

Ähnlichkeitstheoretische Adaption eines Buckelwal-Flossenprofils für den Einsatz in kompressiblen Medien und anschließende Untersuchung der resultierenden Geometrie mittels CFD

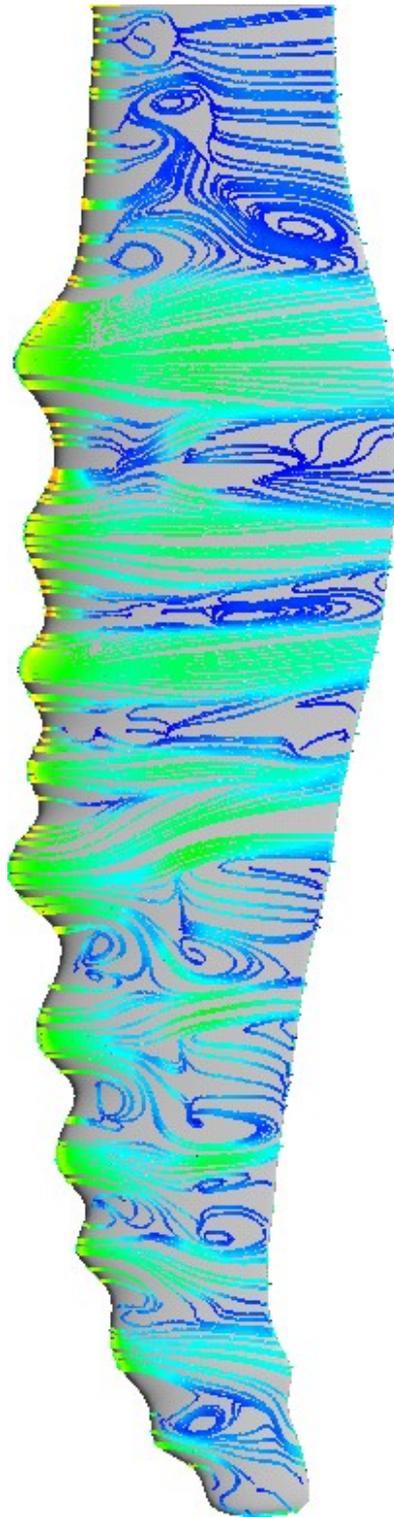
## **Studienarbeit**

Bearbeiter: cand. Ing. B. Kerschgens  
Betreuender Assistent: Dipl.-Ing. K. Theobald

Wiss. Leitung: Dr.-Ing. H. Hönen

Institut für Strahlantriebe und Turboarbeitsmaschinen  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen





*Abb. 0.1: Oberflächenstromlinien bei 10 Grad Inzidenz in Wasser. Erkennbar sind die verschiedenen durch die Tuberkel verursachten Wirbelsysteme. Diese sind jedoch erheblich schwächer ausgeprägt, als diese Darstellungsweise suggeriert.*



Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbst verfasst wurde.

---

(Bruno Kerschgens)



# Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	II
1 Einführung	1
1.1 Lebensweise des Buckelwals.....	1
1.2 Ziel dieser Arbeit.....	1
1.3 Literaturübersicht.....	2
2 Ähnlichkeitstheoretische Analyse	3
2.1 Walflosse.....	3
2.2 Übertragbarkeit für kompressibles Fluid.....	3
2.3 Skalierung der Walflosse.....	4
3 Rechnungen	5
3.1 Vernetzung.....	5
3.1.1 Geometrieimport und -darstellung.....	5
3.1.2 Bilanzraum.....	6
3.1.3 Netzerstellung.....	7
3.2 Simulationsparameter.....	10
3.2.1 Turbulenzmodelle.....	10
3.2.2 Simulationsrechnungen .....	11
4 Ergebnisse	13
4.1 Eindimensionale Kennwerte.....	13
4.1.1 Koordinatensysteme.....	13
4.1.2 Kräfte und Auftriebs-Widerstandsverhältnis.....	15
4.2 Strömungsphänomene.....	16
4.2.1 Profildruckverteilung.....	16
4.2.2 Oberflächennahe Strömung.....	35
4.2.3 Turbulente kinetische Energie.....	40
4.2.4 Ablösungen.....	46
4.2.5 Umströmung der Tuberkel.....	49
4.3 Diskussion.....	50
4.3.1 Gerade angeströmte Fälle, Wasser.....	50
4.3.2 Fälle mit 10° Inzidenz, Wasser.....	51
4.3.3 Fälle mit 20° Inzidenz, Wasser.....	52
4.3.4 Besonderheiten der Simulationsergebnisse mit Luft.....	53
4.3.5 Zusammenfassende Diskussion.....	53
5 Ausblick	54
5.1 Forschungsperspektiven.....	54
5.2 Einsatzmöglichkeiten.....	54
6 Zusammenfassung	55
7 Literaturverzeichnis	56

## Nomenklatur

A.....	Auftriebskraft
$\alpha$ .....	Anströmwinkel
$\beta$ .....	Winkel zwischen Gesamtkraft und der y-Komponente der Gesamtkraft
c.....	Anströmgeschwindigkeit
$\eta$ .....	dynamische Viskosität
Ma.....	Mach-Zahl, Verhältnis von Geschwindigkeit zu Schallgeschwindigkeit
$\nu$ .....	kinematische Viskosität, $\nu = \eta / \rho$
Re.....	Reynolds-Zahl, $Re = \rho cs / \eta$
$\rho$ .....	Dichte
s.....	Sehnenlänge
W.....	Widerstandskraft

# 1 Einführung

Verbesserungen der Beschaukelungen von Turbomaschinen, insbesondere der dreidimensionalen Schaufelgestaltung, sind wünschenswert. Ein möglicher Ansatz ist die Adaption von Formen aus der Natur (Bionik), da diese von der Evolution über Jahrtausende optimiert wurden. Ein Beispiel für eine solche Form ist die Brustflosse des Buckelwals.

## 1.1 *Lebensweise des Buckelwals*

Der Buckelwal (*Megaptera novaeangliae*) ist ein sehr wendiger und agiler Schwimmer. Die Brustflossen, auf deren Vorderkanten sich auffällige Tuberkel befinden, spielen dabei eine wichtige Rolle. Sie sind mit etwa einem Drittel der Körperlänge für Wale außergewöhnlich lang.

Buckelwale erreichen eine Länge von 10 bis 18m und ein Gewicht von 25-30t. Buckelwale kommen praktisch in allen Weltmeeren vor. Das Verbreitungsgebiet erstreckt sich von den polaren Nahrungsgebieten im polaren Sommer bis zu den Paarungsgebieten und Kinderstuben in tropischen und subtropischen Meeren im Winter. Die Populationen der Nord- und Südhalbkugel vermischen sich trotz gleicher Paarungs- und Brutgebiete nicht, da sie sich dort zu anderen Zeiten aufhalten. Buckelwale legen im Laufe eines Jahres sehr weite Strecken zurück. Die Entfernung zwischen Nahrungs- und Paarungsgebieten beträgt bis zu 4000 Meilen.

Er gehört zur Familie der Furchenwale (*Balaenopteridae*). Furchenwale jagen ihre Nahrung, indem sie mit weitgeöffnetem Maul und hoher Geschwindigkeit seitlich oder von unten in Schwärme von Plankton oder Fisch hineinschwimmen. Um seine Ausbeute zu erhöhen, kreist der Buckelwal um den Fischschwarm und stößt dabei Luft aus, die in kleinen Blasen nach oben perlt. Der Fischschwarm bleibt in diesem Zylinder gefangen, dessen Durchmesser der Wal verkleinert, bis er die so „verdichtete“ Beute schließlich verschlingt.

Buckelwale sind zum Überleben sowohl auf eine strömungsgünstige Form angewiesen, um ihre weiten Wanderungen mit vertretbarem Energieaufwand zu bewältigen, als auch auf eine hohe Wirksamkeit ihrer Flossen, um die für die Jagd notwendige Manövrierfähigkeit zu erhalten.

Die ältesten Buckelwal-Skelettfunde sind ca. 10 Millionen Jahre alt.

[15] [16].

## 1.2 *Ziel dieser Arbeit*

In der vorliegenden Arbeit soll ein qualitatives Verständnis der Umströmung der Brustflosse eines Buckelwals erreicht werden. Im Zentrum des Interesses liegt der Einfluß der speziellen Vorderkantenform.

Dazu werden mit dem Strömungslöser CFX Simulationsrechnungen an einer Brustflossengeometrie durchgeführt. Parallel dazu wird ein Vergleichsprofil ohne die charakteristischen Tuberkel untersucht.

Die zu untersuchende Profilform wurde in einer vorangegangenen Studienarbeit am IST [16] ermittelt.

### **1.3 Literaturübersicht**

Der Einfluß der Vorderkanten-Tuberkel wurde bereits von F. E. Fish et al. untersucht. Eine Veröffentlichung bezieht sich dabei auf einen Windkanalversuch [8], eine andere auf eine numerische Simulation eines Flügels und eines Vergleichsprofils [14].

Bei den Windkanalversuchen wurde eine realistische Flossenform verwendet und mit einer Form ohne Tuberkel verglichen. Die dabei verwendete Form unterscheidet sich geringfügig von der hier untersuchten. Im Windkanalversuch wurde bei Fehlanströmung eine Verbesserung des Auftriebs und eine Verringerung des Widerstandes gemessen. Eine Vergrößerung des Stall-Winkels wurde ebenfalls festgestellt.

Bei den Simulationen wurde ein Flügel mit glatter Vorderkante mit einem Flügel mit bucklig geschwungener Vorderkante verglichen. Verwendet wurde hier eine Panel-Methode. Der untersuchte Flügel hatte eine über die Höhe unveränderliche Sehnenlänge, entspricht also nicht der dreidimensionalen Form einer Buckelwalflosse. Hierbei wurden vergleichbare aerodynamische Vorteile wie im Windkanalversuch ermittelt.

Insgesamt bestätigten diese Arbeiten die Vermutung einer aerodynamischen Funktion der Tuberkel. Bei den Windkanalversuchen handelt es sich jedoch um ein rein phänomenologisches Vorgehen. Ein Verständnis für die Funktionsweise der Tuberkel lässt sich daraus nicht ableiten. Auch bei den numerischen Versuchen erfolgte keine genauere Analyse der Veränderung des Strömungsfeldes.

Aus diesen Gründen erschien eine genaue CFD-Analyse der Strömungseffekte wünschenswert.

In beiden genannten Arbeiten wurde die Flosse senkrecht zur Vorderkante, also ohne Pfeilung mit einer Geschwindigkeit von 2,6 m/s angeströmt. Dieses Vorgehen wurde auch hier gewählt.

## 2 Ähnlichkeitstheoretische Analyse

### 2.1 Walflosse

Bei der Umströmung der Walflosse handelt es sich um eine inkompressible, reibungsbehaftete Umströmung eines Körpers. Zielgrößen sind der Widerstand, den die Flosse dabei abhängig von der Geschwindigkeit und Richtung des anströmenden Fluides erfährt, und der Auftrieb, bzw. das Verhältnis dieser Größen.

Es soll hier der stationäre Fall untersucht werden.

Einflussgrößen sind also die Fluideigenschaften Dichte ( $\rho$ ), dynamische Viskosität ( $\eta$ ) und Geschwindigkeit ( $c$ ) und die Geometriegrößen Sehnenlänge des Profils ( $s$ ), Anströmwinkel ( $\alpha$ ) und weitere die Geometrie beschreibende Größen ( $l_i$ ).

Hieraus ergibt sich als Einflussgrößenansatz:

$$F_w = f(\rho, \eta, c, s, \alpha, l_i)$$

Dies führt auf die Kenngrößenbeziehung:

$$Ne = f(Re, Geo)$$

Mit der Newton-Zahl  $Ne = F_w / (\rho c^2 s^2)$ ; der Reynoldszahl  $Re = \rho c s / \eta$  und der Bedingung der geometrischen Ähnlichkeit, worunter eine genaue Skalierung der Geometrie inklusive des Anströmwinkels zusammengefasst ist.

Bei gleicher Re-Zahl und ähnlicher Geometrie, also gleichen Randbedingungen, folgt nicht nur die Gleichheit der Newton-Zahl sondern auch die Gleichheit des Strömungsfeldes aus der Ähnlichkeitstheorie [3].

Bei einer Geschwindigkeit des Buckelwals von 2.6 m/s, einer Sehnenlänge der Walflosse von 0.5 m und einer kinematischen Viskosität ( $\nu = \eta / \rho$ ) des Wassers von 1.275 E-06 m<sup>2</sup>/s [6] ergibt sich für die Walflosse eine Reynoldszahl von  $Re = 1.0196 \text{ E}06$ .

Fish gibt für Seewasser eine kinematische Viskosität von 1.35 E-06 m<sup>2</sup>/s an [14]. Dies entspricht einer Abweichung vom hier benutzten Wert von 5.9 %. Diese Genauigkeit erscheint ausreichend, da die Geschwindigkeit des Wals ebenfalls auf einer Abschätzung beruht und beide Größen linear in die Reynoldszahl eingehen.

### 2.2 Übertragbarkeit für kompressibles Fluid

Für die Beschreibung einer kompressiblen Strömung wesentliche Kennzahlen bzw. Zusammenhänge können für inkompressible Strömungen wesentlich vereinfacht oder außer Acht gelassen werden. (z.B. erhebliche Vereinfachung der Navier-Stokesschen Gleichungen für den inkompressiblen Fall)

Dies führt bei einer ähnlichkeittheoretischen Betrachtung einer kompressiblen Strömung auf einen erweiterten Satz von Kennzahlen. Zumindest der Einfluß der Mach-Zahl, also das Verhältnis von

Strömungs- zu Schallgeschwindigkeit, und der Isentropenexponent müssen für den kompressiblen Fall berücksichtigt werden. Nach [13] ist dieses Vorgehen nicht ausreichend, hier wird ausserdem noch ein Berücksichtigen der Prandtl-Zahl gefordert, auch wenn Wärmeübertragung keine Rolle spielt.

Unter bestimmten Voraussetzungen können Kennzahlsätze vereinfacht werden. Dies ist der Fall, wenn gesicherte theoretische oder experimentelle Erkenntnisse vorliegen, dass der Einfluß einer Kenngröße auf die Zielgröße für einen bestimmten Wertebereich der Kenngröße nicht vorhanden oder vernachlässigbar ist. Ist dieser Sachverhalt nachgewiesen, so ist der verkleinerte Satz von Kennzahlen im Sinne der Ähnlichkeitstheorie vollständig.

Ein Beispiel hierfür ist die Vernachlässigung des Einflusses der Mach-Zahl und somit der Kompressibilität für Geschwindigkeiten kleiner  $Ma=0,3$ . Man kann theoretisch zeigen, dass der Fehler aufgrund dieser Annahme recht gering ist ( $< 10\%$ ) [11].

Für Geschwindigkeiten, die den obengenannten Bedingungen entsprechen, ist also eine vollständig ähnliche Umströmung der Buckelwalflosse mit Luft möglich.

Für den kompressiblen Fall gilt allgemein die Kenngrößenbeziehung:

$$Ne=f(Re, Ma, Geo)$$

Unter der Voraussetzung, dass der funktionale Zusammenhang des Einflusses einer Kennzahl auf ein gegebenes Problem bekannt ist, läßt sich die Einhaltung der Kennzahl durch die Einhaltung des funktionalen Zusammenhanges ersetzen [12]. Dies ist im Bezug auf die Machzahl für kompressible Strömungen nicht der Fall.

Zusammenfassend ergibt sich, dass inkompressible Strömungen und kompressible Strömungen mit  $Ma>0,3$  nicht ähnlich im Sinne der Ähnlichkeitstheorie sind.

Bezogen auf die Buckelwalflosse bedeutet das, dass die Effekte, die die Tuberkel auf der Vorderkante der Flosse auf das Strömungsfeld im inkompressiblen Fall haben, nicht notwendigerweise auf den kompressiblen Fall übertragbar sind. Eine Übertragbarkeit kann jedoch auch nicht ausgeschlossen werden.

### **2.3 Skalierung der Walflosse**

Um bei einer Änderung der Anströmgeschwindigkeit die Reynoldszahl konstant zu halten, ist eine Skalierung der Geometrie nötig.

Für Luft von 298.15 K ergibt sich eine Schallgeschwindigkeit von 346 m/s. Eine Anströmung mit  $Ma=0.2$  entspricht also einer Anströmgeschwindigkeit von 69.2 m/s.

Luft bei 25 °C hat eine kinematische Viskosität von  $15.61 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Durch eine Skalierung der Geometrie mit dem Faktor 0.46 ergibt sich eine Reynoldszahl von  $Re=1.0196 \cdot 10^6$ . Die Reynoldssche Ähnlichkeit bleibt also erhalten.

Zahlenwerte aus [6].

## 3 Rechnungen

Zur Vernetzung der Geometrie wurde das Programmpaket ANSYS ICEM CFD verwendet. Die numerischen Simulationsrechnungen, sowie deren Definition und Auswertung wurden mit ANSYS CFX 10.0 durchgeführt.

Die Vernetzungen und erste Testrechnungen wurden auf einem PC (1,66 GHz, 3,00 GB RAM) durchgeführt. Die Durchführung der Simulationsrechnungen erfolgte auf dem Cluster des Rechenzentrums der RWTH-Aachen.

Die Anströmung der Flossengeometrie und des glatten Vergleichsprofils wurde mit Wasser und den Inzidenzwinkeln 0, 10 und 20 Grad simuliert. Die Anströmgeschwindigkeit wurde zu 2,6 m/s festgelegt.

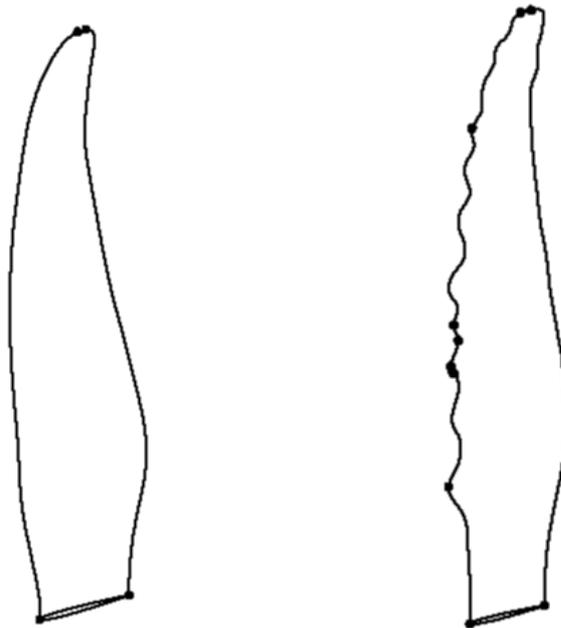
Die Anströmung der Flossengeometrie mit Tuberkeln wurde außerdem mit Luft und den Inzidenzwinkeln 0, 10 und 20 Grad berechnet. Hierbei wurde eine Geschwindigkeit von 69,2 m/s gewählt. Dies entspricht einer Machzahl von 0,2. Die Geometrie wurde mit dem Faktor 0,46 skaliert, um die Reynoldssche Ähnlichkeit zu erhalten. (s. Kap. 2.1 Ähnlichkeitstheoretische Analyse)

### 3.1 Vernetzung

#### 3.1.1 Geometrieimport und -darstellung

Die Geometrie sowohl der Flosse mit Tuberkeln, als auch des Vergleichsprofils, wurden zunächst als IGES 3D-CAD-File in CFD importiert.

An den Import schloss sich eine Bereinigung der Geometrie an, die mittels der Funktion „Build Typology“ zu einer definierten Darstellung der Flossenkonturen mittels Linien und Punkten führte. (s. Abb. 3.1) Dadurch wurde eine wesentliche Voraussetzung für eine gute Abbildung der Flossengeometrie mittels CFD erfüllt, da die Netzknotenpunkte in sich anschließenden Vernetzungsprozessen direkt auf die in dieser Weise erstellten Linien gesetzt werden. Die Darstellung der Oberflächen und somit auch die Form der Tuberkel wird durch dieses Vorgehen nicht negativ beeinflusst.



*Abb. 3.1: Darstellung der Flossenkegel in CFD*

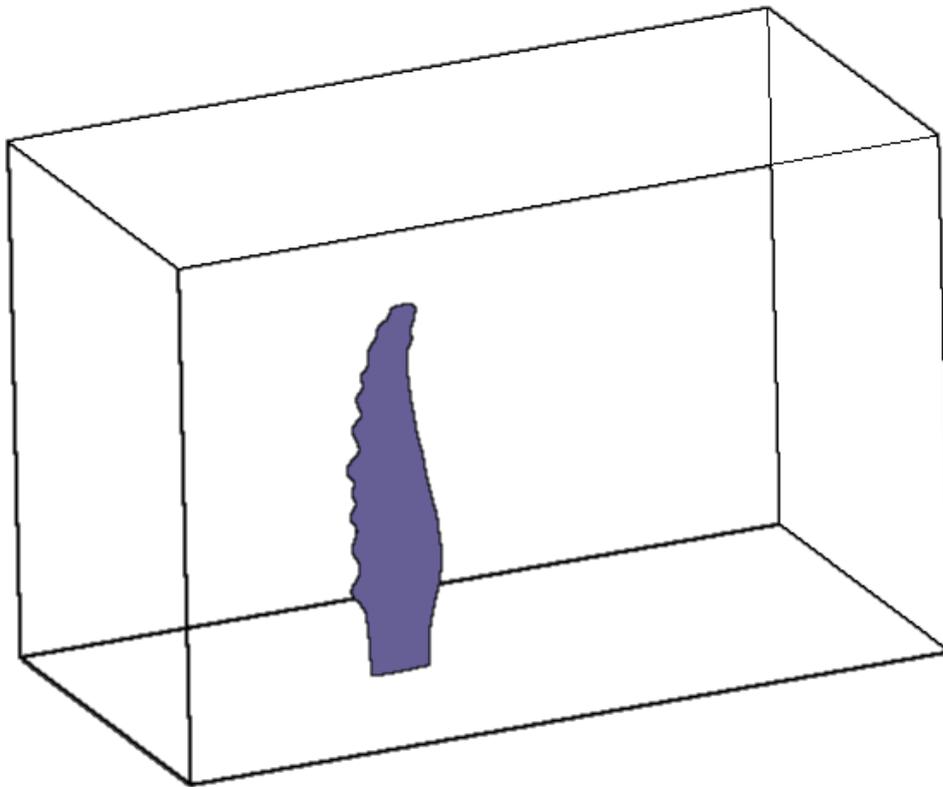
#### **3.1.2 Bilanzraum**

Um eine Umströmung der Flosse simulieren zu können, muss zunächst ein Bilanzraum festgelegt werden. Dieser sollte einerseits nicht zu groß gewählt werden, um die Netzgröße und die daraus resultierende Rechendauer in Grenzen zu halten. Andererseits sollte zur Simulation einer freien Anströmung der Bilanzraum auch nicht zu klein gewählt werden, um Randeinflüsse ausschließen zu können. Aufgrund der theoretisch unendlichen Stromaufwirkung einer Störung in einer Unterschallströmung ist die zweite Forderung nur näherungsweise erfüllbar. Da Unterschiede in den Verlustmechanismen am ehesten im Nachlauf zu beobachten sind, ist eine gute Auflösung des Nachlaufs erforderlich.

Als Kompromiß wurde ein Kasten mit rechteckigem Querschnitt von 6m Länge, 3m Breite und 4m Höhe gewählt. Dieser Kasten wurde so um die Flosse angeordnet, dass diese darin mittig zu den Seitenwänden auf ihrem Ansatz steht. In der Länge wurde die Flosse aussermittig gestellt, so dass sich ein Abstand der Vorderkante von etwa 2m zum anströmseitigen Ende des Bilanzraumes und ein Abstand von 4m zum anderen Ende des Bilanzraumes ergibt. Bezogen auf eine Sehnenlänge der Flosse von 0,5 m am Ansatz, ergibt sich also ein Bilanzraum von vierfacher Sehnenlänge stromauf und achtfacher Sehnenlänge stromab der Flosse (s. Abb. 3.2).

Eine Ungenauigkeit ergibt sich aus der Tatsache, daß am „walseitigen“ Ende der Flosse eine reibungsfreie Wand als Bilanzgrenze definiert wurde. In der realen Umströmung der Walflosse hat mit Sicherheit auch die Form des Walkörpers und das sich daraus ergebende dreidimensionale Strömungsfeld einen Einfluß. Diesen Einfluß in die Simulationen einzubeziehen hätte jedoch einen

erheblichen Mehraufwand bedeutet und insofern den Rahmen dieser Arbeit deutlich überschritten.



*Abb. 3.2: Position der Flosse im Bilanzraum*

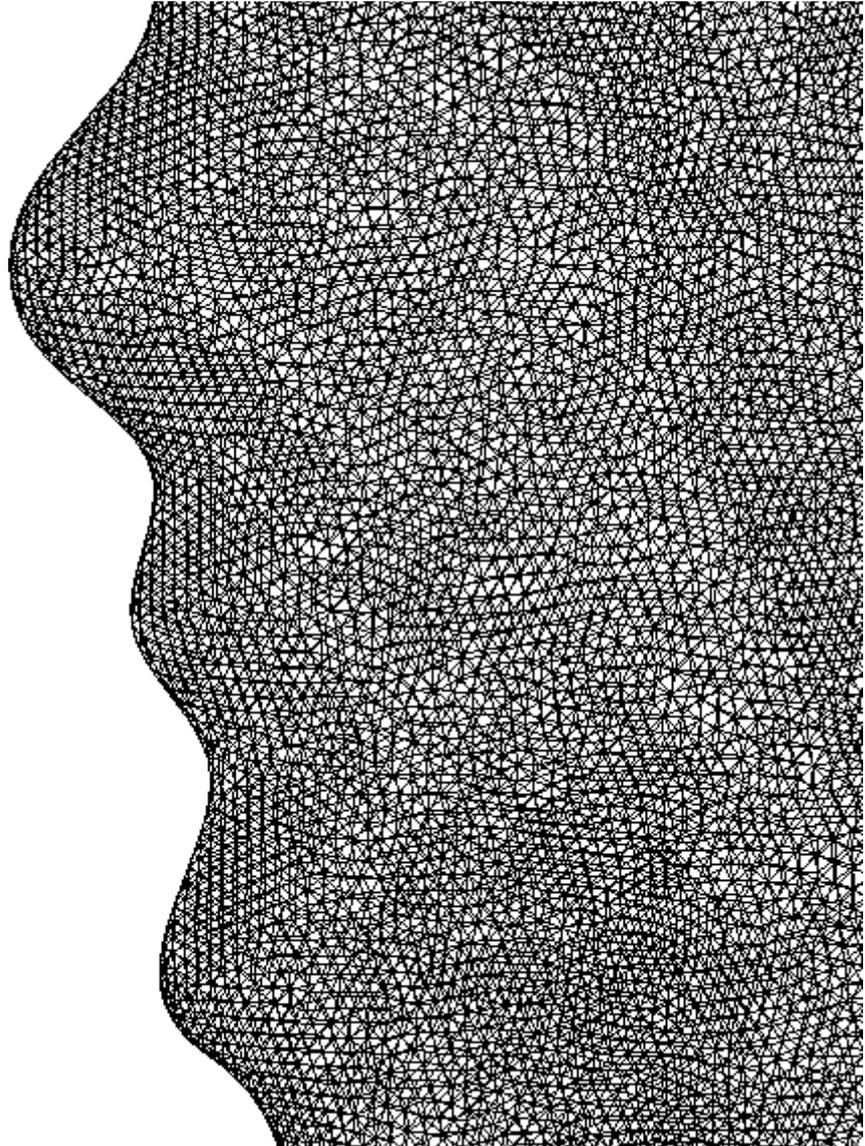
### 3.1.3 Netzerstellung

Die Erstellung eines funktionsfähigen und ausreichend fein aufgelösten Rechennetzes erwies sich als weitaus komplizierter als zunächst angenommen.

Als naheliegende Lösung für das vorliegende Vernetzungsproblem erschien zunächst ein unstrukturiertes tetraedrisches Netz. Die wesentlichen Vorteile dieses Netztyps sind der hohe Automatisierungsgrad des Vernetzungsprozesses und die Fähigkeit, komplexe Geometrien gut darstellen zu können. Insbesondere für die Vernetzung der Tuberkel erschien ein strukturierter Netztyp ungeeignet. Nachteilig an einem unstrukturierten Netz und dem automatisierten Vernetzungsprozess sind die begrenzten Einflußmöglichkeiten auf die lokale Feinheit des Netzes und längere Rechendauer.

Erste Versuche mit einem reinen Tetraeder-Netz ergaben unbefriedigende Ergebnisse. Auf der Flosse und in der Nähe der Flossenoberfläche ist eine sehr feine Auflösung des Netzes wünschenswert. Diese ließ sich auf der Flossenoberfläche realisieren und wurde auch im Weiteren beibehalten (s. Abb. 3.3). Um den gesamten Bilanzraum so fein aufzulösen, erwiesen sich zum Einen die zur Verfügung stehenden Rechnerressourcen als nicht ausreichend, zum Anderen erschien eine so feine Auflösung für die Anströmung und den nicht direkt vom Nachlauf betroffenen Teil

des Bilanzraumes als nicht erforderlich.



*Abb. 3.3: Oberflächennetz am Beispiel Flosse mit Tuberkeln*

In ICEM-CFD sind verschiedene Möglichkeiten gegeben, die Dichte eines Tetraeder-Netzes zu beeinflussen. Zunächst werden Parameter bezüglich der Zellgröße für das gesamte Netz vorgegeben, dann besteht die Möglichkeit, einzelnen Flächen andere Parameter zuzuweisen. Auch eine Einflußnahme auf die Art des Überganges zwischen diesen Oberflächennetzen und dem Volumennetz ist möglich. Als drittes besteht die Möglichkeit, eine sogenannte „density“ zu definieren. Hiermit können für einen geometrisch definierten Teil des Bilanzraumes Netzparameter zugewiesen werden.

Trotzdem gelang es nicht, ein Netz zu erstellen, das den Anforderungen genügte. Ab einer gewissen Feinheit ließen sich die Vernetzungsparameter nicht weiter verkleinern, ohne dass es zu mehrfachen Programmabstürzen kam. Diese Abstürze waren zwar insofern reproduzierbar, dass sie immer wieder auftraten, jedoch traten sie zu unterschiedlichen Zeiten des Vernetzungsprozesses auf. In seltenen Fällen gelang eine Vernetzung, nachdem das Programm vorher mehrfach abgestürzt war und keine Veränderung an den Einstellungen vorgenommen worden war.

Dieses stochastische Ausfallverhalten erschien mir für einen zielführenden Vernetzungsprozeß nicht akzeptabel.

Weitergehend wurde eine Vernetzung mit einem „Hexa-Core“-Netztyp angestrebt. Hexa-Core ist ein hybrider Netztyp, der dazu dienen soll, die Vorteile eines unstrukturierten Netzes, nämlich einfache Darstellung von Geometrien, mit den Vorteilen eines strukturierten Netzes bezüglich verringerter Rechendauer und Speicherbedarf, zu kombinieren. Realisiert wird das durch einige Schichten Tetraeder um die Geometrie, an die sich zur Vernetzung des umgebenden Volumens Hexaeder anschließen.

Leider stellten sich die Möglichkeiten, den Übergang von Tetraedern zu Hexaedern zu beeinflussen, als sehr begrenzt heraus. An diesem Übergang entstanden zum Teil stark degenerierte Tetraeder, die aufgrund ihrer Form und Größe zu deutlich sichtbaren Netzteinflüssen im Strömungsbild führten. Um diesem Problem abzuweichen, wurde ein kleinerer Kasten in den bestehenden Bilanzraum eingefügt. Dieser Kasten umspannt die Flosse mit geringem Abstand. Innerhalb dieses Kastens wurde ein reines Tetraeder-Netz erzeugt. Aufgrund der geringen Größe konnte hier ein genügend feines Netz erzeugt werden, ohne die zur Verfügung stehende Hardware zu überfordern. Der Rest des Bilanzraumes wurde mit dem oben beschriebenen Hexa-Core-Verfahren vernetzt. Die so entstandenen Netze wurden in einem weiteren Schritt zu einem Rechnernetz verschmolzen. Die Übergänge, die sich jetzt zwischen Tetraedern und Hexaedern ergaben, waren aufgrund der einfacheren Form des Zwischenkastens hinreichend glatt.

Zur Darstellung der oberflächennahen Strömung stellte sich die Notwendigkeit der Verwendung sogenannter „Prism-Layers“ heraus. Diese flachen, in Art eines O-Netzes die Flossenoberfläche umschließenden Schichten reichen keineswegs aus, die Grenzschicht direkt zu modellieren. Sie unterstützen lediglich die Funktion der Grenzschichtmodelle.

Die Netzparameter wurden bei der Vernetzung beider Geometrien gleich gewählt, um unterschiedliche Netzeinflüsse ausschließen zu können.

Für die tetraedrische Vernetzung der Flosse und des direkt die Flosse umgebenden Raumes wurden folgende Werte gesetzt:

#### Global Mesh

Scale factor: 32  
Maximum element size: 32

#### Surface Mesh

Maximum element size: 0.3  
Initial height: 0.5  
Height ratio: 1.2  
Number of layers: 5

Für die Vernetzung der Aussenströmung mit einem Hexa-Core Netztyp wurden folgende Werte gesetzt:

#### Global Mesh

Scale factor: 16  
Maximum element size: 32

#### Mesh Size for Parts

##### Volume

Maximum element size: 3

Für die Prism-Layer Schichten schließlich:

#### Global Mesh

Scale factor: 1  
Maximum element size: 32

#### Mesh Size for Parts

Flosse

Maximum element size: 0.5  
Initial height: 1  
Height ratio: -  
Number of layers: 5

Vor dem Export des Netzes nach CFX wurde der lediglich als Hilfskonstruktion für die Vernetzung erstellte Innenkasten wieder aus der Geometrie herausgelöscht.

## 3.2 Simulationsparameter

### 3.2.1 Turbulenzmodelle

Da es zur Zeit unmöglich ist, turbulente Vorgänge in dreidimensionalen Strömungen direkt zu simulieren, wird die Verwendung eines Turbulenzmodells notwendig.

CFX stellt mehrere Turbulenzmodelle zur Auswahl. Als Standardmodell wird das  $k-\varepsilon$  Modell empfohlen. Das  $k-\varepsilon$  Modell ist ein Wirbel-Viskositäts-Modell und gehört zur Gruppe der Zwei-Gleichungsmodelle. Es ist stabil und numerisch robust. Nicht so gut geeignet ist das  $k-\varepsilon$  Modell bei Grenzschichtablösung, Strömungen in rotierenden Fluiden und Strömungen über gekrümmte Oberflächen. Es bietet insofern für viele Strömungsfälle einen guten Kompromiß zwischen Genauigkeit und Robustheit.

Das BSL-Modell ist ein Modell aus der Gruppe der Reynoldsspannungsmodelle, die auch als SMC-Modelle (Second Moment Closure) bezeichnet werden. Das BSL-Modell basiert auf Transportgleichungen für die Komponenten des Reynoldsschen Spannungstensors und der Dissipationsrate. Nachteilig am BSL-Modell ist eine gegenüber dem  $k-\varepsilon$  Modell höhere mathematische Komplexität, die zu reduzierter numerischer Robustheit und erhöhtem Rechenaufwand führt. Als Vorteil steht dagegen, dass durch die Berücksichtigung turbulenter Transportgleichungen starke Stromlinienkrümmungen und Sekundärströmungseffekte präziser simuliert werden. BSL verwendet ein SMC- $\omega$  Modell für die Strömung in Wandnähe. Eine der Grenzschicht entsprechende Auflösung des oberflächennahen Netzes ist nicht erforderlich.

Aufgrund der zu erwartenden stark gekrümmten Stromlinien und Sekundärströmungseffekte im Bereich der Tuberkel wurde das BSL-Modell ausgewählt. Auch zur Berechnung der Strömung über die im Vorderkantenbereich stark gekrümmte Flossenoberfläche erscheint das BSL-Modell dem  $k-\varepsilon$  Modell überlegen.

Das BSL-Modell ist bezüglich seines Konvergenzverhaltens etwas empfindlicher als das  $k-\varepsilon$  Modell. ANSYS [1] empfiehlt deshalb, bei Konvergenzproblemen zunächst eine durchkonvergierte Lösung mit dem  $k-\varepsilon$  Modell zu erstellen und mit dieser Lösung als Startwert eine Simulation mit dem BSL-Modell durchzuführen. Dieser Empfehlung wurde hier grundsätzlich gefolgt.

### 3.2.2 Simulationsrechnungen

Die verschiedenen Anströmfälle wurden jeweils durch am Eintritt definierte karthesische Geschwindigkeitskomponenten realisiert. Der Turbulenzgrad der Anströmung ist medium intensity (5%) . Die parallel zur Hauptströmungsrichtung stehenden Wände des Bilanzraumes wurden als reibungsfreie Wände, die Flosse selbst als reibungsbehaftete Wand definiert.

Die Austrittsflächen wurden als Outlet mit der Option Average Static Pressure festgelegt.

Es folgt eine Übersicht über die durchgeführten Simulationsrechnungen, d.h. die Anströmfälle, und die dabei verwendeten Turbulenzmodelle und Advektionsschemata.

#### Glatte Flosse in Wasser (2,6 m/s):

##### Glatt1810:

gerade angeströmter Fall, Turbulenzmodell zunächst  $k-\varepsilon$ , Advektionsschema Upwind für 31 Iterationsschritte, davon ausgehend für 66 Schritte High Resolution. Dann Wechsel des Turbulenzmodells auf BSL, Advektionsschema High Resolution beibehalten, nach weiteren 75 Schritten Residuum von  $E-05$  erreicht.

##### GlattW10:

$10^\circ$  Inzidenz, Advektionsschema Upwind, Turbulenzmodell für 30 Schritte  $k-\varepsilon$ , dann BSL. Nach 180 Schritten mit BSL Wechsel des Advektionsschemas auf Specified Blend Factor = 0,25. Nach 86 Schritten den Blend Factor auf 0,5 erhöht. 103 Schritte mit Blend Factor 0,5, dann 100 Schritte mit 0,6. Erhöhung des Blend Factors auf 0,7 für weitere 150 Schritte. Erhöhung des Blend Factors auf 0,75 für 125 Schritt, dann Erhöhung auf 0,8. Bei einem Blend Factor von 0,8 begannen die Residuen divergent zu schwingen. Um Vergleichbarkeit mit anderen Rechnungen herzustellen, wurde das Advektionsschema High Resolution für 150 Schritte verwendet, Konvergenz ließ sich nicht erzielen. Die Residuen schwankten im Bereich  $8 E-04$ .

##### GlattW20:

$20^\circ$  Inzidenz, Advektionsschema Upwind, Turbulenzmodell für 150 Schritte  $k-\varepsilon$ , dann BSL. Nach 65 Schritten mit BSL Wechsel des Advektionsschemas auf Specified Blend Factor = 0,25 für 90 Schritte. Erhöhung des Blend Factors auf 0,5 für 40 Schritte, daran anschließend Erhöhung auf 0,75 für 20 Schritte. Dann Advektionsschema High Resolution für 105 Schritte.

In diesem Fall ließ sich auch bei der stabilst möglichen Einstellung mit  $k-\varepsilon$  und dem Advektionsschema Upwind keine Konvergenz erreichen.

Um eine mit den anderen Fällen wenigstens ansatzweise vergleichbare Lösung zu erhalten, wurde die beschriebene Anpassung des Advektionsschemas durchgeführt. Es ließ sich keine Konvergenz erreichen. Die Residuen führten regellose Schwingungen im Bereich  $E-03$  aus.

#### Flosse mit Tuberkeln in Wasser (2,6 m/s):

WB1406:

gerade angeströmter Fall, Advektionsschema High Resolution, Turbulenzmodell BSL, nach 79 Schritten Konvergenz von E-05 erreicht.

BW10:

10° Inzidenz, Advektionsschema Upwind, Turbulenzmodell für 60 Schritte k- $\epsilon$ , dann BSL. Nach 150 Schritten mit BSL Wechsel des Advektionsschemas auf Specified Blend Factor = 0,25 für 72 Schritte. Erhöhung des Blend Factors auf 0,5 für 140 Schritte, dann auf 0,55 für 120 Schritte.

An dieser Stelle begannen die Residuen divergent zu schwingen, so dass eine weitere schrittweise Erhöhung des Blend Factors als nicht zielführend erschien. Um die Vergleichbarkeit mit anderen Rechnungen herzustellen, wurde das Advektionsschema für 180 Schritte auf High Resolution gesetzt. Konvergenz ließ sich nicht erreichen, die Residuenwerte pendelten um E-03.

BW20:

20° Inzidenz, Turbulenzmodell zunächst k- $\epsilon$ , Advektionsschema Upwind für 120 Iterationsschritte, davon ausgehend für 30 Schritte High Resolution. Dann Wechsel des Turbulenzmodells auf BSL, Advektionsschema Upwind, nach weiteren 270 Schritten Wechsel des Advektionsschemas auf Specified Blend Factor = 0,25 für 150 Schritte. Erhöhung des Blend Factors auf 0.5 für 60 Schritte.

Abschließend Advektionsschema High Resolution für 90 Schritte.

In diesem Fall ließ sich auch bei der stabilsten möglichen Einstellung mit k-e und dem Advektionsschema Upwind keine Konvergenz erreichen.

Um eine mit den anderen Fällen wenigstens ansatzweise vergleichbare Lösung zu erhalten, wurde die beschriebene Anpassung des Advektionsschemas durchgeführt. Es ließ sich keine Konvergenz erreichen. Die Residuen führten regellose Schwingungen im Bereich E-03 aus.

Flosse mit Tuberkeln in Luft bei Ma=0,2 (69,2 m/s):

(Reynoldssche Ähnlichkeit durch Skalierung der Flosse)

BMa02W0:

gerade angeströmter Fall, Turbulenzmodell zunächst k- $\epsilon$ , Advektionsschema Upwind für 30 Iterationsschritte, davon ausgehend für 60 Schritte High Resolution. Dann Wechsel des Turbulenzmodells auf BSL, Advektionsschema High Resolution beibehalten, nach weiteren 71 Schritten Residuum von E-05 erreicht.

BMa02W10:

10° Inzidenz, Advektionsschema Upwind, Turbulenzmodell für 60 Schritte k- $\epsilon$ , dann BSL. Nach

180 Schritten mit BSL Wechsel des Advektionsschemas auf Specified Blend Factor = 0,25 für 95 Schritte. Erhöhung des Blend Factors auf 0,5 für 200 Schritte. Zunächst gute Konvergenz, dann beginnende Schwingungen der Residuen. Für 40 Schritte Erhöhung des Blend Factors auf 0,55 führte zu Divergenz.

Um die Vergleichbarkeit mit anderen Rechnungen herzustellen, wurde das Advektionsschema für 160 Schritte auf High Resolution gesetzt. Konvergenz ließ sich nicht erreichen, die Residuenwerte pendelten um E-03.

BMa02W20:

20° Inzidenz, Advektionsschema Upwind, Turbulenzmodell für 180 Schritte k- $\epsilon$ , dann BSL. Nach 420 Schritten mit BSL keine Konvergenz erreichbar. Wechsel des Advektionsschemas auf Specified Blend Factor =0,25 für 100 Schritte. Erhöhung auf Blend Factor 0,5 für 200 Schritte. Erhöhung auf Blend Factor 0,75 für 20 Schritte.

Um die Vergleichbarkeit mit anderen Rechnungen herzustellen, wurde das Advektionsschema für 120 Schritte auf High Resolution gesetzt. Konvergenz ließ sich nicht erreichen, die Residuenwerte pendelten um E-03.

## 4 Ergebnisse

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass nur die gerade von vorn angeströmten Simulationsfälle ein zufriedenstellendes Konvergenzverhalten aufgewiesen haben.

Die mit 10° Inzidenz angeströmten Fälle konvergierten wenigstens mit stark stabilisierenden Randbedignungen. Dies lässt sich von den 20° Inzidenz-Fällen nicht sagen.

Zusammenfassend lässt sich also die Aussagekraft der hier gewonnenen Ergebnisse über das bei numerischen Simulationen normale Maß hinaus anzweifeln. Dies gilt insbesondere für die 20° Inzidenz Fälle.

Trotzdem wurden die gewonnenen Ergebnisse ausgewertet, um zumindest einen möglichen Erklärungsansatz für die Funktionsweise der Tuberkel zu bieten.

### 4.1 Eindimensionale Kennwerte

#### 4.1.1 Koordinatensysteme

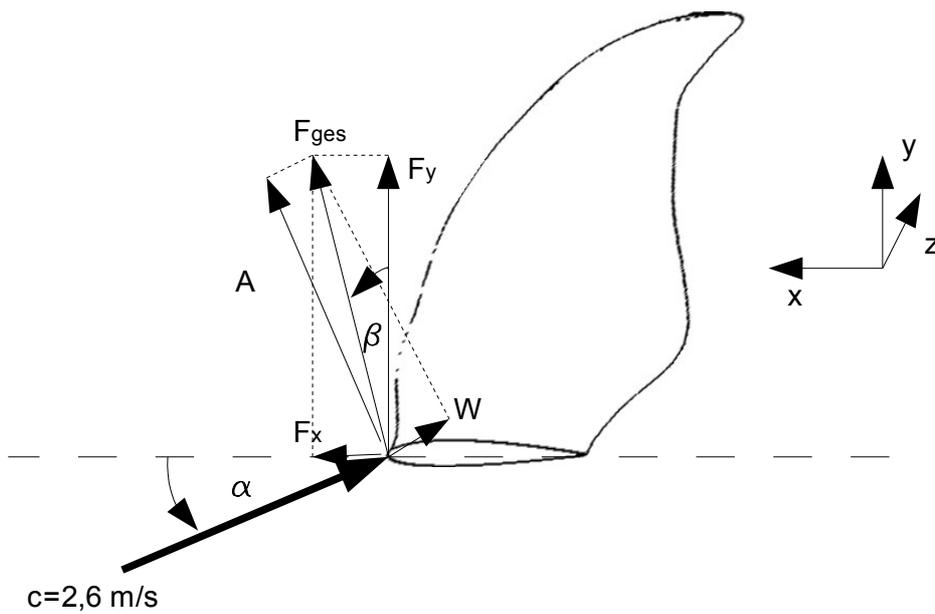
Aufgrund der importierten Geometrien ergeben sich für die unterschiedlichen Flossenformen leicht unterschiedliche Koordinatensysteme (s. Skizzen).

Die eingezeichneten Kraftvektoren sind nicht maßstäblich und geben nicht die korrekten Winkel

wieder. Sie dienen lediglich der Erklärung der Vorzeichenkonventionen. Im folgenden negativ angegebene Kräfte und Winkel weisen dementsprechend in die Gegenrichtung.

Die angegebenen Kräfte sind die Summe der Kräfte in die angegebene Richtung vom umströmenden Fluid auf die Oberfläche der Flosse.

Flosse mit glatter Vorderkante



Es gilt:

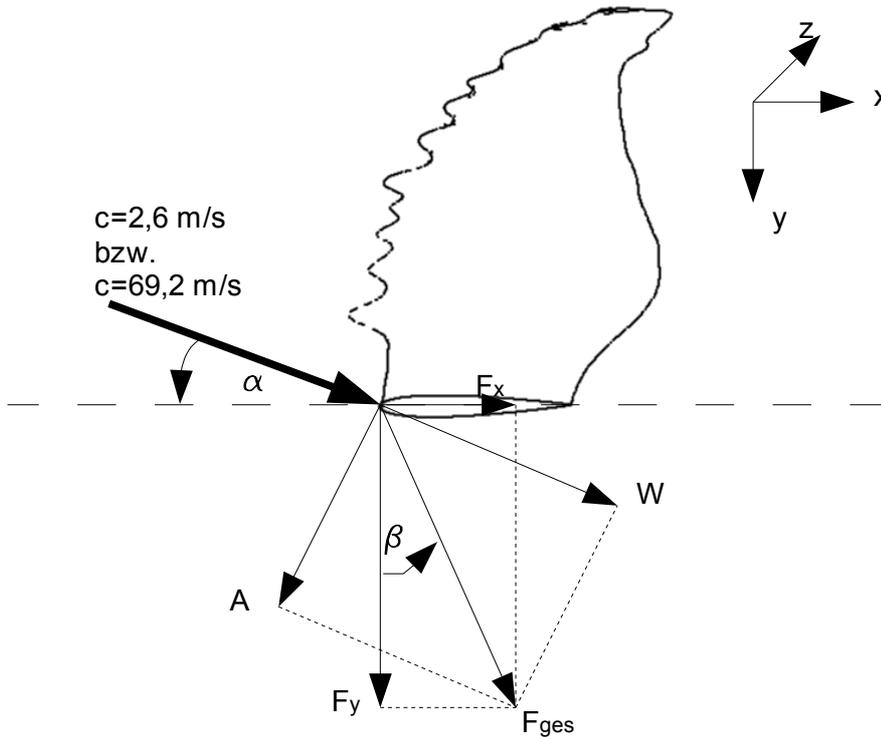
$$F_{ges} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$\beta = \text{atan}(F_x/F_y)$$

$$A = F_{ges} \cos(\alpha - \beta)$$

$$W = F_{ges} \sin(\alpha - \beta)$$

Flosse mit Tuberkeln



Es gilt:

$$F_{ges} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$\beta = \text{atan}(F_x/F_y)$$

$$A = F_{ges} \cos(\alpha + \beta)$$

$$W = F_{ges} \sin(\alpha + \beta)$$

**4.1.2 Kräfte und Auftriebs-Widerstandsverhältnis**

Glatte Flosse in Wasser

$\alpha$ [°]	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_{ges}$ [N]	$\beta$ [°]	$A$ [N]	$W$ [N]	$A/W$ [-]
0	-46,30	0,00	46,30	90,00	0,00	46,30	-
10	340,19	3640,94	3656,80	5,34	3644,70	297,22	12,26
20	-213,33	3750,21	3756,27	-3,26	3451,08	1483,11	2,33

Flosse mit Tuberkeln in Wasser

$\alpha$ [°]	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_{ges}$ [N]	$\beta$ [°]	$A$ [N]	$W$ [N]	$A/W$ [-]
0	49,31	0,00	49,31	90,00	0,00	49,31	-
10	-216,40	3464,89	3471,64	-3,57	3449,83	388,56	8,88
20	-79,19	4695,90	4696,57	-0,97	4439,79	1531,68	2,90

Flosse mit Tuberkeln in Luft

$\alpha$ [°]	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_{ges}$ [N]	$\beta$ [°]	$A$ [N]	$W$ [N]	$A/W$ [-]
0	11,52	0,00	11,52	90,00	0,00	11,52	-
10	-23,16	595,12	595,57	-2,23	590,10	80,54	7,33
20	6,45	671,59	671,62	0,55	628,88	235,76	2,67

## 4.2 Strömungsphänomene

In den folgenden Darstellungen werden Ergebnisse der Strömungssimulation der verschiedenen untersuchten Fälle einander gegenüber gestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die Flosse mit der glatten Vorderkante bei direkten Vergleichen in die gleiche Darstellungsart gedreht wie die Flosse mit Tuberkeln. Dies gibt nicht die im Kapitel 4.1.1 Koordinatensysteme beschriebene räumliche Orientierung wieder. Legenden und Geschwindigkeitsangaben sind entsprechend korrigiert dargestellt. Bei Einzeldarstellungen wurde die ursprüngliche Orientierung entsprechend Kapitel 4.1.1 beibehalten.

### 4.2.1 Profildruckverteilung

Im folgenden sind an charakteristischen Schnitten ermittelte Profildruckverteilungen sowie zugehörige Contour Plots der Geschwindigkeit in x-Richtung gezeigt. Die Contour-Plots der glatten Flosse sind von der Skala her so angepasst, dass sich trotz entgegengesetzt orientierter x-Achse gleiche Farbmuster für gleiche Geschwindigkeiten ergeben. Die Profildruckverteilungen werden mit einer rechnerisch durch eine inkompressible, reibungsfreie 2-D-Panel-Methode ermittelten Profildruckverteilung an einem NACA-0012-Profil verglichen. Quelle für die Panel-Methode ist [7].

Bei 29% der Länge der Flosse, vom Flossenansatz aus gemessen, entspricht sowohl das bucklige als auch das glatte Profil einem NACA-0012-Profil. Bei der Flosse mit buckliger Vorderkante befindet

## 4.2 Strömungsphänomene

sich genau hier ein Tal der Vorderkante. Diese beiden Fälle wurden für die Darstellung der Druckverteilung ausgewählt. Zusätzlich wurde ein Schnitt der Buckelflosse betrachtet, der bei ca. 30% der Flossenlänge genau eine Buckelspitze teilt.

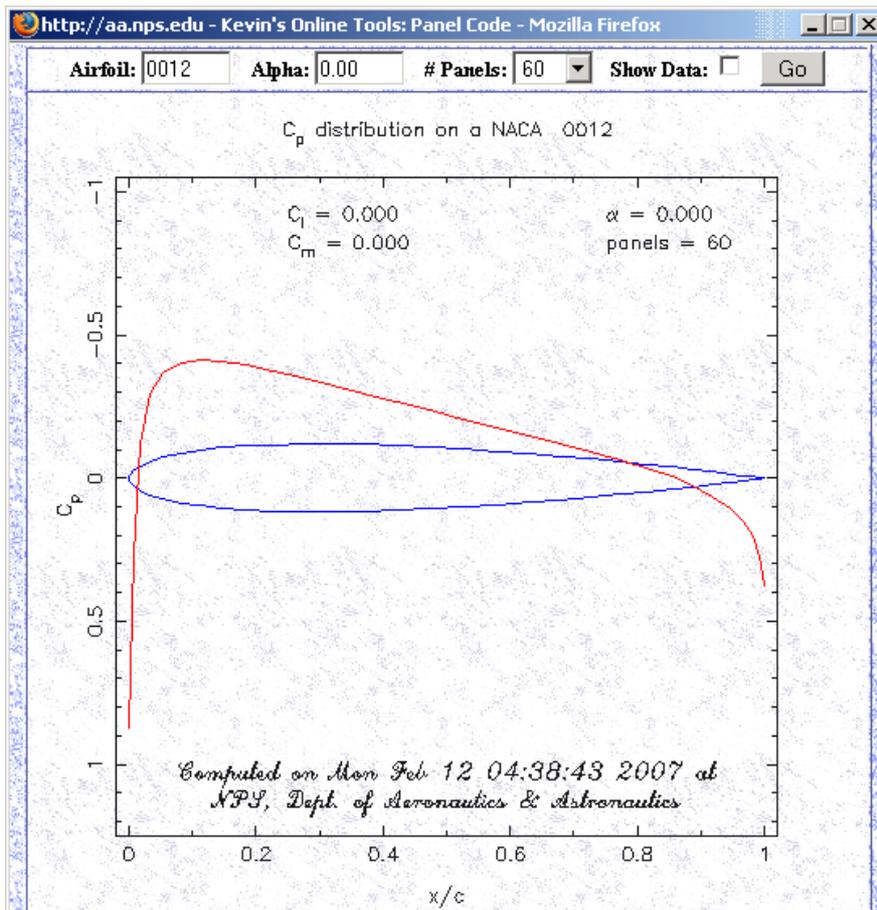


Abb. 4.1: Mithilfe einer Panel-Methode ermittelte Profildruckverteilung an einem NACA-0012 Profil bei gerader Anströmung.

## 4 Ergebnisse

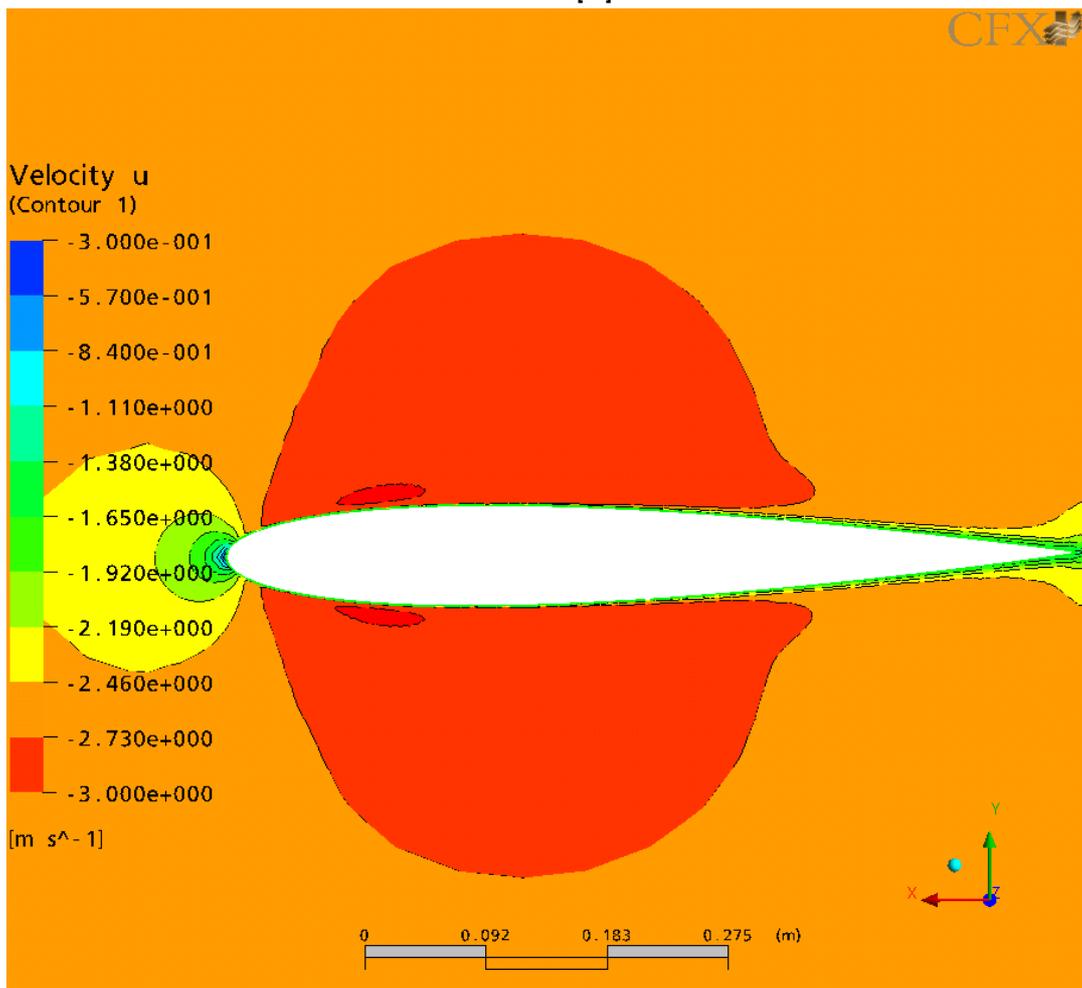
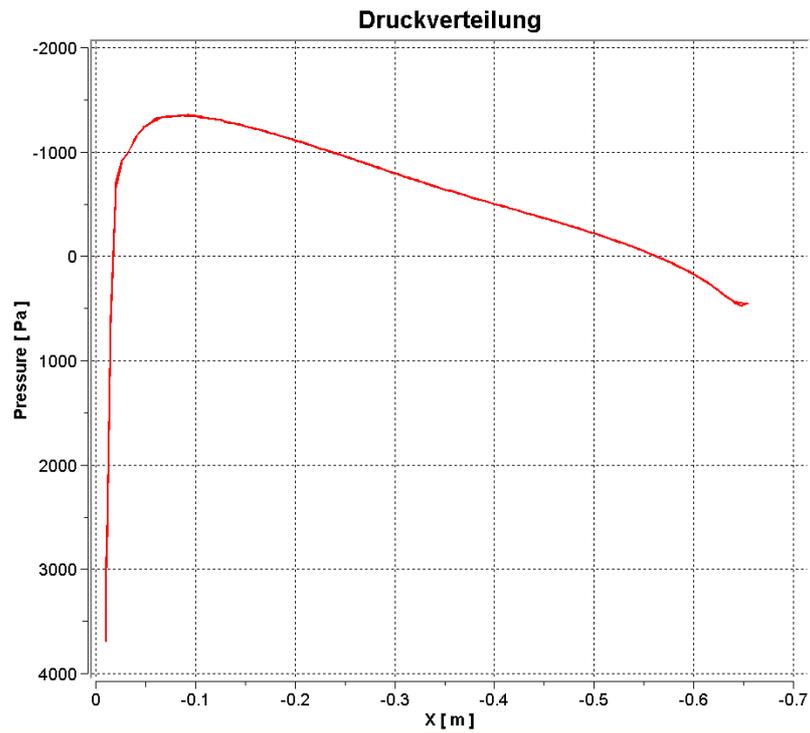


Abb. 4.2: Flosse mit glatter Vorderkante, Wasser, gerade angeströmt.

## 4.2 Strömungsphänomene

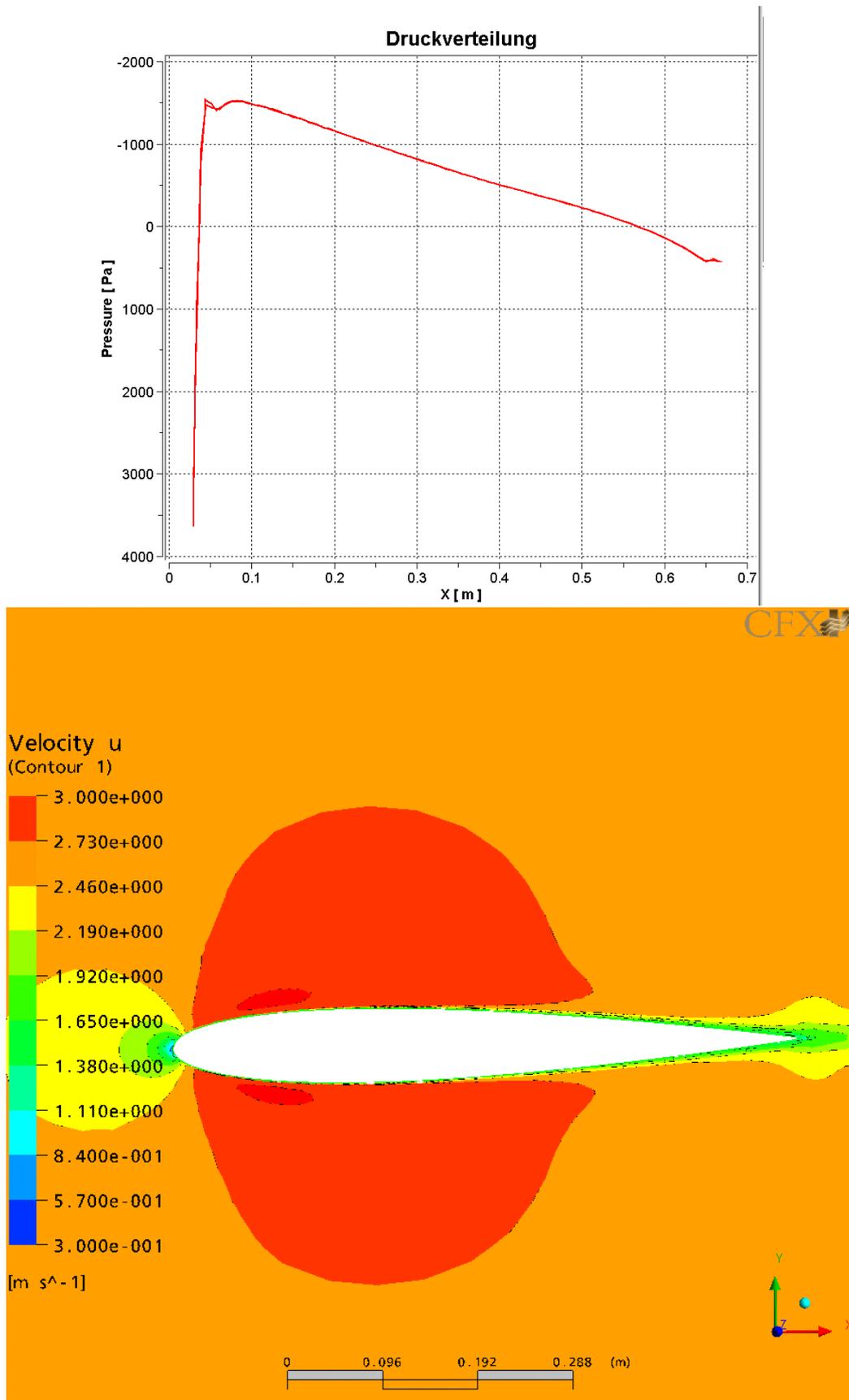


Abb. 4.3: Senke zwischen zwei Buckeln, Wasser, gerade angeströmt

## 4 Ergebnisse

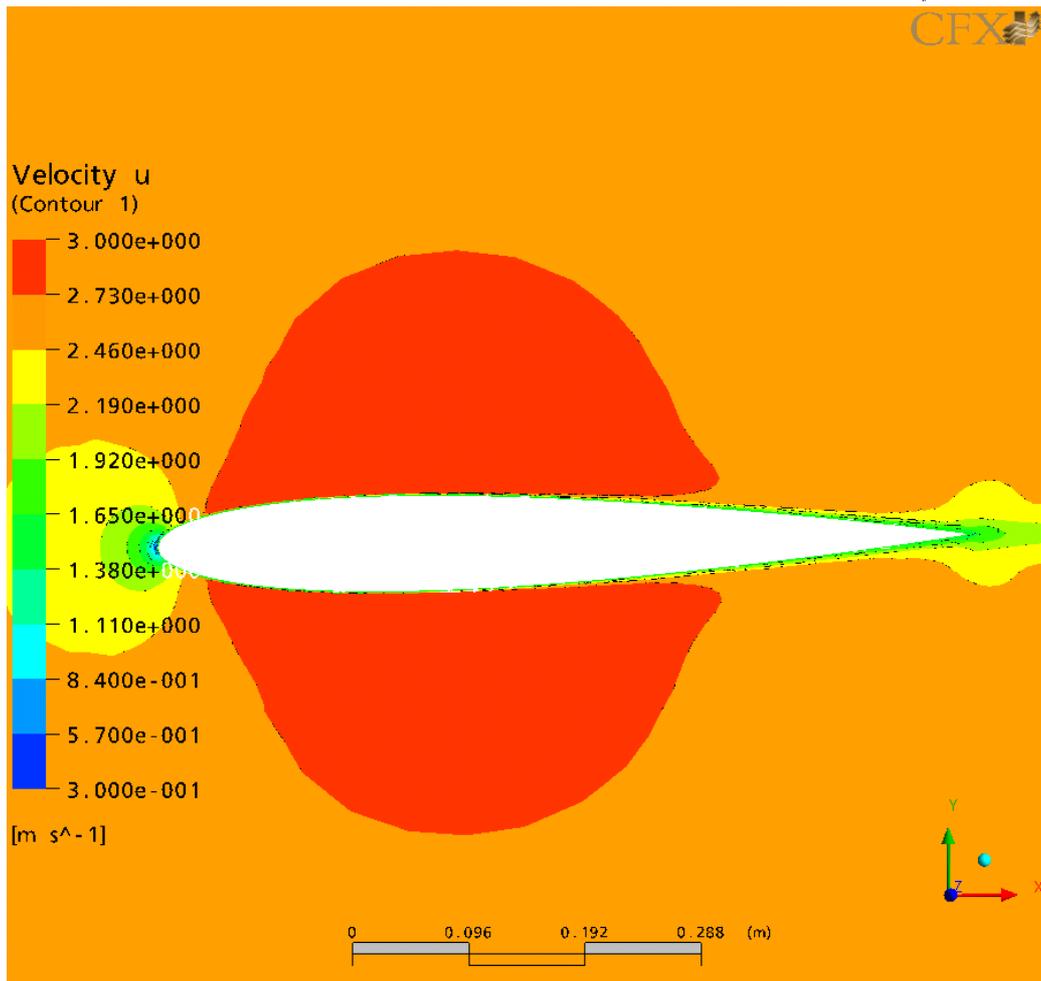
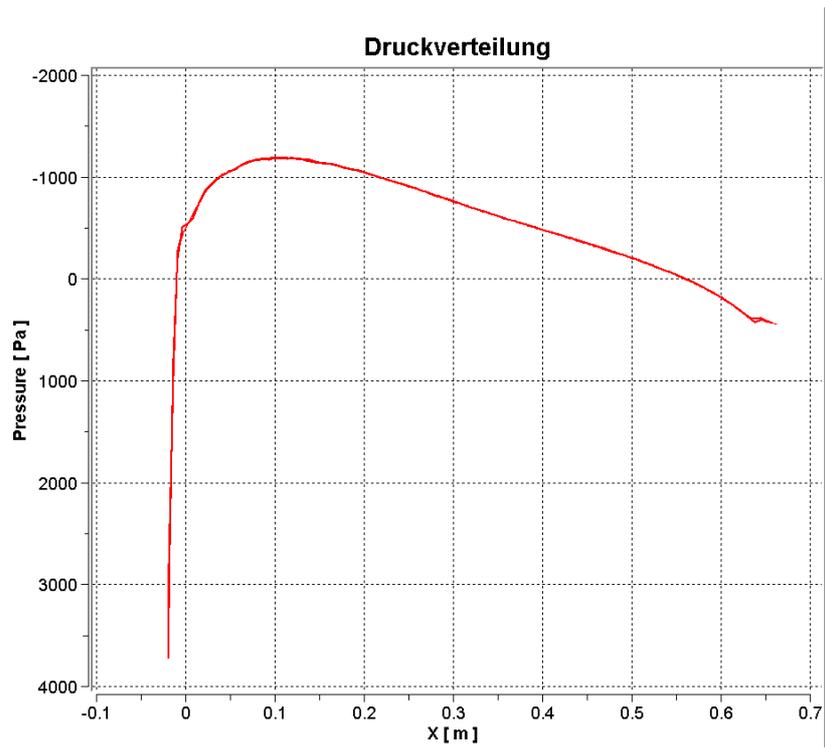


Abb. 4.4: Buckelspitze, Wasser, gerade angeströmt.

## 4.2 Strömungsphänomene

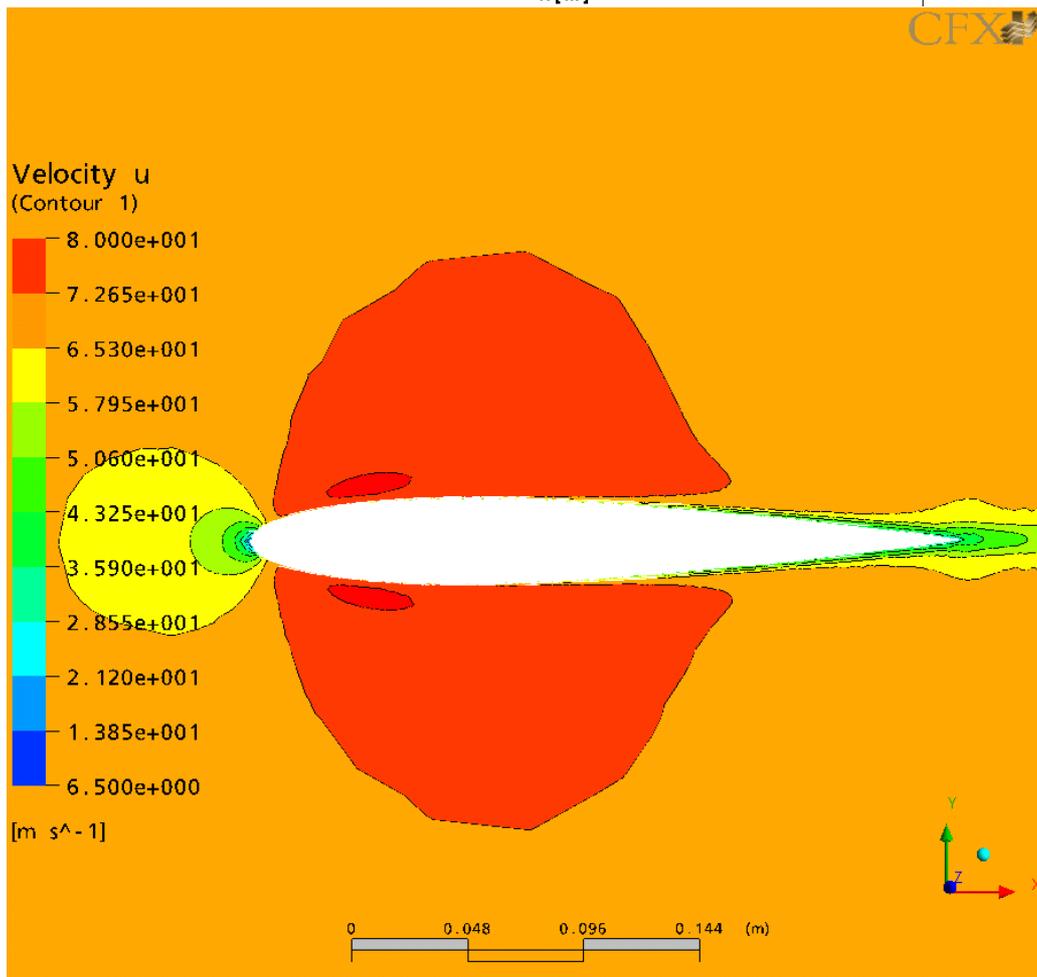
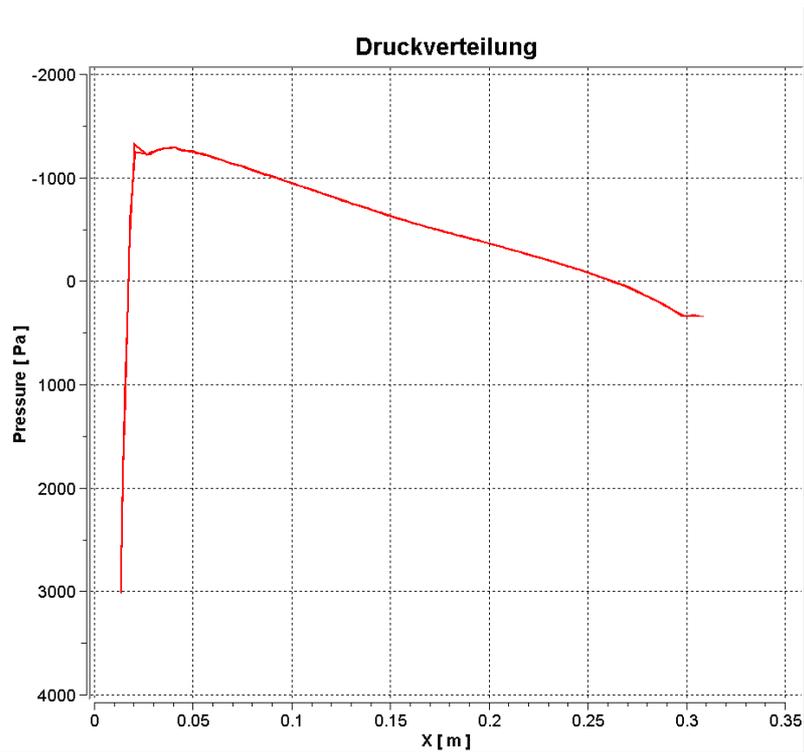


Abb. 4.5: Senke zwischen zwei Buckeln, Luft,  $Ma=0,2$ , gerade angeströmt

## 4 Ergebnisse

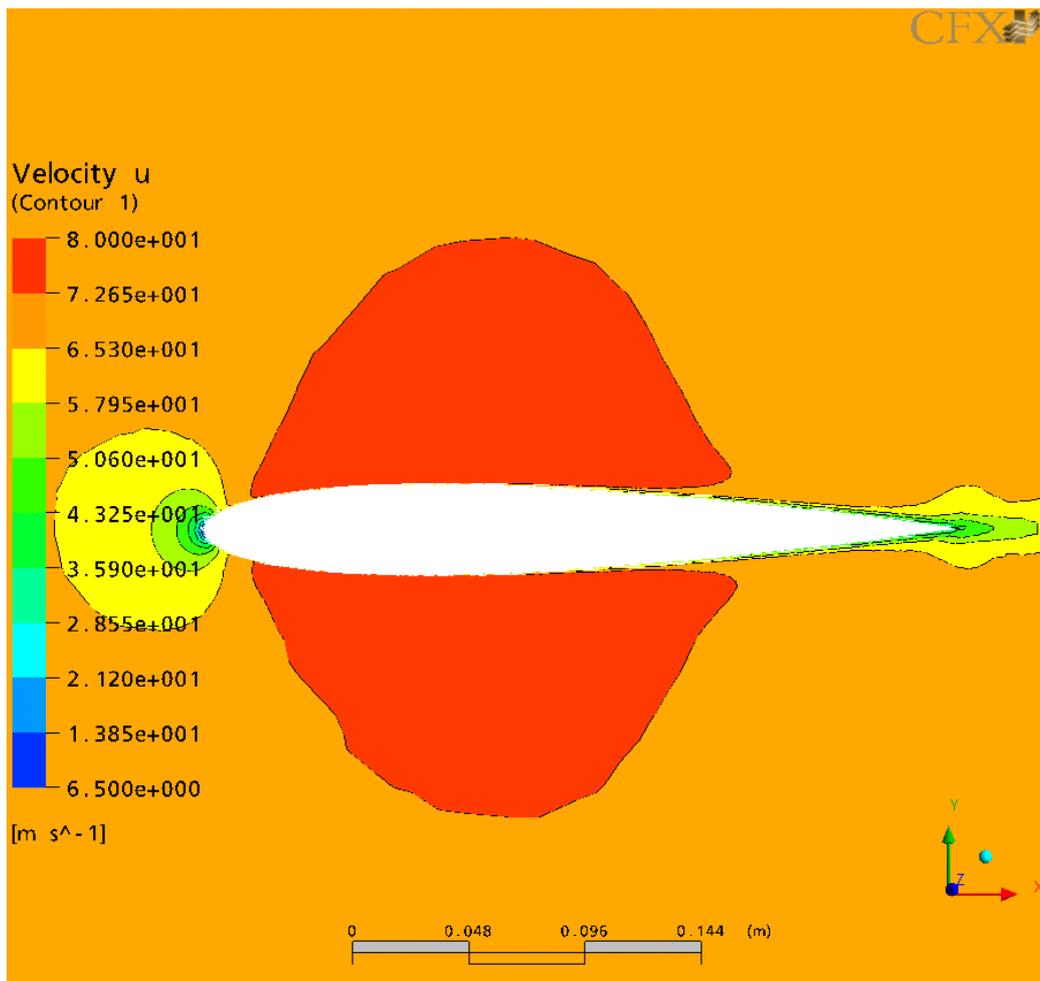
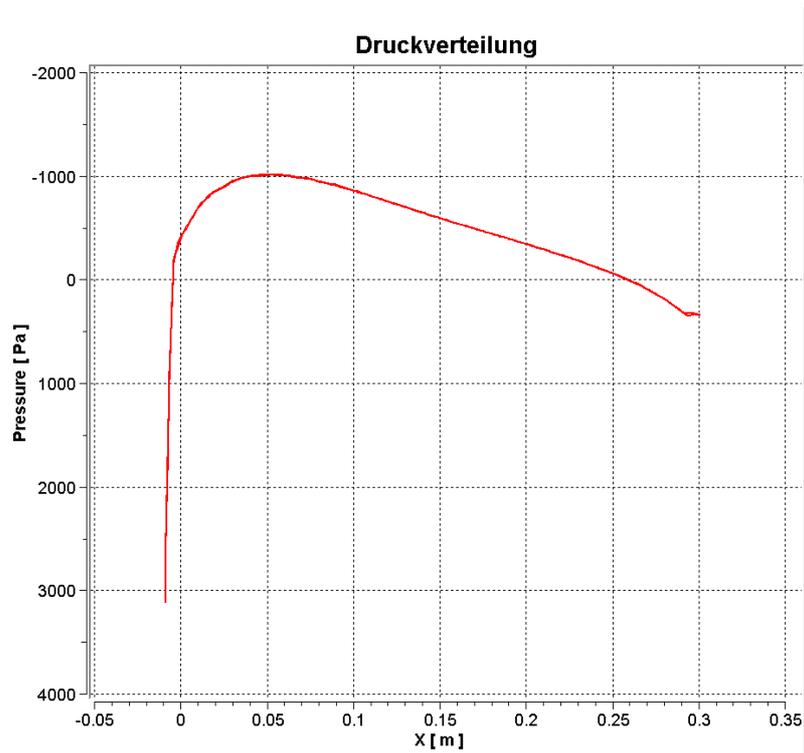


Abb. 4.6: Buckelspitze, Luft,  $Ma=0,2$ , gerade angeströmt.

## 4.2 Strömungsphänomene

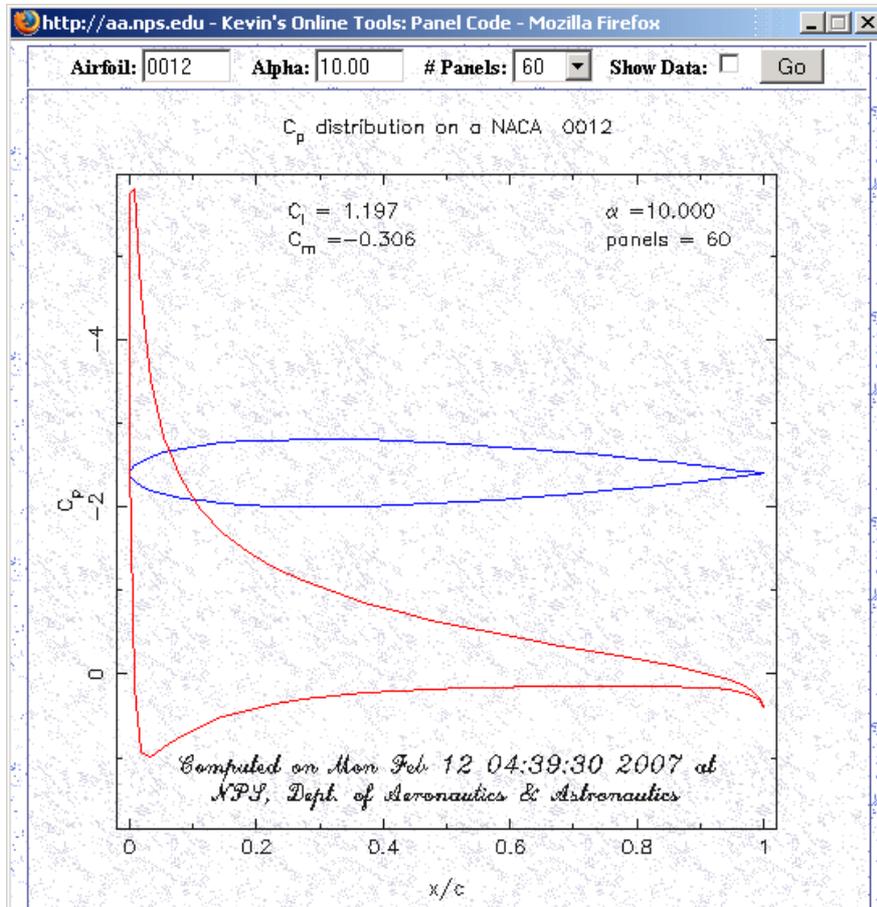


Abb. 4.7: Mithilfe einer Panel-Methode ermittelte Profildruckverteilung an einem NACA-0012 Profil bei  $10^\circ$  Inzidenz.

## 4 Ergebnisse

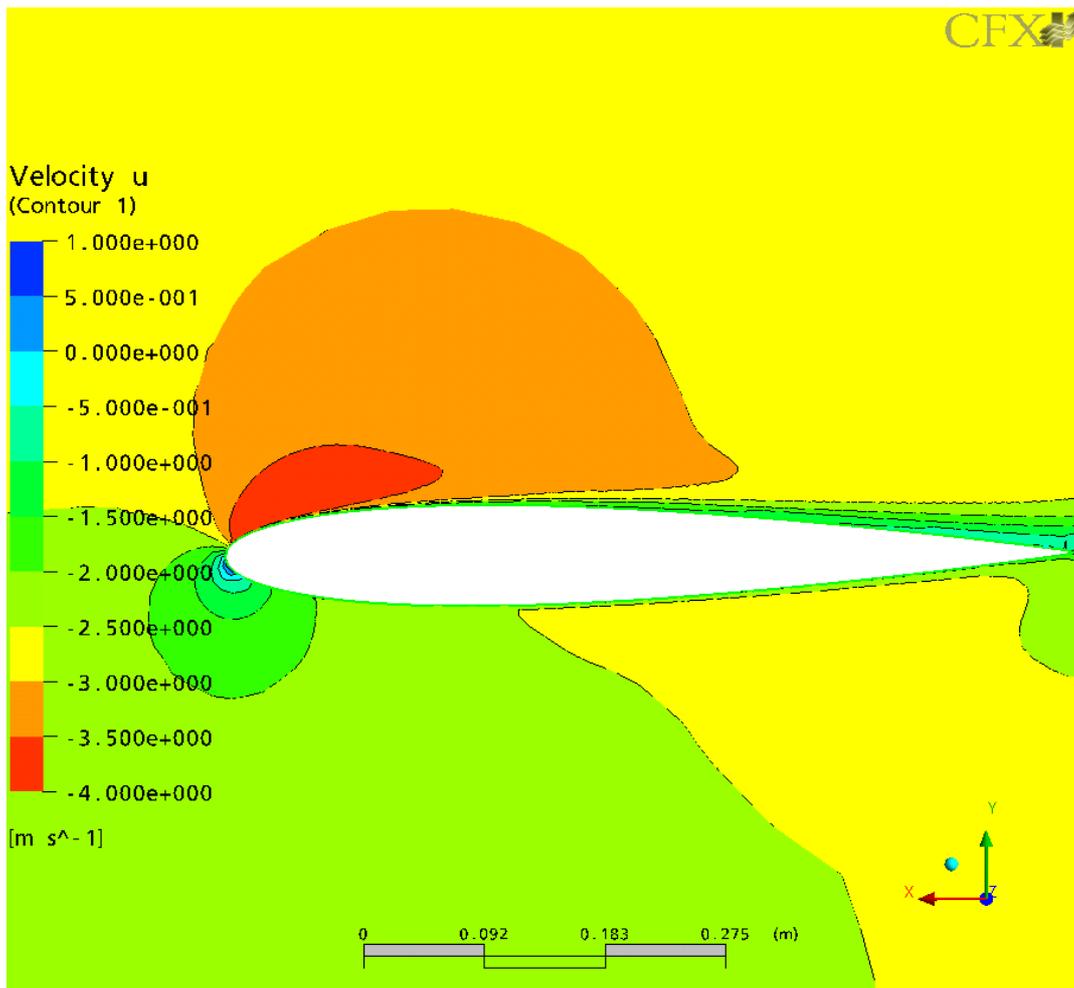
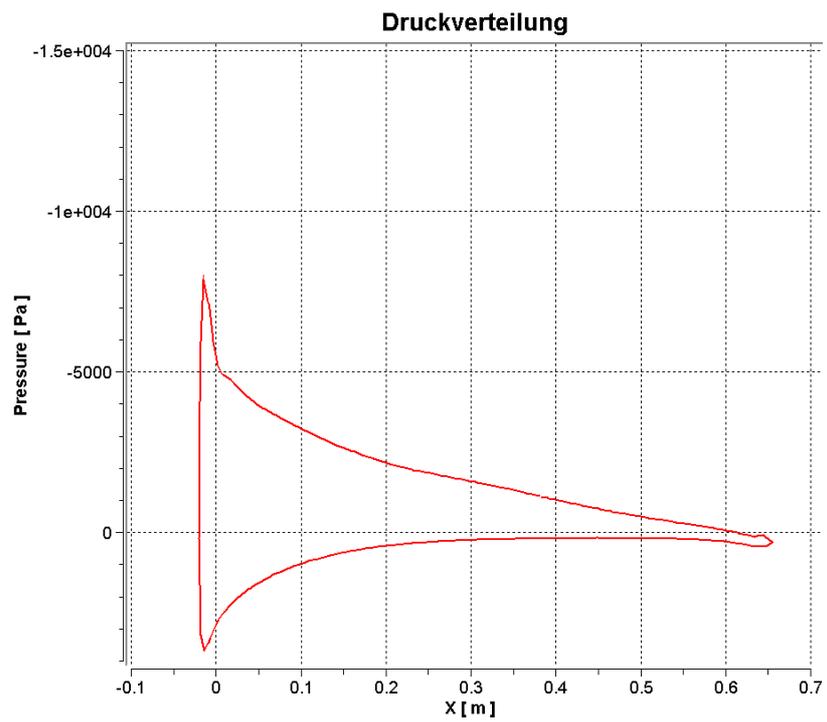


Abb. 4.8: Flosse mit glatter Vorderkante, Wasser, 10° Inzidenz

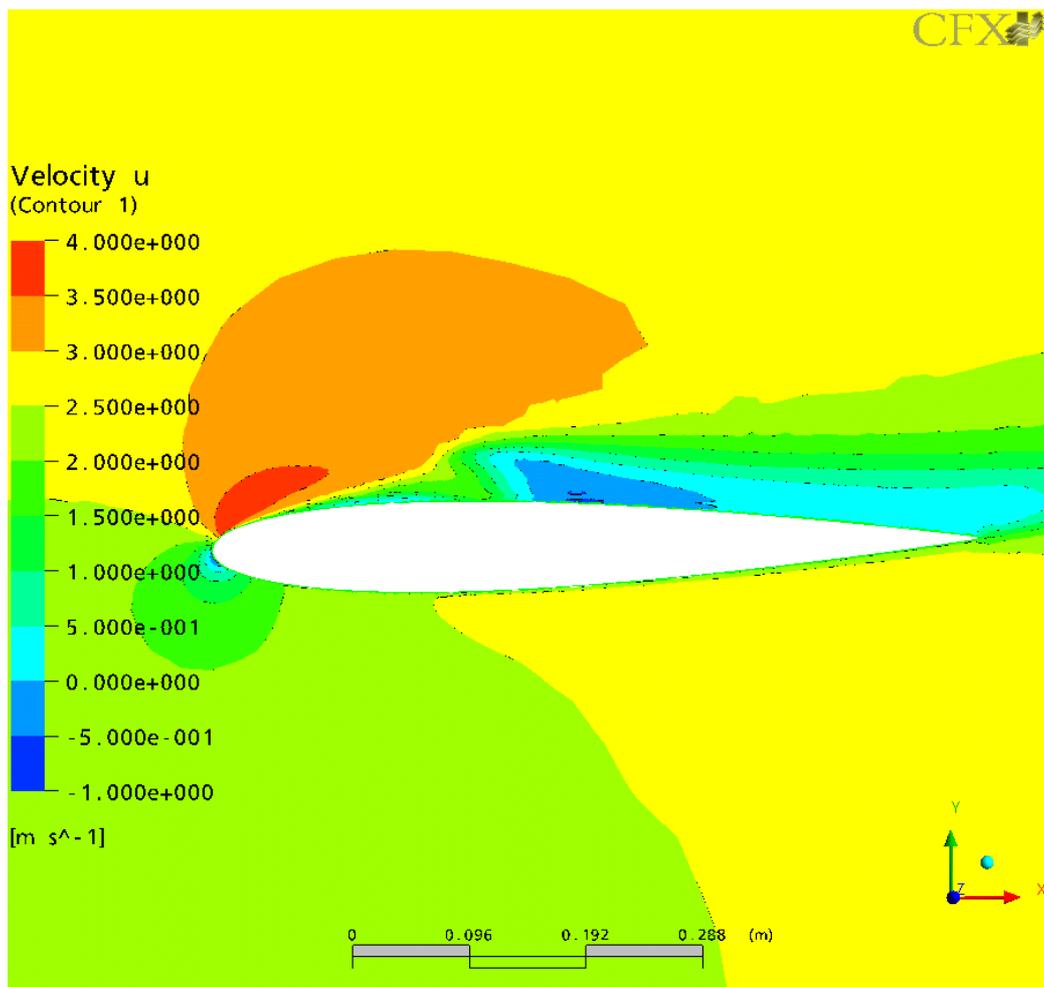
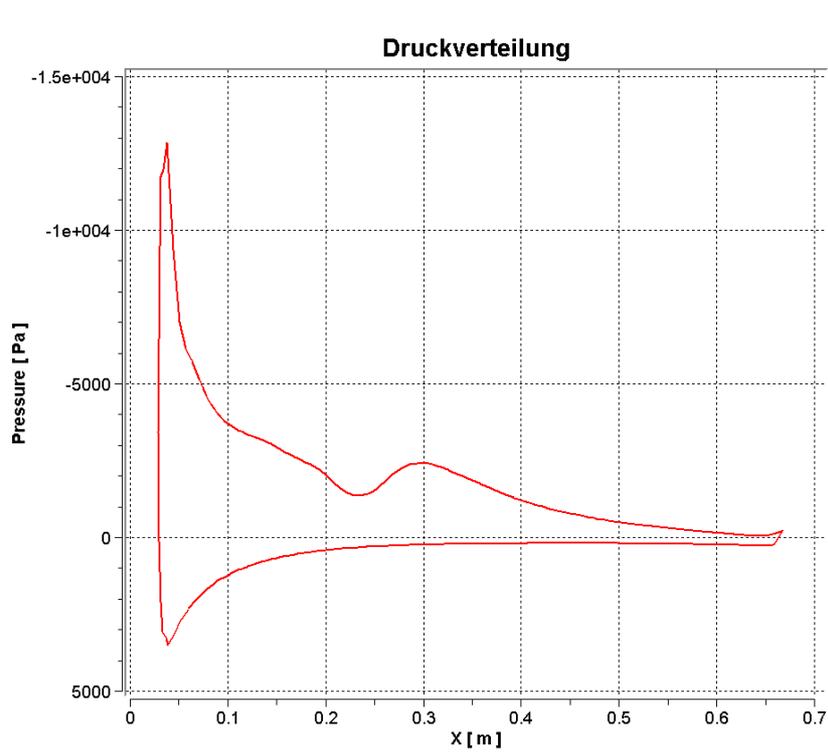


Abb. 4.9: Senke zwischen zwei Buckeln, Wasser,  $10^\circ$  Inzidenz.

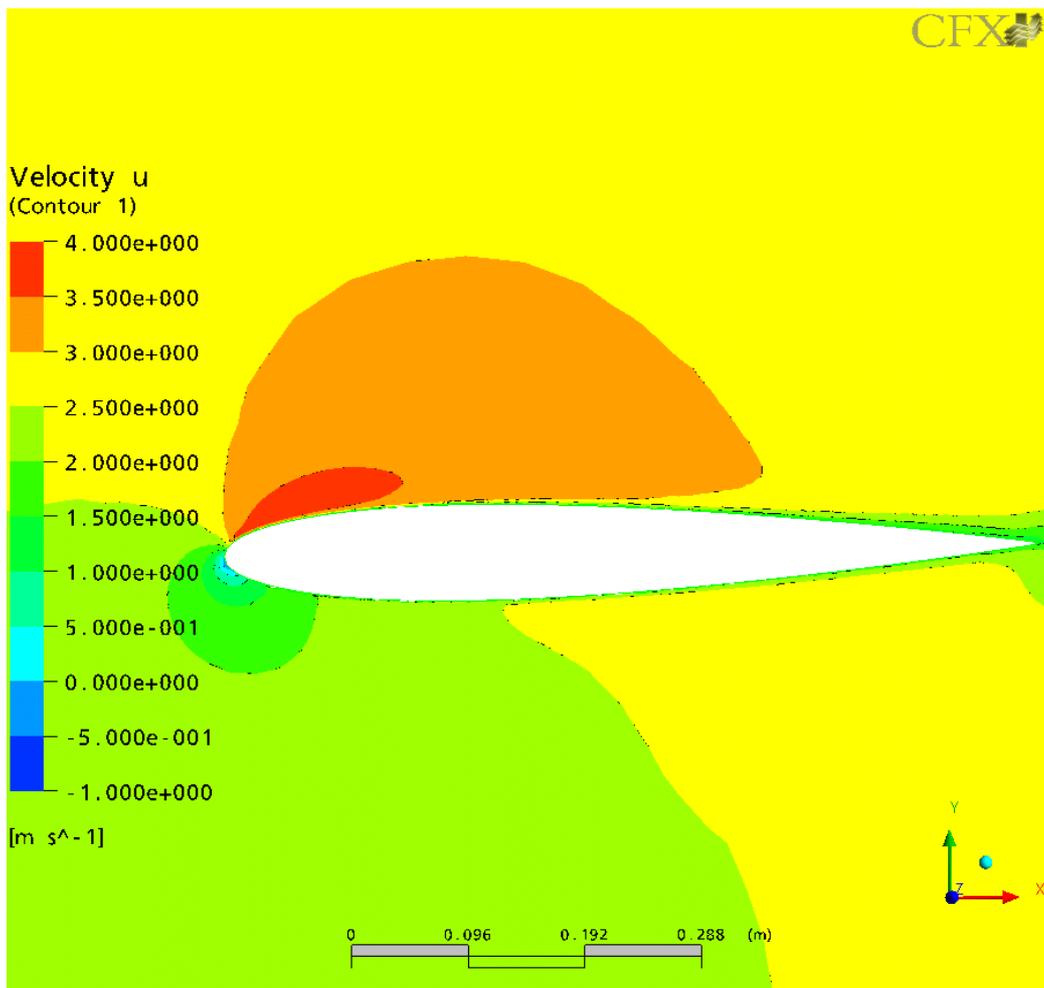
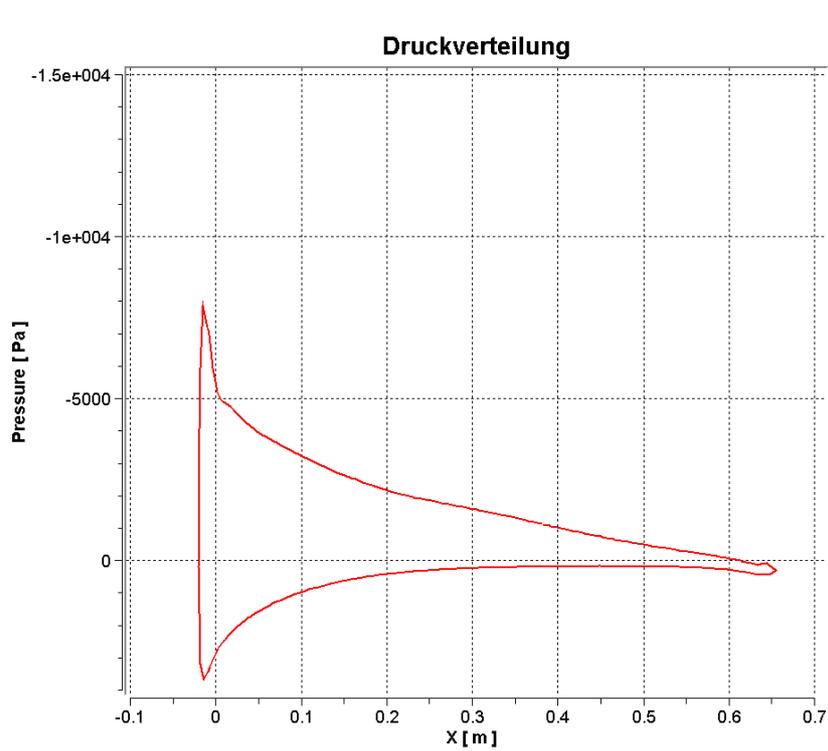


Abb. 4.10: Buckelspitze, Wasser, 10° Inzidenz.

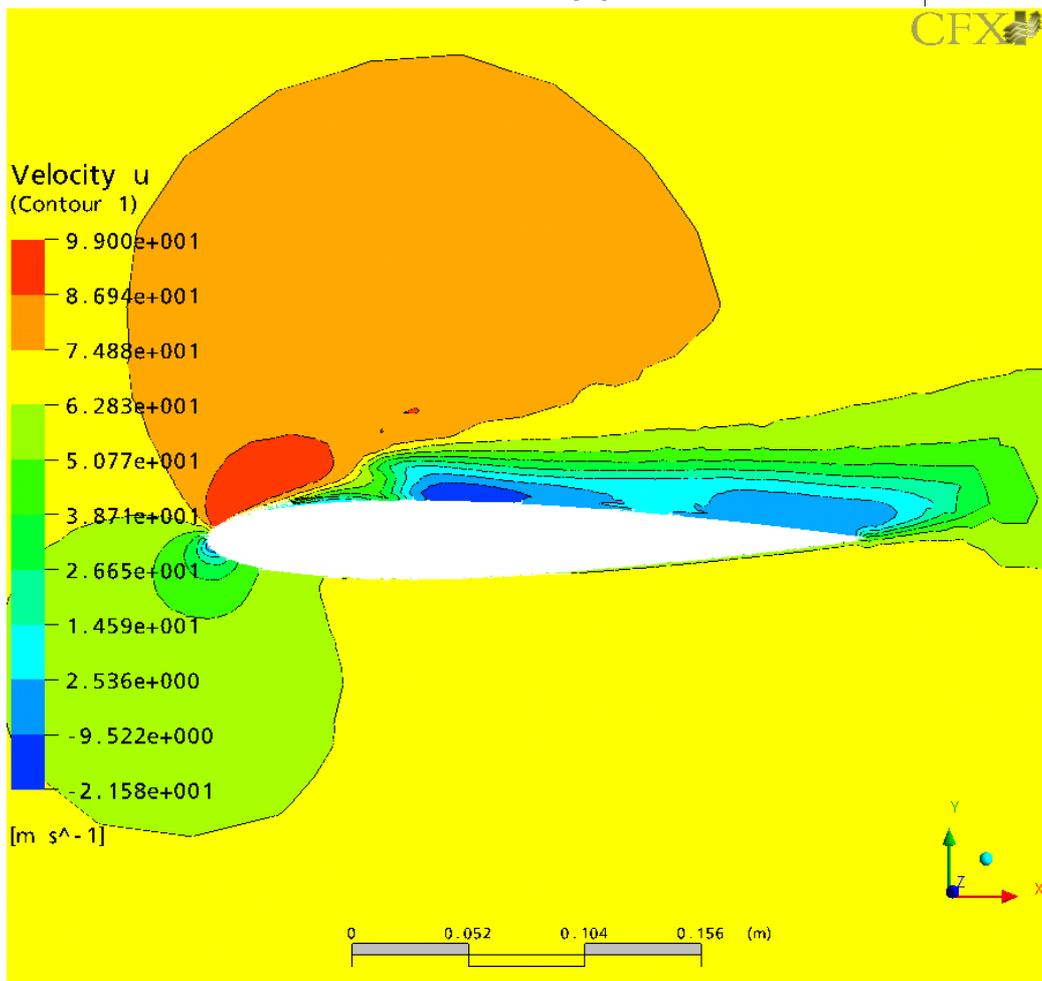
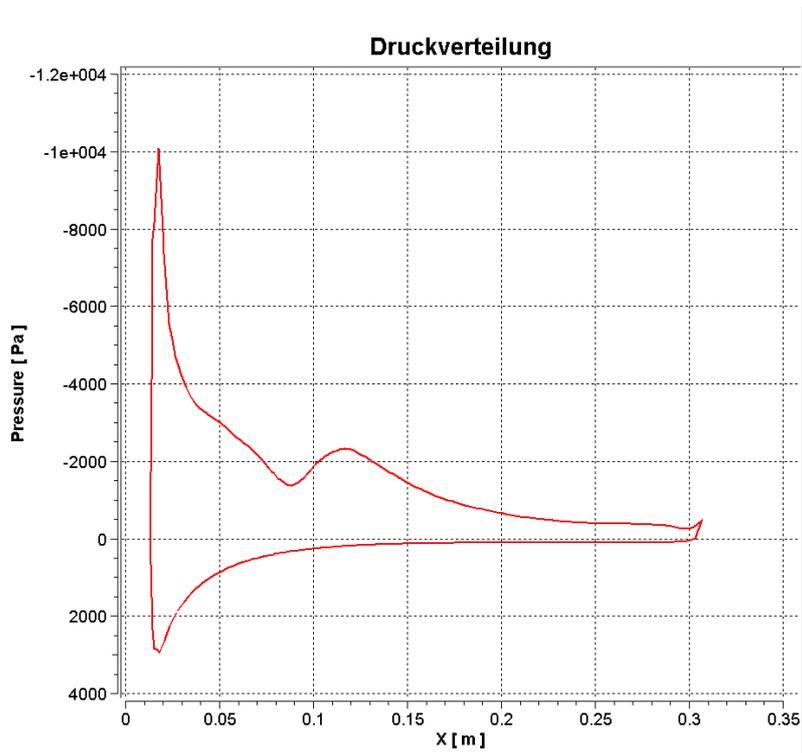


Abb. 4.11: Senke zwischen zwei Buckeln, Luft,  $Ma=0,2$ ,  $10^\circ$  Inzidenz.

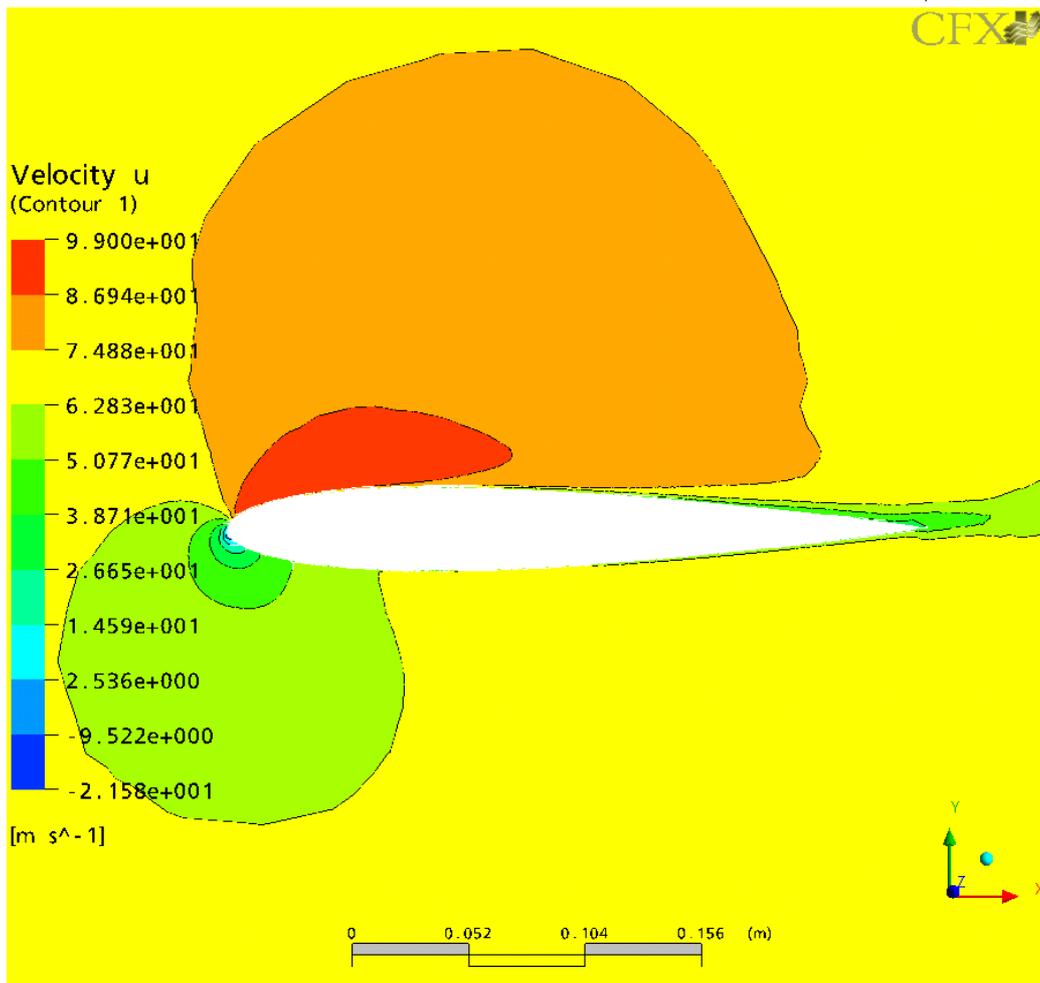
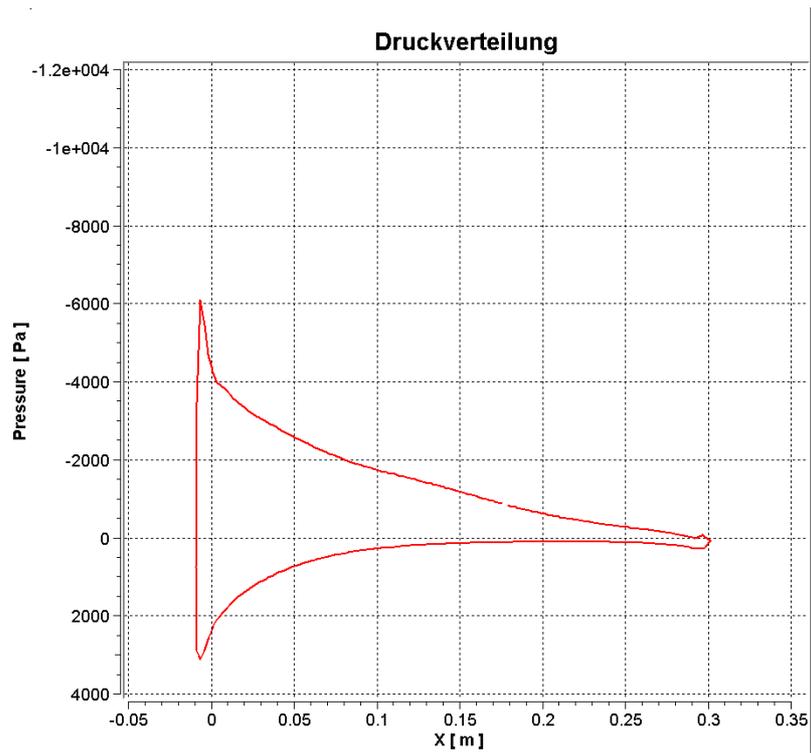


Abb. 4.12: Buckelspitze, Luft,  $Ma=0,2$ ,  $10^\circ$  Inzidenz.

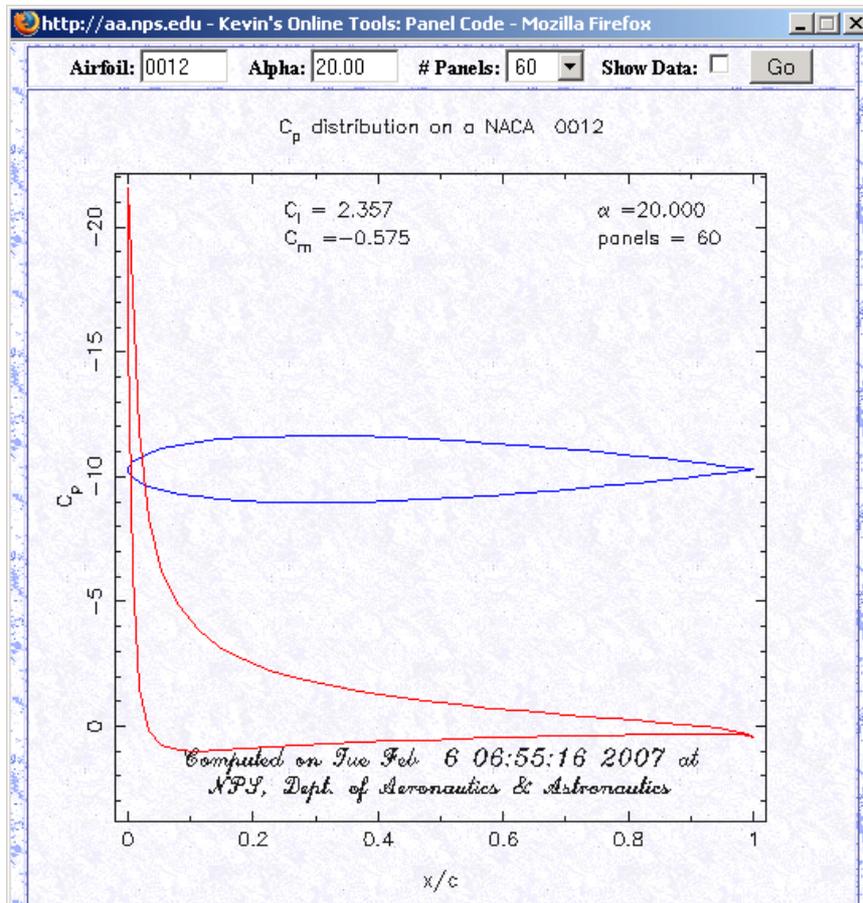


Abb. 4.13: Mithilfe einer Panel-Methode ermittelte Profildruckverteilung an einem NACA-0012 Profil bei 20° Inzidenz.

## 4 Ergebnisse

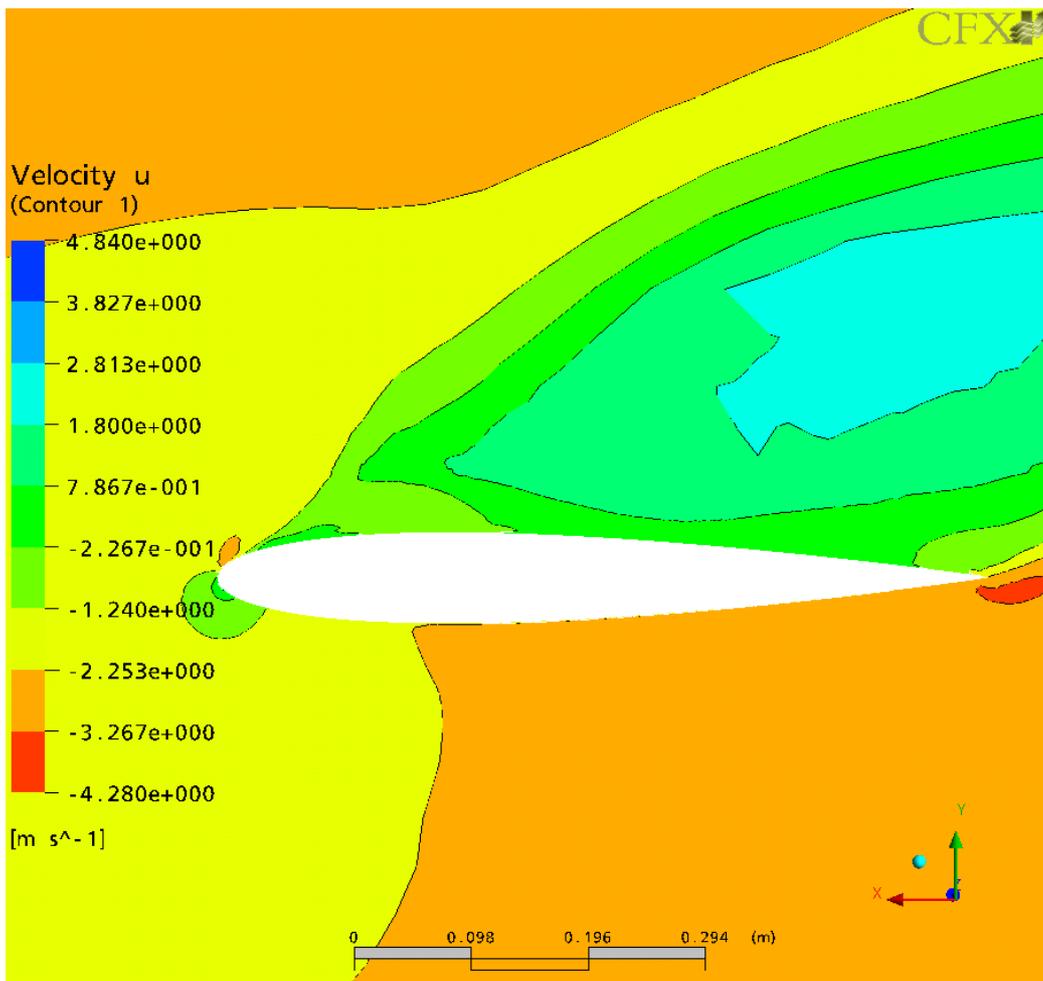
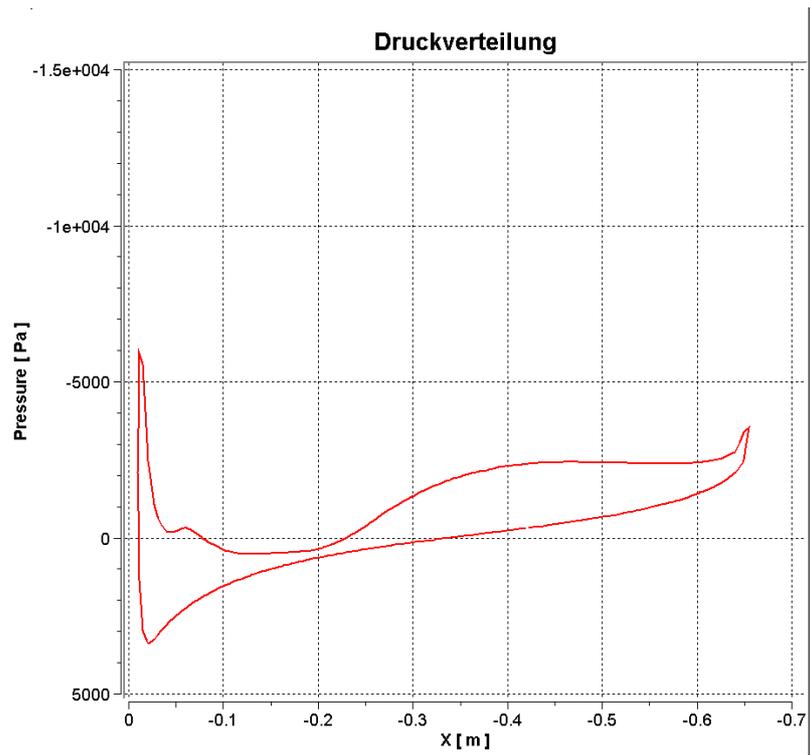


Abb. 4.14: Flosse mit glatter Vorderkante, Wasser, 20° Inzidenz.

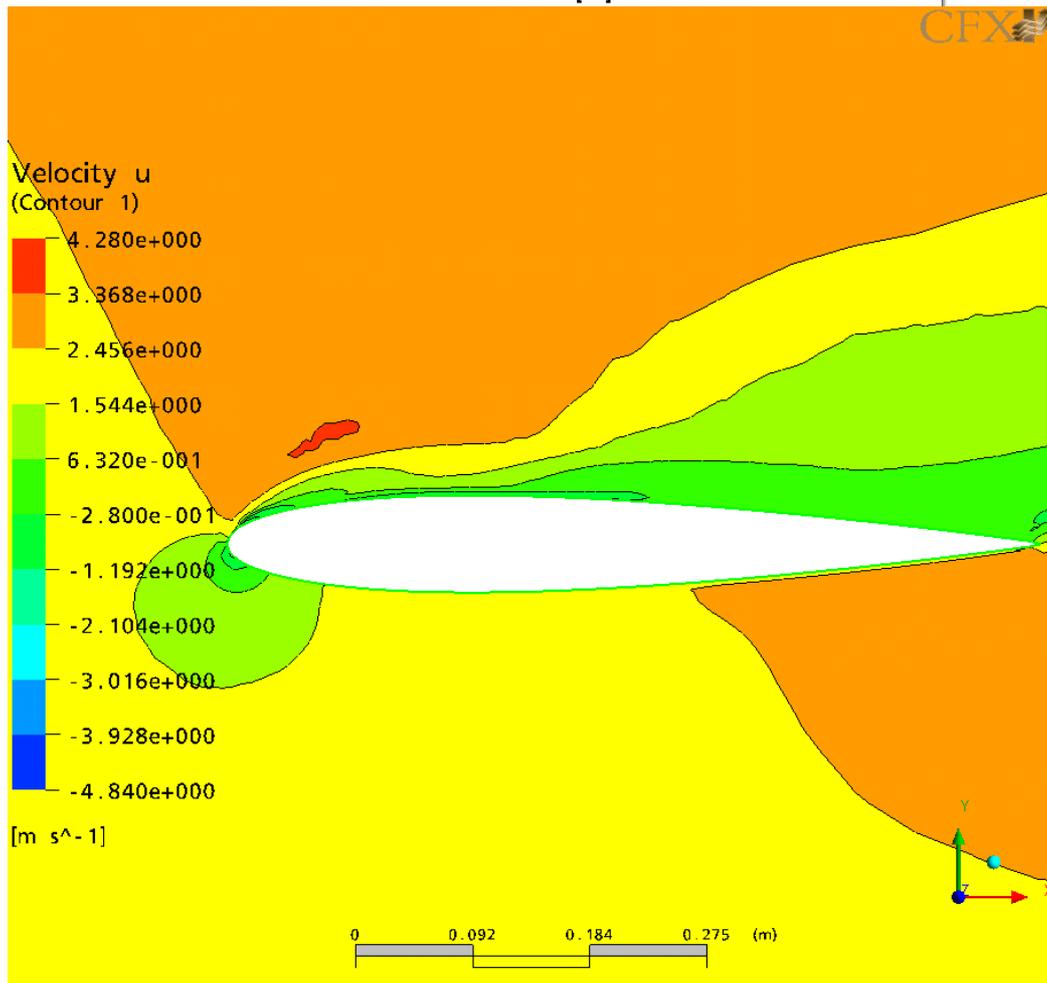
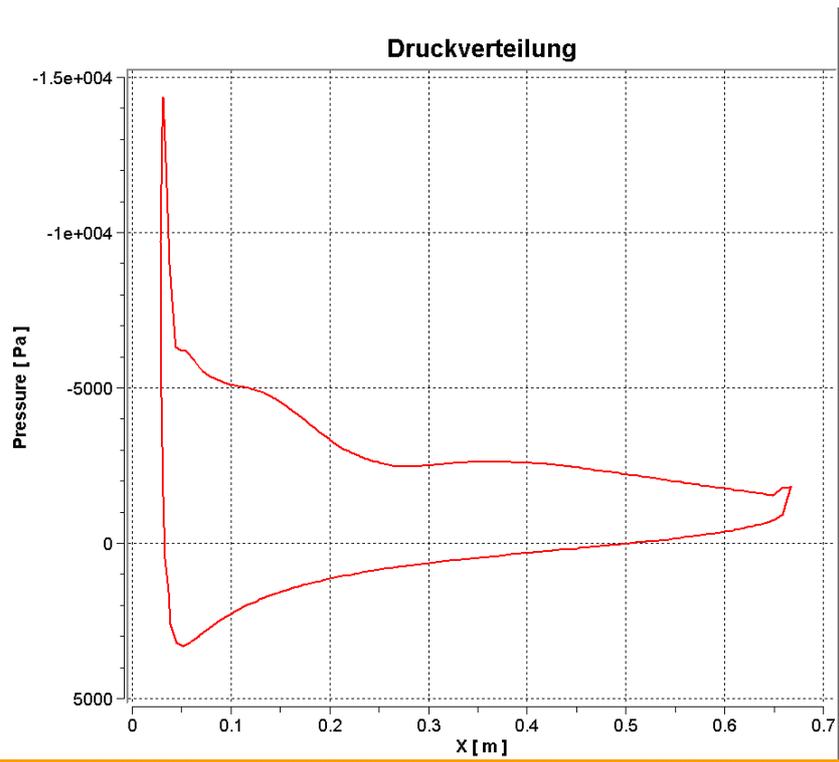


Abb. 4.15: Senke zwischen zwei Buckeln, Wasser,  $20^\circ$  Inzidenz.

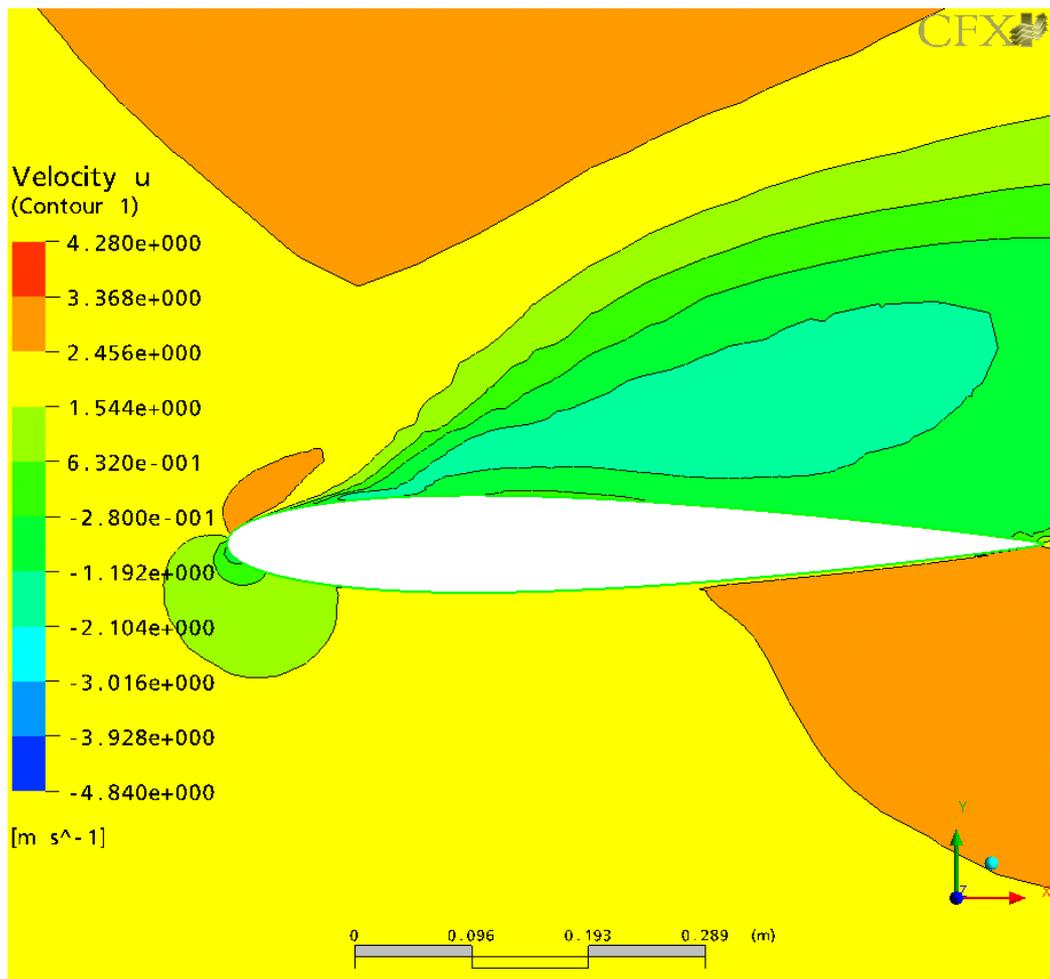
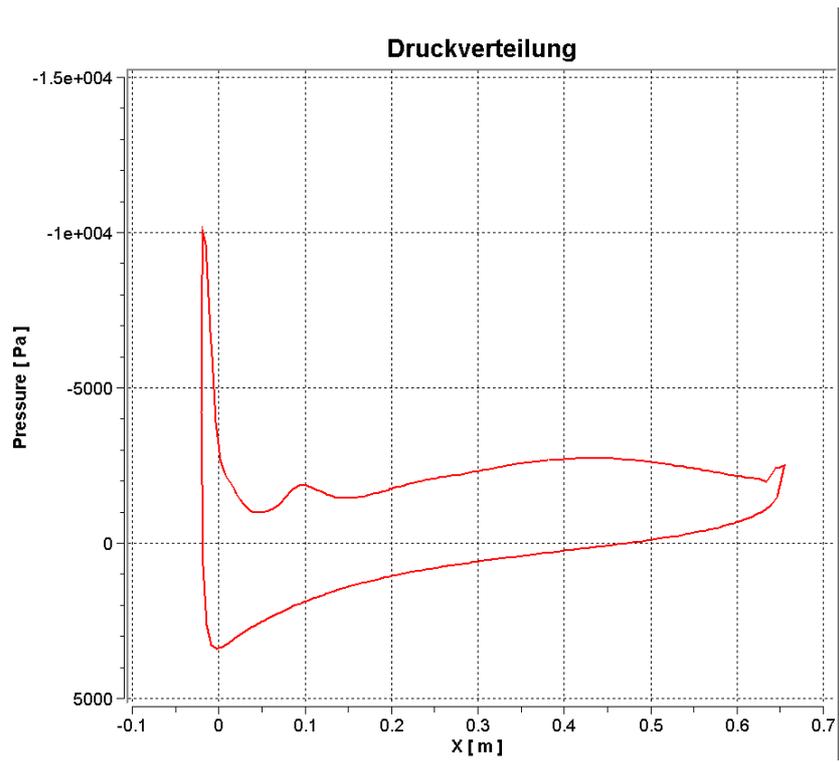


Abb. 4.16: Buckelspitze, Wasser, 20° Inzidenz.

## 4.2 Strömungsphänomene

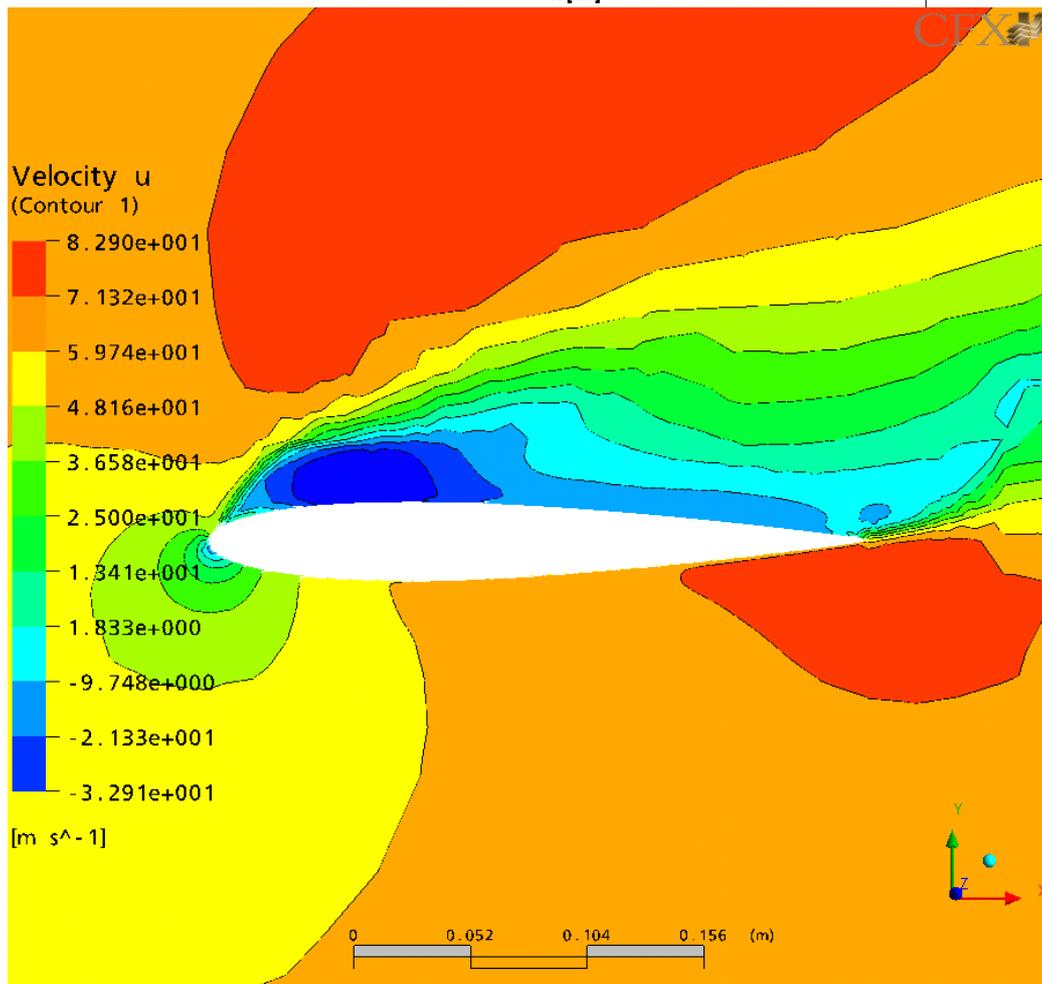
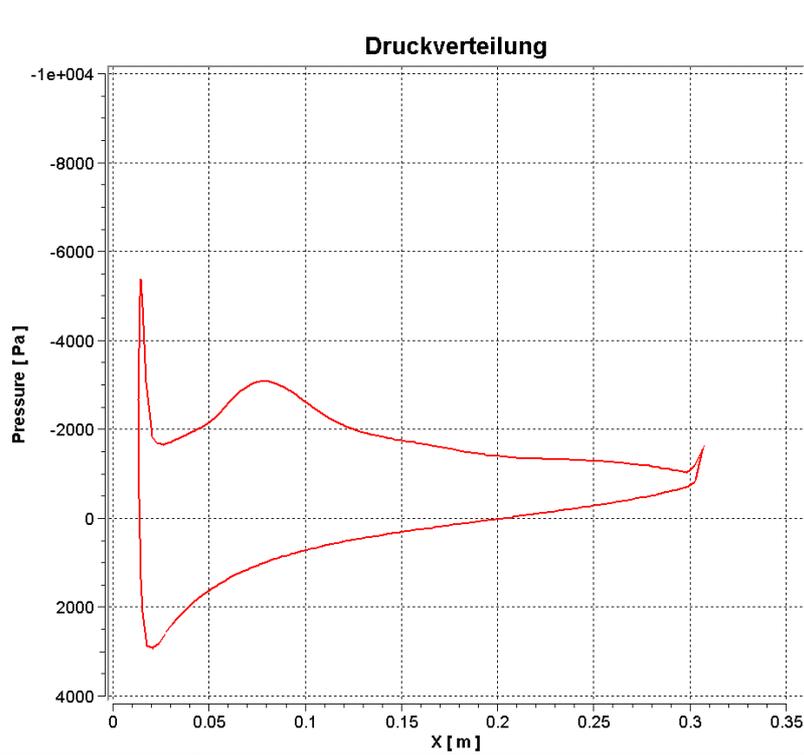


Abb. 4.17: Senke zwischen zwei Buckeln, Luft,  $Ma=0,2$ ,  $20^\circ$  Inzidenz.

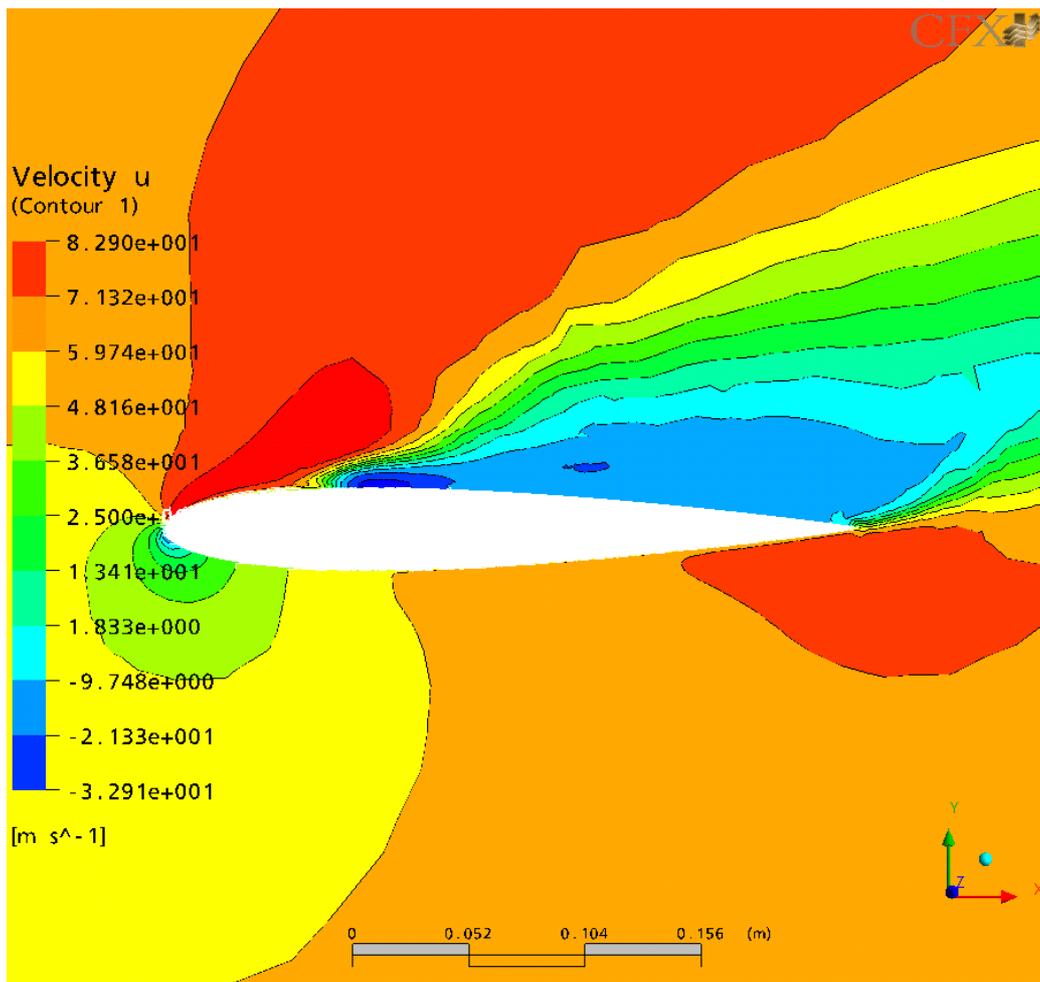
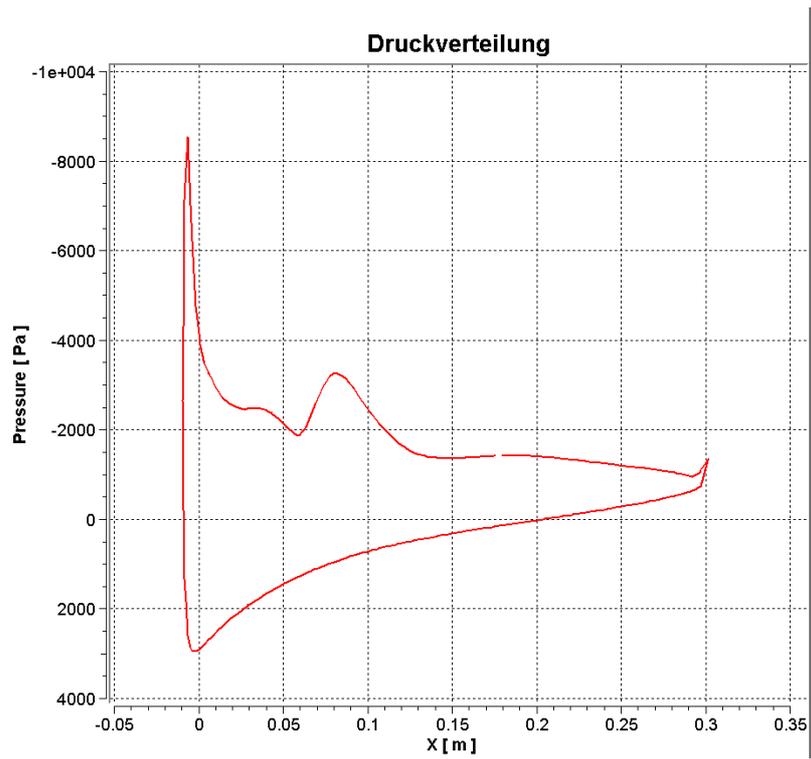


Abb. 4.18: Buckelspitze, Luft,  $Ma=0,2$ ,  $10^\circ$  Inzidenz.

## 4.2.2 Oberflächennahe Strömung

CFX

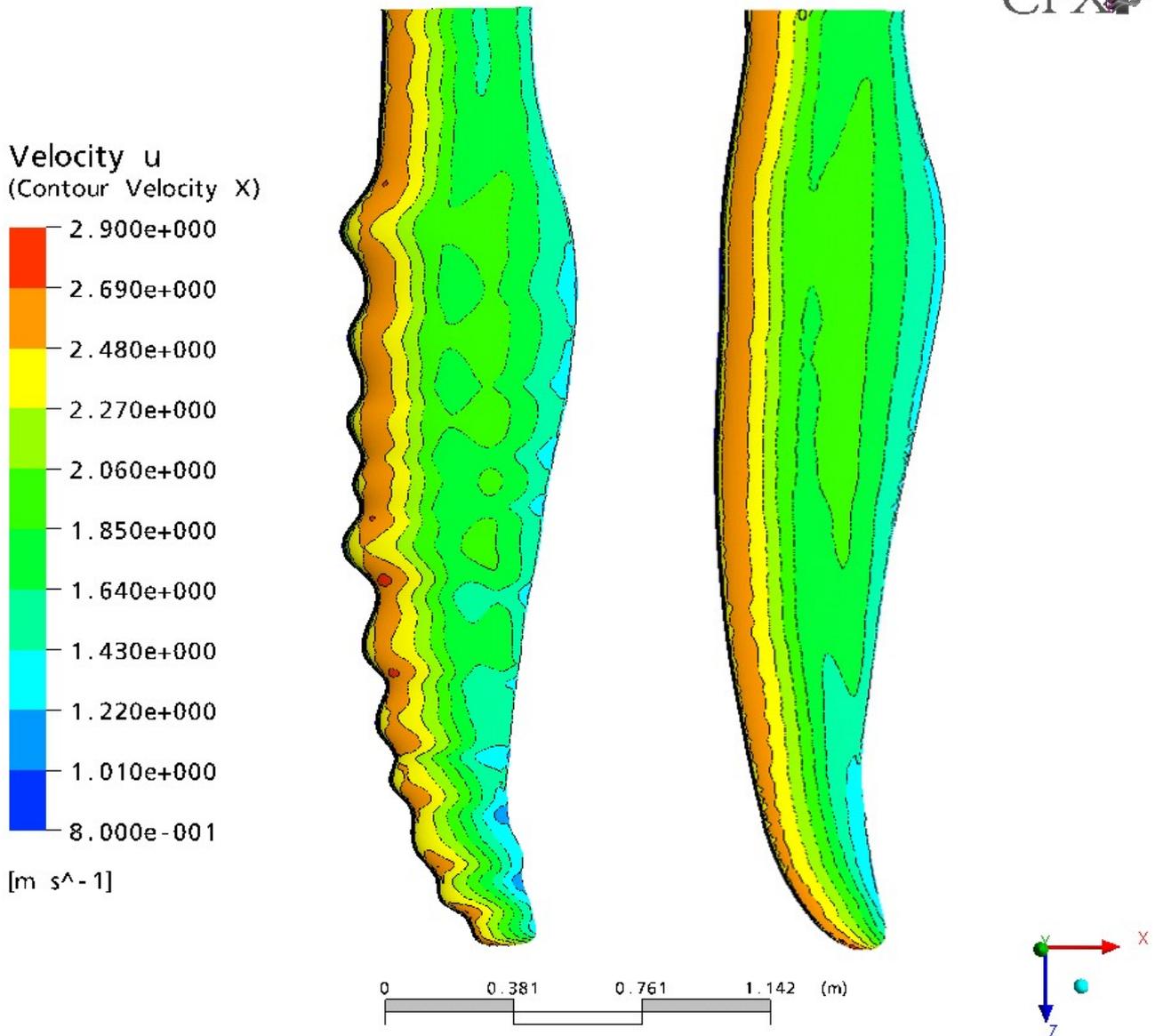


Abb. 4.19: Geschwindigkeit in  $x$ -, also Anströmrichtung in Oberflächennähe in Wasser bei gerader Anströmung. Flosse mit und ohne Tuberkel im Vergleich, Flosse ohne Tuberkel entsprechend angepasst. Erkennbar ist die stärker dreidimensionale Ausprägung der Strömung auf der mit Tuberkeln besetzten Flosse.

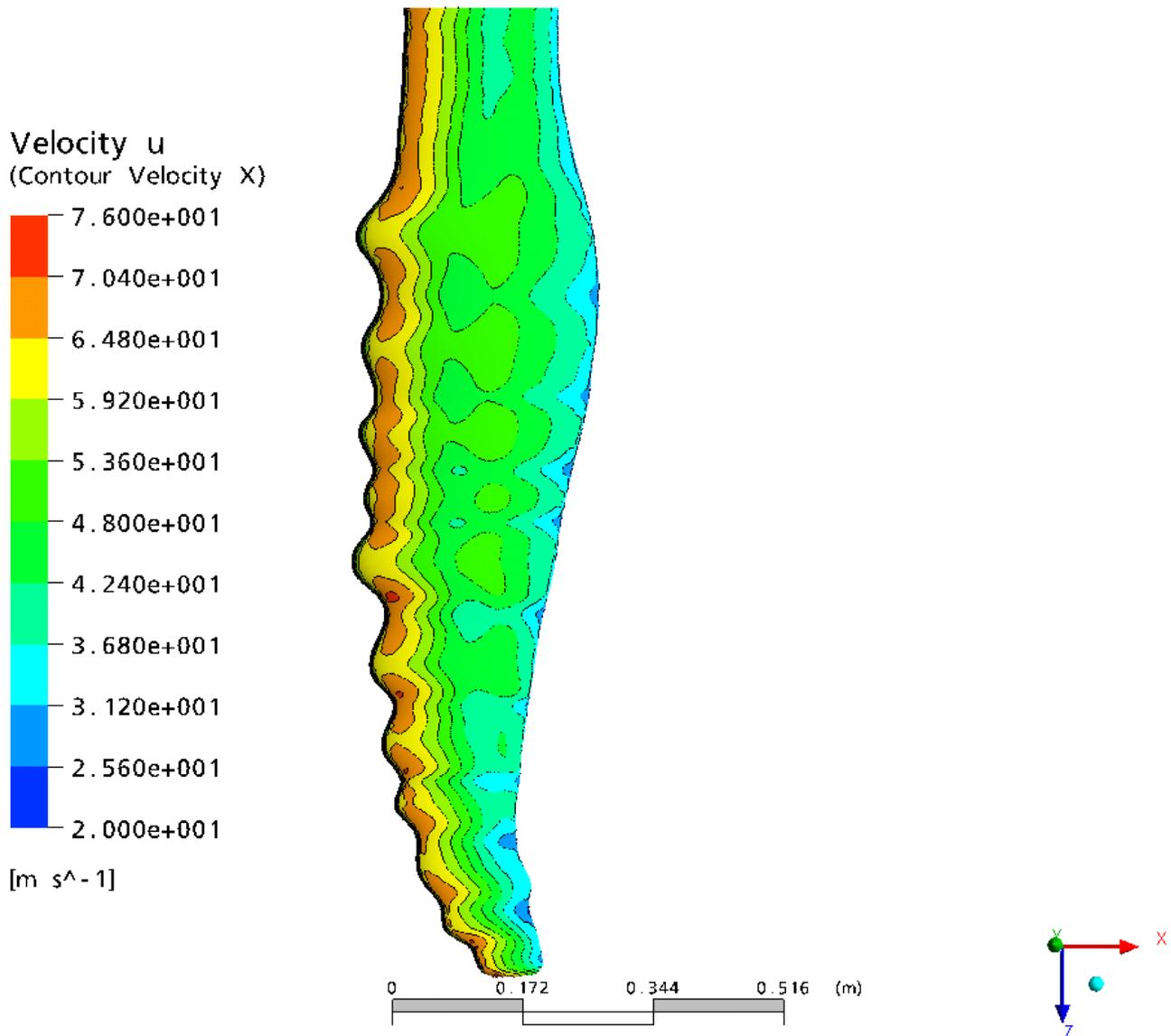


Abb. 4.20: Geschwindigkeit in  $x$ -, also Anströmrichtung in Oberflächennähe in Luft,  $Ma=0,2$ , Anströmung gerade von vorn. Ähnliche Struktur der Strömung wie im Wasser ist zu erkennen.

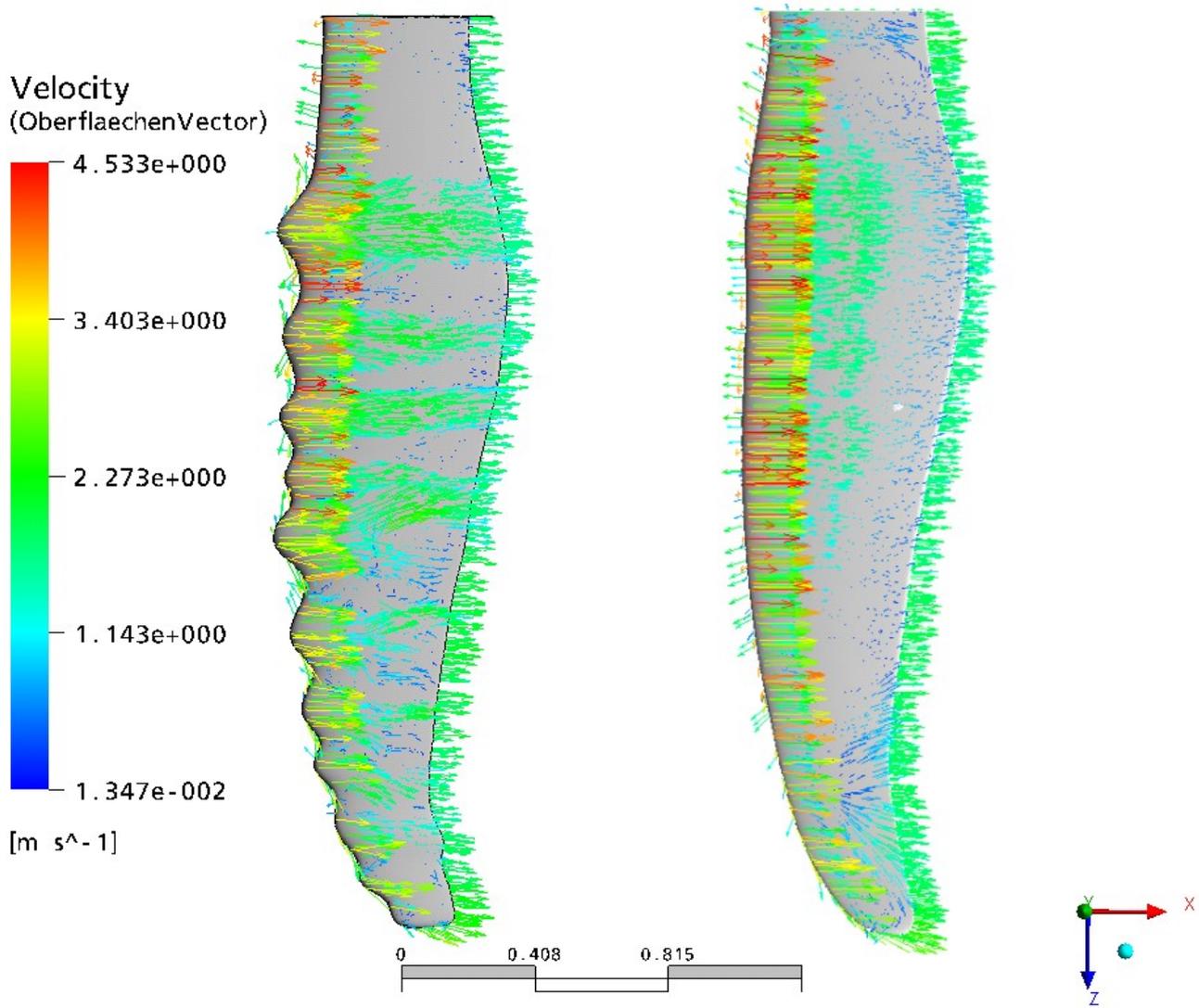


Abb. 4.21: Struktur der saugseitigen oberflächennahen Strömung bei 10 Grad Inzidenz in Wasser. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die Flosse mit glatter Vorderkante in die gleiche Darstellungsart gespiegelt. Auf der Flosse mit buckliger Vorderkante ist die Einteilung der Strömung in beschleunigte und Totwasserbereiche gut erkennbar. Auf der Flosse mit glatter Vorderkante ab etwa zwei dritteln Sehnenlänge Ablösungen erkennbar. An der Flossenspitze ausgeprägtes Rückströmgebiet.

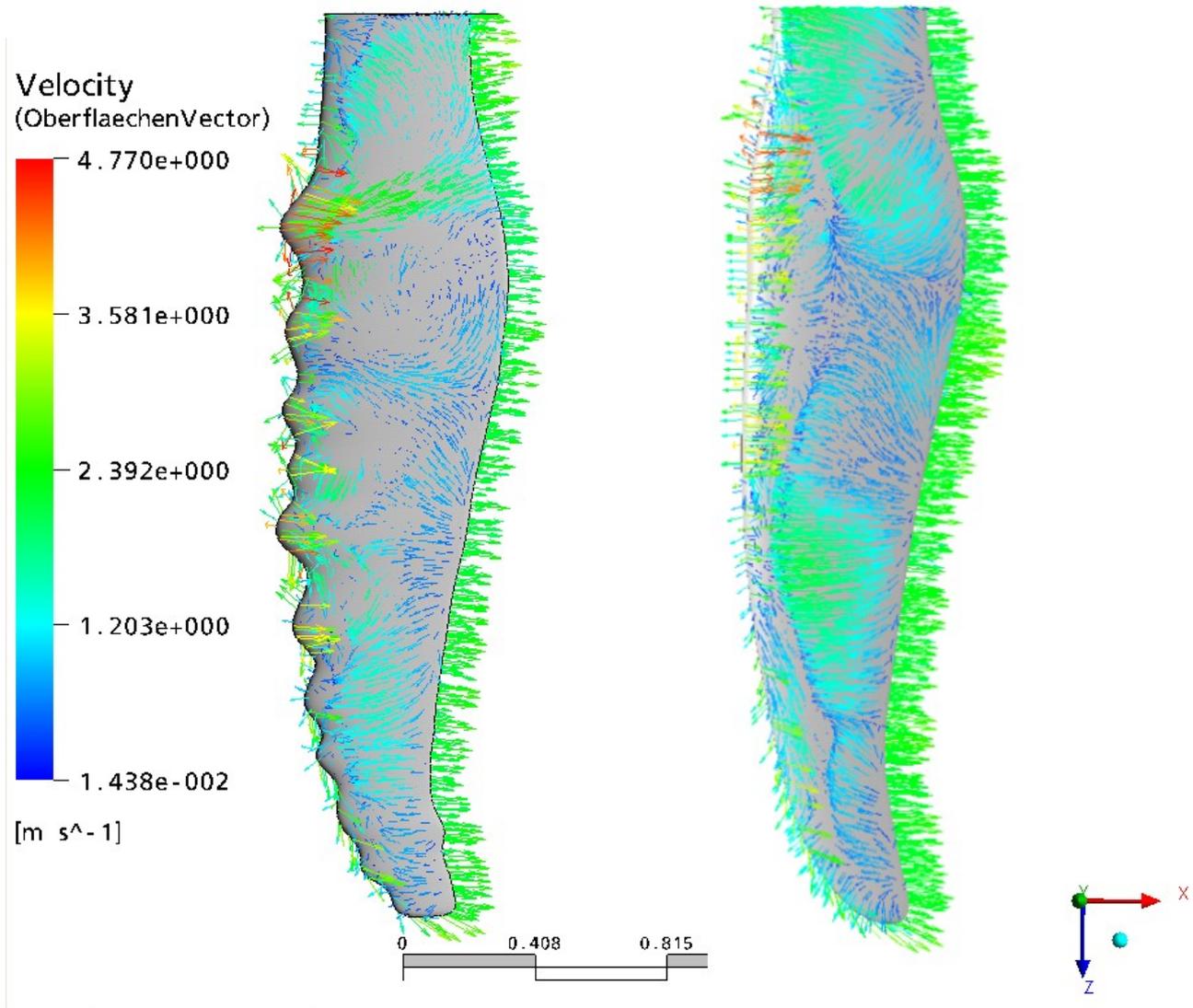


Abb. 4.22: Struktur der saugseitigen oberflächennahen Strömung bei 20 Grad Inzidenz in Wasser. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die Flosse mit glatter Vorderkante in die gleiche Darstellungsart gespiegelt. Die Vectorplots sind gleich skaliert. Auf der tuberkelbesetzten Flosse zeigen sich Wirbelsysteme geringer Geschwindigkeit, während auf der Flosse mit glatter Vorderkante zusammenhängende Rückstromgebiete erkennbar sind.

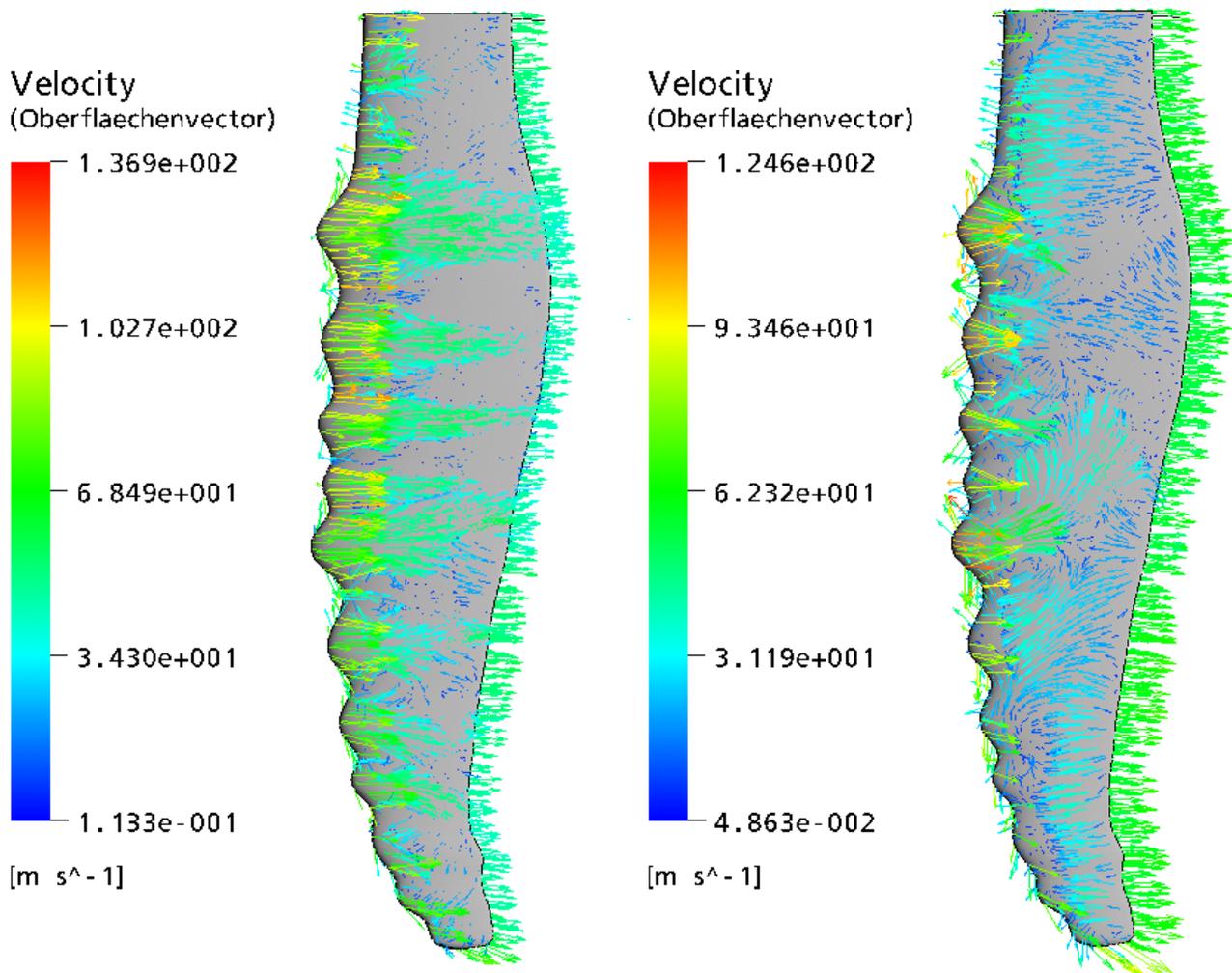


Abb. 4.23: Struktur der saugseitigen oberflächennahen Strömung in Luft bei  $Ma=0,2$ . Links zehn Grad Inzidenz, rechts zwanzig Grad. Beim  $10^\circ$ -Inzidenz-Fall sind Beschleunigung der Strömung über den Tuberkeln und dadurch anliegende Strömung, sowie einzelne Rückströmgebiete zwischen den Tuberkeln gut erkennbar. Beim  $20^\circ$ -Inzidenz-Fall ähnlich wie im Wasser Unterteilung in verschiedene Wirbelsysteme, so dass sich keine zusammenhängende Rückströmung ausbildet. Unterschiede zum Wasser sind in der Wirbelstruktur jedoch erkennbar.

### 4.2.3 Turbulente kinetische Energie

Die im folgenden abgedruckten Bilder stellen Flächen gleicher turbulenter kinetischer Energie dar. Die Legenden geben den Wertebereich der turbulenten kinetischen Energie im jeweiligen Fall an. Außerdem läßt sich aufgrund der Farbgebung erkennen, dass jeweils in etwa der gleiche Bereich für die Darstellung gewählt wurde.



Turbulence Kinetic Energy  
(TKE)

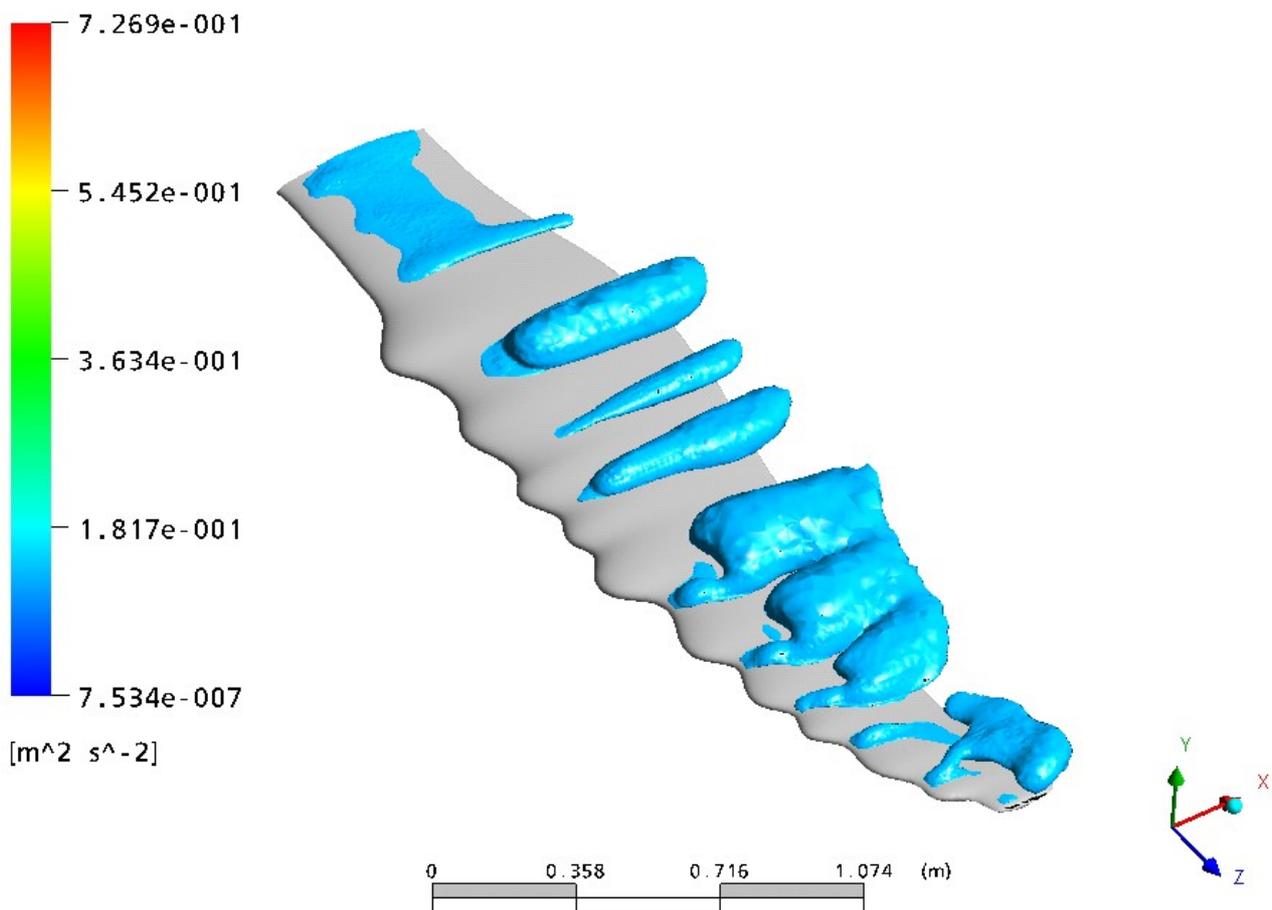


Abb. 4.24: Fläche gleicher turbulenter kinetischer Energie bei 10 Grad Inzidenz in Wasser, Blick auf die Saugseite; Flosse mit Tuberkeln. Gut erkennbar ist die Konzentration von Wirbeln in den Bereichen zwischen den Tuberkeln.

Turbulence Kinetic Energy  
(Isosurface 1)

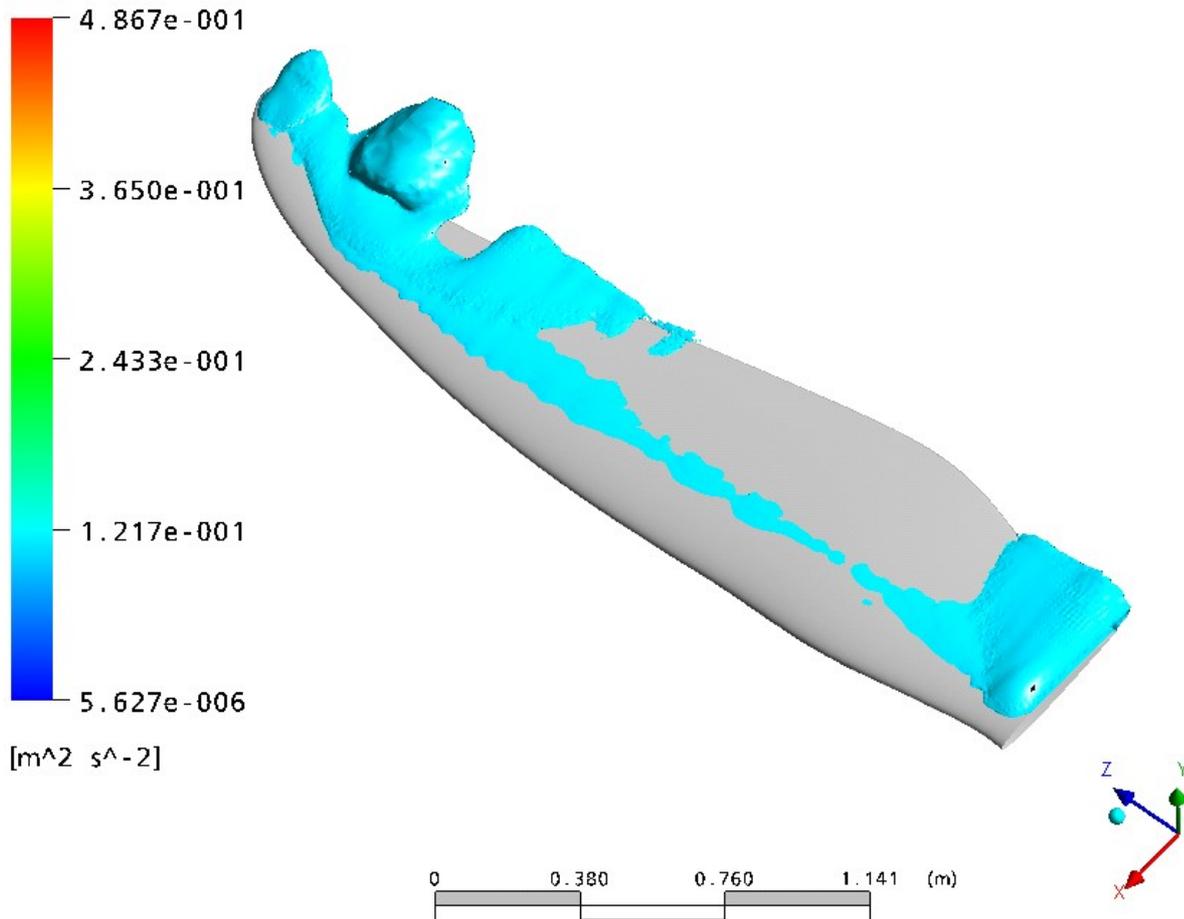


Abb. 4.25: Fläche gleicher turbulenter kinetischer Energie bei 10 Grad Inzidenz in Wasser, Blick auf die Saugseite; Flosse mit glatter Vorderkante. Deutlich geringere Intensität im Vergleich zur buckligen Flosse. Turbulenzfeld durch Spitzenwirbel gut erkennbar.

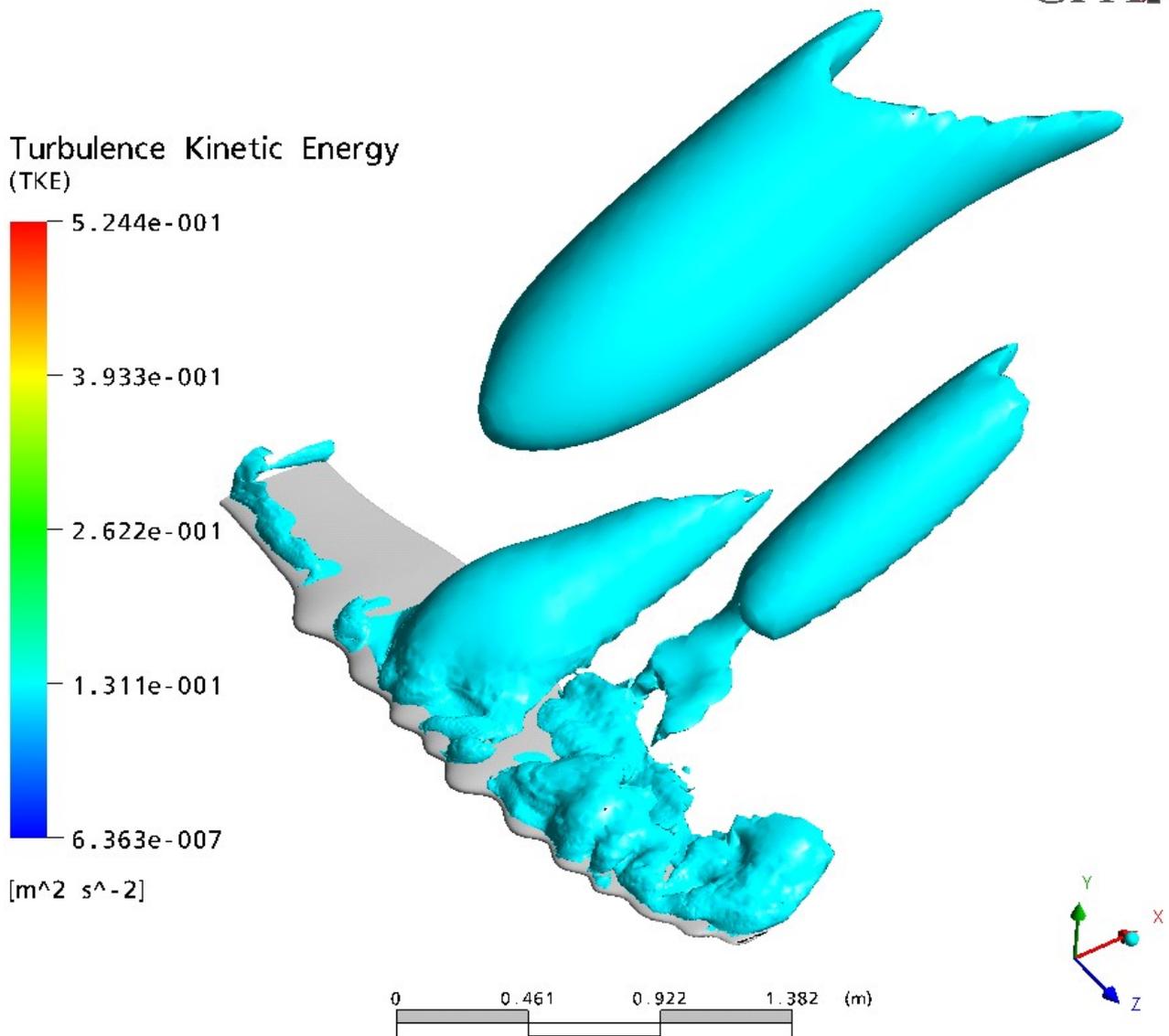


Abb. 4.26: Fläche gleicher turbulenter kinetischer Energie bei 20 Grad Inzidenz in Wasser, Blick auf die Saugseite; Flosse mit Tuberkeln. Zu sehen ist ein zentrales Wirbelsystem in der Mitte der Flosse, sowie zwei davon verursachte Wirbel im Nachlauf der Flosse.

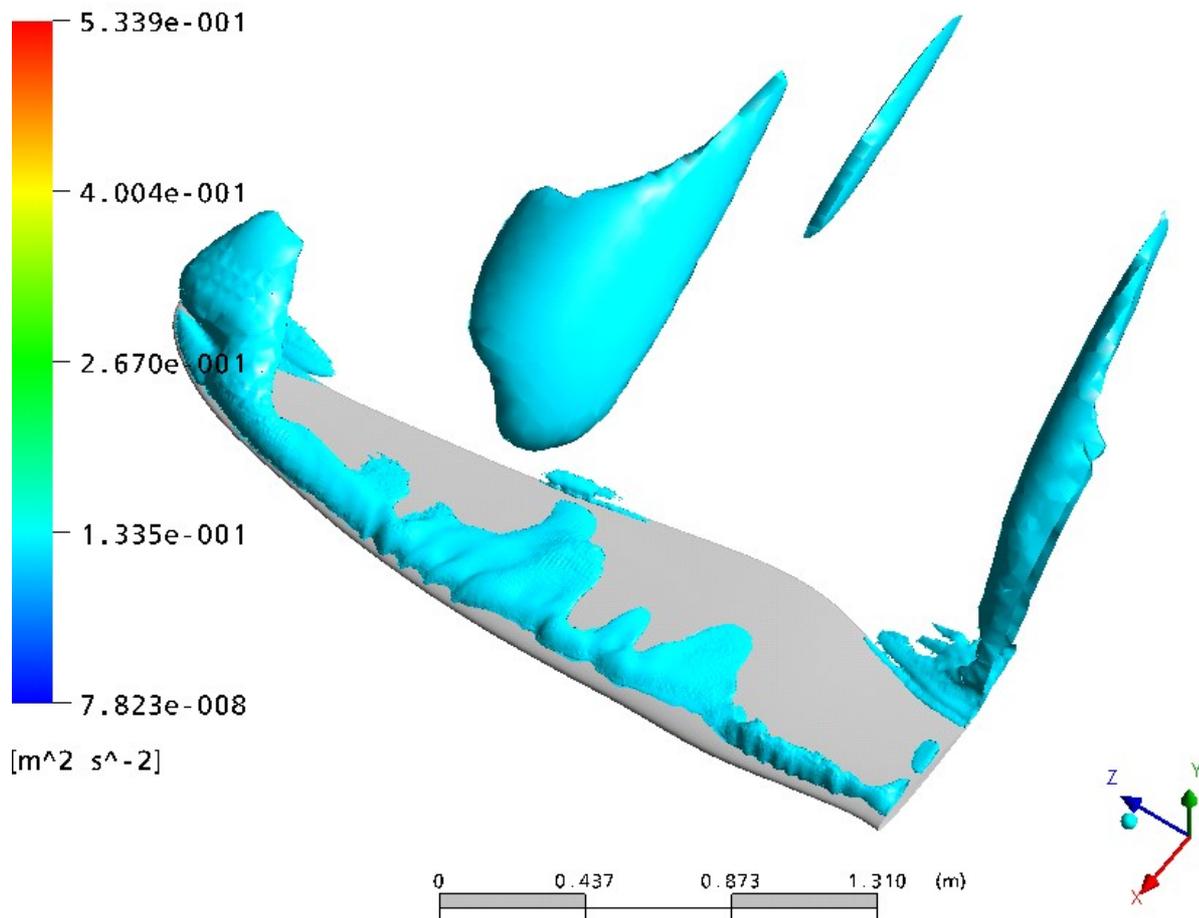
Turbulence Kinetic Energy  
(TKE)

Abb. 4.27: Fläche gleicher turbulenter kinetischer Energie bei 20 Grad Inzidenz in Wasser, Blick auf die Saugseite; Flosse mit glatter Vorderkante. Deutlich geringere Wirbelkonzentration auf der Oberfläche im Vergleich zur Tuberkel-Flosse. Jedoch stärker ausgebildeter Flügelspitzenwirbel. Im Raum stehende Wirbel deutlich kleiner.

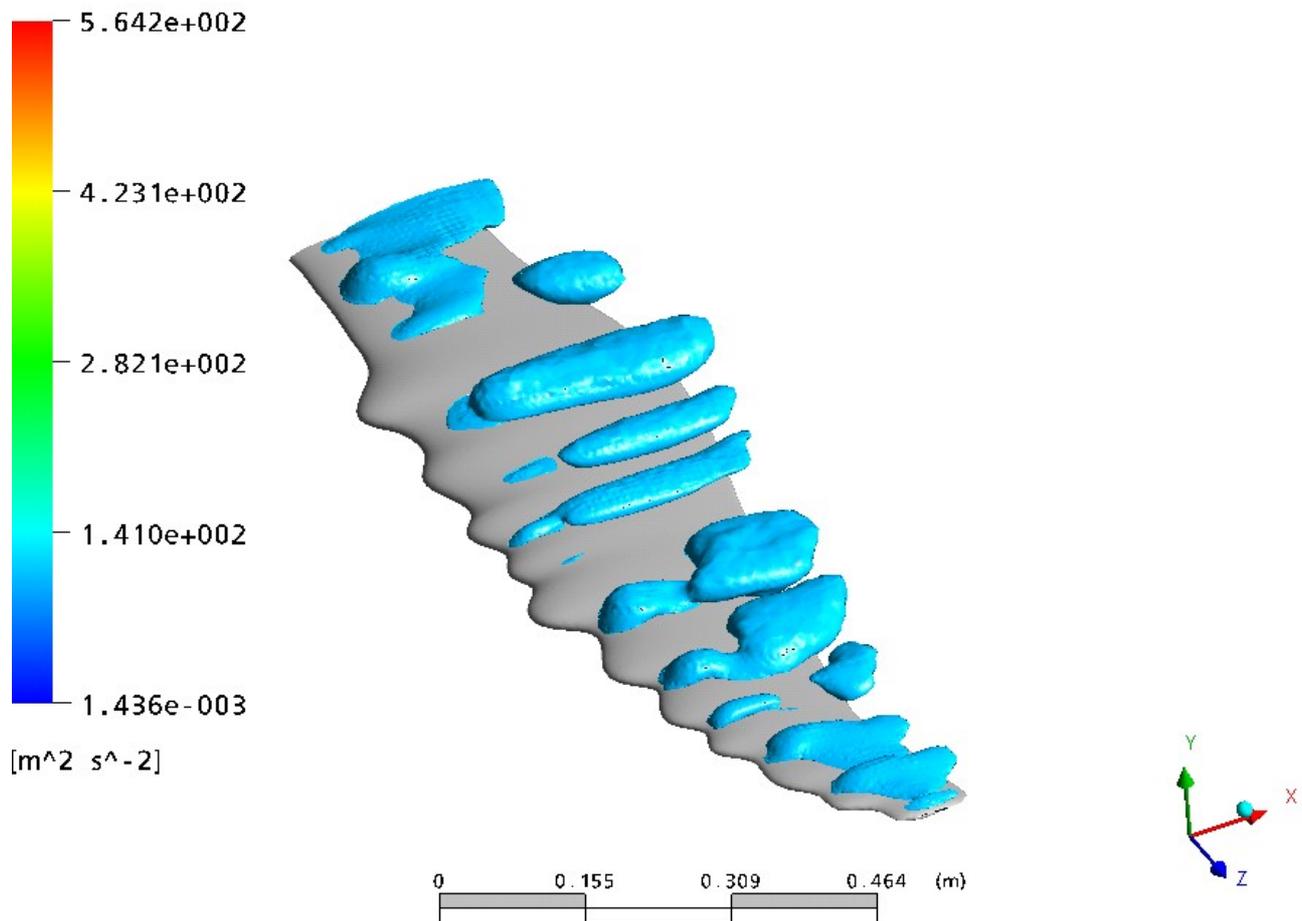
Turbulence Kinetic Energy  
(TKE)

Abb. 4.28: Fläche gleicher turbulenter kinetischer Energie bei 10 Grad Inzidenz in Luft mit  $Ma=0,2$ , Blick auf die Saugseite; Flosse mit Tuberkeln. Insgesamt ähnliche Struktur wie beim  $10^\circ$ -Wasser-Fall. Geringe Unterschiede erkennbar.

Turbulence Kinetic Energy  
(TKE)

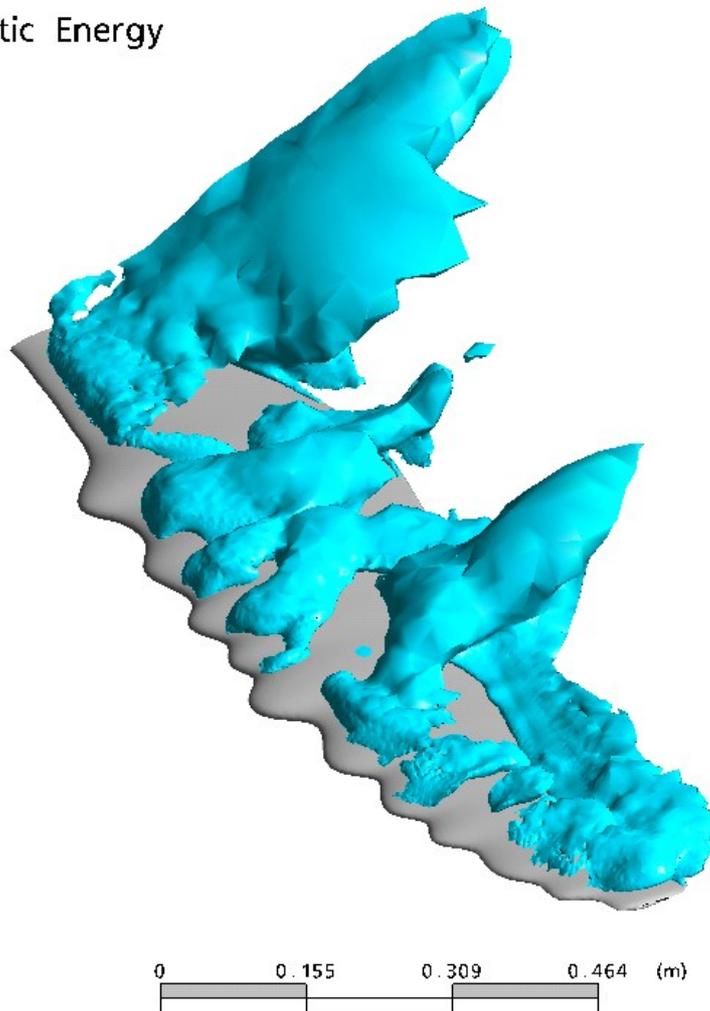
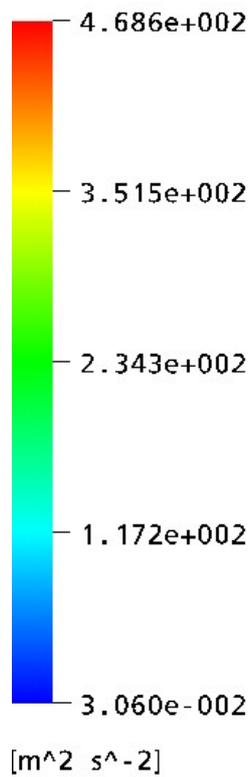


Abb. 4.29: Fläche gleicher turbulenter kinetischer Energie bei 20 Grad Inzidenz in Luft,  $Ma=0,2$ , Blick auf die Saugseite; Flosse mit Tuberkeln. Zentrales Wirbelsystem deutlich schwächer ausgeprägt als im 20°-Wasser-Fall. Im Raum stehende Wirbelsysteme nicht vorhanden. Wirbel am Flossenansatz unterliegt starkem Wandeinfluß.

#### 4.2.4 Ablösungen

Die im folgenden dargestellten Contour Plots zeigen die Verteilung der Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung, also in Sehnen-Richtung der Flosse. Um die Luft- und die Wasser-Strömungsfälle vergleichbar zu machen, wurde für die Farbgebung eine symmetrische Skalierung gewählt, deren Betrag das 1,3-fache der Anströmgeschwindigkeit ist. (Anströmung Luft mit 69,2 m/s, Wasser 2,6 m/s)

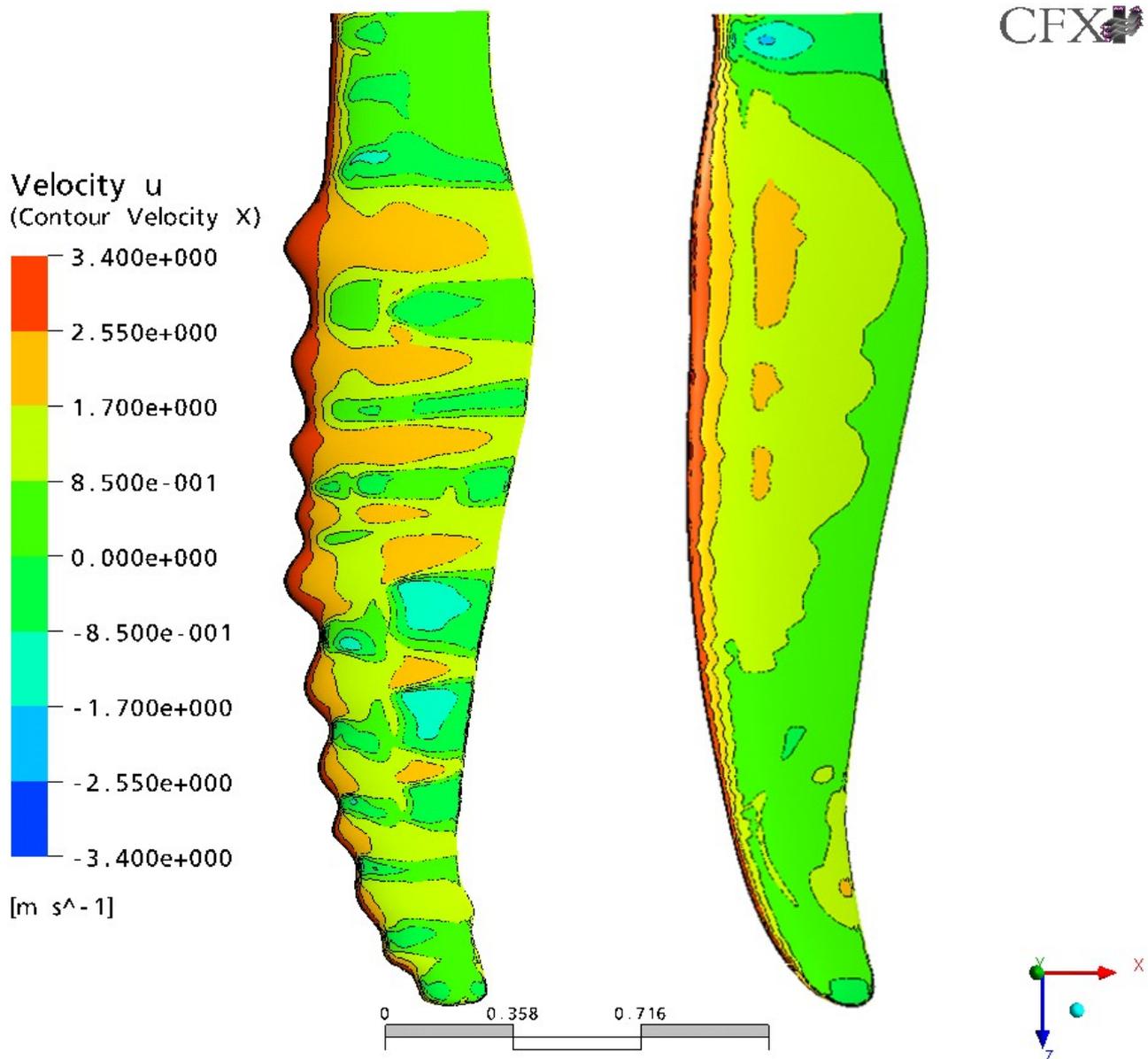


Abb. 4.30: Verteilung der oberflächennahen Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung auf der Saugseite bei 10 Grad Inzidenz in Wasser, Flossen mit glatter und tuberkelbesetzter Vorderkante im Vergleich. Wie bei den Vector-Plots ist die starke Kanalisierung der Strömung auf der Buckelflosse und die zusammenhängenden Ablösegebiete auf der Flosse mit glatter Vorderkante zu erkennen.

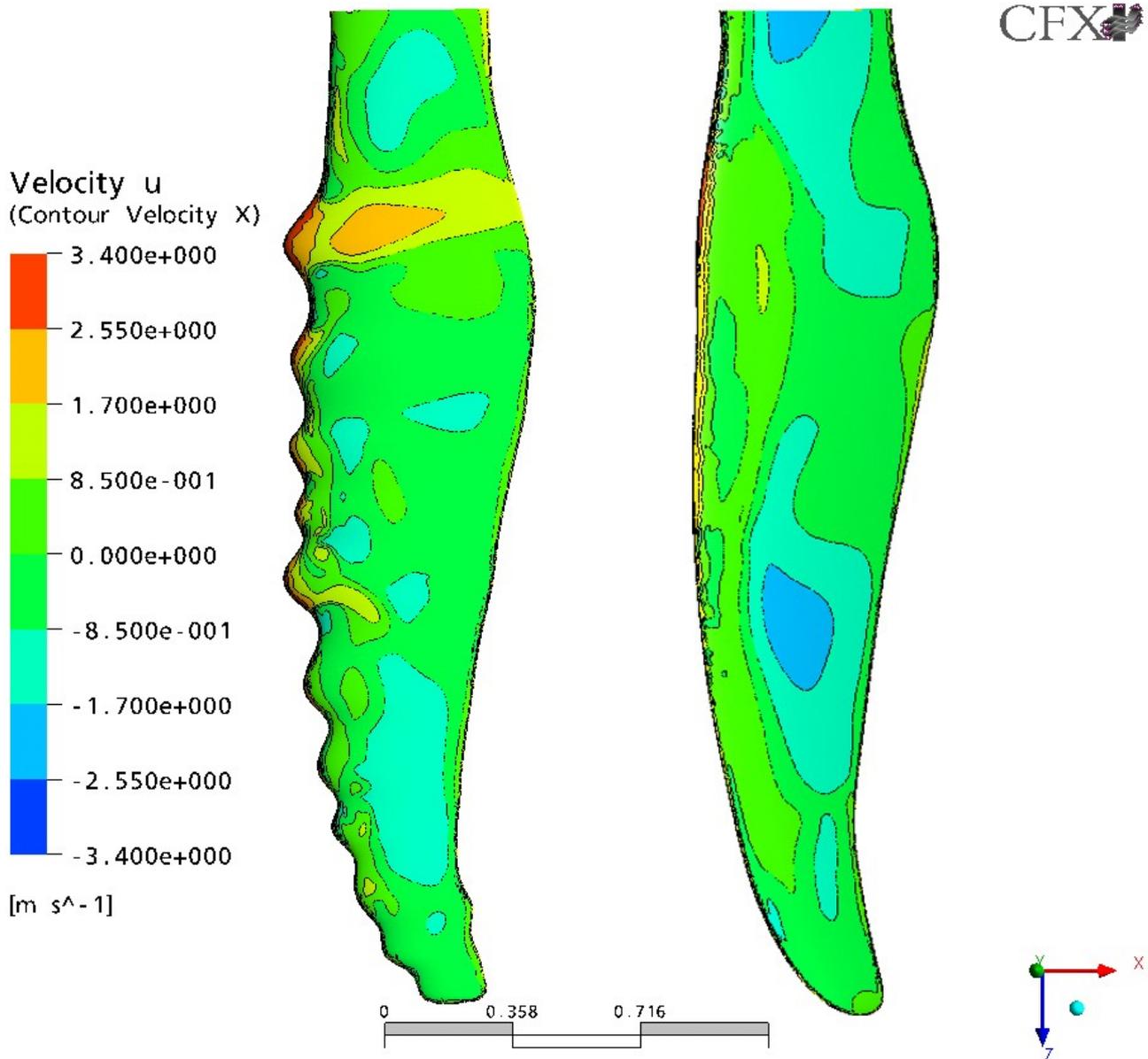


Abb. 4.31: Verteilung der oberflächennahen Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung auf der Saugseite bei 20 Grad Inzidenz in Wasser, Flossen mit glatter und tuberkelbesetzter Vorderkante im Vergleich. Gut zu erkennen ist die sowohl von der Fläche als auch der Geschwindigkeit deutlich ausgeprägtere Rückströmung auf der Flosse mit glatter Vorderkante.

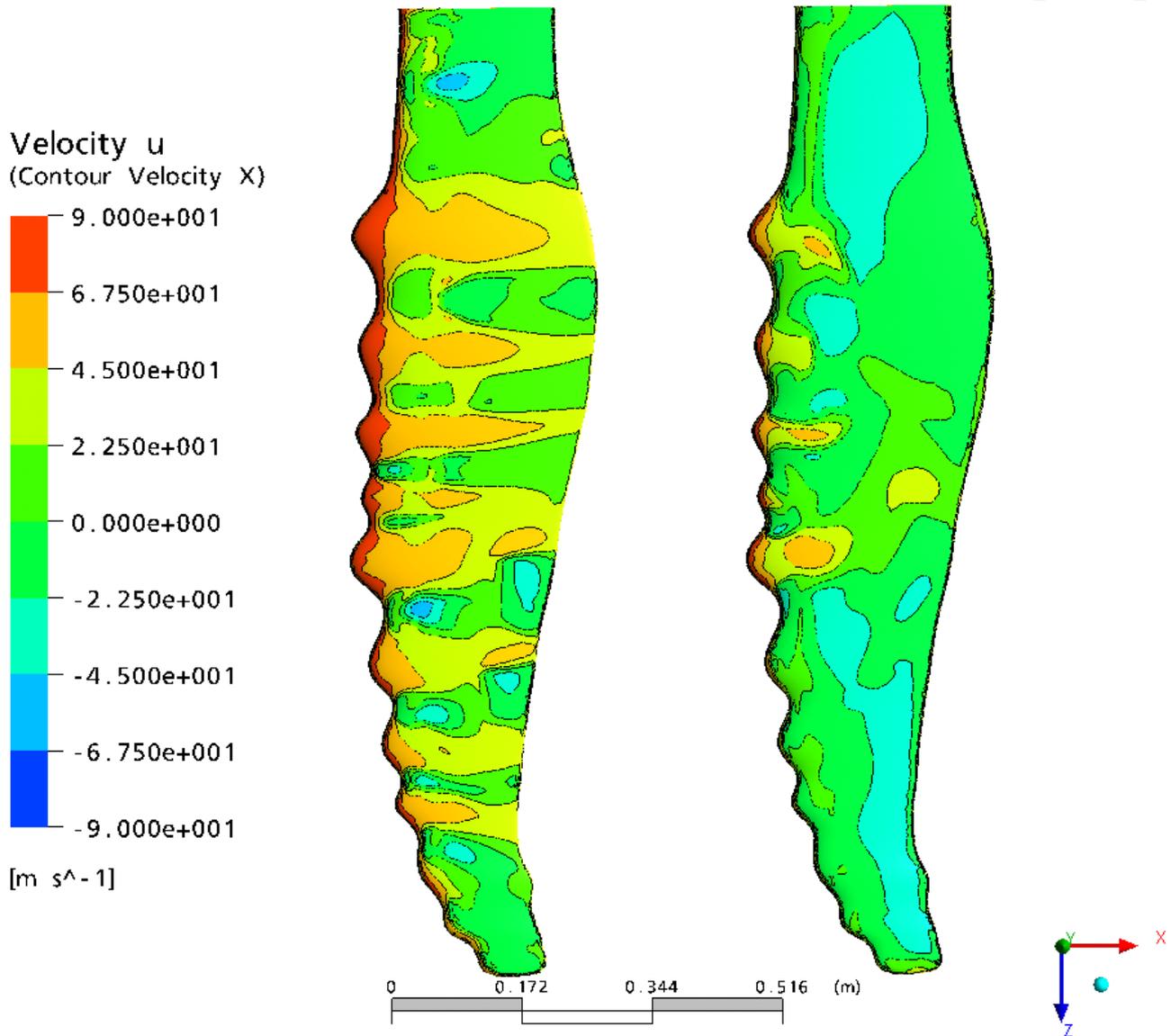


Abb. 4.32: Verteilung der oberflächennahen Geschwindigkeitskomponente in  $x$ -Richtung auf der Saugseite bei 10 Grad Inzidenz links und 20 Grad Inzidenz rechts. Jeweils in Luft bei  $Ma=0,2$ .

## 4.2.5 Umströmung der Tuberkel

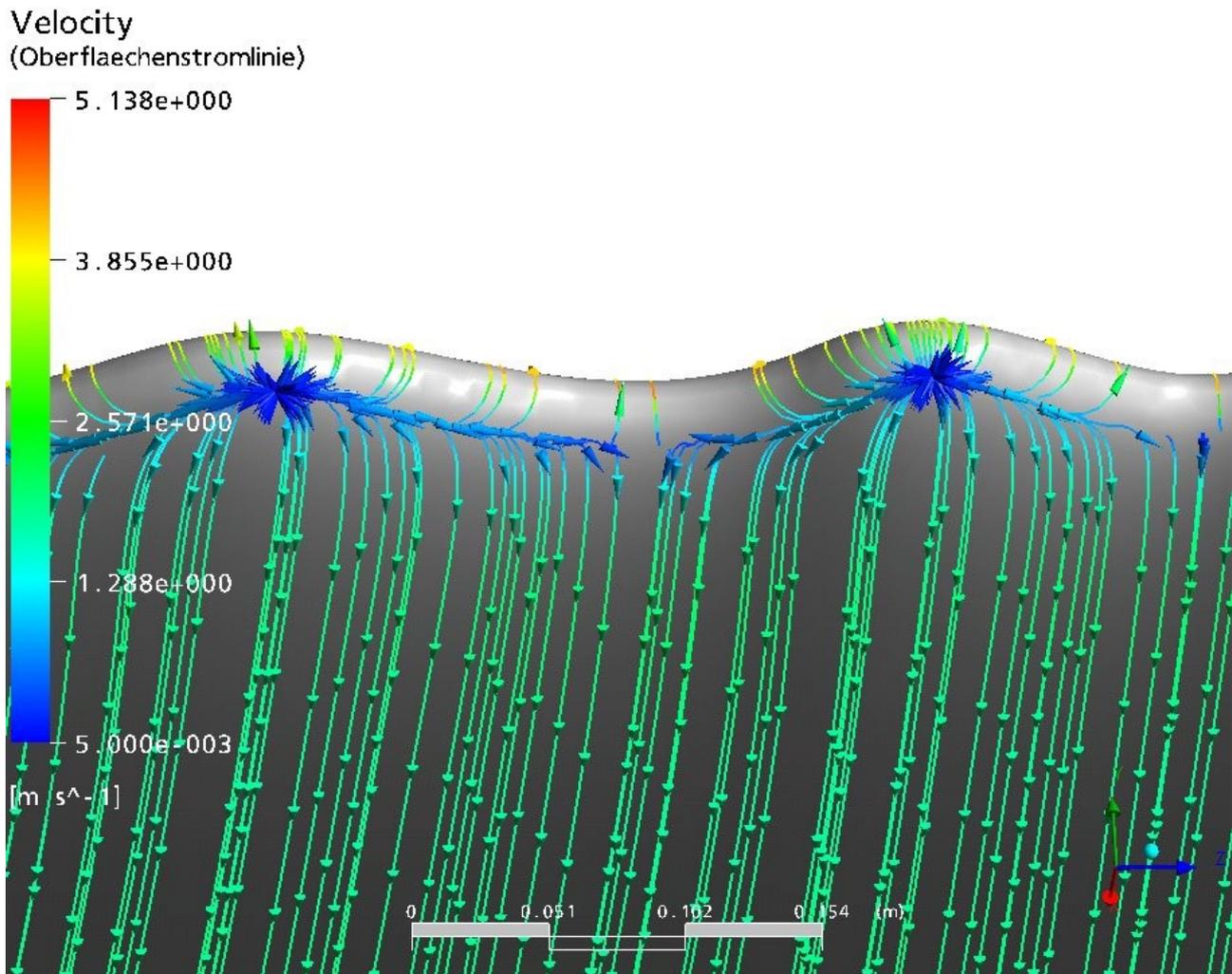


Abb. 4.33: Staupunkte an der Vorderkante bei Wasser und zehn Grad Inzidenz. Gut zu erkennen sind die einzelnen Staupunkte auf den Tuberkelspitzen, sowie die davon ausgehende Querströmung entlang der Staupunktstromlinie.

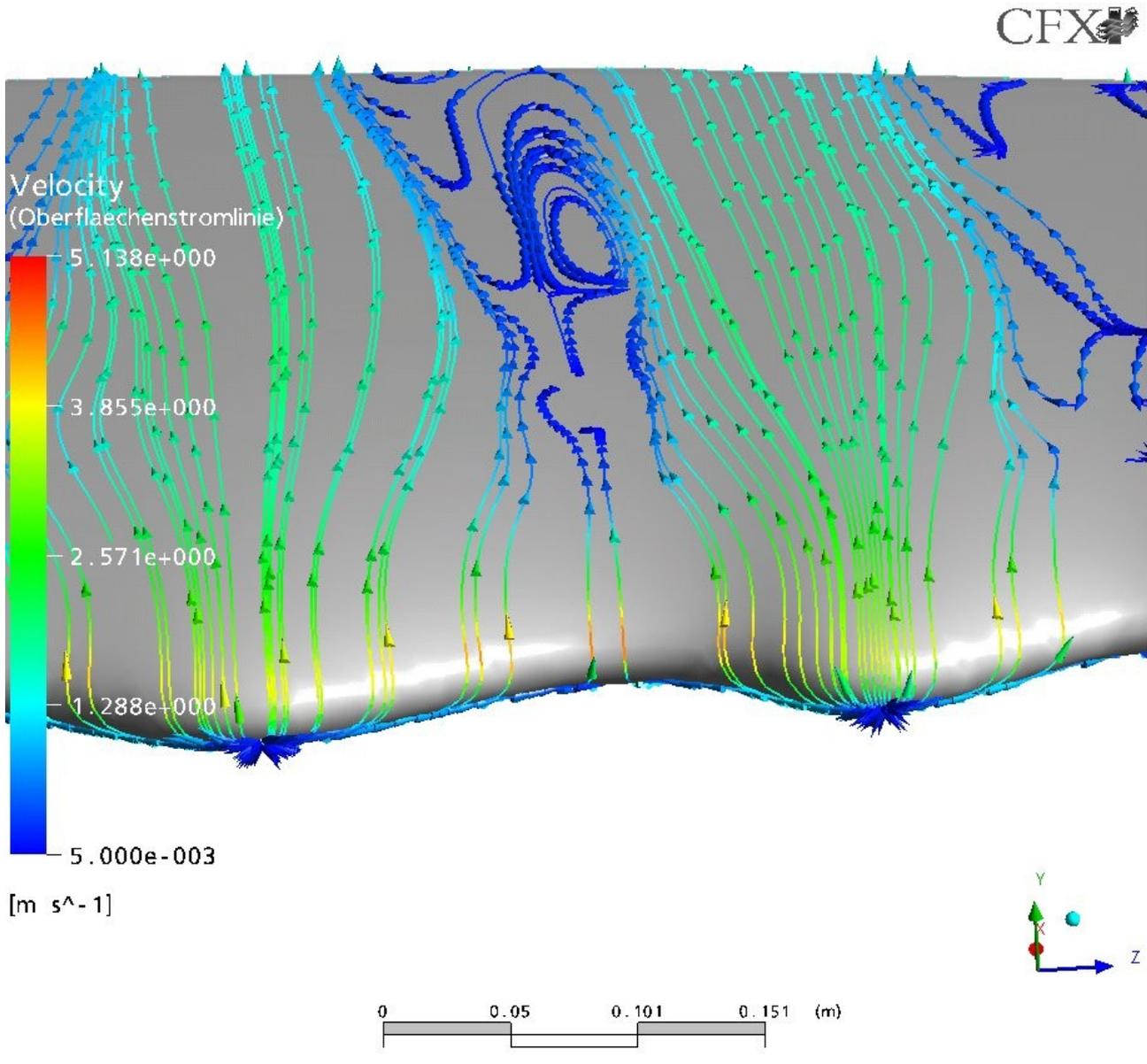


Abb. 4.34: Staupunkte von der Saugseite aus gesehen, Wasser 10 Grad. Erkennbar sind die Zonen beschleunigter Strömung über den Tuberkeln, sowie die Rückströmgebiete in den Zonen dazwischen.

## 4.3 Diskussion

### 4.3.1 Gerade angeströmte Fälle, Wasser

Hinsichtlich der eindimensionalen Kennwerte ergibt sich für die Flosse mit Tuberkeln ein gegenüber der glatten Flosse um 6,5 % erhöhter Widerstand. Dies steht im Einklang mit der Annahme, dass die durch die Buckel verursachten zusätzlichen Verluste verhältnismäßig gering sind.

Die Profildruckverteilung auf der glatten Flosse entspricht bis auf die Hinterkante der durch die Panel-Methode ermittelten Profildruckverteilung. Bei der Flosse mit Tuberkeln ergibt sich in der Senke zwischen den Buckeln eine Verlagerung und Zuspitzung des Druckminimums in Anströmrichtung. Auf dem Buckel ist das Druckminimum deutlich flacher und außerdem weiter nach hinten verschoben. Dies lässt sich durch den Verdrängungseffekt der Buckel erklären, da das von den Buckeln verdrängte Fluid in die Senke gedrückt wird und hier eine stärkere Beschleunigung verursacht. Andererseits ist die Aufstauwirkung auf den Buckeln geringer, da das Fluid auch zu den Seiten ausweichen kann. Diese dreidimensionalen Effekte sind auch im Oberflächen-Contourplot Abb. 4.19 erkennbar.

### 4.3.2 Fälle mit 10° Inzidenz, Wasser

Für diesen Fall ergibt sich für die Flosse mit Tuberkeln ein fast 30% schlechteres Auftriebs- zu Widerstandsverhältnis gegenüber dem glatten Vergleichsprofil. Das glatte Vergleichsprofil erzeugt sowohl einen stärkeren Auftrieb als auch eine geringere Widerstandskraft.

Auch hier entspricht die auf der Flosse mit glatter Vorderkante ermittelte Profildruckverteilung der mit der Panel-Methode berechneten Druckverteilung. Im hinteren Bereich der Flosse ist im Contourplot (Abb. 4.8) schon eine leichte Rückströmung erkennbar, die allerdings noch sehr schwach ausgeprägt ist.

Auf der Buckelflosse in Wasser ergibt sich ein deutlich abweichendes Bild, welches durch dreidimensionale Strömungseffekte zu erklären ist. In guter Übereinstimmung mit dem Druckverlauf zeigt sich im Contourplot (Abb. 4.9) eine Ablöseblase auf dem Profil in der Senke zwischen zwei Buckeln. Im Schnitt, welcher einen Buckel teilt, ist eine mit der glatten Flosse vergleichbare Druckverteilung und im Contourplot eine sehr gut anliegende Strömung erkennbar.

Die Abbildung 4.21 stützt dieses Bild. Sehr gut zu sehen ist die anliegende Strömung über den Buckeln und die dazwischen liegenden Ablösegebiete, in denen die Strömungsgeschwindigkeit in Oberflächennähe gegen Null geht. Die glatte Flosse ist hier noch deutlich gleichmäßiger angeströmt, jedoch ist ein ausgeprägtes Rückströmgebiet an der Flosenspitze erkennbar. Auch die leichte Rückströmung ab ca. 2/3 der Sehnenlänge ist in dieser Darstellung erkennbar.

In der Darstellung der turbulenten kinetischen Energie zeigt sich, dass die Flosse mit Tuberkeln deutlich stärkere Turbulenzen erzeugt. Die Flosse mit glatter Vorderkante erzeugt nur an der Spitze und am Ansatz nennenswerte Wirbel. Der Wirbel am Ansatz ist möglicherweise auf die dort verkürzte Sehnenlänge zurückzuführen, ein Wandeinfluß ist hier jedoch grundsätzlich nicht auszuschließen.

Die Flosse mit Tuberkeln hingegen erzeugt abgegrenzte Wirbelzonen in den Senken zwischen den Tuberkeln. Dies stimmt mit den in Abb. 4.21 beobachteten Rückstromgebieten überein.

In Abb. 4.30 zeigen sich die unterschiedlichen Funktionsweisen der Flossen. Die Flosse mit Tuberkeln hat die schon erwähnten einzelnen Gebiete mit Ablösungen und Gebiete sehr guter Umströmung. Die Flosse mit glatter Vorderkante zeigt noch einen relativ großen aerodynamisch wirksamen Teil. Jedoch ist hier das Ablösungsgebiet zusammenhängend.

Die stärkere Wirbelerzeugung der Flosse mit Tuberkeln erklärt das deutlich schlechtere Auftriebs/Widerstandsverhältnis. Jedoch scheint die Strömung über den Tuberkeln stabiler und weniger ablösegefährdet als auf dem glatten Vergleichsprofil. Es lässt sich also vermuten, dass die Vorteile dieser Flossenform bei Inzidenzwinkeln größer 10° zu suchen sind.

In Abb. 4.33 und 4.34 ist die Funktion der Tuberkel dargestellt. Zunächst bildet sich auf der Druckseite nicht eine zusammenhängende Staupunktlinie, sondern jeweils einzelne Staupunkte auf den Spitzen der Tuberkel. Von diesen Staupunkten aus fließt Fluid mit langsamer Geschwindigkeit in Richtung der Senken, von wo aus es entweder über die Saug- oder die Druckseite abströmt. Auf der Saugseite zeigt sich der Effekt dieser Strömungsform. Über den Buckeln bildet sich eine Profilmströmung deutlich höherer Geschwindigkeit, während sich im Nachlauf der Senken Rückströmungen oder Totwassergebiete ausbilden

### 4.3.3 Fälle mit 20° Inzidenz, Wasser

Hier ergibt sich für die Flosse mit Tuberkeln ein ca. 24% besseres Auftriebs/Widerstandsverhältnis.

Dies wird im wesentlichen durch die deutlich größere Auftriebskraft erreicht. Die Widerstandskraft der Flosse mit Tuberkeln ist geringfügig größer als die des glatten Vergleichsprofils.

Wie zu Beginn dieses Kapitels schon erwähnt sind diese Ergebnisse jedoch nicht belastbar, da keine Konvergenz erreicht wurde und die Residuen unregelmäßige Schwingungen ausführten. Im Bezug auf die Flosse mit glatter Vorderkante zeigte sich dies im Vergleich zweier Lösungen, die lediglich 30 Iterationsschritte auseinanderlagen, in der Größenordnung der Residuen aber durchaus vergleichbar waren. Es traten extreme Schwankungen im Strömungsbild und den eindimensionalen Kennwerten auf. Es wurde zur Darstellung die Lösung ausgewählt, die physikalisch sinnvoller erschien (s. Kap. 5.1).

Die ermittelten Profildruckverteilungen weisen keine Ähnlichkeit mit der durch die Panel-Methode berechneten Profildruckverteilung auf. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da die Panel-Methode reibungsfrei und zweidimensional arbeitet, Ablösungen also nicht nachvollziehen kann.

Für den Fall der Flosse mit glatter Vorderkante ergibt sich in Abb. 4.14 das Bild einer völlig abgelösten Strömung. Für die Flosse mit Tuberkeln ergibt sich interessanterweise in der Senke zwischen den Buckeln eine nahezu anliegende Strömung. Auf den Buckeln erscheint die Strömung abgelöst, jedoch nicht so stark wie bei der glatten Flosse.

In Abb. 4.22 ist die sehr ausgeprägte Rückströmung auf der glatten Flosse zu sehen. Eine reguläre Umströmung der Flosse mit Tuberkeln ist ebenfalls nicht mehr ausgebildet, jedoch sind die Rückströmgeschwindigkeiten hier deutlich geringer.

Im Vergleich der Flächen gleicher turbulenter kinetischer Energie (Abb. 4.26 und 4.27) zeigt sich ein vergleichbares Niveau der turbulenten kinetischen Energie. Erkennbar ist ein zentrales Wirbelsystem auf der Flosse mit Tuberkeln und ausgeprägte Wirbel im Nachlauf. Bei der glatten Flosse sind die Wirbelgebiete sowohl auf der Oberfläche als auch im Nachlauf deutlich kleiner.

Im Vergleich der Ablösungen (Abb. 4.31) zeigt sich wieder die stärker ausgeprägte Rückströmung auf der glatten Flosse und ein Bereich intakter Überströmung auf der Buckelflosse im Bereich des ersten Buckels. Ob dieser so existiert darf zum einen wegen des möglichen Wandeinflusses, zum anderen wegen der erwähnten Instabilität der Lösungen bezweifelt werden.

### 4.3.4 Besonderheiten der Simulationsergebnisse mit Luft

Für den gerade angeströmten Fall ergeben sich keine Unterschiede zum Wasser. Profildruck- und Geschwindigkeitsverteilungen sind ähnlich.

Bei 10° Inzidenz erscheint die Rückströmung in der Senke zwischen den Buckeln stärker ausgeprägt und weiter zur Vorderkante verschoben. Dies gibt auch die Druckverteilung wieder. Die Strömungsstruktur auf dem Buckel ist wiederum sehr ähnlich zu der im vergleichbaren Wasser-Fall. Die Druckverteilung hier entspricht wieder der durch die Panel-Methode ermittelten.

Bei Betrachtung der oberflächennahen Strömung fallen bei 10° Inzidenz keine prinzipiellen Unterschiede zwischen Luft- und Wasser-Rechnungen auf. Auch die Verteilung der turbulenten kinetischen Energie ähnelt sich stark. Das gleiche gilt für die Struktur der Rückströmgebiete. Unterschiede sind allenfalls im Detail zu bemerken.

Bei 20° Inzidenz zeigt sich in der Senke eine ausgeprägte Rückströmung. Völlig abgelöst ist die Umströmung allerdings nicht, wie auch die Druckverteilung zeigt. Auf dem Buckel zeigt sich ebenfalls deutliche Rückströmung, die Druckverteilung zeigt auch hier noch eine, wenn auch geringe, aerodynamische Wirksamkeit.

In der oberflächennahen Strömung zeigen sich an Flossenansatz und -spitze Rückströmgebiete. Dazwischen ähnliche Effekte wie im Wasser-Fall, das heißt langsame Rückströmungen mit Wirbelgebieten.

Die Verteilung der turbulenten kinetischen Energie zeigt Unterschiede zum Wasser-Fall. Das zentrale Wirbelsystem ist schwächer ausgeprägt, die abgelösten Wirbel im Nachlauf fehlen ganz.

Die Struktur der Rückströmgebiete (Abb.4.32) bestätigt die bei der oberflächennahen Strömung gemachten Beobachtungen. Bemerkenswert sind die Flecken höherer Geschwindigkeit an den fünf ersten Buckeln.

Unterschiede zwischen den Simulationen in Luft und Wasser sind stärker, je größer der Inzidenzwinkel ist. Da mit steigendem Inzidenzwinkel auch die Stabilität der Rechnungen schlechter wird, liegt der Schluss nahe, diese Unterschiede mit Ungenauigkeiten der Rechnungen zu erklären. Ein weiterer möglicher Grund für die Unterschiede liegt in der Vernachlässigung der Mach-Zahl. Dies ist für  $Ma=0,2$  zwar allgemein zulässig, stellt aber nur eine Näherung dar. Zudem treten in den Senken bei 10 und 20° lokal Geschwindigkeiten  $>Ma=0,3$  auf.

### 4.3.5 Zusammenfassende Diskussion

Die hier gezeigten Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass es sich bei den Tuberkeln an der Vorderkante der Buckelwalflosse um ein Hochauftriebssystem handelt. Die erzielte Auftriebskraft im 20° Inzidenzfall ist mit großen Verlusten erkauft, das glatte Vergleichsprofil arbeitet bei kleineren Anströmwinkeln deutlich effizienter. In einer Jagdsituation dürfte für den Wal in erster Linie die Steuerwirkung relevant sein, während sich der erhöhte Energieaufwand durch den Beutegewinn auszahlt.

Außerdem scheint schon im 10°-Fall die Umströmung der Flosse mit Tuberkeln deutlich stabiler. Eine verbesserte Unempfindlichkeit gegen Schwankungen in der Anströmung, z.B. Änderungen des Turbulenzgrades, könnte ein weiterer Vorteil dieser Flossenform sein. Durch die geschwungene Vorderkante stehen dem Wal im Prinzip mehrere Profilformen zur Verfügung. Dadurch entsteht möglicherweise ein weicherer Übergang von anliegender zu abgelöster Strömung.

Die hier beobachtete deutlich schlechtere Wirksamkeit der Flosse mit Tuberkeln bei  $10^\circ$  Inzidenz steht im Widerspruch zu den in [8] und [14] gemachten Beobachtungen.

## 5 Ausblick

### 5.1 Forschungsperspektiven

Zunächst erscheint es wünschenswert, die hier vorliegenden Simulationen zu überarbeiten, um zu einer verlässlicheren Aussage zu kommen. Gegebenenfalls gibt es für die  $20^\circ$ -Fälle überhaupt keine stationäre Lösung. Die beobachteten abgelösten Wirbelsysteme legen diese Vermutung nahe. Ein erster Schritt könnte sein, die Schwankungsbreite der Ergebnisse zu überprüfen und zu dokumentieren. In einem zweiten Schritt ließe sich daraus gegebenenfalls eine Startlösung für eine instationäre Rechnung erzeugen.

Diese Untersuchungen hätten jedoch den schon stark gedehnten Rahmen dieser Arbeit deutlich überschritten.

Desweiteren wäre zu untersuchen, inwieweit die Effekte der Buckel geschwindigkeits-, also Reynoldszahlabhängig sind. Eine Loslösung von der Flossenform und eine Übertragung der Buckel auf eine normale Tragflächengeometrie, unter Beibehaltung der auf die Buckelgröße bezogenen Reynoldszahl, könnte Ziel eines solchen Vorgehens sein.

Eine kleinschrittige Variation des Anströmwinkels würde sicherlich ebenfalls zu einem tieferen Verständnis der Tuberkel beitragen. Auch der hier nur grob geschätzte Turbulenzgrad der Anströmung verdient eine genauere Betrachtung.

Die vielfältigen Bewegungsmöglichkeiten der Flosse konnten in dieser Arbeit gar nicht berücksichtigt werden. Um die besonderen Effekte der Buckel auf der Flossenvorderkante besser bewerten zu können wäre dies wünschenswert. Insbesondere die Pfeilungs- und Krümmungsmöglichkeiten, die der Wal in vielen Manövern nutzt, verdienen nähere Betrachtung.

Die Rolle der Buckel auf der Schnauze des Wals ist ebenfalls noch nicht untersucht.

Ein weiteres wichtiges Feld wäre die Übertragbarkeit auf real kompressible Strömungen, also Strömungen mit  $Ma > 0,3$ , sowie die Frage, ob sich die Effekte der mit Buckeln besetzten Vorderkante in den Trans- und Überschallbereich übertragen lassen. Hierzu wäre eine Variation der Ma-Zahl unter Beibehaltung der Re-Zahl bei vorher ausgesuchten Strömungsfällen interessant.

### 5.2 Einsatzmöglichkeiten

Als Einsatzmöglichkeiten kommen grundsätzlich alle Bereiche in Frage, in denen Hochauftriebssysteme eingesetzt werden.

Die hier beobachtete geringe Effizienz bei  $10^\circ$  Inzidenz schließt Anwendungen, bei denen die Effizienz im Vordergrund steht, also Schiffsschrauben, Schiffssteuer und Ähnliches, zunächst aus. Jedoch lässt sich diese Beobachtung bezweifeln, experimentelle Ergebnisse [8] legen nahe, dass die Wirksamkeit nicht so viel schlechter ist.

In Luftströmungen sind ebenfalls Anwendungen denkbar, zumindest im Geschwindigkeitsbereich  $Ma < 0,3$ . Gelingt die Übertragung in höhere Geschwindigkeitsbereiche wäre an Einsatzmöglichkeiten im Turbomaschinenbau zu denken. Im Bereich von Verdichtern könnte eine Profilform mit verbessertem Inzidenzverhalten den Vorteil einer Betriebsbereichserweiterung oder Einsparungen an Leitschaufelverstellmechanismen ermöglichen.

Auch Hubschrauberrotoren, Propeller und Steuereinrichtungen von Flugzeugen wären mögliche Anwendungsfelder.

## 6 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass die Tuberkel auf der Vorderkante der Brustflosse des Buckelwals nach Art eines Hochauftriebssystems durch die Erzeugung von Wirbelstrukturen die Umströmung stabilisieren. Diese Wirbelerzeugung ist naturgemäß mit Verlusten verbunden.

Hierzu wurden Simulationsrechnungen mit den Anströmwinkeln  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  und  $20^\circ$  durchgeführt. Es wurden ein realistisches Flossenprofil und ein Vergleichsprofil mit glatter Vorderkante mit Wasser und  $2,6 \text{ m/s}$  Anströmgeschwindigkeit berechnet. Zusätzlich wurde ein unter der Bedingung Reynoldsscher Ähnlichkeit skaliertes Flossenprofil mit Luft und einer Anströmmachzahl von  $0,2$  simuliert.

Zur Vernetzung wurde ein hybrider Netztyp verwendet. Die Ausrichtung des hexaedrischen Teils entspricht der Ausrichtung der Flosse. Dadurch sind möglicherweise zusätzliche Instabilitäten bei den Inzidenzwinkeln  $10^\circ$  und  $20^\circ$  verursacht.

Die numerischen Simulationen sind von starken Instabilitäten geprägt, die ihre Ursachen zum Teil in den Wirbelstrukturen, zum Teil in Ablösungsphänomenen und möglicherweise auch in Netz- und Randbedingungseinflüssen haben. Dadurch ist die Verlässlichkeit der gewonnenen Aussagen stark eingeschränkt.

Es wurde ein um  $30\%$  schlechteres Auftriebs/Widerstandsverhältnis der mit Tuberkeln besetzten Flosse gegenüber dem Vergleichsprofil bei  $10^\circ$  Inzidenz ermittelt. Bei  $20^\circ$  Inzidenz wurde ein  $24\%$  besseres A/W-Verhältnis ermittelt.

Die Simulationen mit Luft zeigen ein ähnliches Strömungsbild wie die vergleichbaren Simulationen in Wasser.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] ANSYS ICEM CFD/AI\*Environment 10.0 User Manual
  
- [2] Bader, H.G.:  
Einführung in die Dynamik der Flugzeuge mit besonderer Berücksichtigung der mechanischen Ähnlichkeit  
Selbstverlag d. VDI, Berlin 1916
  
- [3] Bohn, D., Ähnlichkeitsprobleme im Maschinenbau, Vorlesungsskript, Lehrstuhl und Institut für Dampf- und Gasturbinen RWTH Aachen
  
- [4] Czichos, H. (Herausg.):  
Hütte – Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften  
30. Auflage  
Springer Verlag
  
- [5] Fiebig, M.:  
Betrachtungen zur Ähnlichkeit reibungsfreier, kompressibler Strömungen an Hand der Integralsätze  
Zentrale für Wissenschaftliches Berichtswesen der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V., Porz-Wahn (Rhld.) 1963
  
- [6] Hutter, K.:  
Fluid- und Thermodynamik  
Springer-Verlag, Berlin 1995
  
- [7] Jones, K.D., US Navy, Naval Postgraduate School  
[http://www.aa.nps.navy.mil/~jones/online\\_tools/panel/](http://www.aa.nps.navy.mil/~jones/online_tools/panel/)
  
- [8] Miklosovic, D.S., Murray, M.m., Howle, L.E., Fish, F.E., Leading-edge Tubercles delay stall on Humpback Whale (Megaptera Novaeangliae) flippers, 2003/2004
  
- [9] Moog, W.:  
Ähnlichkeits- und Analogielehre  
VDI-Verlag, Düsseldorf 1985
  
- [10] Pawlowski, J.:

Die Ähnlichkeitstheorie in der physikalisch-technischen Forschung  
Springer-Verlag, Berlin 1971

- [11] Schröder, W., Fluidmechanik, Wissenschaftsverlag Mainz in Aachen, 2004
  
- [12] Stichlmair, J.:  
Kennzahlen und Ähnlichkeitsgesetze im Ingenieurwesen  
Altos-Verlag Doris Stichlmair, Essen 1990
  
- [13] Spurk, J.H.:  
Dimensionsanalyse in der Strömungslehre  
Springer-Verlag, Berlin 1992
  
- [14] Watts, P., Fish, F.E.: The Influence of Passive, Leading Edge Tubercles on Wing Performance, 12<sup>th</sup> Int. Symp. Unmanned Untethered Submersible Technology, Autonomous Undersea Systems Inst. Durham, NH, 2001
  
- [15] Winn, L.K. / Winn, H.E., Wings in the Sea – The Humpback Whale, 1985
  
- [16] Wortmann, C., Numerical Simulation of the Flow around the pectoral fin of a humpback whale, Student Research Project, RWTH Aachen 2007

## 8 **Abbildungsverzeichnis**

0.1 Oberflächenstromlinien 10°, Wasser.....	II
3.1 Darstellung der Flossenkanten in CFD.....	6
3.2 Position der Flosse im Bilanzraum.....	7
3.3 Oberflächennetz am Beispiel Flosse mit Tuberkeln.....	8
Skizze Koordinatensystem Flosse mit glatter Vorderkante.....	14
Skizze Koordinatensystem Flosse mit Tuberkeln.....	15
4.1 Profildruckverteilung 0° NACA0012.....	17
4.2 Druckverteilung und Contour-Plot glatte Flosse, Wasser, 0°.....	18
4.3 Druckverteilung und Contour-Plot bucklige Flosse, Senke, Wasser, 0°.....	19
4.4 Druckverteilung und Contour-Plot bucklige Flosse, Buckel, Wasser, 0°.....	20

4.5 Druckverteilung und Contour-Plot bucklige Flosse, Senke, Luft, 0° .....	21
4.6 Druckverteilung und Contour-Plot bucklige Flosse, Buckel, Luft, 0° .....	22
4.7 Profildruckverteilung 10° NACA 0012.....	23
4.8 Druckverteilung und Contour-Plot glatte Flosse, Wasser, 10° .....	24
4.9 Druckverteilung und Contour-Plot bucklige Flosse, Senke, Wasser, 10°.....	25
4.10 Druckverteilung und Contour-Plot bucklige Flosse, Buckel, Wasser, 10°.....	26
4.11 Druckverteilung und Contour-Plot bucklige Flosse, Senke, Luft, 10° .....	27
4.12 Druckverteilung und Contour-Plot bucklige Flosse, Buckel, Luft, 10° .....	28
4.13 Profildruckverteilung 20° NACA 0012.....	29
4.14 Druckverteilung und Contour-Plot glatte Flosse, Wasser, 20° .....	30
4.15 Druckverteilung und Contour-Plot bucklige Flosse, Senke, Wasser, 20°.....	31
4.16 Druckverteilung und Contour-Plot bucklige Flosse, Buckel, Wasser, 20°.....	32
4.17 Druckverteilung und Contour-Plot bucklige Flosse, Senke, Luft, 20° .....	33
4.18 Druckverteilung und Contour-Plot bucklige Flosse, Buckel, Luft, 20° .....	34
4.19 Oberflächennahe Strömung, Contourplot, 0°, Wasser.....	35
4.20 Oberflächennahe Strömung, Contourplot 0°, Luft .....	36
4.21 Oberflächennahe Strömung, Vectorplot, 10°, Wasser.....	37
4.22 Oberflächennahe Strömung, Vectorplot, 20°, Wasser.....	38
4.23 Oberflächennahe Strömung, Vectorplot, 10° und 20°, Luft.....	39
4.24 Fläche gleicher turbulenter kinetischer Energie, bucklige Flosse, 10°, Wasser.....	40
4.25 Fläche gleicher turbulenter kinetischer Energie, glatte Flosse, 10°, Wasser.....	41
4.26 Fläche gleicher turbulenter kinetischer Energie, bucklige Flosse, 20°, Wasser.....	42
4.27 Fläche gleicher turbulenter kinetischer Energie, glatte Flosse, 20°, Wasser.....	43
4.28 Fläche gleicher turbulenter kinetischer Energie, bucklige Flosse, 10°, Luft.....	44
4.29 Fläche gleicher turbulenter kinetischer Energie, bucklige Flosse, 20°, Luft.....	45
4.30 Oberflächennahe Strömung, Contourplot, 10°, Wasser.....	46
4.31 Oberflächennahe Strömung, Contourplot, 20°, Wasser.....	47
4.32 Oberflächennahe Strömung, Contourplot, 10° und 20°, Luft.....	48
4.33 Staupunkte an den Tuberkelspitzen, Druckseite.....	49

4.34 Staupunkte an den Tuberkelspitzen, Saugseite.....	50
--	----

## Anhang

### Inhalt der DVD (Begleitmaterial)