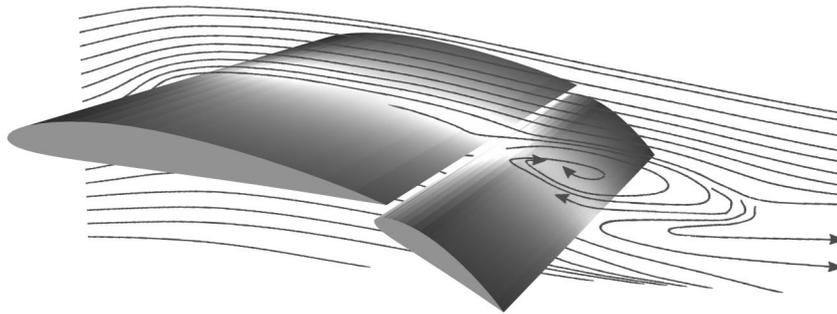


Aktive Kontrolle der Strömungsablösung an einer Hochauftriebs-Konfiguration

vorgelegt von Frank Tinapp



Von der Fakultät V
Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuß:

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. A. Dillmann

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. W. Nitsche

Prof. Dr.-Ing. Chr. Haberland

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 14.12.2001

Berlin, 2001
(D83)

Technische Universität Berlin
Fakultät V Verkehrs- und Maschinensysteme
Institut für Luft- und Raumfahrt

Frank Tinapp

Aktive Kontrolle der Strömungsablösung an einer Hochauftriebskonfiguration

Von der Fakultät V
Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

Wissenschaftliche Aussprache am 14.12.2001

Promotionsausschuß:

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. A. Dillmann
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. W. Nitsche
Prof. Dr.-Ing. Chr. Haberland

Berlin, im Dezember 2001

D83

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Aerodynamik am Institut für Luft- und Raumfahrt an der TU-Berlin in der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Nitsche im Rahmen des Universitären Forschungsschwerpunktes UF8 „Kontrolle turbulenter Scherströmungen“ und des Sonderforschungsbereiches 557 „Beeinflussung komplexer turbulenter Scherschichten“. Während dieser Zeit hatte ich die Gelegenheit, mich intensiv mit der angewandten Aerodynamik im allgemeinen und mit der aktiven Kontrolle von Strömungsablösung im speziellen zu beschäftigen.

Meinem Doktorvater, Herr Prof. Nitsche, möchte ich ganz besonders danken. Durch seine Unterstützung auch während schwieriger Projektphasen und durch einen regen fachlichen Austausch hat er sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Bereits ganz am Anfang meiner wissenschaftlichen Tätigkeit hat er mich in die Kunst des wissenschaftlichen Schreibens eingeführt und mir die Schönheit so manchen Tagungsortes vor Augen geführt.

Mein Dank gilt außerdem Herrn Prof. Haberland für die freundliche Übernahme des Ko-referates sowie Herrn Prof. Dillmann für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Ich bedanke mich bei allen meinen Kollegen der Arbeitsgruppe, welche mich während meiner Zeit an der TU-Berlin tatkräftig bei meinen experimentellen Untersuchungen unterstützt haben. Insbesondere geht mein Dank an unseren Elektroniker Herrn Dipl.-Ing. Klaus Noack für seine unübertroffene Geduld beim Erklären elektronischer Zusammenhänge, sowie an unseren Versuchstechniker Reiner Thiel, der als „guter Geist der Versuchshalle“ immer zur Stelle war, wenn man ihn brauchte.

Ohne die Hilfe von zahllosen Studien- und Diplomarbeitern, und deren Zuarbeit wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen. Besonders stolz bin ich darauf, daß eine Vielzahl der Studenten, nach Abschluß ihrer Diplomarbeit bei mir, ebenfalls eine wissenschaftliche Laufbahn eingeschlagen haben.

Danken möchte ich auch meiner Frau Pamela, die mich über die gesamte Dauer meiner Forschungstätigkeit verständnisvoll unterstützt und angespornt hat. Dank ihres Einsatzes war es mir möglich, das Heranwachsen unserer gemeinsamen Tochter Claudia Daniela zu genießen, ohne meine wissenschaftliche Arbeit vernachlässigen zu müssen.

Für
Pamela und Claudia Daniela

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
Nomenklatur	5
Übersicht	9
1 Einleitung	11
2 Stand der Forschung	15
2.1 Grundlagen der Strömungsablösung	15
2.2 Ablösekontrolle	19
2.2.1 Formgebung	19
2.2.2 Kontinuierliches Ausblasen bzw. Absaugen	22
2.2.3 Periodische Anregung	23
2.2.4 Kontrollstrategien	25
2.3 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	27
3 Versuchsaufbau	29
3.1 Versuchsmodell	29
3.1.1 Allgemeines	29
3.1.2 Wasserkanalmodell	30
3.1.3 Windkanalmodell	31
3.2 Anregemechanismus	35
3.2.1 Definition der Anregeparameter	35
3.2.2 Pulsierende Anregung am Wasserkanal-Versuchsmodell	36
3.2.3 Oszillierende Anregung am Windkanal-Versuchsmodell	37
3.3 Versuchsanlagen	40
3.3.1 Wasserkanal	40
3.3.2 Grenzschichtkanal	40
3.3.3 Großer Windkanal am HFI	41
3.4 Meßverfahren	42
3.4.1 Anströmgeschwindigkeit	42
3.4.2 Druckverteilung	42
3.4.3 Windkanalwaage	44
3.4.4 Messung der Druckschwankungen im Aktuator	46
3.4.5 Hitzdraht-Anemometrie	46

3.4.6	Laser-Doppler-Anemometrie	47
3.5	Schematische Darstellung der Versuchsaufbauten	50
3.5.1	Vorversuche am Wasserkanal	50
3.5.2	Vorversuche am Windkanal	51
3.5.3	Hauptuntersuchungen am Windkanal	52
4	Voruntersuchungen	55
4.1	Untersuchungen am Wasserkanal-Modell	55
4.1.1	Zweidimensionalität der Profilmströmung	55
4.1.2	Der Grundströmungszustand	56
4.1.3	Einfluß der periodisch pulsierenden Anregung	60
4.2	Untersuchungen am Windkanal-Modell	66
4.2.1	Einfluß der periodischen Anregung auf ein Einzelprofil	66
4.2.2	Einfluß der Anregung auf die Hochauftriebskonfiguration	68
4.3	Fazit der Voruntersuchungen	72
5	Hauptuntersuchungen	73
5.1	Einströmbedingungen	73
5.2	Festlegung der Testfälle	76
5.3	Grundströmung	78
5.4	Angeregte Strömung	81
5.4.1	Variation der Anregeparameter	81
5.4.2	Einfluß der Anregung auf das Nahfeld	83
5.4.3	Strömungsfeldmessung, zeitlich gemittelt	87
5.4.4	Strömungsfeldmessung, phasengemittelt	90
5.4.5	Frequenzanalyse des angeregten Strömungsfeldes	94
5.4.6	Einfluß der Anregung auf die Auftriebspolaren	96
5.5	Fazit der Hauptuntersuchungen	98
6	Zusammenfassung	99
	Lebenslauf	111

Nomenklatur

Symbol	Einheit	Bezeichnung
Arabische Buchstaben		
A	[N]	Auftrieb
A_{Modell}	[m ²]	Gesamtfläche des Versuchsmodells
$A_{Section}$	[m ²]	Querschnittsfläche der Meßstrecke
b	[m]	Spannweite
$B_{Section}$	[m]	Breite der Meßstrecke
c	[m]	Profiltiefe
c_{Main}	[m]	Profiltiefe des Hauptprofils
c_{Flap}	[m]	Profiltiefe der Hinterkantenklappe
c	[m/s]	Resultierende Strömungsgeschwindigkeit
\bar{c}	[m/s]	Zeitlicher Mittelwert der resultierenden Strömungsgeschwindigkeit
c'	[m/s]	Schwankungswert der resultierenden Strömungsgeschwindigkeit
c_p	[-]	Druckbeiwert
c_a	[-]	Auftriebsbeiwert aus Druckmessung
c_A	[-]	Auftriebsbeiwert aus Kraftmessung
c_{A0}	[-]	Auftriebsbeiwert ohne Beeinflussung
$c_{A,Grund}$	[-]	Auftriebsbeiwert ohne Hochauftriebshilfen
c_W	[-]	Widerstandsbeiwert
c_{Nm}	[-]	Nickmomentenbeiwert
c_S	[-]	Seitenkraftbeiwert
c_{Gm}	[-]	Giermomentenbeiwert
c_{Rm}	[-]	Rollmomentenbeiwert
c_μ	[-]	Impulsbeiwert der Anregung
$d_{Partikel}$	[m]	Durchmesser der Seedingpartikel
F	[Hz]	Frequenz
F_D	[Hz]	Dopplerfrequenz
g	[mm]	Horizontaler Abstand zwischen Hauptprofilhinterkante und Klappenvorderkante
Gm	[Nm]	Giermoment
h	[mm]	Vertikaler Abstand zwischen Hauptprofilhinterkante und Klappenvorderkante
H	[m]	Breite des Anregeschlitzes
$H_{Section}$	[m]	Höhe der Meßstrecke
\tilde{I}	[A]	Schwankungswert der elektrischen Stromstärke
l	[m]	Bezugslänge
Nm	[Nm]	Nickmoment

p	[Pa]	Druck
\tilde{p}	[Pa]	Schwankungswert des Druckes
p_0	[Pa]	Statischer Druck
p_{ges}	[Pa]	Gesamtdruck
p_i	[Pa]	Statischer Druck an der jeweiligen Druckbohrung
p_{umg}	[Pa]	Umgebungsdruck
P'_{el}	[W]	Schwankungswert der elektrischen Leistung
q	[Pa]	Staudruck
t	[s]	Zeit
Re_c	[-]	Reynoldszahl, bezogen auf die Profiltiefe
Rm	[Nm]	Rollmoment
S	[N]	Seitenkraft
T	[K]	Temperatur
Tu	[%]	Turbulenzgrad
u	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung
$u(x)$	[m/s]	Geschwindigkeitsverteilung in x-Richtung
$u(y)$	[m/s]	Geschwindigkeitsverteilung in y-Richtung
\bar{u}	[m/s]	Zeitlich gemittelte Geschwindigkeit
u'	[m/s]	Schwankungsgröße der Geschwindigkeit
u_0	[m/s]	Maximal auftretende Geschwindigkeit
u_δ	[m/s]	Geschwindigkeit am Grenzschichttrand
u_∞	[m/s]	Anströmgeschwindigkeit
u_{Edge}	[m/s]	Geschwindigkeit am Grenzschichttrand
u_{Jet}	[m/s]	Geschwindigkeit im Klappenspalt-Strahl
\tilde{U}	[V]	Schwankungswert der elektrischen Spannung
v	[m/s]	Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Hauptströmungsrichtung
v_{max}	[m/s]	Maximale Strahlgeschwindigkeit
v'	[m/s]	Schwankungswert der Strahlgeschwindigkeit
w	[m/s]	Geschwindigkeitskomponente quer zur Hauptströmungsrichtung
W	[N]	Strömungswiderstand
x, y, z	[mm]	Koordinaten
x_A	[mm]	Ablöseposition
x_f	[mm]	Position der virtuellen Vorderkante der ebenen Platte
x/c_{flap}	[-]	x-Position bezogen auf die Klappenprofiltiefe
x/c_{main}	[-]	x-Position bezogen auf die Hauptprofiltiefe

Griechische Buchstaben

α	[°]	Anstellwinkel des Hauptflügels
η	[°]	Anstellwinkel der Hinterkantenklappe
δ	[mm]	Grenzschichtdicke
δ^*	[mm]	Verdrängungsdicke
λ	[m]	Wellenlänge
λ_{flap}	[-]	Streckung des Klappenprofiles
λ_{main}	[-]	Streckung des Hauptprofiles
μ	[kg/ms]	Dynamische Viskosität

ν	[m ² /s]	Kinematische Viskosität
Φ	[°]	Phasenwinkel
ρ	[kg/m ³]	Dichte
Θ	[°]	Kreuzungswinkel
θ	[mm]	Impulsverlustdicke
θ_0	[mm]	Impulsverlustdicke an der Stelle des Geschwindigkeitsmaximums

Kennzahlen

$Re = u_\infty \cdot \frac{l}{\nu}$	[-]	Reynolds-Zahl
$Re_{\delta^*} = u \cdot \frac{\delta^*}{\nu}$	[-]	Reynoldszahl bezogen auf die Verdrängungsdicke
$St = \frac{F \cdot l}{u_\infty}$	[-]	Strouhal-Zahl

Übersicht

Diese Arbeit beschreibt experimentelle Untersuchungen zur aktiven Beeinflussung der Strömungsablösung an einer Tragflügel-Hochauftriebskonfiguration. Ziel war es, die abgelöste Strömung über der Hinterkantenklappe durch gezielte periodische Anregung so zu beeinflussen, daß sie wiederanlegt. Dadurch sollte insbesondere das Auftriebsverhalten der Hochauftriebskonfiguration dahingehend beeinflusst werden, daß entweder höhere Auftriebsbeiwerte erzielt werden können oder aber der nutzbare Anstellwinkelbereich erhöht wird.

Hierzu kommen verschiedene Anregemechanismen zur Anwendung. Dem Einsatz von Tiefton-Lautsprechern in Kombination mit Aktuatorschlitzen in der Nähe der Ablöseposition wird dabei besondere Beachtung geschenkt, da sich diese Art der Anregung als besonders wirkungsvoll herausgestellt hat.

Die experimentellen Untersuchungen unterteilen sich in Vorversuche in einem Wasserkanal und in einem kleinen Windkanal, sowie die Hauptuntersuchungen in einem großen Windkanal bei einer Reynoldszahl von $Re_C = 1.6 \cdot 10^5$.

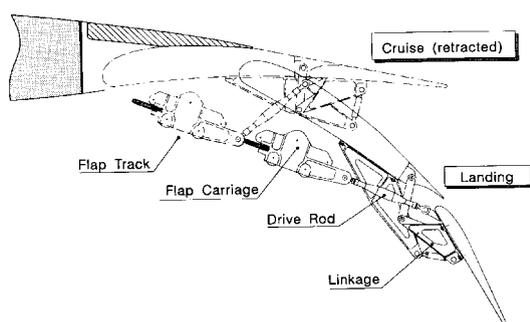
Bei den Vorversuchen steht zunächst die generelle Frage nach der Realisierbarkeit einer Ablösekontrolle durch periodische Anregung im Vordergrund. Die weiterführenden Untersuchungen in den Windkanälen zielen auf die Optimierung der Anregeparameter zur Erreichung maximalen Auftriebes. Hierzu muß zunächst das Verhalten der Grundströmung, insbesondere im Fall der Strömungsablösung, untersucht werden. Im Vordergrund stehen hierbei Frequenzanalysen des Strömungsfeldes im Bereich der Ablösung. Die Ergebnisse dieser Untersuchung lassen Rückschlüsse auf den Frequenzbereich zu, bei dem eine periodische Anregung der abgelösten Strömung zum Wiederanlegen führt. Für einen exemplarischen Testfall, bei dem die Anregung mit optimierten Anregeparametern zum Wiederanlegen und damit zu einer Auftriebssteigerung führt, wird abschließend das angeregte Strömungsfeld im Detail analysiert.

Insgesamt zeigt diese Arbeit deutlich, daß durch den gezielten Einsatz der periodischen Anregung, das Strömungsverhalten, insbesondere im Bereich des Hochauftriebes, drastisch verbessert werden kann. Das Ausblasen und Einsaugen durch einen schmalen Schlitz mit einer bestimmten Frequenz und Intensität führt zum Wiederanlegen der zuvor abgelösten Strömung, und der erreichbare Auftrieb wird dadurch deutlich gesteigert.

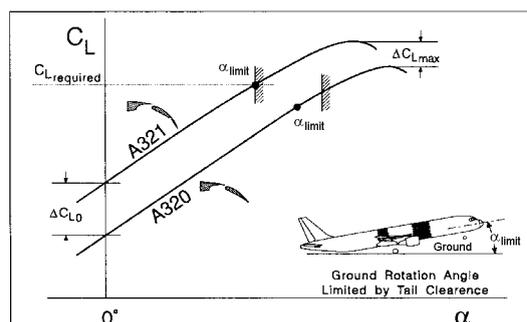
1. Einleitung

Die größten aerodynamischen Anforderungen an einen Tragflügel in Hinblick auf die Erzeugung von Auftrieb gelten während der Phasen niedriger Geschwindigkeit. Dies trifft in erhöhtem Maße auf die Startphase zu, da der Tragflügel hier in der Lage sein muß, unter allen Bedingungen, wie z.B. Triebwerksausfall, hoher Lufttemperatur oder niedriger Luftdichte aufgrund der Höhenlage des Flugplatzes, das Abfluggewicht des Flugzeuges zu kompensieren, um ein sicheres Abheben zu gewährleisten. Der maximal erreichbare Auftrieb eines Tragflügels bei hohem Anstellwinkel wird dabei durch das Auftreten von Strömungsablösung, dem sogenannten „stall“, begrenzt.

Dieses Problem wird in der Luftfahrtindustrie üblicherweise durch den Einsatz von Hochauftriebshilfen gelöst. Diese mechanischen Zusatzelemente des Tragflügels erlauben es, den erreichbaren Auftrieb mit verschiedenen Methoden zu erhöhen. Hochauftriebssysteme bestehen zumeist aus mechanisch komplexen und daher sehr wartungsintensiven Klappensystemen, wie sie exemplarisch in Bild 1.1(a) dargestellt sind. Als Beispiel für die Notwendigkeit des Einsatzes einer komplexen Klappensystems sei hier das Airbus A320/A321-Programm genannt. Durch Modifikation des Rumpflayouts (gestreckter Rumpf) werden erhöhte Anforderungen an das Hochauftriebssystem des ansonsten unveränderten Tragflügels gestellt. Trotz Limitierung des Anstellwinkels α aufgrund des verlängerten Rumpfes und erhöhten Abfluggewichtes muß der Flügel in der Lage sein, genügend großen Auftrieb für Start und Landung zu liefern (siehe Bild 1.1(b)). Ein aufwendigeres Klappensystem (Doppelspalt- anstatt Einfachspalt-Flügel) kann hier Abhilfe schaffen. Das dadurch ver-



(a) Komplexe Mechanik zur Steuerung des Hinterkantenklappen-Systems



(b) Erhöhte Anforderung an den Auftrieb beim Startvorgang, aufgrund von Streckung des Flugzeugrumpfes am Beispiel der A320/321

besserte Auftriebsverhalten wird „erkauft“ durch eine komplexere Ansteuerungsmechanik der Klappen (Bild 1.1(a)) und daraus resultierend ein höheres Strukturgewicht und erhöhte Wartungskosten. Wünschenswerter wäre allerdings gewesen, das Hochauftriebsverhalten durch alternative aerodynamische Methoden zu verbessern, ohne die Komplexität der Struktur so gravierend zu erhöhen. An dieser Stelle soll das Konzept der vorliegenden Arbeit zur Auftriebserhöhung durch gezielte aktive Beeinflussung der Strömung greifen.

Wie bereits erwähnt wurde, ist der maximal erreichbare Auftrieb eines Flügels im allgemeinen durch die auf der Saugseite des Flügelprofils einsetzende Strömungsablösung limitiert (siehe Bild 1.2(a)). Zur Vermeidung der Ablösung (und damit zur Aufrechterhaltung des Auftriebs) werden - wie bereits am Beispiel der A321 gezeigt - üblicherweise komplexe Klappensysteme an Vorder- und Hinterkante eingesetzt, die ein passives, d.h. auf Formgebung basierendes Kontrollsystem für die Flügelumströmung bilden. Dadurch ist es möglich, den maximal erreichbaren Auftriebsbeiwert beträchtlich zu steigern.

Neuere Forschungsansätze konzentrieren sich auf die aktive Kontrolle des Hochauftriebes, und zwar z.B. mit Hilfe periodischer Anregung der ablösegefährdeten (bzw. bereits abgelösten) Scherschicht durch oszillierend ausgeblasene Luft oder auch mit Hilfe von mechanischen Aktuatoren. Ziel ist es dabei, die Strömungsablösung zu höheren Anstellwinkeln und damit zu höheren Auftriebsbeiwerten zu verschieben. Damit wird es möglich, entweder deutlich leistungsfähigere Hochauftriebskonfigurationen zu verwirklichen oder aber weniger komplexe Klappensysteme zu verwenden, die ein gleichwertiges oder gar besseres Hochauftriebsverhalten aufweisen, als die zur Zeit im Einsatz befindlichen komplexen Systeme. Die Wirkung der aktiven Beeinflussung auf das Auftriebsverhalten wird in Bild 1.2(b) sinnbildlich am Beispiel einer Zweiflügel-Hochauftriebskonfiguration verdeutlicht.

Während für die Strömung um Hochauftriebskonfigurationen im wesentlichen die globalen Parameter wie Anstellwinkel, Klappenspaltgeometrie, Anströmgeschwindigkeit und Turbulenzgrad maßgeblich sind, kommt im Falle einer aktiven Beeinflussung sowohl der Lage

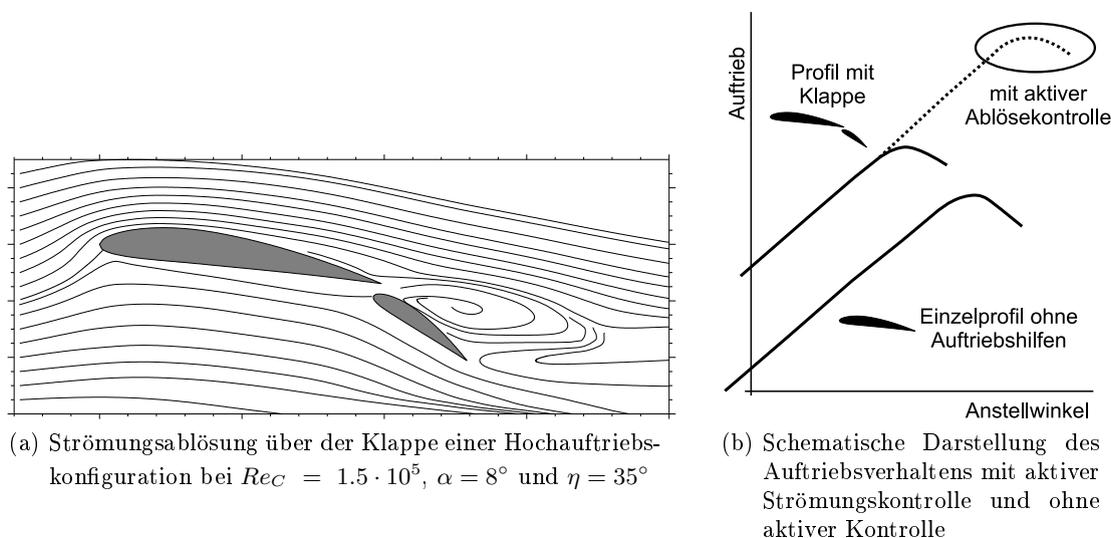


Bild 1.2: Allgemeine Problematik beim Einsatz von Hochauftriebs-Konfigurationen

und der Ausrichtung der Störquelle als insbesondere auch der Art der Anregung (periodisches Ausblasen und Ansaugen / gepulster Strahl / akustische Anregung / oszillierende Klappen oder Zusatzspoiler) eine große Bedeutung zu. Letztendliches Ziel derartiger Maßnahmen muß es sein, mit minimalem Energieaufwand bei der Anregung ein Maximum an Leistungssteigerung im Hochauftrieb zu erzielen.

Die im Zusammenhang mit dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen am Institut für Luft- und Raumfahrt fanden zunächst im Rahmen des Universitären Forschungsschwerpunktes UF8 „Kontrolle turbulenter Scherströmungen“ statt, der seine Fortsetzung im Sonderforschungsbereich 557 „Beeinflussung komplexer turbulenter Scherschichten“ fand. Sie konzentrierten sich primär auf die experimentelle Untersuchung der aktiven Strömungsbeeinflussung an einer generischen 2-Element Hochauftriebskonfiguration entsprechend Bild 1.2. Zunächst wurden Vorversuche im Wasserkanal durchgeführt, danach anschließend Messungen im Niedergeschwindigkeits-Windkanal des ILR und im großen HFI-Kanal. Dabei wurden am Wasserkanal insbesondere Untersuchungen zur Grundströmung und zur Reaktion der mittleren Strömungsfelder auf die Anregung (LDA-Strömungsfeldmessungen) sowie Visualisierungen des Ablöseverhaltens mit und ohne Strömungsanregung durchgeführt. Der Schwerpunkt bei den Experimenten im Windkanal lag vor allem auf der Erfassung des phasengemittelten Strömungsfeldes sowie der Messung der statischen Wanddrücke und der auf das Modell wirkenden Kräfte, um daraus den Auftriebsbeiwert bei aktiver Beeinflussung zu bestimmen.

2. Stand der Forschung

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist die Verzögerung der Strömungsablösung an einer Hochauftriebskonfiguration bei hohen Anstellwinkeln. Daher wird im folgenden kurz das Thema der Strömungsablösung im allgemeinen behandelt, um danach einige der verschiedenen Möglichkeiten zur Ablösekontrolle aufzuzeigen. Diese können generell in passive und aktive Maßnahmen eingeteilt werden. Insbesondere bei den aktiven Maßnahmen zur Ablösekontrolle sind die eingesetzten Kontrollstrategien von großer Wichtigkeit und sollen daher an dieser Stelle kurz diskutiert werden. Aus dem aktuellen Stand der Forschung wird schließlich die Zielsetzung für die vorliegende Arbeit abgeleitet.

2.1 Grundlagen der Strömungsablösung

Ein in Strömungsrichtung positiver Druckgradient, wie er z.B. an der stetig gekrümmten Oberfläche eines Tragflügelprofils hinter dem Druckminimum auftritt, hat einen großen Einfluß auf das Verhalten der Grenzschichtströmung. Dieser positive Druckgradient wird verursacht durch die Verlangsamung der Außenströmung und der daraus resultierenden Zunahme des statischen Druckes der Strömung in diesem Bereich. Der statische Druck der Außenströmung prägt sich unmittelbar über die Grenzschicht auf die Wand auf und bewirkt somit auch den Druckanstieg entlang der gekrümmten Wandkontur. Bild 2.1 zeigt anschaulich, wie der Druckanstieg in Strömungsrichtung eine kontinuierliche Abbremsung der Strömung bewirkt, die zusätzlich zu der abbremsenden Wirkung resultierend aus der Zähigkeit des Strömungsmediums zum Tragen kommt. Die Verzögerung wirkt stärker nah

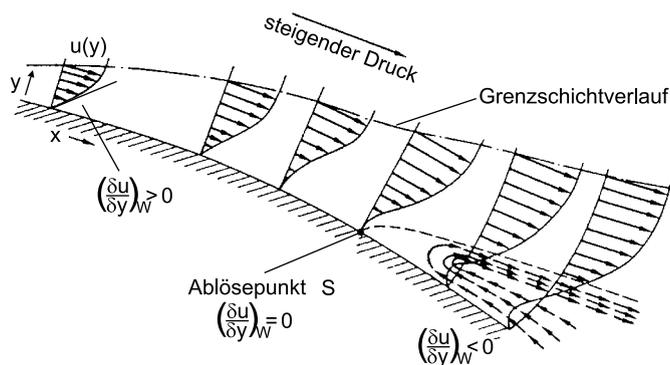


Bild 2.1: Entstehung der Strömungsablösung an einer gekrümmten Oberfläche mit positivem Druckgradienten [23]

an der Oberfläche, so daß sich die Geschwindigkeitsprofile in Wandnähe stark verformen. Daraus resultiert eine Reduzierung des Geschwindigkeitsgradienten an der Wand $(\frac{\delta u}{\delta y})_w$. Erfolgt die Geschwindigkeitsverzögerung über einen ausreichend langen Zeitraum, so wird schließlich der Punkt erreicht, an dem $(\frac{\delta u}{\delta y})_w$ gleich Null wird. Dieser Punkt wird als Ablösepunkt bezeichnet und ist in Bild 2.1 mit dem Buchstaben „S“ gekennzeichnet. Stromab des Ablösepunktes nimmt $(\frac{\delta u}{\delta y})_w$ negative Werte an, d.h. die Strömung parallel zur Wand ist in diesem Bereich stromauf gerichtet. Diese Region wird als Ablöse- bzw. Rezirkulationsgebiet bezeichnet.

Strömungsablösung kann z.B. auftreten bei Tragflügelprofilen mit großem Anstellwinkel, in Diffusoren mit überkritischem Öffnungswinkel oder im Bereich von Verdichtungsstößen. Auch eine unstetige Geometrieänderung der Kontur bewirkt, daß die Strömung unmittelbar hinter dem Kontursprung (z.B. einer rückwärtsgewandten Stufe) ablöst.

Entsprechend unterscheidet man zwischen „druckinduzierter“, „stoßinduzierter“ sowie „geometrieinduzierter“ Ablösung (siehe Bild 2.2). Bei dem in dieser Arbeit eingesetzten Tragflügel-Versuchsmodell kommt es ausschließlich zu druckinduzierter Ablösung. Hierbei liegt der Ablösepunkt auf der Körperkontur des Versuchsmodells, ein Wiederanlegepunkt ist jedoch nicht vorhanden, da die Strömung komplett ablöst und ein großes, geschlossenes Rezirkulationsgebiet ausbildet.

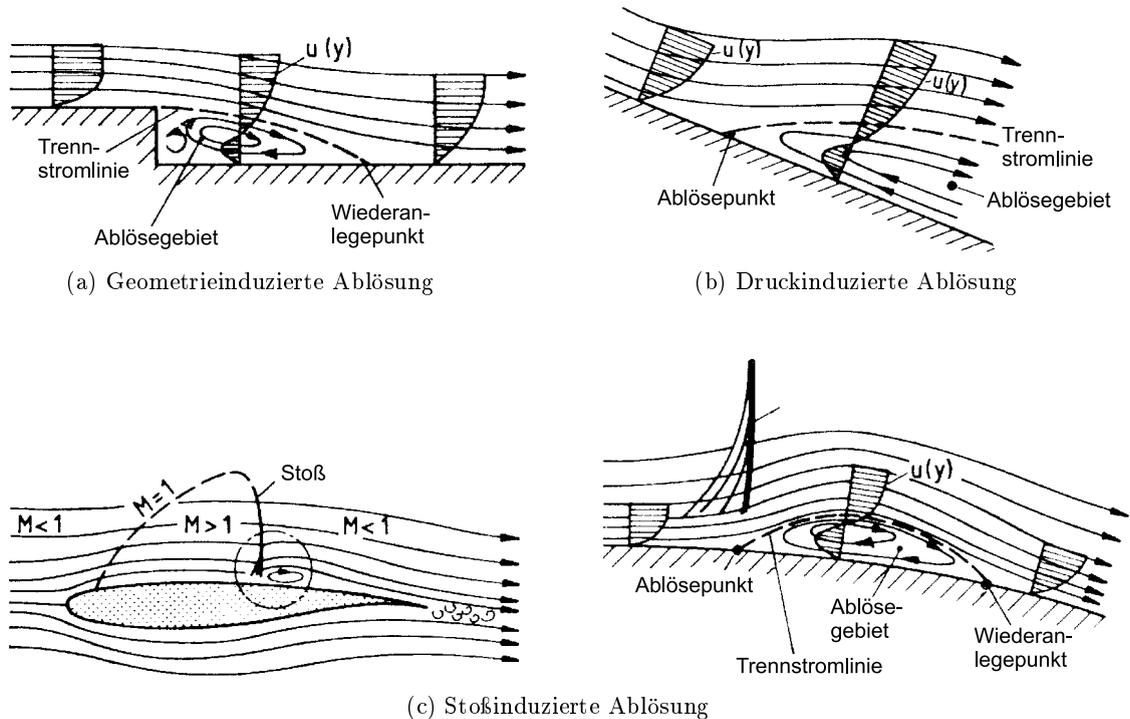


Bild 2.2: Verschiedene Typen der Strömungsablösung, [32]

Man unterscheidet zusätzlich zwischen laminarer Ablösung und einer voll turbulenten Ablösung. Die laminare Strömung verfügt aufgrund der wesentlich schwächer ausgeprägten Durchmischung in Wandnähe und des daraus resultierenden geringeren Geschwindigkeitsgradienten an der Wand (siehe Bild 2.3(a)) über deutlich weniger kinetische Energie an der

Wand als eine turbulente Grenzschicht. Daher ist sie weniger gut in der Lage, die bremssende Wirkung eines positiven Druckgradienten zu überwinden und löst früher ab als eine turbulente Grenzschicht.

Die resultierenden Druckverteilungen am Profil unterscheiden sich für beide Ablösearten deutlich voneinander. In Bild 2.3(b) ist die typische Druckverteilung bei turbulenter Ablösung aufgetragen. Man erkennt den plateauartigen Verlauf der Druckverteilung für $x/c > 50\%$, welcher den Bereich der abgelösten Strömung anzeigt. Die turbulente Ablösung setzt zuerst an der Hinterkante des Profils ein und wandert mit steigendem Anstellwinkel in Richtung Profilverderrkante. Die Druckverteilung bei Auftreten einer laminaren Ablösung ist in Teilbild (c) dargestellt. Man erkennt wiederum das Druckplateau im Bereich der abgelösten Strömung, welches nun sehr viel weiter vorne auftritt, da die laminare Strömung in diesem Fall bereits in der Nähe der Profilverderrkante ablöst.

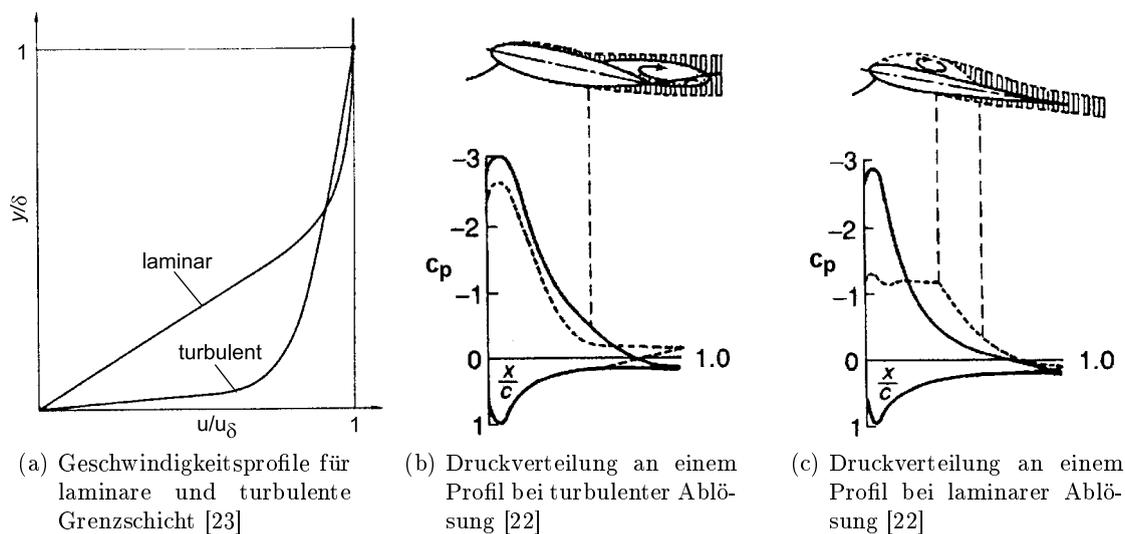


Bild 2.3: Vergleich zwischen laminarer und turbulenter Ablösung

Als weitere Sonderform der lokalen Ablösung existieren sogenannte laminare Ablöseblasen. Die Strömung löst zunächst laminar ab, es kommt dann in der abgelösten Scherschicht zur Transition, und die abgelöste Strömung schlägt in den turbulenten Zustand um. Der nun deutlich erhöhte Turbulenzaustausch quer zur Strömungsrichtung kann unter günstigen Umständen dazu führen, daß die Strömung turbulent wiederanlegt. Es bildet sich also ein kleines, geschlossenes Rezirkulationsgebiet aus, man spricht in diesem Fall von einer laminaren Ablöseblase (siehe hierzu Bild 2.4).

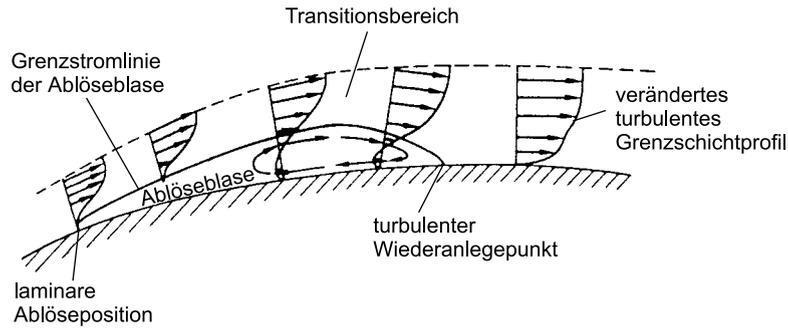


Bild 2.4: Laminare Ablöseblase und turbulentes Wiederanlegen [23]

Man unterscheidet dabei zwischen kurzen und langen Ablöseblasen, die durch das Owen-Klanfer [23] Kriterium identifiziert werden können:

$$Re_{\delta^*} = \frac{u_{\infty} \cdot \delta^*}{\nu} \quad (2.1)$$

$< 400 \rightarrow$ lange Blase

$\geq 550 \rightarrow$ kurze Blase

$\delta^* =$ Verdrängungsdicke an der Ablöseposition

Insbesondere die langen Ablöseblasen bei kleinen Reynoldszahlen können bei Verstärkung des Druckgradienten (z.B. Anstellwinkelerhöhung) aufplatzen und die Strömung dadurch schlagartig über dem gesamten Tragflügel-Profil zum Ablösen bringen.

Um die Ausbildung von laminaren Ablöseblasen zu verhindern, muß die Transition durch gezielten Einsatz von Oberflächenrauigkeiten bereits in unmittelbarer Nähe der Profilvorderkante herbeigeführt werden.

Erfolgt der laminar-turbulente Umschlag rechtzeitig vor der Ablöseposition und hat sich bis zum Ablösepunkt ein vollkommen turbulentes Grenzschicht-Profil ausgebildet, so wird die Ablösung als turbulent bezeichnet. Da die turbulente Grenzschicht besser als die laminare in der Lage ist, gegen den Druckgradienten anzugehen, tritt die Ablösung erst bei höheren Druckgradienten, bzw. Anstellwinkeln auf.

Ein zusätzliches typisches Merkmal der turbulenten Ablösung ist die Tatsache, daß sie zunächst in der Nähe der Profilhinterkante auftritt, um dann mit steigendem Anstellwinkel in Richtung Profilvorderkante zu wandern.

Um die Position, bei der die Strömungablösung auftritt, abschätzen zu können, wird von B.S. Stratford [37] ein Kriterium angegeben. Mit diesem Ablösekriterium kann die Lage des Ablösepunktes direkt aus der gegebenen Geschwindigkeitsverteilung $u(x)$ bestimmt werden. Die Strömung löst an einer Stelle ab, für die der Zusammenhang gilt:

$$-0.102 = \sqrt{1 - \left(\frac{u(x)^2}{u_0}\right)} \cdot (x_A - x_f) \quad (2.2)$$

x_A – x-Koordinate des Ablösepunktes

$u(x)$ – Geschwindigkeitsverteilung

x_f – Fiktive Vorderkante der gedachten Platte

u_0 – Maximale Geschwindigkeit

Mit Hilfe der Gleichung zur Bestimmung der Impulsverlustdicke an der Stelle des Geschwindigkeitsmaximums

$$\theta_0 = 0.664 \cdot \sqrt{\frac{\nu \cdot (x_0 - x_f)}{u_0}} \quad (2.3)$$

kann der Ausdruck $(x_A - x_f)$ in Gleichung 2.2 ersetzt werden durch:

$$x_A - x_f = x_A - x_0 + \frac{\theta_0^2 \cdot u_0}{0.441 \cdot \nu} \quad (2.4)$$

Die Lage des Ablösepunktes stromab des Geschwindigkeitsmaximums $(x_A - x_0)$ läßt sich also mit Hilfe dieses Kriteriums abschätzen, wenn die Geschwindigkeitsverteilung $u(x)$, das Geschwindigkeitsmaximum u_0 sowie die Impulsverlustdicke an der Stelle des Geschwindigkeitsmaximums θ_0 bekannt sind.

2.2 Ablösekontrolle

Um die Strömungsablösung und damit einhergehende Nachteile wie Auftriebsverlust und Widerstandsanstieg, zu vermeiden oder aber zumindest zu verzögern, sind unterschiedliche Methoden denkbar. Generell unterteilen sie sich in **passive** Methoden ohne Energiezufuhr von außen (z.B. durch Formgebung) und **aktive** Methoden. Bei den aktiven Methoden ist die Zufuhr einer gewissen Energiemenge zum Erreichen der ablöseverzögernden Wirkung notwendig. Natürlich muß diese Energiemenge in Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit der Kontrollmethode minimiert werden. Diese Optimierung der aktiven Maßnahmen kann durch entsprechende Kontrollstrategien erreicht werden.

2.2.1 Formgebung

Die konventionellste und am weitesten verbreitete Methode der passiven Ablösekontrolle (und damit der Auftriebssteigerung) ist die Methode der optimierten Formgebung. Dabei wird die Profilgeometrie während des Tragflügel-Entwurfsprozesses dahingehend optimiert, daß der zur Ablösung führende positive Druckgradient weniger stark ausgeprägt ist und

die Strömung dadurch länger anliegend bleibt. Des weiteren läßt sich die Geometrie des Profils durch Hinzufügen von weiteren Profilelementen so verändern, daß der ablösegefährdeten Strömung aus dem umgebenden Strömungsfeld Energie zugeführt wird. Eine übliche Methode zur Auftriebssteigerung dieser Art stellen z.B. Klappen dar. Dabei können diese zusätzlichen Profilelemente sowohl an der Hinter- als auch an der Vorderkante des Hauptflügels zur Anwendung kommen. In Bild 2.5 ist die Wirkungsweise dieser beiden Auftriebshilfen exemplarisch dargestellt.

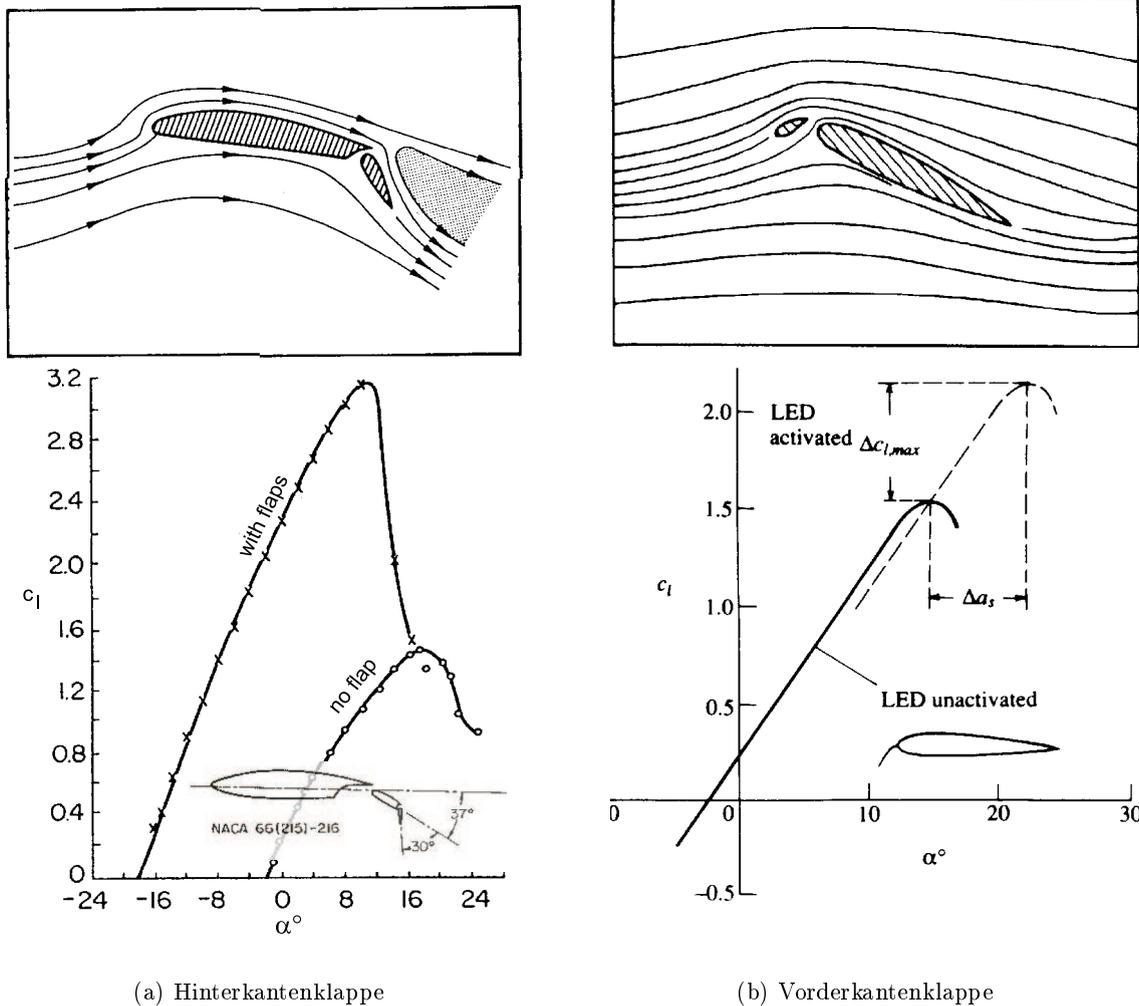


Bild 2.5: Wirkungsweise unterschiedlicher Auftriebshilfen, [8], [5]

Generell gilt, daß eine Hinterkantenklappe durch Vergrößerung der Profilwölbung die Zirkulation um das Profil verstärkt und damit den erreichbaren Auftrieb um den Wert Δc_l erhöht (siehe Bild 2.5(a)). Bei identischem Profil-Anstellwinkel können somit höhere Auftriebsbeiwerte als beim Grundprofil (ohne Klappe) erzielt werden. Im Polaren-Diagramm (c_A über α) entspricht dies einer Parallelverschiebung der Auftriebscharakteristik hin zu höheren Auftriebsbeiwerten. Damit einher geht jedoch die Tatsache, daß der maximale Auftrieb bereits bei kleineren Anstellwinkeln erreicht wird, da die Strömung aufgrund der vergrößerten Profilwölbung und dem daraus resultierenden stärkeren Druckgradienten stärker belastet ist und bereits eher ablöst. Diese Strömungsablösung kann jedoch zu höheren

Anstellwinkeln verschoben werden, wenn vor der Hinterkantenklappe ein Spalt angebracht wird (Spaltklappe). Durch diesen Spalt wird der ablösegefährdeten Grenzschicht auf der Profilloberseite von der Unterseite her Energie zugeführt, welche die Ablösung verzögert. Durch den Einsatz von Mehrfach-Spalt Konfigurationen kann dieser günstige Effekt noch gesteigert werden (siehe Bild 2.6).

Ein ähnliches Prinzip kann auch an der Profilvorderkante zum Einsatz kommen (Bild 2.5(b)). Durch einen dem Hauptprofil vorgelagerten Vorflügel wird die Umströmung der Profilnase des Hauptprofils beeinflusst. Die Strömung durch den Spalt zwischen Vor- und Hauptflügel beeinflusst die Druckverteilung auf der Oberseite des Hauptprofils, so daß der für die Strömungsablösung verantwortliche positive Druckgradient abgemildert wird. Dadurch wird die Strömungsablösung zu höheren Anstellwinkeln verschoben. Diese Vorderkanten-Auftriebshilfen erweitern also den nutzbaren Anstellwinkelbereich des Profils um $\Delta\alpha_S$. Daraus resultiert ein um den Wert $\Delta c_{l,max}$ höherer maximal erreichbarer Auftrieb. Das Auftriebsverhalten bei geringen Anstellwinkeln wird durch Vorderkanten-Auftriebshilfen hingegen nur wenig beeinflusst. Dieses Prinzip der Ablöseverzögerung mittels „Leitschaukeln“ an einem Tragflügel wurde bereits 1921 zum ersten Mal von Lachmann und Handley-Page erfolgreich eingesetzt [26].

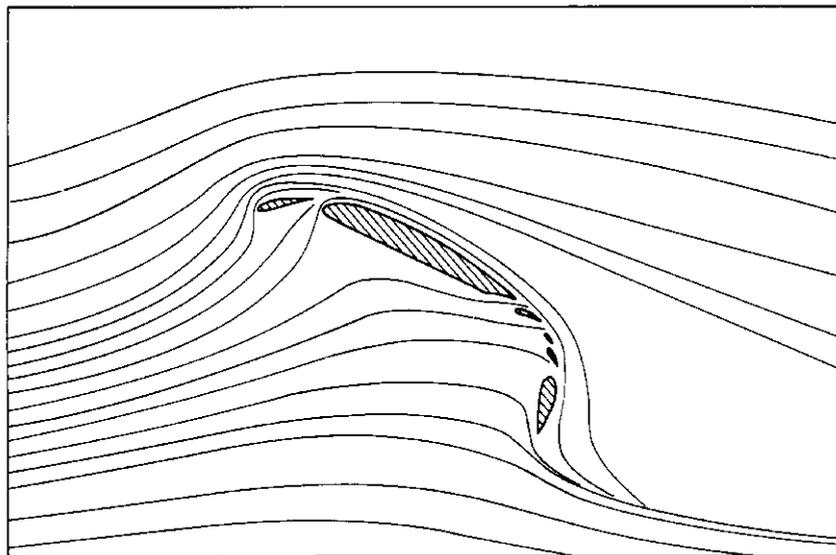


Bild 2.6: Stromlinien um eine Extrem-Hochauftriebskonfiguration mit Vorflügel und Vierfach-Spalt Hinterkantenklappe, $c_A \approx 4.5$, [5]

In der nachfolgenden Tabelle 2.2.1 sind Auftriebshilfen verschiedenen Typs und deren Kombinationen zusammengefaßt. Man erkennt, daß die größte Auftriebssteigerung durch die Verwendung einer Kombination von Vorderkantenklappe und Fowler-Klappe zu erreichen ist. Die Steigerung des maximal erreichbaren Auftriebsbeiwertes liegt bei etwa 200% bezogen auf das Grundprofil ohne Auftriebshilfen. Der in den hier vorgestellten Untersuchungen als Versuchsmodell zum Einsatz kommende Doppelflügel erreicht eine deutlich geringere Steigerung des Maximal-Auftriebes (155%). Dem Doppelflügel wird bei den Untersuchungen der Vorzug gegenüber den leistungsfähigeren Konfigurationen gegeben, da

er eine geometrisch weitaus einfachere Konfiguration darstellt, als z.B. die Kombination Vorflügel/Fowler und sich daher für die experimentellen Untersuchungen anbietet.

Bezeichnung	Bild	$\frac{c_A}{c_{A,Grund}}$	Bezeichnung	Bild	$\frac{c_A}{c_{A,Grund}}$
Grundprofil		100%			
Normalklappe		155%	Fowler-Flügel		193%
Spaltklappe		179%	Vorflügel		138%
Doppel-Spaltklappe		193%	Vorflügel und Doppel-Spaltklappe		200%
Doppelflügel		155%	Vorflügel und Fowler-Flügel		207%

Tabelle 2.1: Verschiedene Auftriebshilfen und die damit erzielbare Steigerung des maximalen Auftriebes im Verhältnis zum Grundprofil, [16]

2.2.2 Kontinuierliches Ausblasen bzw. Absaugen

Aus der Literatur ist bekannt, daß durch die aktive Zufuhr von kinetischer Energie in die Grenzschicht einer ablösegefährdeten Strömung die Ablösung verhindert werden kann [38] [26]. Dies gelingt beispielsweise durch kontinuierliches, tangenciales Ausblasen im Knick eines Klappenprofils, wie es in Bild 2.7(a) exemplarisch dargestellt ist. Bei sehr hoher Strahlintensität wird der sogenannte Strahlklappen-Effekt erzielt, welcher aufgrund des Coanda-Effektes einen sehr hohen Auftrieb produziert (siehe Bild 2.7(d)). Dabei können c_A -Werte weit über den durch passive Methoden erreichbaren Werten erreicht werden.

Eine alternative Vorgehensweise zur Eliminierung der Strömungsablösung stellt die Absaugung an einer entsprechend geeigneten Position dar. Bild 2.7(b) zeigt, wie durch kontinuierliches Absaugen im Bereich des Klappenknickes einer Hinterkantenklappe die Strömung an der Ablösung gehindert werden kann. Die Absaugung entfernt das energiearme Fluid der ablösegefährdeten Strömung. Dadurch bildet sich eine neue Grenzschicht, die nochmals gegen den positiven Druckgradienten angehen kann.

Als Optimum zur Erzeugung sehr hoher Auftriebsbeiwerte ist eine Kombination aus kontinuierlichem Absaugen am Klappenknick und Ausblasen an der Klappenhinterkante, wie sie in Bild 2.7(c) gezeigt ist, denkbar. Hiermit lassen sich bei Experimenten im Windkanal Auftriebsbeiwerte bis $c_A = 11$ erzielen [16].

Die kontinuierlich arbeitenden Verfahren sind damit klar in der Lage, den erreichbaren Auftrieb deutlich zu steigern und das System der angeblasenen Klappen ist in der Geschichte des Luftfahrzeugbaus bereits einige Male zur Anwendung gekommen (z.B. F104-Starfighter). Jedoch ist der Aufwand zur Erzeugung der hochenergetischen Spaltströmung

vergleichsweise hoch und deswegen nicht von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Dies belegt auch die Tatsache, daß Klappensysteme mit kontinuierlichem Ausblasen bzw. Absaugen bisher hauptsächlich an militärischen Luftfahrzeugen, bzw. an Forschungsträgern zum Einsatz kamen.

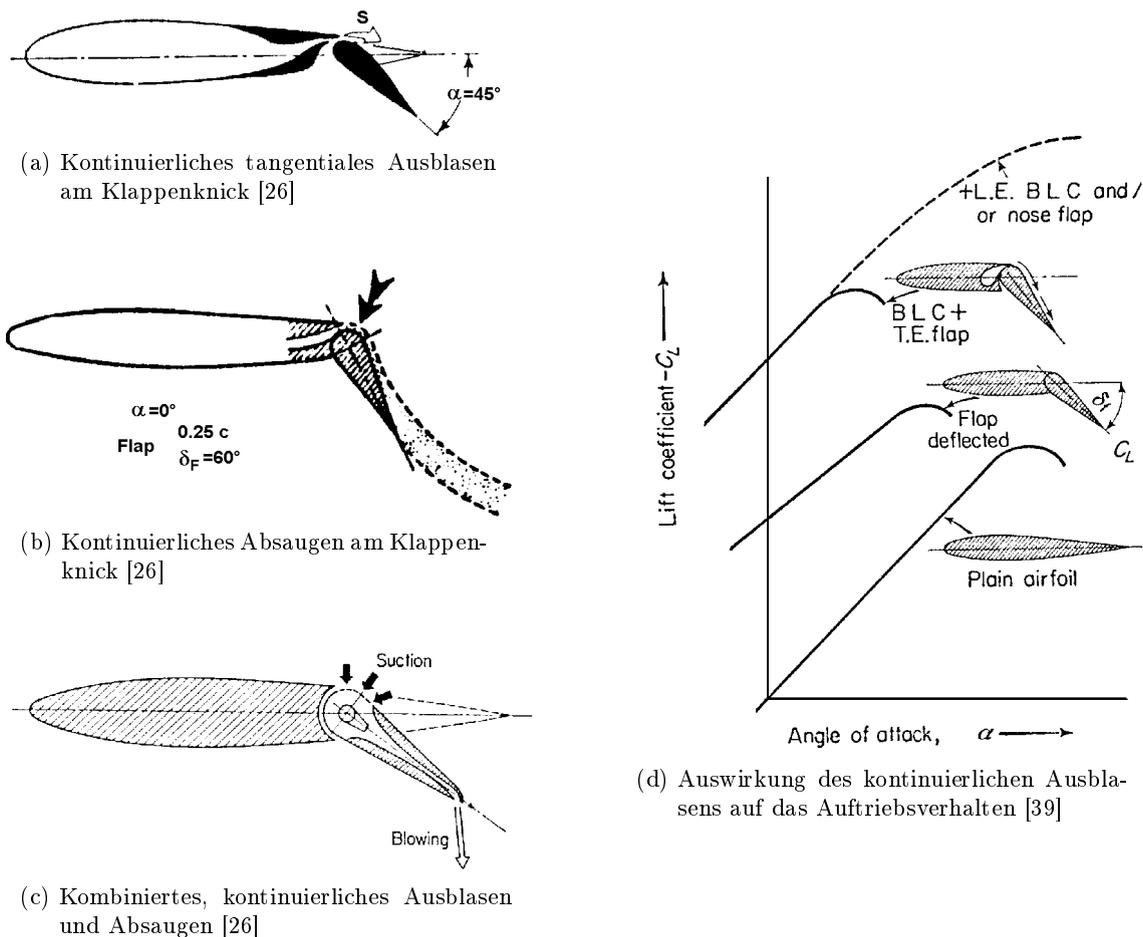


Bild 2.7: Kontinuierlich arbeitende Methoden zur aktiven Ablösebeeinflussung

2.2.3 Periodische Anregung

Die Fortschritte in der Grenzschichtforschung, insbesondere die Erforschung der kohärenten Strukturen in Scherschichten [34], öffneten einen weiteren, sehr wirkungsvollen Ansatz zur aktiven Beeinflussung abgelöster Strömungen durch gezielt eingebrachte periodische Störungen. Primäres Ziel dabei ist die Deformation der großen, kohärenten Strukturen, was zu einer Erhöhung der Durchmischung turbulenter Scherschichten führt (u.a. [19], [18]) und daher Strömungsablösungen verringert oder gar vermeiden hilft.

Aus der einschlägigen Literatur ist grundsätzlich bekannt, daß sich die abgelöste Strömung über einem Tragflügelprofil durch periodische Anregung erfolgreich beeinflussen läßt [15], [42]. Hierbei wurden bisher verschiedene Methoden der Anregung verfolgt:

In manchen Untersuchungen wurde die Beeinflussung der abgelösten Strömung mit Hilfe von extern angebrachten Lautsprechern durchgeführt, welche zumeist in die Außenwände der Windkanal-Meßstrecke eingelassen waren [13], [30], [53]. Die Anregungsmethode ist hierbei von rein akustischer Art, und es war ein großer Energieaufwand notwendig, um eine ablöseverzögernde Wirkung zu erreichen. In jüngerer Zeit konzentrieren sich die Experimente zur Ablösebeeinflussung überwiegend auf interne Anregemethoden. Der Aktuator wird hierbei in das Modell integriert und wirkt lokal auf die abgelöste Strömung ein. Meist geschieht dies durch einen schmalen, in Spannweitenrichtung angeordneten Schlitz in unmittelbarer Nähe der Ablöseposition [12]. Die durch den Aktuator verursachten Druckschwankungen resultieren in einem periodischen Luftstrom am Schlitz. Dabei kommen verschiedene Konzepte der Anregung zur Anwendung: oszillierend, d.h. massenstromneutrales Ausblasen und Einsaugen (bei Verwendung von Lautsprechern oder ähnlichen elektromechanischen Aktuatoren) oder pulsierendes Ausblasen (bei Verwendung von Magnet- oder rotierenden Ventilen). Zusätzlich unterscheidet man zwischen der Anregung tangential zur Strömungsrichtung bzw. senkrecht dazu. Als alternative Anregemechanismen kamen neben den Lautsprechern auch mechanische Systeme, wie z.B. oszillierende Klappen [33] oder schwingende Drähte, zum Einsatz [6], [52] .

Die überwiegende Mehrheit dieser Experimente konzentriert sich hierbei auf die Beeinflussung der saugseitig vollständig abgelösten Strömung an einfachen Profilen [25], [24], [14], [17]. In jüngerer Zeit wurden auch Experimente an Profilen mit Klappen zur Kontrolle der abgelösten Scherschicht im Klappenbereich vorgenommen [40], [41], [31]. Eigene Arbeiten auf dem Gebiet der aktiven Ablösekontrolle an einer Hochauftriebskonfiguration durch periodisches Einblasen und Absaugen durch einen spannwitig ausgerichteten Schlitz auf der Hinterkantenklappe sind in [46] [47] [48] [51] [49] und [50] dokumentiert.

Insbesondere haben sich die Arbeiten zur aktiven Beeinflussung von abgelösten Tragflügelströmungen innerhalb der letzten Jahre stark auf Untersuchungen auch bei praxisrelevanten Reynoldszahlen konzentriert. Dabei wurden Untersuchungen sowohl an Tragflügelprofilen [43], [45] als auch an vereinfachten generischen Konfigurationen [44] durchgeführt. Die maximal erreichten Reynoldszahlen lagen dabei im Bereich von $Re_C = 38 \cdot 10^6$. Im inkompressiblen Bereich wird der Anregung eine gute Wirksamkeit hinsichtlich der Ablösebeeinflussung bescheinigt, die im kompressiblen Bereich abnimmt [45]. Hier nennen die Autoren die Beeinflussung des Buffeting als zusätzliche Zielgröße der periodischen Anregung.

Insbesondere zeigen die genannten Arbeiten, daß Wandschlitzkonfigurationen, die in Nähe der Ablösezone positioniert werden, gute Ergebnisse hinsichtlich Ablösereduktion erzielen. Die Autoren von [31] weisen insbesondere auch auf die Überlegenheit der periodischen Beeinflussung im Vergleich zur stationären Strahlausblasung hin. Ferner verdeutlichen sie den Unterschied in der einzubringenden Anregungsfrequenz hinsichtlich einer Ablöseverhinderung (hohe Frequenzen) und dem Ziel, eine bereits abgelöste Strömung zum Wiederanlegen zu bringen (tiefe Frequenzen).

2.2.4 Kontrollstrategien

Bei den anwendbaren Strategien zur Kontrolle der Strömungsablösung unterscheidet man primär zwischen passiven und aktiven Methoden (siehe Bild 2.8). Als passive Methoden können hier neben der Ablösekontrolle durch Formgebung, die Wirbelgeneratoren bzw. Rückströmklappen exemplarisch [27] [28] [29] genannt werden. Diese passiven Methoden nutzen entweder die in der Strömung vorhandene Energie und erreichen durch deren Umverteilung eine Verzögerung der Strömungsablösung oder aber es wird durch eine lokale Formveränderung der umströmten Profilgeometrie verhindert, daß sich das Ablösegebiet weiter stromauf ausbildet. Als aktive Methoden werden die Methoden bezeichnet, welche einen zusätzlichen Eintrag von Energie (periodisch oder stetig) benötigen, um die Strömung zum Wiederanlegen zu bringen.

Diese aktiven Kontroll-Methoden wiederum lassen sich einteilen in die „vorherbestimmten“ und die „reaktiven“ Methoden. Dabei handelt es sich bei den vorherbestimmten Methoden um solche, bei denen in ausgiebigen Vorversuchen die Reaktion der Strömungsablösung auf eine bestimmte Kombination von Kontrollparametern untersucht wird. Bei der späteren Anwendung werden anhand dieser empirisch ermittelten Daten die für den jeweiligen Strömungsfall passenden Parameter zur Kontrolle der Ablösung ermittelt (siehe Bild 2.9(a)). Dabei sind keine Sensoren zur Detektion der aktuellen Strömungssituation notwendig. Die reaktive Methode beruht hingegen auf der Messung der jeweilig aktuellen Situation der Strömungsbedingungen mittels einzelner bzw. flächig verteilter Sensoren sowie der daraus resultierenden Ermittlung bzw. Korrektur der notwendigen Parameter zur Kontrolle der Ablösesituation [11].

Die reaktiven Methoden wiederum unterteilen sich in die „Feedforward“ bzw. die „Feedback“ Methode. Bei Feedforward (Bild 2.9(b)) handelt es sich um einen Kontrollalgorithmus, welcher in der Lage ist, aus einer stromauf der Ablösung gemessenen Größe ein Signal zur Kontrolle der Strömungsablösung zu generieren. Dabei erfolgt keinerlei Rückmeldung über den Erfolg der Strömungskontrolle. Genau dies wird beim Feedback-Algorithmus berücksichtigt (siehe Bild 2.9(c)). Hierbei wird aus einem an einer geeigneten Stelle gemessenen Referenzsignal durch Vergleich und Optimierung mit dem Meßwert des zu beeinflussenden Parameters ein Signal generiert, welches in der Lage ist, die Kontrolle der Strömungsablösung jeweils der aktuellen Strömungssituation anzupassen [10] [4].

Die Feedback-Methoden unterteilen sich in verschiedene Konzepte, welche zum Teil auf Adaption oder aber der physikalischen Modellierung des Übertragungsverhaltens der Strömung zur Kontrolle der Ablösung beruhen.

Das in dieser Arbeit verwendete Kontrollsystem entspricht im übertragenen Sinn einem adaptiven Feedback-Controller. Hierbei wird die aktuelle Strömungssituation durch Sensoren erfaßt (z.B. Auftriebsbeiwert) und die Regelparameter werden durch den Controller (Experimentator) dahingehend optimiert, einen maximalen Auftrieb zu erhalten.

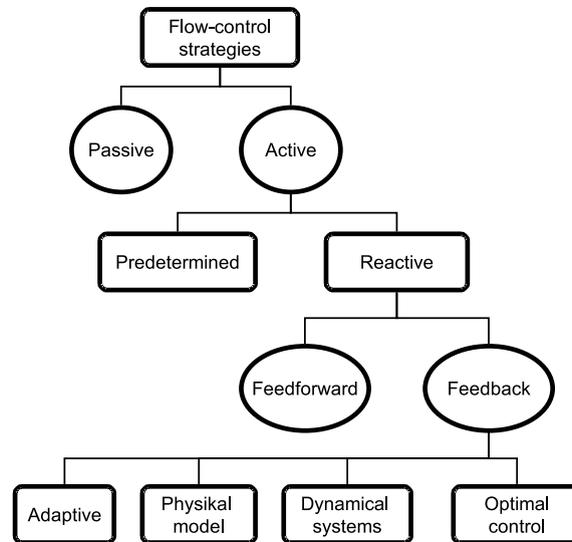


Bild 2.8: Unterschiedliche Strategien bei der Strömungskontrolle, [21]

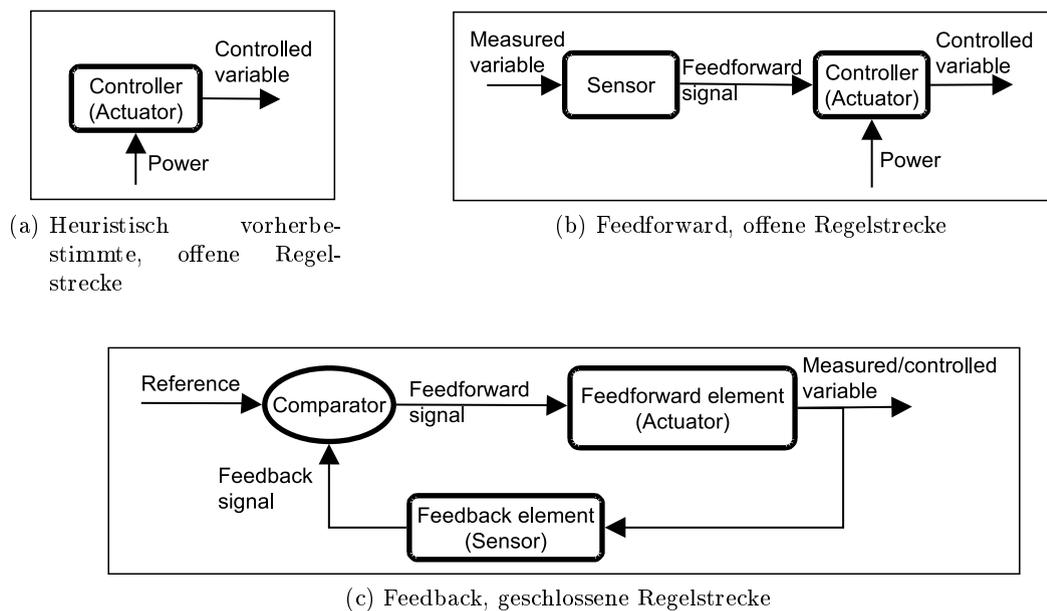


Bild 2.9: Verschiedene Regelstrecken für die aktive Strömungskontrolle, [21]

2.3 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Abgeleitet aus dem derzeitigen Stand der Forschung ergibt sich für die vorliegende Arbeit die folgende Zielsetzung:

Die aktive Kontrolle der abgelösten Strömung ist ein vielversprechendes Mittel zur Leistungssteigerung an Tragflügelprofilen. Dies wurde bereits durch zahlreiche Arbeiten in der Literatur belegt. Dabei fällt auf, daß sich die überwiegende Mehrheit der beschriebenen experimentellen Untersuchungen auf die aktive Beeinflussung der abgelösten Strömung an einem Einzelprofil konzentrierten. Der weitaus interessanteren, weil deutlich praxisnäheren Hochauftriebskonfiguration, bestehend aus Hauptflügel und Klappenprofilen, wurde hingegen bisher nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Einige Untersuchungen beschäftigen sich mit der Strömungsanregung an abstrahierten Klappenkonfigurationen, die sich aus einer ebenen Platte mit angelenkter Hinterkantenklappe (teilweise auch mit Klappenspalt) zusammensetzen. Diese können den tatsächlichen Sachverhalt an einer Mehrelement-Hochauftriebskonfiguration jedoch nicht vollständig erfassen, da in ihnen im Allgemeinen der dominante Klappenspaltstrahl fehlt.

Aus diesem Grund wird für die vorliegende Arbeit eine an der **Realität orientierte Hochauftriebskonfiguration** gewählt. Diese setzt sich zusammen aus einem Hauptflügel und einer Hinterkantenklappe, die so positioniert ist, daß sich ein Spalt zwischen Klappe und Hauptprofil-Hinterkante bildet. Die Wahl fiel auf diese **generische Hochauftriebskonfiguration**, da sie verschiedene Vorteile bietet:

Die Kombination aus NACA 4412 Hauptflügel und der Klappe mit NACA 4415 Kontur ist aus mehreren Literaturstellen bekannt [2] [3] und wurde bereits vielfach z.B. zur Validierung von Ergebnissen aus der numerischen Simulation verwendet [9] [36] [35]. Darüberhinaus kommt es, aufgrund der geschlossenen Kontur dieser Hochauftriebskonfiguration, nicht zur Ausbildung von lokalen, geometriebedingten Ablösezononen, wie es beispielsweise bei einer Fowler-Klappe durch den Klappen-„schroud“ unvermeidlich wäre. Die Tatsache, daß es sich um eine Doppelflügel-Konfiguration handelt, vereinfacht darüber hinaus die Kinematik beim Verstellen der jeweiligen Anstellwinkel von Klappe und Hauptflügel und sorgt somit für einen einfacheren Versuchsaufbau.

Es handelt sich also bei dem in dieser Arbeit verwendeten Versuchsmodell um eine generische, praxisnahe Mehrelement-Hochauftriebskonfiguration, mit deren Hilfe der Einfluß der aktiven Ablösekontrolle auf die Hochauftriebsleistungen untersucht wird.

Als Anregemethode werden gepulste, bzw. periodisch ausblasende und einsaugende Wandstrahlen eingesetzt, die von zahlreichen Literaturquellen als zuverlässige Methode zur Ablösebeeinflussung genannt werden. Hierzu werden verschiedene Aktuatoren hinsichtlich ihrer Eignung untersucht und eingesetzt. Des weiteren gilt es, die Anregeparameter zu bestimmen und zu optimieren, bei denen ein Wiederanlegen der Strömung und damit eine Verbesserung der Hochauftriebsleistung zu beobachten ist. Als Anregeparameter gelten sowohl die Strouhalzahl St als auch die Anregeintensität, welche als c_μ dimensionslos dargestellt werden kann.

Der Schwerpunkt der hier beschriebenen Untersuchungen liegt auf Windkanalversuchen, bei denen sowohl zeitlich- als auch phasengemittelte Strömungsfeldmessungen durchgeführt und analysiert werden. Zusätzlich werden Druck- und Kraftmessungen angewendet, um die globalen Auswirkungen der aktiven Strömungsbeeinflussung auf die Hochauftriebskonfiguration erfassen zu können.

Im folgenden Kapitel werden die Versuchsmodelle, die verschiedenen Aktuatorssysteme sowie die verwendete Meßtechnik erläutert. Die Ergebnisse unterteilen sich in die Vorversuche, welche an einem Wasserkanal und an einem kleinen Windkanal durchgeführt wurden, und die Hauptuntersuchungen im großen HFI-Windkanal. Abschließend folgt eine Zusammenfassung der Arbeit.

3. Versuchsaufbau

3.1 Versuchsmodell

3.1.1 Allgemeines

Als Versuchsmodell kommt bei sämtlichen Untersuchungen eine Einfachspalt-Hochauftriebskonfiguration zum Einsatz, welche sich aus einem Hauptprofil (NACA 4412) sowie einer Hinterkantenklappe (NACA 4415, mit einer Profiltiefe $c_{flap} = 40\% \cdot c_{main}$) zusammensetzt. Diese Konfiguration ist aus zahlreichen Quellen in der Literatur bekannt [1], [2], [3]. Beide Teilprofile können in ihrem Anstellwinkel unabhängig voneinander verändert werden. Hierbei entspricht α dem Anstellwinkel des Hauptprofiles und η dem Differenzwinkel zwischen Klappenprofil und Hauptprofil. Die Winkelbereiche betragen: $3^\circ < \alpha < 17^\circ$, sowie $3^\circ < \eta < 45^\circ$. Alle geometrischen Abmessungen werden auf die Profiltiefe des Hauptflügels c_{main} bezogen. Die Positionierung der Hinterkantenklappe ist so gewählt, daß sich bei $\alpha = 8^\circ$ und $\eta = 35^\circ$ ein Spalt zwischen Hauptprofil und Klappe mit den Abmessungen: $g = 2.7\% \cdot c_{main}$ in horizontaler und $h = 3.5\% \cdot c_{main}$ in vertikaler Richtung ergibt. Eine Skizze des Versuchsmodells ist in Bild 3.1(a) dargestellt.

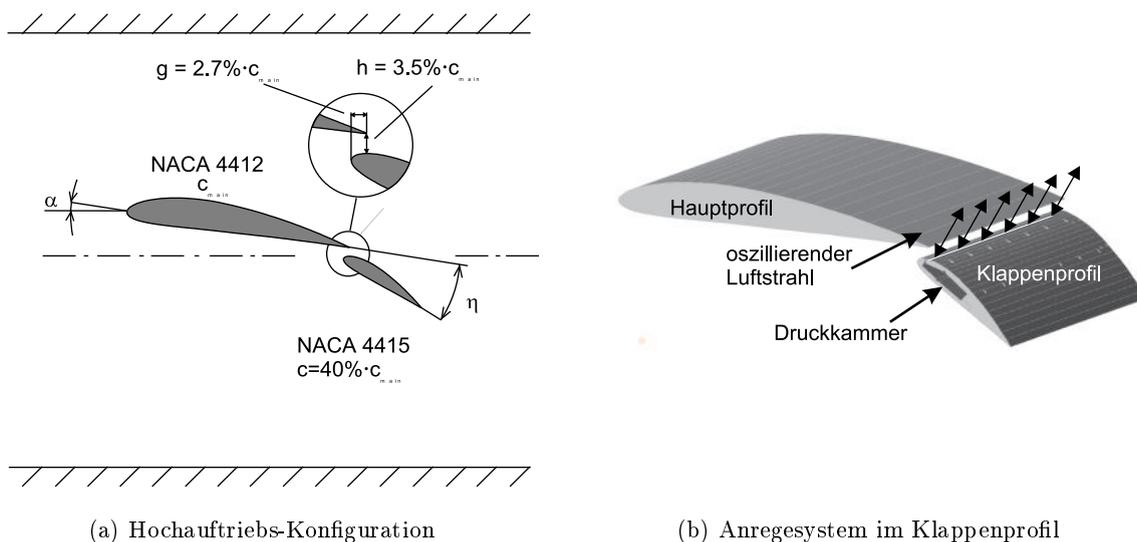


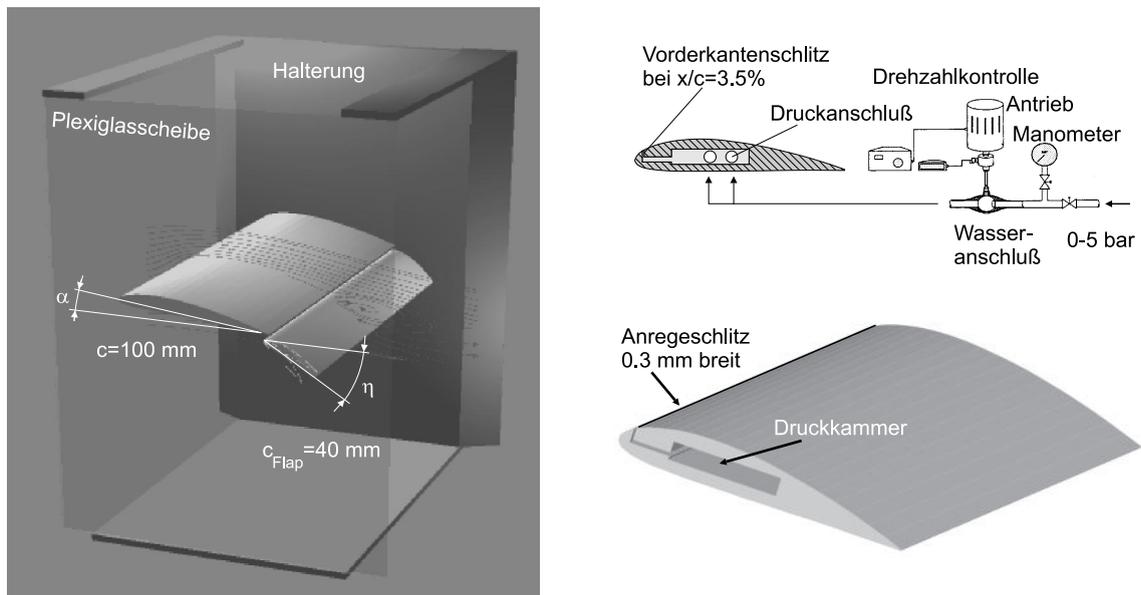
Bild 3.1: Versuchsmodell

Das Klappenprofil ist im Inneren mit einem Hohlraum ausgestattet, welche in einem 0.3 mm breiten Schlitz mündet, der sich bei $3.5\% \cdot x/c_{flap}$ befindet und spannweitig ausgerichtet ist. Periodische Druckschwankungen, welche von außen in diesen Hohlraum eingebracht werden, resultieren in einem oszillierenden Strahl am Schlitz-Austritt. Der Schlitz ist so ausgerichtet, daß der oszillierende Strahl senkrecht zur Profilschneide des Klappenprofils austritt (siehe hierzu Bild 3.1(b)).

3.1.2 Wasserkanalmodell

Für die Voruntersuchungen im Wasserkanal wird zunächst ein relativ kleines Testmodell gefertigt, welches eine Profiltiefe von $c_{main} = 100 \text{ mm}$ ($c_{flap} = 40 \text{ mm}$) und eine Spannweite von $b = 230 \text{ mm}$ aufweist. Dies entspricht der Gesamtbreite der Wasserkanal-Meßstrecke und ergibt ein Streckungsverhältnis von $\Lambda_{main} = 2.5$, sowie $\Lambda_{flap} = 6.25$. Der Anstellwinkel des Hauptprofils ist dabei mit $\alpha = 8^\circ$ fest eingestellt, der Klappenwinkel η kann manuell im Bereich zwischen $0^\circ \leq \eta \leq 50^\circ$ verändert werden. Das Modell wird in eine u-förmige Halterung eingebaut, welche die optische Zugänglichkeit von einer Seite her ermöglicht (siehe hierzu Bild 3.2(a)).

Bei einer Anströmgeschwindigkeit von $u_\infty = 1.5 \text{ m/s}$ beträgt die auf die Profillänge des Hauptprofils bezogene Reynoldszahl $Re_C = 1.5 \cdot 10^5$.



(a) Hochoftriebs-Konfiguration in der Halterung zum Einbau in die Meßstrecke des Wasserkanal

(b) Anregesystem zur Generierung von Druckpulsen

Bild 3.2: Wasserkanal-Versuchsmodell

Zur Erzeugung der periodischen Druckschwankungen kommt beim Wasserkanalmodell ein rotierendes Ventil zum Einsatz, welches an eine Hochdruckpumpe vom Typ „WAP, aqua 100“ angeschlossen wird. Der Wasserdruck kann durch einen zwischengeschalteten Druckreduzierer im Bereich von 0-5 bar eingestellt werden. Durch Veränderung der Dreh-

zahl des rotierenden Ventiles wird die Frequenz der Druckpulse im Bereich zwischen 0-40 Hz variiert. Mit Hilfe dieses Anregesystems können lediglich positive Druckpulse generiert werden, welche einen resultierenden Massenstrom am Anregeschlitz zur Folge haben. Eine oszillierende Anregung (Ausblasen und Einsaugen mit Nulldurchgang) kann im Wasser lediglich bei kleinen Amplituden generiert werden, da es bei großen Amplituden (hohen Druckschwankungen) in der Unterdruckphase zu Kavitation im System kommt. Das System zur Erzeugung der periodischen Druckschwankungen am Wasserkanal ist in Bild 3.2(b) oben schematisch dargestellt. Die Druckschwankungen werden über zwei dünne Rohrleitungen in die Druckkammer im Inneren der Klappe eingebracht. Die Geometrie dieser Druckkammer ist in Bild 3.2(b) unten zu erkennen.

3.1.3 Windkanalmodell

Für weiterführende Untersuchungen im Windkanal wird ein im Maßstab vergrößertes Versuchsmodell verwendet. Das Hauptprofil weist eine Profiltiefe von $c_{main} = 180$ mm auf ($c_{flap} = 72$ mm), die Spannweite des Windkanal-Versuchsmodells beträgt $b = 400$ mm mit einer Streckung von $\Lambda_{main} = 2.2$, sowie $\Lambda_{flap} = 5.6$. Die Spannweite entspricht der Höhe der Meßstrecke des Grenzschichtkanales am ILR. Sowohl α als auch η können rechnergesteuert verändert werden.

3.1.3.1 Modell für die Vorversuche im Grenzschichtkanal am ILR

Für Voruntersuchungen in Luft wird das Versuchsmodell im Grenzschichtkanal senkrecht stehend eingebaut, um die größere Breite der Meßstrecke (600 mm x 400 mm) zur Minimierung der Wandinterferenzen auszunutzen (siehe Bild 3.3(a)). Das Verhältnis aus Gesamtprofiltiefe zu Windkanalhöhe $\frac{c_{main}+c_{flap}}{H_{section}}$ beträgt in diesem Fall 30%. Die Verblockung der Meßstrecken-Querschnittsfläche bei Anstellwinkeln von $\alpha = 7^\circ$ und $\eta = 30^\circ$ ist 11.3%. Es wird bei den Messungen im Grenzschichtkanal auf eine Korrektur der gemessenen aerodynamischen Beiwerte verzichtet, da es sich hierbei um rein qualitative Untersuchungen zur Realisierbarkeit der Ablösekontrolle durch periodische Anregung handelt.

Die Reynoldszahl bei den Voruntersuchungen liegt bei $Re_C = 1.6 \cdot 10^5$, die Anströmgeschwindigkeit beträgt $u_\infty = 14$ m/s.

Als Aktuator zur Erzeugung periodischer Druckschwankungen in Luft wird ein Shaker vom Typ „Brüel+Kjær , 4808 - Small Permanent Magnet Vibration Exciter“ eingesetzt, welcher eine kleine Kolbenpumpe mit einem Kolbendurchmesser von 27 mm antreibt. Dieser Shaker wird mit Hilfe eines Frequenzgenerators des Typs „HAMEG, HM 8130“ sowie eines Leistungsverstärkers „Brüel+Kjær, 2712“ angetrieben und kann Druckschwankungen im Frequenzbereich zwischen $50 \text{ Hz} \leq F \leq 400 \text{ Hz}$ bei verschiedenen Amplituden generieren. Über druckfeste Schläuche mit einem Innendurchmesser von 6 mm werden diese oszillierenden Druckschwankungen in die Klappe eingebracht (Bild 3.3(b) oben). Bei dem hier verwendeten Versuchsmodell wird der Nasenbereich der Klappe durch ein geschlitztes

zylindrisches Rohr gebildet, an welches die Druckschläuche von beiden Seiten her angeschlossen werden (siehe hierzu Bild 3.3(b) unten).

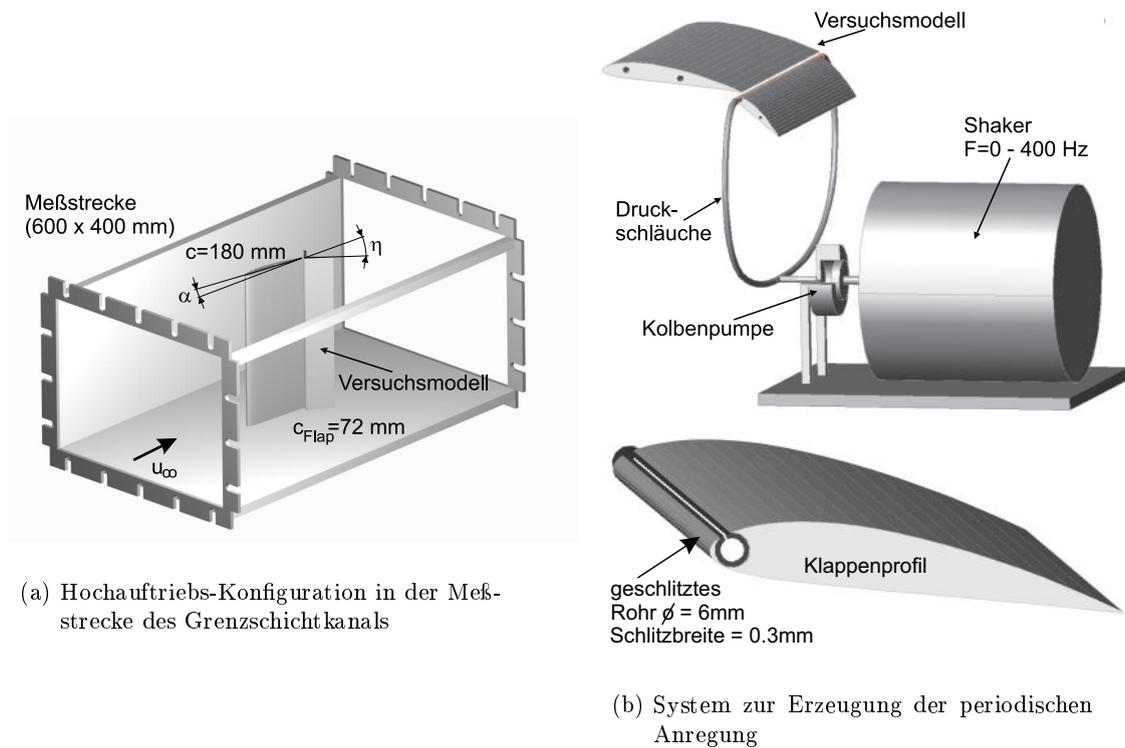


Bild 3.3: Grenzschichtkanal-Versuchsmodell

3.1.3.2 Modell für die Hauptuntersuchungen im „großen Windkanal“ am HFI

Um den Einfluß der Wandinterferenzen auf das Strömungsfeld aufgrund eines zu kleinen Meßstreckenquerschnittes im Grenzschichtkanal zu reduzieren, werden sämtliche Hauptuntersuchungen zur aktiven Ablösekontrolle im „großen Windkanal“ am Hermann-Föttinger-Institut (HFI) durchgeführt. Hierfür muß das Modell aufgrund seiner geringen Spannweite zwischen zwei Seitenwänden eingebaut werden. Diese Seitenwände erstrecken sich über die gesamte Kanalhöhe sowie ca. 3 Profiltiefen stromauf sowie 6 Profiltiefen stromab des Versuchsmodells, um somit homogene An- und Abströmbedingungen zu schaffen. Die Seitenwände sind auf der Außenseite strömungsgünstig verkleidet und beinhalten sämtliche zur Durchführung der Messung notwendigen Hilfsmittel, wie z.B. Drucktransmitter, Traversierung für Strömungssonden, Aktuatoren und die Anstellwinkel-Servomotoren. Der Einbau des Versuchsmodells zwischen diesen Seitenwänden innerhalb der Meßbox ist schematisch in Bild 3.4(a) gezeigt. Zum besseren Verständnis ist hierbei die vordere Seitenwand nicht dargestellt.

Durch die große Höhe der Meßstrecke von $H_{\text{section}} = 1400\text{ mm}$ ergibt sich ein geringes Längenverhältnis $\frac{c_{\text{main}}}{H_{\text{section}}}$ von nur 12.8% und ein Verblockungsverhältnis von $\frac{A_{\text{Modell}}}{A_{\text{section}}} = 4.8\%$. Aufgrund dieser niedrigen Werte ist eine Korrektur der Meßwerte nicht notwendig [7].

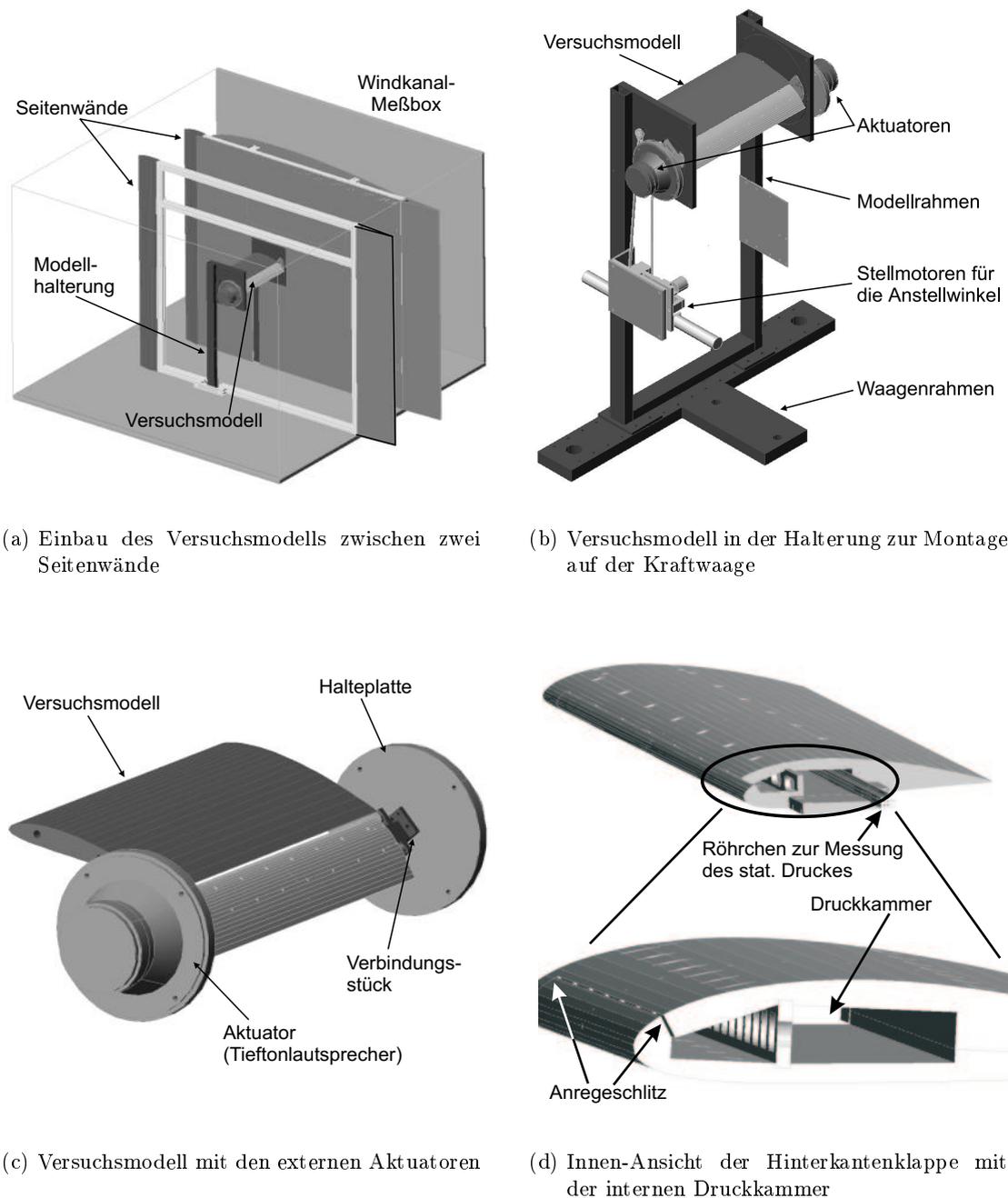


Bild 3.4: Versuchsmodell in der Meßstrecke des HFI-Kanals

Das Versuchsmodell ist in einer Halterung montiert, welche auf einer Kraft-Waage befestigt wird, die sich unterhalb der Meßstrecke befindet (siehe Bild 3.4(b)). Mithilfe dieser Halterung werden die am Modell wirkenden Kräfte und Momente auf die Waage übertragen und können so gemessen werden.

Die Untersuchungen wurden bei einer Anströmgeschwindigkeit von $u_\infty = 14 \text{ m/s}$ durchgeführt, dies entspricht einer Reynoldszahl von $Re_C = 1.65 \cdot 10^5$ (bezogen auf c_{main}). Haupt- und Klappenprofil sind in der Nähe der Vorderkanten mit Turbulatoren ausgestattet, um eine turbulente Grenzschichtströmung sicherzustellen. Als Turbulator kommt

ein Zackenband mit einer Dicke von 0.1 mm und einer Tiefe von 4 mm zum Einsatz. Die exakten Positionen der Turbulenzstreifen können der Tabelle 3.1 entnommen werden.

Bezeichnung	Position
Hauptprofil - Oberseite	3.8% x/c_{main}
Hauptprofil - Unterseite	1.1% x/c_{main}
Klappenprofil - Oberseite	0% x/c_{flap}
Klappenprofil - Unterseite	1.4% x/c_{flap}

Tabelle 3.1: Position der Turbulatoren auf Haupt- und Klappenprofil

Als Aktuatoren zur Generierung periodischer Druckschwankungen werden bei diesem Windkanalmodell Tieftonlautsprecher verwendet. Diese Lautsprecher werden aufgrund der kleinen Abmessungen des Testmodells rechts und links außerhalb des Klappenprofils montiert und sind über Kanäle mit der internen Druckkammer des Klappenprofils verbunden. Damit ist es möglich, einen periodisch oszillierenden Luftstrom am spannweitigen Schlitz zu generieren, welcher sowohl in seiner Frequenz als auch in der Amplitude variiert werden kann. Hierbei handelt es sich um eine massenstromneutrale Anregemethode. Der Aufbau des Anregemechanismus ist in Bild 3.4(c) schematisch dargestellt und wird in Kapitel 3.2.3 detailliert beschrieben.

3.2 Anregemechanismus

3.2.1 Definition der Anregeparameter

Als variable Parameter der aktiven, periodischen Anregung gelten die beiden Werte:

Frequenz: Die Anregefrequenz F [Hz] kann dimensionslos dargestellt werden als Strouhalzahl St [-]. Diese ist definiert als

$$St = \frac{F \cdot l_{char}}{u_\infty} \quad [-] \quad (3.1)$$

F – Frequenz [Hz]

u_∞ – Anströmgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]

l_{char} – charakteristische Länge, z.B. Profiltiefe [m]

Eine Strouhalzahl von $St = 1$ kann so interpretiert werden, daß die Wellenlänge einer generierten Schwingung exakt der charakteristischen Länge entspricht.

Amplitude: Zur Charakterisierung der Anregeamplitude dient der dimensionslose Impulsbeiwert c_μ [-], der nach [43] wie folgt definiert ist:

$$c_\mu = \frac{J'}{c \cdot q} \quad [-] \quad (3.2)$$

$J' = \rho \cdot H \cdot v'^2$ – Impuls am Schlitzaustritt [$\frac{N}{m}$]

c – Profiltiefe des Hauptprofiles [m]

$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_\infty^2$ – Staudruck [Pa]

Durch Einsetzen und Umformen erhält man dadurch die folgende Gleichung:

$$c_\mu = 2 \cdot \frac{H}{c} \cdot \left(\frac{v'}{u_\infty} \right)^2 \quad [-] \quad (3.3)$$

H – Breite des Anregeschlitzes [m]

c – Profiltiefe des Hauptprofiles [m]

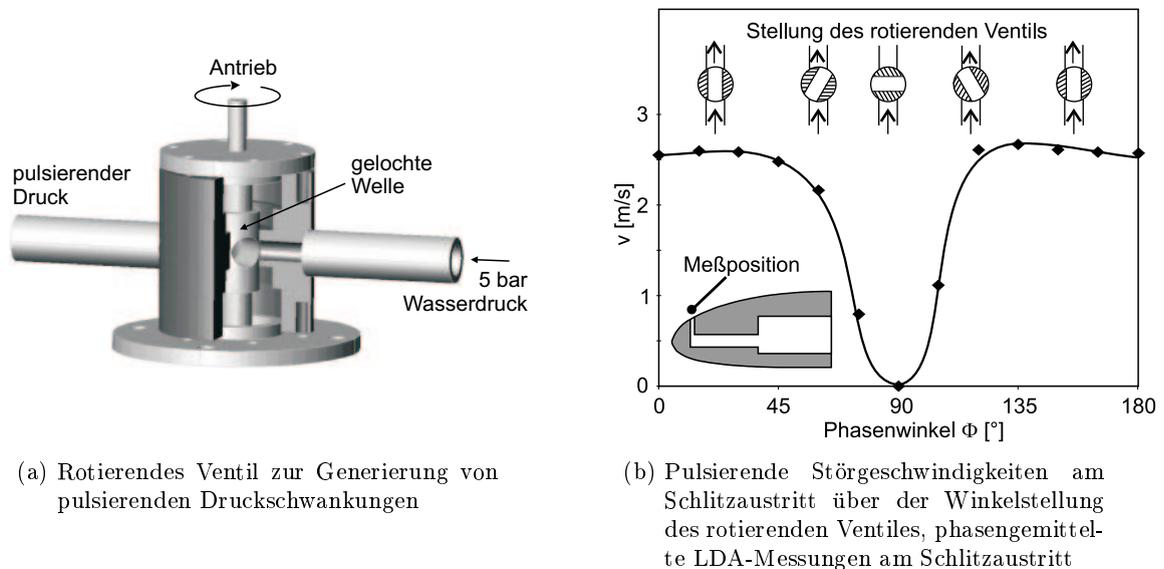
v' – Effektivwert der Störgeschwindigkeit am Schlitz [$\frac{m}{s}$]

u_∞ – Anströmgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]

Aufgrund des Quotienten $\frac{H}{c}$ mit $H = 0.3$ mm und $c = 180$ mm ergibt sich für den Impulsbeiwert c_μ stets ein sehr kleiner Wert von der Größenordnung 10^{-5} .

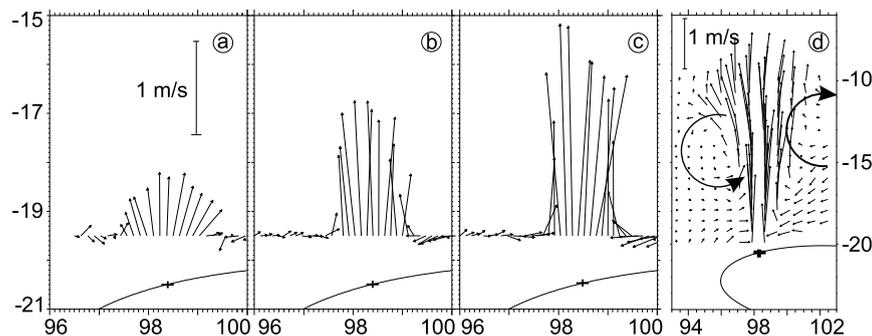
3.2.2 Pulsierende Anregung am Wasserkanal-Versuchsmodell

Zur Erzeugung der pulsierenden Anregung am Wasserkanal-Versuchsmodell wird ein rotierendes Ventil eingesetzt, das von einem regelbaren Drehstrommotor angetrieben wird (Bild 3.5(a)). Durch Variation der Motordrehzahl kann die Frequenz der Anregung im Bereich 0-40 Hz verändert werden. Das Ventil ist an eine Wasser-Druckleitung angeschlossen, deren Druck über einen Druckregler (0-5 bar) einstellbar ist. Die Intensität der Anregung erfolgt durch Variation des Wasserdruckes.



(a) Rotierendes Ventil zur Generierung von pulsierenden Druckschwankungen

(b) Pulsierende Störgeschwindigkeiten am Schlitzaustritt über der Winkelstellung des rotierenden Ventiles, phasengemittelte LDA-Messungen am Schlitzaustritt



(c) Pulsierender Jet am Schlitzaustritt, (a)-(c): Strahlgeschwindigkeiten bei verschiedenen Anregephasen, (d): Zeitlich gemittelte Strömungsfeldmessung, LDA-Messungen

Bild 3.5: Anregesystem am Wasserkanal-Versuchsmodell

Durch den Einsatz des rotierenden Ventiles an einem Überdruckreservoir können lediglich positive Anregeimpulse generiert werden (siehe Bild 3.5(b)). Versucht man durch Aufbringen eines im Vorzeichen wechselnden Druckes einen oszillierenden Anregeimpuls zu erzeugen, so führt dies während der Unterdruckphase bei großen Amplituden zu Kavitation im System. Daher wurden die Untersuchungen im Wasserkanal auf pulsierende Anregung beschränkt. Die aufgebrachten positiven Druckpulse resultieren in einem pulsierenden Strahl am Schlitzaustritt der internen Druckkammer der Hinterkantenklappe. Dieser Strahl ist in

seiner Breite scharf begrenzt und induziert im umgebenden Fluid periodische, gegenläufig rotierende Wirbel (siehe Bild 3.5(c)).

3.2.3 Oszillierende Anregung am Windkanal-Versuchsmodell

Zur Generierung einer oszillierenden Störgeschwindigkeit am Anregeschlitz (Ausblasen und Einsaugen) werden bei den Hauptuntersuchungen im Windkanal Tiefton-Lautsprecher vom Typ „Tonsil, GTC 20/60“ eingesetzt (siehe Bild 3.6(a)). Der Lautsprecher wird durch eine Platte abgedeckt, die in der Mitte mit einer 8 mm großen Bohrung versehen ist. An dieser Öffnung können die periodischen Druckschwankungen \tilde{p} , die vom Lautsprecher erzeugt werden, abgegriffen und über geeignete Druckleitungen zum Anregeschlitz geführt werden. Die Überwachung der jeweiligen elektrischen Leistung zum Schutz des Aktuators gegen Überlastung erfolgt durch Messung der Wechselspannung \tilde{U} am Leistungsverstärker sowie des Stromes \tilde{I} , der durch die Spule des Lautsprechers fließt (Bild 3.6(b)). Durch Multiplikation der Effektivwerte beider Größen erhält man die effektive elektrische Leistung P'_{el} :

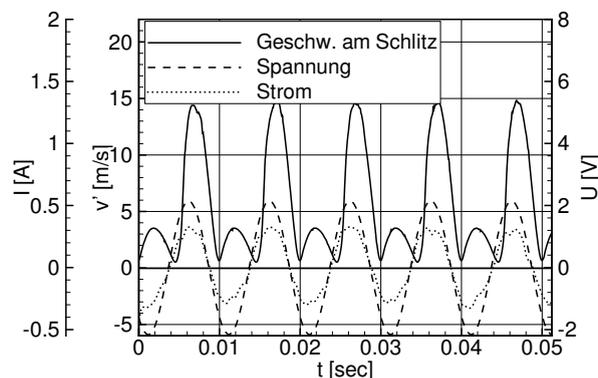
$$P'_{el} = \tilde{U}' \cdot \tilde{I}' \cdot \cos(\Phi) \quad (3.4)$$

Dabei wird der Phasenversatz $\cos(\Phi)$ zwischen Spannung und Strom bei den Untersuchungen zu eins angesetzt. Daraus resultiert stets ein etwas zu großer Wert für die elektrische Leistung, die Erfassung dieser Größe dient jedoch lediglich zum Schutz des Aktuators.

Um während der Messung mit aktivierter Strömungsanregung eine Aussage über die Intensität der aktuellen Anregung treffen zu können, wird diese zuvor ohne überlagerte Anströmgeschwindigkeit im Frequenzbereich zwischen 25 Hz bis 500 Hz kalibriert. Hierzu wird ein Hitzdraht in unmittelbarer Nähe des Anregeschlitzes positioniert, um die maximale Ausblasegeschwindigkeit des periodisch oszillierenden Luftstromes zu messen. Da es



(a) Tiefton-Lautsprecher zur Erzeugung der oszillierenden Druckschwankungen, Quelle: Katalog der Fa. Conrad Elektronik



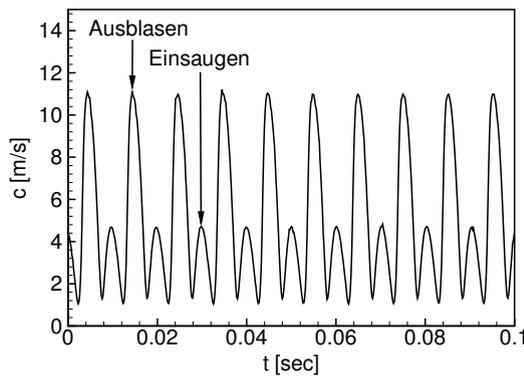
(b) Zeitschrieb der periodischen Störgeschwindigkeiten am Schlitz v' , der Wechselspannung \tilde{U} sowie des Stromes \tilde{I} am Aktuator

Bild 3.6: Anregesystem Windkanal

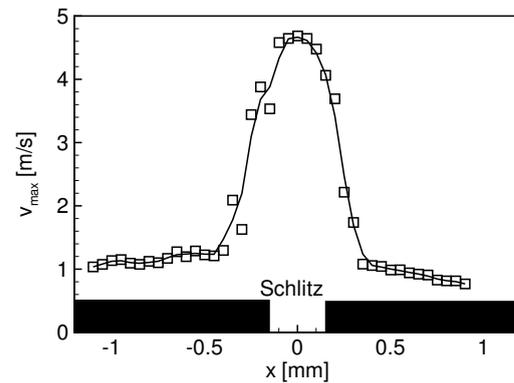
die Standard Hitzdraht-Anemometrie nicht erlaubt, zwischen Vorwärts- und Rückwärtsanströmung des Sensors zu unterscheiden, werden lediglich die in der Amplitude höheren Signalanteile ausgewertet, da es sich dabei jeweils um Ausblasen handelt (siehe hierzu Bild 3.7(a)). Werden die so gemessenen maximalen Ausblasgeschwindigkeiten v_{max} über der x-Koordinate aufgetragen, so ergibt sich in einem Abstand von ca. 0.5 mm über dem Schlitz eine nahezu parabelförmige Geschwindigkeitsverteilung (siehe Bild 3.7(b)). Als Wert für die Störgeschwindigkeit zur Bestimmung der Anregeintensität c_μ in Formel 3.3 dient in diesem Falle die Geschwindigkeit in der Strahlmitte. Unter Annahme einer sinusförmigen Anregung kann die gemessene maximale Ausblasgeschwindigkeit v_{max} überführt werden in eine effektive Schwankungsgröße der Anregegeschwindigkeit v' :

$$v' = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot v_{max} \quad (3.5)$$

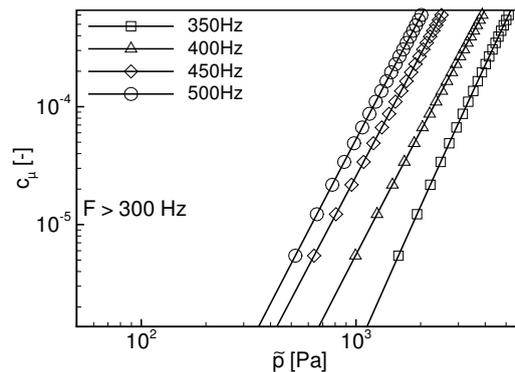
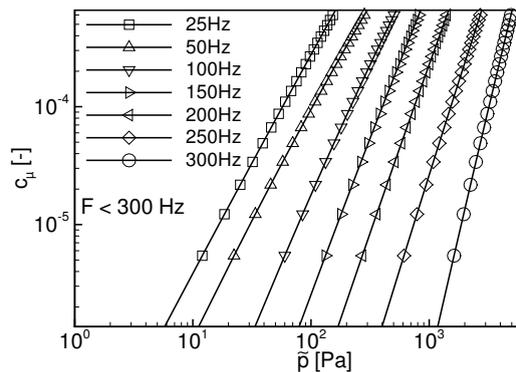
Durch Einsetzen von 3.5 in (3.3) folgt dann die Umrechnung in den dimensionslosen Impulsbeiwert c_μ .



(a) Zeitschrieb der Ausblasgeschwindigkeiten ca. 0.5 mm über dem Schlitzaustritt, $F = 100$ Hz, die höheren Peaks kennzeichnen die Phase des Ausblasens, Hitzdrahtmessung



(b) Verteilung der maximalen Ausblasgeschwindigkeit ca. 0.5 mm über dem Schlitzaustritt, $F = 100$ Hz, Hitzdrahtmessung



(c) Kalibrationszusammenhang zwischen den generierten Druckschwankungen im Aktuator und der resultierenden Anregeintensität c_μ für verschiedene Frequenzen.

Bild 3.7: Kalibration der Anregung am Windkanalmodell

Zusätzlich werden die von den Aktuatoren generierten Druckschwankungen mit Hilfe eines piezo-resistiven Drucktransmitters vom Typ „Honeywell 24PCAFA1D, 1 psi“ gemessen. Sie liegen maximal im Bereich zwischen ± 7 kPa. Die so ermittelten Größen für den RMS-Wert der Druckschwankung \tilde{p} sowie den Impulsbeiwert c_μ können für verschiedene Frequenzen gegeneinander aufgetragen werden. Dadurch ergibt sich ein Kalibrationszusammenhang, der sich im doppelt logarithmisch aufgetragenen $c_\mu - \tilde{p}$ -Diagramm näherungsweise als Gerade darstellt. Dabei gilt für jede Anregfrequenz eine unterschiedliche Geradengleichung (Bild 3.7(c)). Durch diesen Kalibrationszusammenhang ist es möglich, lediglich durch Messung der Druckschwankungen im Anregesystem, die aktuelle Anregeintensität c_μ zu berechnen.

3.3 Versuchsanlagen

3.3.1 Wasserkanal

Am Institut für Luft- und Raumfahrt steht ein Umlauf-Wasserkanal mit einem Meßstreckenquerschnitt von 0.25×0.33 m (BxH) zur Verfügung (Bild 3.8). Angetrieben wird der Kanal über einen regelbaren Gleichstrommotor mit einstufigem Axialverdichter. Die Strömung im Kanal erreicht eine maximale Anströmgeschwindigkeit von $u_\infty = 2$ m/s bei einem maximalen Turbulenzgrad von $Tu = 6\%$. Die Kontrolle der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt mit Hilfe eines Gleichspannungs-Wandlers zur Regelung der Motordrehzahl. Die Meßstrecke verfügt über Seitenwände aus Glas. Dadurch ist die optische Zugänglichkeit zum Versuchsmodell gegeben. Der Wasserkanal eignet sich daher insbesondere für Strömungsvisualisierung und laser-optische Meßmethoden, wie z.B. Laser-Doppler-Anemometrie oder Particle-Image-Velocimetry.

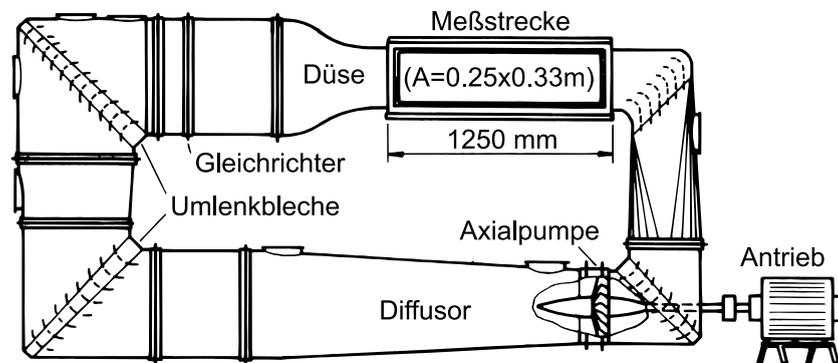


Bild 3.8: Wasserkanal am ILR

3.3.2 Grenzschichtkanal

Weiterführende Vorversuche in Luft werden im Grenzschichtkanal am ILR durchgeführt. Es handelt sich hierbei um einen Umlaufkanal mit wahlweise geschlossener oder offener Meßstrecke (Bild 3.9). Durch Umbau der Düse und des Diffusors kann der Meßstreckenquerschnitt von 0.3×0.4 m (BxH) auf 0.6×0.4 m vergrößert werden. Je nach verwendeter Düse werden Geschwindigkeiten bis zu $u_\infty = 55$ m/s (kleine Düse) oder $u_\infty = 27$ m/s (große Düse) erreicht. Der maximale Turbulenzgrad beträgt dabei $Tu = 0.2\%$ respekti-

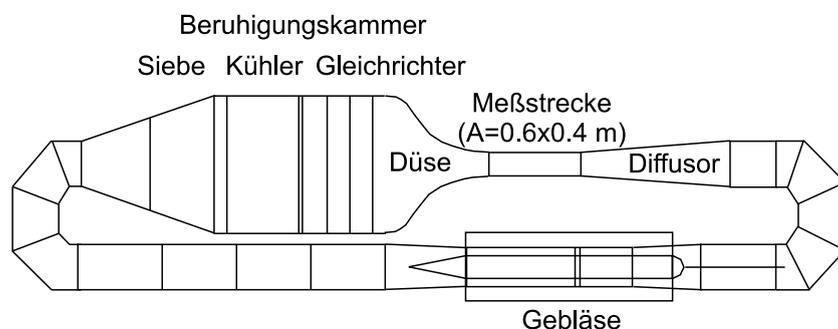


Bild 3.9: Grenzschichtkanal am ILR

ve 0.6%. Die Strömungsgeschwindigkeit wird dabei über einen fernsteuerbaren Drehzahl-Regler für den Antriebsmotor stets konstant gehalten. Zusätzlich verfügt der Kanal über einen geregelten Wärmetauscher, mit dessen Hilfe bei Bedarf eine konstante Temperatur in der Strömung eingehalten werden kann.

3.3.3 Großer Windkanal am HFI

Die experimentellen Haupt-Untersuchungen wurden im „großen Windkanal“ am Hermann-Föttinger-Institut durchgeführt. Hierbei handelt es sich um einen Umlaufkanal mit geschlossener Meßstrecke und einer Antriebsleistung von 500 KW, in dem sich Anströmgeschwindigkeiten bis max. 50 m/s bei einem Turbulenzgrad von ca. 0.3% erreichen lassen (Bild 3.10). Dieser Turbulenzgrad wird durch den Einsatz von Schalldämpfern vor und hinter dem Antrieb erreicht. Die Geschwindigkeitsregelung erfolgt durch manuelle Wahl der Motordrehzahl. Der Meßstreckenquerschnitt beträgt 2 m x 1.4 m (BxH). Mehrere Meßstreckensegmente lassen sich zusammensetzen und bilden insgesamt eine ca. 10 m lange

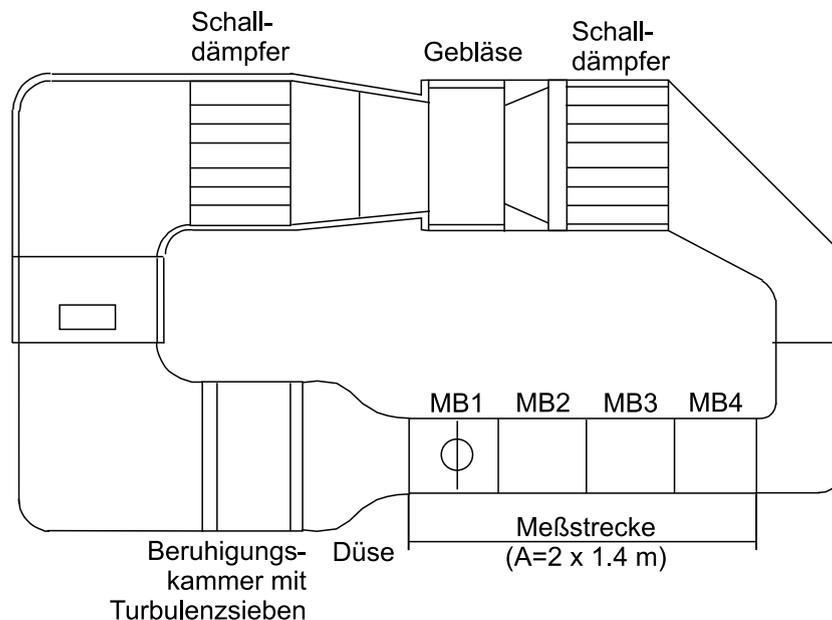


Bild 3.10: Großer Windkanal am Hermann-Föttinger-Institut

Meßstrecke. Die einzelnen Segmente lassen sich herausnehmen und untereinander austauschen.

Das vorderste Meßstreckensegment ist mit einer 6-Komponenten-Waage in Unterflur-Bauweise ausgestattet, welche es erlaubt, die am Testmodell angreifenden Kräfte und Momente direkt zu messen.

3.4 Meßverfahren

3.4.1 Anströmgeschwindigkeit

Bei den Untersuchungen im Windkanal wird die Anströmgeschwindigkeit u_∞ der Strömung mit einem Prandtl-Rohr kontrolliert. Der am Prandtl-Rohr anliegende Staudruck q wird mit Hilfe eines Drucktransmitters vom Typ „Multur PU, 0-5 mBar“ erfaßt und, unter Berücksichtigung der aktuellen Temperatur T und des Umgebungsdruckes p_{umg} , in eine Strömungsgeschwindigkeit überführt: $u = \sqrt{\frac{2 \cdot q}{\rho}}$, $\rho = f(T, p_{umg})$. Das Prandtl-Rohr ist 1.7 Profiltiefen stromauf und 2.2 Profiltiefen oberhalb der Hauptprofil-Vorderkante in der Strömung montiert. Diese Position wurde durch Vorversuche so bestimmt, daß sich das Prandtl-Rohr weitgehend außerhalb des Einflußbereiches des Versuchsmodells befindet. Hierzu wurde das Strömungsfeld über der Hochauftriebs-Konfiguration mit Hilfe der Hitzdraht-Anemometrie bei verschiedenen Anstellwinkeln vermessen. In Bild 3.11(a) ist ein solches Strömungsfeld exemplarisch dargestellt, die Lage des Prandtl-Rohres ist hierin gekennzeichnet. Man erkennt, daß sich das Prandtl-Rohr an einer Stelle befindet, an der nahezu die Anströmgeschwindigkeit herrscht. Eine Veränderung des Modell-Anstellwinkels hat außerdem keinen starken Einfluß auf den gemessenen Staudruck, wie in Bild 3.11(b) gezeigt wird.

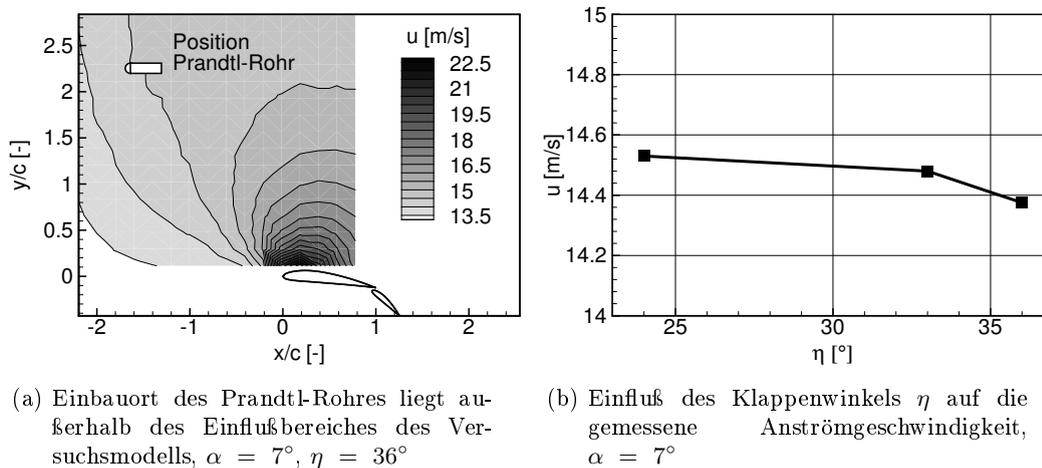


Bild 3.11: Einfluß des Strömungsfeldes auf die Lage des Prandtl-Rohres zur Bestimmung der Anströmgeschwindigkeit u_∞

3.4.2 Druckverteilung

Zur Bestimmung der Verteilung des statischen Druckes um die Hochauftriebs-Konfiguration ist das Versuchsmodell sowohl auf dem Hauptprofil als auch auf der Klappe jeweils auf der Profilerseite mit 0.3 mm großen Druckbohrungen versehen. Die exakten Positionen der Druckbohrungen können aus Bild 3.12 sowie aus den Tabellen 3.2 und 3.3 entnommen werden. Die gemessenen statischen Drücke p_i werden umgerechnet in einen Druckbeiwert:

$$c_p = \frac{p_i - p_0}{q} \quad [-] \quad (3.6)$$

p_i – jeweiliger Druck an der Druckbohrung [Pa]

p_0 – statischer Druck am Prandtl-Rohr [Pa]

q – Staudruck am Prandtl-Rohr [Pa]

und über der dimensionslosen Lauflänge x/c_{main} aufgetragen. Dabei wird der c_p -Wert, wie in der Aerodynamik üblich, nach oben negativ aufgetragen. Anhand der c_p -Verteilung lassen sich das Auftriebsverhalten und die Ablöseposition lokal analysieren. Ein plateauartiges niedriges Druckniveau in der Druckverteilung eines Profils kennzeichnet hierbei das Ablösegebiet.

Die insgesamt 23 Druckbohrungen des Versuchsmodells sind über dünne Schläuche mit einem 50-Kanal Scanivalve-Meßstellenumschalter verbunden, der die einzelnen statischen Drücke sequentiell auf einen Drucktransmitter vom Typ „Setra 239, ± 1700 Pa“ schaltet. Aufgrund der relativ großen Schlauchlängen zwischen Druckbohrung und Drucktransmitter muß nach jedem Umschalten auf die jeweils nächste Druckbohrung solange gewartet werden, bis sich ein konstantes Druckniveau eingestellt hat, ehe die Messung ausgelöst wird. Für die Druckbohrungen auf dem Klappenprofil beträgt dieses Zeitintervall bis zu 4 Sekunden.

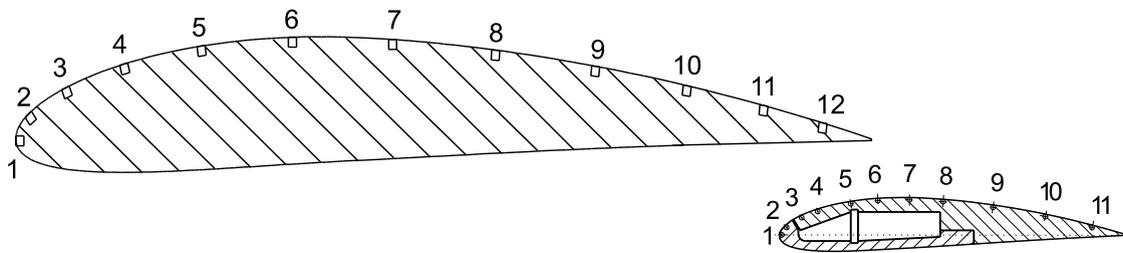


Bild 3.12: Positionen der Druckbohrungen

Nr	x	y	Nr	x	y
1	0.0	0.00	7	79.1	9.54
2	2.6	2.46	8	100.9	8.54
3	10.3	4.92	9	121.9	7.01
4	22.6	7.19	10	141.1	5.17
5	38.9	8.91	11	157.4	3.27
6	58.0	9.74	12	169.7	1.64

Tabelle 3.2: Tabellarische Auflistung der Druckbohrungspositionen auf dem Hauptprofil

Nr	x	y	Nr	x	y
1	0.0	0.0	6	20.4	7.7
2	1.1	1.9	7	27.1	7.9
3	4.4	4.0	8	34.1	7.5
4	7.8	5.4	9	44.5	6.3
5	14.8	7.0	10	55.4	4.4
			11	65.2	1.6

Tabelle 3.3: Positionen der Druckbohrungen auf dem Klappenprofil

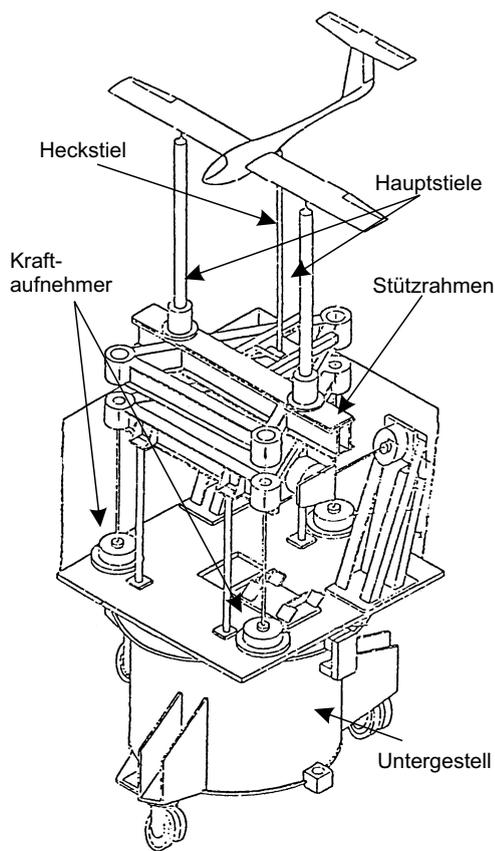
3.4.3 Windkanalwaage

Kräfte und Momente am Versuchsmodell werden am großen Windkanal mit Hilfe einer 6-Komponenten-Waage in Unterflur-Bauweise gemessen (Bild 3.13). Diese Waage ist bis zu einer Last von 340 N kalibriert. Hierbei werden die 3 Kräfte und die 3 Momente des Versuchsmodells über einen Rahmen auf 6 Wägezellen übertragen, die auf einem Fundament befestigt sind. Die Wägezellen liefern kraftproportionale Spannungssignale, die über 6 Voltmeter von einem Rechner erfasst werden. Durch Umrechnung der 6 gemessenen Kraftanteile mit Hilfe einer 6x6-Kalibrationsmatrix können die am Versuchsmodell angreifenden Lasten ermittelt werden. Durch die zeitliche Mittelung der gemessenen Spannungen der Kraftmeßdosen von bis zu 20 Sekunden Dauer werden instationäre Effekte in den aerodynamischen Lasten nicht erfasst. Als guter Kompromiß zwischen Meßdauer und Genauigkeit hat sich eine Mittlungsdauer von 4 Sekunden ergeben. Die Meßgenauigkeit der Kraftwaage für Auftrieb und Widerstand beträgt $\leq 0.1\%$.

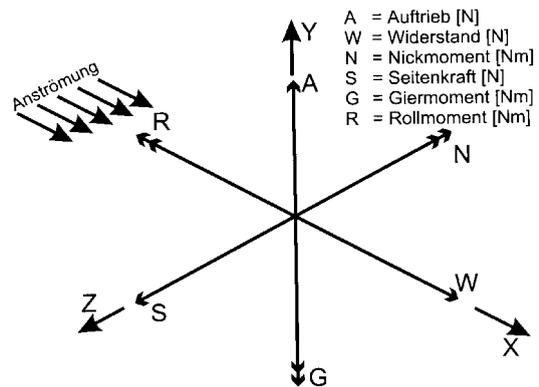
Mit Hilfe der gemessenen Anströmgeschwindigkeit, der Luftdichte ρ und der bekannten Flügelfläche des Hauptprofils F_{main} sowie der Bezugslänge c_{main} können die gemessenen Kräfte und Momente umgerechnet werden in dimensionslose Beiwerte:

Name	Kraft	Beiwert
Auftrieb	A	$c_A = \frac{A}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 \cdot F_{main}}$
Widerstand	W	$c_W = \frac{W}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 \cdot F_{main}}$
Seitenkraft	S	$c_S = \frac{S}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 \cdot F_{main}}$
Nickmoment	Nm	$c_{Nm} = \frac{Nm}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 \cdot F_{main} \cdot c_{main}}$
Rollmoment	Rm	$c_{Rm} = \frac{Rm}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 \cdot F_{main} \cdot c_{main}}$
Giermoment	Gm	$c_{Gm} = \frac{Gm}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 \cdot F_{main} \cdot c_{main}}$

Tabelle 3.4: Definition der Aerodynamischen Kraft- und Momenten-Beiwerte



(a) Zeichnung der Unterflur Windkanalwaage



-0.98152	-0.98305	-0.9799	-0.00912	-0.0005	-5e-005
-0.00266	-0.0019	-0.0013	0.97694	0.97574	-0.01319
-0.19997	-0.20172	0.39601	-1.13742	1.13462	-0.00341
0.00196	0.00212	-0.00016	-0.01718	-0.0113	-0.97773
-0.00057	-0.00095	-2e-005	-0.34432	0.34313	0.00225
0.34644	-0.34009	-0.00089	0.00278	0.00485	-1.13107

(b) Oben: Koordinatensystem der Windkanalwaage, aufgetragen sind positive Kräfte und Momente. Unten: 6x6-Kalibrationsmatrix (Stand: 18.03.2001)

Bild 3.13: 6-Komponenten Windkanalwaage am „großen Windkanal“ im HFI, Quelle: Dokumentation Karl Schenk AG

3.4.4 Messung der Druckschwankungen im Aktuator

Für die Erfassung der Druckschwankungen im Aktuator kommt ein piezo-resistiver Druckaufnehmer vom Typ „Honeywell Control Systems, 24PCAFA1D“ zum Einsatz (Bild 3.14). Es handelt sich hierbei um einen unkompensierten, piezo-resistiven Miniatur Druck-Meßwertgeber mit einem Meßbereich von 1 psi. Dieser Drucksensor ist geeignet, instationäre Druckschwankungen im Bereich von ± 3.4 kPa bis zu einer Grenzfrequenz von 1 kHz aufzulösen. Der Sensor ist nicht temperaturstabilisiert und daher lediglich zur Messung von Effektivwerten der Druckschwankungen geeignet. Durch die hohe Überlastsicherheit (Faktor 40) ist der Sensor gegen zu hohe Druckschwankungen gut gesichert, wie sie beispielsweise bei einem Einschaltimpuls auftreten können.

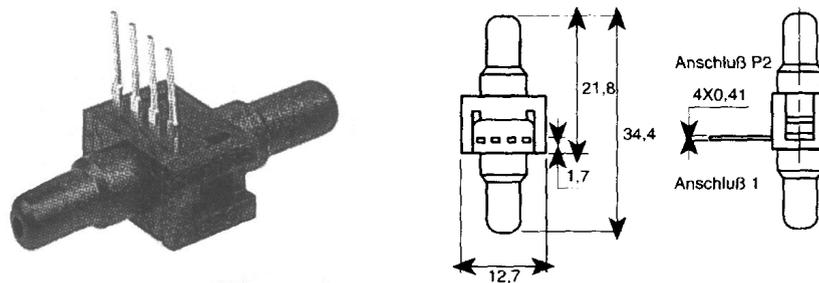


Bild 3.14: Druckaufnehmer zur Messung der Druckschwankungen im Aktuator, Quelle: Katalog der Fa. RS-Elektronik

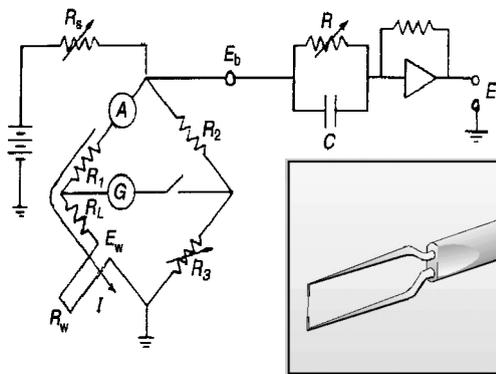
3.4.5 Hitzdraht-Anemometrie

Mit Hilfe der Hitzdraht-Meßtechnik ist es möglich, instationäre Strömungsvorgänge zeitlich wie räumlich gut aufzulösen. Bei vorheriger Kalibration des Hitzdrahtes kann das gemessene Hitzdrahtspannungssignal umgerechnet werden in eine instationäre lokale Strömungsgeschwindigkeit. Durch die zusätzliche zeitgleiche Erfassung des periodischen Anregesignales und nachfolgender Korrelation dieser beiden Signale kann z.B. eine flächige, quasi zeitgleiche Messung des instationären Strömungsfeldes im Falle der periodischen Strömungsanregung erfolgen.

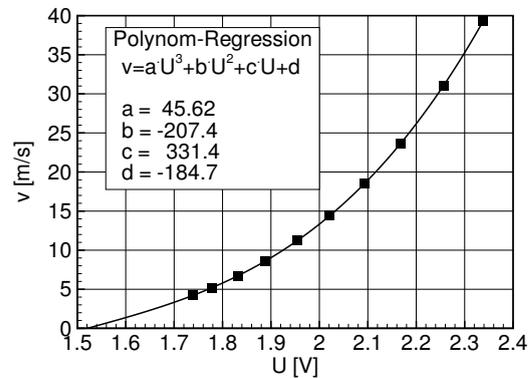
Da eine Hitzdrahtsonde nicht zwischen Vor- und Rückanströmung unterscheiden kann, ist man bei der Ermittlung des Ablösegebietes stark auf eine Interpretation der Meßergebnisse angewiesen. Daher wird die Hitzdraht-Anemometrie primär zur Untersuchung der instationären Strömungsvorgänge in der Scherschicht eingesetzt.

Um das Strömungsfeld in der Nähe des Versuchsmodells zu vermessen, wird eine Hitzdraht-Sonde mit Hilfe einer 2D-Traversierung verfahren. Aufgrund der relativ großen Abmessung der Meßstrecke im großen Windkanal muß diese Traversierung in unmittelbarer Nähe zum Versuchsmodell positioniert werden, um unerwünschte Schwingungen des Sondenschaftes zu minimieren. Daher wurde die Traversierung in einer der beiden Seitenwände integriert.

Die Hitzdrahtsonde wird an einer Brückenschaltung angeschlossen, die im CTA-Modus (Constant Temperature Anemometer) betrieben wird (Bild 3.15(a)). Die Kalibration der Hitzdrahtsonde erfolgt innerhalb des Versuchsaufbaus in unmittelbarer Nähe zum Prandtl-Rohr, das als Referenz zur Geschwindigkeitsmessung verwendet wird. Die ermittelten elektrischen Spannungen der Hitzdrahtsonde, bei Variation der Strömungsgeschwindigkeit, werden über der Geschwindigkeit aufgetragen und durch ein Polynom dritten Grades angenähert (z.B. siehe Bild 3.15(b)).



(a) Hitzdrahtsensor und Brückenschaltung im CTA-Modus



(b) Exemplarische Kalibration eines Hitzdrahtsensors

Bild 3.15: Hitzdraht-Meßtechnik, Quelle: Internet-Homepage der Fa. Dantec

3.4.6 Laser-Doppler-Anemometrie

Mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie ist es möglich, Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung berührungslos zu messen. Dabei ist das Vorhandensein von ausreichend kleinen Partikeln im Strömungsfluid die Voraussetzung ($d_{Partikel} \approx 5\mu m$). An diesen Partikeln wird das einfallende Laserlicht gestreut und mit einer um einen bestimmten Betrag verschobenen Frequenz reflektiert (Dopplereffekt). Die Geschwindigkeit des Partikels ist dabei direkt proportional der Frequenzverschiebung und ergibt sich aus dem Zusammenhang:

$$u = \frac{F_D \cdot \lambda}{2 \cdot \sin(\frac{\Theta}{2})} \quad (3.7)$$

F_D – Dopplerfrequenz

λ – Wellenlänge des Laserlichts

Θ – Kreuzungswinkel der Laserstrahlen

Am Institut für Luft- und Raumfahrt ist ein 2-Komponenten Laser-Doppler-Anemometer vom Typ „Polytec, LDA 580“ im Einsatz. Mit diesem Gerät können zwei Geschwindigkeitskomponenten gleichzeitig erfaßt werden. Im Laser-Meßkopf sind zwei verschiedenfarbige Halbleiterlaser integriert, die in ihrer Strahlebene um 90° zueinander verdreht sind.

Die Meßoptik ist durch einen ca. 4 m langen Lichtwellenleiter mit der Ansteuer- und Auswerte-Elektronik verbunden. Dies ermöglicht die einfache Traversierung des Meßkopfes und somit Messungen des Strömungsfeldes um das Versuchsmodell herum. Diese Meßtechnik setzt sowohl die optische Zugänglichkeit zum Versuchsmodell als auch das Vorhandensein von geeigneten Partikeln in der Strömung voraus. Daher kommt dieses Meßverfahren primär bei den Voruntersuchungen am Wasserkanal zum Einsatz. Die Auswertung der Signale (Bild 3.17) von der optischen Empfangseinheit des LDA erfolgt mit Hilfe von zwei Hardware-Signalanalysatoren. Dabei handelt es sich um Fourier-Analysatoren vom Typ „Aerometrics, RSA-1000“. Diese RSA (**R**ealtime-**S**ignal-**A**nalyzer) bestimmen die Doppler-Frequenz in den Meßsignalen und leiten das Ergebnis weiter an einen separaten Rechner, der die statistische Auswertung der Meßwerte durchführt.

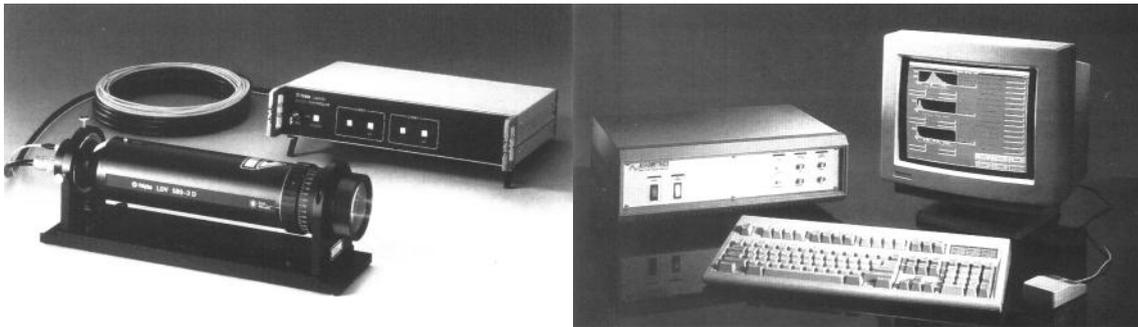
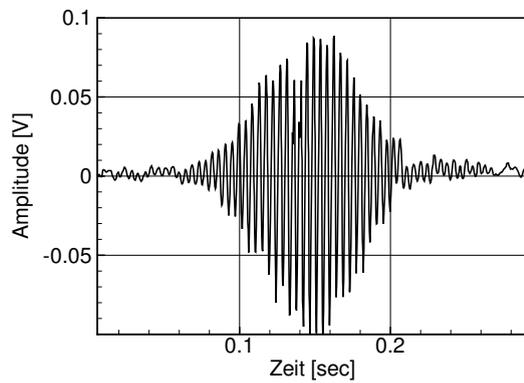
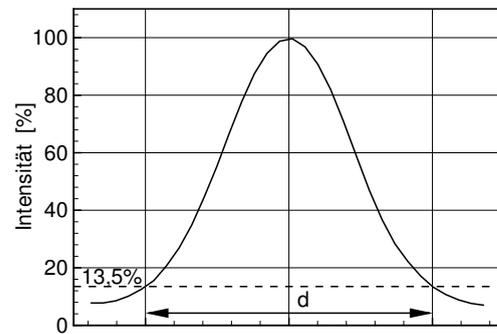


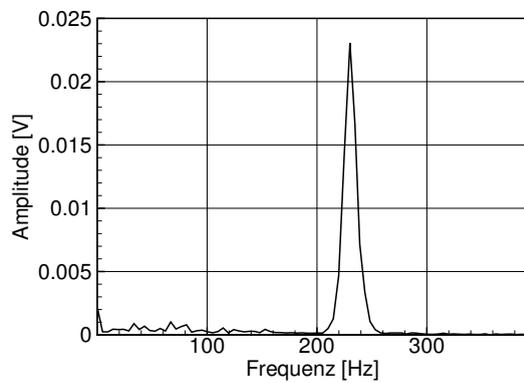
Bild 3.16: Eingesetztes 2 Komponenten LDA der Firma Polytec, Quelle: Polytec Werbeprospekt



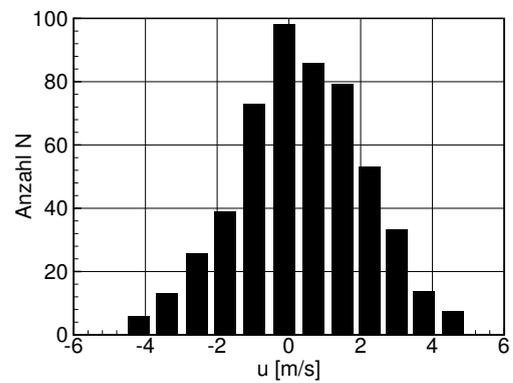
(a) Zeitschrieb eines LDA-Signals



(b) Intensitätsverteilung innerhalb des Laserstrahls



(c) Frequenzanalyse des LDA Signals



(d) Häufigkeitsverteilung der gemessenen Geschwindigkeiten

Bild 3.17: Auswertung eines LDA-Signals, [32]

3.5 Schematische Darstellung der Versuchsaufbauten und Beschreibung der Datenerfassung

In den folgenden drei Abbildungen (Bild 3.18 - Bild 3.20) sind die Versuchsaufbauten sowie die eingesetzten Meßtechniken an den verschiedenen Versuchsständen schematisch dargestellt. Zu jedem der drei Versuchsaufbauten wird die jeweilig eingesetzte Meßtechnik zur Datenerfassung kurz beschrieben.

3.5.1 Vorversuche am Wasserkanal

Bei den Versuchen am Wasserkanal wird primär die Laser-Doppler-Anemometrie als Meßtechnik eingesetzt. Der Laser kommuniziert über einen speziellen Datenbus mit einer im Meßrechner eingebauten Datenerfassungskarte. Die Optik des Lasers wird auf einer Traversierung montiert, mit deren Hilfe beliebige x-, y- und z-Koordinate angefahren werden können. Dadurch sind Strömungsfeldmessungen um das Versuchsmodell herum möglich. Die Ansteuerung der Traversierung erfolgt über die serielle Schnittstelle vom zentralen Meßdatenerfassungsrechner.

Die periodischen Druckschwankungen im Aktuator werden von einem Druckwandler für Drücke bis max. 5 bar erfaßt und mit Hilfe eines 4-Kanal Transientenrekorders vom Typ „Analogic Data Precision, DATA 6100“ gemessen. Das Gerät besitzt ein Auflösungsvermögen von 14 Bit bei einer maximalen Abtastrate von 100 kHz. Mit Hilfe einer GPIB-Schnittstelle kann das Gerät vom Zentralrechner aus bedient und ausgelesen werden.

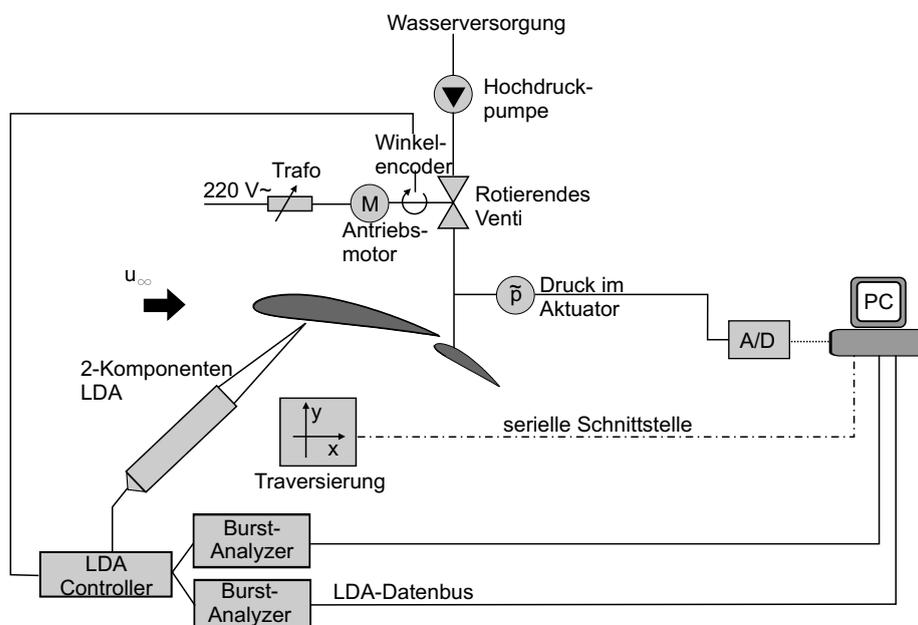


Bild 3.18: Versuchsaufbau im Wasserkanal am ILR

3.5.2 Vorversuche am Windkanal

Bei den Vorversuchen am Grenzschichtkanal des ILR kommt ein Frequenzgenerator vom Typ „Hameg, HM 8130“ zum Einsatz, dessen Signale von einem Amplifier (Brüel & Kjøer, 2712 (180 VA)) verstärkt und dem Aktuator zugeführt werden. Die dort generierten Druckschwankungen werden von einem Drucksensor zur Messung instationärer Drücke bis max. 3,5 kPa erfaßt und vom Transientenrekorder aufgezeichnet. Die Signale eines Hitzdrahtes, der auf einer Traversierung montiert ist, werden ebenfalls durch den Transientenrekorder erfaßt und gespeichert. Bei der Traversierung handelt es sich hierbei um eine 2D-Traversierung vom Typ „Microcontrol“, die über den GPIB-Bus vom Rechner aus ferngesteuert werden kann.

Die beiden Anstellwinkel des Versuchsmodells (α und η) werden mit Hilfe eines Servoantriebes (Gleichstrommotor mit Positionsrückmeldung) kontrolliert. Vom Zentralrechner aus können die Anstellwinkel ausgewählt werden, der Servoantrieb hält diese Winkel daraufhin konstant. Die Anstellwinkelkontrolle kommuniziert über die serielle Schnittstelle mit dem zentralen Datenerfassungsrechner.

Um die Druckverteilung am gesamten Versuchsmodell erfassen zu können, sind sowohl das Haupt- als auch das Klappenprofil mit Druckbohrungen versehen. Jede dieser Druckbohrungen ist über einen dünnen Schlauch mit jeweils einem Eingang eines Scanivalves verbunden. Mit Hilfe dieses Multikanal-Druckstellenumschalters können bis zu 50 verschiedene Drücke auf einen Druck-Transmitter vom Typ „Setra 270, ± 1700 Pa“ geschaltet werden. Das Scanivalve ist mit einer parallelen PC-Schnittstelle versehen, mit deren Hilfe es ferngesteuert werden kann. Zusätzlich verfügt es über eine Möglichkeit zur Detektion einer Referenzposition.

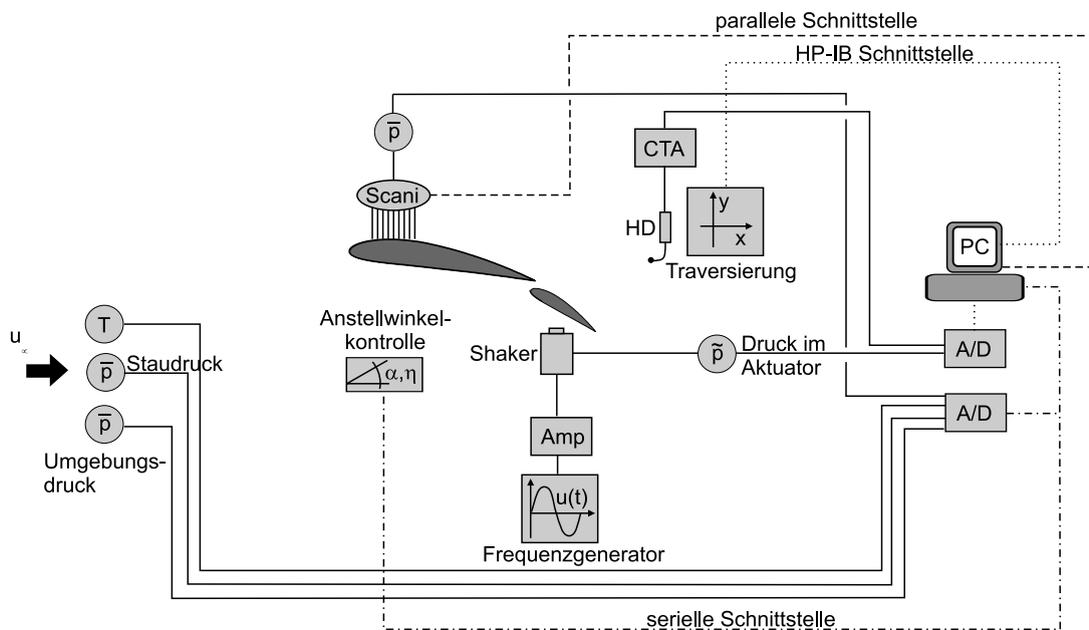


Bild 3.19: Versuchsaufbau im Grenzschichtkanal am ILR

Die Erfassung der „Luftwerte“ erfolgt über einen zusätzlich angeschlossenen externen A/D-Wandler. Dieser A/D-Wandler ist an die serielle Schnittstelle des Zentralrechners angeschlossen und bietet ein Auflösungsvermögen von 18 Bit. Mit Hilfe eines Prandtl-Rohres wird der Staudruck der Strömung ermittelt. Der erfaßte Gesamtdruck sowie der statische Druck am Prandtl-Rohr werden auf einen Drucktransmitter vom Typ „Multur PU, 0-5 mBar“ gegeben. Die Differenz dieser beiden Drücke bildet den Staudruck $q = p_{ges} - p_0$. Der Umgebungsdruck wird außerhalb der Meßstrecke mit einer Absolutdruckdose vom Typ „Setra 270, 0-1,4 Bar“ erfaßt und bei der Bestimmung der aktuellen Luftwerte berücksichtigt. Zur Erfassung der aktuellen Temperatur der Strömung dient ein Thermoelement vom Typ „Voltcraft 9050, -50°C-250°C, Thermoelement Typ K“. Dieser Temperatur-Meßfühler wird in unmittelbarer Nähe zum Prandtl-Rohr platziert.

3.5.3 Hauptuntersuchungen am Windkanal

Bei den Hauptuntersuchungen wird zusätzlich zu den bereits vorgestellten Geräten weitere Meß-Hardware eingesetzt.

Die am Modell wirkenden Kräfte und Momente werden mit Hilfe der 6-Komponenten-Waage gemessen. Dieses Gerät kommuniziert über die GPIB-Schnittstelle mit dem Zentralrechner.

Zur Vermessung des Strömungsfeldes um das Versuchsmodell herum kommen zwei Hitzdrahtsensoren zum Einsatz. Jeder der beiden Hitzdrähte ist auf einem Traversierungssystem montiert. Die erste der beiden Traversierungen (3D-Isel) deckt den Fernbereich des Strömungsfeldes ab, während die zweite (2D-Microcontrol) derart konstruiert ist, daß sie primär den Bereich über der Hinterkantenklappe des Versuchsmodells bedient. Beide Tra-

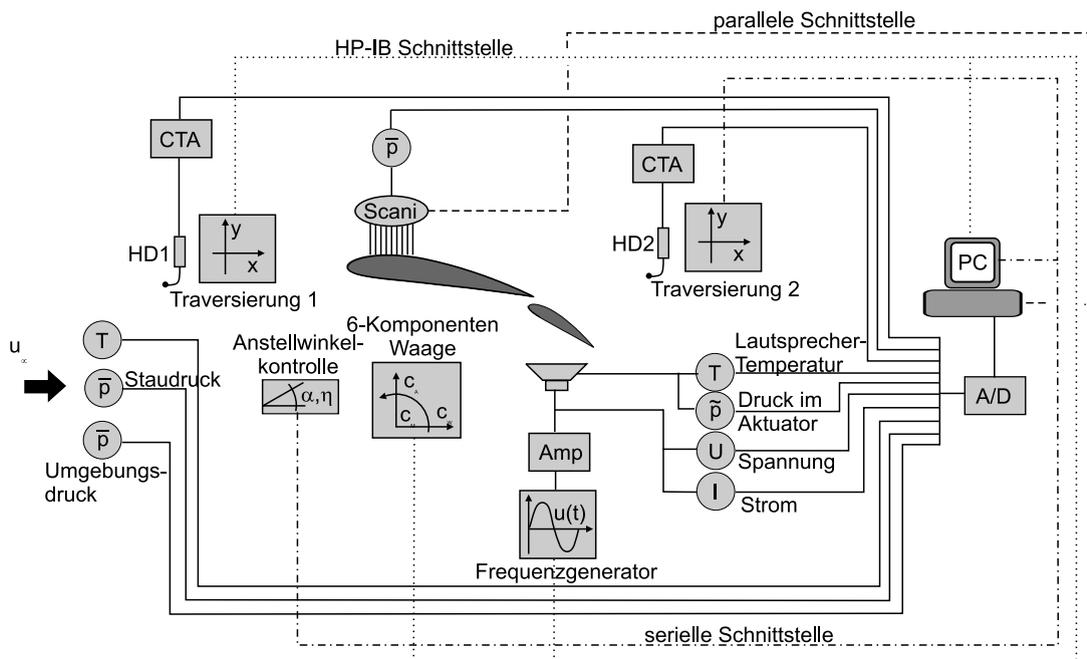


Bild 3.20: Versuchsaufbau im „großen Windkanal“ am HFI

versierungen werden vom Zentralrechner aus über die serielle Schnittstelle, bzw. mit Hilfe des IEC-Bus ferngesteuert.

Zum Schutz des Aktuators (Tiefton-Lautsprecher bei den Hauptuntersuchungen) vor thermischer Überlastung wird seine Temperatur in regelmäßigen Abständen kontrolliert. Dies geschieht mit Hilfe eines Thermoelementes vom Typ „Votcraft 9050, -50°C-250°C, Thermoelement Typ K“, das auf der Rückseite der Tauchspule des Lautsprechers thermisch leitend befestigt ist. Als zusätzlicher Schutz des Aktuators vor Überlastung wird die jeweilige aktuelle elektrische Leistung gemessen. Hierzu ist die Bestimmung des Stromes und der Spannung am Aktuator notwendig. Die Messung des Stromes erfolgt mit Hilfe einer Strommeßzange, die um eines der Zuleitungskabel zum Aktuator geklemmt wird. Die am Aktuator anliegende Spannung wird am „Monitoring-Ausgang“ des Leistungsverstärkers abgenommen.

Die Aufnahme sämtlicher analogen Meßwerte erfolgte mit Hilfe eines 16-Kanal A/D-Wandlers mit interner Verstärkung (Faktoren: 1, 2, 4, 8, 16) zur Signalkonditionierung, 12-Bit Signal-Auflösung und einer maximalen Summenabtastrate von 500 KHz. Bei diesem A/D-Wandler handelt es sich um eine Erweiterungskarte für den PC von der Firma Meilhaus, vom Typ ME3000-PCI. Diese Karte ist zusätzlich mit 32 digitalen I/O-Ports versehen und verfügt darüberhinaus über 4 frei programmierbare analoge Ausgänge.

4. Voruntersuchungen

Die Voruntersuchungen zur aktiven Ablösekontrolle an der Hochauftriebskonfiguration wurden sowohl im Wasserkanal als auch in einem kleinen Windkanal am Institut für Luft- und Raumfahrt durchgeführt. Der Schwerpunkt bei diesen Untersuchungen lag dabei auf der Vermessung des Grundströmungszustandes und ersten Versuchen zur Beeinflussung der Ablöseposition durch periodische Anregung.

4.1 Untersuchungen am Wasserkanal-Modell

4.1.1 Zweidimensionalität der Profilmströmung

Um sicherzustellen, daß die Umströmung des Versuchsmodells für den Fall der anliegenden Strömung weitgehend 2-dimensional ist, werden an ausgewählten spannweiten Positionen Grenzschichtmessungen vorgenommen und untereinander verglichen. Weichen die Geschwindigkeitsverteilungen in Spannweitenrichtung nur wenig voneinander ab, so kann davon ausgegangen werden, daß keine großen spannweiten Veränderungen des Strömungsfeldes auftreten, die Umströmung des Profils kann dann als 2-dimensional angenommen werden.

Bei einem Klappenwinkel von $\eta = 27^\circ$ (anliegende Strömung, siehe Kapitel 4.1.2) werden in drei Schnittebenen über dem Versuchsmodell, bei 50%, 95% und 140% x/c_{Main} die Geschwindigkeitsprofile in unmittelbarer Nähe der Profilloberfläche mit Hilfe der LDA-Meßtechnik erfaßt. Diese Messungen werden an 6 verschiedenen Spannweiten-Positionen wiederholt (bei $z/b = 17\%$, 33% , 46% , 61% , 76% und 91%). Um die Meßergebnisse miteinander zu vergleichen, wird jeweils eine für das Geschwindigkeitsprofil charakteristische Geschwindigkeit über der Spannweite aufgetragen. Bei den Grenzschichtprofilen über dem Hauptprofil handelt es sich dabei um die Geschwindigkeit am Grenzschichttrand u_{Edge} , bei den Messungen über dem Klappenprofil wird hingegen die maximale Geschwindigkeit des Klappenspalt-Strahls u_{Jet} als Referenz verwendet und über der Spannweite dargestellt. Die Ergebnisse dieser Meßreihe können Bild 4.1.1 entnommen werden. Hierbei kann man erkennen, daß die jeweiligen charakteristischen Geschwindigkeiten in Spannweitenrichtung kaum variieren. Lediglich in der Nähe der Kanalwände tritt eine leichte Erhöhung der Geschwindigkeiten auf, die durch die Verdrängungswirkung der am Übergang zwischen Profil und Kanalwand auftretenden Tütenwirbel erklärt werden kann. Die Profilmströmung bei $\eta = 27^\circ$ kann damit als weitgehend 2-dimensional angenommen werden.

Bei größeren Anstellwinkeln und damit einhergehender Strömungsablösung auf der Klappe und auf dem Hauptprofil kann man nicht mehr von einer 2-dimensionalen Umströmung ausgehen, da Strömungsablösung sowohl zeitlich als auch örtlich hochgradig instationär ist. Als aktuelle Ablöseposition kann daher stets lediglich ein zeitlicher Mittelwert angegeben werden.

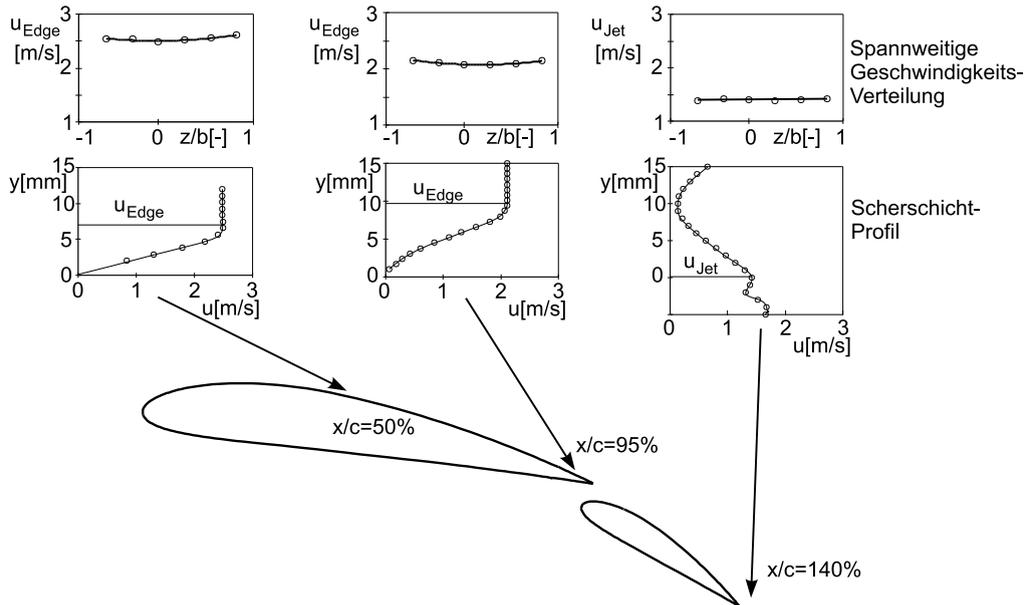
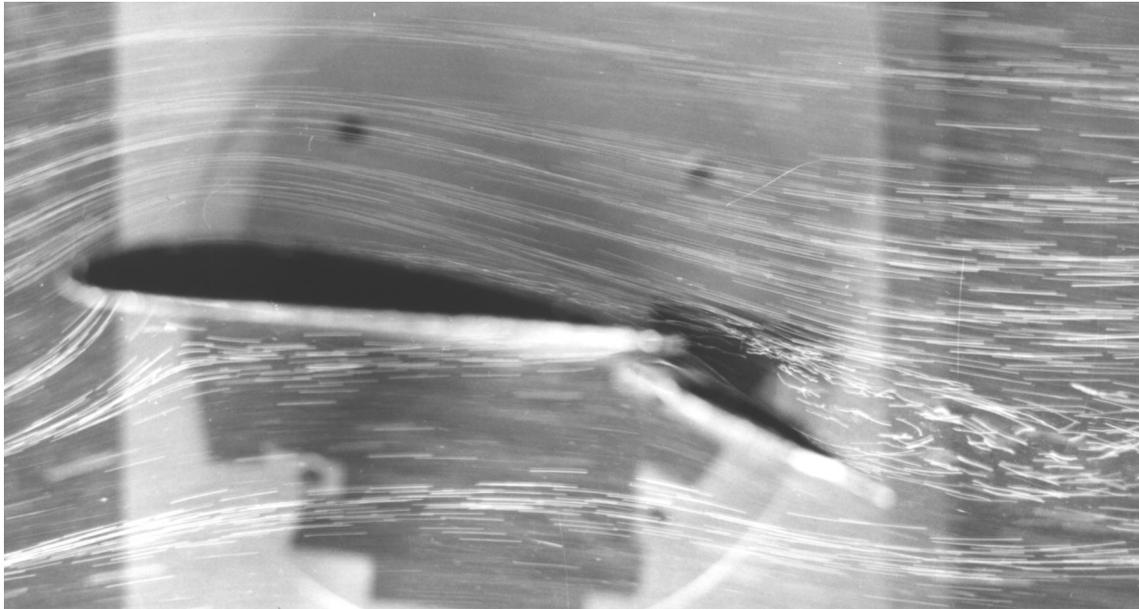


Bild 4.1: Nachweis der 2-Dimensionalität der Profilmströmung bei $\alpha = 8^\circ$ und $\eta = 27^\circ$, durch Vermessung der Scherschichtprofile an verschiedenen Positionen und Vergleich von char. Geschwindigkeitsgrößen in Spannweitenrichtung, LDA-Messungen

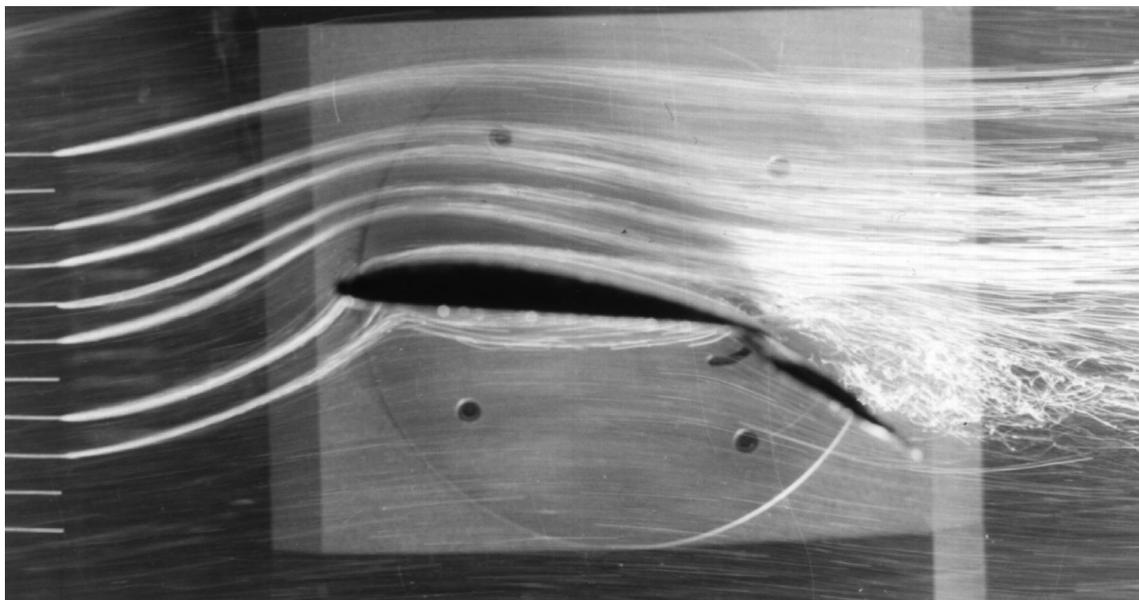
4.1.2 Der Grundströmungszustand

Um zunächst den Grundströmungszustand um die Hochauftriebskonfiguration zu dokumentieren, wird das Strömungsfeld bei verschiedenen Klappen-Anstellwinkeln η untersucht. Der Anstellwinkel des Hauptprofils ist dabei auf einen Wert von $\alpha = 8^\circ$ fest eingestellt und kann während der Voruntersuchungen nicht variiert werden.

Im Wasserkanal bietet sich die Strömungsvisualisierung als erstes, qualitatives Meßverfahren zur Sichtbarmachung des globalen Strömungsverlaufes an. Durch Einbringen von kleinen Luftbläschen mit Hilfe eines Rechens vor dem Versuchsmodell kann der Verlauf der Stromlinien im Wasser in etwa dargestellt werden. Je kleiner die in die Strömung eingebrachten Luftbläschen sind, umso geringer ist der verfälschende Einfluß ihres Auftriebes auf den Bahnverlauf. In Bild 4.2 sind exemplarisch zwei Strömungsvisualisierungen bei einem Klappenanstellwinkel von $\eta = 27^\circ$ und $\eta = 33^\circ$ dargestellt. Während die Strömung in Bild 4.2(a) über dem gesamten Versuchsmodell anliegt, ist die Strömung in Bild 4.2(b) über der Klappe bereits abgelöst, erkennbar an den stark verwirbelten Stromlinien in diesem Bereich. Das Ablösegebiet erstreckt sich bis weit hinter das Versuchsmodell. Die Stromlinien sind im vorderen Bereich des Hauptprofils auf der Oberseite stark gekrümmt. Durch die große Übergeschwindigkeit an dieser Stelle wirken dort hohe Unterdrücke, das Hauptpro-



(a) $\alpha = 8^\circ$, $\eta = 27^\circ$, anliegende Strömung über der gesamten Hochauftriebskonfiguration



(b) $\alpha = 8^\circ$, $\eta = 33^\circ$, anliegende Strömung über dem Hauptprofil, abgelöste Strömung über der Klappe

Bild 4.2: Strömungsvisualisierung durch Einbringen von kleinen Luftbläschen durch einen Rechen vor dem Versuchsmodell

fil liefert somit noch Auftrieb. Aufgrund der Strömungsablösung über der Klappe ist die gesamte Hochauftriebskonfiguration jedoch stark entwölbt, was am nahezu horizontalen Verlauf der Stromlinien im Abströmgebiet hinter dem Versuchsmodell zu erkennen ist.

Um das Strömungsfeld im Detail besser untersuchen zu können, werden Strömungsfeldmessungen mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie sowohl im Fernfeld um das Versuchsmodell als auch in dessen unmittelbarer Nähe durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Bild 4.3(a)-(c) dargestellt. Bei einem Anstellwinkel von $\eta = 27^\circ$ liegt die Strömung noch nahezu komplett über dem Versuchsmodell an. Lediglich in der Nähe der Hinterkante des Hauptprofils zeichnet sich ein kleines Ablösegebiet ab. Insbesondere über der Hinterkantenklappe liegt die Strömung jedoch komplett an. Gut erkennbar ist der Strahl, der aus dem Spalt zwischen Hauptflügel und Klappenprofil hervortritt und der noch in der Nachlaufdüse als leichte Geschwindigkeitsüberhöhung zu erkennen ist.

Wird der Klappenanstellwinkel η vergrößert, so beginnt die Strömung über der Hinterkantenklappe abzulösen. Bei dem im Bildteil (b) dargestellten Klappenwinkel von $\eta = 31^\circ$ ist die Strömungsablösung bereits in die Nähe der Klappen Vorderkante gewandert. Dadurch hat sich über der Klappe ein geschlossenes Rezirkulationsgebiet gebildet, das durch den starken Klappenspalt-Strahl von der Außenströmung getrennt ist. Die Geschwindigkeiten innerhalb des Rezirkulationsgebietes sind sehr gering und nahezu konstant über die Höhe des Rückströmgebietes. Innerhalb des Ablösegebietes können nur sehr wenig Messungen durchgeführt werden. Dies liegt zum einen an der nur geringen Strömungsgeschwindigkeit sowie an der Tatsache, daß die zur Messung notwendigen Tracer-Partikel im Ablösegebiet nur mit sehr geringer Konzentration auftreten. Wegen der daraus resultierenden geringen Datenrate und damit sehr langen Meßzeiten werden nur wenige Meßpunkte aufgenommen.

Bei weiterer Vergrößerung des Anstellwinkels der Klappe bis auf $\eta = 40^\circ$ erfährt der Klappenspalt-Strahl eine deutlich stärkere Ablenkung nach oben. Dies bewirkt eine Vergrößerung des Rezirkulationsgebietes über der Klappe und eine weitere Entwölbung der Hochauftriebskonfiguration. Die Strömung um das Hauptprofil wird ebenfalls von dem größeren Klappenwinkel beeinflusst und löst bereits deutlich vor der Hinterkante des Hauptprofils ab.

Insgesamt ist der Einfluß des Klappenwinkels von sehr großer Bedeutung für das gesamte Strömungsfeld um das Versuchsmodell. Ab einem Klappenwinkel von etwa $\eta = 31^\circ$ muß mit Strömungsablösung über der Klappe und einem einhergehenden Auftriebsverlust gerechnet werden.

Zur exakteren Erfassung des Strömungsverhaltens im Klappenbereich werden die Strömungsgeschwindigkeiten in einem konstanten Abstand über der Klappenoberfläche mit Hilfe der LDA-Meßtechnik bei drei verschiedenen Klappenwinkeln gemessen. Der Abstand zur Klappenoberfläche beträgt dabei etwa 1.5 mm, es wird bei den Messungen ausschließlich die empfindlichere Infrarot-Komponente des LDA-Systems eingesetzt, um lediglich die Haupt-Strömungskomponente u zu erfassen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Bild 4.4 dargestellt. Bei einem Anstellwinkel von $\eta = 27^\circ$ liegt die Strömung über der Klappe noch komplett an. Man erkennt dies an den über der gesamten Klappenauflän-

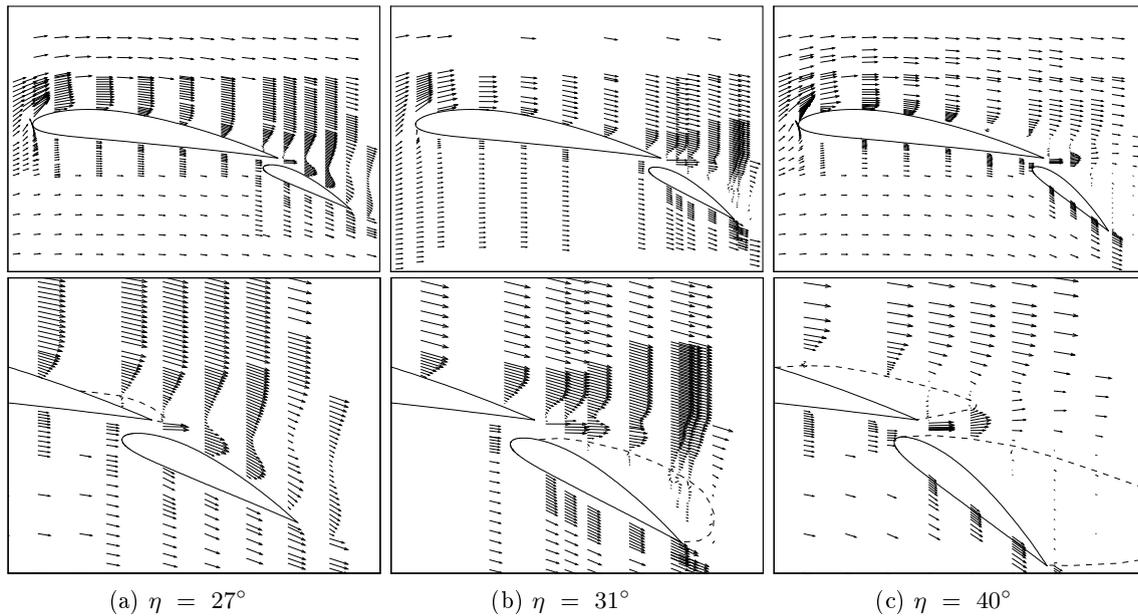


Bild 4.3: Strömungsfeld um das Versuchsmodell bei Grundströmungsbedingungen (ohne Anregung), obere Grafiken zeigen das Fernfeld der Strömung, die unteren Bilder zeigen eine Ausschnittsvergrößerung aus dem Bereich der Hinterkantenklappe, zeitgemittelte LDA-Messungen

ge positiven u -Geschwindigkeiten. Erhöht man den Klappenwinkel auf einen Wert von $\eta = 25^\circ$, so erfährt der Geschwindigkeitsverlauf über der Klappe einen Nulldurchgang bei etwa $x/c_{Flap} = 34\%$. Die Position, an der eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von $u = 0$ m/s auftritt, wird als Ablösepunkt definiert. Eine weitere Erhöhung des Klappenwinkels auf $\eta = 40^\circ$ resultiert in einer über die gesamte Lauflänge negativen Strömungsgeschwindigkeit. Bei diesem Klappenwinkel liegt der Ablösebereich also vor dem ersten Meßpunkt. Diese Meßreihe zeigt deutlich, daß der Ablösepunkt bei Vergrößerung des Klappen-Anstellwinkels von der Hinterkante der Klappe zur Vorderkante wandert. Aufgrund von fehlenden Zwischenwerten für den Klappenwinkel η kann keine Aussage darüber getroffen werden, wie sich der Ablösebereich mit größer werdendem Klappenwinkel η in Richtung Klappen-Vorderkante bewegt.

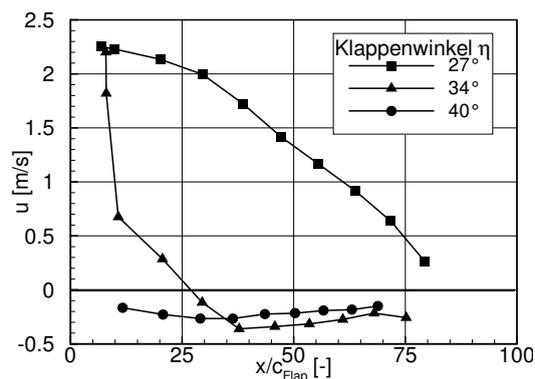


Bild 4.4: Wandparallele Messungen der u -Geschwindigkeiten in einem Abstand von 1.5 mm bei verschiedenen Klappenwinkeln η , LDA-Messungen

4.1.3 Einfluß der periodisch pulsierenden Anregung

Aus den bereits in Kapitel 3.2.2 genannten Gründen können bei den Vorversuchen im Wasserkanal lediglich positive periodische Druckpulse aufgebracht werden. Aus dem Schlitz in der Nähe der Klappenvorderkante tritt dadurch ein periodischer Wasserstrahl aus, der in seiner Amplitude und Frequenz regulierbar ist. Hierdurch wird die Außenströmung periodisch angeregt und soll dadurch, bei richtiger Wahl der Anregfrequenz und -amplitude, zum Wiederanlegen gebracht werden.

Eine weitere Strömungsvisualisierung mit Hilfe der Laser-Induced-Fluorescence (LIF) soll einen ersten Eindruck von der Wirkung der periodischen Anregung auf das abgelöste Strömungsfeld vermitteln. Der fluoreszierende Farbstoff wird durch ein kleines Röhrchen in der Nähe der Klappen-Hinterkante in das Strömungsfeld über der Klappe eingeleitet und durch eine Laser-Lichtschneitebene beleuchtet. Die zunächst abgelöste Strömung bei einem Klappenwinkel von $\eta = 35^\circ$ wird mit unterschiedlichen Frequenzen periodisch angeregt. Die resultierenden Bilder sind in Bild 4.5 dargestellt. Hierin erkennt man für den Fall ohne periodische Anregung in Bild 4.5(a) das Ablösegebiet über der Klappe, das durch



(a) Ohne Anregung, großes Ablösegebiet



(b) Anregung mit $St = 0.2$, Strömung legt teilweise wieder an



(c) Anregung mit $St = 1$, Strömung legt komplett wieder an

Bild 4.5: Strömungsvisualisierung durch Laser-Induced-Fluorescence, bei verschiedenen Anregfrequenzen, $\alpha = 8^\circ$, $\eta = 35^\circ$. Der fluoreszierende Farbstoff wird an der Klappenhinterkante eingebracht.

den fluoreszierenden Farbstoff ausgefüllt ist und daher als helle Fläche sichtbar wird. Bei Aktivierung der Anregung mit einer Frequenz von $St = 0.2$ (Bild 4.5(b)) erfolgt ein teilweises Wiederanlegen, zu erkennen am deutlich verkleinerten Rezirkulationsgebiet. Erst bei Anregung mit einer dimensionslosen Frequenz von $St = 1$ legt die Strömung über der Hinterkantenklappe wieder vollständig an. Man erkennt dies daran, daß der fluoreszierende Farbstoff mit der Strömung ausschließlich nach hinten abgetragen wird.

Anhand des hier gezeigten Ergebnisses kann man erkennen, daß die abgelöste Strömung über der Klappe durch Einbringung eines periodischen Strahles in der Nähe der Klappenvorderkante zum Wiederanlegen gebracht werden kann. Entscheidend ist hierbei, daß die periodische Anregung mit der richtigen Frequenz erfolgt (im gezeigten Beispiel betrug die Anregungsfrequenz $St = 1$, das entspricht einer dimensionsbehafteten Frequenz von $F = 40$ Hz).

Als weiterer Parameter der Anregung gilt die Anregeintensität, die bereits als Impulsbeiwert c_μ in dimensionsloser Schreibweise eingeführt wurde (siehe Kapitel 3.2.1). Der Einfluß der Anregeintensität auf das Wiederanlegeverhalten wird im Folgenden untersucht: Entlang eines Schnittes über der Klappe bei $x/c_{Flap} = 75\%$ werden die Geschwindigkeitsprofile $u(y)$ mit Hilfe der LDA erfaßt und sind in Bild 4.6 (a)-(c) dargestellt. Dabei wird die Anregeintensität zwischen den Werten $0 \leq c_\mu \leq 100 \cdot 10^{-5}$ variiert, die Anregungsfrequenz beträgt dabei $St = 1$. In jedem der drei Diagramme ist das Geschwindigkeitsprofil für den Fall ohne Anregung ($c_\mu = 0$) als Referenzfall in Form einer gestrichelten Linie eingetragen. Man erkennt, daß bereits eine schwache Anregung mit $c_\mu = 60 \cdot 10^{-5}$ zu einer deutlichen Veränderung des Strömungsverhaltens über dem Klappenprofil führt (Bild 4.6(a)). Das

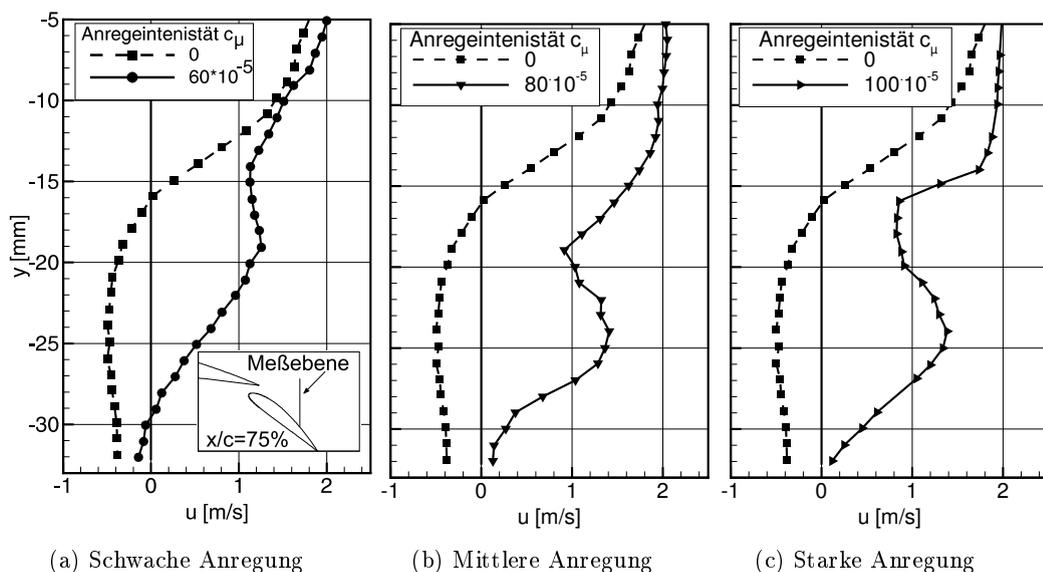


Bild 4.6: Geschwindigkeitsprofile entlang eines Schnittes über der Klappe bei verschiedenen Anregeintensitäten, Anregungsfrequenz $St = 1$, LDA-Messungen

Rezirkulationsgebiet wird erheblich verkleinert, kann jedoch noch nicht völlig unterdrückt werden. Bildteil (b) zeigt, daß eine Erhöhung von c_μ zu einer stark verbesserten Strömungsqualität über der Klappe führt. Der Klappenspalt-Strahl verläuft wesentlich näher entlang

der Profilloberfläche und ist stärker ausgeprägt als bei der schwachen Anregeintensität. Eine weitere Verstärkung von c_μ resultiert in einer Verbesserung der Strömungsqualität in unmittelbarer Nähe der Profilloberfläche. Wie man in Bild 4.6(c) erkennen kann, ist das Geschwindigkeitsprofil im Bereich $y = -30$ mm deutlich fülliger und damit resistenter gegen Strömungsablösung, als dies in Bildteil (b) der Fall ist.

Man erkennt, daß das Wiederanlegeverhalten ebenfalls stark von der Anregeintensität abhängig ist. Generell gilt, daß eine starke Anregung bis zu einer gewissen Grenze ein besseres Ergebnis liefert als eine schwache. Dabei tritt jedoch ein Sättigungseffekt ein. Wurde die Strömung durch Anregung mit einer bestimmten Intensität bereits vollständig zum Wiederanlegen gebracht, so bringt eine darüber hinausgehende Verstärkung der Anregeintensität keine weitere Verbesserung der Strömungsqualität.

Um einen besseren Eindruck vom Einfluß der Strömungsanregung auf das Strömungsfeld im Bereich der Hinterkantenklappe zu erhalten, sind in den Bildern 4.7 und 4.8 die Geschwindigkeitsvektoren über der Klappe für verschiedene Anstellwinkel aufgetragen. Dabei wird in Bild 4.7 jedem Strömungsfeld ohne Anregung (linke Bildhälfte) das entsprechende Strömungsfeld für den Fall mit optimaler Strömungsanregung gegenübergestellt. Anregungsfrequenz und -amplitude sind jeweils so gewählt, daß die Strömung über der Klappe vollständig wiederanlegt. Gut zu erkennen ist, daß durch die Strömungsanregung neben dem Rezirkulationsgebiet direkt über dem Klappenprofil zusätzlich auch die Strömungsablösung in der Nähe der Hinterkante des Hauptprofils eliminiert wird. Die durch periodische Anregung verbesserte Gesamtumströmung und die daraus resultierende Auftriebserhöhung kann am deutlich vergrößerten Abströmwinkel hinter dem Versuchsmodell erkannt werden. Die Entwölbung der Profilgeometrie durch Strömungsablösung kann durch die aktive Beeinflussung der Strömung erkennbar reduziert werden.

Auch bei sehr großen Klappenanstellwinkeln zeigt die periodische Anregung noch deutliche Auswirkungen auf das Strömungsfeld. Jedoch ist der Einfluß mit steigendem Anstellwinkel immer schwächer ausgeprägt. Wie in Bild 4.8 zu erkennen ist, kann die Strömung bis zu einem Anstellwinkel von $\eta = 45^\circ$ gut zum Wiederanlegen gebracht werden. Bei größeren Anstellwinkeln erfolgt lediglich ein teilweises bzw. intermittierendes Wiederanlegen. Im unteren rechten Bild von 4.8 ist der angeregte Klappenspalt-Strahl im Geschwindigkeitsprofil zunächst noch gut zu erkennen, verschwindet jedoch mit wachsender Lauflänge. Dies läßt sich durch ein intermittierendes Strömungsverhalten erklären, d.h. zeitweilig erfolgt ein Wiederanlegen der Strömung, kurze Zeit darauf löst die Strömung wieder ab. Da bei diesen Untersuchungen lediglich zeitlich gemittelte LDA-Messungen zum Einsatz kommen, können stochastisch auftretende, instationäre Strömungsvorgänge naturgemäß nicht erfaßt werden. Treten diese auf, so wird das Geschwindigkeitsprofil in diesem Bereich stark verschmiert. Daher wird der Klappenspalt-Strahl für den Fall $\eta = 50^\circ$ in der Nähe der Klappenhinterkante kaum erfaßt, bzw. das Geschwindigkeitsprofil weist starke Unstetigkeiten auf.

All dies zeigt deutlich, daß die Leistungsfähigkeit der Ablösekontrolle durch periodisches Einblasen bei großen Anstellwinkeln abnimmt und daß das Verfahren der periodisch ein-

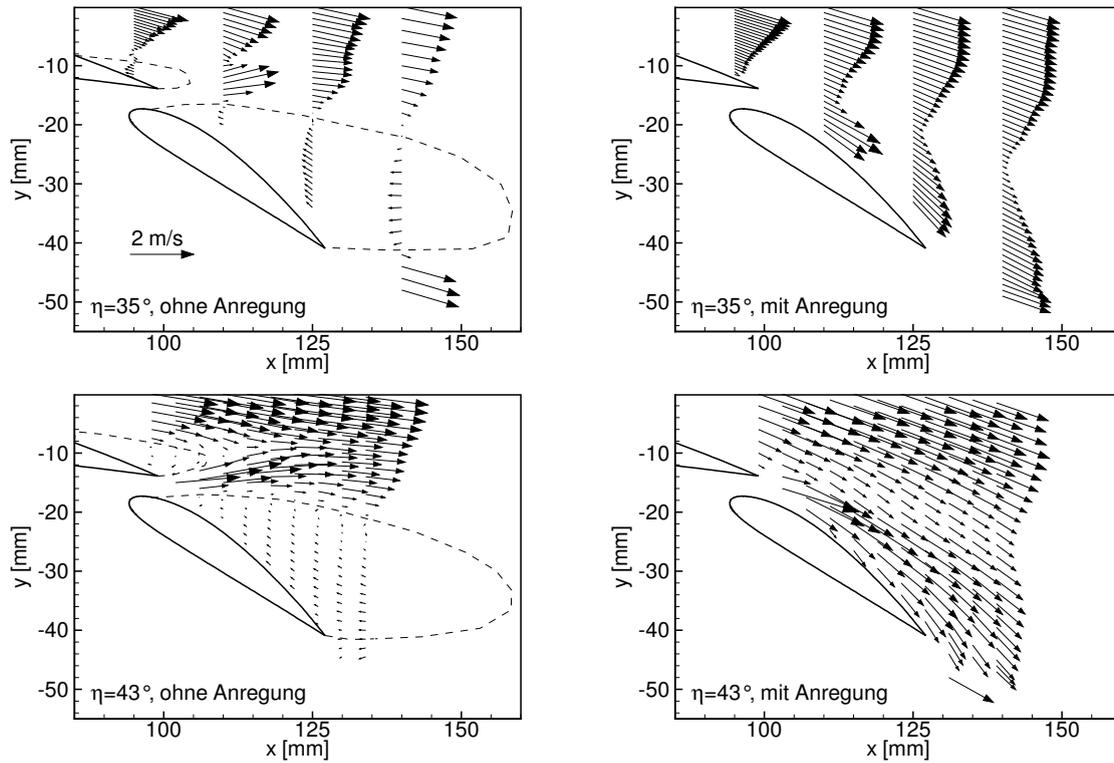


Bild 4.7: Strömungsfeld über dem Klappenprofil für zwei exemplarische Anstellwinkel, jeweils ohne bzw. mit Anregung ($St = 1$, $c_\mu = \text{optimiert}$)

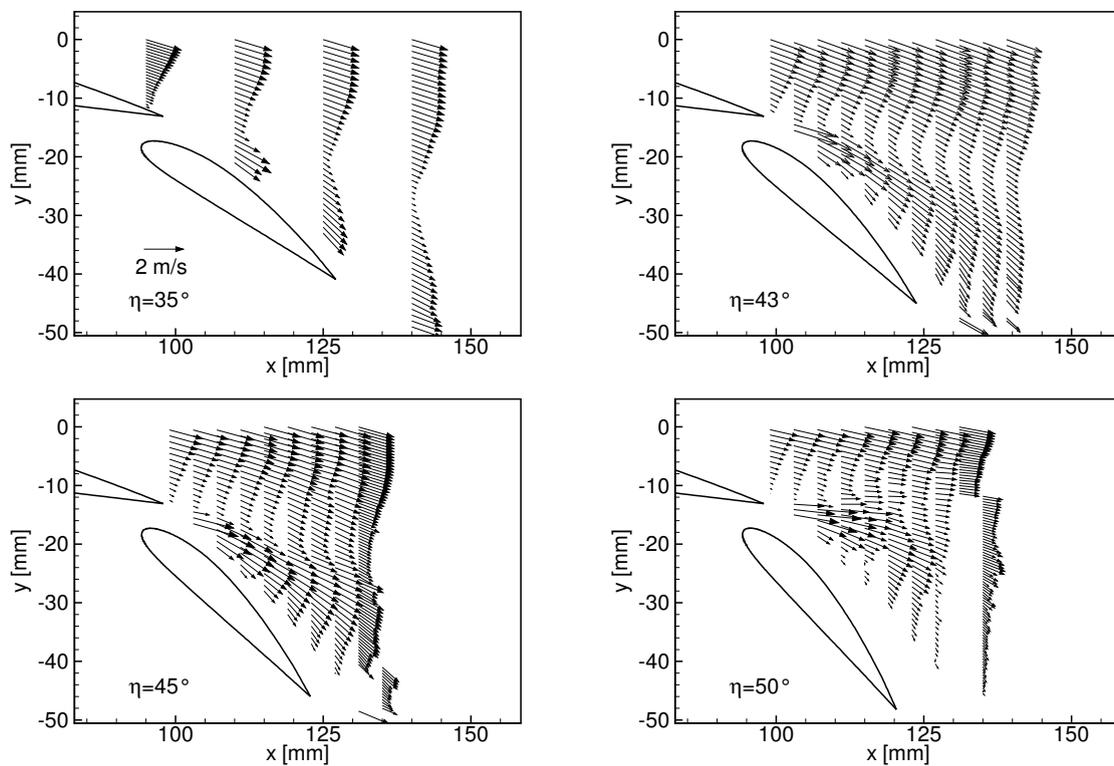


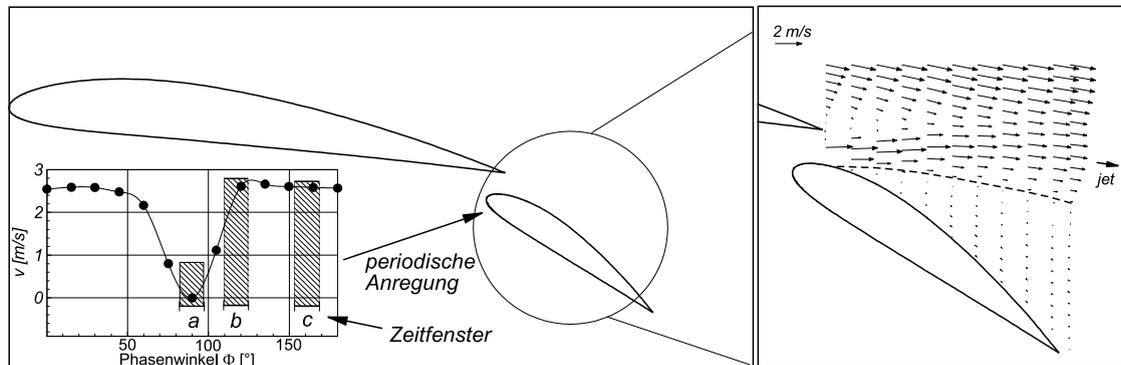
Bild 4.8: Durch periodische Anregung mit $St = 1$ und $c_\mu = \text{optimiert}$ wiederangelegte Strömung über dem Klappenprofil bei vier verschiedenen Anstellwinkeln η

blasenden Wandschlitz-Strahlen nicht auf abgelöste Strömung bei beliebig hohen Klappenwinkeln angewendet werden kann.

Zur Vervollständigung der Voruntersuchungen im Wasserkanal werden an dieser Stelle noch die Ergebnisse aus einer Meßreihe zur Bestimmung des instationären Strömungsverhaltens bei periodischer Anregung präsentiert. Dazu wird das Strömungsfeld im Klappenbereich mit Hilfe der phasengemittelten LDA-Technik vermessen. Hierzu ist der Anregemechanismus (siehe Kapitel 3.2.2) mit einem Drehgeber ausgestattet, mit dessen Hilfe zu jedem Zeitpunkt die aktuelle Phasenlage der Anregung ermittelt werden kann. Dadurch ist es möglich, die LDA-Anlage so zu triggern, daß lediglich diejenigen Lasersignale ausgewertet werden, die innerhalb eines erlaubten Zeitfensters auftreten. Um die bei der Meßsignalerfassung erreichbare Datenrate in erträglichem Rahmen zu halten (≥ 10 Hz), werden die Zeitfenster relativ breit gewählt, und es werden Messungen bei lediglich drei verschiedenen Phasenlagen durchgeführt (siehe hierzu Bild 4.9(a)).

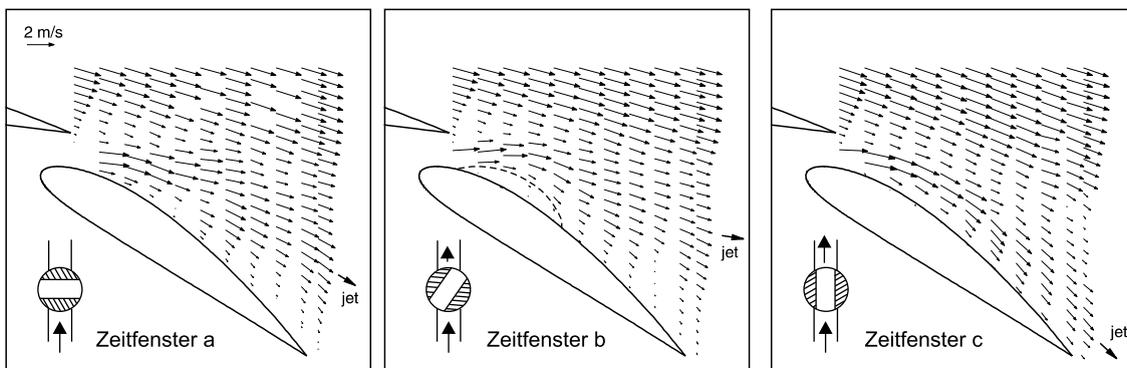
Der Klappenanstellwinkel beträgt bei diesen Untersuchungen $\eta = 35^\circ$, als Anregeparameter werden $St = 1$ und $c_\mu = 100 \cdot 10^{-5}$ gewählt, um ein Wiederanlegen der Strömung zu erreichen. In Bild 4.9 sind die Ergebnisse der phasengemittelten Messungen als Vektorplots dargestellt. Im oberen Bildteil auf der rechten Seite ist das abgelöste Strömungsfeld für den Fall ohne periodische Anregung zur Erinnerung nochmals dargestellt. In der unteren Hälfte erkennt man die momentanen Strömungsfelder zu drei verschiedenen Phasenlagen der Anregung. Bild (c) zeigt das resultierende Strömungsfeld zum Zeitpunkt des geschlossenen Ventiles. Zu diesem Zeitpunkt erfolgt keine Anregung der Außenströmung. Die zweite Phase kennzeichnet den Moment der einsetzenden Anregung aufgrund des sich öffnenden Ventiles. Im Bild (e) schließlich ist das Ventil voll geöffnet, und der Anregestrahl am Schlitz erreicht seine maximale Intensität. Man erkennt die deutliche Reaktion des Strömungsfeldes auf die periodische Anregung. Das gesamte Strömungsfeld schwingt im Gleichtakt mit der Anregephase auf und ab. Dies läßt sich besonders gut an der Lage des anliegenden Klappenspalt-Strahls erkennen, der in jedem der drei Teilbilder durch einen kleinen Pfeil am rechten Bildrand gekennzeichnet ist. Zusätzlich ist zu erkennen, daß im Moment der einsetzenden Anregung (Bild (d)) die Strömung im Bereich des Anregeschlitzes, durch den vertikal eintretenden Impuls der Anregung, leicht nach oben abgelenkt wird. Stromab davon bildet sich ein kleines, geschlossenes Rezirkulationsgebiet aus.

Die phasengemittelten Strömungsfeldmessungen zeigen, daß die Strömung durch die Anregung in eine periodische Schwingung versetzt wird. Abgesehen von lokalen Ablösezonen liegt das Strömungsfeld während der kompletten Anregeperiode über der gesamten Klappenauflänge an.



(a) Untersuchte Zeitfenster der periodischen Anregung

(b) Abgelöste Strömung im zeitlichen Mittel



(c) Phase 1, $\Phi = 90^\circ$, geschlossenes Ventil, keine Anregung

(d) Phase 2, $\Phi = 120^\circ$, öffnendes Ventil, einsetzende Anregung

(e) Phase 3, $\Phi = 160^\circ$, voll geöffnetes Ventil, maximale Anregungsintensität

Bild 4.9: Darstellung des Momentan-Strömungsfeldes für drei verschiedene Anregephase, Anregeparameter: $St = 1$, $c_\mu = 100 \cdot 10^{-5}$, $\alpha = 8^\circ$, $\eta = 35^\circ$

4.2 Untersuchungen am Windkanal-Modell

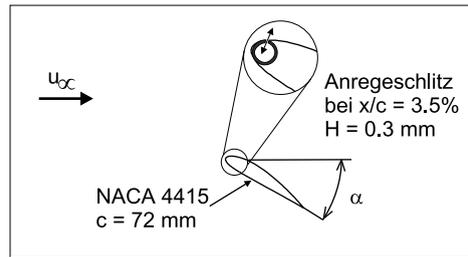
Um den Einfluß der **periodisch oszillierenden** Anregung mit Ausblase- und Einsaugephase zu erfassen, werden einige Voruntersuchungen im Windkanal durchgeführt. Als Anregemechanismus kommt hierbei das in Kapitel 3.1.3.1 beschriebene System zum Einsatz. Aufgrund der kleinen Abmessungen des verwendeten Windkanales können die Verbindungsschläuche zwischen Anregemechanismus und Versuchsmodell relativ kurz gehalten werden. Dadurch liegen die negativen Effekte der Schlauchverbindung, wie z.B. stehende Wellen oder starke Dämpfung der Druckschwankungen, außerhalb des verwendeten Frequenzbereiches. Es sollen im Weiteren zwei Untersuchungen vorgestellt werden: Zum einen wird der Einfluß der periodischen Anregung auf ein Einzelprofil untersucht. Hierbei dient das Klappenprofil, welches ohne das Hauptprofil in die Meßstrecke eingebaut wird, als Versuchsmodell (nur das Klappenprofil ist mit einem Anregesystem ausgestattet). Zum anderen wird die Wirkung der Anregung bei der Hochauftriebs-Konfiguration untersucht. Im Gegensatz zu den Voruntersuchungen im Wasserkanal ist das Windkanal-Versuchsmodell mit statischen Druckbohrungen versehen, so daß die statischen Wanddrücke über Drucksensoren erfaßt werden können. Damit ist es möglich, den jeweiligen, aus der Druckverteilung resultierenden Auftrieb, zu berechnen, der als Maß zur Beurteilung der Auswirkung der periodischen Anregung auf die Strömungsablösung dient.

4.2.1 Einfluß der periodischen Anregung auf ein Einzelprofil

4.2.1.1 Anregeparameter

Es wird zunächst der Einfluß der beiden Anregeparameter (c_μ und St) auf den erreichbaren Auftriebsbeiwert untersucht. Hierzu wird das Einzelprofil bei zwei hohen Anstellwinkeln ($\alpha = 18^\circ$ bzw. $\alpha = 22^\circ$) eingebaut. Bei diesen beiden exemplarischen Anstellwinkeln ist die Strömung auf der Profiloberseite im Grundströmungsfall bereits abgelöst, wie man den Polaren in Bild 4.11 entnehmen kann.

Die Ergebnisse der Untersuchungen, zum Einfluß der Anregung bei einem Einzelprofil sind in Bild 4.10 dargestellt. Man erkennt in Bild (b), daß eine Erhöhung der Anregeintensität generell zu einer Verbesserung des Auftriebsbeiwertes führt. Dies ist auf eine Reduzierung des Ablösegebietes und damit eine verbesserte Umströmung des Profils aufgrund der periodischen Anregung zurückzuführen. Dabei reagiert die Ablösung bei dem größeren der beiden untersuchten Anstellwinkel bereits bei kleineren Werten von c_μ . Zusätzlich erkennt man, daß ab einer gewissen Anregeintensität eine Sättigungsgrenze für den Auftrieb erreicht wird. Wie aus den Vorversuchen im Wasserkanal bekannt ist, läßt sich dies auf eine bereits vollständig wiederangelegte Strömung zurückführen, die sich nicht mehr weiter beeinflussen läßt. Bild (c) zeigt den Einfluß der Anregefrequenz auf das Wiederanlegeverhalten bei einem Einzelprofil. Der Profil-Anstellwinkel ist bei diesen Untersuchungen konstant auf $\alpha = 18^\circ$ eingestellt. Die Variation der Anregefrequenz bei unterschiedlichen Anregeintensitäten zeigt deutlich, daß die abgelöste Strömung in einem Frequenzbereich um $St = 1$ herum gut zum Wiederanlegen gebracht werden kann. Frequenzen außerhalb dieses Frequenzbandes



(a) Einzelprofil im Windkanal mit Anregeschlitz

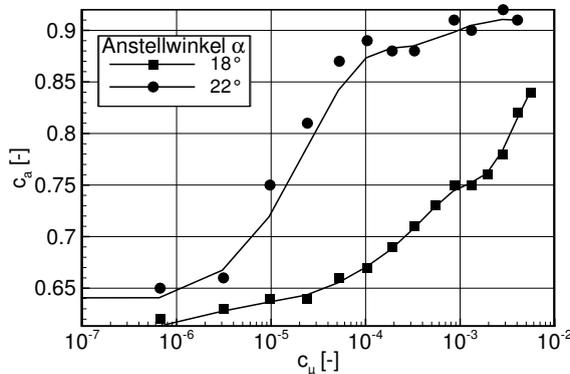
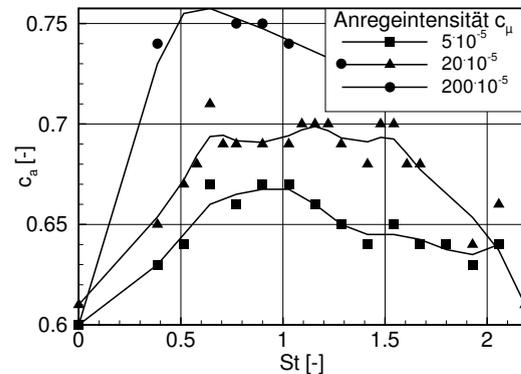
(b) Einfluß der Anregungsintensität c_μ , $St = 1$ (c) Einfluß der Anregungsfrequenz, $\alpha = 18^\circ$

Bild 4.10: Untersuchungen zum Einfluß der periodischen Anregung an einem Einzelprofil, hierbei wird die Hinterkantenklappe ohne das Hauptprofil verwendet

resultieren, bei gleicher Anregungsintensität, in einem deutlich niedrigerem Auftriebsbeiwert. Die zusätzlich in Bild (c) dargestellte Variation der Anregungsintensität macht deutlich, daß eine Verstärkung der Anregung sowohl in einem höheren erreichbaren Auftriebsbeiwert als auch in einem breiteren nutzbaren Frequenzband resultiert.

4.2.1.2 Einfluß auf die Auftriebspolare

Zum Abschluß der Vorversuche am Einzelprofil wird der erreichbare Auftrieb bei unterschiedlichen Anstellwinkeln jeweils ohne bzw. mit periodischer Anregung verschiedener Anregungsintensität erfaßt und ist in Bild 4.11 grafisch als Polaren-Diagramm dargestellt. Die gestrichelte Linie kennzeichnet den Referenzfall ohne Anregung. Die Grundströmung beginnt ab einem Anstellwinkel von $\alpha \approx 10^\circ$ abzulösen, der Auftrieb bricht zusammen und bildet bei etwa 20° ein Auftriebsminimum, um danach wieder anzusteigen. Der Auftriebsanstieg bei diesen hohen Anstellwinkeln ist auf ein verstärktes Mittragen der Profilunterseite aufgrund der Einengung der Meßstrecke bei großen Profilanstellwinkeln zurückzuführen. Eine Windkanalwandkorrektur der Auftriebsbeiwerte findet nicht statt.

Die periodische Anregung bei Variation der Intensitäten resultiert in gesteigerten Auftriebsbeiwerten, wie die zusätzlich eingetragenen Meßwerte deutlich zeigen. Erfolgt die Anregung mit relativ schwacher Intensität ($c_\mu = 42 \cdot 10^{-5}$), so bleibt die Gesamtcharakteristik der Polare erhalten. Das bedeutet, daß nach Erreichen eines leicht gesteigerten Maximalauftriebs-

bes am Profil nach wie vor lokal Ablösung auftritt und der Auftrieb dadurch abfällt. Dabei sind die insgesamt erreichbaren Auftriebsbeiwerte bei großen Anstellwinkeln deutlich hin zu höheren Werten verschoben. Die Anregung mit sehr starker Intensität ($c_\mu = 600 \cdot 10^{-5}$) resultiert in einer völlig veränderten Auftriebs-Charakteristik. Es bildet sich kein Auftriebsminimum aus, sondern der Auftrieb nimmt auch bei Anstellwinkeln von $\alpha \geq 10^\circ$ stetig zu. Die starke Anregung verhindert offensichtlich das Bilden von großen Rezirkulationsgebieten und trägt somit dazu bei, den Auftrieb weit über den normalerweise erreichbaren Wert hinaus zu steigern.

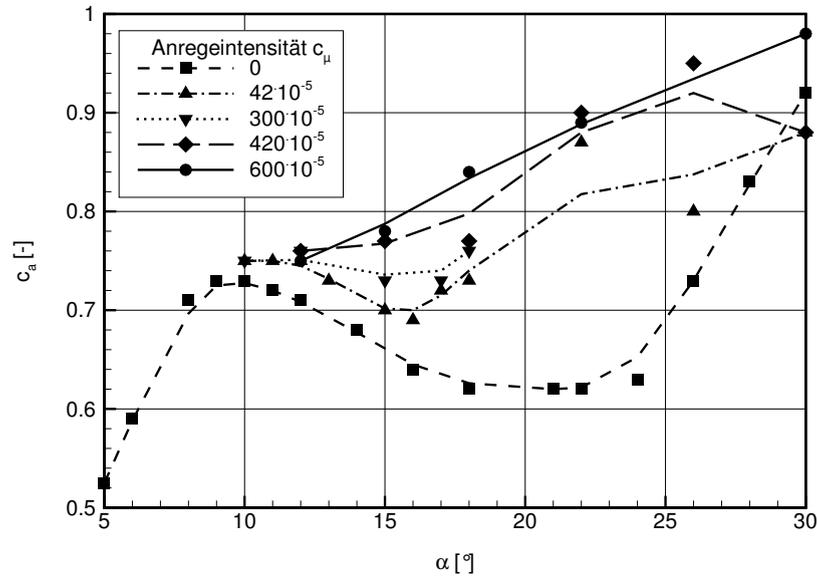


Bild 4.11: Auftriebscharakteristik des Einzelprofils bei Einbringung der periodischen Anregung, $St = 1.0$, $c_\mu =$ variiert

Die Voruntersuchungen zeigen, daß die periodisch oszillierende Anregung in der Lage ist, bei einem Einzelprofil den erreichbaren Auftrieb deutlich zu steigern. Dabei ist zu erkennen, daß die auftriebssteigernde Wirkung bei sehr hohen Anstellwinkeln besonders zum Tragen kommt. Der hierfür nutzbare Frequenzbereich ist sehr breit und liegt im Bereich von $St \approx 1$.

4.2.2 Einfluß der Anregung auf die Hochauftriebskonfiguration

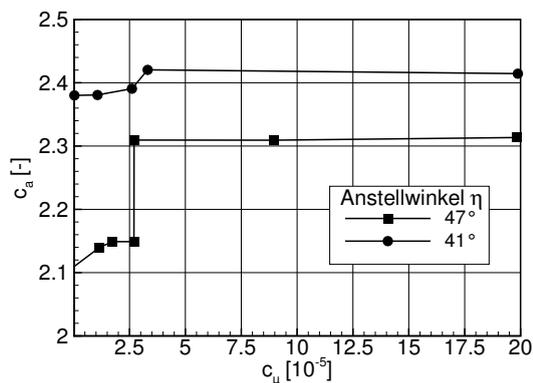
4.2.2.1 Anregeparameter

Bei diesen erweiterten Vorversuchen stehen die Untersuchungen zur Auswirkung der periodischen Anregung auf die Umströmung einer Hochauftriebskonfiguration im Mittelpunkt. Zunächst werden wieder der Einfluß von Anregungsintensität und Frequenz auf das Auftriebsverhalten untersucht.

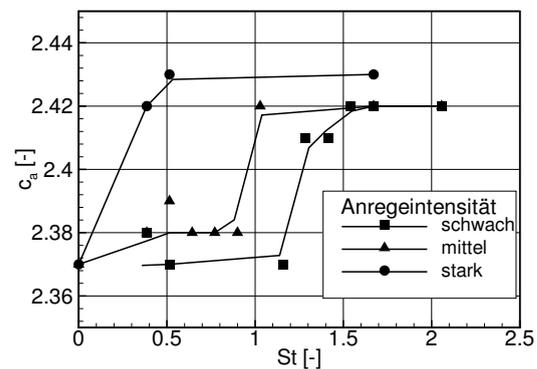
Wie bereits bei den Voruntersuchungen am Einzelprofil gezeigt, bewirkt eine Steigerung der Anregungsintensität bei fester Frequenz auch bei der Hochauftriebskonfiguration eine Erhöhung des erreichbaren Auftriebes (Bild 4.12(a)). Interessant ist dabei, daß der Auftrieb, im Gegensatz zu den Untersuchungen am Einzelprofil, bei Erhöhung vom c_μ nicht kontinuierlich ansteigt, sondern sich sprunghaft bei Erreichen eines gewissen Schwellwertes für

c_μ erhöht. Dies ist auf ein schlagartig erfolgendes Wiederanlegen der abgelösten Klappenspaltströmung zurückzuführen. Bei dem größeren der beiden in Bild 4.12(a) dargestellten Klappenanstellwinkeln, fällt der erreichbare relative Gewinn im Auftrieb höher aus. Dies läßt darauf schließen, daß die Strömung, für den Fall ohne Anregung, bei einem Klappenwinkel von $\eta = 47^\circ$ bereits vollständig in der Nähe der Klappenvorderkante ablöst und sich mit Hilfe der Anregung besonders gut beeinflussen und zum Wiederanlegen bringen läßt.

Der Einfluß der Anregfrequenz auf das Wiederanlegeverhalten der Hochauftriebskonfiguration ist in Bild 4.12(b) dargestellt. Auch hier erkennt man einen sprunghaftigen Anstieg des Auftriebsbeiwertes bei Erreichen einer bestimmten Anregfrequenz. Die Frequenz, bei der eine Erhöhung des Auftriebes auftritt, ist dabei von der Anregintensität c_μ abhängig. Während bei einer schwachen Anregungsintensität der Auftrieb erst bei einer Anregfrequenz von $St = 1.2$ ansteigt, wird bei einer starken Anregung bereits ab $St = 0.5$ ein höherer Auftrieb gemessen. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den Untersuchungen am Einzelprofil gilt also bei der Hochauftriebskonfiguration, daß das nutzbare Frequenzband zum Erreichen des Wiederanlegens im Bereich um $St = 1$ liegt.



(a) Einfluß der Anregintensität auf den erreichbaren Auftrieb



(b) Einfluß der Anregfrequenz auf c_a

Bild 4.12: Erste Untersuchungen zum Einfluß der periodischen Anregung an einer Hochauftriebs-Konfiguration

4.2.2.2 Druckverteilung

Das Versuchsmodell ist komplett mit Druckbohrungen ausgestattet, um sowohl die Verteilung der statischen Drücke um die Hochauftriebskonfiguration als auch den Einfluß der periodischen Anregung auf die Druckverteilung erfassen zu können. In Bild 4.13 sind die Druckverteilungen für vier verschiedene Anstellwinkel jeweils für den Fall ohne, bzw. mit periodischer Anregung dargestellt. Man erkennt anhand der plateauförmigen Druckverteilung im Bereich der Klappe, daß die Grundströmung über dem Klappenprofil bei einem Anstellwinkel von $\eta \geq 43^\circ$ komplett abgelöst ist. Die periodische Anregung mit einer Frequenz von $St = 1$ und einer jeweils an den Anstellwinkel angepaßten Amplitude resultiert in einer Wiederherstellung der Druckverhältnisse im Klappenbereich, d.h. über dem Klapp-

penprofil bildet sich erneut eine Druck-Saugspitze aus. Als zusätzlicher positiver Effekt der Anregung kann eine Erhöhung des Unterdruckes im Hinterkantenbereich des Hauptflügels beobachtet werden. Die durch die Anregung verbesserte Strömungssituation über der Hinterkantenklappe führt zu einer Abströmbedingung für das Hauptprofil und damit zu höheren Unterdrücken im Bereich der Flügelhinterkante. Die aufgrund der Anregung resultierende Erhöhung des Gesamtauftriebes ist hauptsächlich auf die Verbesserung der Druckverhältnisse auf dem Hauptprofil zurückzuführen, da diese einen größeren Einfluss auf den Gesamtauftrieb hat, als die geringe Druckänderung auf der Klappe. Bei großen Klappenwinkeln ($\eta = 53^\circ$) sind für den Fall der periodischen Anregung lediglich schwache Auswirkungen auf das Druckfeld zu beobachten. Dementsprechend ist bei diesem Anstellwinkel lediglich eine minimale Erhöhung des Auftriebsbeiwertes durch die Anregung zu beobachten.

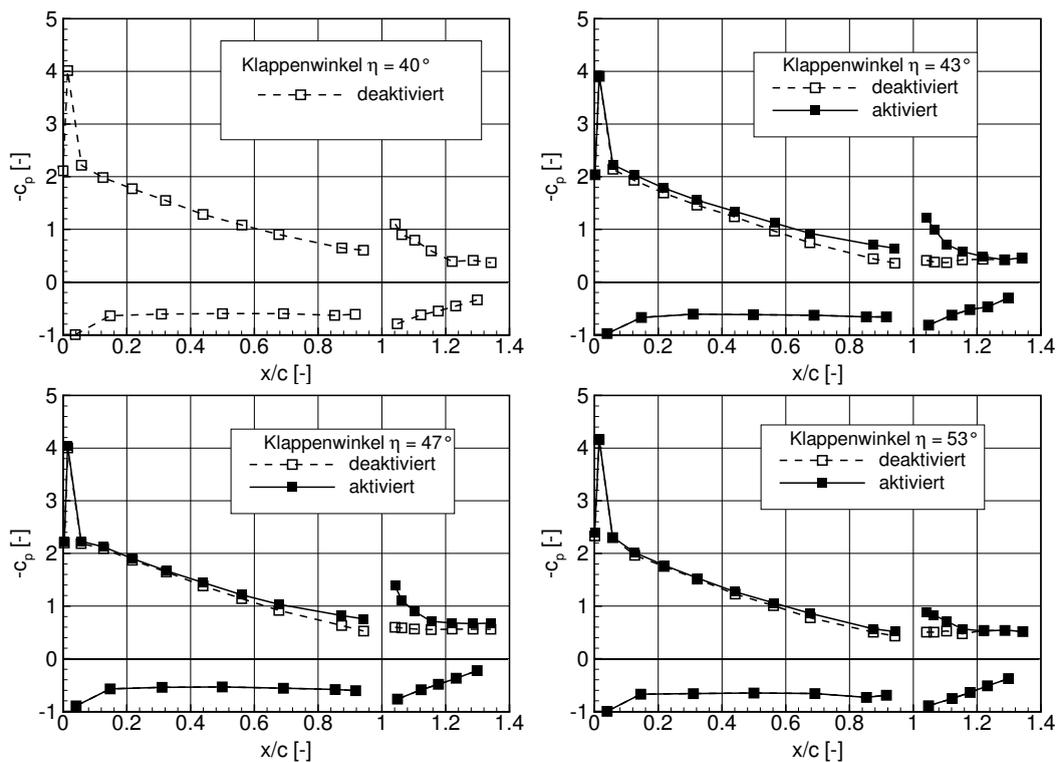


Bild 4.13: Druckverteilungen am Hochauftriebsprofil bei verschiedenen Klappenwinkeln η , jeweils mit und ohne Anregung, $\alpha = 8^\circ$, $St = 1$, $c_\mu = \text{optimiert}$.

4.2.2.3 Einfluß auf die Auftriebspolare

Die Auswirkungen der periodischen Anregung auf das Gesamt-Auftriebsverhalten der Hochauftriebs-Konfiguration lassen sich am besten im Polaren-Diagramm in Bild 4.14 erkennen. Hierbei ist der Anstellwinkel des Hauptflügels mit $\alpha = 8^\circ$ fest eingestellt, der Klappenwinkel η wird variiert. Der Auftriebsbeiwert c_a wird hierbei aus den gemessenen Werten der jeweiligen Druckverteilung ermittelt. Der Fall ohne Anregung ist als gestrichelte Linie eingezeichnet. Nach Einsetzen der Strömungsablösung bei etwa $\eta = 37^\circ$ fällt der erreichbare Auftrieb stark ab. Durch Einbringen einer periodischen Anregung mit der Frequenz $St = 1$ und einer jeweils an den Strömungsfall angepaßten Anregungsintensität kann der Auftrieb bei hohen Anstellwinkeln deutlich verbessert und bis zu wesentlich höheren Anstellwinkeln aufrechterhalten werden. Bei Anstellwinkeln von $\eta < 40^\circ$ kann bei diesen Untersuchungen keine Auftriebserhöhung durch periodische Anregung erzielt werden.

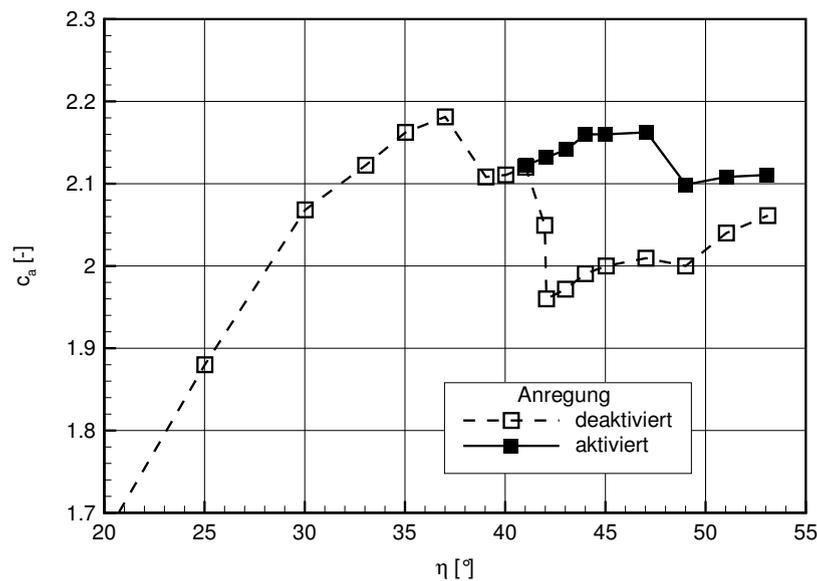


Bild 4.14: Auftriebs-Charakteristik der Hochauftriebskonfiguration für verschiedene Klappenwinkel η (mit/ohne Anregung), $St = 1$, $\alpha = 8^\circ$

4.3 Fazit der Voruntersuchungen

Die Voruntersuchungen zeigen, daß die Umströmung der Hochauftriebskonfiguration bei moderaten Anstellwinkeln als 2-dimensional anzunehmen ist. Man erkennt, daß der Klappenanstellwinkel einen entscheidenden Einfluß auf das Strömungsverhalten hat. Der Anstellwinkel des Hauptflügels ist während der Voruntersuchungen auf einen konstanten Wert von $\alpha = 8^\circ$ eingestellt. Bis zu einem Klappenwinkel von etwa $\eta = 30^\circ$ liegt die Strömung über der Klappe an, um dann mit größer werdendem Anstellwinkel über dem Klappenprofil abzulösen. Die Strömung über dem Hauptflügel ist dabei bei allen Klappenwinkeln, bis auf einen kleinen Bereich in der Nähe der Profilhinterkante, komplett anliegend.

Durch Einbringen von periodischen Störungen durch einen schmalen spannweitenigen Schlitz in unmittelbarer Nähe der Vorderkante des Klappenprofiles gelingt es, die Strömung zum Wiederanlegen zu bringen. Dabei spielt es zunächst keine Rolle, ob die Strömungsanregung durch periodisches Ausblasen (angewandte Methode bei den Versuchen im Wasserkanal) oder aber durch oszillierendes Ausblasen und Einsaugen (Windkanal) erfolgt. In beiden Fällen kann ein Wiederanlegen der abgelösten Strömung über der Klappe erreicht werden.

Bei den Versuchen im Wasserkanal kann dies durch Visualisierung und Vermessung des Strömungsfeldes per Laser-Doppler-Anemometrie eindrucksvoll gezeigt werden. Bei den Versuchen im Windkanal zeigen die Werte der Druckverteilungsmessung und der daraus bestimmte Auftriebsbeiwert ähnliche Ergebnisse.

Als Anregemethode für die weiterführenden Hauptuntersuchungen im Windkanal wird die oszillierende Anregung mit Hilfe von Tiefton-Lautsprechern gewählt. Diese läßt sich einfacher in Frequenz und Amplitude regeln und besitzt ein breiteres Einsatzspektrum als die pulsierende Anregung durch gepulste Magnetventile zum Beispiel.

5. Hauptuntersuchungen

Aufgrund der relativ kleinen Meßstrecke des Windkanales bei den Voruntersuchungen kommt es zu einer stark verfälschenden Beeinflussung der Profilmessung bei hohen Anstellwinkeln (siehe Bild 5.1). Daher ist es notwendig, weiterführende Untersuchungen zur aktiven Ablösebeeinflussung an Hochauftriebskonfigurationen in Windkanälen mit ausreichend großem Meßstreckenquerschnitt vorzunehmen. Insbesondere die Höhe der Meßstrecke sollte groß genug sein, um eine Interferenz zwischen Versuchsmodell und Windkanalwänden zu minimieren. Alternativ hierzu ist der Einsatz von 2D-adaptiven Windkanalwänden denkbar. Sämtliche Hauptuntersuchungen in dieser Arbeit finden im „großen Windkanal“ am Hermann-Föttinger-Institut statt, der mit einer Meßstreckenhöhe von 1.4 m für die vorliegenden Untersuchungen ausreichend groß dimensioniert ist.

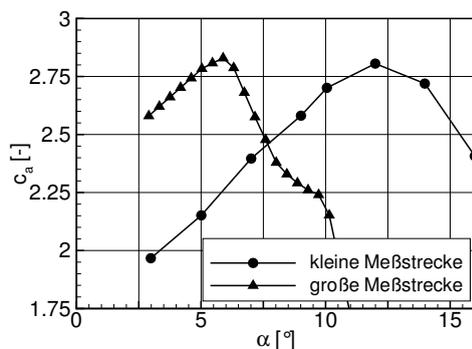


Bild 5.1: Vergleich der Auftriebspolaren der Hochauftriebskonfiguration bei Messungen in verschiedenen Windkanälen, Klappenwinkel konstant $\eta = 35^\circ$. ILR-Kanal mit kleiner Meßstrecke (Versperrung=11.3%), HFI-Kanal mit großer Meßstrecke (Versperrung=4.8%)

5.1 Einströmbedingungen

Um zu überprüfen, ob das Geschwindigkeitsprofil im Einströmquerschnitt der Meßstrecke über die Höhe konstant ist, werden Hitzdrahtmessungen ca. 3 Profiltiefen stromauf der Vorderkante des Hauptprofils durchgeführt. Hierbei wird die Verteilung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit \bar{u} sowie der Geschwindigkeitsfluktuation u' über nahezu die gesamte Kanalhöhe bei drei verschiedenen Klappenanstellwinkeln η vermessen. Die Ergebnisse hierzu sind in Bild 5.2 dargestellt. Man erkennt, daß die mittlere Geschwindigkeit im oberen Bereich der Meßstrecke bereits eine Überhöhung aufweist, was auf den Einfluß des Ver-

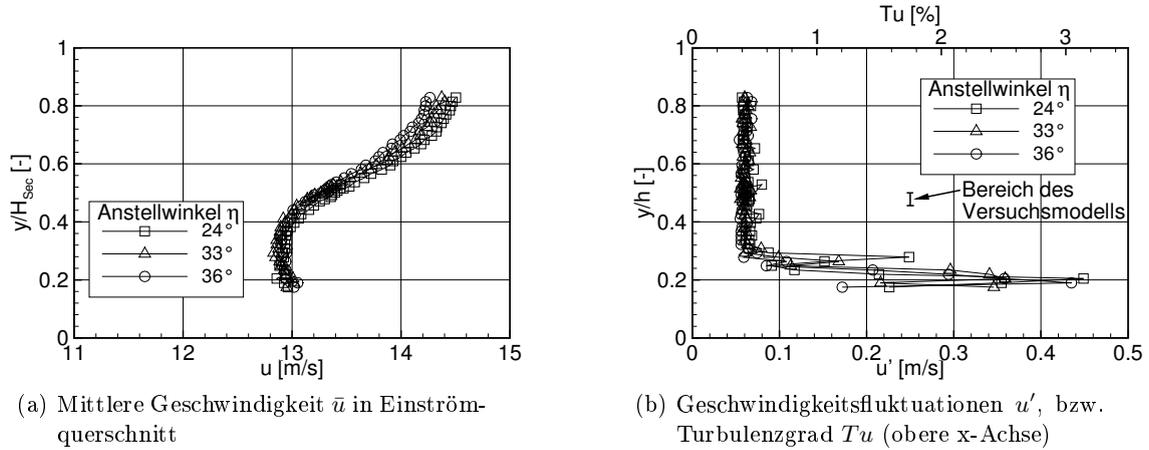
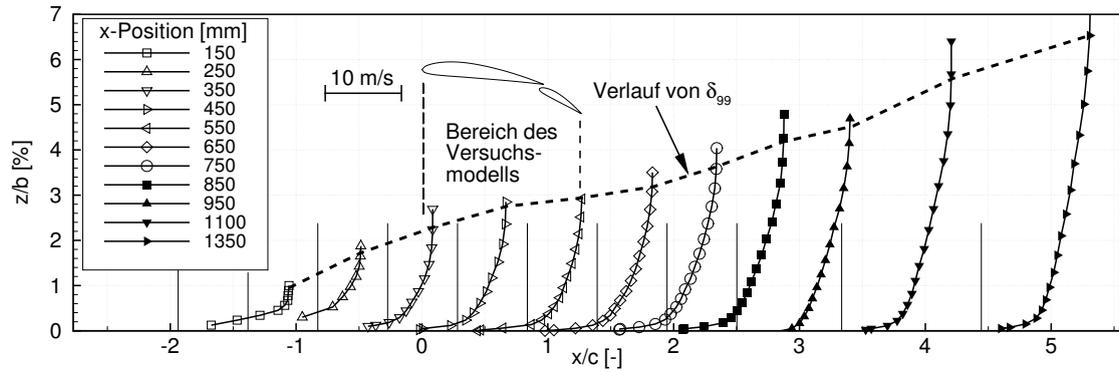
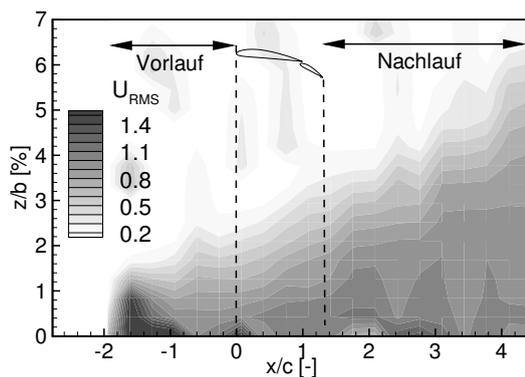


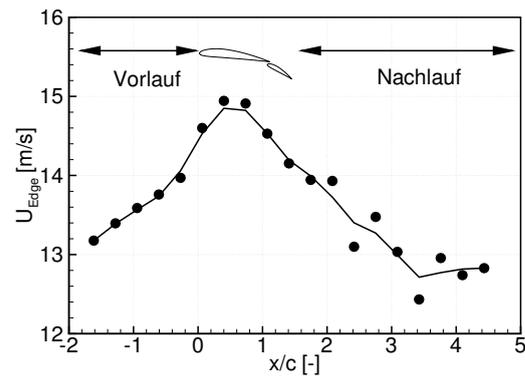
Bild 5.2: Untersuchungen zur Verteilung der Anströmgeschwindigkeit im Einlauf, $H_{Section} = 1.4 \text{ m} = \text{Höhe der Me\ssstrecke}$, $\alpha = 7^\circ$

suchsmodells auf das stromauf liegende Strömungsfeld zurückzuführen ist. Die deutliche Erhöhung der Geschwindigkeitsfluktuationen u' im Bereich von $y/c = 0.2$ sind auf eine in diesem Bereich verstopfte Filtermatte in der Beruhigungskammer zurückzuführen. Diese Filtermatte dient normalerweise zum Herausfiltern von LDA-Tracerpartikeln, die künstlich in die Strömung eingebracht werden. Da dieser Bereich der erhöhten Geschwindigkeitschwankungen weit unterhalb des Versuchsmodells liegt, werden die Untersuchungen fortgeführt, ohne diesen Defekt zuvor zu beheben. Der mittlere Turbulenzgrad der ungestörten Anströmung liegt etwa bei $Tu = 0.5\%$.

Aufgrund der geringen Spannweite ($b = 400 \text{ mm}$) im Vergleich zur Breite der Me\ssstrecke ($B_{section} = 2000 \text{ mm}$) ist das Versuchsmodell zwischen zwei Trennwänden installiert (siehe Kapitel 3.1.3.2). An diesen Trennwänden bildet sich eine Grenzschicht aus, die sich mit zunehmender Lauflänge aufdickt. Durch Hitzdrahtmessungen entlang der Innenseite einer der beiden Trennwände wird überprüft, bis auf welchen Wert die Grenzschichtdicke im Bereich des Versuchsmodells angewachsen ist, um sicherzustellen, daß die Profilmströmung nicht von sehr dicken Seitenwand-Grenzschichten dominiert wird. In Bild 5.3(a) sind die etwa 0.5 Profiltiefen oberhalb des Versuchsmodells gemessenen Grenzschichtprofile an verschiedenen x/c -Positionen dargestellt. Der Koordinatenursprung liegt bei dieser Messung an der Spitze des Versuchsmodells. Zur besseren Orientierung ist das Versuchsmodell an der entsprechenden Position in die Grafik eingezeichnet. Man erkennt, daß die Grenzschichtdicke im Bereich des Versuchsmodells etwa $\delta/b = 3\%$ beträgt ($\delta \approx 10 \text{ mm}$). Daraus resultiert eine Gesamteinengung des ungestörten Strömungsbereiches über dem Modell von 6% der Spannweite. Im weiteren Verlauf nimmt die Grenzschichtdicke zu und erreicht im hinteren Bereich der Trennwand einen Wert von $\delta/b = 7\%$.

(a) u -Grenzschichtprofile entlang der Trennwand, $0.5 \cdot y/c$ oberhalb des Versuchsmodells

(b) Verteilung der RMS-Werte der Geschwindigkeiten innerhalb der Grenzschicht an der Trennwand



(c) Geschwindigkeiten am Grenzschichttrand der Trennwand

Bild 5.3: Grenzschichtmessung auf der Innenseite der Trennwände, die Position des Versuchsmodells ist in den Grafiken gekennzeichnet

In Bild 5.3(b) ist die Verteilung des RMS-Wertes von u innerhalb der Grenzschicht dargestellt. Anhand des Maximums im vorderen Bereich erkennt man den Transitionsbereich der Grenzschicht an der Trennwand. Im Bereich des Versuchsmodells liegt somit eine turbulente Grenzschicht an der Innenseite der Trennwand vor.

Bild 5.3(c) zeigt den Verlauf der Geschwindigkeiten am Grenzschichttrand u_{Edge} entlang der Trennwand. Den Einfluß des Versuchsmodells auf die Geschwindigkeit am Grenzschichttrand erkennt man an der Überhöhung von u_{Edge} im Bereich von $x/c = 0.5$.

5.2 Festlegung der Testfälle

Um einen Überblick über das Verhalten der Strömung unter normalen Bedingungen (ohne Anregung) zu erhalten, wird zunächst die Grundströmung bei verschiedenen Anstellwinkel-Kombinationen untersucht. Im Mittelpunkt der Untersuchung steht hierbei die Festlegung von drei Testfällen, bei denen verschiedene Auftriebsituationen bzw. Ablöseszenarien vorliegen (anliegende, teilabgelöste sowie vollabgelöste Strömung über der Hinterkantenklappe). Hierzu werden zunächst die beiden Anstellwinkel α (Gesamtanstellwinkel des Versuchsmodells) und η (Klappenanstellwinkel) in weiten Grenzen variiert und die jeweilig erreichten Auftriebsbeiwerte mit Hilfe der Windkanalwaage gemessen. Anschließend werden die drei entsprechenden Anstellwinkel-Kombinationen ausgewählt, bei denen sich die oben erwähnten Strömungsbedingungen einstellen.

Die Ergebnisse aus diesen Messungen sind in Bild 5.4 als Polarschar in Form eines Konturplots aufgetragen. Hierbei entspricht jede Farbstufe einem bestimmten Auftriebsbeiwert. An den Rändern des Konturplots sind exemplarisch einige Schnitte durch diese Polarschar dargestellt. Sie repräsentieren die jeweilige Auftriebscharakteristik bei Variation eines

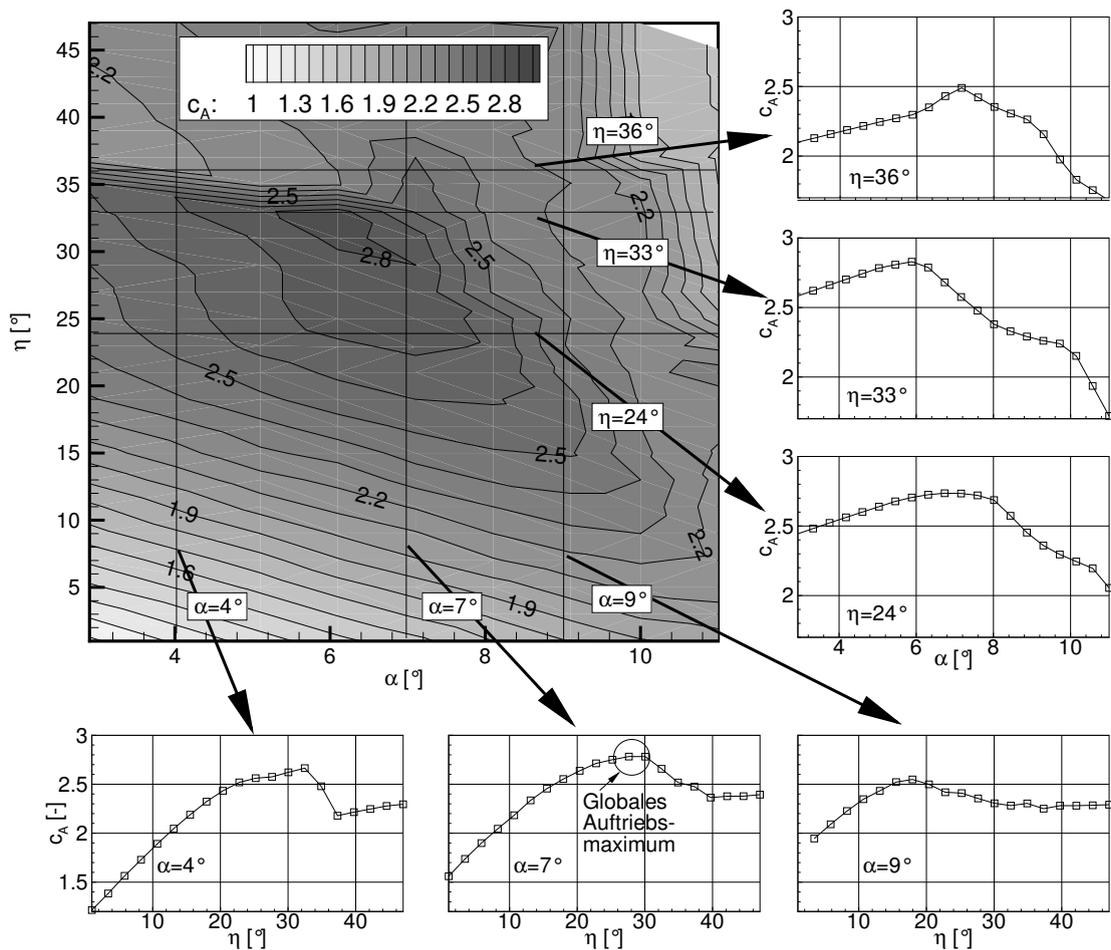


Bild 5.4: Auftriebsbeiwerte bei verschiedenen Anstellwinkeln α und η , exemplarisch sind einige Polaren (c_A über α bzw. η) eingetragen, das Auftriebsmaximum befindet sich ca. bei $\alpha = 7^\circ, \eta = 30^\circ$

der beiden Anstellwinkel, während der entsprechende andere Anstellwinkel konstant gehalten wird. Man erkennt ein globales Auftriebsmaximum von $c_A = 2.8$ (bezogen auf die Hauptflügelfläche) für die Anstellwinkelkombination $\alpha = 7^\circ$ und $\eta = 30^\circ$. Anhand dieser Meßwerte werden drei Konfigurationen als Testfälle ausgewählt, die in folgender Tabelle zusammengestellt sind.

α	η	Kommentar
7°	24°	Anliegende Strömung über dem gesamten Testmodell
7°	33°	Teilabgelöste Strömung über der Hinterkantenklappe
7°	36°	Vollabgelöste Strömung über der Hinterkantenklappe

Für diese drei Testfälle werden zusätzlich die Druckverteilungen an der Profilloberseite von Haupt- und Klappenprofil gemessen (Bild 5.5). Dargestellt ist auf der linken Seite die Auftriebspolare für den Fall $\alpha = 7^\circ$, die drei Testfälle sind hierin mit den Pfeilen (a), (b) und (c) gekennzeichnet. Auf der rechten Bildseite ist die Verteilung der entsprechenden Druckbeiwerte $c_p = \frac{p_i - p_0}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2}$ über die Profiltiefe x/c (c =Profiltiefe des Hauptprofils) dargestellt.

Man erkennt deutlich, daß die Druckverteilung für den Fall $\eta = 24^\circ$ (Bildteil (a)) einer anliegenden Strömung sowohl über dem Haupt- als auch über dem Klappenprofil entspricht. Das Hauptprofil zeigt eine Saugspitze in unmittelbarer Nähe der Profilnase und anschließend einen gewöhnlichen ansteigenden Druckverlauf bis zur Profilhinterkante. Auch auf der Klappe bildet sich eine kleine Saugspitze und eine füllige Druckverteilung aus, was eine ins-

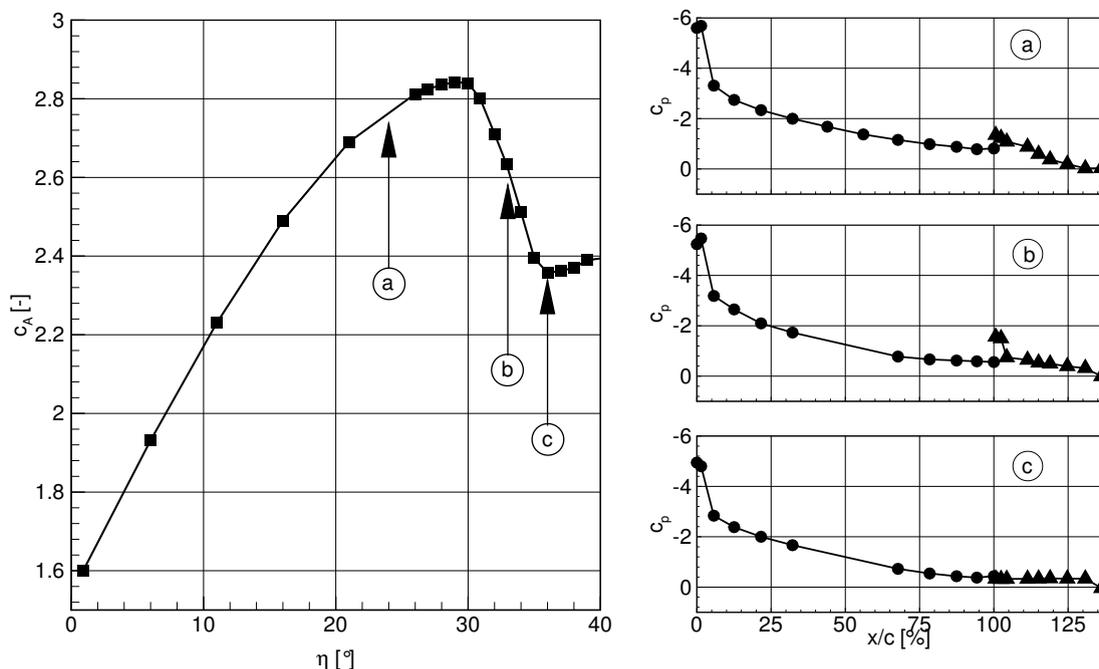


Bild 5.5: Polare für $\alpha = 7^\circ$ inclusive der Druckverteilungen für die drei Testfälle: a) $\eta = 24^\circ$: anliegende Strömung über Haupt- und Klappenprofil, b) $\eta = 33^\circ$: teilweise abgelöste Strömung über der Klappe, c) $\eta = 36^\circ$: vollständig abgelöste Strömung über der Klappe

gesamt anliegende Strömung über der Klappe widerspiegelt. Wird der Klappenwinkel auf $\eta = 33^\circ$ erhöht, so verändert sich primär die Druckverteilung auf der Klappenoberseite. Es bildet sich eine deutliche lokale Saugspitze an der Klappenvorderkante und eine plateauartige, nahezu konstante Druckverteilung stromab davon. Diese Druckverteilung läßt auf Strömungsablösung über der Klappe kurz hinter dem Saugmaximum schließen. Das Unterdruck-Niveau über dem Hauptprofil ist insgesamt niedriger als im zuvor betrachteten Fall, so daß der Gesamtauftrieb c_A bereits deutlich niedriger ist, als im Fall (a). Im Fall (c) ($\eta = 36^\circ$) ist der Druck über dem gesamten Klappenprofil konstant auf einen niedrigen Wert gesunken und entspricht einer typischen Druckverteilung bei Vorderkantenablösung. Auch das Druckniveau über dem Hauptprofil ist weiter abgesunken, so daß sich ein niedrigerer Wert für den Gesamtauftrieb von lediglich $c_A = 2.36$ ergibt.

5.3 Grundströmung

Um eine Vergleichsbasis zu den später durchgeführten Versuchen mit aktiver Strömungsanregung zu haben, werden für die drei zuvor bestimmten Testfälle Strömungsfeldmessungen im Nah- und Fernbereich sowie Nachlaufmessungen durchgeführt. Als Meßverfahren kommt hierbei ein traversierbarer Hitzdraht zum Einsatz, mit dessen Hilfe das Strömungsfeld in einem engen Meßgitter um die Hochauftriebs-Konfiguration herum vermessen wird.

Die späteren Untersuchungen des angeregten Strömungsfeldes konzentrieren sich in erster Linie auf den Fall der komplett abgelösten Strömung (Testfall c). Daher soll an dieser Stelle schwerpunktmäßig die Grundströmung für diesen Testfall dokumentiert werden. Die Messungen werden mit Hilfe eines einfachen Hitzdrahtes durchgeführt, daher sind im folgenden die resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten $c = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ dargestellt.

In Bild 5.6(a) ist die resultierende Geschwindigkeit im Fernfeld um die Hochauftriebskonfiguration für den Testfall c ($\alpha = 7^\circ, \eta = 36^\circ$) aufgetragen. Man erkennt den Bereich der Geschwindigkeitsüberhöhung über dem Hauptprofil sowie das große Nachlaufgebiet hinter der Klappe, das sich über mehrere Profiltiefen stromab erstreckt. Am nahezu horizontalen Verlauf des Nachlaufgebietes erkennt man, daß der Abströmwinkel der Hochauftriebskonfiguration aufgrund der massiven Strömungsablösung über der Klappe sehr klein ist. Im Gegensatz dazu steht das Strömungsfeld für den Testfall a der anliegenden Strömung bei $\alpha = 8^\circ$ und $\eta = 24^\circ$. Das Nachlaufgebiet ist deutlich schwächer ausgeprägt und ein negativer Abströmwinkel ist zu erkennen. Aufgrund der komplett anliegenden Strömung ist der Einfluß des Versuchsmodells auf das gesamte Strömungsfeld stärker als für den Fall der abgelösten Strömung. Dies ist zu erkennen am deutlich größeren Gebiet der Übergeschwindigkeit oberhalb des Hauptprofils.

In Bild 5.7 ist auf der linken Seite das per Hitzdraht-Anemometrie vermessene Strömungsfeld unmittelbar über der Hinterkantenklappe aufgetragen. Deutlich erkennbar ist der Bereich der hohen Strömungsgeschwindigkeiten im abgelösten Strahl, der durch den Spalt zwischen Hauptprofil und Hinterkantenklappe gebildet wird. Dieser Klappenspalt-Strahl

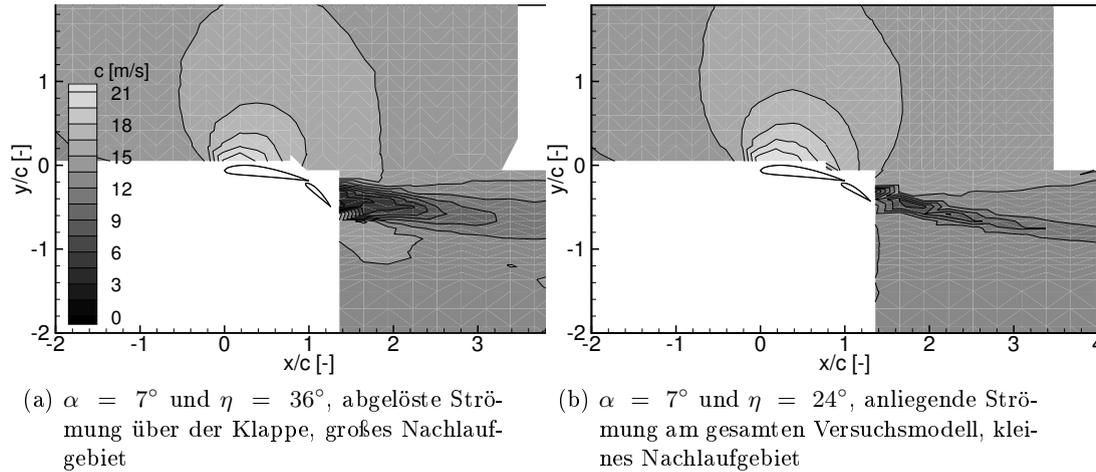


Bild 5.6: Resultierende Geschwindigkeit c im Fernfeld der Strömung um das Testmodell bei verschiedenen Klappenwinkeln

löst bei der gewählten Anstellwinkel-Konfiguration in unmittelbarer Nähe der Klappen-Vorderkante ab und bildet ein Rezirkulationsgebiet über der Profilkontur der Klappe.

Für die periodische Anregung der abgelösten Strömung zur Erhöhung der Durchmischung in der Scherschicht ist es notwendig, in der Strömung vorhandene Wirbelstrukturen in ihrer Frequenz zu kennen. Die Anregung dieser Wirbelstrukturen mit den ihnen eigenen Frequenzen ist eine besonders effektive Art, diese Strukturen zu verstärken und dadurch ein Wiederanlegen der bereits abgelösten Strömung zu provozieren. Um eine Information über die in dem abgelösten Strömungsfeld vorhandenen Wirbelstrukturen zu erhalten, wird eine Frequenzanalyse der Hitzdrahtsignale durchgeführt. Entlang von zwei exemplarischen Schnitten durch das Strömungsfeld sind die Frequenzspektren der Geschwindigkeitsschwankungen aufgetragen. Hierbei handelt es sich zum einen um einen Schnitt entlang einer Iso-tachen im unteren Bereich der abgelösten Scherschicht über dem Klappenprofil (ⓕ-Ⓛ). Der zweite Schnitt erfolgt in etwa senkrecht dazu im Bereich der am stärksten ausgeprägten Geschwindigkeitsschwankungen (ⓐ-ⓔ).

Man erkennt, daß sich in der Scherschicht zwischen abgelöstem Klappenspaltstrahl und darunterliegendem Rezirkulationsgebiet Frequenzen herausbilden, die in etwa im Bereich zwischen 50 und 300 Hz liegen. Dabei handelt es sich um die Durchgangsfrequenz der Wirbel, die sich in der Scherschicht ausbilden. Dieses Frequenzband verschiebt sich mit zunehmender Lauflänge hin zu niedrigeren Frequenzen. Dies erklärt sich durch Wirbelpaarung und Verschmelzung der Strukturen.

In den Frequenzspektren der senkrechten Schnittebene ist zu erkennen, daß die periodischen Strukturen im unteren Bereich der Scherschicht am deutlichsten ausgeprägt sind. Sie lassen sich jedoch ebenfalls im oberen Bereich (zwischen Strahl und Nachlauf des Hauptprofils) eindeutig nachweisen. Am untersten Rand der Scherschicht und insbesondere im Rezirkulationsgebiet treten diese Frequenzen jedoch nicht mehr auf. In diesem Gebiet er-

folgt eine starke Verschiebung des Frequenzspektrums hin zu extrem niedrigen Frequenzen im Bereich $F < 50$ Hz.

Um den Impulsaustausch zwischen der energiereichen, abgelösten Strahl-Strömung und dem Rezirkulationsgebiet zu erhöhen, sollen in erster Linie die Wirbelstrukturen in der Scherschicht zwischen Strahl und Ablösegebiet über der Klappe angeregt werden. Der Frequenzbereich der periodischen Anregung konzentriert sich daher in den folgenden Untersuchungen primär auf den Bereich zwischen 50 Hz und 300 Hz.

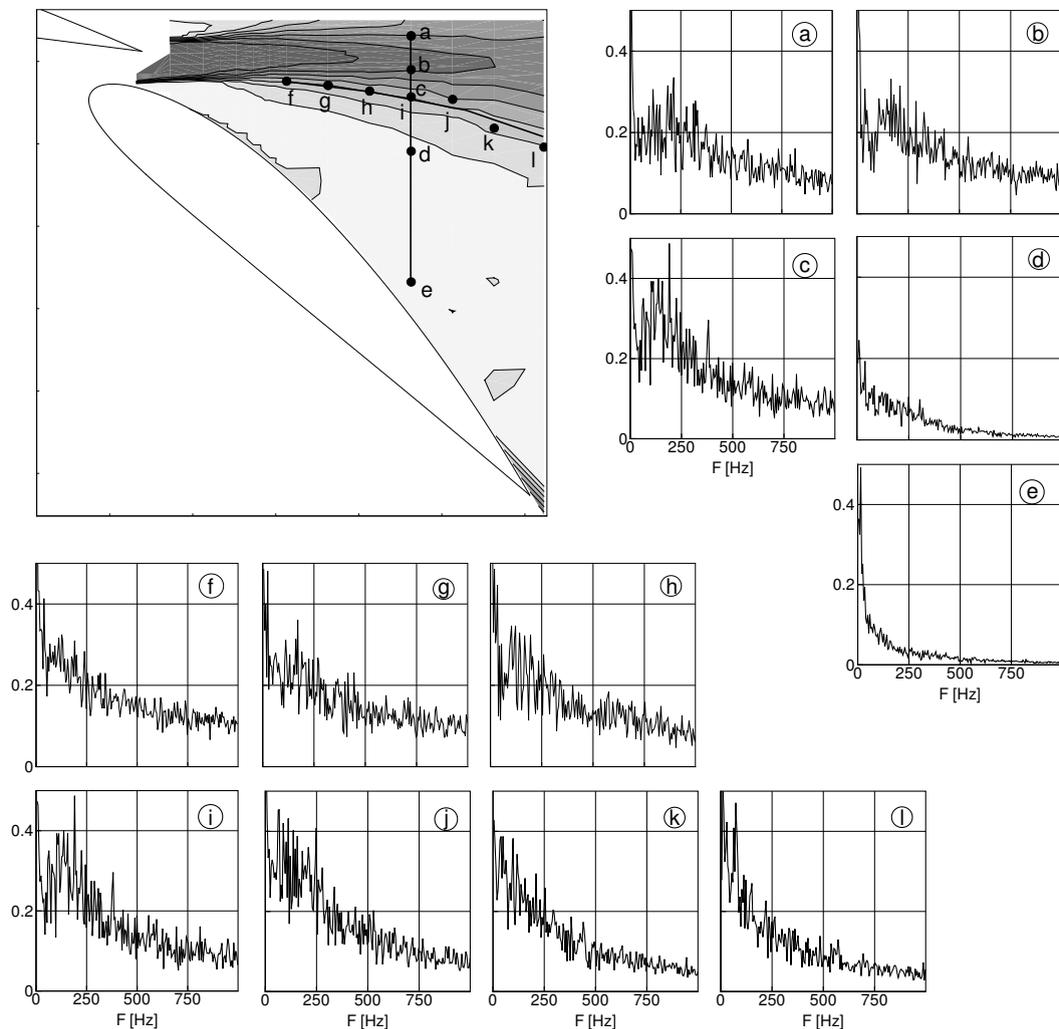


Bild 5.7: Resultierende Geschwindigkeit c im Nahfeld über der Hinterkantenklappe und einige exemplarische Frequenzspektren der Geschwindigkeitsschwankung, (a)-(e): entlang eines senkrechten Schnittes, (f)-(l): entlang einer Isotachen

5.4 Angeregte Strömung

Die Voruntersuchungen haben bereits gezeigt, daß die abgelöste Strömung um die Hochauftriebs-Konfiguration durch periodisches Ausblasen und Einsaugen über den Schlitz auf der Hinterkantenklappe derart beeinflusst wird, daß es zu einem Wiederanlegen der Strömung und damit zu einer Steigerung des erreichbaren Auftriebsbeiwertes kommen kann. Hierbei ist zunächst von Interesse, in welchem Bereich der Anregfrequenz (St) und -intensität (c_μ) Auftriebssteigerungen zu erreichen sind. Dazu wird eine Variation der beiden Anregeparameter für alle drei oben beschriebenen Testfälle durchgeführt.

Aus dem ermittelten Parameterfeld wird eine geeignete Kombination aus Anregfrequenz und -intensität ausgewählt, um anschließend detaillierte Untersuchungen der Reaktion des Strömungsfeldes auf die Anregung durchführen zu können. Dabei werden sowohl Untersuchungen zur Auswirkung der Anregung auf das lokale Strömungsfeld in unmittelbarer Umgebung des Anregeschlitzes als auch zeitgemittelte Messungen im Bereich über der Klappe durchgeführt. Desweiteren kann eine zeitaufgelöste, phasengemittelte Strömungsfeldmessung im Bereich über der Hinterkantenklappe Auskunft geben über das instationäre Verhalten der Strömung im Falle der periodischen Anregung. Auch diese Messungen werden mit Hilfe eines traversierbaren Hitzdrahtes durchgeführt.

Um einen abschließenden Überblick über die Gesamtmöglichkeiten zur Auftriebssteigerung durch periodische Strömungsanregung zu erhalten, werden zusätzlich zu den vermessenen Testfällen weitere Anstellwinkelkombinationen auf Möglichkeit zur Beeinflussung des Auftriebsverhaltens hin untersucht.

5.4.1 Variation der Anregeparameter

In den hier beschriebenen Versuchen wird untersucht, inwieweit sich das Strömungsfeld bei den drei Testfällen durch periodische Strömungs-Anregung beeinflussen läßt. Zu diesem Zweck werden zunächst sowohl Anregeintensität c_μ als auch die Frequenz St für alle drei Testfälle in weiten Grenzen variiert. Die Bestimmung des Auftriebsbeiwertes c_A für jeden Anregefall läßt dessen Wirksamkeit erkennen. Dabei wird der jeweilige c_A -Wert auf c_{A0} (Auftriebsbeiwert ohne Anregung) normiert aufgetragen.

Aus den Experimenten zur Grundströmung ist bekannt, daß in der Scherschicht Wirbel-frequenzen in einem Frequenzband zwischen 50 - 300 Hz vorhanden sind. Daher erfolgt die Anregung der abgelösten Strömung durch periodisches Ausblasen und Absaugen mit einer Mono-Frequenz innerhalb dieser Grenzen.

Für den ersten Testfall der anliegenden Strömung ($\eta = 24^\circ$) konnte bei keiner der untersuchten Frequenzen und Anregeintensitäten eine signifikante Auftriebssteigerung durch periodische Anregung festgestellt werden. Dies ist auch insofern verständlich, da sich bei diesem Testfall noch keine abgelöste Scherschicht gebildet hat, die sich durch die Einbringung von periodischen Störungen beeinflussen läßt. Daher ist in Bild 5.8(a) der Verlauf des Auftriebsbeiwertes über der Anregeintensität lediglich exemplarisch für eine feste An-

refrequenz ($St = 0.5 \hat{=} F = 100$ Hz) dargestellt. Man erkennt hier deutlich, daß der Auftriebsbeiwert der Grundströmung bei $c_\mu = 0$ durch Einbringen der periodischen Anregung mit steigender Anregeintensität nicht weiter erhöht werden kann. Auch bei Anregefrequenzen ungleich $St = 0.5$ ist kein Einfluß auf den Auftriebsbeiwert erkennbar, so daß auf die Darstellung dieser Ergebnisse hier verzichtet wird.

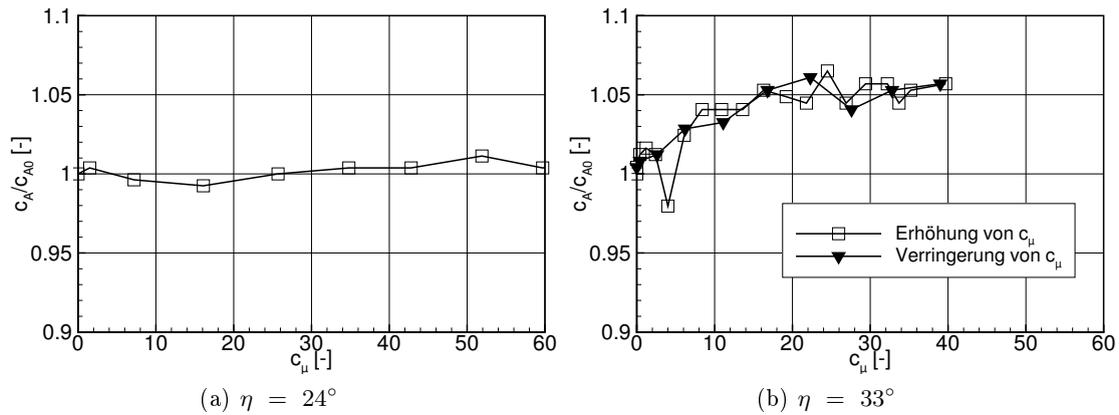


Bild 5.8: Steigerung des Auftriebsbeiwertes c_A im Verhältnis zu c_{A0} (ohne Anregung) bei Anregung mit verschiedenen Anregeintensitäten $c_\mu [10^{-5}]$ bei einer festen Anregefrequenz $St = 0.5 (F = 100$ Hz)

Im Bild 5.8(b) ist derselbe Zusammenhang für den zweiten Testfall dargestellt. Der erhöhte Klappenanstellwinkel ($\eta = 33^\circ$) hat eine Strömungsablösung über der Klappe zur Folge, die sich beeinflussen läßt. Durch Aktivierung der periodischen Anregung mit $St = 0.5$ kann der Auftriebsbeiwert gesteigert werden. Eine Erhöhung der Anregeintensität resultiert in einer Steigerung des erreichbaren c_A -Wertes. Dabei kommt es bei Erreichen eines Schwellwertes zu einer Sättigung, d.h. der Auftrieb kann durch weitere Steigerung der Anregeintensität nicht weiter erhöht werden. Bei Reduzierung von c_μ (\blacktriangledown -Markierungen) erfolgt der Rückgang auf den ursprünglichen Auftriebsbeiwert, ohne daß es dabei zu einem Hystereseverhalten (d.h. zu einer Abweichung im Auftriebsverhalten zwischen Erhöhung und Verringerung der Anregeintensität c_μ) kommt.

Für den dritten Testfall der vollständig abgelösten Strömung bei einem Klappenwinkel von $\eta = 36^\circ$ sind die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluß der Anregeparameter in Bild 5.9 aufgetragen. Die Variation der Anregefrequenz ($0.25 < St < 1.5$) wird in den Teil-Diagrammen a)-d) dargestellt. Man erkennt zunächst deutlich, daß der erreichbare Auftriebsbeiwert bei Überschreiten eines Schwellwertes der Anregeintensität sprunghaft auf einen höheren c_A -Wert ansteigt. Dies bedeutet, daß die zuvor abgelöste Strömung sprunghaft wiederanlegt. Bei nachfolgender Reduzierung der Anregeintensität erfolgt der Rücksprung zum Ausgangswert erst bei wesentlich geringerem c_μ . Diese Hysterese ist typisch für das Wiederanlegeverhalten der Strömung bei allen untersuchten Anregefrequenzen bei dieser Anstellwinkelkonfiguration, ist jedoch bei höheren Anregefrequenzen wesentlich deutlicher ausgeprägt. Die Hysterese folgt aus den völlig unterschiedlichen Anforderungen an die Anregefrequenz je nach Strömungssituation. Um ein Wiederanlegen der Strömung zu erreichen, muß das große Rezirkulationsgebiet beeinflusst werden, daher ist die Erzeugung

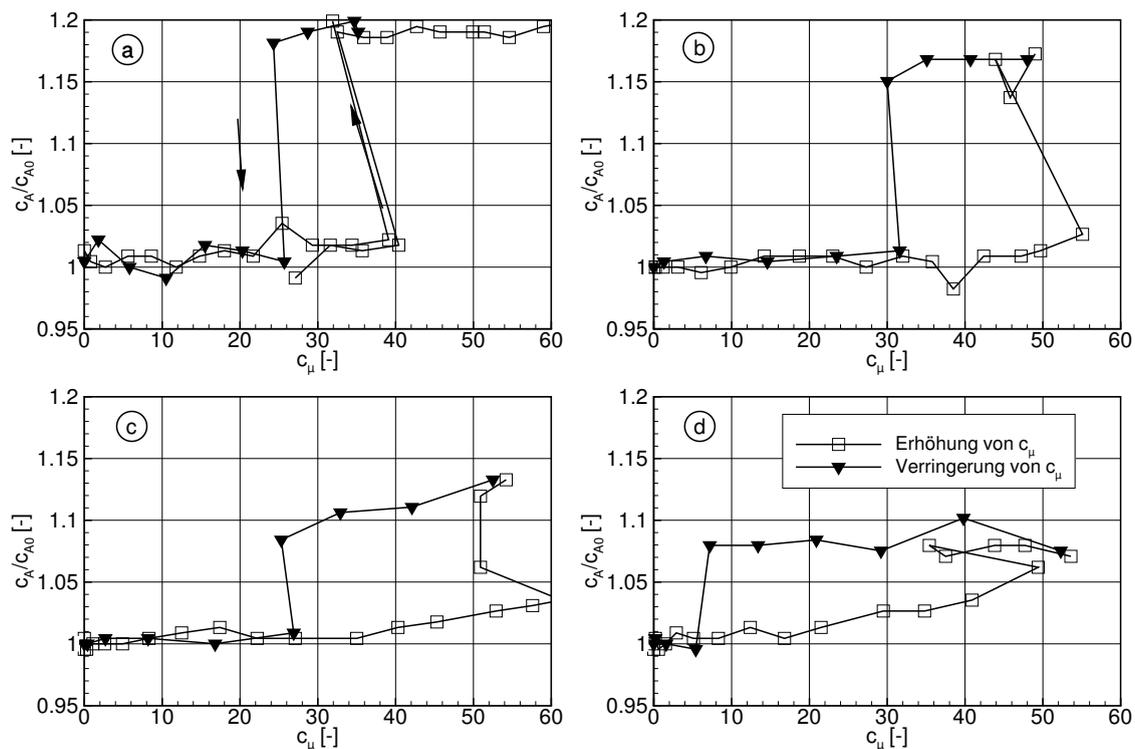


Bild 5.9: Steigerung des Auftriebsbeiwertes c_A im Verhältnis zu c_{A0} (ohne Anregung) bei Anregung mit variierten Anregeintensitäten c_μ [10^{-5}] und bei verschiedenen Anregefrequenzen, $\eta = 36^\circ$, a): $St = 0.26$, b): $St = 0.5$, c): $St = 1.0$, d): $St = 1.5$

von großräumigen Strukturen und damit eine niederfrequente Strömungsanregung effektiv. Eine höherfrequente Anregung (kleine Strukturen) ist geeignet, die Strömung anliegend zu halten, da hier das zu beeinflussende Gebiet kleiner ist.

Der durch periodische Anregung erreichbare c_A -Wert nimmt mit steigender Anregefrequenz ab. Für die weiterführenden Untersuchungen wurde daher eine Frequenz von $St = 0.5$ gewählt.

5.4.2 Einfluß der Anregung auf das Nahfeld

Um den Einfluß der periodischen Anregung auf das Strömungsfeld in direkter Umgebung des Anregeschlitzes zu erfassen, werden einige Messungen unmittelbar am Schlitz durchgeführt. Bild 5.10 oben rechts zeigt die Strömungsgeschwindigkeit an einem festen Punkt kurz über dem Anregeschlitz innerhalb der Grenzschicht der Klappenspaltströmung bei verschiedenen Anregeintensitäten c_μ und konstanter Anregefrequenz $St = 0.5$. Man erkennt das Anwachsen der mittleren Strömungsgeschwindigkeit am Meßpunkt mit steigender Anregeintensität. Dieses Anwachsen ist zum Teil auf die direkte geschwindigkeitserhöhende Wirkung des Anregeschlitz-Strahles zurückzuführen, zu einem weiteren Teil jedoch auch auf die Reaktion des Strömungsfeldes auf die periodische Anregung. An vier exemplarischen Punkten werden hierzu im unteren Bereich der Grafik die Zeitschriebe der Hitzdrahtsonde gezeigt. Für den Fall ohne Anregung in Bild (a) erkennt man ein relativ glattes Signal bei

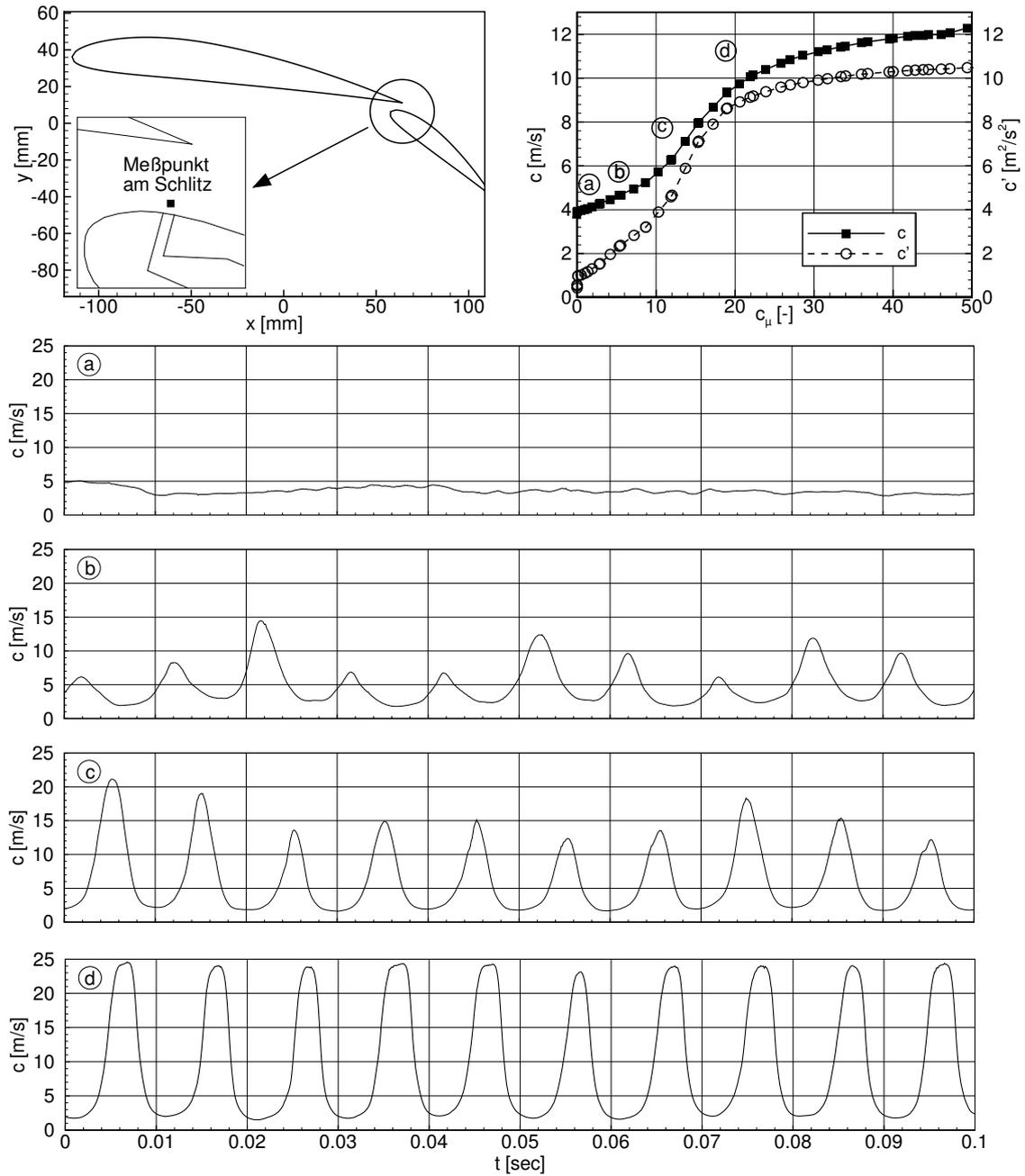


Bild 5.10: Einkoppeln der periodischen Anregung in die Strömung unmittelbar über der Anregeposition, $St = 0.5$

einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von lediglich 4 m/s (unterer Bereich der Grenzschicht). Bei Aktivierung der Anregung mit schwacher Intensität (b) zeigt sich das periodische Anrege-Signal im Zeitschrieb. Allerdings ist die Amplitude des gemessenen Signales sehr unregelmäßig. Dies läßt darauf schließen, daß die Strömung noch nicht gleichmäßig auf das schwache Anregesignal reagiert, daraus resultiert nur ein schwacher Anstieg der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Wird die Intensität gesteigert (c) + (d), so vergrößern sich die Amplituden des Zeitsignales sehr deutlich. Die Strömung reagiert also auf die periodische Anregung mit einem ebenfalls periodischen Verlauf, und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit weist hohe Werte auf. Bei weiterer Steigerung der Anregeintensität findet eine Art Sättigung der Strömungsreaktion statt, sowohl die mittlere Geschwindigkeit als auch der RMS-Wert der gemessenen Geschwindigkeitsschwankungen streben für hohe Werte von c_μ einem Grenzwert entgegen.

In Bild 5.11 ist die Reaktion des Strömungsfeldes im Nahbereich um den Anregeschlitz auf das Anregesignal dargestellt. Hierzu werden an mehreren Positionen unmittelbar über dem Schlitz die Zeitschriebe der Hitzdrahtsonde ausgewertet. Die mittlere Geschwindigkeit c sowie die Schwankungsgröße c' sind in der oberen rechten Grafik über der x-Koordinate aufgetragen. Man erkennt, daß die Geschwindigkeitsschwankungen c' bis zur Anregeposition zunächst kontinuierlich ansteigen, um danach relativ schnell wieder abzunehmen. Auch für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit c ergibt sich ein relatives Maximum an der Position des Anregeschlitzes. An vier ausgewählten x-Positionen sind im unteren Bereich des Bildes die Zeitschriebe des Hitzdrahtsignals sowie des Referenz-Drucksensors im Anregesystem dargestellt. In Teilbild (a) erkennt man deutlich, daß die Strömung bereits stromauf der Anregeposition auf die periodische Anregung reagiert. Die Strömungsgeschwindigkeit zeigt den gleichen zeitlichen Verlauf wie das Referenzsignal der Anregung, die maximalen Amplituden sind jedoch leicht ungleichmäßig. Dabei ist ein Phasenversatz zwischen den beiden Signalen zu erkennen. Im Bereich des Anregeschlitzes (Teilbild (b)) ist das Zeitsignal des Hitzdrahtsensors sehr gleichmäßig, entspricht jedoch von der Charakteristik her nicht dem sinusförmigen Verlauf des Anregesignales. Vielmehr ähnelt es einem Rechtecksignal mit in etwa gleichlangen Phasen niedriger und hoher Strömungsgeschwindigkeit. Dies zeigt deutlich, daß das Strömungsverhalten keinesfalls direkt mit dem Anregesignal gekoppelt ist. Betrachtet man das Zeitsignal der Geschwindigkeit weiter stromab Bild (c), so verstärkt sich die Rechteck-Charakteristik weiter. Es bildet sich ein plateauartiges Verhalten der Geschwindigkeit während der Ausblase-Phase hervor. An den Rändern dieses Plateaus zeigen sich weitere kleine Peaks im Zeitsignal, die auf die Ausbildung höherfrequenter Oberschwingungen hindeuten. In Bild (d) treten diese Oberschwingungen bereits sehr deutlich hervor. Der Anteil der Phasen mit niedriger Geschwindigkeit wird deutlich geringer. Dies erklärt, warum die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in diesem Bereich höher ist als bei den vorherigen Meßpunkten. Es gilt hierbei zu berücksichtigen, daß die Meßpunkte entlang einer horizontalen Linie über dem Klappenprofil aufgenommen wurden, es wurde also nicht in einem konstanten Abstand zur Profilloberfläche gemessen. Veränderungen der Signal-Charakteristik zwischen den einzelnen Meßpositionen können also auch darauf zurückzuführen sein, daß jede Meßposition in einer „anderen Höhe“ innerhalb der Grenzschicht liegt.

Insgesamt kann man deutlich erkennen, daß die Strömung auf das Einbringen von sinusförmigen, periodischen Störungen mit der Bildung von höherfrequenten Geschwindigkeitsschwankungen reagiert. Dieser Effekt kann durch die Bildung periodischer Wirbelstrukturen erklärt werden, die sich weiter stromab deutlich ausbilden.

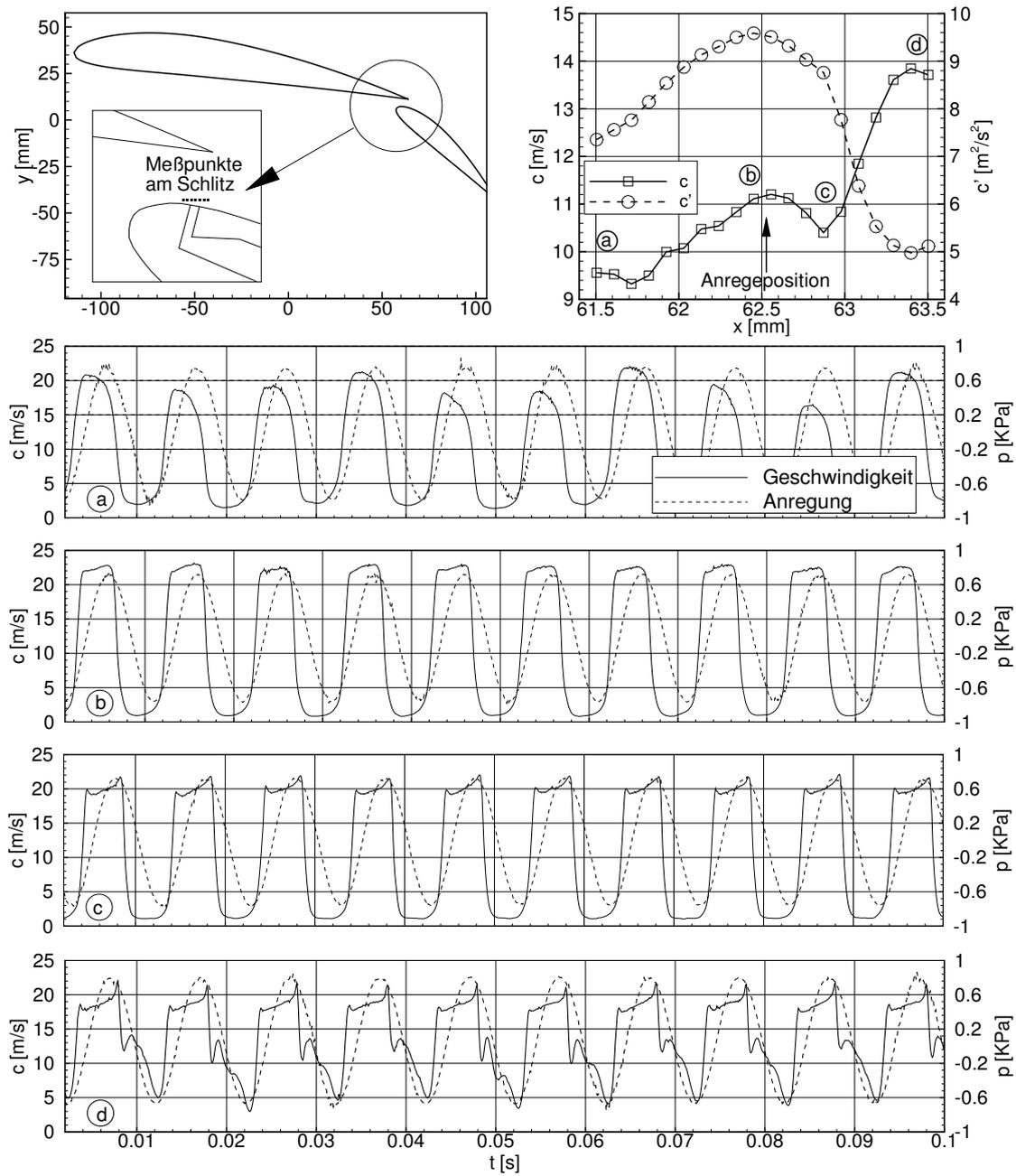


Bild 5.11: Reaktion der Strömung auf das Anregesignal im Nahbereich um den Anregeschlitz, $St = 0.5$, $c_\mu = 25 \cdot 10^{-5}$

5.4.3 Strömungsfeldmessung, zeitlich gemittelt

Um die Auswirkung der periodischen Anregung auf den Strömungsverlauf über der Klappe sichtbar zu machen, werden für den dritten Testfall ($\eta = 36^\circ$) zeitlich gemittelte Hitzdrahtmessungen in einem Raster im Mittelschnitt des Strömungsfeldes über der Hinterkantenklappe bei fester Anregungsfrequenz $St = 0.5$ und unterschiedlichen Anregeintensitäten durchgeführt. Im Bildteil 5.12(a) erkennt man die mittlere Strömungsgeschwindigkeit c für die drei Anregeintensitäten $c_\mu = 0$ (Anregung deaktiviert), $c_\mu = 30 \cdot 10^{-5}$ (schwache Anregung) und $c_\mu = 45 \cdot 10^{-5}$ (starke Anregung). In Teil (b) ist die Schwankungsgröße der Geschwindigkeit c' für die oben genannten Anregefälle dargestellt.

Am Verlauf des Strömungsfeldes erkennt man zunächst, daß die schwache Anregung nicht in der Lage ist, die Strömung zum Wiederanlegen zu bringen. Der Klappenspalt-Strahl wird lediglich etwas aufgeweitet und die gemessenen Geschwindigkeiten im Rezirkulationsgebiet nehmen etwas zu. Die Geschwindigkeitsschwankungen innerhalb der abgelösten Scherschicht sind durch die periodische Anregung deutlich verstärkt. Bei ausreichend starker Anregung mit $c_\mu = 45 \cdot 10^{-5}$ erkennt man, daß der abgelöste Strahl bei Anregung über der Klappe vollständig wiederanlegt. Die Veränderung dieser Strahl-Strömung hat

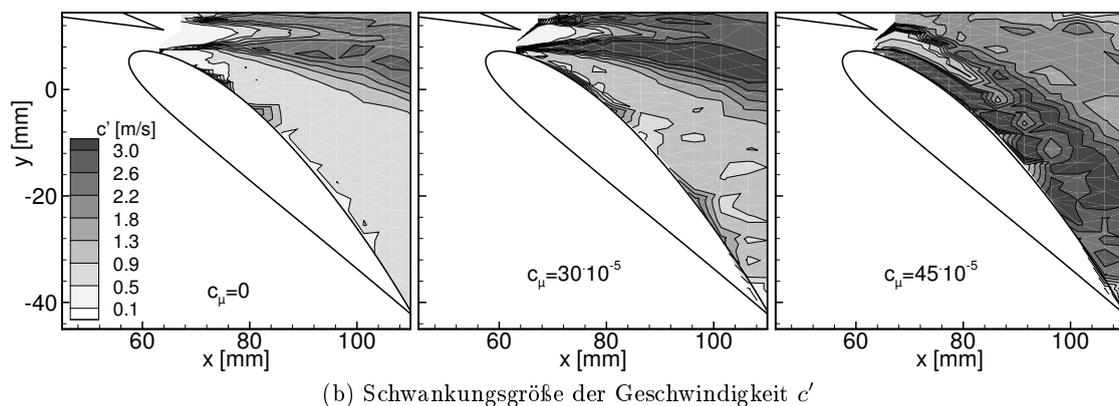
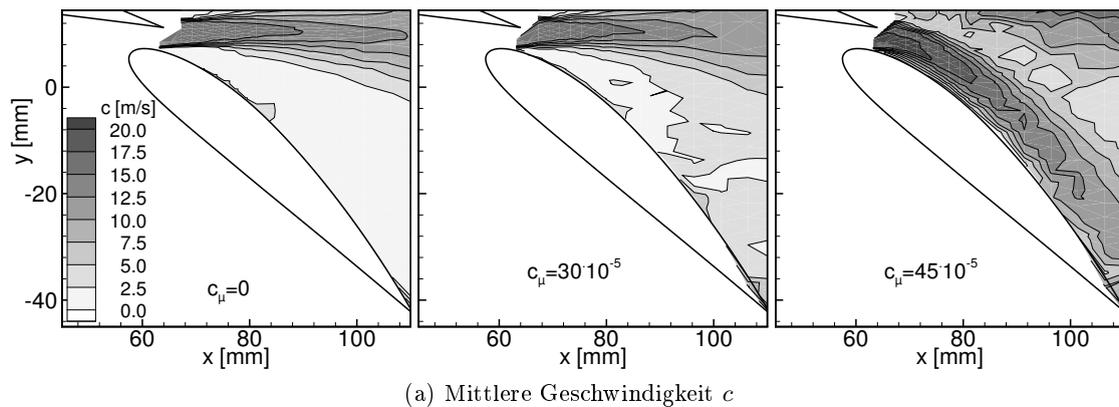


Bild 5.12: Mittleres Strömungsfeld über der Hinterkantenklappe bei einem Klappenwinkel von $\eta = 36^\circ$ bei verschiedenen Anregeamplituden c_μ und fester Frequenz $St = 0.5$, zeitgemittelte Hitzdrahtmessung

eine Modifikation der Gesamtumströmung zur Folge, woraus eine verbesserte Umströmung des Hauptprofils resultiert und hieraus sich die Erhöhung des Auftriebs ergibt.

Das Strömungsverhalten bei sukzessiver Erhöhung der Anregeintensität ist in Bild 5.13 anhand von Geschwindigkeitsprofilen entlang drei exemplarischer Schnitte über der Klappe detailliert dargestellt. Der Grundströmungszustand ist durch die durchgezogene Linie $c_\mu = 0$ wiedergegeben. Bei Aktivierung der Anregung auf einem zunächst noch geringen Niveau ($c_\mu = 12 \cdot 10^{-5}$) kann kaum eine Veränderung des mittleren Geschwindigkeitsprofils festgestellt werden. Jedoch sind die Geschwindigkeitsschwankungen c' in der Scherschicht zwischen Strahl und Rezirkulationsgebiet bereits deutlich erhöht. Wird c_μ weiter erhöht (auf einen Wert von $c_\mu = 30 \cdot 10^{-5}$), so verändert sich das Geschwindigkeitsprofil in der Schnittebene (a): die mittlere Strahl-Geschwindigkeit ist leicht erhöht und die Strahl-Scherschicht ist bereits etwas nach unten aufgedickt. Die Geschwindigkeitsschwankungen in der Scherschicht sowie im Rezirkulationsgebiet sind deutlich höher als im Falle der Grundströmung. Bei Überschreiten des in Bild 5.9 beschriebenen Schwellwertes ($c_\mu = 45 \cdot 10^{-5}$) legt die Strömung über der Klappe an. Dies resultiert in einer dramatischen Veränderung der gemessenen Geschwindigkeitsprofile. Im Zeitmittel ist der Strahl dabei bis zur Hinterkante der Klappe anliegend. Die verbesserte Umströmung des Hauptprofils erkennt man an der erhöhten Geschwindigkeit im Nachlauf des Hauptprofils. Die Geschwindigkeitsschwankungen für diesen Fall der Anregung zeigen ein extrem erhöhtes Niveau sowohl in Profilnähe als auch im Bereich der oberen Scherschicht des Strahls. Diese starken Geschwindigkeitsschwankungen resultieren aus dem instationären Verhalten der angelegten Strömung, wie im nachfolgenden Kapitel gezeigt wird.

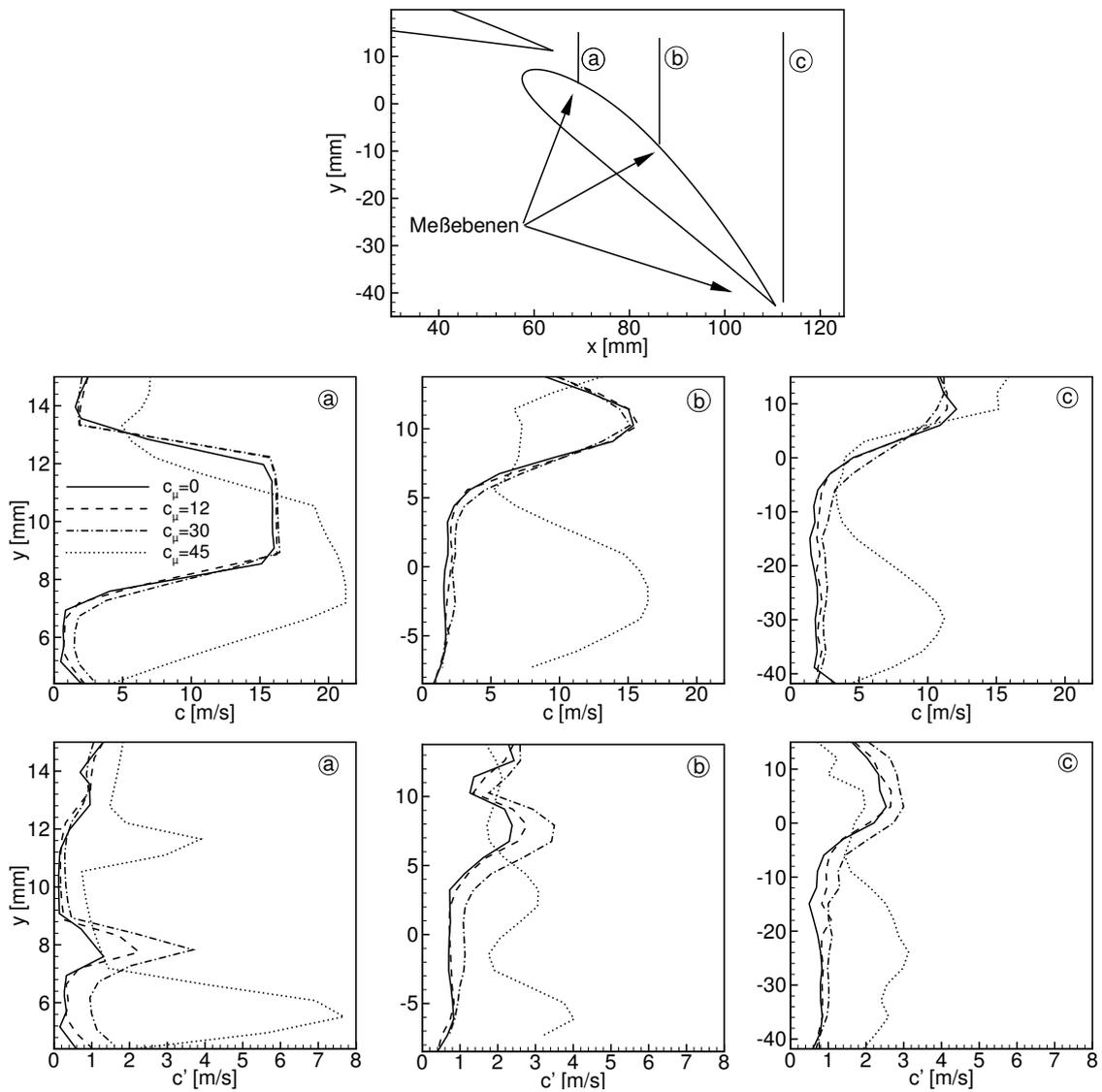


Bild 5.13: Geschwindigkeitsprofile in der Scherschicht entlang drei exemplarischer Schnitte bei verschiedenen Anregeintensitäten $c_\mu [10^{-5}]$, mittlere Reihe: \bar{c} , untere Reihe: c' , zeitgemittelte Hitzdrahtmessung

5.4.4 Strömungsfeldmessung, phasengemittelt

Zur Dokumentation des instationären Verhaltens der angeregten Strömung sind in den Bildern 5.14-5.17 (auf den nächsten Seiten) sowohl die mittlere Geschwindigkeit c als auch die Geschwindigkeitsschwankung $c'(t) = c(t) - \bar{c}$ im Strömungsfeld zu neun verschiedenen Phasenwinkeln Φ der Anregung als Konturplot dargestellt. Alle neun Teilbilder zusammen ergeben eine Periode der Anregung. Die eingezeichneten Pfeile in der Nähe der Klappen-vorderkante symbolisieren die Phase der Anregung, die Länge der Pfeile repräsentiert die Amplitude der momentanen Anregung.

Dargestellt sind wiederum zwei unterschiedliche Anregeintensitäten. Die Bilder 5.14 und 5.15 zeigen das instationäre Strömungsfeld bei einer Anregung mit einer Intensität von $c_\mu = 30 \cdot 10^{-5}$, bei der die Strömung noch nicht zum Wiederanlegen gebracht wird. In der Darstellung der mittleren Geschwindigkeit erkennt man deutlich das periodische Auf- und Abschwngen des abgelösten Klappenspalt-Strahls sowie den Einfluß auf das Rezirkulationsgebiet über der Klappe. Bild 5.15 zeigt deutlich, wie durch die Anregung periodische Strukturen in der abgelösten Scherschicht generiert werden, die sich stromab bewegen. Dabei wechseln sich stets Bereiche höherer Geschwindigkeit mit solchen niedriger Geschwindigkeit ab. Diese periodischen Strukturen können als Wirbel identifiziert werden, die durch die periodische Anregung in der Strömung induziert werden. Diese Wirbel treten paarweise auf und rotieren stets gegensinnig. In Bild 5.15(b) sind diese Wirbel durch Pfeile schematisch angedeutet.

Die Bilder 5.16 und 5.17 zeigen das Verhalten des Strömungsfeldes bei $c_\mu = 45 \cdot 10^{-5}$. Die Strömung ist nun anliegend. Die Darstellung von c in Bild 5.16 zeigt einen über die gesamte Periodendauer der Anregung anliegenden Klappenspalt-Strahl, der sich in Phase mit der Anregung leicht auf und ab bewegt. Insbesondere zum Zeitpunkt der einsetzenden Anregung (Bild 5.16(a)+(b)) bildet sich stromab des Anregepunktes ein Bereich sehr geringer mittlerer Geschwindigkeit. Aus LDA-Messungen während der Vorversuche im Wasserkanal (siehe Kapitel 4.1.3) ist bekannt, daß sich bei dieser Phasenlage ein kleines lokales Rezirkulationsgebiet ausbildet, das von der Strömung nach hinten abtransportiert wird. Wie bereits zuvor beschrieben, erkennt man auch bei dieser Anregeintensität, daß durch die Anregung periodische Wirbel in der Strömung induziert werden, die stromab abschwimmen und dort diffundieren bzw. mit einer Nachbarstruktur verschmelzen (z.B. Bild 5.17(e)).

Insgesamt erkennt man deutlich, daß die wiederangelegte Strömung ein stark instationäres Verhalten aufweist, welches von seiner Phasenlage her starr an die Anregung gekoppelt ist. Bei der gewählten Anregefrequenz überspannen die induzierten Wirbelpaare in etwa die Profillänge der Klappe.

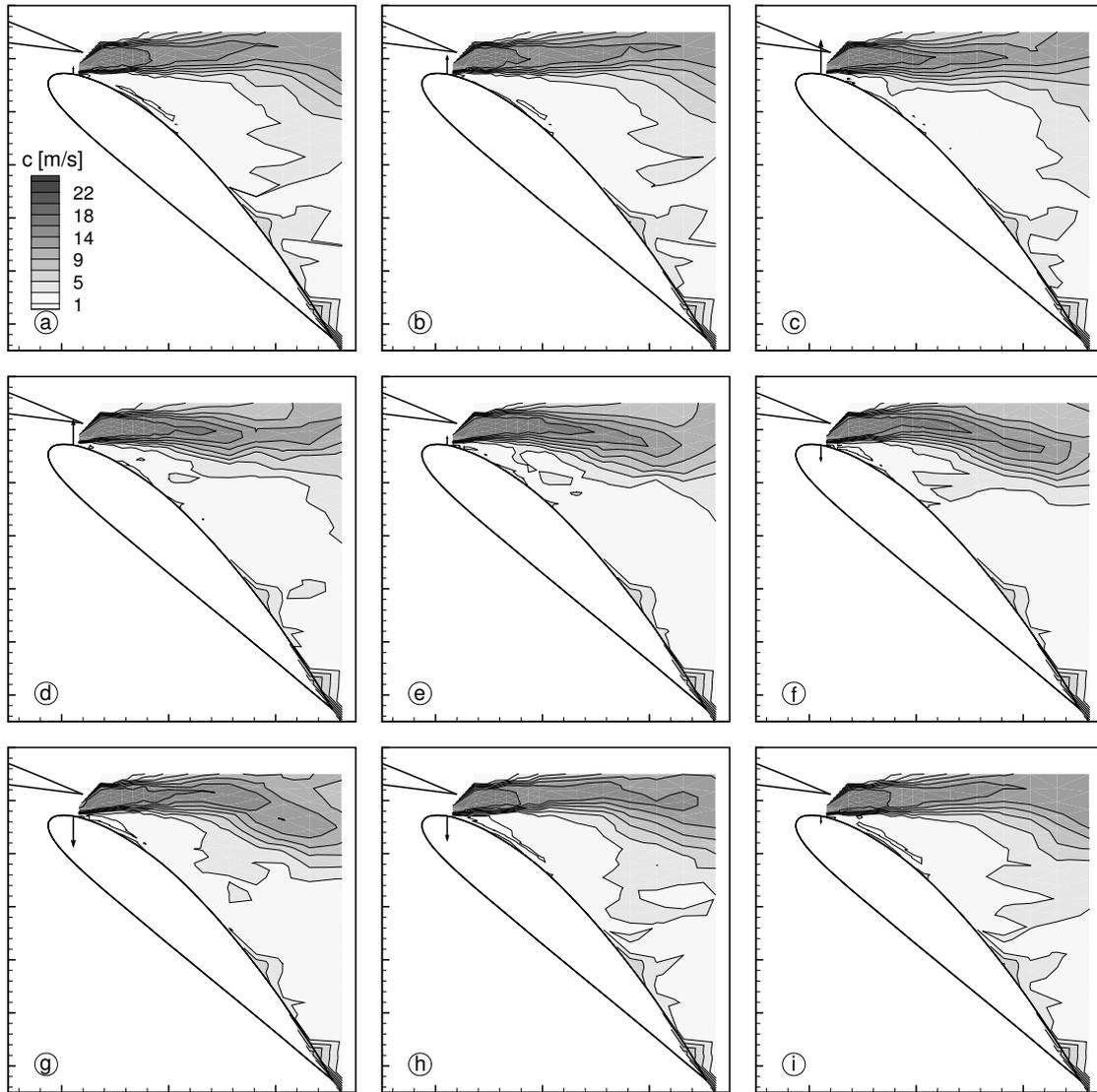


Bild 5.14: Momentanbilder der mittleren Strömungsgeschwindigkeit c des instationären Strömungsfeldes bei Anregung mit $St = 0.5$, $c_\mu = 30 \cdot 10^{-5}$, a): Phasenwinkel $\Phi = 0^\circ$, b): $\Phi = 20^\circ$, c): $\Phi = 90^\circ$, d): $\Phi = 135^\circ$, e): $\Phi = 170^\circ$, f): $\Phi = 205^\circ$, g): $\Phi = 240^\circ$, h): $\Phi = 310^\circ$, i): $\Phi = 340^\circ$, phasengemittelte Hitzdrahtmessung

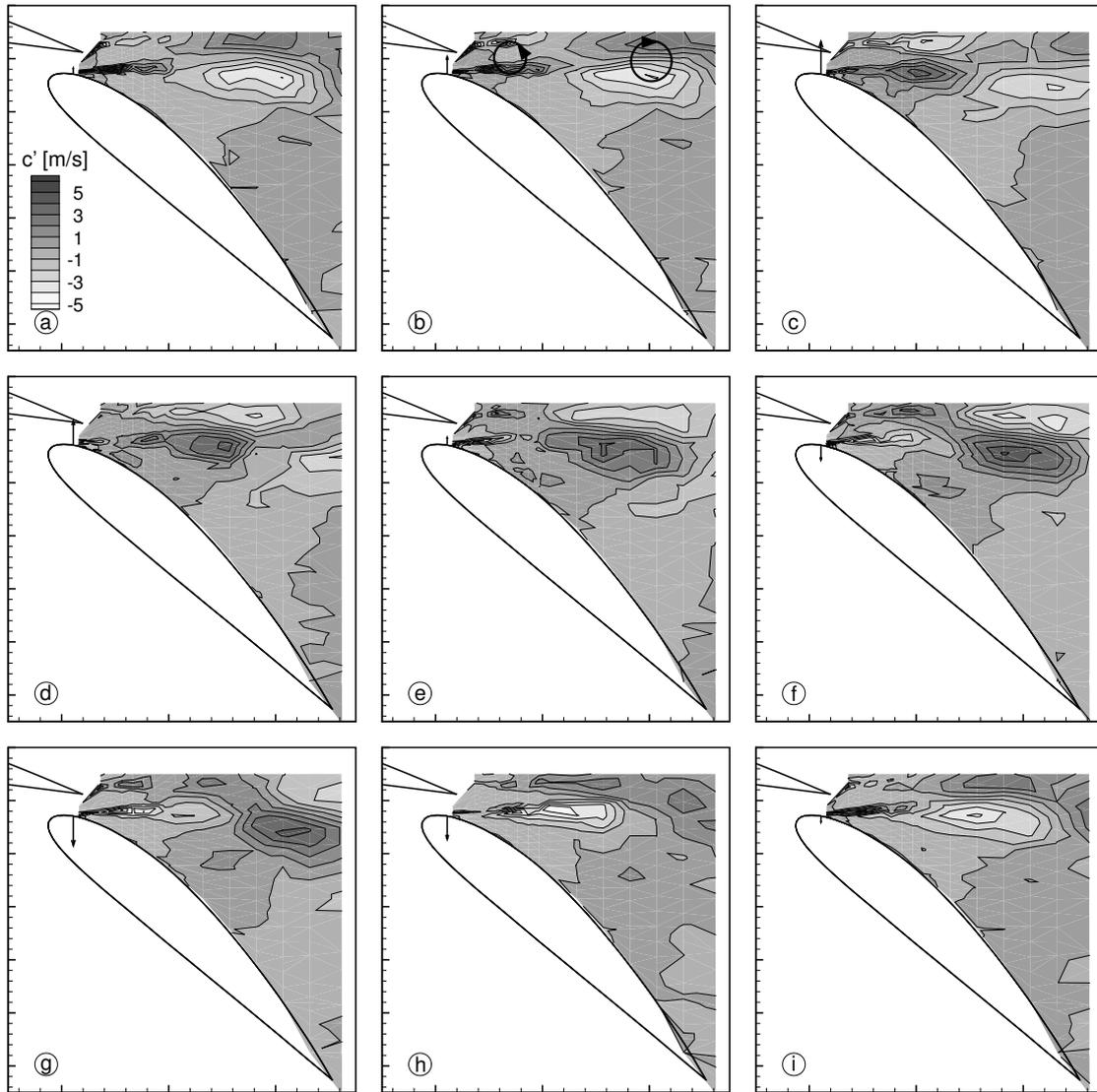


Bild 5.15: Momentanbilder der Schwankungsgeschwindigkeit c' des instationären Strömungsfeldes bei Anregung mit $St = 0.5$, $c_\mu = 30 \cdot 10^{-5}$, a): Phasenwinkel $\Phi = 0^\circ$, b): $\Phi = 20^\circ$, c): $\Phi = 90^\circ$, d): $\Phi = 135^\circ$, e): $\Phi = 170^\circ$, f): $\Phi = 205^\circ$, g): $\Phi = 240^\circ$, h): $\Phi = 310^\circ$, i): $\Phi = 340^\circ$, phasengemittelte Hitzdrahtmessung

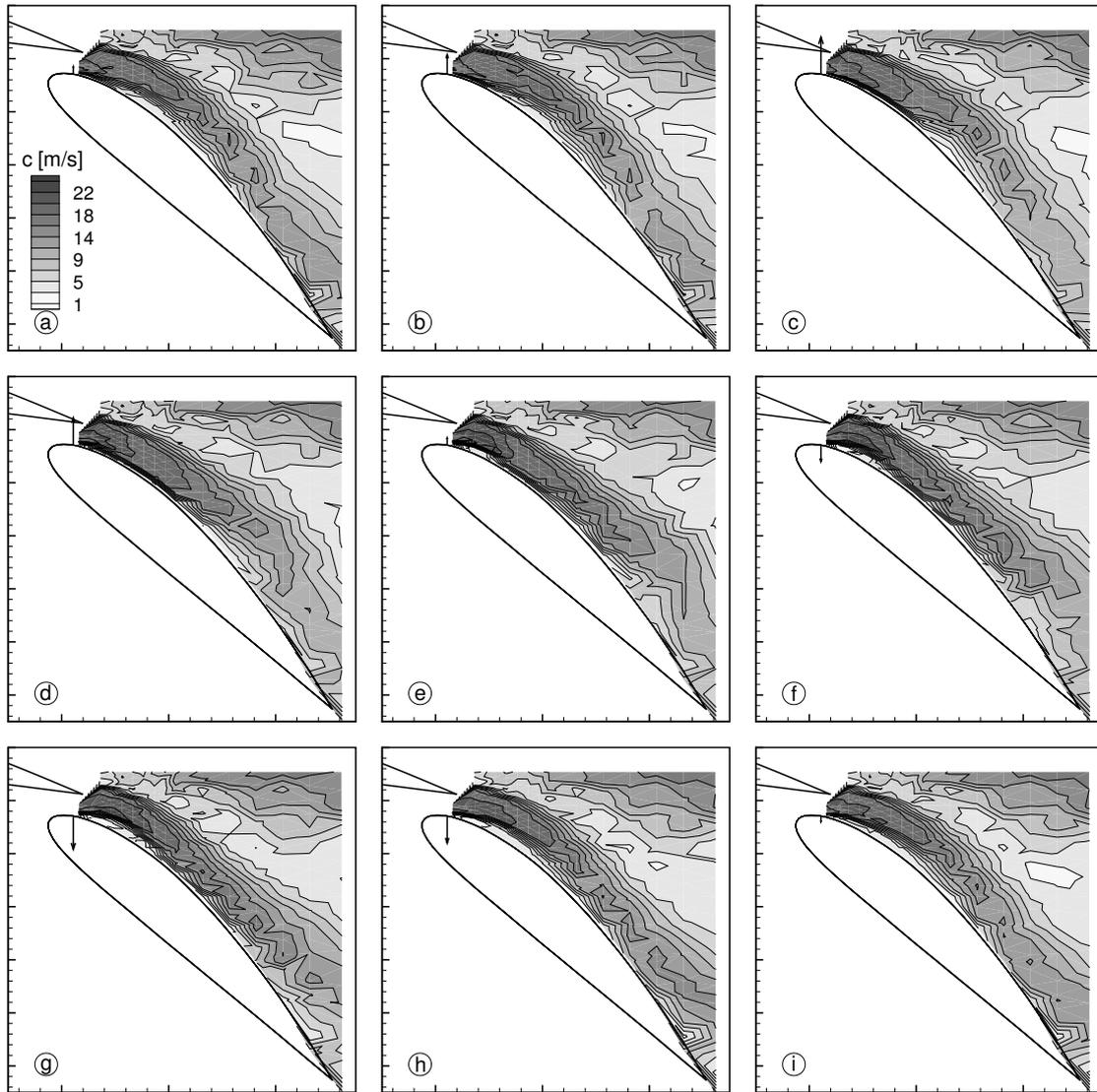


Bild 5.16: Momentanbilder des instationären Strömungsfeldes bei Anregung mit $St = 0.5$, $c_\mu = 45 \cdot 10^{-5}$, mittlere Geschwindigkeit c , a): Phasenwinkel $\Phi = 0^\circ$, b): $\Phi = 20^\circ$, c): $\Phi = 90^\circ$, d): $\Phi = 135^\circ$, e): $\Phi = 170^\circ$, f): $\Phi = 205^\circ$, g): $\Phi = 240^\circ$, h): $\Phi = 310^\circ$, i): $\Phi = 340^\circ$, phasengemittelte Hitzdrahtmessung

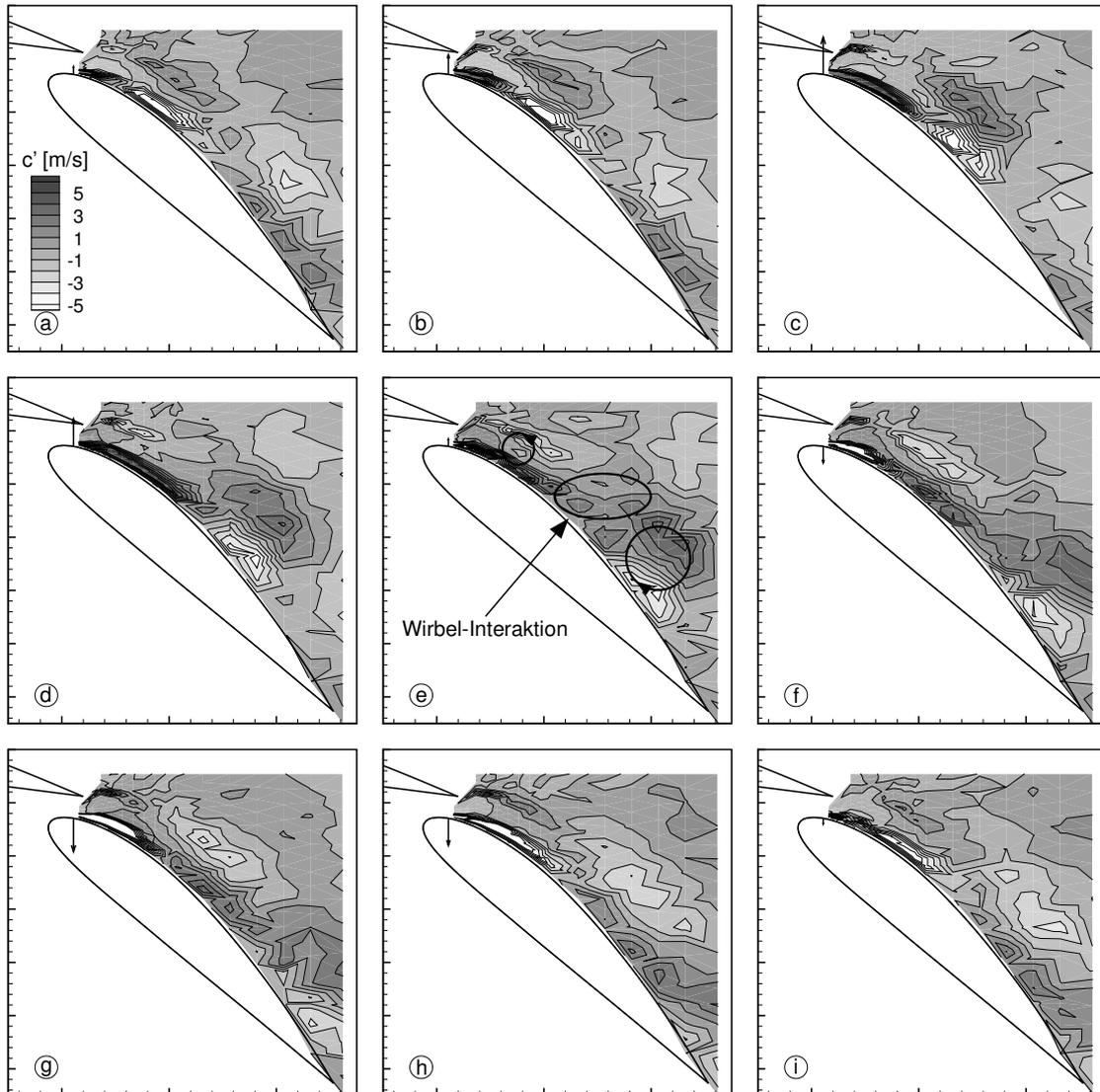


Bild 5.17: Momentanbilder des instationären Strömungsfeldes bei Anregung mit $St = 0.5$, $c_\mu = 45 \cdot 10^{-5}$, Schwankungsgeschwindigkeit c' , a): Phasenwinkel $\Phi = 0^\circ$, b): $\Phi = 20^\circ$, c): $\Phi = 90^\circ$, d): $\Phi = 135^\circ$, e): $\Phi = 170^\circ$, f): $\Phi = 205^\circ$, g): $\Phi = 240^\circ$, h): $\Phi = 310^\circ$, i): $\Phi = 340^\circ$, phasengemittelte Hitzdrahtmessung

5.4.5 Frequenzanalyse des angeregten Strömungsfeldes

Mit Hilfe der Strömungsfelduntersuchung aus dem vorangegangenen Kapitel kann eine Frequenzanalyse der Geschwindigkeitssignale durchgeführt werden. Dadurch ergibt sich an jedem Meßpunkt ein Frequenzspektrum der Geschwindigkeitsschwankungen, das analysiert werden kann. Dabei ist insbesondere die Ausbreitung der eingebrachten Störimpulse im Strömungsfeld bei verschiedenen Anregeintensitäten von Interesse. Hierzu wird an jeder Stelle des untersuchten Strömungsfeldes der jeweilige Wert des Frequenzspektrums bei 100 Hz (Anregfrequenz) als Konturplot dargestellt (siehe Bild 5.18). Man erkennt, daß die eingebrachten periodischen Geschwindigkeitsschwankungen in die abgelöste Scherschicht eindringen und sich darin ausbreiten. Bei schwacher Anregung ($c_\mu = 12 \cdot 10^{-5}$)

ist der Bereich, in dem sich die Anregung ausbreitet, lokal auf die untere Scherschicht zwischen Rezirkulationsgebiet und Klappenspaltstrahl begrenzt. Bei Erhöhung der Anreigintensität breiten sich die periodischen Geschwindigkeitsschwankungen stärker aus und interagieren mit dem Rezirkulationsgebiet. Auch im Gebiet der oberen Scherschicht (zwischen Klappenspaltstrahl und Nachlauf des Hauptflügels) sind große periodische Anteile in der Strömungsgeschwindigkeit zu erkennen. Dies resultiert aus der periodisch veränderten Abströmbedingung für das Hauptprofil durch den oszillierenden Klappenspaltstrahl.

In den exemplarisch dargestellten Frequenzspektren entlang einer Linie der maximalen Ausbreitung der periodischen Störungen am unteren Rand der Grafik erkennt man das Auftreten von Oberschwingungen (Vielfache der Anregfrequenz). Diese können z.T. durch das Meßprinzip des Hitzdrahtes erklärt werden. Da dieser nicht zwischen positiver und negativer Anströmrichtung unterscheiden kann, führt der Durchgang von Wirbelstrukturen mit einer festen Folgefrequenz zu Frequenzverdopplung im Hitzdrahtsignal. Generell ist zu erkennen, daß mit größer werdender Lauflänge die Intensität der kohärenten Frequenzanteile im Frequenzspektrum abnimmt. Dies resultiert aus dem größer werdenden, von der Anregung beeinflussten Bereich, sowie aus der Verschiebung der Frequenzanteile hin zu niedrigeren Werten.

Die nächstgrößere untersuchte Anreigintensität von $c_\mu = 45 \cdot 10^{-5}$ führt zum Wiederanlegen der Strömung (siehe Bild 5.19). Da das Strömungsfeld dadurch im Vergleich zu dem der schwächeren Anreigintensitäten vollkommen verändert wird, ist ein Vergleich der

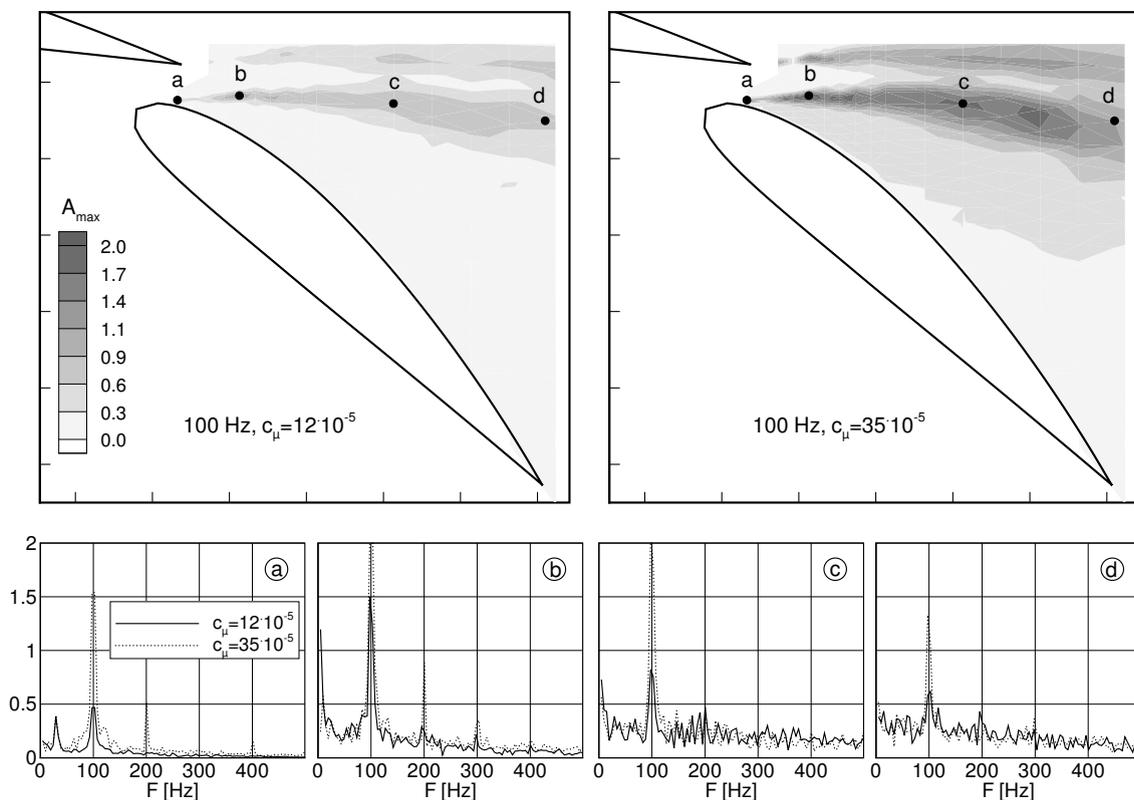


Bild 5.18: Entwicklung der Anregfrequenz $F = 100$ Hz ($St = 0.5$) im Strömungsfeld bei unterschiedlichen Anreigintensitäten c_μ

Frequenzspektren bei dieser hohen Anregeintensität mit den zuvor gezeigten Spektren der schwachen Anregeintensität nicht sinnvoll.

Man erkennt, daß die periodischen Störgeschwindigkeiten primär in der Grenzschicht des wiederangelegten Klappenspaltstrahles auftreten. Die bei den ersten Meßpunkten ① und ② sehr dominanten Peaks der Anrefrequenz im Frequenzspektrum werden weiter stromab stark gedämpft und treten an der Klappenhinterkante kaum noch hervor. Eine weitere Erhöhung der Anregeintensität hat (wie bereits zuvor gezeigt) keine Auswirkung auf das globale Strömungsverhalten. Daher erfolgt an dieser Stelle keine vergleichende Frequenzanalyse dieses Strömungsfeldes.

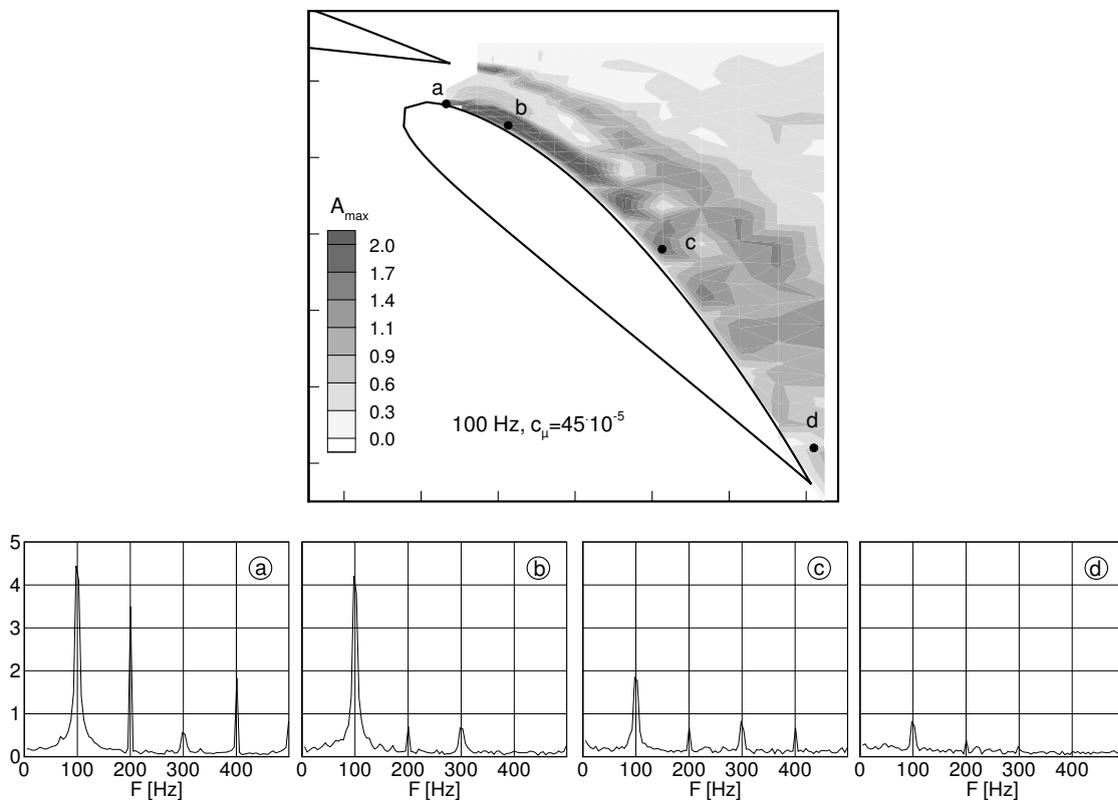


Bild 5.19: Anrefrequenz $F = 100$ Hz ($St = 0.5$) im Strömungsfeld bei hoher Anregeintensität $c_\mu = 45 \cdot 10^{-5}$

5.4.6 Einfluß der Anregung auf die Auftriebspolaren

Um den Einfluß der periodischen Anregung auf die Strömungsanregung auch bei anderen Anstellwinkel-Konfigurationen als den festgelegten Testfällen zu untersuchen, werden Auftriebspolaren unter Variation des Klappenwinkels η bei unterschiedlichen Anstellwinkeln α jeweils mit und ohne Anregung aufgenommen. Die Anregeparameter wurden dabei konstant gehalten ($St = 0.5$, $c_\mu = 45 \cdot 10^{-5}$). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Bild 5.20 dargestellt. Man erkennt in allen gemessenen Polaren, daß insbesondere der Auftrieb im „post-stall“ Bereich der Polaren durch die periodische Anregung stark verbessert werden kann. Der erreichbare Auftriebsbeiwert kann hier um bis zu 20% gesteigert werden und erreicht dabei stets mindestens den $c_{A,max}$ -Wert der Polaren ohne Anregung. Damit

wird der Maximal-Auftrieb um ca. $\Delta\alpha = 4^\circ$ hin zu höheren Anstellwinkeln verschoben. Bei Anstellwinkeln $\alpha \geq 8^\circ$ kann keine signifikante Verbesserung der Auftriebspolaren durch periodische Anregung erzielt werden. Bei diesen Anstellwinkeln löst die Strömung bereits auf dem Hauptprofil ab, und der Auftrieb bricht daher bereits bei niedrigen Klappenwinkeln zusammen. Diese Strömungsablösung kann durch eine Anregung auf dem Klappenprofil nicht mehr beeinflusst werden und der Auftriebsgewinn durch Anregung ist bei diesen Anstellwinkeln vernachlässigbar klein.

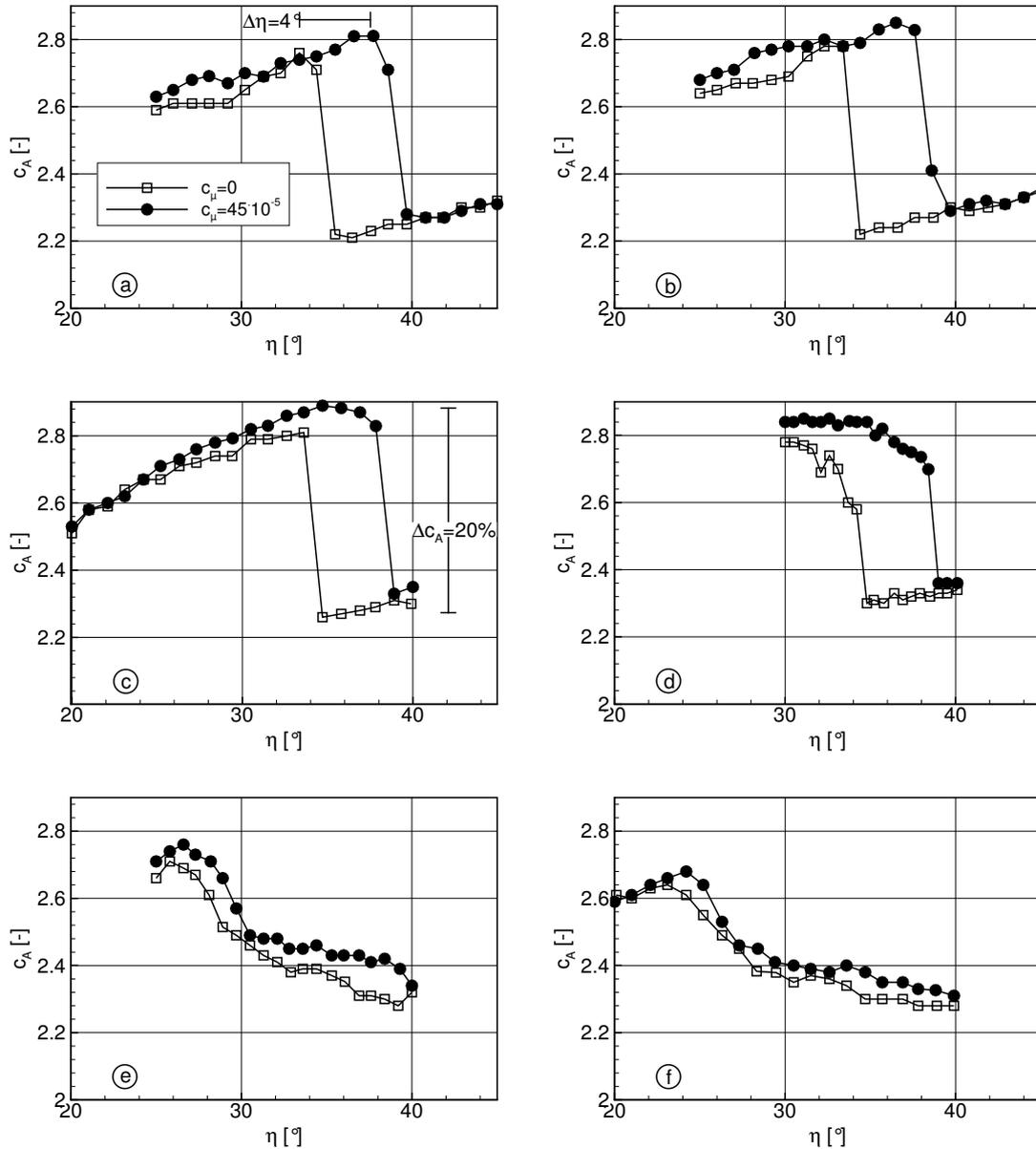


Bild 5.20: Auftriebsbeiwert für verschiedene Klappenwinkel η und Anstellwinkel α , mit (●)/ohne (□) Anregung ($St = 0.5$, $c_\mu = 45 \cdot 10^{-5}$), a): $\alpha = 5.5^\circ$, b): $\alpha = 6^\circ$, c): $\alpha = 6.5^\circ$ d): $\alpha = 7^\circ$, e): $\alpha = 8^\circ$, f): $\alpha = 8.5^\circ$

5.5 Fazit der Hauptuntersuchungen

Die Hauptuntersuchungen belegen eindeutig, daß die abgelöste Strömung an einer Hochauftriebskonfiguration durch periodische Anregung zum Wiederanlegen gebracht werden kann. Dabei konzentrieren sich die Untersuchungen auf eine Konfiguration, bei der die Strömung über der Klappe für den Fall ohne Anregung komplett abgelöst ist, während sie auf dem Hauptflügel noch weitestgehend anliegt.

Eine Frequenzanalyse der abgelösten Scherschicht zeigt, daß insbesondere im Bereich zwischen dem abgelösten Klappenspaltstrahl und dem Rezirkulationsgebiet über der Klappe, periodisch wiederkehrend auftretende Strukturen in einem Frequenzband zwischen 50 Hz und 300 Hz zu finden sind. Daher konzentrieren sich die Untersuchungen zur aktiven Beeinflussung der Strömungsablösung primär auf diesen Frequenzbereich.

Es zeigt sich, daß der Testfall der komplett abgelösten Strömung besonders gut durch die periodisch eingebrachten Störungen beeinflusst werden kann. Dabei spielt im untersuchten Frequenzbereich die Anregungsfrequenz offensichtlich nur eine untergeordnete Rolle. Als dominierender Parameter zur Herbeiführung des Wiederanlegens und damit auch zur Auftriebssteigerung stellt sich die Anregeintensität heraus.

Detaillierte Strömungsfeldmessungen mit Hilfe der Hitzdraht-Anemometrie zeigen die ausgeprägte Reaktion des Strömungsfeldes auf die periodische Anregung sowohl im zeitlichen Mittel als auch in der phasengemittelten Darstellung. Dabei erkennt man, daß die Strömung bei Erreichen eines gewissen Schwellwertes der Anregeintensität sprunghaft wiederanlegt.

Frequenzanalysen der angeregten Strömung belegen die Ausbreitung der eingebrachten periodischen Störungen in der abgelösten Scherschicht. Die durch den Schlitz in der Nähe der Klappenvorderkante eingebrachten Geschwindigkeitsfluktuationen regen nahezu ausschließlich die Scherschicht zwischen Klappenspaltstrahl und Ablösegebiet an, erhöhen dort die Durchmischung und bringen die Strömung schließlich zum Wiederanlegen.

Dadurch läßt sich im „post-stall“-Bereich eine deutliche Auftriebssteigerung erzielen. Auch bei Anstellwinkeln, die größer sind als der unter Grundströmungsbedingungen erreichbare maximale Anstellwinkel, kann durch aktive Ablösebeeinflussung mindestens $c_{A,max}$ erreicht werden. Dadurch wird der nutzbare Anstellwinkelbereich, bei dem maximaler Auftrieb erreicht wird, deutlich erweitert.

6. Zusammenfassung

Bei der Umströmung von Tragflügelprofilen kommt es bei hohen Anstellwinkeln zur Strömungsablösung. Dieses Verhalten der Strömung bewirkt einen starken Auftriebsverlust, der einhergeht mit dem Anstieg des Widerstandes. Zur Vermeidung dieses Strömungsphänomens werden an Flugzeug-Tragflügeln im allgemeinen sogenannte Hochauftriebshilfen eingesetzt. Mit diesen passiven Hilfsmitteln ist man in der Lage, die Strömungsablösung zu hohen Anstellwinkeln hinauszuzögern und somit hohe Auftriebsbeiwerte zu erzielen.

Eine zunehmend interessante Alternative bieten aktive Beeinflussungsmethoden. Eine dieser aktiven Methoden ist das gezielte periodische Ausblasen und Einsaugen durch einen schmalen Schlitz, der sich in unmittelbarer Nähe der Ablöseposition befindet. Im Gegensatz zum stationären Ausblasen bzw. Einsaugen ist bei der periodischen Anregung der Strömung deutlich weniger Energie notwendig, um eine auftriebssteigernde Wirkung zu erzielen.

Die hier vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, die ablösegefährdete Umströmung einer einfachen 2-Element Hochauftriebskonfiguration mit Hilfe eines periodisch angesteuerten Schlitzes aktiv zu beeinflussen. Durch Optimierung der Anregeparameter sollte die Strömung dahingehend beeinflusst werden, daß es zum Wiederaanlegen der zuvor bereits abgelösten Strömung kommt und dadurch insbesondere der Auftrieb wiederhergestellt wird. Hierzu wurden zunächst Voruntersuchungen sowohl in einem Wasser- als auch in einem Windkanal durchgeführt. Die für die experimentellen Untersuchungen entscheidenden Parameter waren neben den Anstellwinkeln der beiden Teilprofile die Anregeintensität c_μ sowie die Strouhalzahl der Anregung St .

Die Untersuchung der Grundströmung zeigte, daß die Strömung ab einem gewissen Anstellwinkel über der Hinterkantenklappe ablöst, während sie über dem Hauptprofil weitgehend anliegend bleibt. Die Ablösung erfolgt bei großem Anstellwinkel unmittelbar an der Klappenvorderkante und befindet sich damit direkt an der Position der Anregung. Dies sichert die optimale Wirksamkeit der Anregung bei Einbringung der periodischen Störung in die abgelöste Scherschicht.

Die Vorversuche im Wasserkanal zeigten klar, daß bereits ein periodisch gepulstes Ausblasen geeignet ist, die abgelöste Strömung anzuregen und zum Wiederaanlegen zu bringen. Aufgrund der fehlenden Einsaug-Komponente (wegen Kavitation im Anregesystem wurde darauf verzichtet) erhält man einen resultierenden Netto-Massenstrom von der Anregung in das Strömungsfeld.

Bei den Hauptuntersuchungen im Windkanal wurde ein Wandschlitz in Verbindung mit einem Tiefton-Lautsprecher als Aktuator eingesetzt und damit ein massenstromneutraler Anregemechanismus realisiert. Die Anregung verteilt sich homogen über die Spannweite und konnte durch Vermessung der Strahlgeschwindigkeit für den gewünschten Frequenzbereich kalibriert werden. Die durch den Schlitz eingebrachten Geschwindigkeitsstörungen induzieren periodische Wirbel im Strömungsfeld, welche die Durchmischung zwischen der Außenströmung und dem Rezirkulationsgebiet erhöhen. Dadurch wird kinetische Energie aus dem energiereichen Gebiet der Außenströmung in das Ablösegebiet transportiert. Dies führt bei richtiger Wahl der Anregeparameter zum Wiederanlegen der Strömung.

Die Analyse der Frequenzspektren im abgelösten Strömungsfeld ergab, daß insbesondere im Bereich der Scherschicht zwischen abgelöstem Klappenspalt-Strahl und darunterliegendem Rezirkulationsgebiet periodische Strukturen existieren, die in einem Frequenzband zwischen 50 - 300 Hz auftreten. Die Untersuchungen zur aktiven Ablösebeeinflussung konzentrierten sich daher auf die Anregung der Strömung innerhalb dieses Frequenzbandes.

Das Wiederanlegeverhalten der Strömung ist in erster Linie von der Anregeintensität abhängig, wie die Variation von Anregeintensität und -frequenz zeigte. Der Übergang vom Zustand der abgelösten Strömung hin zur anliegenden Strömung erfolgt sprunghaft bei Erreichen eines gewissen Schwellwertes der Anregeintensität. Eine erneute Reduzierung der Anregeintensität resultiert jedoch nicht in einem sofortigen Wiederablösen der Strömung, sondern es zeigt sich eine deutliche Hysterese im Anlege- bzw. Ablöseverhalten der angeregten Strömung.

Im Falle der optimalen Anregung legt die Strömung im zeitlichen Mittel komplett wieder an. Dies belegten Strömungsfeldmessungen im Bereich über der Hinterkantenklappe. Betrachtet man das Strömungsfeld in der phasengemittelten Darstellung, so erkennt man ein deutliches Pulsieren der Strömung, das in seiner Phase streng an die Anregung gekoppelt ist. Zu bestimmten Phasenwinkeln kann die Ausbildung kleiner, lokal begrenzter Rezirkulationsgebiete beobachtet werden.

Insgesamt machen die Untersuchungen deutlich, daß durch Einbringung periodischer Störungen in die abgelöste Strömung diese zum Wiederanlegen gebracht werden kann. Damit wird das Auftriebsverhalten der Hochauftriebskonfiguration deutlich verbessert: Der maximal erreichbare Klappen-Anstellwinkel kann somit z.B. von $\eta_{max} = 34^\circ$ auf $\eta_{max} = 38^\circ$ erhöht werden, und es werden Auftriebssteigerungen von bis zu 20% erreicht.

Damit konnte erfolgreich gezeigt werden, daß das entwickelte System in der Lage ist, die Leistungsfähigkeit im Bereich des Hochauftriebes an einer praxisnahen Hochauftriebskonfiguration durch aktive Kontrolle der Strömung deutlich zu steigern. Durch die gezielte Einbringung von periodischen Störungen konnten sowohl der erreichbare Auftrieb als auch der nutzbare Anstellwinkelbereich erheblich erweitert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] *AGARD-CP-515 High-Lift Systems Aerodynamics* (7 Rue Ancelle, 92200 Neuilly sur Seine, France, 1993), Advisory Group for Aerospace Research and Development.
- [2] ADAIR, D., AND HORNE, W. Turbulent separated flow in the vicinity of a single slotted airfoil flap. *AIAA- 88-0613* (1988).
- [3] ADAIR, D., AND HORNE, W. Turbulent separating flow over and downstream of a two-element airfoil. *Experiments in Fluids* 7 (1989), 531.
- [4] ALLAN, B., JUANG, J., RANEY, D., SEIFERT, A., PACK, L., AND BROWN, D. Closed-loop separation control using oscillatory flow excitation. Tech. Rep. NASA/CR-2000-210324, ICASE Report No. 2000-32, ICASE, August 2000.
- [5] ANDERSON, J. *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill, Inc., 1991.
- [6] BAR-SEVER, A. Separation control on an airfoil by periodic forcing. *AIAA Journal* 27, 6 (1989), 820.
- [7] BARLOW, J., RAE JR., W., AND POPE, A. *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. John Wiley and Sons, Inc., 1999.
- [8] BARNES W., AND MCCORMICK. *Aerodynamics of V/STOL Flight*. Academic Press, 1967.
- [9] BARTSCH, P., NITSCHKE, W., AND BRITSCH, M. Navier-stokes computations of turbulent flow around high-lift configurations. In *High-Lift System Aerodynamic, AGARD-CP-515* (1993), Advisory Group for Aerospace Research and Development, pp. 6.1–6.10.
- [10] BAUMANN, M., AND NITSCHKE, W. Investigation of active control of Tollmien-Schlichting waves on a wing. *Transitional boundary layer in Aeronautics* 46 (1996), 89–98.
- [11] BECKER, R., GARWON, M., GUTKNECHT, C., BÄRWOLF, G., AND KING, R. Regelung aerodynamischer Strömungen am Beispiel einer rückwärts gewandten Stufe. *at-Automatisierungstechnik* (2001).
- [12] CHANG, R., HSIAO, F., AND SHYU, R. Forcing level effects of internal acoustic excitation on the improvement of airfoil performance. *Journal of Aircraft* Vol. 29, No. 5 (1992), pp. 823.

- [13] COLLINS, F., AND ZELEVITZ, J. Influence of sound upon separated flow over wings. *AIAA Journal Vol. 13*, No. 3 (1975), pp. 408.
- [14] DAVIS, W., LOVATO, J., AND PEZESHKI, C. Nonlinear spectral characterization of frequency-modulated control applied to a static airfoil shear layer. *AIAA 94-2217* (1994).
- [15] DOVGAL, A. Control of leading-edge separation on an airfoil by localized excitation. DLR-Forschungsbericht DLR-FB-93-16, DLR, 1993.
- [16] DUBS, F. *Aerodynamik der reinen Unterschallströmung*. Birkhäuser, 1966.
- [17] ERK, P. Separation control on a post-stall airfoil using acoustically generated perturbations. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1997.
- [18] FERNHOLZ, H. Management and control of turbulent shear flows. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik (ZAMM)* 73, 11 (1992), 287.
- [19] FIEDLER, H., AND FERNHOLZ, H. On management and control of turbulent shear flows. *Prog. Aerospace Sci.* 27 (1990), 305.
- [20] FLAIG, A., AND HILBIG, R. High-lift design for large civil aircraft. In *AGARD CP-515, High-Lift System Aerodynamics* (7 Rue Ancelle, 92200 Neuilly sur Seine, France, 1993), Advisory Group for Aerospace Research and Development, pp. 31.1–31.12.
- [21] GAD-EL HAK, M. Flow control: The future. *Journal of Aircraft* 38, 3 (May-June 2001), 401–418.
- [22] GAD-EL HAK, M. Micro-air-vehicles: Can they be controlled better? *Journal of Aircraft* 38, 3 (May-June 2001), 419–428.
- [23] HOUGHTON, E., AND CARRUTHERS, N. *Aerodynamics for Engineering Students*. Edwards Arnold, 1982.
- [24] HSIAO, F., LIU, C., AND SHYU, L. Control of wall-separated flow by internal acoustic excitation. *AIAA Journal Vol. 28*, No. 8 (1990), pp. 1440.
- [25] HUANG, L., MAESTRELLO, L., AND BRYANT, T. Separation control over an airfoil at high angles of attack by sound emanating from the surface. *AIAA-87-1261* (1987).
- [26] LACHMANN, G., Ed. *Boundary Layer and Flow Control, its Principles and Application*, vol. 1. Pergamon Press, 1961.
- [27] MEYER, R. *Experimentelle Untersuchungen von Rückstromklappen auf Tragflügeln zur Beeinflussung von Strömungsablösung*. PhD thesis, Technische Universität Berlin, Dezember 2000.
- [28] MEYER, R., AND BECHERT, D. Separation control on a glider wing with artificial bird's feathers. *Advances in Turbulence VI, Kluwer, Dodrecht* (1996), pp. 471–472.

- [29] MEYER, R., BECHERT, D., AND HAGE, W. Experiments with artificial bird feathers for separation control on airfoils. *Euromech Colloquium 361, Active Control of Turbulent Shear Flows 17-19 March, Berlin* (1997).
- [30] MUELLER, T., AND BATILL, S. Experimental studies of separation on a two-dimensional airfoil at low Reynolds numbers. *AIAA Journal Vol. 20*, No. 4 (April 1982), pp. 457.
- [31] NISHRI, B., AND WYGNANSKI, I. On flow separation and its control. *Ecomass '96 (Invited Lecture)* (1996).
- [32] NITSCHKE, W. *Strömungsmesstechnik*. Springer-Verlag, 1994.
- [33] ROOS, F., AND KEGELMANN, J. Control of coherent structures in reattaching laminar and turbulent shear layers. *AIAA Journal 24* (December 1986), 1956.
- [34] ROSHKO, A. Structure of turbulent shear flows: A new look. *AIAA Journal 14*, 10 (1976), 1349.
- [35] SCHATZ, M. Numerical study of high-lift flow with separation control by periodic excitation. *AIAA Paper 2001-0296* (2001).
- [36] SCHATZ, M., SCHÄFER, J., AND THIELE, F. Numerische Simulation einer Zweikomponenten-Hochauftriebskonfiguration mit Vergleich zu LDA Messungen. Tech. rep., Hermann-Föttinger-Institut, TU-Berlin, 1998.
- [37] SCHLICHTING, H., AND GERSTEN, K. *Grenzschicht-Theorie*. Springer-Verlag, 1997.
- [38] SCHLICHTING, H., AND TRUCKENBRODT, E. *Aerodynamik des Flugzeuges*, vol. 1. Springer-Verlag, 1967.
- [39] SCHLICHTING, H., AND TRUCKENBRODT, E. *Aerodynamik des Flugzeuges*, vol. 2. Springer-Verlag, 1969.
- [40] SEIFERT, A., BACHAR, T., KOSS, D., SHEPSHELOVICH, M., AND WYGNANSKI, I. Oscillatory blowing, a tool to delay boundary-layer separation. *AIAA Journal Vol. 31*, No. 11 (November 1993), pp. 2052.
- [41] SEIFERT, A., DARABI, A., SOKOLOV, M., AND WYGNANSKI, I. The use of oscillatory blowing for managing the flow around a slotted airfoil at low Reynolds numbers. *Euromech Colloquium 328* (1994).
- [42] SEIFERT, A., DARABI, A., AND WYGNANSKI, I. On the delay of airfoil stall by periodic excitation. *Journal of Aircraft Vol. 33*, No. 4 (1996), pp. 691.
- [43] SEIFERT, A., AND PACK, L. Oscillatory control of separation at high Reynolds numbers. *AIAA paper 98-0214* (1998).
- [44] SEIFERT, A., AND PACK, L. Active control of separated flows on generic configurations at high Reynolds numbers. *AIAA paper 99-3403* (1999).

- [45] SEIFERT, A., AND PACK, L. Oscillatory excitation of unsteady compressible flows over airfoils at flight Reynolds numbers. *AIAA paper 99-0925* (1999).
- [46] TINAPP, F., AND NITSCHKE, W. LDV-Messungen um eine Hochauftriebskonfiguration. In *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 5. Fachtagung*. Shaker Verlag, 1996, pp. 11.1 – 11.7.
- [47] TINAPP, F., AND NITSCHKE, W. Ablösekontrolle an einer Tragflügel-Hochauftriebskonfiguration. *STAB-Bericht '97, Göttingen* (November 1997).
- [48] TINAPP, F., AND NITSCHKE, W. LDV-measurements on a high-lift configuration with separation control. In *Ninth International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics* (1998), pp. 19.1.1 – 19.1.8.
- [49] TINAPP, F., AND NITSCHKE, W. On active control of high-lift flow. In *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*, W. Rodi and D. Laurence, Eds. Elsevier Science Ltd., 1999, pp. 619 – 626.
- [50] TINAPP, F., AND NITSCHKE, W. Separation control on a high-lift configuration by periodic excitation. In *Notes on Numerical Fluid Mechanics, Contributions to the 12th AG STAB/DGLR Symposium Stuttgart, Germany 2000*. Springer Verlag, 2001.
- [51] TINAPP, F., AND WOLFGANG, N. LDV-measurements on a high-lift configuration with separation control. In *Laser Techniques Applied to Fluid Mechanics*. Springer Verlag, 1999.
- [52] VANDSBURGER, U., AND DING, C. Self-excited wire method for the control of turbulent mixing-layers. *AIAA Journal* 33, 6 (1995), 1032.
- [53] ZAMAN, K. Effect of acoustic excitation on stalled flows over an airfoil. *AIAA Journal* Vol. 30, No. 6 (1992), pp. 1492.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Anforderung und Komplexität der Klappensysteme	11
1.2	Allgemeine Problematik beim Einsatz von Hochauftriebs-Konfigurationen	12
2.1	Strömungsablösung bei positiven Druckgradienten	15
2.2	Verschiedene Typen der Strömungsablösung	16
2.3	Vergleich zwischen laminarer und turbulenter Ablösung	17
2.4	Laminare Ablöseblase und turbulentes Wiederanlegen	18
2.5	Wirkungsweise unterschiedlicher Auftriebshilfen	20
2.6	Stromlinien um eine Extrem-Hochauftriebskonfiguration mit Vorflügel und Vierfach-Spalt Hinterkantenklappe	21
2.7	Kontinuierlich arbeitende Methoden zur aktiven Ablösebeeinflussung	23
2.8	Unterschiedliche Strategien bei der Strömungskontrolle	26
2.9	Verschiedene Regelstrecken für die aktive Strömungskontrolle	26
3.1	Versuchsmodell	29
3.2	Wasserkanal-Versuchsmodell	30
3.3	Grenzschichtkanal-Versuchsmodell	32
3.4	Versuchsmodell in der Meßstrecke des HFI-Kanals	33
3.5	Anregesystem am Wasserkanal-Versuchsmodell	36
3.6	Anregesystem Windkanal	37
3.7	Kalibration der Anregung am Windkanalmodell	38
3.8	Wasserkanal am ILR	40
3.9	Grenzschichtkanal am ILR	40
3.10	Großer Windkanal am Hermann-Föttinger-Institut	41
3.11	Einfluß des Strömungsfeldes auf die Lage des Prandtl-Rohres zur Bestimmung der Anströmgeschwindigkeit u_∞	42

3.12	Positionen der Druckbohrungen	43
3.13	6-Komponenten Windkanalwaage am „großen Windkanal“ im HFI	45
3.14	Druckaufnehmer zur Messung der Druckschwankungen im Aktuator	46
3.15	Hitzdraht-Meßtechnik	47
3.16	Eingesetztes 2 Komponenten LDA der Firma Polytec	48
3.17	Auswertung eines LDA-Signals	49
3.18	Versuchsaufbau im Wasserkanal am ILR	50
3.19	Versuchsaufbau im Grenzschichtkanal am ILR	51
3.20	Versuchsaufbau im „großen Windkanal“ am HFI	52
4.1	Nachweis der 2-Dimensionalität der Profilmströmung	56
4.2	Strömungsvisualisierung durch Einbringen von kleinen Luftbläschen durch einen Rechen vor dem Versuchsmodell	57
4.3	Strömungsfeld um das Versuchsmodell bei Grundströmungsbedingungen	59
4.4	Wandparallele Messungen der u-Geschwindigkeiten	59
4.5	Strömungsvisualisierung durch Laser-Induced-Fluorescence	60
4.6	Geschwindigkeitsprofile entlang eines Schnittes	61
4.7	Strömungsfeld über dem Klappenprofil	63
4.8	Durch periodische Anregung wiederangelegte Strömung	63
4.9	Darstellung des Momentan-Strömungsfeldes	65
4.10	Untersuchungen zum Einfluß der periodischen Anregung an einem Einzelprofil	67
4.11	Auftriebscharakteristik des Einzelprofiles bei Einbringung der periodischen Anregung	68
4.12	Erste Untersuchungen zum Einfluß der periodischen Anregung an einer Hochauftriebs-Konfiguration	69
4.13	Druckverteilungen am Hochauftriebsprofil	70
4.14	Auftriebs-Charakteristik der Hochauftriebskonfiguration	71
5.1	Vergleich der Auftriebspolaren der Hochauftriebskonfiguration bei Messun- gen in verschiedenen Windkanälen	73
5.2	Untersuchungen zur Verteilung der Anströmgeschwindigkeit	74
5.3	Grenzschichtmessung auf der Innenseite der Trennwände	75
5.4	Auftriebsbeiwerte bei verschiedenen Anstellwinkeln	76

5.5	Polare für $\alpha = 7^\circ$ inclusive der Druckverteilungen für die drei Testfälle . . .	77
5.6	Resultierende Geschwindigkeit c im Fernfeld der Strömung um das Testmodell bei verschiedenen Klappenwinkeln	79
5.7	Resultierende Geschwindigkeit c im Nahfeld über der Hinterkantenklappe und einige exemplarische Frequenzspektren der Geschwindigkeitsschwankung	80
5.8	Steigerung des Auftriebsbeiwertes c_A im Verhältnis zu c_{A0}	82
5.9	Steigerung des Auftriebsbeiwertes c_A im Verhältnis zu c_{A0} bei $\eta = 36^\circ$. . .	83
5.10	Einkoppeln der periodischen Anregung in die Strömung unmittelbar über der Anregeposition, $St = 0.5$	84
5.11	Reaktion der Strömung auf das Anregesignal im Nahbereich um den Anreageschlitz, $St = 0.5$, $c_\mu = 25 \cdot 10^{-5}$	86
5.12	Mittleres Strömungsfeld über der Hinterkantenklappe bei verschiedenen Anregeamplituden	87
5.13	Geschwindigkeitsprofile in der Scherschicht entlang drei exemplarischer Schnitte	89
5.14	Momentanbilder der mittleren Strömungsgeschwindigkeit c bei schwacher Anregung	91
5.15	Momentanbilder der Schwankungsgeschwindigkeit c' bei schwacher Anregung	92
5.16	Momentanbilder des instationären Strömungsfeldes bei starker Anregung, mittlere Geschwindigkeit c	93
5.17	Momentanbilder des instationären Strömungsfeldes bei starker Anregung, Schwankungsgeschwindigkeit c'	94
5.18	Entwicklung der Anregefrequenz im Strömungsfeld	95
5.19	Anregefrequenz im Strömungsfeld bei hoher Anregeamplitude	96
5.20	Auftriebsbeiwert für verschiedene Klappenwinkel η und Anstellwinkel α . . .	97

Tabellenverzeichnis

2.1	Verschiedene Auftriebshilfen und die damit erzielbare Steigerung des maximalen Auftriebes	22
3.1	Position der Turbulatoren auf Haupt- und Klappenprofil	34
3.2	Tabellarische Auflistung der Druckbohrungspositionen auf dem Hauptprofil	43
3.3	Positionen der Druckbohrungen auf dem Klappenprofil	43
3.4	Definition der Aerodynamischen Kraft- und Momenten-Beiwerte	44

Lebenslauf

Zur Person	TINAPP, Frank Geb. am 28. Mai 1967 in Viña del Mar/ Chile
Schulbildung	08/74 - 06/78 Grundschule, Bobenheim-Roxheim 08/78 - 06/82 Albert-Einstein Gymnasium Frankenthal/Pfalz 08/82 - 12/85 Kath. Salvatorschule, Berlin-Reinickendorf Dezember 1985 Allgemeine Hochschulreife (Abitur)
Studium	10/85 - 10/94 Studium der Luft- und Raumfahrttechnik an der TU-Berlin Diplomarbeit „Messung der Transitionslage an einem transsonischen Laminarprofil mit Grenzschichtabsaugung“ bei Prof. Dr.-Ing. W. Nitsche 03/95 Abschluß als Diplomingenieur für Luft- und Raumfahrttechnik
Berufstätigkeit	04/95 - 12/01 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Luft- und Raumfahrt der Technischen Universität Berlin

Berlin, im Dezember 2001