ausgelegte Rotor entspricht einer WEA der 600 kW-Klasse. Von den kommerziellen Anlagen gehören zwei der Rotorsätze der Megawattklasse und einer der Multimegawattklasse an. Die Geometrie der kommerziellen Rotorblätter inklusive Spinner- und Gondelgeometrie wurde von den jeweiligen Herstellern der Technischen Universität Berlin im Rahmen von Forschungsarbeiten zur Verfügung gestellt. Die Anlagen entsprechen der Standardbauform (s. Kap. 3.2) und dem drehzahlvariablen Pitch-Konzept. Der Radius des selbstausgelegten Blattes ist 25 m und bei den kommerziellen Rotorblättern zwischen 32 und 41 m lang. Die Auslegungsschnellaufzahlen dieser Anlagen variieren im Bereich zwischen 6 und 9. Die Drehzahl im Auslegungspunkt entspricht je nach Anlage 14 bis 21  $\text{min}^{-1}$ .

### 7.1.4 Gittergenerierung und Strömungsgebiete

Die Gitter wurden als strukturierte Gitter mit Hexaeder-Volumenelementen generiert. Dies verkürzt bei den Domänen Dimensionen die Rechenzeit. Der Fokus der numerischen Untersuchungen waren in allen Fällen die Nabenbereiche der Blätter, wo kreisförmige und relativ dicke Profile eingesetzt werden (s. Kap. 4.3.2). Aus diesem Grund wird um das Blatt, Nabe und Gondel ein hoch aufgelöstes O-Gitter verwendet. Für weitere Bereiche wurde die H-Typ-Topologie genutzt [117].

Es wird ein rotierender Bereich um den Rotor mit feiner Auflösung modelliert und eine weitere stationäre Domäne gestaltet, die die erste ummantelt (s. Bild A-1). Die Größen der Domänen basieren auf eigenen Parameterstudien und einer Literaturrecherche zu ähnlichen Untersuchungen. Die verfügbare Rechnerkapazität ist als weiterer Faktor zu berücksichtigen, da sie die Gitterzellenanzahl und die Dimensionen der Domänen begrenzt. Es ist für das kleinere Rotorblatt möglich gewesen, größere Domänen zu gestalten. Die rotierenden Domänen um das Rotorblatt sind 1,25..1,50 R in der radialen Richtung hoch und um 0,5 R in der Strömungshaupttrichtung lang. Es wurde versucht, mit größerer rotierender Domäne zu arbeiten. Dies hat sich als ungeeignet für den Anwendungsfall gezeigt. Die stationären Domänen haben einen Vorlauf von 4..5 R, einen Nachlauf von 10 R und sind 5..7 R in der radialen Richtung hoch. Der Übergang der Strömung von einer Domäne zur nächsten wird mittels der Frozen Rotor Methode realisiert, die als sogenanntes stationäres Rotor-Stator-Interaktionsverfahren gilt [115].

Zur Anzahl der Gitterpunkte innerhalb der Grenzschicht, sowie in der Außenströmung wurde eine Gitterstudie durchgeführt, dabei ist noch einmal ein Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit der Ergebnisse getroffen worden. Die Anzahl von mindestens zehn Gitterzellen innerhalb der Grenzschicht ist eingehalten worden [119].

Die Ergebnisse der CFD-Simulationen mit Einsatz von strömungsbeeinflussenden Elementen werden in der vorliegenden Arbeit stets im Vergleich zur Simulation des Referenzblattes, d.h. ohne Elemente, bewertet. Für diese vergleichende Betrachtungsweise ist anzustreben, dass die Gitter des Referenzblattes und des Blattes mit strömungs-

beeinflussenden Elementen, ausgenommen der Elemente selbst, sich von einander so wenig wie möglich unterscheiden.

#### 7.1.5 Randbedingungen der numerischen Simulationen

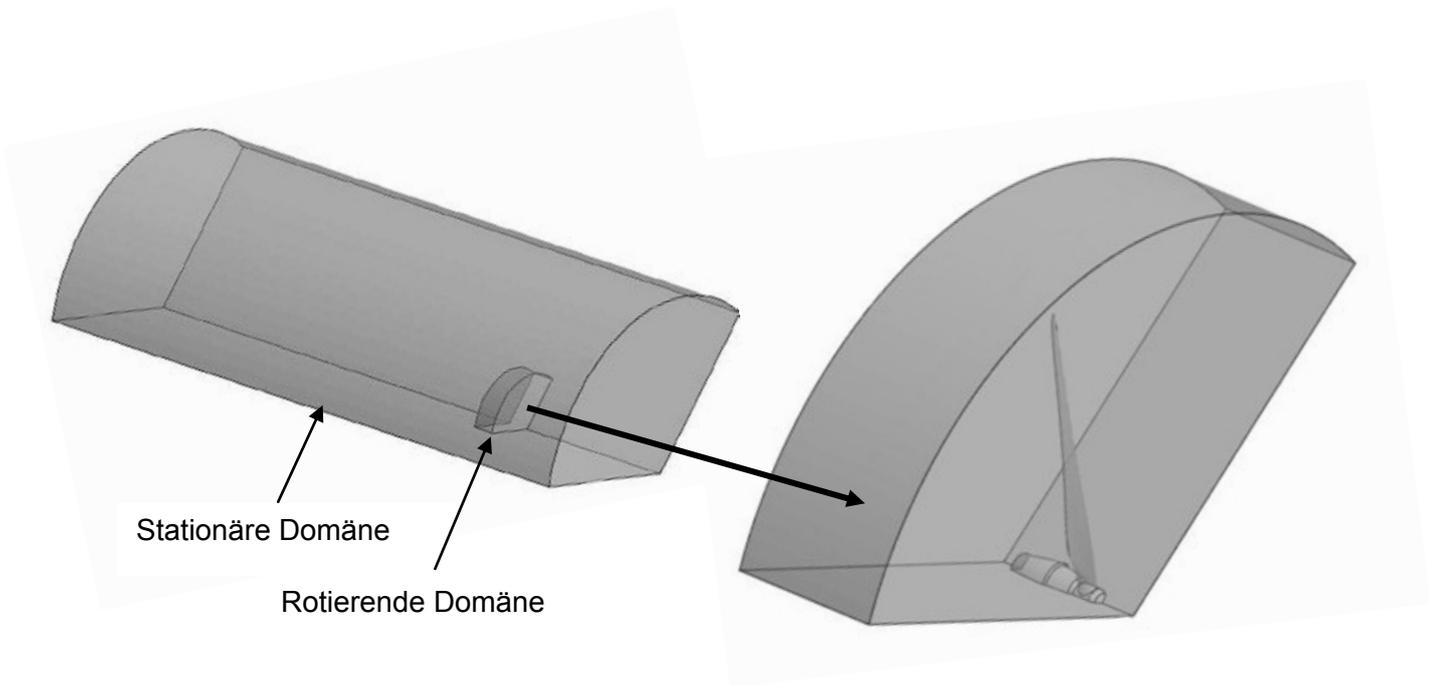
Die Simulationen werden für den turbulenten Strömungszustand durchgeführt. Eine stationäre Strömung wird angenommen. Erfahrungen mit der Einbeziehung von Transitionsmodellen bei Simulationen von Umströmungen um WEA-Rotoren gibt [44] wieder.

Ein geringer Turbulenzgrad der Anströmung von 1% wird wie üblich bei vergleichenden Arbeiten angegeben, auch wenn im Freifeld Turbulenzgrade im Bereich von 5 bis 10% gemessen werden. Es ist außerdem noch anzumerken, dass aufgrund des sehr großen Vorlaufs von  $4R$  von einer Unterdrückung der vorgegebenen Anströmungsturbulenz auszugehen ist.

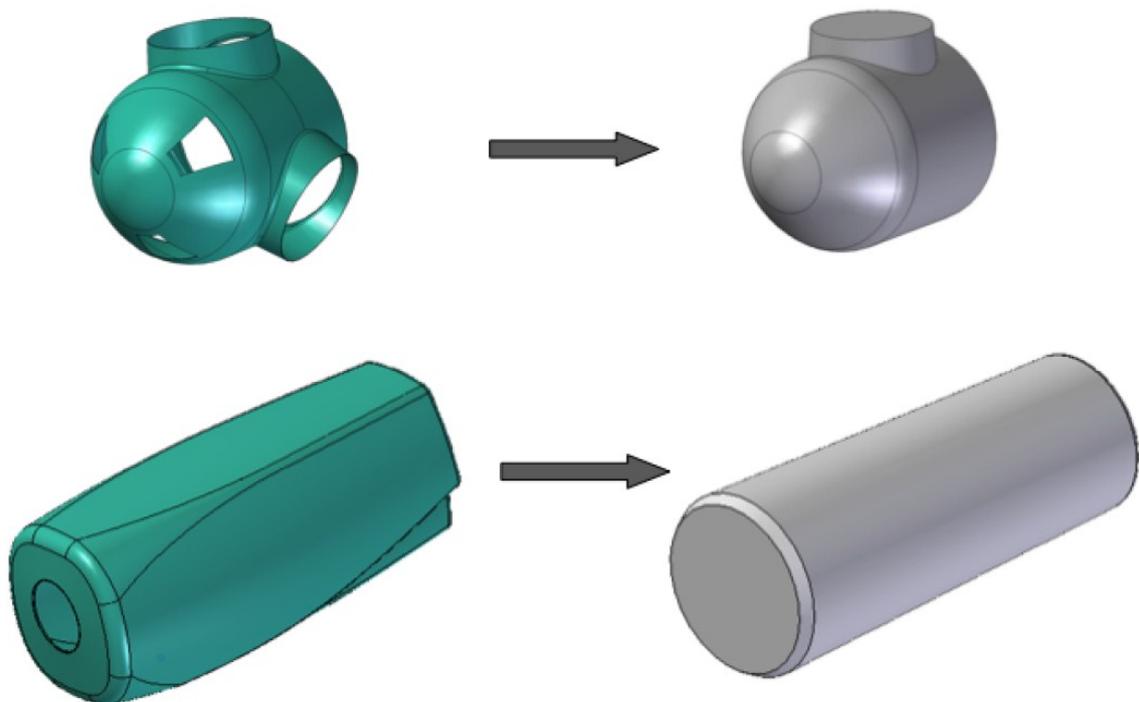
Die Kontrollvolumina sind für den Simulationsfall von Strömungen um WEA-Rotoren groß zu wählen. Zusätzlich treten signifikante Ablösungsgebiete entlang der Spannweite der Blätter auf. Beide Faktoren zusammen verlangen Vereinfachungen der Geometriemodellierung, um die Rechenzeit und Rechnerkapazität zu reduzieren. Eine Möglichkeit dabei ist, von der Periodizität Gebrauch zu machen und statt des kompletten Rotors, lediglich ein Rotorblatt zu simulieren. Dies verlangt eine axialsymmetrische Geometrie. Um die Gittergenerierung zu vereinfachen und Rechnerkapazität zu schonen, werden folgende Annahmen oder Vereinfachungen in dieser Arbeit getroffen:

- Die Interaktion Turm-Rotor wird vernachlässigt. Der Turm wird nicht modelliert.
- Die Änderungen der Windgeschwindigkeitsprofile mit der Höhe werden vernachlässigt.
- Die bei kommerziellen WEA übliche Rotorneigung zur Horizontalen wird nicht berücksichtigt.
- Die aus den schwankenden Windlasten resultierende Verbiegung des Blattes am jeweiligen Betriebspunkt kann nicht mitbetrachtet werden. Eine konstruktive Vorbeugung wurde gleichfalls nicht berücksichtigt. Der Fehler im Auslegungspunkt soll sich erfahrungsgemäß als nicht signifikant erweisen.
- Ein  $120^\circ$ -Ausschnitt wird berechnet. Die Geometrie des Spinners und der Gondel wird in Kanten und Ecken soweit vereinfacht, dass ein rotationssymmetrischer Körper entsteht (s. Bild A-2).
- Scharfe Kanten an Blattspitze und Profilhinterkante werden umgestaltet. Es wird auf minimale Dimensionen der Gitterzellen geachtet. Die Vereinfachung an der Hinterkante ist nicht gravierend, da sie auch bei der Blattfertigung bei vielen Herstellern vorkommt.

Die Interaktion zwischen den Blättern wird durch die periodischen Randbedingungen berücksichtigt. Weitere Simulationsbedingungen wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Technischen Support der Software-Entwickler durchgeführt.



**Bild A-1. Konzept mit stationärer und rotierender Domäne**



**Bild A-2. Exemplarische Vereinfachung der Geometrie des Spinners und der Gondel**

### 7.1.6 Validierung

Die Einschätzung der Güte der CFD-Ergebnisse kann mit Hilfe der Analyse des Konvergenzverlaufes und der Residuen erfolgen [119]. Eine Validierung der numerischen Ergebnisse zeigt sich bei WEA schwierig. Wie bereits erwähnt, sind aufgrund der hohen Reynoldszahlen dreidimensionale WEA-Modelle im Windkanal, die die Ähnlichkeitsgesetze noch respektieren, sehr aufwändig zu gestalten. [44] stellt Ergebnisse solcher Untersuchungen dar. Im Freifeld lässt sich eine gewisse Bestätigung der Ergebnisse erreichen. Es ist allerdings bei normalen Betriebsbedingungen schwierig, die genaue Bestimmung der momentan vorherrschenden ungestörten Windgeschwindigkeit und der sich daraus ergebenden Schnelllaufzahl, sowie des aerodynamischen Rotorleistungsbeiwertes durchzuführen. Für eine gelungene Validierung wird im Fall von kommerziellen Rotorblättern ein intensiver Austausch von sensiblen Informationen zum Leistungsverhalten der Anlagen und aufgetretenen Schäden an Rotorblättern von den Herstellern verlangt.

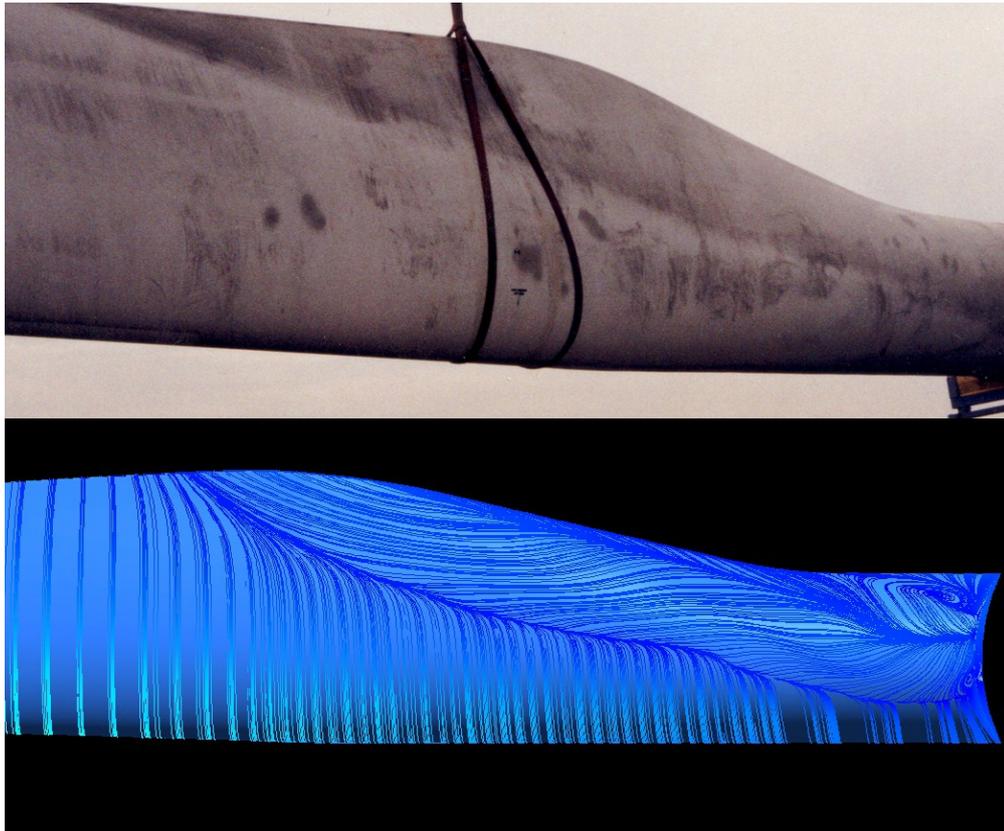
Bilder A-3 und A-4 zeigen numerische Untersuchungen von zwei der hier betrachteten kommerziellen Rotorblätter und eine Art Validierung der Ergebnisse im Feld. Das Bild A-3 aus [50] zeigt die CFD Ergebnisse und realen Schmutzspuren auf der Blattoberfläche, die sich im normalen Betrieb der Anlagen gebildet haben. Das Bild A-4 aus [57] stellt auf der rechten Seite die Ergebnisse der numerischen Simulation eines weiteren Rotorblattes dar und auf der linken Seite die Strömungsvisualisierung durch Wollfäden bei der realen WEA im Freifeld. Beide Bilder zeigen die Saugseite der Rotorblätter im Nabenbereich bei Auslegungsschnelllaufzahl. Der schwarzen Linie im Bild A-3 oben entspricht der vermuteten Ablösungslinie. In beiden Fällen kann von einer guten Übereinstimmung des simulierten Ablösebereiches ausgegangen werden.

## 7.2 CFD Untersuchungen der Profilmströmung mit Grenzschichtabsaugung

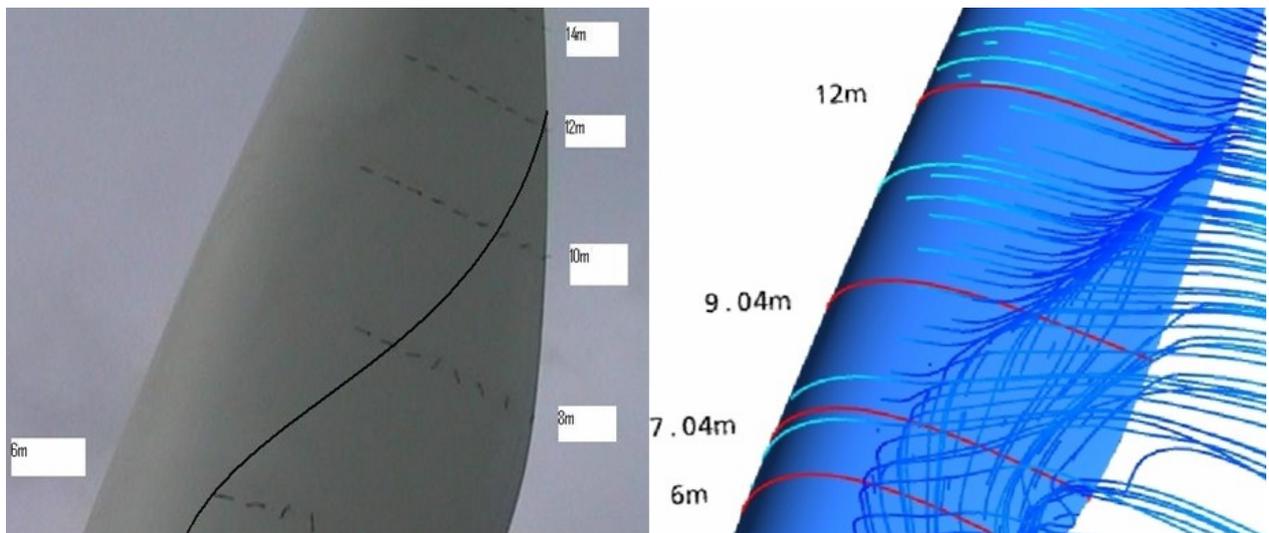
### 7.2.1 Ziel

Zweidimensionale CFD-Simulationen tragen im Vorfeld der Experimente zu einem verbesserten Verständnis der Auswirkungen der Grenzschichtabsaugung auf die Profilmströmung bei unterschiedlichen Absaugraten bei. Ein weiteres Ziel der zweidimensionalen CFD-Simulationen ist eine Parameterstudie zur Lage der Absaugstelle, zur Breite der Schlitze und Einschätzung des benötigten Volumenstromes. Diese Untersuchungen für verschiedene Anstellwinkel und zwei Reynoldszahlen von  $1 \times 10^6$  und  $3 \times 10^6$  sind vor den Experimenten durchzuführen. Letztes Ziel wurde aufgrund von Schwierigkeiten mit dem Transitionsmodell nur teilweise erreicht.

Die RANS basierten CFD Simulationen werden mit dem kommerziellen Software ANSYS CFX 11.0 und die Gittergenerierung mit ANSYS ICEM CFD realisiert. Um das dicke Profil wird zuerst ein O-Gitter gelegt, worauf sich ein C-Gitter anschließt. Um das C-Gitter wird wiederum ein H-Gitter konstruiert. Als Turbulenzmodell wird das k- $\omega$ -SST-Model und als Transitionsmodell das Gamma-Theta-Model eingesetzt.



**Bild A-3. Reale Schmutzspuren auf der Blattoberfläche, die sich im normalen Betrieb der Anlage gebildet haben (oben) und CFD Ergebnisse (unten), aus [50]**



**Bild A-4. Strömungsvisualisierung durch Wollfäden bei der realen WEA im Freifeld (links) und Ergebnisse der numerischen Simulation (rechts), aus [57]**

### 7.2.2 Modellierung

Bei den numerischen CFD-Untersuchungen wird die Schlitzabsaugung simuliert. Der Schlitz ist ein Schnitt in der Profilgeometrie, die als Inlet simuliert wird. Die Vernetzung einer perforierten Fläche würde zu einem für diese Arbeit unangemessenen Vernetzungszeitaufwand mit strukturierten Gittern bzw. Rechenzeit mit unstrukturierten Gittern führen.

Zwei Varianten werden für die Domäne ausprobiert:

- Variante 1: Der Vorlauf des Profils beträgt das Fünffache der Profiltiefe, sowie über und unter dem Profil. Der Nachlauf des Profils beträgt das Zehnfache der Profiltiefe. Zwei Varianten zur Breite des Profils werden betrachtet. Einmal ist als Breite des Profils die reale Modellspannweite von 1.400 mm (Variante 1A) und als zweite Variante ein Drittel der Profiltiefe (Variante 1B) in ICEM CFD modelliert.
- Variante 2: Der Vorlauf des Profils ist das Hundertfache der Profiltiefe, sowie über und unter dem Profil. Der Nachlauf des Profils beträgt das Zweihundertfache der Profiltiefe. Die Breite des Profils ist ein Zwanzigstel der Profiltiefe.

Die Varianten 1A und 1B wurden simuliert. Die Variante 2 konnte nicht erfolgreich eingesetzt werden. Da hier viele Parameter verändert wurden, ist es nicht möglich zu beurteilen, welche Parameter der zweiten Variante optimiert werden sollen. Es wird an dieser Stelle auf [108, 120] hingewiesen, wobei der Einfluss der Gitterauflösung auf die Ergebnisse bei ähnlichen Untersuchungen ausführlich diskutiert wird.

Die Simulationen wurden für die Auslegungs-Reynoldzahl des Profils von  $3 \times 10^6$  durchgeführt. Folgende Anstellwinkel von  $12^\circ$ ,  $16^\circ$ ,  $19^\circ$ ,  $22^\circ$  und  $25^\circ$  und Absaugraten (s. Kap. 6.3.4) im Bereich von etwa 0,1 bis 0,6 wurden simuliert. Die Simulationen spiegeln die Effekte des Einsatzes der Grenzschichtabsaugung, d.h. Veränderungen der Ablösestelle, des Grenzschichtverlaufes und der turbulenten kinetischen Energie wieder.

### 7.2.3 Validierung

Eine Validierung der RANS-basierten CFD Ergebnisse durch die Windkanalmessungen konnten in dieser Arbeit nicht durchgeführt werden, da es sich um unterschiedliche Reynoldszahlen handelt. Dennoch wird eine Tendenz der Überschätzung des benötigten Absaugvolumenstromes bei der Numerik vermutet. Da keine Validierung möglich war, wird auf die Darstellung der CFD Ergebnisse in dieser Arbeit verzichtet.

## 8 Literaturverzeichnis

1. Web-Site des Europäischen Projektes UpWind in Rahmen der EU's Sixth Framework Programme. URL: <http://www.upwind.eu>
2. Web-Site des Projektes AdapWing. URL: <http://www.risoe.dk/vea/adapwing/results.htm>
3. Johansen, J. et al.: Know-Blade Task-2 report; Aerodynamic Accessories. Risø National Laboratory: Roskilde, 2004
4. Ender, C.: Wind Energy Use in Germany – Status 31.12.2009. In: DEWI Magazin. Wilhelmshaven 2009; 36: 28-41
5. Wind Energy Market 2009, 19. Auflage der BWE-Markübersicht. Bundesverband WindEnergy e.V. (BWE): Berlin, 2009
6. Molly, J.P.: Wind Energy - Quo Vadis? In: DEWI Magazin 2009; 34: 6-15
7. Gasch, R.; Twele J. (Hrsg.): Windkraftanlagen. B. G. Teubner Verlag: Wiesbaden, 2007, 5. Auflage
8. Heier, S.: Windkraftanlagen - Systemauslegung, Integration und Regelung. B. G. Teubner Verlag: Stuttgart, 2003, 3. Auflage
9. van Kuik, G.A.M; Berg, D.E.: Wind Energy. Special Issue: Smart Blades. Editorial. Wind Energy, 2010. 13: 101
10. Barlas, T.K.; van Kuik, G.A.M.: Review of state of the art in smart rotor control research for wind turbines. Progress in Aerospace Sciences, 2010. 46(1): p. 1-27
11. Durstewitz, M. et al.: Windenergie Report Deutschland 2006, Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET): Kassel
12. Molly, J.P.: Technische Entwicklung und Anwendung der Windenergie. e&i Elektrotechnik und Informationstechnik 2003, 120 (10)
13. Hau, E.: Windkraftanlagen. Springer-Verlag: Berlin, 2003, 3. Auflage
14. König, V.: Windkraftanlagen: Marktübersicht 1989/1990. Interessenverband Windkraft Binnenland: 1989
15. Heinzelmann, B.S.: Auswahl und Bewertung von netzgekoppelten Windenergieanlagen-Konzepten nach länderspezifischen Produktanforderungen. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 2004
16. Burton, T.: Wind energy handbook. John Wiley & Sons: Chichester, 2002
17. de Vries, O.: Fluid Dynamic Aspects of Wind Energy Conversion. AGARDograph N°. 243, Report AG-243, NATO Research & Technology Association. Neuilly Sur Seine, 1979
18. Angaben der Hersteller EUROS Entwicklungsgesellschaft für Windkraftanlagen mbH – Blattfamilie EU90, URL: [http://www.euros.de/de/products\\_blades90.html](http://www.euros.de/de/products_blades90.html) (Stand 1. Februar 2010)
19. Dubs, F.: Aerodynamik der reinen Unterschallströmung. Birkhäuser Verlag: Basel, 1979, 4. Auflage
20. Manwell, J.F.; McGowan, J.G.; Rogers, A.L.: Wind Energy – Explained. John Wiley & Sons: Chichester, 2002
21. Madsen, H.A. et al.: A detailed investigation of the Blade Element Momentum (BEM) Model based on analytical and numerical results and proposal for modifications of the BEM model. The Science of Making Torque from Wind 2007. Journal of Physics: Conference Series, 2007. **75**

22. Hansen, M.O.L. et al.: State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity. *Progress in Aerospace Sciences*, 2006. **42**(4): p. 285-330
23. Laursen, J.; Enevoldsen, P., Hojrt, S.: 3D CFD quantification of the performance of a multi-megawatt wind turbine. *The Science of Making Torque from Wind 2007. Journal of Physics: Conference Series 2007*, **75**
24. Johansen, J. et al.: Numerical investigation of a wind turbine rotor with an aerodynamically redesigned hub-region. In: *Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Athens, 2006*
25. Tangler, J.L.; Somers, D.S.: NREL Airfoil Families for HAWTs. In: *American Wind Energy Association WindPower '95 Conference, Washington DC, 1995*
26. Timmer, W.A.; van Rooij, R.P.J.O.M.: Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2003. **125**: 488-496.
27. Fuglsang, P.; Bove, S.; Møllevej, R.: Wind tunnel testing of airfoils involves more than just wall corrections. In: *Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Brussels, 2008*
28. First LM blade with specially designed and tested airfoils. In: *LM Newsletter März 2009, LM Glasfiber: Kolding*
29. Knops, M.; Petsche, M.; Eyb, E.: REpower's RE-Blade Family, In: *EWEC European Wind Energy Conference, Marseille, 2009*
30. PowerBlades: Gearing up for the Offshore Wind Boom. In: *Renewable Energy World, April 2009*,  
URL:<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/04/powerblades-gearing-up-for-the-offshore-wind-boom>
31. van Rooij, R.P.J.O.M; Timmer, W.A.: Roughness Sensitivity Considerations for Thick Rotor Blade Airfoils. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2003. **125**: 468-478
32. Bertagnolio, F. et al.: *Wind Turbine Airfoil Catalogue*, Risø National Laboratory: Roskilde, 2001
33. *Wind Turbine Airfoil List*, NREL's National Wind Technology Center,  
URL: <http://wind.nrel.gov/airfoils/AirfoilList.html> (Stand 12. Oktober 2009)
34. Björck, A.: *Coordinates and Calculations for the FFA-W1-xxx, FFA-W2-xxx and FFA-W3-XXX Series of Airfoils for Horizontal Axis Wind Turbine*. Flygtekniska Försöksanstalten: Bromma, 1990
35. Bak, C. et al.: *Airfoil Characteristics for Wind Turbines*. Risø National Laboratory: Roskilde, 1999
36. Althaus, D.; Wortmann, F.X. (Hrsg): *Stuttgarter Profilkatalog I*. Vieweg Verlag: Braunschweig, 1981
37. *Airfoil Coordinates Database 1995-2009*, University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC), Applied Aerodynamics Group, URL: [http://www.ae.uiuc.edu/m-selig/ads/coord\\_database.html](http://www.ae.uiuc.edu/m-selig/ads/coord_database.html) (Stand: 16. Januar 2010)
38. Althaus, D.: *Niedriggeschwindigkeitsprofile (Stuttgarter Profilkatalog II)*. Vieweg Verlag: Braunschweig, 1996
39. van Rooij, R.; Timmer, N.: *Design of Airfoils for Wind Turbine Blades*, Delft University of Technology: Delft, 2004
40. Fuglsang, P.; Bak, C.: Development of the Risø wind turbine airfoils. *Wind Energy*, 2004, **7**(2): 145-162
41. Bak, C.; Gaunaa, M.; Antoniou, I.: Performance of the Risø-B1 airfoil family for wind turbines. In: *Peinke, J.; Schaumann, P.; Barth, S. (Hrsg.): Wind energy Proceedings of the EUROMECH Colloquium*, Springer Verlag: Berlin, 2007, 231-234

42. Chaviaropoulos, P.; Hansen, M.: Investigating Three-Dimensional and Rotational Effects on Wind Turbine Blades by means of a Quasi-3D Navies-Stokes Solver. *Journal of Fluids Engineering*, 2000. **122**
43. Bak, C.; Johansen, J.; Andersen, P.B.: Three-Dimensional Corrections of Airfoil Characteristics Based on Pressure Distributions. In: *Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Athen, 2006*
44. Bechmann, A.; Sørensen, N.N.: CFD Simulation of the MEXICO Rotor Wake. In: *Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Marseille, 2009*
45. Stoevesandt, B. et al.: Computational Simulation of the Turbulent Flow around an Airfoil using spectral/HP Method. In: *Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Milan, 2007*
46. Barthelmie, J. et al.: Modelling and measurements of wakes in large wind farms. *The Science of Making Torque from Wind 2007. Journal of Physics: Conference Series 2007, 75*
47. Peinke, J.; Schaumann, P.; Barth, S. (Hrsg.): *Wind energy Proceedings of the EUROMECH Colloquium, Springer Verlag: Berlin, 2007*
48. Schuler, S.: I1-Optimal Multivariable Pitch Control for Load Reduction on Large Wind Turbines. In: *Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Warsaw, 2010*
49. Sørensen, J.N.: VISCWIND - Viscous effects on wind turbine blades. DTU-ET-AFM-99-02. Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark, 1999
50. Heinzlmann, B. et al.: 3D numerical simulation and evaluation of the air flow through wind turbine rotors with focus on the hub area. In: Peinke, J.; Schaumann, P.; Barth, S. (Hrsg.): *Wind energy Proceedings of the EUROMECH Colloquium, Springer Verlag: Berlin, 2007: 227-230*
51. Himmelskamp, H.: Profiluntersuchungen an einem umlaufenden Propeller. *Mitteilungen aus dem Max-Planck-Institut für Strömungsforschung: Göttingen, 1950*
52. Hansen, A.C.; Butterfield, C.P.: Aerodynamics of Horizontal-Axis Wind Turbines. *Annual Reviews Fluid Mech.* 1993; **25**: 115-149
53. Carcangiu, C.E. et al.: CFD-RANS analysis of the rotational effects on the boundary layer of wind turbine blades. *The Science of Making Torque from Wind 2007. Journal of Physics: Conference Series 2007, 75*
54. Lindenburg, C.: Modeling of rotational augmentation based on engineering considerations and measurements. In: *Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, London, 2004*
55. Breton, S.P.; Coton, F.N.; Moe, G.: A Study on Rotational Effects and Different Stall Delay Models Using a Prescribed Wake Vortex Scheme and NREL Phase VI Experiment Data. *Wind Energy 2008*
56. Du, Z.; Selig, M.S.: The effect of rotation on the boundary layer of a wind turbine blade. *Renewable Energy 2000; 20*: 167-181
57. Heinzlmann, B. et al.: Investigations into boundary layer fences in the hub area of wind turbine blades. In: *Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Brussels, 2008*
58. Siekmann, H.E.; Thamsen, P.U.: *Strömungslehre – Grundlagen. Springer Verlag: Berlin, 2008, 2. Auflage*
59. Deutlich mehr Ertrag. In: *Windblatt Enercon Magazine for Wind Energy. 3/2004*
60. Mandas, N.: Numerical Prediction of Horizontal Axis Wind Turbine Flow. In: *Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Athen, 2006*

61. Andersen, P.B.: A Near Wake Model for Deformable Trailing Edge Flaps Implemented the in Multi Body Aero-Servo-Elastic Code HAWC2. In: Presentation on EWEC European Wind Energy Conference, Warsaw, 2010
62. Wagner, S.; Bareis, R.; Guidati, G.: Wind Turbine Noise. Springer Verlag: Berlin, 1996
63. Fleig, O.; Iida, M.; Arakawa, C.: Wind Turbine Blade Tip Flow and Noise Prediction by Large-Eddy Simulation. Journal of Solar Energy Engineering, 2004. **126**: 1017-1024
64. Gomez, A.; Seume, J.R.: Aerodynamic Coupling of Rotor and Tower in HAWTs. In: Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Marseille, 2009
65. Schlichting, H.; Riegels, F.W.: *Grenzschicht-Theorie*. Wissenschaftliche Bücherei: Karlsruhe, 1982, 8. Auflage
66. Gad-el-Hak, M.: Flow control - Passive, active, and reactive flow management. Cambridge University Press: Cambridge, New York, 2006
67. Nitsche, W.: Aerodynamik I. Technische Universität Berlin, 2007
68. Scott, J.J. et al.: An overview of active load control techniques for wind turbines with an emphasis on microtabs. Wind Energy. **13**(2-3): p. 239-253
69. Johansen, J.; Sørensen, N.N.: Numerical Analysis of Winglets on Wind Turbine Blades using CFD. In: Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Milan, 2007
70. Shimooka, M.; Iida, M.; Arakawa, C.: Basic Study of Winglets Effects on Aerodynamics and Aeroacoustics using Large-Eddy Simulation. In: Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Athens, 2006
71. Johansen, J.; Sørensen, N.N.: Aerodynamic Investigation of Winglets on Wind Turbine Blades using CFD. Risø-R-1543 (EN). Risø National Laboratory: Roskilde, 2006
72. Gaunaa, M.; Johansen, J.: Determination of the Maximum Aerodynamic Efficiency of Wind Turbine Rotors with Winglets. Journal of Physics: Conference Series, 2007. **75**
73. Salcedo, S. et al.: Gurney Flaps and trailing edge devices for wind turbines. In: Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Athens, 2006
74. Kentfield, J.: The Influence of Free-Stream Turbulence Intensity on the Performance of Gurney-Flap Equipped Wind-Turbine Blades. Wind Engineering, 1996. **20**(2): p. 93-105
75. Barlow, J.; William, H.; Pope, A.: Low-Speed Wind Tunnel Testing. John Wiley and Sons: New York, 1999. 3. Auflage
76. Perivolaris, Y.G.; Voutsinas, S.G.: Numerical Investigation of the Boundary Layer Control and Wind Turbine Power Production Enhancement Using Solid Vortex Generators. In: Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Warsaw, 2010
77. Velte, C.; Hansen, M.; Jønck, K.: Experimental and numerical investigation of the performance of vortex generators on separation control. Journal of Physics: Conference Series 2007, **75**
78. Xue, S. et al.: Advanced Aerodynamic Modeling of Vortex Generators for Wind Turbine Applications. In: Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Warsaw, 2010
79. LM Glasfiber S/A. Aerodynamics. A Balance between Performance and Load. *Vortex-Generatoren*.  
ULR:<http://www.lmglasfiber.com/Products/Performance/Aerodynamics.aspx>  
(Stand 1. Juni 2010)

80. Ohde, K.
81. Liebe, W.: Barriere gegen den Abreißvorgang – Barrier against the separation process. Luft- und Raumfahrt 1990; **11**: 30-34
82. Dubs, F.: Hochgeschwindigkeitsaerodynamik. Birkhäuser Verlag: Basel, 1987, 6. Auflage
83. Kawai, T.: Effect of Combined Boundary Layer Fences on Turbine Secondary Flow and Losses. JSME International Journal 1994. Series B, **37**(2)
84. Subramanian, S.: Beitrag zur experimentellen Beeinflussung und theoretischen Berechnung der Grenzschichtströmung in einem Radialverdichterlaufradkanal. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1991
85. Heinzelmann, B.: Investigations into boundary layer fences in the hub area of wind turbine blades. Vortrag auf der EWEC 2008 European Wind Energy Conference, Brussels, 2. April 2008
86. European Patent Specification, EP 1671030A1 (07.10.2004), Quell, P.; Petsche, M.
87. Gollnick, B. et al.: Numerical and experimental investigation of spoilers and stall barriers in the root area of the blade. In: 9. Deutsche WindEnergie Konferenz DEWEK, Bremen, 2008
88. Leder, A.: Abgelöste Strömung. Vieweg+Teubner: Braunschweig, 1992
89. Lee, C.S.; Bodapati, S.: Experimental Investigations of the Flowfield of an Airfoil with Spoiler. AIAA Journal, 1987. **25**(11): 1411-1416
90. Wentz, W.H.; Snyder, M.H.; Calhoun, J.T.: Systems for Large Horizontal-Axis Wind Turbines. Journal of Energy, 1981. **5**: 281-284
91. Schatz, M.: Numerische Simulation der Beeinflussung instationärer Strömungsablösung durch frei bewegliche Rückstromklappen auf Tragflügeln. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2003
92. Andersen, P.B. et al.: A Dynamic Stall Model for Airfoils with Deformable Trailing Edges. The Science of Making Torque from Wind 2007. Journal of Physics: Conference Series 2007, **75**
93. Petz, R.: Kontrolle der turbulenten Ablösung an einer Tragflügel-Hochauftriebskonfiguration. Ergebnisbericht des Sonderforschungsbereiches Beeinflussung komplexer turbulenter Scherströmungen (SSB 557). Technische Universität Berlin, 2001-2004
94. Messing, R.: Direkte numerische Simulationen zur diskreten Absaugung in einer dreidimensionalen Grenzschichtströmung. Dissertation. Universität Stuttgart, 2004
95. Waidmann, W.: Grenzschichtabsaugung: Eine Methode zur Leistungssteigerung an Windkraftanlagen. In: DEWI Magazin, 2003. 23: p. 50-58
96. Deutsche Patentschrift Nr. 700625 (27.09.1938). Liebe, W.
97. Djenidi, L.; Antonia, R.A.: Calculation of the effect of concentrated wall suction on a turbulent boundary layer using a second-order moment closure. In: International Journal of Heat and Fluid Flow 2001. **22**: p. 487-494
98. Eppler, R.: Airfoils with boundary layer suction, design and off-design cases. In: Aerospace and Science Technology. 1999. **3**: p. 403-415
99. Wagnanski, I.J.: A century of active control of boundary layer separation: a personal view. In: Meier GEA, Sreenivasan KR (Hrsg.) IUTAM Symposium on One Hundred Years of Boundary Layer Research, Springer Verlag: Berlin, 2006, 155-165
100. Domenico, P.C. et al.: Improving Aircraft Endurance Through Turbulent Separation Control by Pulsed Blowing. Journal of Aircraft, 2008. **45**(3): 900-1001

101. Boermans, L.M.M.: Research on sailplane aerodynamics at Delft University of Technology – recent and present developments. Netherlands Association of Aeronautical Engineers (NVvL). Delft University of Technology, 2006
102. Drela, M.; Youngren, H.: XFOIL-user Guide Massachusetts Institute of Technology (MIT) Aero & Astro, URL: [http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/xfoil\\_doc.txt](http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/xfoil_doc.txt)
103. Drela, M.: XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils. Conference on Low Reynolds Number Airfoil Aerodynamics, Paris, 1989
104. Schaffarczyk, A.P. et al.: Reynolds Number Effects on Thick Aerodynamic Profiles for Wind Turbines. In: Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Madrid, 2003
105. Baek, P.; Fuglsang, P.: Experimental Detection of Transition on Wind Turbine Airfoils. In: Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Marseille, 2009
106. Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik der Technischen Universität Berlin
107. Nayeri, C.N.: Mitarbeiter des Instituts für Strömungsmechanik und Technische Akustik der Technischen Universität Berlin. Persönliche Mitteilung, 2009
108. Madsen, J.: Investigation of Grid Resolution Requirements for detached Eddy Simulation of Flow around Thick Airfoil Sections. In: Proceedings of EWEC European Wind Energy Conference, Marseille, 2009
109. Meyer, R. K. J.: Experimentelle Untersuchungen von Rückstromklappen auf Tragflügeln zur Beeinflussung. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2000
110. Spurk, J.H.: Aufgaben zur Strömungslehre. Springer Verlag: Berlin, 1994
111. Horstmann, K.H.: Persönliche Mitteilung am 22. August 2008. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Braunschweig
112. van Rooij, R.P.J.O.M; Arens, E.A.: Analysis of the experimental and computational flow characteristics with respect to the augmented lift phenomenon caused by blade rotation. The Science of Making Torque from Wind 2007. Journal of Physics: Conference Series 2007, **75**
113. Sørensen, N.N.: 3D Background Aerodynamics using CFD. Risø-R-1376 (EN), Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2002
114. Ferziger, J.H.; Milovan, P.: Numerische Strömungsmechanik. Springer Verlag: Berlin, 2008
115. Carolus, T.: Ventilatoren - Aerodynamischer Entwurf, Schallvorhersage, Konstruktion. Vieweg + B.G. Teubner-Verlag: Stuttgart, 2009, 2. Auflage
116. Oertel Jr., H. (Hrsg): Prandtl-Führer durch die Strömungslehre. Vieweg Verlag: Braunschweig, 2002, 11. Auflage
117. Ansys CFX. Ansys CFX-Solver, Release 11.0: Modelling. 2005
118. Menter, F.R.: Zonal Two Equation k- $\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows. AIAA Paper 93-2906, 1993
119. Ansys CFX Best practices guide for numerical accuracy. 2007
120. Winkler, H.; Schaffarczyk, A.P.: Numerische Simulation des Reynoldszahlverhaltens von dicken aerodynamischen Profilen für Off-Shore-Anwendungen. Fachhochschule Kiel, University of Applied Sciences. Bericht des Labors für Numerische Mechanik. Kiel, 2003