

Abstract

Die Wandschubspannung wird auf einem Deltaflügel sowie auf einem Flügel eines generischen Flugkörpers flächendeckend mittels Ölfilminterferometrie experimentell vermessen. Dafür wird ein Ölfilm auf dem Modell im Windkanal aufgetragen, welcher sich durch die Scherkräfte entlang der Wandstromlinien verdünnt. LED-Beleuchtung in drei Farben erzeugt Interferenzbilder, die fotografiert und ausgewertet werden. Mit unterschiedlichen Ölviskositäten können für zwei getrennte Bilderserien Streifen auf der Ölfilmoberfläche entlang der Bewegungsrichtung verstärkt oder vermieden werden. Ein Matlab-Programm kann aus diesen Bildern die Wandstromlinien sowie die lokale Ölfilmstärke zu verschiedenen Zeitpunkten automatisiert bestimmen. Daraus berechnet das Programm an jedem Bildpunkt unter Berücksichtigung der vollständigen dreidimensionalen Geometrie und gekrümmten Oberflächen die Verteilung der Wandschubspannung.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Stand der Technik	3
1.2. Zielsetzung	5
2. Grundlagen	7
2.1. Prinzip der Ölfilminterferometrie	7
2.2. Wandschubspannung	8
2.3. Bewegung des Ölfilms	10
2.4. Interferenz am Ölfilm	12
3. Computerauswertung der Bilder	17
3.1. Überblick	17
3.2. Rechenlaufzeit	18
3.3. Bestimmung der Modellposition	20
3.3.1. Dreidimensionale Geometrie	20
3.4. Ermittlung der Strömungsrichtung	21
3.5. Auswertung der Ölfilmstärke	27
3.6. Stromröhrenbreite	31
3.7. Integriertes Ölvolumen entlang der Stromröhren	34
3.8. Wandschubspannung	35
4. Tool zur Bestimmung der Kamera- und Leuchtfeldpositionen	37
5. Validierungsexperimente im Niedergeschwindigkeitskanal	41
5.1. Windkanal, Testmodell und Versuchsaufbau	41
5.2. Ergebnisse	44
5.3. Funktionalität der Messmethode	47

6. Transsonische Messungen am Flugkörper	51
6.1. DNW-TWG in Göttingen	51
6.2. Wandstromlinienbilder	53
6.3. Ölfilmdickenauswertung	55
6.4. Wandschubspannungsverteilungen	56
7. Diskussion	59
7.1. Mögliche Verbesserungen der Methodik	60
7.2. Optimale experimentelle Durchführung	61
8. Zusammenfassung	63
A. Weitere Details zur Computerauswertung	65
A.1. Zuordnung von Pixeln und Dreiecken	65
A.2. Raytracing	66
A.3. 3D-Modellpositionen der Pixel	67
A.4. Grafikkartenprogrammierung	69
A.5. Rekursive Integration entlang der Stromlinien	70
A.6. Subpixelinterpolation	72
A.7. Interpolation fehlender Daten	73
B. Stromlinienbilder des Flugkörpers	75
C. Matlab-Tool zur Ölfilmanalyse	77
D. Literaturverzeichnis	89

Abkürzungsverzeichnis

$\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$	Eckpunkte eines Dreiecks
c	Lichtgeschwindigkeit
d, m	geometrische Längen
dx, dy	Abstände einer Subpixelposition zu den nächsten ganzzahligen Pixeln
F_{ABC}	Flächeninhalt eines Dreiecks
F	lokaler Verbreiterungsfaktor einer Stromröhre
h	Ölfilmstärke
I	Licht-Intensitäten
$K_{1,2,3}$	Baryzentrische Koordinaten
L	Geometrischer Lichtweg im Öl
L^*	Differenz der optischen Weglänge der interferierenden Strahlen
l_c	Kohärenzlänge
Ma	Machzahl
n	Brechungsindex (des Öls)
p	Druck
P	zu untersuchender Punkt entlang einer Stromlinie
Q_1, Q_2	Hilfspunkte zur Subpixelinterpolation
Re	Reynoldszahl
r, S	Strecke senkrecht zur Stromlinie, Stromröhrenbreite
s	Strecke entlang einer Stromlinie
t	Zeit nach Messungsbeginn
$u^*(y)$	Ölfilmgeschwindigkeitsprofil
u_∞	Windkanalgeschwindigkeit
u	Ölfilmgeschwindigkeit, über die Ölfilmstärke gemittelt
u_{max}	Maximalgeschwindigkeit des Öls an der Ölfilmoberfläche
V	Ölvolumen in einer Stromröhre
x	Windkanalkoordinate in Strömungsrichtung
y, z	Windkanalkoordinaten senkrecht zur Strömungsrichtung
α	Winkel zwischen Oberflächennormalen und Lichtstrahl im Ölfilm
λ	Wellenlänge des Lichts
ν, μ	kinematische, dynamische Viskosität
ρ	Dichte des Öls
τ	Wandschubspannung
θ	Winkel zwischen Oberflächennormalen und einfallendem Licht auf den Ölfilm
φ	Phasenverschiebung der interferierenden Lichtstrahlen
ϕ	Strömungsrichtung auf dem Foto

1. Einleitung

In der Luftfahrttechnik ist es unerlässlich, neue Flugobjekte in Form von Modellen im Windkanal zu testen, bevor die Konstruktion der Originale beginnt. Die wichtigsten Ergebnisse der Experimente sind dabei die Kräfte der Strömung auf das Modell sowie die Beobachtung der Wirbelstrukturen und deren Interaktion mit der restlichen Strömung oder Teilen des Modells. Numerische Simulationen können teilweise zur Vorhersage von hochturbulenten Wirbeln herangezogen werden wodurch eine experimentelle Validierung nach wie vor notwendig ist [1, 2]. Dies betrifft unter Anderem die Detektion von Stromlinien und Vermessung von Kräften im Windkanal. Für die Kräfte senkrecht zur Oberfläche, als Druck mal Fläche darstellbar, haben sich schon viele Messtechniken langjährig etabliert, zum Beispiel PSP [3] (Pressure sensitive paint, drucksensitive Farbe) und verschiedene Absolut- oder Relativdruckmessungen wie dem Pitotrohr. Deutlich schwieriger ist die Vermessung der tangentialen Kräfte, die für einen großen Teil des Reibungswiderstandes verantwortlich sind. Da dieser in der zivilen Luftfahrt über 50% des Gesamtwiderstandes eines Flugzeuges ausmachen kann steht er im Fokus vieler Forschungsprojekte [2, 4]. Durch die Verringerung des Reibungswiderstandes an Flugzeugen kann direkt der Treibstoffverbrauch reduziert werden, was sich positiv auf die Flugkosten und die Umwelt auswirkt.

Als Wandschubspannung wird in der Strömungsmechanik die lokal auf die umströmte Wand wirkende Reibungskraft des Fluids pro Flächeninhalt bezeichnet. Es gibt mehrere Ansätze, diese experimentell zu vermessen, jedoch hat jede Methodik einige Nachteile sodass sich sich noch kein Verfahren für solche Messungen im industriellen Maßstab etabliert hat. Es wäre eine Messtechnik wünschenswert, die diese tangentiale Kraft großflächig, aber lokal aufgelöst und des Weiteren wirtschaftlich sinnvoll im Experiment vermessen kann [5].

Naughton und Sheplak haben 2002 die wichtigsten vorhandenen Techniken zur Vermessung der Wandschubspannung zusammengefasst [5]. Bei den sogenannten direkten Messverfahren geht es um MEMS (Mikroelektromechanisch) basierte Sensoren, die in die Modelloberfläche eingebaut werden und lokal einen einzelnen Messpunkt

1. Einleitung

der Wandschubspannung aufnehmen. Ein kleines Flächenelement ist nur durch Mikrofedern mit der restlichen Struktur verbunden und kann sich durch die Strömung bedingt relativ zur restlichen Modelloberfläche bewegen. Die Richtung und Auslenkung der Bewegung hängt dabei von der Wandschubspannung ab. Die genaue Position des schwebenden Flächenelementes kann elektrisch oder optisch erfasst werden. Diese MEMS-Sensoren müssen aufwändig in das Modell eingebaut werden und liefern keine flächendeckende Informationen über die Strömung. Durch die entstehenden Kanten und Spalten in der Oberfläche wird die Nachlaufströmung eines solchen Sensors beeinflusst, wodurch dort keine weiteren Messungen möglich sind. Dies sorgt dafür, dass mechanische Sensoren nur für einzelne Punktmessungen zu gebrauchen sind.

Die in dieser Arbeit verwendete und weiterentwickelte Messtechnik basiert auf der Ölfilminterferometrie und wurde vor 40 Jahren von Thanner und Blows [6] maßgeblich entwickelt. Bereits 1975 wurden die relevanten Gleichungen aufgestellt und Interferenzbilder der Ölfilme aufgenommen. Dies haben in den folgenden Jahren Garrison und Ackmann [1], Desse [4], Naughton [5, 7, 17] sowie Hijazi [8] weitergeführt und optimiert. Für die Messtechnik wird ein Ölfilm auf die zu beobachtende Fläche aufgetragen, welche wiederum von Luft umströmt ist. Falls der Ölfilm dünn genug ist wird die lokale zeitliche Änderung der Ölfilmstärke in stationären Strömungen durch die Wandschubspannung determiniert. Die Einflüsse des Druckgradienten, der Oberflächenspannung und der Gravitation können dabei vernachlässigt werden. Die Dicke des Ölfilms wird meistens optisch durch Interferenz an der dünnen Schicht vermessen, wobei bereits viele verschiedene Lichtquellen zum Einsatz kamen (siehe Kap. 1.1). Alternativ gibt es auch Ölfilmverfahren ohne Interferometrie wie in der Arbeit von Liu et al 2018 [9]. Das Öl enthält möglichst viele kleine fluoreszierende Partikel die mit den notwendigen Lichtquellen angeregt werden. Die Intensität des Fluoreszenzlichtes hängt direkt von der Ölfilmstärke ab und durch punktuelle Beleuchtung lässt sich die Strömungsrichtung des Öls untersuchen indem die Bewegung der Fluoreszenzerscheinungen verfolgt wird.

Zusätzlich wird in [5] die Beschichtung der Oberfläche mit Flüssigkristallen erwähnt aber direkt auf die Schwierigkeit der experimentellen Umsetzung hingewiesen. Flüssigkristalle ändern bei einer Scherung ihre optischen Eigenschaften wie Farbe und Polarisierungseffekte. Vorteile dieser Methode sind die extrem gute Zeitauflösung im kHz-Bereich sowie die Temperaturunabhängigkeit der Messung. Im Gegenzug dazu ist eine komplizierte Beschichtung des Modells und ein hochpräziser optischer Auf-

bau notwendig, der in vielen Windkanälen mit begrenztem optischen Zugang nicht realisiert werden kann.

1.1. Stand der Technik

In dieser Arbeit wird von den vorhandenen Messverfahren die Ölfilminterferometrie verwendet und genauer untersucht. Von der theoretischen Seite her ist die Bewegung eines dünnen Ölfilms mittlerweile sehr gut aufgearbeitet [5, 6]. Die *thin oil film equation*, Gl. 2.7 beschreibt die Bewegung eines Ölfilms in einem Inertialsystem unter Einfluss von Gravitation, Wandschubspannung und Druckgradienten [10]. Von Tanner und Blows wurde schon 1976 festgestellt, dass alle Effekte gegenüber der Wandschubspannung vernachlässigt werden können [6]. Folglich kann aus der örtlichen Verteilung der Wandschubspannung die Bewegung des Ölfilms berechnet werden und umgekehrt.

Die Herausforderung in der Ölfilminterferometrie liegt in der experimentellen Datengewinnung. Für die finalen Berechnungen sind die Ölfilmstärke und die Strömungsrichtung des Öls notwendig. Bei Annahme einer konstanten Wandschubspannung während der Messzeit kann die gesamte Bilderserie zur Analyse der Ölfilmstärkenveränderung verwendet werden. Dies ist aktuell die gängige Praxis [1, 5, 6, 11] obwohl in [12] Methoden zur Auswertung an einem Zeitpunkt unabhängig vom restlichen Experiment vorgeschlagen werden. Unterschiede gibt es jedoch in der Beleuchtung des Ölfilms zur Erzeugung der Interferenz. Von punktueller Beleuchtung mit einem Laser und einer Photodiode zur Intensitätsmessung ging die Entwicklung seit 30 Jahren zur flächigen Beleuchtung über [5]. Alle modernen Arbeiten benutzen eine Kamera, um eine Verteilung der Wandschubspannung zu vermessen. In den Arbeiten von Desse [4] wird weißes Licht verwendet, um die Interferenz in mehreren Farben zu erzeugen, während Schülein [13, 14] LEDs in drei Farben nutzt. Letztere weisen jedoch ein breites Spektrum auf und unterscheiden sich daher von den ebenfalls verwendeten monochromatischen Lichtquellen von Driver [15]. Fotos dieser sichtbaren Interferenzstreifen auf der Modelloberfläche reichen zur Berechnung der Ölfilmstärke aus [13].

Mittels Photogrammetrie lassen sich die Ergebnisse auf das dreidimensionale Modell umrechnen, welches auch beliebig gekrümmt sein kann [12]. Es wird lediglich ein digitales Gittermodell benötigt. Damit ist die Messtechnik nicht mehr wie bei älteren Arbeiten auf zweidimensionale Strömungen oder planare Oberflächen angewiesen.

1. Einleitung

Schwieriger als die Berechnung der Ölfilm Dicke ist die automatisierte Bestimmung der Strömungsrichtung. Zu diesem Thema existieren in der Literatur bisher auch nur sehr wenige Ergebnisse. Die Wandstromlinien¹ werden häufig per Hand eingezeichnet oder müssen a priori bekannt sein [1, 4, 5, 7]. Mehrere Verfahren verwenden Tracer-Partikel [5] um die Stromlinien des Öls experimentell sichtbar zu machen und manuell einzeichnen zu können. Unter Verwendung anderer Viskositäten ist dies jedoch nicht mehr notwendig. Es ist zu beobachten, dass dünnflüssige Öle auf dem Modell in der Strömung keine perfekt glatten Oberflächen bilden. Entlang der Wandstromlinien bilden sich durch minimale Störungen Streifen kleiner Höhenunterschiede aus, die bereits in mehreren Arbeiten zur manuellen Bestimmung der Strömungsrichtung verwendet wurden [14, 16]. Solche Streifen sind in den Interferenzbildern als Farbunterschiede zum umgebenden Ölfilm deutlich sichtbar und werden aus den Bildern extrahiert und ausgewertet. Diese Bilder können jedoch nicht zur Ölfilm Dickenauswertung verwendet werden, da bei dünnflüssigen Ölen das Signal-Rausch-Verhältnis zu schlecht ist.

Ein Matlab-Tool für die Auswertung eines ähnlichen Messverfahrens wurde bereits 2003 von Naughton, Robinson und Durgesh [7] entwickelt. Dieses benötigt jedoch noch erheblichen manuellen Aufwand, Kenntnis über die Strömungstopologie und setzt strenge Anforderungen an das Experiment voraus, damit alle Annahmen und Vereinfachungen der Berechnungen gültig sind. Seitdem wird an der Automatisierung und Optimierung der Auswertungsmethoden kontinuierlich gearbeitet.

¹Stromlinien der Luft können an der Modelloberfläche nicht sichtbar gemacht werden. Es handelt sich immer um Stromlinien des Ölfilms, also die Linien entlang derer die Wandschubspannung verläuft. Dies sind die Wandstromlinien oder Grenz-Stromlinien der Luft sehr nahe des Ölfilms.

1.2. Zielsetzung

Die bisherigen Verfahren benötigen einen erheblichen Aufwand für die Auswertung des experimentellen Bildmaterials. Dies verhindert, dass die Messtechnik wirtschaftlich sinnvoll eingesetzt werden kann. Ziel dieser Arbeit ist es, die bisherige, größtenteils manuelle Auswertung zu automatisieren und dadurch zur Steigerung der Effizienz beitragen. In [7] wird auf die Notwendigkeit einer solchen einfachen Anwendung hingewiesen:

'It is hoped that, by implementing the complex analysis process in a simple-to-use program, the use of oil-film interferometry in aerodynamic test facilities will become more widespread.'

Dies ist bis jetzt teilweise gelungen, jedoch ist das Ziel einer vollautomatischen Auswertung noch weit entfernt. Zunächst muss geklärt werden, welche Teilschritte für die vollständige Auswertung notwendig sind, anschließend werden diese Schritte möglichst gut automatisiert.

Zur Bestimmung der wirkenden Wandschubspannung mit der verwendeten Methode ist ausschließlich die Variation der Ölfilmstärke in Zeit und Raum und die Wandstromrichtung über der Testfläche notwendig [5]. Die angewandte Messtechnik ist ein Zweibildverfahren, wobei die Entwicklung der Interferenzbilder zu zwei verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen wird. Zur Bestimmung der Wandströmungsrichtung wird meist ein weiterer Versuch bei gleichen experimentellen Bedingungen durchgeführt. Die einzelnen Auswerteschritte müssen automatisiert werden und die Ergebnisse mittels Photogrammetrie auf die dreidimensionale, unter Umständen gekrümmte Modelloberfläche umgerechnet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Matlab-Tool entwickelt, um eine einfache Auswertung der aufgenommenen Interferenzbilder von beliebigen Modelloberflächen zu ermöglichen. Dieses muss alle Bilder und weitere benötigte Daten leicht einlesen können und variierbare Parameter benutzerfreundlich an einer graphischen Oberfläche anpassen können. Nach dem Benutzer-Input und anschließender möglichst kurzen Rechenzeit sollen alle Ergebnisse sowohl zweidimensional als Bild als auch dreidimensional auf dem Gittermodell zur Verfügung stehen.

Im Folgenden werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen der Messtechnik erklärt. In Kapitel 3 werden die Ideen der automatischen Auswertung beschrieben, wobei viele Details der Programmierung im Anhang A zu finden sind. Danach werden die Validierungsexperimente beschrieben. Einerseits werden in Kapitel 5 Experimen-

1. Einleitung

te bei niedrigen Geschwindigkeiten beschrieben, welche direkt mit den Ergebnissen bisheriger Auswertungsverfahren verglichen werden. Andererseits geht es in Kapitel 6 um Experimente bei transsonischen Geschwindigkeiten in Windkanälen von industriell relevanter Größe, um die Funktionalität der Methodik auch bei komplizierten Strömungen und schwierigen Bedingungen zu bestätigen.

2. Grundlagen

2.1. Prinzip der Ölfilminterferometrie

Ziel der Ölfilminterferometrie ist es, aus der Bewegung eines dünnen Ölfilms auf der Modelloberfläche Rückschlüsse auf die Strömung ziehen zu können. Squire [10] zeigt, dass die Grenzschicht der Strömung nicht signifikant vom Ölfilm beeinflusst wird. Dieser haftet an dem Modell und nur die oberen Schichten des Öls werden während der Messung wie in Abb. 2.1 bewegt. Die Verschiebung entlang der Strömungsrichtung führt zu einer Verdünnung des Ölfilms, so dass Interferenzerscheinungen zu beobachten sind. Diese Interferenzen werden in der folgenden Arbeit gezielt durch Beleuchtung von LEDs nacheinander in drei verschiedenen Farben erzeugt. Sobald die Dicke des Ölfilms zu verschiedenen Zeitpunkten sowie die Strömungsrichtung bekannt ist, wird mit Hilfe der von Tanner und Blows [6] sowie Naughton [17] aufgestellten Gleichungen daraus die Wandschubspannung berechnet.

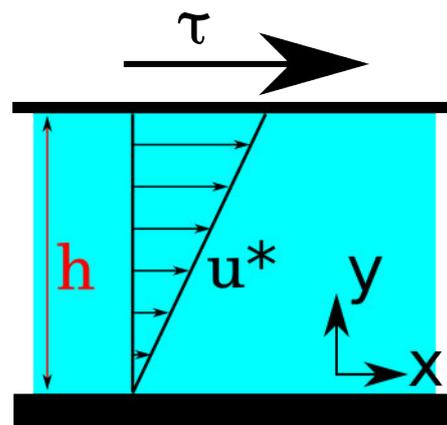


Abb. 2.1.: Skizze der Couette-Strömung. Auf einen Flüssigkeitsfilm der Dicke h wirkt an der Oberfläche die Wandschubspannung τ .

2.2. Wandschubspannung

Alle aerodynamischen Kräfte lassen sich in normale und tangentiale Kräfte aufteilen. Erstere wirken senkrecht zur Oberfläche des untersuchten Körpers und sind als Druckkräfte bekannt. Letztere sind Reibungskräfte, die durch die Viskosität des Fluids entstehen. Der Geschwindigkeitsgradient der Luft-Grenzschicht an der Öl-Oberfläche bestimmt die dafür verantwortliche Wandschubspannung.

Bei der Ölfilminterferometrie wirkt die Wandschubspannung auf den dünnen Ölfilm, der auf der Modelloberfläche aufgebracht ist und bewegt diesen [4, 5, 6]. Dieses System einer Flüssigkeit mit wirkender Scherkraft auf einer Seite kann analog zum in der Strömungsmechanik bekannten Fall der *Couette-Strömung* [18] analytisch berechnet werden. Dies ist schematisch in Abb. 2.1 dargestellt. Ein Fluid der Dicke h , hier das Öl, befindet sich auf einer unbeweglichen Platte. An der Oberfläche des Fluids wirkt die Wandschubspannung τ . In diesem Modellsystem kann die Bewegung des Öls im stationären Zustand einfach berechnet werden [19]. Die horizontale Koordinatenachse entlang der Kraftwirkung sei x , die Achse entlang der Ölfilmstärke sei y .

Im stationären Zustand ist die Gesamtspannung aus Wandschubspannung τ und Druckgradient in x -Richtung null und damit [18]

$$\frac{dp}{dx} + \frac{d\tau}{dy} = 0. \quad (2.1)$$

Falls es entlang der Strömung bei kleinen h keine signifikanten Druckgradienten gibt, bleibt die Wandschubspannung im Querschnitt immer konstant [5].

$$\frac{d\tau}{dy} = 0, \quad (2.2)$$

Mit dem Zusammenhang nach Newton bei laminaren Strömungen, also kleinen Reynoldszahlen

$$\tau = \mu \frac{du^*}{dy} \quad (2.3)$$

folgt, dass die Geschwindigkeit des Öls von der Bodenplatte zur Oberfläche linear zunimmt:

$$u^*(y) = u_{max} \frac{y}{h}. \quad (2.4)$$

In Gl. 2.3 eingesetzt lässt sich τ abhängig von der Maximalgeschwindigkeit u_{max} an der Ölfilmoberfläche berechnen. Durch das lineare Geschwindigkeitsprofil ist die

Durchschnittsgeschwindigkeit des Öls

$$u = u_{max}/2 = \frac{\tau h}{2\mu} . \quad (2.5)$$

In den folgenden Kapiteln wird mit u die Durchschnittsgeschwindigkeit beschrieben. Das genaue Geschwindigkeitsprofil $u^*(y)$ abhängig von dem Abstand zur Modelloberfläche wird nicht mehr benötigt.

Dieses Modell ist nur für eine laminare Strömung mit kleinen Reynoldszahlen gültig, wenn Trägheitseffekte vernachlässigt werden können. Um dies zu rechtfertigen muss die Reynoldszahl Re des fließenden Öls abgeschätzt werden:

$$Re = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{viskose Kräfte}} = \frac{\rho u^2/s}{\mu u/h^2} = \frac{u h^2}{\nu s} . \quad (2.6)$$

Folgende Abschätzungen sind möglich und wurden bereits in [5] durchgeführt:

- Dichte: $\rho \approx 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, auch wenn die meisten Öle etwas leichter sind.
- Typischer Abstand zur Ölfilmvorderkante: $s < 3 \text{ cm}$ da der Ölfilm bei größeren Distanzen dünn wird
- Kinematische Viskosität $\nu = 100 \text{ cSt}$ bis 750 cSt (Centistokes). $1 \text{ cSt} = 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
- Ölfilmstärke $h \approx 1 \mu\text{m}$, meistens aber deutlich weniger.
- Strömungsgeschwindigkeit u : Diese kann mit Hilfe der später berechneten Wandschubspannung von $\tau \approx 200 \text{ Pa}$ abgeschätzt werden: $u = \frac{\tau h}{\rho \mu} \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Daraus errechnet sich eine Reynoldszahl von maximal $Re \lesssim 6 \cdot 10^{-9}$. Dies bestätigt, dass die viskosen Kräfte eine dominierende Rolle gegenüber den Trägheitskräften haben.

2.3. Bewegung des Ölfilms

Neben der Wandschubspannung τ können Druckgradienten ∇P und Gravitation \vec{g} den Ölfilm ebenfalls beeinflussen. Diese drei Effekte zusammen ergeben in differenzieller Form die *thin-oil-film equation* von Squire [5, 10]

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\tau_x h^2}{2\mu} - \frac{h^3}{3\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} - \rho g_x \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\tau_z h^2}{2\mu} - \frac{h^3}{3\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g_z \right) \right] = 0. \quad (2.7)$$

Dabei wurde die Oberflächenspannung direkt vernachlässigt. Die Stärke der drei Effekte wurde schon häufig einander gegenübergestellt [5, 6, 10, 16]. Der Term der Wandschubspannung ist unter den verwendeten experimentellen Bedingungen um vier Größenordnungen größer als die beiden anderen Terme, sodass deren Vernachlässigung zu einem Fehler von unter 1 % führt [5].

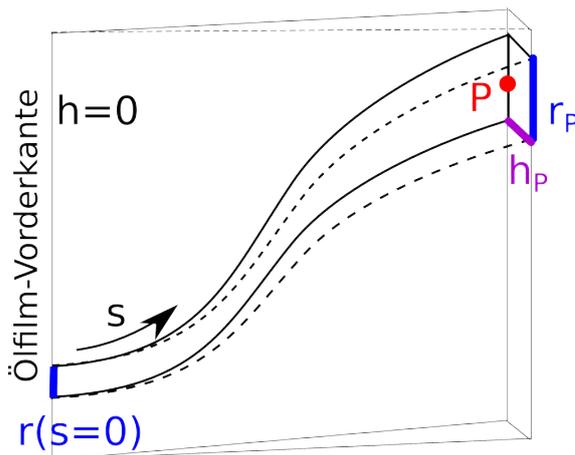


Abb. 2.2.: Schematische Darstellung einer Wandstromröhre, die Luft strömt von links nach rechts entlang der eingezeichneten Stromlinien.

Aus den experimentellen Daten sind das Strömungsfeld und die Ölfilmstärke zu verschiedenen Zeitpunkten bekannt. Zur Berechnung der Wandschubspannung wird die Masseerhaltung und Inkompressibilität des Öls verwendet. Nach Kap. 2.2 bestimmt nur die Wandschubspannung die lokale Strömungsgeschwindigkeit am Messpunkt P . Hier wird eine einzelne Stromröhre wie in Abb. 2.2 betrachtet. Dies ist der Bereich zwischen zwei benachbarten Stromlinien im Öl, also Wandstromlinien der Luft. Es wird kein Öl aus der Stromröhre heraus

oder in diese hinein fließen, da dafür eine Stromlinie gekreuzt werden müsste. Der Ölfluss durch den Querschnitt der Röhre an P entspricht also genau der Änderung des Ölolumens vom Startpunkt bis zum Punkt P .

Die Strecke entlang der Stromröhre sei s , die lokale Ölfilmstärke $h(s)$ und die Stromröhrenbreite sei r . P im Index bezieht sich bei allen Variablen auf den Wert am

Punkt P . Dann folgt die Volumenänderung mit [6]:

$$\text{Gesamtvolumensänderung: } \frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt} \int_0^{s_P} r(s)h(s) ds \quad (2.8)$$

$$\text{Querschnitts-Durchfluss: } \frac{dV}{dt} = -r_P h_P u_P \quad (2.9)$$

$$\text{mit Gl. 2.5: } \frac{dV}{dt} = -r_P h_P \frac{\tau_P h_P}{2\mu} . \quad (2.10)$$

Diese werden noch gleichgesetzt, um aus der Ölfilmstärke die Wandschubspannung zu berechnen [20]

$$\frac{d}{dt} \int_0^{s_P} r h ds = -r_P h_P \frac{\tau h_P}{2\mu} \quad (2.11)$$

$$\Leftrightarrow \tau = -\frac{2\mu}{r_P (h_P)^2} \frac{d}{dt} \int_0^{s_P} r h ds . \quad (2.12)$$

Die einzigen Unbekannten sind also die Dicke h des Ölfilms und die Stromröhrenbreite r , die im Experiment ermittelt werden können. Bisherige Arbeiten [4, 5, 6, 7, 11, 21] treffen weitere Annahmen um diese Gleichung zu vereinfachen und besser nutzbar zu machen. Dies schränkt jedoch die möglichen Anwendungsgebiete und allgemeine Gültigkeit ein. Auf diese Vereinfachungen wird hier verzichtet und mit der vollständigen Gleichung weitergerechnet.

2.4. Interferenz am Ölfilm

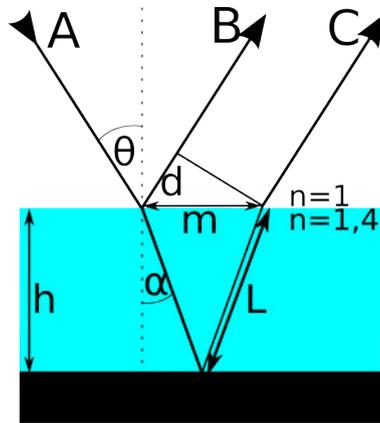


Abb. 2.3.: Strahlengang am Ölfilm mit Brechung und Reflektion des einfallenden Strahles A, Darstellung aller für geometrische Berechnungen wichtigen Parameter.

Der Ölfilm ist eine dünne transparente Schicht, deren Brechungsindex sich deutlich von dem der Luft unterscheidet. Wie bei einem Fizeau-Interferometer wird die Oberfläche einen einfallenden Lichtstrahl teilweise reflektieren und brechen. Die zwei Lichtstrahlen interferieren miteinander, wodurch je nach Dicke des Ölfilms eine konstruktive oder destruktive Überlagerung der beiden Wellen zu beobachten ist. Die Intensität des ausfallenden Lichtes ist von der Wellenlänge und der Ölfilmstärke abhängig.

Zunächst wird die begrenzte Kohärenzlänge des Lichtes noch nicht berücksichtigt und davon ausgegangen, dass monochromatisches,

kohärentes Licht der Wellenlänge λ unter einem Einfallswinkel von θ zur Flächennormale auf einen Ölfilm der Dicke h einfällt. Dies ist schematisch in Abb. 2.3 dargestellt.

Ein Teil des einfallenden Lichtes A wird an der Oberfläche des Öls als Strahl B reflektiert. Der andere Teil wird an der Öloberfläche gebrochen und erst an der Modelloberfläche reflektiert. Gelangt das Licht erneut zu ersterer, wird es gebrochen und verlässt als Strahl C im gleichen Winkel θ wie Strahl B das Modell¹. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Ölfilmoberfläche nahezu planparallel ist. Es entsteht eine Überlagerung der zwei Wellen (B und C) gleicher Wellenlänge mit einer Phasendifferenz von φ . Diese ist durch die zusätzliche optische Weglänge $2 \cdot n \cdot L$ des Strahles C im Öl mit Brechungsindex n und geometrischer Weglänge L bestimmt (siehe Abb. 2.3). Die Überlagerung beider normierten Wellenfunktionen f_1 und f_2

¹Höhere Ordnungen der Reflektion wie beim FIZEAU-INTERFEROMETER treten auch auf, ändern aber nichts an der Interferenzbedingung.

berechnet sich nach [19]:

$$f = f_1 + f_2 \quad (2.13)$$

$$= \sin\left(2\pi\frac{c}{\lambda}t\right) + \sin\left(2\pi\frac{c}{\lambda}t + \varphi\right) \quad (2.14)$$

$$= 2 \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(2\pi\frac{c}{\lambda}t + \frac{\varphi}{2}\right) . \quad (2.15)$$

Es entsteht also eine Welle gleicher Wellenlänge, deren Amplitude mit einem Faktor $2 \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)$ von der Phasendifferenz φ der beiden interferierenden Wellen abhängt. Dies entspricht der optischen Weglänge mit der Wellenzahl $2\pi/\lambda$ multipliziert. Die Differenz der optischen Weglänge der beiden interferierenden Strahlen ist dabei:

$$L^* = 2nL - d \quad (2.16)$$

$$\varphi = \frac{2\pi L^*}{\lambda} . \quad (2.17)$$

Die beobachtete Intensität I ist das zeitliche Mittel des quadrierten Pointingvektors, also hier unter Vernachlässigung konstanter Vorfaktoren [19]

$$I = \overline{4 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin^2\left(2\pi\frac{c}{\lambda}t + \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (2.18)$$

$$= 2 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.19)$$

$$= 2 \cos^2\left(\frac{\pi L^*}{\lambda}\right) \quad (2.20)$$

Die resultierende Intensität der Interferenz ist also periodisch von L^* abhängig und hat immer dann ein Maximum, wenn die Differenz der optischen Weglänge beider Strahlen ein Vielfaches der Wellenlänge des Lichts ist (siehe Abb. 2.4). Die Differenz der optischen Weglängen L^* lässt sich mittels geometrischer Optik anhand der in Abb. 2.3 eingezeichneten Winkel in Abhängigkeit von der Ölfilmstärke h , dem

2. Grundlagen

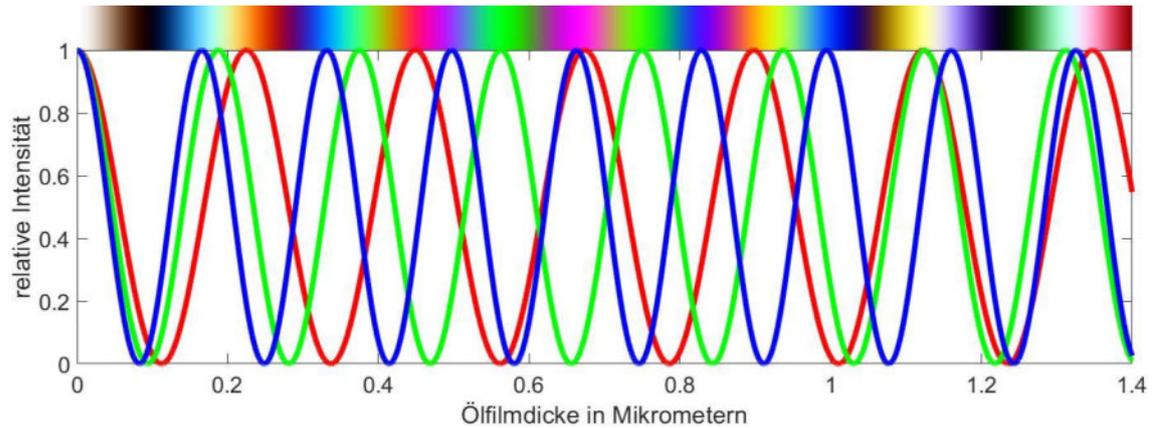


Abb. 2.4.: Theoretische Interferenz-Farbintensitäten von monochromatischem Licht von drei Wellenlängen 629 nm (rot), 524 nm (grün) und 464 nm (blau) in Abhängigkeit von der Ölfilmstärke. Darstellung als Intensitätsgraph und darüber das theoretische RGB-Bild der drei Farben zusammen.

Brechungsindex n und dem Einfallswinkel des Lichts θ berechnen:

$$\text{Differenz der optischen Weglänge } L^* = 2nL - d \quad (2.21)$$

$$\text{Anteil in der Luft } d = m \sin \theta \quad (2.22)$$

$$= 2h \tan \alpha \sin \theta \quad (2.23)$$

$$= 2nh \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \quad (2.24)$$

$$\text{Anteil im Öl } L = \frac{h}{\cos \alpha} \quad (2.25)$$

$$\Rightarrow L^* = 2nh \frac{1 - \sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \quad (2.26)$$

$$= 2nh \cos \alpha \quad (2.27)$$

$$= 2nh \cos \left(\arcsin \left(\frac{\sin \theta}{n} \right) \right) \quad (2.28)$$

In den durchgeführten Experimenten werden Farb-LEDs mit einem relativ breiten Spektrum verwendet die somit Licht in einem Wellenlängen-Band bereitstellen. In diesem Fall muss die begrenzte Kohärenzlänge des Lichtes l_c berücksichtigt werden. Nur bei einer ungestörten Sinuswelle ist die Selbstähnlichkeit der Wellenfunktion mit einer identischen, aber um eine Wellenlänge verschobenen, gegeben. Bei einem breiten Spektrum, also weiteren Schwingungsfrequenzen neben der Frequenz der Hauptwelle, unterscheiden sich die Originale und um eine Wellenlänge verschobene Welle geringfügig. Die Interferenz ist zwar noch sichtbar, jedoch nicht mehr in der

vollen Intensität. Dementsprechend nimmt die Amplitude des Interferenzmaximums mit zunehmender Phasenverschiebung beziehungsweise Ölfilmstärke ab. Um dies zu berechnen wird die Korrelationsfunktion der Wellenfunktion benötigt, was im allgemeinen Fall sehr kompliziert werden kann [22].

Im Fall eines gaußförmigen Spektrums ist die Korrelationsfunktion nach dem Wiener-Khintchine-Theorem² [22, 23] die Fouriertransformierte des Spektrums. Das frequenzabhängige Spektrum $A(\nu)$ wird durch die Funktion

$$A(\nu) = A_0 e^{-\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)^2} \quad (2.29)$$

approximiert [24]. Damit steht die Kohärenzlänge des Lichtes als Halbwertsbreite der Korrelationsfunktion in direktem Zusammenhang zur spektralen Breite $\Delta\nu$ der LEDs: $l_c = \frac{c}{\pi\Delta\nu}$. Das Spektrum der verwendeten LEDs kann sehr gut als gaußförmig genähert werden [8], muss aber vollständig vermessen werden. In [16] wurde z.B. das Spektrum des bisherigen Aufbaus am DLR Göttingen vermessen und folgende Kohärenzlängen l_c bestimmt:

$$l_{c,Blau} = 1,6 \mu m$$

$$l_{c,Grün} = 2,0 \mu m$$

$$l_{c,Rot} = 2,4 \mu m .$$

Da der genaue Wert für die Auswertung nicht notwendig ist, sondern nur eine grobe Näherung für qualitative Darstellungen, wurde in dieser Arbeit auf die genaue Berechnung der Kohärenzlänge verzichtet und nur die mittlere Wellenlänge des Spektrums vermessen. Unter Berücksichtigung der Kohärenzlänge ändert sich die Formel der Intensität in Abhängigkeit von der Ölfilmstärke [19]:

$$I(L^*) = I_0 + I_A \exp\left(-\left(\frac{L^*}{l_c}\right)^2\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi L^*}{\lambda}\right) . \quad (2.30)$$

²manchmal auch in der Schreibweise Wiener-Chintschin-Theorem

2. Grundlagen

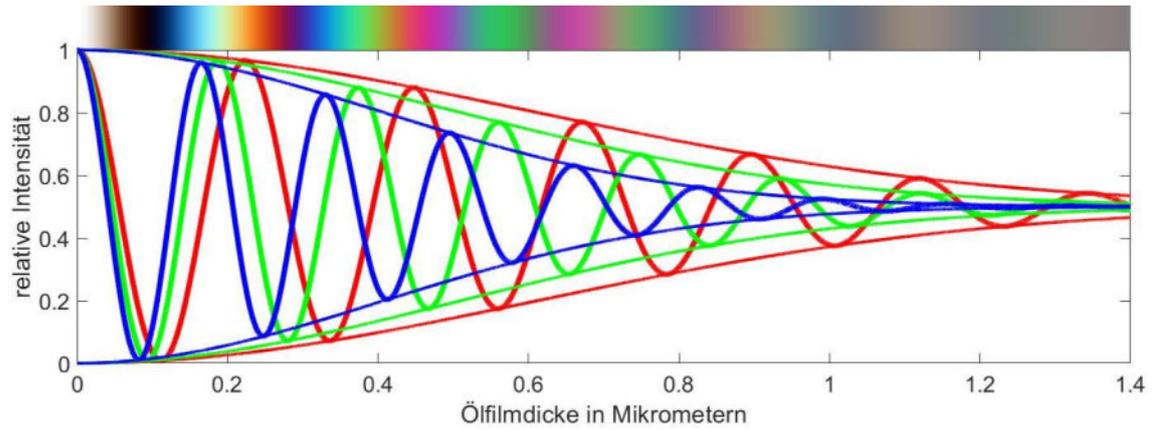


Abb. 2.5.: Theoretische Farbintensitäten bei Weißlichtinterferenz in Abhängigkeit von der Ölfilmstärke wie in Abb. 2.4 mit Berücksichtigung der Kohärenzlänge des Lichtes und Darstellung der einhüllenden Funktion.

Dabei wurden die Amplituden I_0 und I_A eingeführt, die von den bisher noch nicht berücksichtigten Intensitätsanteilen des reflektierten und gebrochenen Strahles abhängen. Diese korrigierten Intensitätsverläufe sind in Abb. 2.5 dargestellt. Bei zunehmender Ölfilmstärke sind die Maxima nur noch schwer voneinander zu unterscheiden, was dem gesamten Verfahren eine Obergrenze der auswertbaren Ölfilmstärke von etwa einem Mikrometer aufsetzt.

3. Computerauswertung der Bilder

3.1. Überblick

Die zentrale Aufgabe dieser Arbeit ist es, ein Matlab-basiertes Computerprogramm zu entwickeln um experimentelle Ölfilminterferenzbilder automatisiert auszuwerten zu können. Beide Windkanalexperimente zur Validierung des Tools werden in Kapitel 5 und 6 beschrieben. Bei jeder vermessenen Konfiguration wurden mehrere Bilderserien aufgenommen: In einer Serie sind lokal Strukturen entlang der Stromlinien sichtbar, in einer anderen dahingegen großflächige Interferenzerscheinungen, mit denen die Ölfilmstärke zu bestimmen ist. Referenzbilder ohne Öl wurden zusätzlich aufgenommen um Ungleichmäßigkeiten in der Beleuchtung oder Oberflächenbeschaffenheit ausgleichen zu können.

Um die Wandschubspannung, wie in Gleichung 2.12 beschrieben, ausrechnen zu können müssen mehrere physikalische Größen aus diesen Interferenzbildern ermittelt werden. Zunächst die lokalen Strömungsrichtungen im Öl sowie eine ausreichende Menge daraus resultierender Wandstromlinien. Entlang dieser Stromlinien kann die lokale Divergenz oder Konvergenz der Öl-Strömung und damit die Stromröhrenbreite berechnet werden. In der zweiten Bilderserie, die mit viskoserem Öl auf dem selben Modell gewonnen wird, soll die örtliche und zeitliche Variation der Ölfilmstärke ermittelt werden. Die Stromröhrenbreite, mit der Ölfilmstärke multipliziert und entlang der Stromlinie integriert ergibt das Öl-Volumen in jeder einzelnen Stromröhre. Die Differenz dieser Volumina zwischen zwei Zeitpunkten wird benötigt, um den Wandschubspannungsverlauf entlang der Stromröhre zu berechnen.

Schwierigkeiten entstehen durch verzerrte Bilder und Beobachtung einer gekrümmten Oberfläche. Abstände in Pixeln sowie Winkelmaße auf den Bildern entsprechen dadurch nicht den Abständen und Winkeln auf dem dreidimensionalen Modell. Jedes untersuchte Modell ist für die Auswertung als digitales unstrukturiertes Gittermodell vorhanden, wodurch die gekrümmte Oberfläche durch viele kleine Dreiecke repräsentiert ist. Durch Verbindung der Gitterpunkte mit den zugeordneten Nach-

3. Computerauswertung der Bilder

barpunkten entstehen planare Dreiecke, deren Approximationsfehler der Oberfläche von der Größe der Dreiecke und der Oberflächenkrümmung abhängt. Für die hier beschriebene Aufgabe liegt eine gut praktisch nutzbare Annäherung vor, sobald die Dichte der Dreiecke auf dem Modell vergleichbar zur Pixelauflösung auf dem Foto ist. Andernfalls entstehen unnötige Fehler bei der Berechnung der lokalen Oberflächennormalen oder Abständen auf dem Modell.

Die gesamte Auswertung muss mit den geometrischen Informationen des dreidimensionalen Modells durchgeführt werden, um die genannten geometrischen Probleme der gekrümmten Oberfläche zu umgehen. Aus mehreren Gründen ist eine dreidimensionale Rechnung auf dem ungeordneten Gitter rechnerisch nicht sinnvoll. Die wichtigsten davon sind die Suche nach benachbarten Datenpunkten und die Subpixel-Interpolation. Eine Subpixel-Interpolation ist notwendig, weil alle Daten nur an diskreten Punkten vorhanden sind, aber für eine kontinuierliche Auswertung oft an beliebig anderen Punkten ausgelesen werden müssen.

Mathematisch komplizierter aber rechentechnisch realisierbar ist dagegen die Variante, alles auf dem Pixelbild zu berechnen. Dafür werden viele Korrekturen benötigt, die den Blickwinkel auf das Modell, die lokale Oberflächennormale und alle Verzerrungen berücksichtigen.

3.2. Rechenlaufzeit

Da das Auswertungstool am Ende sehr viele Programmschritte enthält und große Mengen an Daten ausgewertet werden, wird auf eine möglichst kurze Laufzeit großer Wert gelegt. Heutige Computer mit Prozessoren im Geschwindigkeitsbereich von Gigahertz sind in der Lage, 10^9 Operationen pro Sekunde durchzuführen [25]. Alles was über dieser Größenordnung liegt bedeutet also ohne Verwendung eines großen Rechenclusters eine merklich lange Rechenzeit von mehreren Minuten oder Stunden. Im aktuellen Fall liegt die Auflösung der verwendeten Kamera bei 12 Megapixel, also die Anzahl der untersuchten Pixel bei ca. 10^7 . Die Anzahl der Dreiecke des Modells wurde auf ca. $4 \cdot 10^6$ gewählt um etwa der Anzahl der relevanten Pixel zu entsprechen. Ein Algorithmus, dessen Laufzeit quadratisch von einer dieser Größen abhängt oder sich aus dem Produkt der beiden zusammensetzt ist also schon nicht mehr in kurzer Zeit rechenbar. Eine einzelne Operation wie Addition oder if-Abfrage, die auf jedes Pixel-Dreieck-Paar angewendet wird, muss $4 \cdot 10^{13}$ mal aufgerufen werden und lässt sich mit den verfügbaren 10^9 Operationen pro Sekunde auf über eine Stunde

Operation	Relative Dauer	Bearbeitete Bilder pro sec
Addition	1	23
Subtraktion	1	23
Multiplikation	1,5	22
Division	4	20
Wurzel	8	6
Sinus	8	6
Arcustangens	20	4

Tab. 3.1.: Vergleich der Laufzeit verschiedener Operationen mit Matlab auf einem i7-6700. Unterschiede in den letzten beiden Spalten kommen dadurch zustande, dass auch Zeit verwendet wird um die Daten zu lesen und die Ergebnisse zu speichern.

Rechenlaufzeit abschätzen. Genauso können weder Knotenpunkte noch Pixel unter sich paarweise in geschachtelten Schleifen durchlaufen werden¹.

Subpixelinterpolation ist auf einem zweidimensionalen sortierten Pixelbild einfach zu berechnen, benötigt auf einem dreidimensionalen unsortierten Gitter aber eine um 5 Größenordnungen längere Zeit. Das ist bei einer Funktion, die über 10^8 mal aufgerufen wird, so viel, dass die Rechenlaufzeit von Minuten auf etliche Tage steigen würde.

Um verschiedene Rechenoperationen untereinander vergleichen zu können, wurden spezielle Benchmarkingtests mit Matlab durchgeführt. Tab. 3.1 gibt an, wie lange die grundlegenden Rechenoperationen erfahrungsgemäß [26] brauchen, normiert auf 1 bei der Addition. Die rechte Spalte zeigt Ergebnisse des Benchmarks auf einem Intel i7-6700 und 32 GB DDR4-RAM als Anzahl der Operationen pro Sekunde, die auf die Daten eines 12 Megapixel-Bildes² mit drei Datenkanälen angewendet werden können. Dies können die Farbwerte der Kamera sein, die Komponenten des Oberflächennormalenvektors in jedem Pixel oder beliebige andere Größen, die für jeden Pixel berechnet werden müssen. Wo immer möglich, sollten Wurzeloperationen und trigonometrische Funktionen vermieden werden, was vor allem bei Abstandsvergleichen leicht machbar ist.

¹zum Beispiel um von jedem Knotenpunkt zu jedem anderen den 3D Abstand zu berechnen

² $4096 \cdot 3000 \cdot 3 = 3,5 \cdot 10^7$ Zufallszahlen. Die meisten Berechnungen verwenden keine Farbwerte (8-Bit integer) sondern berechnete Daten wie Oberflächennormale, Ölfilmstärke oder Strömungsrichtung (double). Single hat in Matlab keinen signifikanten Geschwindigkeitsvorteil.

3.3. Bestimmung der Modellposition

Für alle späteren Auswertungsschritte ist die Verknüpfung von Pixelpositionen mit dreidimensionalen Positionen der Gitterelemente auf dem Modell notwendig. Dafür muss bestimmt werden, wie das Modell relativ zur Kamera im Raum orientiert ist. Für eine dreidimensionale Auswertung und die Möglichkeit, Bilder und Ergebnisse auf dem Gittermodell darstellen zu können wird Photogrammetrie verwendet. Das Verfahren ist weit verbreitet und bei dem Teil der Auswertung konnte auf bereits vorhandene Techniken der Arbeitsgruppe zurückgegriffen werden [27]. Unter Verwendung aller Kameradaten wie Brennweite des Objektivs, Pixelauflösung auf dem Sensor und der geometrischen Positionen von Kamera und Modell lässt sich berechnen, wie die Abbildung aussehen wird. Ziel ist es, alle unbekannt Parameter so zu fitten, dass das berechnete Ergebnis möglichst gut mit dem tatsächlichen Foto übereinstimmt. Die Parameter der Optimierung sind dabei Position des Modells, Rotation, Distanz zur Kamera und Objektivverzerrung.

Im Modell werden vier bis acht markante Punkte wie Kanten, Ecken, Druckbohrungen oder selbst aufgebrachte Marker gewählt. Alle Marker müssen im Bild gefunden und die Positionen ausgewählt werden. Iterativ werden die geometrischen Parameter variiert und jeweils das Residuum berechnet, also der quadratische Abstand zwischen Bildmarkern und projizierten Modellmarkern. Ist das Minimum dieses Residuums gefunden, werden die aktuellen Werte der Projektionsparameter für alle folgenden Berechnungen verwendet. Je weniger Markerpunkte gewählt werden, desto höher ist das Risiko, dass die Optimierung nur in einem lokalen Minimum endet und nicht die tatsächliche Modellposition findet.

Mit diesen Parametern werden alle Gitterknotenpunkte auf das Bild projiziert. Dies liefert direkt die Information darüber, welche Pixel des Bildes für die weitere Auswertung interessant sind. So kann in den Bildern automatisch das Modell vom Hintergrund getrennt werden, welcher die weitere Auswertung nur stören würde.

3.3.1. Dreidimensionale Geometrie

Nach Ermittlung der Modellposition wird für jeden Pixel berechnet, welches Dreieck auf der Modelloberfläche an dieser Stelle abgebildet wird (siehe Kap. A.1). Sobald für jeden Pixel ein Dreieck der Modelloberfläche gefunden wurde, kann die Oberflächennormale des Modells an der zum Pixel zugehörigen Position berechnet werden. Das Kreuzprodukt zweier Dreieckskanten berechnet die Richtung senkrecht zur Ober-

fläche. Dieser Vektor muss jedoch nach Bestimmung der Modellposition entsprechend der gefundenen Rotationswinkel und Verschiebungen transformiert werden. Der Blickwinkel auf die Oberfläche θ ist der Winkel zwischen rotierter Oberflächennormale und Verbindungslinie des Mittelpunktes des betrachteten Dreiecks zur Kameraposition.

Für genaue Abstandsberechnungen und Winkel auf der Modelloberfläche muss jedem Pixel eine exakte dreidimensionale Position auf dem Modell zugeordnet werden, die nicht notwendigerweise genau auf einem Gitterknoten liegt. Dafür werden Baryzentrische Koordinaten verwendet (siehe Anhang A.3). Mit diesen Informationen kann die Auswertung Pixelbezogen durchgeführt werden, berücksichtigt aber alle Effekte der dreidimensionalen Geometrie.

3.4. Ermittlung der Strömungsrichtung

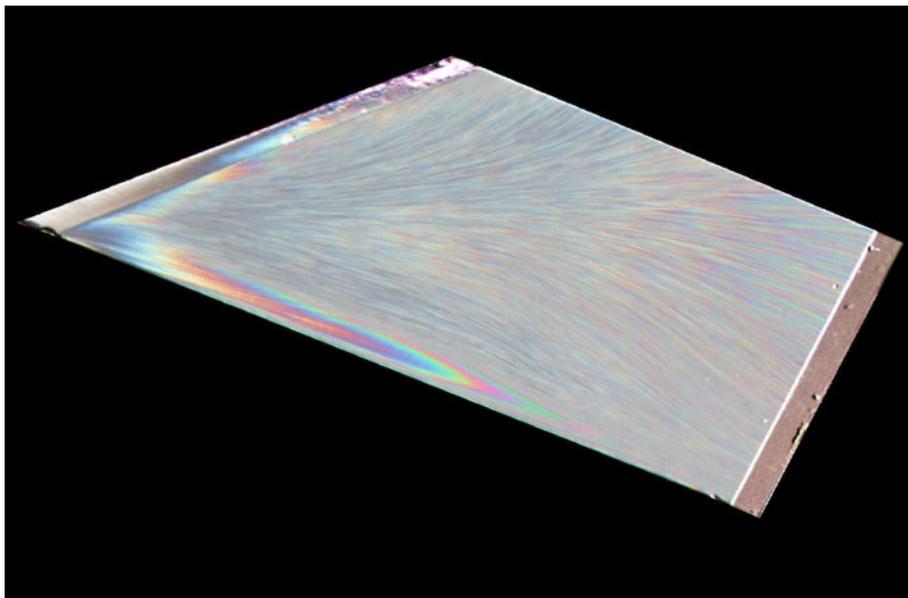


Abb. 3.1.: Wandstromlinienfoto des Modells, mit Referenzbild verglichen und Hintergrund durch die Maske entfernt.

Anhand von Interferenzbildern wie Abb. 3.1, die im speziellen Versuch mit einem sehr dünnflüssigen und großflächig verteilten Öl erzielt wurden, lassen sich die Wandstromlinien auf dem Modell gut visuell detektieren. Bei dem dünnflüssigen Öl und langen Messzeiten reichen minimale Störungen der Ölfilmoberfläche aus, um diese entlang der Stromlinien zu beeinflussen. Ursache dafür können kleinste Staubpartikel

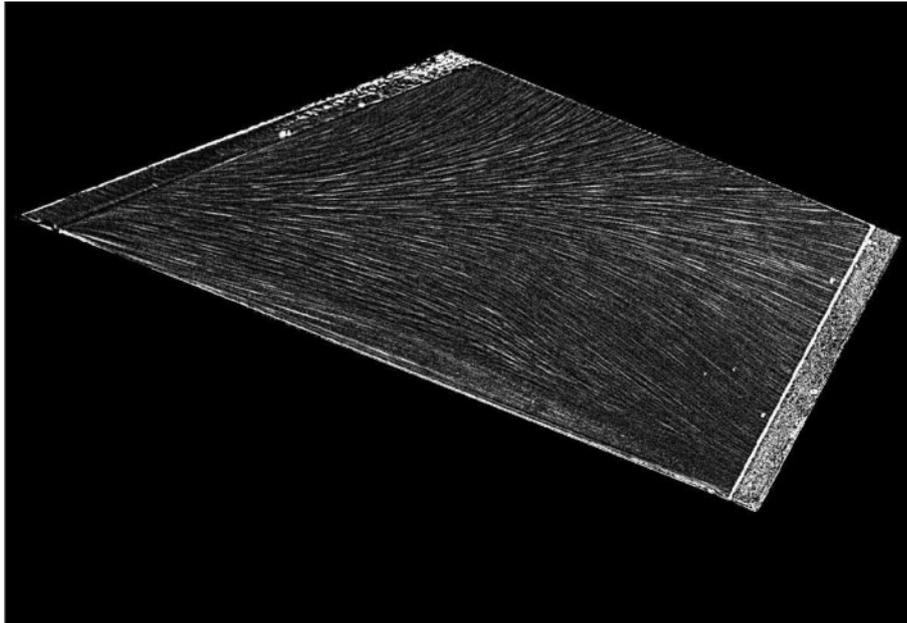


Abb. 3.2.: Differenz des originalen Bildes (Abb. 3.1) zum gefilterten Bild. Die Graustufen sind das Maximum der drei Farbkanäle.

oder Instabilitäten auf der Oberfläche sein. Die resultierenden Streifen mit einem geringen Dickenunterschied gegenüber der Umgebung werden anhand Farbunterschieden sichtbar. Solche Bilder wurden bereits zur manuellen Auswertung verwendet [13, 16], was jedoch sehr mühselig ist. Für eine hier implementierte automatische Erkennung müssen die Streifen deutlicher hervorgehoben werden. Großskalige Interferenzstreifen, anhand derer in Kap. 3.5 die Ölfilmdicke bestimmt wird, dürfen nicht als Strömungsrichtung fehlinterpretiert werden. Auf das Originalbild wird dafür zunächst ein Medianfilter angewendet, was genau die wichtigen feinen Streifen entfernt, welche nicht der Umgebungsfarbe entsprechen. Die Subtraktion des geglätteten Bildes vom Originalbild (siehe Abb. 3.2) ist danach frei von groben Strukturen wie dem Hintergrund und Interferenzstreifen und enthält nur noch die gewünschten Streifen. Aus den drei Farbkanälen wird an jedem Pixel jener mit der größten Differenz gewählt, was dem mit dem deutlichsten Kontrast entspricht. In einigen Bildern bleiben jedoch weitere Strukturen der Modelloberfläche sichtbar. Beispiele sind Kratzer auf der Modelloberfläche, Bläschen auf der auf dem Modell aufgetragenen Folie oder ähnliche Oberflächenmerkmale, die auch mit dem Referenzbild nicht vollständig entfernt werden können. Diese Strukturen werden zunächst fälschlicherweise als Wandströmungsrichtungen detektiert und müssen später erkannt und entfernt werden.

Um die lokale Strömungsrichtung automatisch zu erkennen wird an jedem Pixel in einem vordefinierten Suchkreis radial in 1° Schritten das Graustufenbild 3.2 untersucht. Die quadratische Differenz der Pixelwerte entlang der radialen Linie zu dem Wert des Startpixels werden aufsummiert. Kreuzt die radiale Linie mehrere der sichtbaren Farbstreifen, so ist die Differenz zum Startpixel größer und die Richtung entspricht nicht der Strömungsrichtung des Öls. Eine minimale Differenz bedeutet eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass diese radiale Linie genau entlang eines Streifens mit konstanter Farbe verläuft.

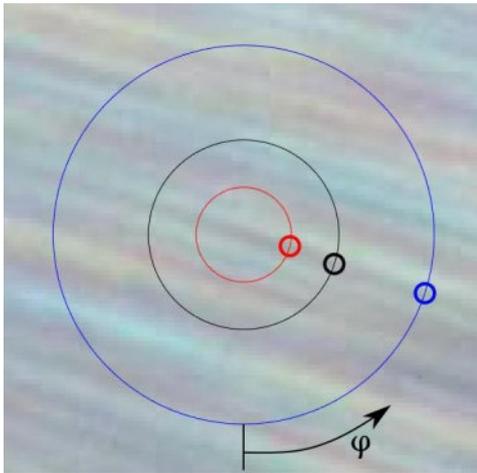
In Abb. 3.3 sind zwei Beispiele dieser Auswertung gezeigt, eine Erfolgreiche und eine Fehlerhafte. Beide Bilder auf der linken Seite zeigen jeweils 100 mal 100 Pixel kleine Ausschnitte aus Abb. 3.1. Die Suchkreise haben einen Radius von 10 Pixeln (rot), 20 Pixeln (schwarz) oder 40 Pixeln (blau). Alle untersuchten Linien sind Durchmesser dieser Kreise. 0 Grad entspricht der vertikalen Linie, welche sich mit zunehmendem Winkel φ wie eingezeichnet gegen den Uhrzeigersinn dreht. Die Diagramme auf der rechten Seite, Abb. 3.3b und 3.3d zeigen die ermittelte quadratische Differenz der Farbintensität auf dem Durchmesser im entsprechenden Winkel von 0 bis 179 Grad gegenüber der des Startpixels im Zentrum des Bildes. Der Algorithmus kann nicht unterscheiden, ob die Strömung vorwärts oder rückwärts verläuft³. In Abb. 3.3b wurde die Strömungsrichtung sicher identifiziert, da es in eine Richtung ein klares Minimum gibt, in der folglich keine Linien anderer Farbe gekreuzt wurden. Im zweiten Beispiel sind dagegen nahe des zentralen Startpixels keine farbigen Linien zu erkennen und der Algorithmus findet kein sicheres und eindeutiges Ergebnis. Diese fehlerhaften oder unsicheren Werte müssen automatisch entfernt werden, um die Zuverlässigkeit des Verfahrens zu gewährleisten.

Im nächsten Schritt wird eine mehrstufige Datenbereinigung durchgeführt, um die Fehldetektionen auszusortieren. Ein erster Filter prüft mit Hilfe eines Schwellenwertes die gefundenen normierten Minima des 180° -Scans. Liegt das Minimum unter 40 % des Durchschnittswertes aller 180 Winkel, wird Wert akzeptiert. Andernfalls, wenn das Minimum näher am Durchschnittswert liegt, wird der Wert als Rauschen klassifiziert und gelöscht.

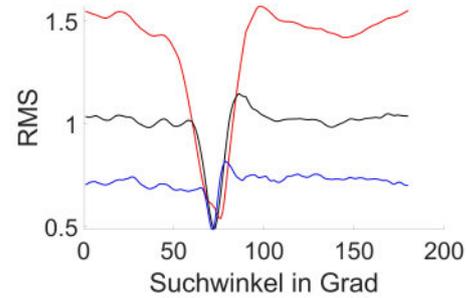
Ein zweiter Filter vergleicht die gefundene Richtung mit jener der Nachbarpixel. Nur wenn in einem Radius von z.B. 15 Pixel mindestens 60 % aller Pixel die gleiche Richtung $\pm 16^\circ$ aufweisen, wird der Wert akzeptiert, andernfalls gelöscht. Die ange-

³Es wird hier immer eine Strömung von links nach rechts angenommen, die Input-Bilder müssen entsprechend rotiert werden, damit das stimmt.

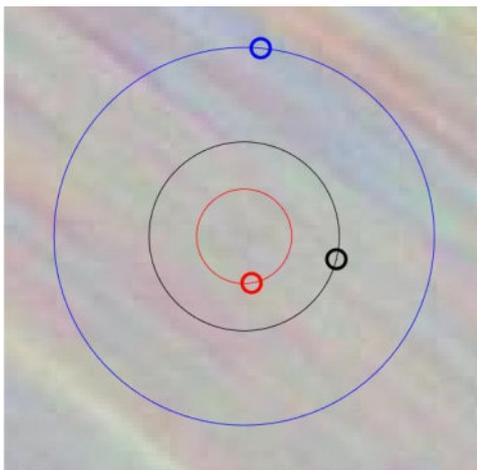
3. Computerauswertung der Bilder



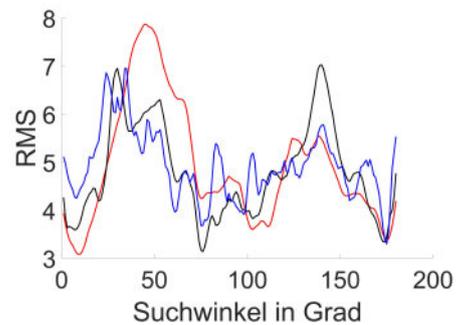
(a) Originalbildausschnitt um einen 'guten' Pixel herum, verschiedene Suchradien von 10, 20 und 40 Pixeln und jeweils gefundene Richtungen.



(b) RMS-Differenzen zu den benachbarten Pixeln in Abhängigkeit der Such-Richtung (Farbkodierung siehe links).



(c) Siehe (a), Umgebung eines nicht erfolgreich detektierten Pixels.



(d) Siehe (b), RMS entlang aller Richtungen ohne deutliches Minimum.

Abb. 3.3.: Stromlinienerkennungsverfahren an zwei Beispielen. Links sind die untersuchten Bildausschnitte gezeigt, rechts die berechneten Daten abhängig von der untersuchten Richtung. Das Minimum der Plots ist die gefundene Richtung, in den linken Bildern durch kleine Kreise dargestellt. $\varphi = 0^\circ$ ist die Richtung senkrecht nach unten.

gegebenen Schwellwerte haben sich im Test als sinnvoll herausgestellt, um die meisten falschen aber nicht zu viele richtige Daten zu entfernen. Sie können bei Bedarf nach Qualität der experimentellen Bilder und Sichtbarkeit der Stromlinien angepasst werden.

Kratzer der Modelloberfläche im Bild lassen sich damit jedoch nicht zuverlässig eliminieren, da sie für das erste Kriterium zu deutlich sind und für das zweite Kriterium alle Nachbarpixel auch die gleiche Richtung anzeigen. Für solche Probleme gibt es noch einige weitere Filter um möglichst alle potentiell falsch detektierten Richtungswerte zu entfernen und nur Daten zu behalten, die aufgrund tatsächlicher Stromlinien im Öl gefunden wurden. Scharfe Richtungsänderungen entlang der Stromlinien sind z.B. ein Zeichen für einen Kratzer der Modelloberfläche, der gekreuzt wird. Einzelne Flecken an Richtungswerten, die nicht zu großflächig homogenen Umgebungswerten passen sind meistens die Folge von Bläschen auf der Modelloberfläche. Es kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, dass teilweise richtig gefundene Strömungsrichtungen ein Fehlerkriterium erfüllen und entfernt werden.

Zum Abschluss der Datenreinigung sind zwar 40 bis 80 Prozent der Werte gelöscht, da aus einem der genannten Gründe die Richtigkeit des Ergebnisses nicht garantiert werden kann, aber der Rest kann gut interpoliert werden, um ein kontinuierliches Feld der Strömungsrichtungen zu erhalten (siehe Kap. A.7). Abb. 3.4 zeigt ein Ergebnis einer solchen Interpolation und Abb. 3.5 die aus den lokalen Strömungsrichtungen resultierenden Stromlinien.

Die beschriebene Analyse der Stromlinien hat in den ersten Ansätzen mehr als einen Tag zur Berechnung gebraucht. Dies liegt vor Allem an der großen Menge an Zugriffen auf die gespeicherten Daten des untersuchten Bildes. Genau dieses Problem lässt sich durch Verwendung der Grafikkarte lösen. Im Anhang A.4 wird erläutert, wie die Rechenlaufzeit von einem Tag auf unter 10 Sekunden verringert werden konnte.

3. Computerauswertung der Bilder

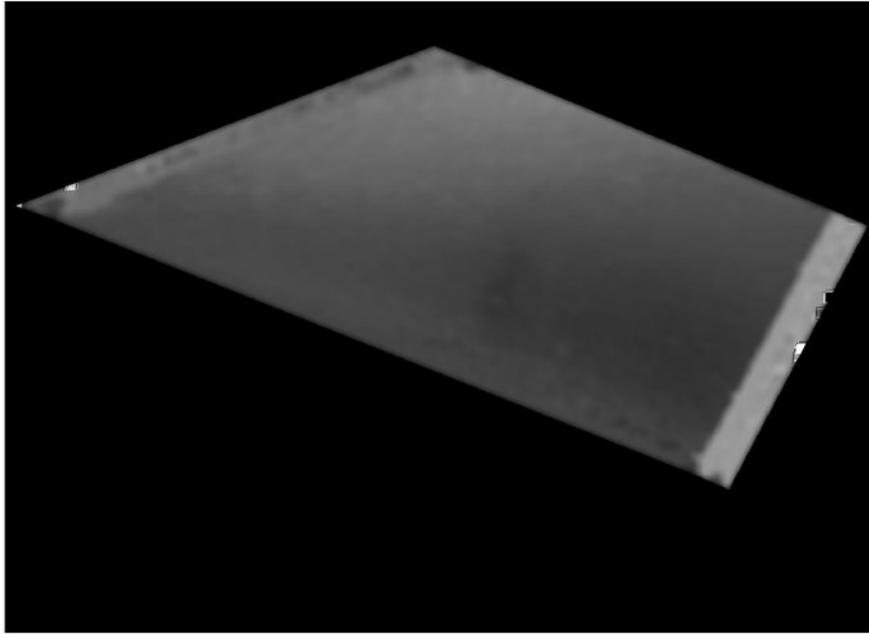


Abb. 3.4.: Richtungsfeld der Strömung. Strömung von links nach rechts, je heller desto weiter nach oben zeigt die Strömungsrichtung.

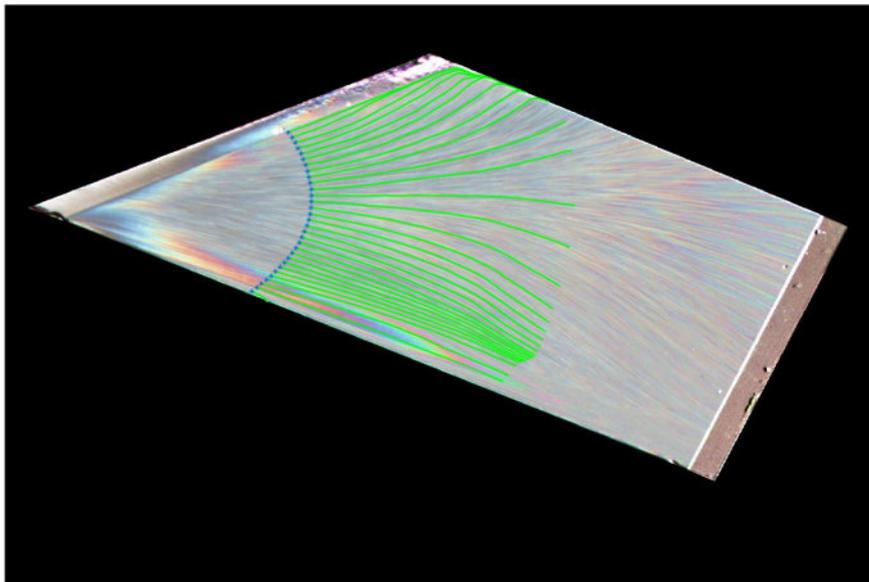


Abb. 3.5.: Berechnete Stromlinien aus dem Richtungsfeld von gewählten (blauen) Startpunkten.

3.5. Auswertung der Ölfilm Dicke

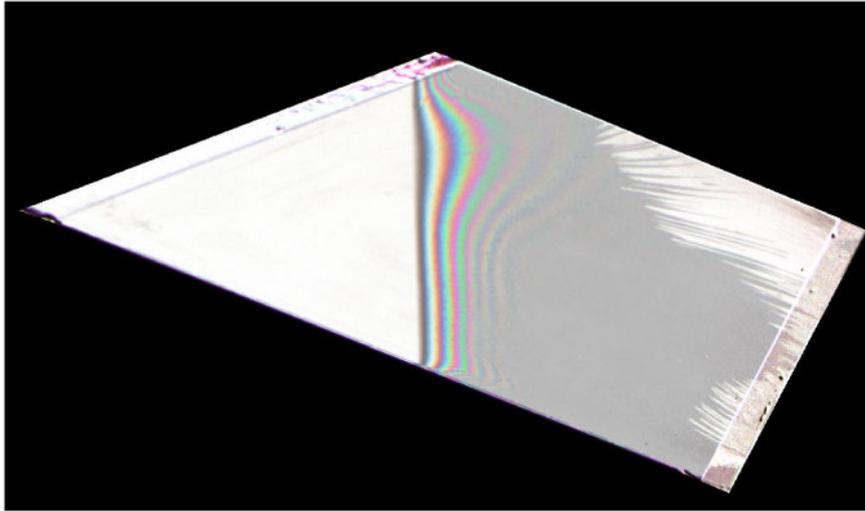


Abb. 3.6.: Beispielbild der beobachteten Interferenzstreifen. Auf den weißen Flächen ist kein Öl, bei den grauen Flächen ist der Ölfilm zu dick für sichtbare Interferenzerscheinungen.

Um dem Messverfahren gerecht zu werden soll bei der Dickenauswertung anhand eines einzelnen Bildes wie Abb. 3.6 jedem Pixel im Bereich der Interferenzerscheinungen eine Ölfilm Dicke zugewiesen werden können. Zur Verfügung stehen dazu die Wandstromlinien, welche kurz vor der Ölfilmvorderkante starten. Die Bilder werden mit Referenzbildern des Experimentes ohne Öl normiert, um die Effekte der potentiell inhomogenen Beleuchtung zu eliminieren. Die experimentell beobachtete Farbvariation entspricht qualitativ gut den theoretischen Verläufen aus Abb. 2.5. Quantitativ weichen jedoch die relativen Intensitäten der Maxima und Minima von den vorhergesagten Werten deutlich ab. Theoretisch sollten nach Gl. 2.30 die Intensitäten der Maxima entsprechend einer Gaußkurve abfallen, was aber nur als grobe Tendenz in den experimentellen Daten erkennbar ist. Werden diese Farbin-tensitäten für die Auswertung mit den Theoriekurven verglichen, ergeben sich große Fehler in der berechneten Dicke. Ursache dafür könnte die Ölfilmoberfläche sein, die bei hohen Ölfilm dicken nicht mehr perfekt glatt und reflektierend ist. Außerdem kann die Absorption des Lichtes im Ölfilm bei größeren Dicken oder an der Modelloberfläche ebenfalls eine Rolle spielen. Die relativen Intensitätswerte der In-

3. Computerauswertung der Bilder

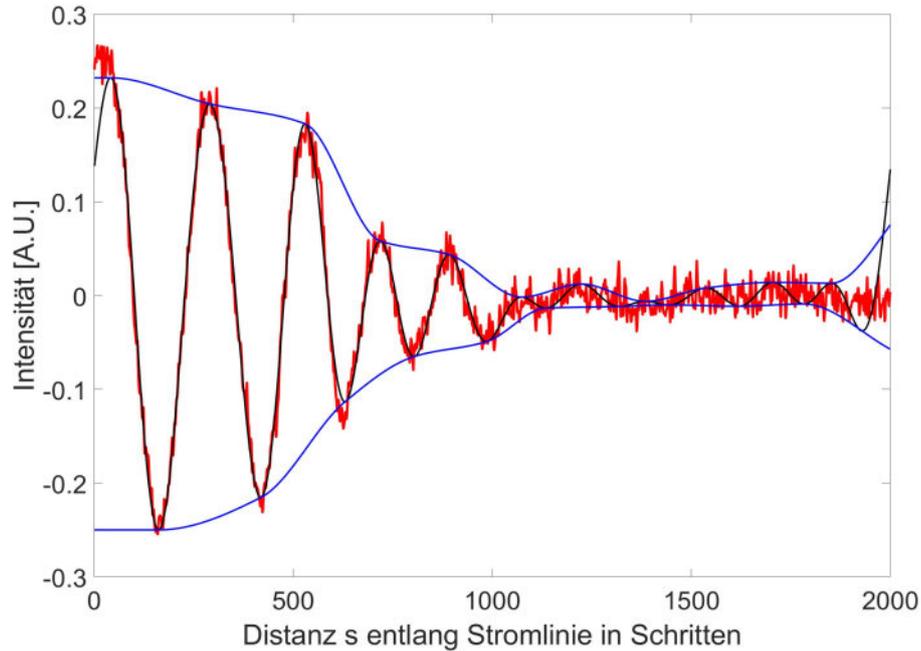


Abb. 3.7.: Gemessener Interferenzverlauf (rot), geglättete Daten nach Fouriertransformation (schwarz) und Einhüllende durch Verbindung aller Minima oder Maxima mittels pchip (blau).

terferenzstreifen zum Hauptmaximum sind folglich nicht zuverlässig vorhersehbar. Deshalb werden hier die quantitativen Effekte der Kohärenzlänge nicht weiter berücksichtigt. Stattdessen wird die Farbintensität abhängig von der Ölfilmstärke mittels einer Kosinusfunktion wie in Abb. 2.4 angepasst. Damit wird angenommen, dass jedes Maximum gleich hell und jedes Minimum gleich dunkel ist, nur die relativen Intensitäten zwischen Maxima und Minima sind von Bedeutung. Um nun die vermessenen Intensitäten mit der Theoriekurve vergleichen zu können muss die experimentell vorhandene einhüllende Funktion gefunden und die Intensitäten anhand dieser normiert werden, wobei zunächst die Erkennung der Maxima und Minima bei jeder Schwingung notwendig ist. Dies benötigt geglättete Daten, wofür alle Farbwerte entlang einer Stromlinie fouriertransformiert und hohe Frequenzen abgeschnitten werden. Bei jeder einzelnen Farbe und Stromlinie wird automatisch ein plausibler Tiefpass-Filter ermittelt⁴. Die Rücktransformation, in Abb. 3.7 als schwarze Linie dargestellt, ist den Originaldaten immer noch sehr ähnlich, jedoch konnte das hochfrequente Rauschen erfolgreich unterdrückt werden.

⁴Die obersten 58 % der Fourier-Amplituden werden abgeschnitten.

In jeder Schwingung sind nun einzelne Intensitätsmaxima ohne Rauschen zu erkennen, welche sich zu einer Einhüllenden Funktion verbinden lassen. Ein Fit der theoretischen Gaußkurve schlug aus oben genannten Gründen fehl, die Einhüllende muss sich besser an die experimentellen Daten anpassen lassen. Splines haben keine festgelegten Monotonieeigenschaften und sind hierfür ebenfalls ungeeignet, da die resultierenden Funktionen zwischen den auszuwertenden Punkten zu frei schwingen können. Die Lösung waren **pchip**: *Piecewise cubic hermite interpolation polynomial* [28]. Diese stückweise zusammengesetzten Funktionen sind nicht so glatt wie Splines, nehmen aber in jedem Abschnitt nur Werte an, die zwischen den beiden zu verbindenden Datenpunkten liegen. Zwei solcher Kurven (je eine für Minima und Maxima) sind in Abb. 3.7 als Einhüllende eingezeichnet. Unabhängig von der Amplitude der Intensitätsschwingungen können die Daten mit diesen zwei Kurven normiert werden: Es entstehen skalierte Schwingungen wie in Abb. 3.8, deren Extrempunkte immer auf ± 1 liegen. Ab etwa 1000 Schritten entlang der Stromlinie ist dieser Datensatz zu verrauscht. Die Fourier-Glättung liefert auch für größere Distanzen entlang der Stromlinie weitere Maxima und Minima der schwarzen Kurve, aber sobald die Ähnlichkeit zu den Originaldaten nicht mehr garantiert werden kann muss die Auswertung dieser Stromlinie abgebrochen werden.

Im entwickelten Verfahren wird die lokale Dicke des Ölfilms anhand eines einzelnen Bildes bestimmt, indem es entlang der berechneten Stromlinien von der Ölfilmvorderkante nach hinten iteriert wird. Ist die Ölfilmstärke bis zu einem bestimmten Punkt bereits berechnet⁵, kann als erste Näherung die Dicke des nächsten Punktes extrapoliert werden. Um diesen Schätzwert herum wird nun der Wert der Dicke gesucht, der am besten zu den beobachteten Interferenzfarben passt (siehe Abb. 3.9). Für jeden Wert, den die Dicke in 0,1 nm Schritten annehmen kann, werden die normierten Messdaten mit den theoretischen Farbwerten verglichen und nach der Methode der kleinsten Quadrate entschieden. Indem der Suchbereich auf einige nm begrenzt wird, lässt sich das Problem der mehrdeutigen Maxima umgehen. Dies funktioniert auch, falls der Ölfilm wieder dünner werden sollte.

So wird bis zum Ende jeder Stromlinie iteriert, oder bis durch ein zu niedriges Signal-Rausch-Verhältnis bei großen Ölfilmstärken nicht mehr sinnvoll ausgewertet werden kann. Außerdem wird überprüft, ob benachbarte Stromlinien ähnliche Ergebnisse liefern. Große Sprünge in der Ölfilmstärke senkrecht zur Strömungsrichtung sind nur bei Ablöselinien möglich und treten sonst in der Strömung nicht auf.

⁵an der Vorderkante wird mit einer Dicke von 0 gestartet

3. Computerauswertung der Bilder

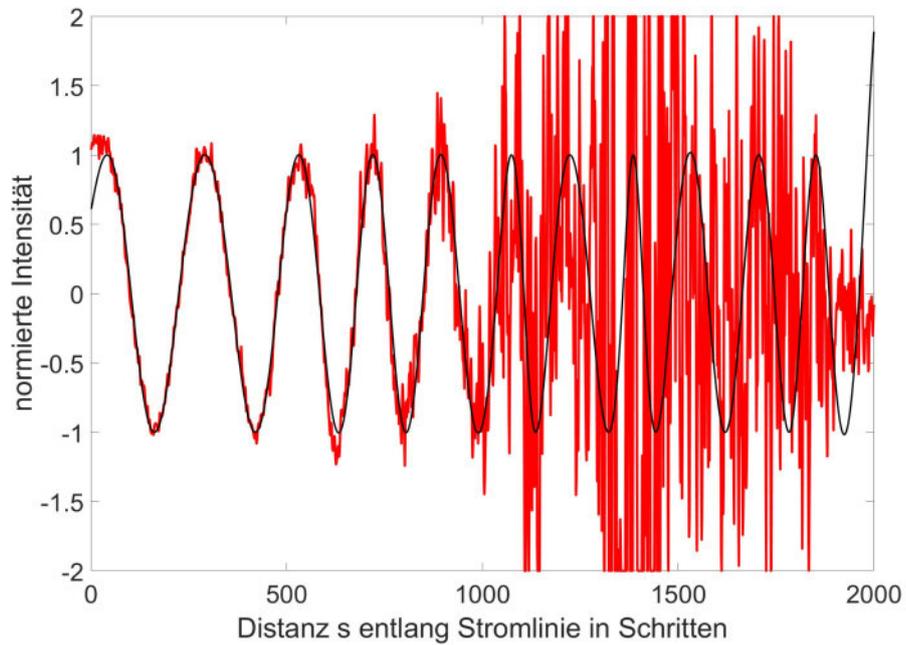


Abb. 3.8.: Originaldaten und geglättete Daten mit den pchip-Einhüllenden normiert, bis $s \approx 1000$ Schritte sind die Daten auswertbar.

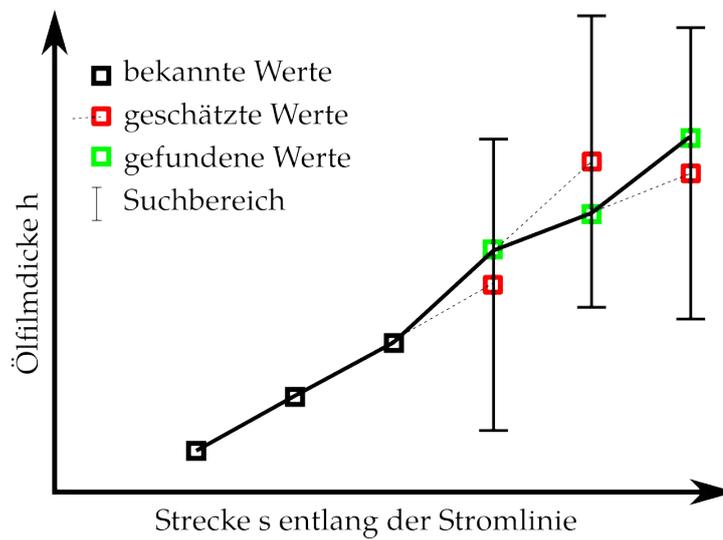


Abb. 3.9.: Skizze zur Bestimmung der Ölfilmstärke an jedem Datenpunkt entlang einer Stromlinie.

3.6. Stromröhrenbreite

Nach Gl. 2.12 ist die Stromröhrenbreite essentiell für die Berechnung der Wand-schubspannung. Allerdings ist die normierte Breite relativ zum Gesamtvolumen der Stromröhre wichtig, nicht die tatsächliche Breite in Millimetern. Dadurch lässt sich die Auswertung unabhängig von tatsächlich gezeichneten Stromröhren durchführen. Die Breite jeder virtuellen Stromröhre kann an einem beliebigen Punkt normiert werden. Damit ist auch der Startpunkt der Stromröhre beliebig, der jeweils deutlich vor der Ölfilmvorderkante liegen sollte. Der Startpunkt beeinflusst nur die virtuelle Breite der Stromröhre an der Ölfilmvorderkante und nicht das Ölvolumen, weil die Ölfilmstärke stromauf der Ölfilmvorderkante null ist. Es geht in diesem Abschnitt also nur um relative Breiten entlang einer Stromlinie, keine absoluten Werte.

Die im folgenden beschriebene Methode klingt sehr umfangreich und kompliziert, ist aber aus mehreren Gründen notwendig. Abstände auf dem Pixelbild entsprechen nicht den Abständen auf der gekrümmten Modelloberfläche. Winkel ändern sich genauso. Mit 'senkrecht zu...' ist gemeint, dass zwei Vektoren auf der Modelloberfläche senkrecht zueinander stehen. Der Winkel im verzerrten Foto könnte ein anderer sein. Des Weiteren sind einzelne gezeichnete Stromlinien nicht zuverlässig. Ein stabiler Algorithmus muss die gesamte Verteilung der Strömungsrichtungen großflächig betrachten, damit die lokale Divergenz oder Konvergenz der Wandstromlinien adäquat wiedergegeben wird.

Als erster Schritt wird lokal bei jedem Pixel diese Divergenz oder Konvergenz der Strömung berechnet. Dazu wird die lokale Strömungsrichtung mit dem umliegenden Werten verglichen. Alle pixelbezogenen Strömungsrichtungen aus der Abbildung müssen mit Hilfe der Oberflächennormalen auf die Modelloberfläche projiziert werden, da die Differenz dieser dreidimensionalen Richtungen und nicht im zweidimensionalen Bild wichtig ist. Ein Kreuzprodukt der lokalen Strömungsrichtung mit der Oberflächennormalen liefert die Richtung tangential zur Oberfläche, welche senkrecht zur Strömung steht. In diese senkrechte Richtung werden nun auf einer Distanz von bis zu 5 mm auf beiden Seiten 30 Datenpunkte der Richtungen ausgelesen⁶.

Es ergeben sich Daten wie in Abb. 3.10, die den Strömungswinkel ϕ abhängig von

⁶Diese Distanz ist auch ein Parameter, der in der GUI variiert werden kann

3. Computerauswertung der Bilder

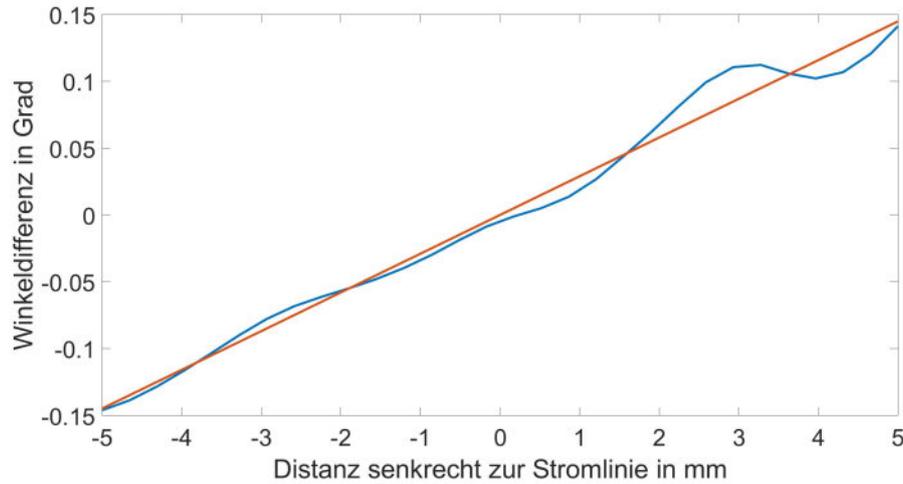


Abb. 3.10.: Linearer Fit (rot) des vermessenen Strömungswinkels in Abhängigkeit vom Abstände zur Stromlinie (blau).

der Distanz r senkrecht zur Stromlinie aufträgt. Die Steigung des linearen Fits⁷ ist $\frac{d\phi}{dr}$, die wie in Gl. 3.1 in eine lokale Divergenz F der Stromröhre umgerechnet werden kann. Mit $dr = 1$ mm berechnet sich ein diskreter Winkelunterschied $\Delta\phi$ in bekannter Distanz. F gibt den Faktor an, um den eine Stromröhre entlang einer Strecke von $ds = 1$ mm breiter wird.

$$\begin{aligned} F &= S_1/S_0 \\ &= (S_0 + 2 \cdot \tan \Delta\phi \cdot ds) / S_0 \end{aligned}$$

Nun wird $S_0 = 2 \cdot dr = 2$ mm und $ds = 1$ mm eingesetzt und es ergibt sich

$$F = 1 + \tan(\Delta\phi) . \quad (3.1)$$

Die diskrete Betrachtungsbreite von $dr = 1$ mm ist willkürlich, da bei den kleinen beobachteten Winkeländerungen die lineare Näherung des Tangens gültig ist. Ist nun überall solch ein Divergenzfaktor berechnet, muss dieser entlang der Stromlinien integriert werden. Dies geschieht rekursiv, indem von jedem Pixel aus entlang seiner Stromlinie stromaufwärts der Wert der dortigen Breite ausgelesen wird. Die Breite B_i , multipliziert mit dem Verbreiterungsfaktor F des Pixels ist die neue Breite

⁷Auch dies wurde selbst programmiert, da alle Matlab-internen Fit-Funktionen universeller anwendbar sind aber dafür viel zu lange brauchen, wenn für jeden Pixel des Bildes ein Fit durchgeführt werden muss [29].

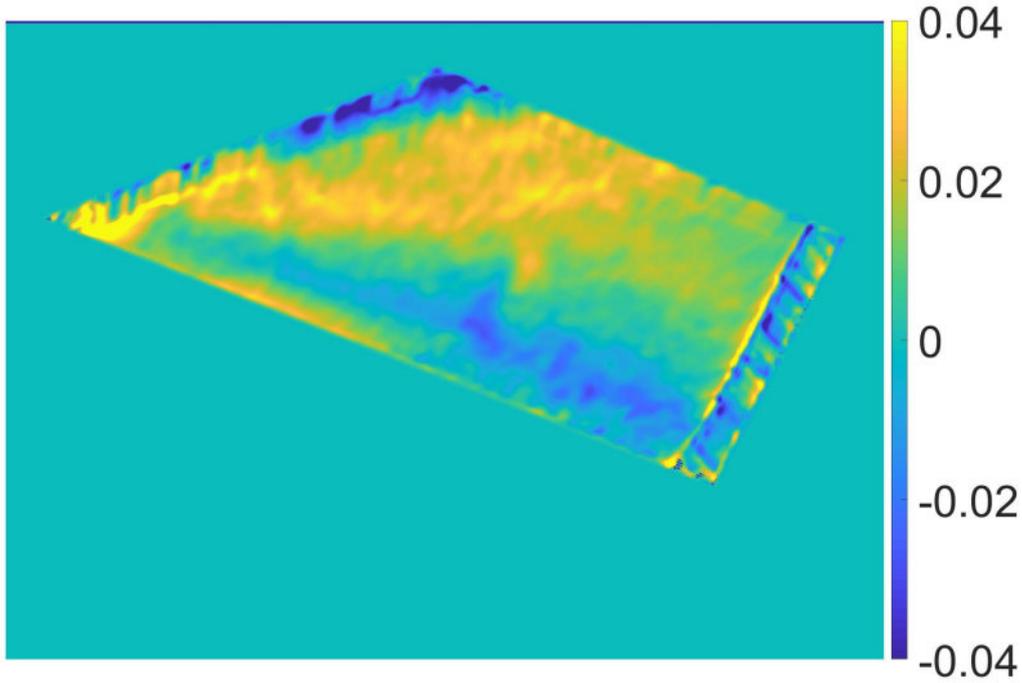
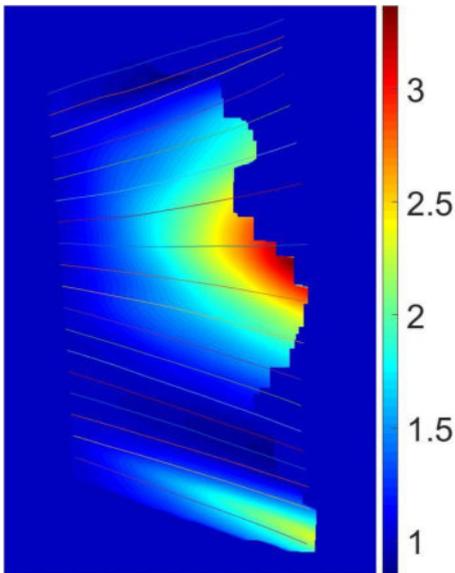


Abb. 3.11.: Visualisierung der lokalen Verbreiterung pro Millimeter $F - 1$ auf dem Flügel. Diese Rohdaten werden meist vor der Weiterverarbeitung geglättet.

B_{i+1} nach dem Pixel. Die räumliche Distanz zum ausgelesenen vorherigen Pixel entlang der Stromlinie ds muss folgendermaßen berücksichtigt werden.



$$B_{i+1} = B_i \cdot F^{ds/\text{mm}} \quad (3.2)$$

Es werden nur die Punkte mit bekannter Ölfilmstärke und nicht der gesamte Flügel berechnet, um Rechenzeit zu sparen. Die erwähnte Methodik der zweidimensionalen rekursiven Integration ist im Anhang A.5 beschrieben.

Abb. 3.12.: Stromröhrenbreite an jedem Pixel relativ zur Breite der selben Stromröhre an der Ölfilmvorderkante.

3.7. Integriertes Ölvolumen entlang der Stromröhren

Aus der Stromröhrenbreite und der Ölfilmstärke muss nun das Ölvolumen in der Stromröhre berechnet werden. An jedem Punkt wird das Volumen der Stromröhre, die durch diesen verläuft, von der Vorderkante des Ölfilms bis zu diesem Messpunkt benötigt. Die Differenz dieser Volumina zu zwei verschiedenen Zeitpunkten während des Experimentes ist nach Gleichung 2.12 genau die Menge Öl, die mit der Ölbewegung aufgrund der Wandschubspannung gleichgesetzt wird. Das Ölvolumen der Stromröhre wird genau wie die Breite der Röhre integriert. Dazu wird an jedem Pixel ein quaderförmiges Volumenelement zum bisherigen der Stromröhre hinzuaddiert. Die Ölfilmstärke ist für jeden Pixel berechnet sowie die Distanz d_s zum vorherigen Datenpunkt entlang der Wandstromlinie. Als Breite wird wieder die gerade berechnete normierte Stromröhrenbreite verwendet. Da die Messpunkte entlang der Stromlinien nur 0,4 Pixel auseinanderliegen sind die Approximationsfehler durch kleine Quaderförmige Volumenelemente vernachlässigbar.

Diese Berechnung muss für jeden Zeitpunkt durchgeführt werden, da das Ölvolumen sich mit der Ölfilmstärke ändert. Von allen analysierten Zeitpunkten können paarweise Wandschubspannungsverteilungen berechnet werden, wobei sich die Auswertung meistens auf 2 Zeitpunkte und damit ein Paar beschränkt.

3.8. Wandschubspannung

Nachdem in den letzten Kapiteln alle notwendigen Größen pixelweise ermittelt wurden, um die Wandschubspannung τ nach Gleichung 2.12

$$\tau = -\frac{2\mu}{r_P h_P^2} \cdot \frac{d}{dt} \int_0^{s_P} r h \, ds$$

zu berechnen, muss diese aber noch an die diskreten Werte angepasst werden. Zunächst ist das Integral $\int_0^{s_P} r h \, ds = V$ genau das berechnete Ölvolumen V einer Stromröhre zwischen dem Startpunkt $s = 0$ und dem Messpunkt bzw. Messpixel $s = s_P$. Da diese Werte in diskreten Zeitabständen t gemessen werden, sie nicht kontinuierlich differenziert werden. Aus der Differentialgleichung 2.12 wird eine Differenzgleichung erstellt und die Ableitung näherungsweise durch den Differenzenquotienten ersetzt.

$$\frac{d}{dt} \int_0^{s_P} r h \, ds \Rightarrow \frac{V(t_0 + t) - V(t_0)}{t}$$

Daraus ergibt sich die finale Formel für die Wandschubspannung, mit der ihr Wert für jeden Pixel des Bildes berechnet wurde:

$$\tau = -\frac{2\mu}{r_P h_P^2} \cdot \frac{V(t_0 + t) - V(t_0)}{t} \quad (3.3)$$

Letztendlich kann nicht überall auf dem Modell ein Ergebnis angegeben werden, sondern nur an den Stellen, an denen in beiden Bildern die Ölfilmstärke zuverlässig ermittelt werden konnte. Dies ist nur in den Bereichen gut erkennbarer Interferenzerscheinungen möglich und scheitert bei zu großen Werten der Dicke oder verrauschten Daten. Außerdem ist der relative Fehler der Ölfilmstärke bei Werten von unter 100 nm sehr groß, wodurch die resultierenden Werte der Wandschubspannung an der Ölfilmvorderkante stark streuen. Solange die Dickenauswertung an der Vorderkante nicht verbessert wird, müssen alle Orte mit einer berechneten Ölfilmstärke von unter 100 nm abgeschnitten werden. Dies war auch schon in [16] notwendig.

4. Tool zur Bestimmung der Kamera- und Leuchtfeldpositionen

Für einen effizienten experimentellen Aufbau wurde eigens ein Tool entwickelt, um vor Beginn der Messungen gute Positionen für die Kamera und das Leuchtfeld zu finden. Das Modell und seine Orientierung sowie die Fenster des Windkanals sind große Einschränkungen des Aufbaus, also der Position von Kamera und Beleuchtungssystem. Die gewählte Zuordnung der optischen Komponenten soll das Modell möglichst gut ausleuchten und wenige Umbaumaßnahmen erfordern, wenn eine Winkelverstellung des Modells während der Messkampagne geplant ist.

Das System wird durch Umkehrung des Strahlenganges simuliert. Von der wählbaren Kameraposition aus werden virtuelle Strahlen auf jeden sichtbaren Knotenpunkt des Modellgitters geworfen und unter Berücksichtigung der lokalen Oberflächennormalen reflektiert. Von allen reflektierten Strahlen wird

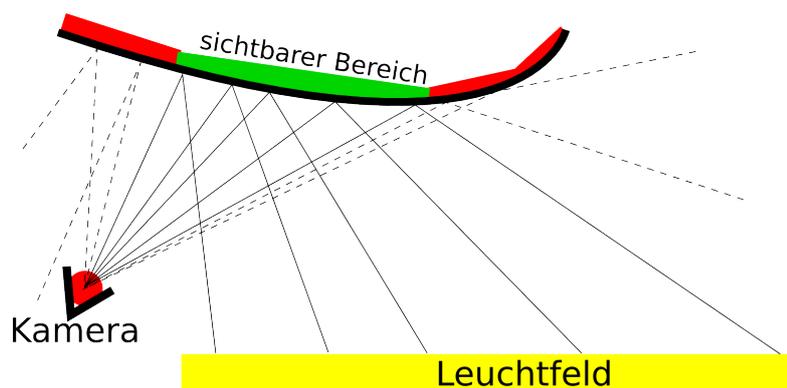


Abb. 4.1.: Skizze der Reflexion des Leuchtfeldes an einem gekrümmten Modell. Bei den durchgezogenen Linien ist für die Kamera das reflektierte Leuchtfeld sichtbar, bei den gestrichelten Linien nicht.

der Schnittpunkt mit der Ebene bestimmt, in der die Fenster des Windkanals und damit potentiell das Blitzfeld aufgebaut werden kann. Jeder Punkt auf der Modelloberfläche ist genau dann sichtbar, wenn sich an der Stelle des gefundenen Schnittpunktes ein Teil des Leuchtfeldes befindet.

Ist das Modell stark gekrümmt, wie zum Beispiel die Vorderkante eines Flügels,

4. Tool zur Bestimmung der Kamera- und Leuchtfeldpositionen

werden einige Punkte in einem sehr großen Winkel, wie in Abb. 4.1 skizziert, reflektiert. Es ist daher unmöglich, das gesamte Modell sichtbar zu machen, weshalb nach der besten Position eines Leuchtfeldes begrenzter Größe gesucht wird. Die Ausgabe dieses Tools ist eine Tecplot-Datei nach der Geometrie des zu untersuchenden Objektes, wie in Abb. 4.2 dargestellt. Im demonstrierten Beispiel ist dies ein Teil einer Flügeloberfläche. z ist die spannweiteige Koordinate, x ist die Anströmungsrichtung. Rechts ist die Vorderkante des Flügels, am linken Ende des Bildes ist der Flügel abgeschnitten, sodass die Hinterkante auf dem Bild nicht sichtbar ist. Die Unstetigkeiten in den Farbverläufen von Abb. 4.2 sind Knicke in der Modelloberfläche, die sich deutlich auf den Reflektionswinkel auswirken. An jedem Gitterpunkt ist dokumentiert, wie groß das Leuchtfeld sein müsste, damit dieser Punkt am Ende im Experiment sichtbar wird. In dem gegebenen Beispiel ist eine große Fläche schon bei einem Leuchtfeld mit 1 m Kantenlänge sichtbar. Ein größeres Leuchtfeld ermöglicht die Auswertung in immer weiteren Bereichen des Flügels, aber nie auf dem gesamten Modell einschließlich Krümmung und Vorderkante. Bilder wie in Abb. 4.2 lassen sich mit dem Tool für jede gewählte Kameraposition und Orientierung des Modells (wie verschiedene Anstellwinkel) erstellen um die bestmögliche Konfiguration auszuwählen. Mit dieser Vorbereitung ist lange vor dem Experiment überprüfbar, welche Bereiche vermessbar sind und welche nur mit erhöhtem Aufwand oder Kosten messbar werden.

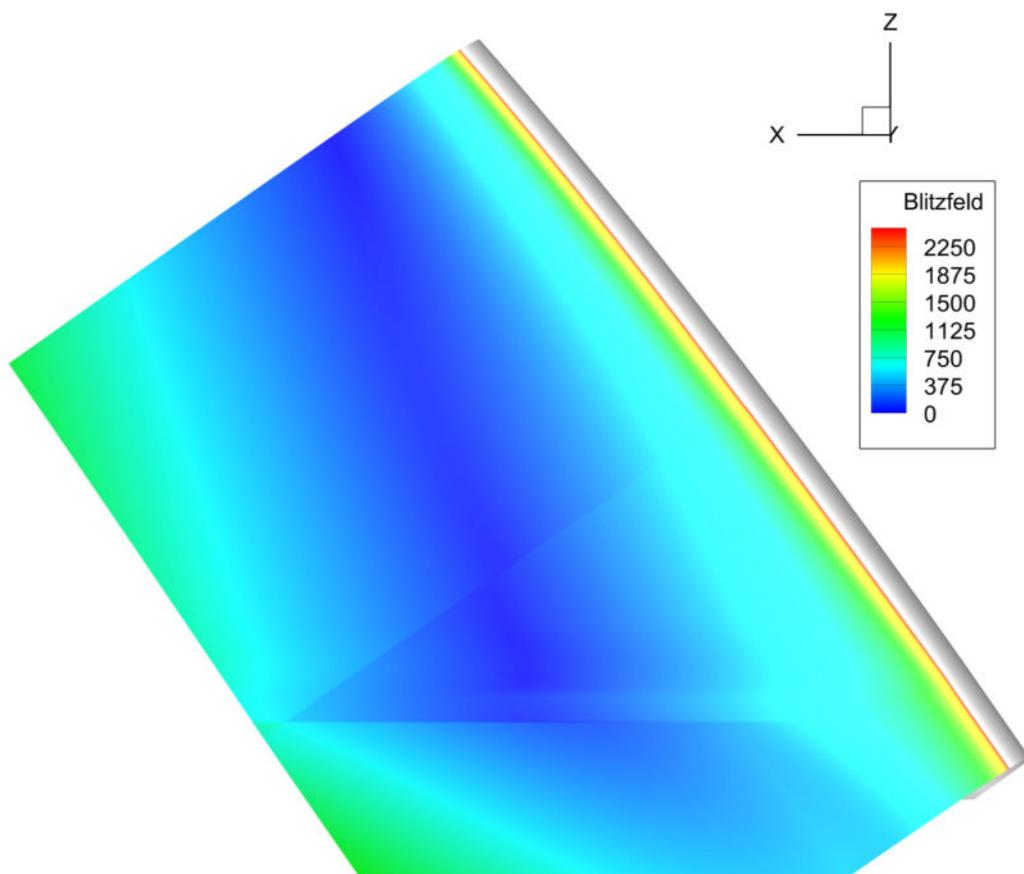


Abb. 4.2.: Notwendige Kantenlänge des Blitzfeldes in mm bei fester Position für die Sichtbarkeit der lokalen Oberflächenposition eines Ausschnittes eines generischen Flügelmodells. Die Unstetigkeit der Werte liegen an dem Knick in der Modelloberfläche. An der Vorderkante mit einem Winkel von $> 45^\circ$ zur Kamera (rechts) kann gar keine Reflektion beobachtet werden, vgl. Abb. 4.1.

5. Validierungsexperimente im Niedergeschwindigkeitskanal

5.1. Windkanal, Testmodell und Versuchsaufbau

Die erste Messreihe wurde am 1m-Windkanal (1MG) des DLR¹ in Göttingen durchgeführt. Es handelt sich um einen Windkanal Göttinger Bauart mit einer 1m mal 1m großen offenen Messstrecke. Die erste Messreihe hatte primär das Ziel, das neu entwickelte Software-Tool zu testen. Untersucht wurde ein Deltaflügel, der wie in Abb. 5.1 mit variablem Anstellwinkel im Windkanal montiert wurde. Das Modell hatte eine Länge von etwa 26 cm, eine ebene Oberseite und eine Vorderkantenpfeilung von 75°. Dieses Modell wurde in ähnlichen Bedingungen schon früher in [16] untersucht, sodass die vorhandenen Daten der Validierung der neuen Auswertungsmethoden dienen können.

Das Modell wird zentral in der Messstrecke wie in Abb. 5.1 an der Aufhängung der Winkelverstell-Mechanik montiert. Für die optischen Messungen ist es notwendig, dass die Modelloberfläche spiegelnd ist, was bei unpoliertem Stahl nicht der Fall ist. Dafür wurde eine selbstklebende schwarze PVC-Folie auf der Saugseite des Flügels aufgebracht. Über dem Flügel, außerhalb der Messstrecke sind das Leuchtfeld und die Kamera montiert. Wie in Kap. 4 beschrieben muss aus der Kameraposition in jedem Punkt des Modells die Spiegelung des Leuchtfeldes sichtbar sein. Kamera und Leuchtfeld werden gleichzeitig vom Triggersystem gesteuert, welches im Zeitabstand von 100 ms die Interferenzbilder in den drei Farbkanälen rot, grün und blau abbilden lässt. Das Leuchtfeld leuchtet für einen kurzen Zeitraum, üblicherweise zwischen 5 und 50 ms, während die Kamera für die entsprechende Farbe ein Graustufenbild aufnimmt.

In dieser Messreihe wurde eine Windkanalgeschwindigkeit von $u_\infty = 50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und ein Anstellwinkel von 25° gewählt. Für die Bilder zur Wandstromlinienauswertung wur-

¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

5. Validierungsexperimente im Niedergeschwindigkeitskanal

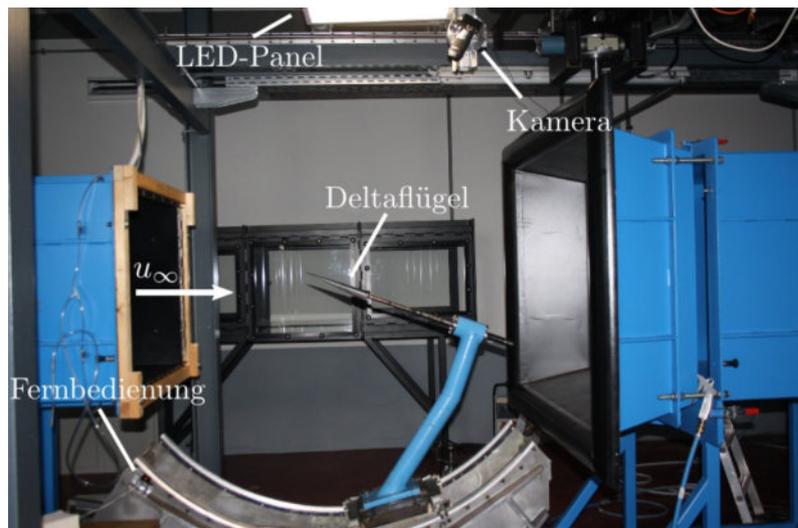


Abb. 5.1.: Experimenteller Aufbau im 1M-Kanal von 2016 [16].

den große Teile des Flügels mit dünnflüssigem Silikonöl benetzt (ELBESIL-Öl B 10 cSt)². Dieses breitet sich in der Luftanströmung schnell auf dem gesamten Flügel aus und bildet deutliche Farbstreifen entlang der Strömungsrichtung. In der Auswertung wird nur ein einziges Bild benötigt. Es werden dennoch innerhalb von einer Minute mehrere Bilder aufgenommen, um den perfekten Zeitpunkt der Ölausbreitung nicht zu verpassen und das beste Bild auswählen zu können.

Für die Interferenzbilder zur eigentlichen Wandschubspannungsmessung wird ein dickflüssigeres Öl (ELBESIL-Öl B 100 cSt) entlang einer Linie senkrecht zur Anströmung aufgetragen. Dies geschieht hier mithilfe einer Gummischnur, die zunächst komplett mit Öl benetzt wird. Die Schnur wird dann manuell über dem Modell gespannt und dort aufgedrückt, wo die Ölfilmvorderkante gewünscht ist. Entlang dieser näherungsweise geraden Linie überträgt sich das Öl von der Oberfläche der Schnur auf das Modell, ohne dass zu große Tropfen entstehen. Die anfängliche Dicke des Ölfilms ist irrelevant, sobald der Windkanal angeschaltet wird verteilt die Luftströmung den Ölfilm stromab und dünnt ihn aus. Alle 10 Sekunden wird ein Interferenzbild aller drei Farben aufgenommen.

²Ein Centistokes (cSt) entspricht dabei $1 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} = 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ als Angabe der kinematischen Viskosität

Kameramodell

Die benutzte Kamera *EXO 340 Mu 3* der SVS-Vistek GmbH ist eine industrielle Monochromkamera mit einer Auflösung von 3000 x 4096 Pixeln und einer Bildrate von 23 fps. Mit ihr können in den drei Farbkanälen rot, grün und blau getrennt voneinander jeweils Graustufenbilder aufgenommen werden. Dadurch wird kein Bayer-Sensor [8, 30] benötigt, der in handelsüblichen Kameras die gleichzeitige Aufnahme aller drei Farbkanäle auf Kosten von reduzierter Auflösung pro Kanal ermöglicht.

Leuchtfeld

Das Leuchtfeld wird ebenfalls vom Triggersystem der Kamera gesteuert und emittiert Licht separat in den drei Farben rot, grün und blau. Die Intensitätsmaxima der Spektren wurden auf 628,7 nm (rot), 524,8 nm (grün) und 464,0 nm (blau) vermessen. Das Licht strahlt dabei diffus in alle Richtungen und tritt aus der gesamten Fläche von etwa 60 cm mal 60 cm gleichmäßig aus. Realisiert wird dies, mit Hilfe von 80 RGB LEDs, die seitlich in ein Paket von mehreren Plexiglas- beziehungsweise Kunststoffplatten leuchten. Die gesamte Rückseite der Platte enthält viele punktförmige Streuzentren, welche durch vielfache Streuungen und Reflektionen diffuses Licht erzeugen. Für scharfe Bilder sowie einem möglichst kurzen Zeitabstand zwischen den drei Bildern in je einer anderen Farbe sind kurze Belichtungszeiten notwendig. Deshalb ist es von Interesse, eine möglichst helle Beleuchtung des Modells zu realisieren. Nach den Messungen am 1MG wurde das Leuchtfeld von der DLR-Werkstatt weiter verbessert, sodass in zukünftigen Messungen höhere Ströme und eine größere Lichtausbeute möglich sind.

ELBESIL-Öle

ELBESIL-ÖLE B sind Polydimethylsiloxane (PDMS), die in kinematischen Viskositäten von 0,65 bis 100 000 cSt käuflich sind. Als Vergleich hat Wasser eine Viskosität von 1 cSt, Tomatensaft liegt bei etwa 220 cSt und Mayonnaise wurde auf 2200 cSt vermessen [31]. Die Vorteile dieser Öle sind ihre Resistenz gegen chemische und mechanische Einwirkungen sowie die geringe Temperaturabhängigkeit der Viskosität [32]. Da diese Öle geruchs- und geschmacksneutral sowie ungiftig sind, lassen sie sich ohne Schutzmaßnahmen handhaben. Der genaue temperaturabhängige Wert der Viskosität muss experimentell vermessen werden.

5. Validierungsexperimente im Niedergeschwindigkeitskanal

Ähnliche Öle werden in anderen Forschungsbereichen auch zur schnellen Verdunstung verwendet [33]. Dies legt die Vermutung nahe, dass auch hier ein kleiner Teil des Öls während des Experimentes verdunsten kann. In Ref. [5] wurde der Effekt untersucht und als nicht signifikant eingestuft, solange Öle mit einer Viskosität von über 10 cSt verwendet werden.

5.2. Ergebnisse

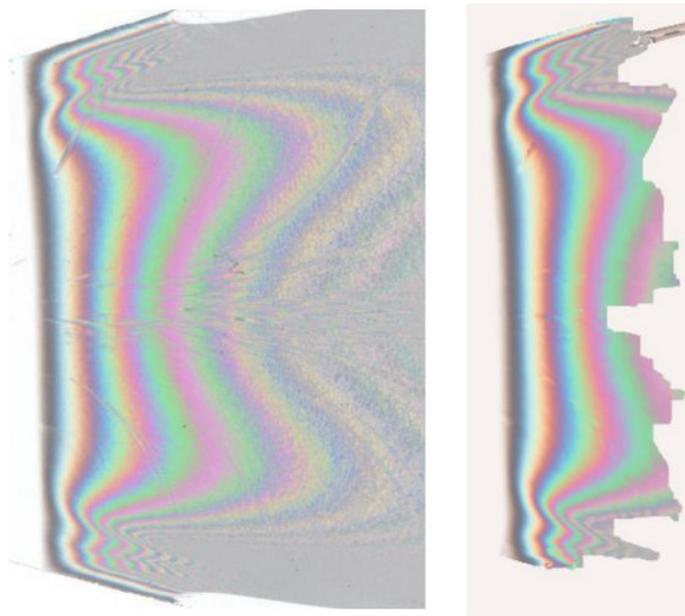


Abb. 5.2.: Vergleich des Original-Interferenzbildes (links) des Deltaflügels im 1MG mit dem aus der ermittelten Ölfilmdickenverteilung berechneten Interferenzbild (rechts).

Abb. 5.2 zeigt ein Originalbild der Interferenzstreifen auf dem Flügel. Aus diesem Bild wird die Ölfilmdicke berechnet, welche von links nach rechts zunimmt. Aus der Verteilung kann mit Gl. 2.30 berechnet werden, welches Interferenzbild bei der ermittelten Dickenverteilung zu beobachten wäre. Diese Rekonstruktion ist in auf der rechten Seite gezeigt, welches nahezu identisch zum Originalbild auf der linken Seite von Abb. 5.2 ist. Das bestätigt die korrekte Berechnung der Ölfilmdicke. Unterschiede sind nur bei sehr großen und sehr kleinen Ölfilmdicken zu erkennen, weshalb das Ergebnis für die weiteren Auswertungsschritte auf beiden Seiten entsprechend abgeschnitten werden muss. Auch sehr kleine Strukturen wie enge Interferenzstreifen

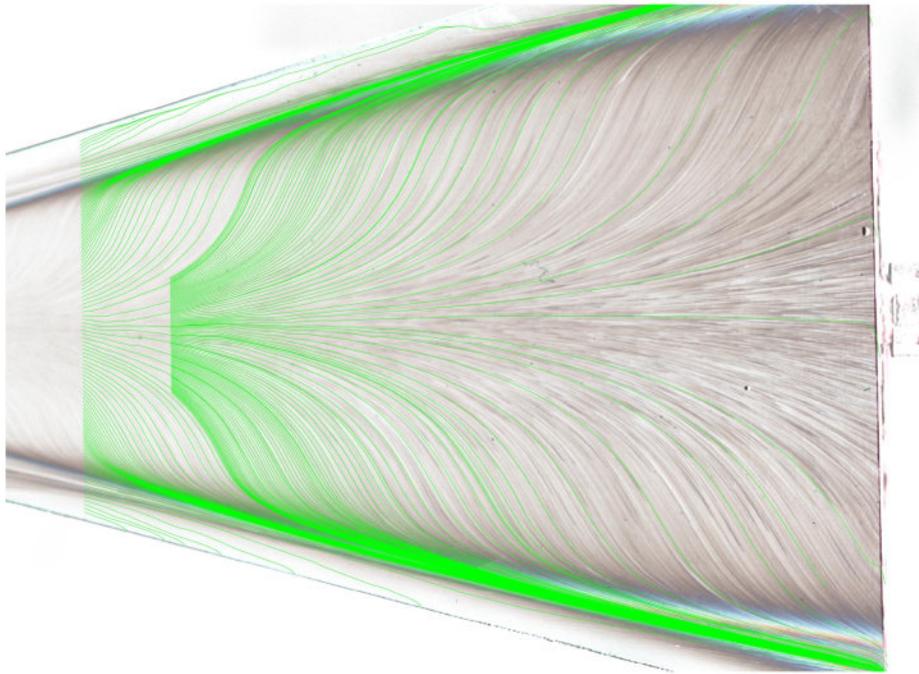


Abb. 5.3.: Automatisch berechnete Stromlinien auf dem Deltaflügel mit dem zur Auswertung verwendeten Bild im Hintergrund.

oder die Kontamination durch ein Staubpartikel werden sehr zuverlässig rekonstruiert. Letztere sind Störstrukturen entlang der Wandstromlinien und könnten ohne Probleme herausgefiltert und die Ölfilmstärke an diesen Stellen interpoliert werden um schönere und glattere Ergebnisse zu liefern. Dies würde aber nicht mehr den experimentellen Bildern entsprechen. Deshalb wurde vorerst auf die Korrektur großer experimenteller Artefakte verzichtet. Ein großer Vorteil der neuen Auswertung ist neben den deutlich reduzierten benötigten experimentellen Daten die Größe des auswertbaren Bereichs in jedem Messdurchlauf. Die Auswertung wird nicht bei einer festgelegten Ölfilmstärke abgebrochen sondern weitergeführt solange die Ergebnisse zuverlässig gut bleiben. Die vergrößerte Datenfläche würde die benötigte Anzahl an Experimenten für eine vollständige Vermessung des Deltaflügels halbieren.

Aus den Interferenzbildern mit einem Öl von geringer Viskosität können nach dem Verfahren, das in Kapitel 3.4 beschrieben ist, Stromlinienbilder wie in Abb. 5.3 berechnet werden. Für die Datengewinnung wurden nur kleinskalige Strukturen verwendet und auch alle Interpolationen oder Glättungen durch Gaußfilter haben

5. Validierungsexperimente im Niedergeschwindigkeitskanal

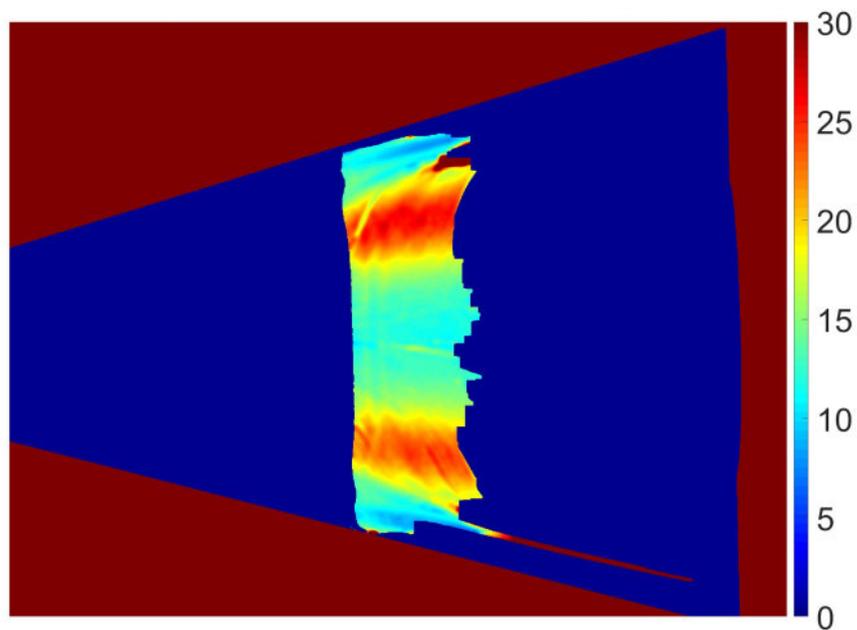


Abb. 5.4.: Vermessene Wandschubspannungsverteilung am Deltaflügel bei $u_\infty = 50$ m/s und 25° Anstellwinkel.

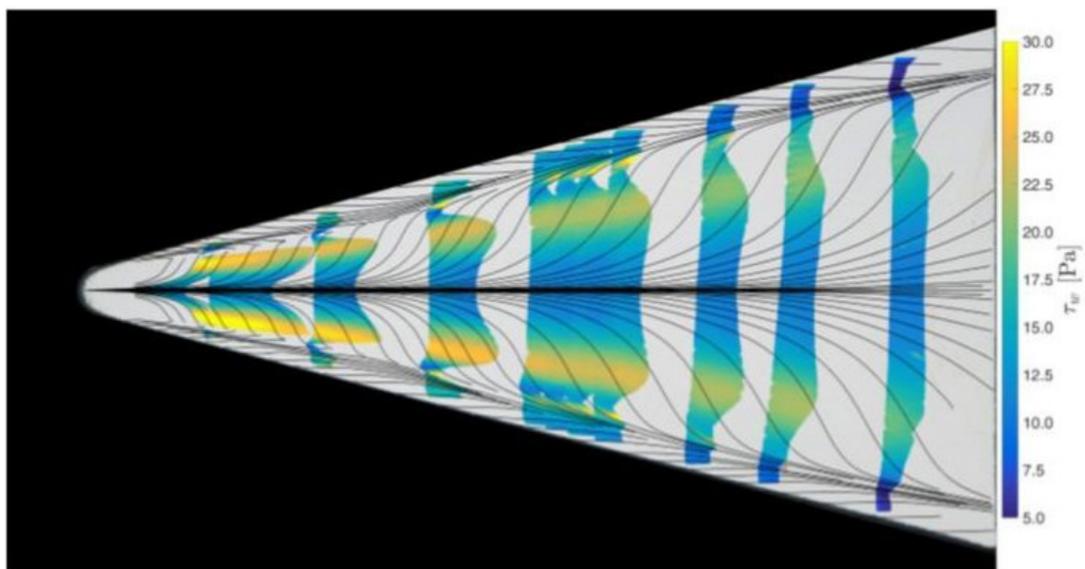


Abb. 5.5.: Früher in [16] vermessene Wandschubspannungswerte am Deltaflügel bei $u_\infty = 50$ m/s und 25° Anstellwinkel.

Breiten von unter 10 Pixeln³. Dennoch sind die ermittelten Stromlinien größtenteils glatt und entsprechen sehr präzise den im Hintergrundbild sichtbaren Strukturen. Ein Beispiel der ermittelten Wandschubspannungsverteilung ist in Abb. 5.4 zu sehen. Als Vergleich dazu zeigt Abb. 5.5 die von [16] ermittelten Verteilungen der identischen Konfiguration. Von beiden Darstellungen ist ein Querschnitt der Wandschubspannung bei 62% der Flügeltiefe in Abb. 5.6 aufgezeichnet. Beide Experimente beziehungsweise Auswertungsmethoden liefern die gleichen Amplituden der Wandschubspannung auf der Symmetrieachse von 13 Pa und deutlich höhere Werte in den Bereichen der beiden Tütenwirbel von 25 Pa. Im Zentrum des Flügels ist die gesamte Verteilung nahezu identisch, jedoch sind die Maxima der Wandschubspannung breiter als in der älteren roten Kurve. An den Außenkanten des Flügels sind ebenfalls deutliche Unterschiede zu erkennen. Das frühere Experiment zeigt ein zweites, schmales aber sehr starkes Maximum der Wandschubspannung im Bereich der Konvergenzlinie an. Dies ist in den Neuen Daten gar nicht vorhanden, was mutmaßlich an der schwierigen Strömungsrichtungserkennung in diesem Bereich liegt. In dem Verlauf der Strömungsrichtung in Abb. 5.7 sind ebenfalls nur kleine Unterschiede sichtbar. Im Zentrum des Flügels haben die alten Daten zwei Knickpunkte, die aus der Manuellen Stromlinienezzeichnung entstanden sind. Trotz der veräuschten Bilder liefert die automatische Auswertung (blau) einen glatten Verlauf der Strömungsrichtung und weicht nur nahe der Flügelkanten von den bisherigen Daten ab.

Des Weiteren ist in beiden Experimenten eine Asymmetrie erkennbar, die durch die Montierung im Windkanal entsteht. Auf einer Seite des Flügels ist die Wandschubspannung jeweils um etwa 2 Pascal größer als auf der anderen Seite. Dies zeigt, dass die Messwerte experimentell in verschiedenen Messkampagnen nur auf 2 Pa genau reproduzierbar sind.

5.3. Funktionalität der Messmethode

Die Berechnung der Wandstromlinien erweist sich am Deltaflügel als schwierig, da die Rohbilder an einigen Stellen keine signifikanten Daten liefern. Nahe der Außenkanten des Flügels sind z.B. keine Streifen sichtbar, sodass auch eine manuelle Auswertung kaum möglich wäre. Des Weiteren wird der Ölfilm an den Konvergenzlinien sehr dick, die unterschiedlichen Ölfilmstärkenbedingten Interferenzstreifen liegen sehr nah aneinander und sind nicht mehr von den Farbstreifen entlang der Wandstromlinien zu

³Das entspricht etwa 0,4 % der Bildbreite von Abb. 5.3

5. Validierungsexperimente im Niedergeschwindigkeitskanal

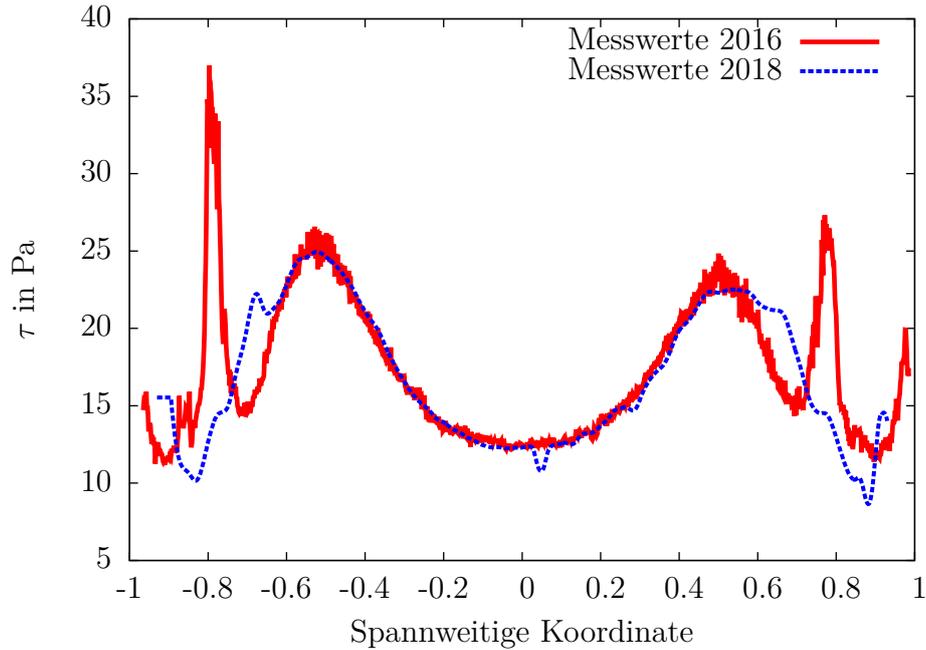


Abb. 5.6.: Vergleich der Wandschubspannungswerte am Deltaflügel bei $u_\infty = 50$ m/s und 25° Anstellwinkel aus dieser Arbeit und aus [16].

unterscheiden. Dadurch konvergieren die ermittelten Wandstromlinien nicht zu einer einzigen Ablöselinie wie es theoretisch [16] von der Wirbelstruktur am Deltaflügel zu erwarten wäre. In Abb. 5.8 verlaufen die detektierten Wandstromlinien nahe der Konvergenzlinie parallel zueinander und sorgen somit im Bereich der extrem starken Konvergenz für fehlerhafte Stromröhrenbreiten.

An den äußersten 5% des Flügels sind die detektierten Stromlinien unbrauchbar. Dort wäre jedoch auch eine manuelle Auswertung schwierig: Die Stromlinien könnten nur anhand von einzelnen Indizien oder großflächiger Interpretation mit 'gesundem Menschenverstand' eingezeichnet werden, nicht anhand von tatsächlichen lokalen Strukturen in der Ölfilmoberfläche. Es müsste untersucht werden, ob dies ein Detektionsfehler ist oder der Ölfilm zu dick ist, um der Strömung zu folgen. Die Luft kann an der Ablöselinie in den Wirbel strömen und sich von der Modelloberfläche entfernen, was für das Öl jedoch nicht gilt. Es könnte sich ein Kanal endlicher Breite bilden, entlang dessen das Öl langsam abfließt. Ein deutlicher Fehler der automatischen Richtungserkennung liegt noch in den Randeffekten. Die äußersten Pixel des Modells können nicht zuverlässig verwendet werden.

Weitere Unsicherheiten sind Abb. 3.11 zu entnehmen. Es wäre zu erwarten, dass der Faktor der lokalen Divergenz bei optimalen Daten eine deutlich glattere Verteilung

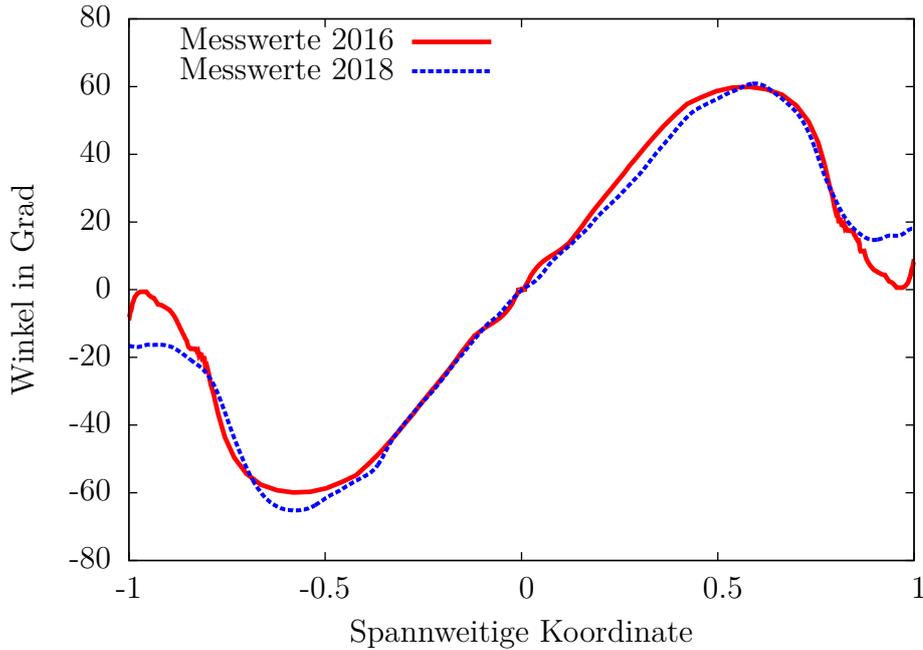


Abb. 5.7.: Vergleich der Wandstromrichtung am Deltaflügel bei $u_\infty = 50$ m/s und 25° Anstellwinkel aus dieser Arbeit und aus [16].

ergeben sollte als im Bild zu sehen ist. Dieses Rauschen mittelt sich jedoch entlang der Wandstromlinie und ist in der integrierten Stromröhrenbreite nicht mehr sichtbar.

Die Übertragung der Daten auf das dreidimensionale Modell sowie Berücksichtigung der Oberflächennormalen und anderer geometrischer Parameter funktioniert dagegen problemlos. Die Abweichungen der tatsächlichen Modellposition bei der Umrechnung auf Pixelpositionen und zurück können genau quantifiziert werden. Es handelt sich um Bruchteile von Millimetern weshalb dies, im Gegensatz zu den Unsicherheiten anderer Auswertungsschritte, eine untergeordnete Rolle spielt.

In der Ölfilm dickenauswertung gibt es ebenfalls sehr gut auszuwertende Bereiche und andere, unzuverlässige Bereiche der Auswertung. Nahe der Ölfilmvorderkante befindet sich der einheitlich dunkle Interferenzstreifen, an dem sich die Ölfilm dicke nicht präzise genug auswerten lässt. Dies, verbunden mit der geringen Ölfilm dicke nahe der Vorderkante sorgt für zu große relative Fehler und unzuverlässige Werte der Wandschubspannung. Ein Abschneiden aller Daten unterhalb einer kritischen Ölfilm dicke löst dieses Problem. Bei sehr hohen Ölfilm dicken sind die Daten nicht mehr auswertbar, eine manuelle Auswertung würde an den Stellen aufgrund der kleinen Kohärenzlänge des Lichtes ebenfalls scheitern. Der Punkt des Scheiterns muss

5. Validierungsexperimente im Niedergeschwindigkeitskanal

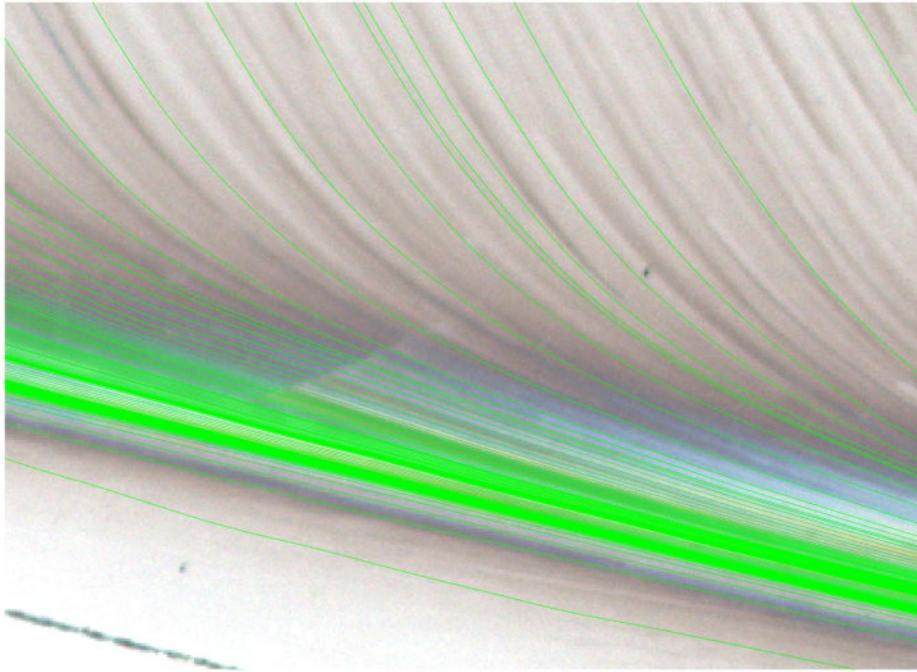


Abb. 5.8.: Parallel verlaufende Stromlinien am Deltaflügel nahe der Konvergenzlinie.

automatisch erkannt werden, was in der aktuellen Version der Software nicht immer zuverlässig funktioniert.

Insgesamt sind die Bilder nahezu vollständig auswertbar und in sich, sowie zu früheren Messungen konsistent. Kleine Randbereiche liefern fehlerhafte Ergebnisse und werden größtenteils automatisch entfernt. Noch sind aber nicht alle ausgegebenen Werte der Wandschubspannung als tatsächliche Messergebnisse aufzufassen, da es noch selten auftretende Artefakte der Auswertung gibt.

6. Transsonische Messungen am Flugkörper

6.1. DNW-TWG in Göttingen

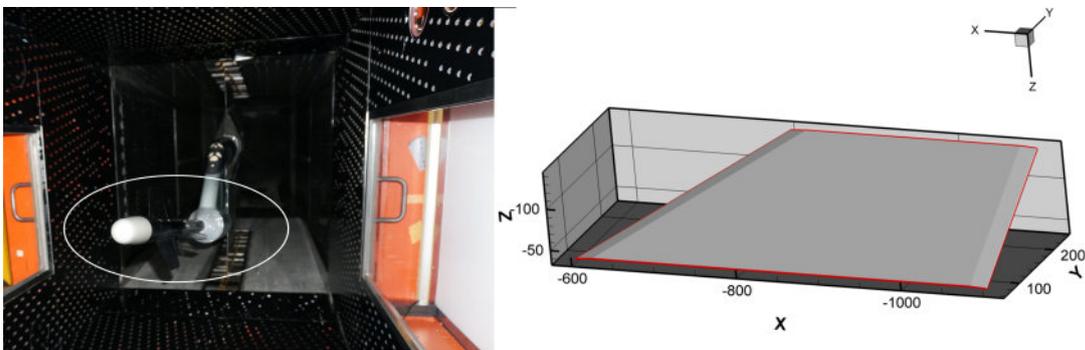


Abb. 6.1.: Links: Flugkörpermodell im TWG Göttingen mit dem Leuchtfeld im rechten Fenster des Kanals. Rechts: CAD-Modell des vermessenen Flügels.

Das zweite Experiment fand im DNW-TWG¹ des DLR in Göttingen statt. Ein Flugkörper wie in Abb. 6.1 wurde bei Mach 0,85 untersucht. Vermessen wurde dabei die Saugseite eines Flügels bei einer Modellrollage von 45° und einem variablen Anstellwinkel von 5° bis 25°. Da die Messstrecke in diesem Kanal geschlossen ist, sind Kamera- und Leuchtfeldpositionen auf die verfügbaren Fenster beschränkt. Die gewählte Rollage des Modells ermöglicht die Beobachtung von verschiedenen Wir-

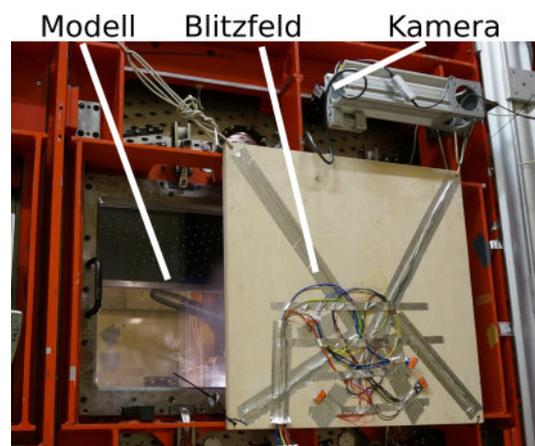


Abb. 6.2.: Experimenteller Aufbau am TWG von außen

¹Deutsch-niederländische Windkanäle, Transsonischer Windkanal Göttingen

6. Transsonische Messungen am Flugkörper

belstrukturen je nach Anstellwinkel. Abb. 6.2 zeigt die Messtrecke von außen. Durch das Fenster ist das Modell im Winkanal zu sehen, welches vom Leuchtfeld beleuchtet wird. Die Kamera ist weiter oben an einem anderen Fenster angebracht um die Bilder aufzunehmen.

Aufgrund der deutlich höheren Staudrücke im TWG verglichen mit dem 1MG sind hier höhere Viskositäten der verwendeten Öle notwendig. Die Auftragung erfolgt zwecks verbesserter Präzision mit einer Spritze. Um die Wandstromlinien sichtbar zu machen wurde das Silikonöl mit einer Viskosität von $100 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$ verwendet. Zur Vermessung der Ölfilm dickenvariation kamen die Öle mit 350, 750 und $1500 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$ Viskosität zum Einsatz. Weiteres wurde aufgetragen, indem ein Tropfen des Öls an der Oberkante des Flügels angebracht wurde, der durch Gravitation² den Flügel herunterlief, siehe Abb. 6.3. Die entstehende Ölfilmvorderkante ist deutlich gerader als mit der bei dem Deltaflügel verwendeten Auftragungstechnik, bei der Flügel entlang der gesamten Linie berührt werden muss. So werden auch keine weiteren Verunreinigungen des Modells wie z.B. Ölspritzer riskiert.

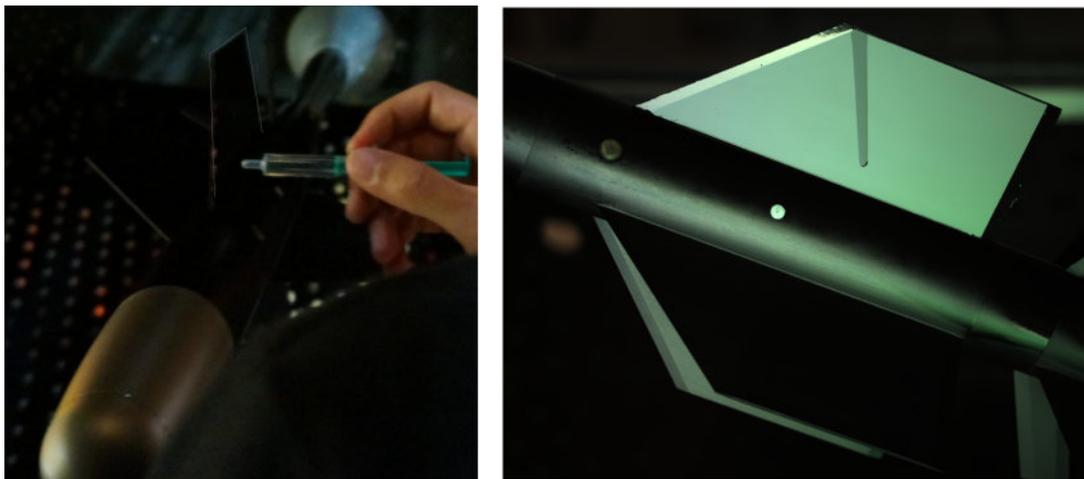


Abb. 6.3.: Ölauftragung mit Hilfe einer Spritze im TWG Göttingen (links) und herunterlaufender Öltropfen zur Erzeugung einer geraden Ölfilmvorderkante (rechts).

Der auswertbare Bereich der Testoberfläche erstreckt sich von dieser Vorderkante aus wie schon bei dem Deltaflügel nur wenige Zentimeter in Strömungsrichtung, weil danach keine verwendbaren Interferenzstreifen mehr sichtbar sind. Für jede Testbedingung müssen also mehrere Experimente durchgeführt werden, um die gesamte Oberfläche auszuwerten. Nach jedem Experiment muss der Windkanal herunterge-

²Bei dem mehrere Millimeter dicken Öltropfen spielt sie doch eine Rolle, da die Kraft mit der Ölfilmstärke skaliert.

fahren und das Modell gründlich gereinigt werden. Das neue Öl wird auf den Flügel aufgetragen und die nächste Messung gestartet.

6.2. Wandstromlinienbilder

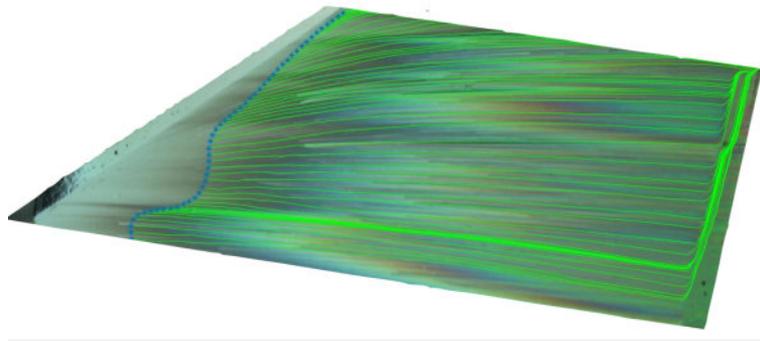


Abb. 6.4.: Stromlinienbild des Flugkörperflügels bei einem Anstellwinkel von 10° .

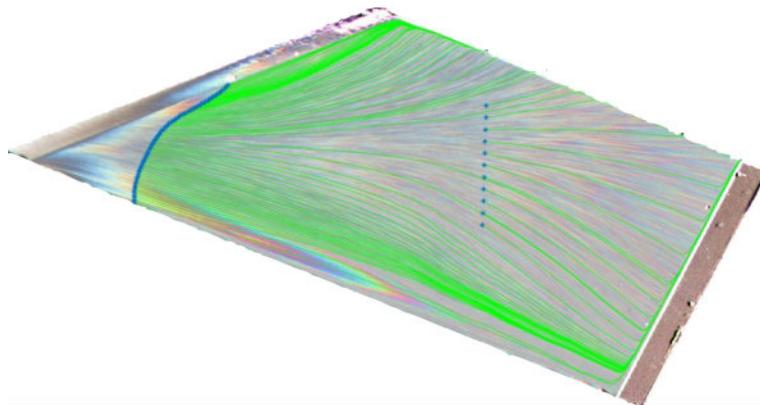


Abb. 6.5.: Stromlinienbild des Flugkörperflügels bei einem Anstellwinkel von 25° .

Abb. 6.4 zeigt die vermessenen Stromlinien des Flugkörperflügels bei einem Anstellwinkel von 10° , Rollwinkel von 45° und Machzahl von 0,85. Die Linien verlaufen größtenteils horizontal und es sind noch keine Wirbelstrukturen erkennbar. Bei einem Anstellwinkel von 25° in Abb. 6.5 ist dagegen eine deutlich veränderte Situation zu beobachten: Die Luft strömt nicht über die Vorderkante des Flügels entlang dessen Oberfläche sondern breitet sich fächerförmig ausgehend aus der Nasenspitze des Flügels nahe des Rumpfes aus. Die Trennlinie markiert die Anlegelinie, entlang der sich die Strömung an der Wand ausbreitet. Daraus könnte auf weitere Wirbelstrukturen geschlossen werden, was hier aber nicht im Detail getan wird. Abb. 6.6 zeigt

6. Transsonische Messungen am Flugkörper

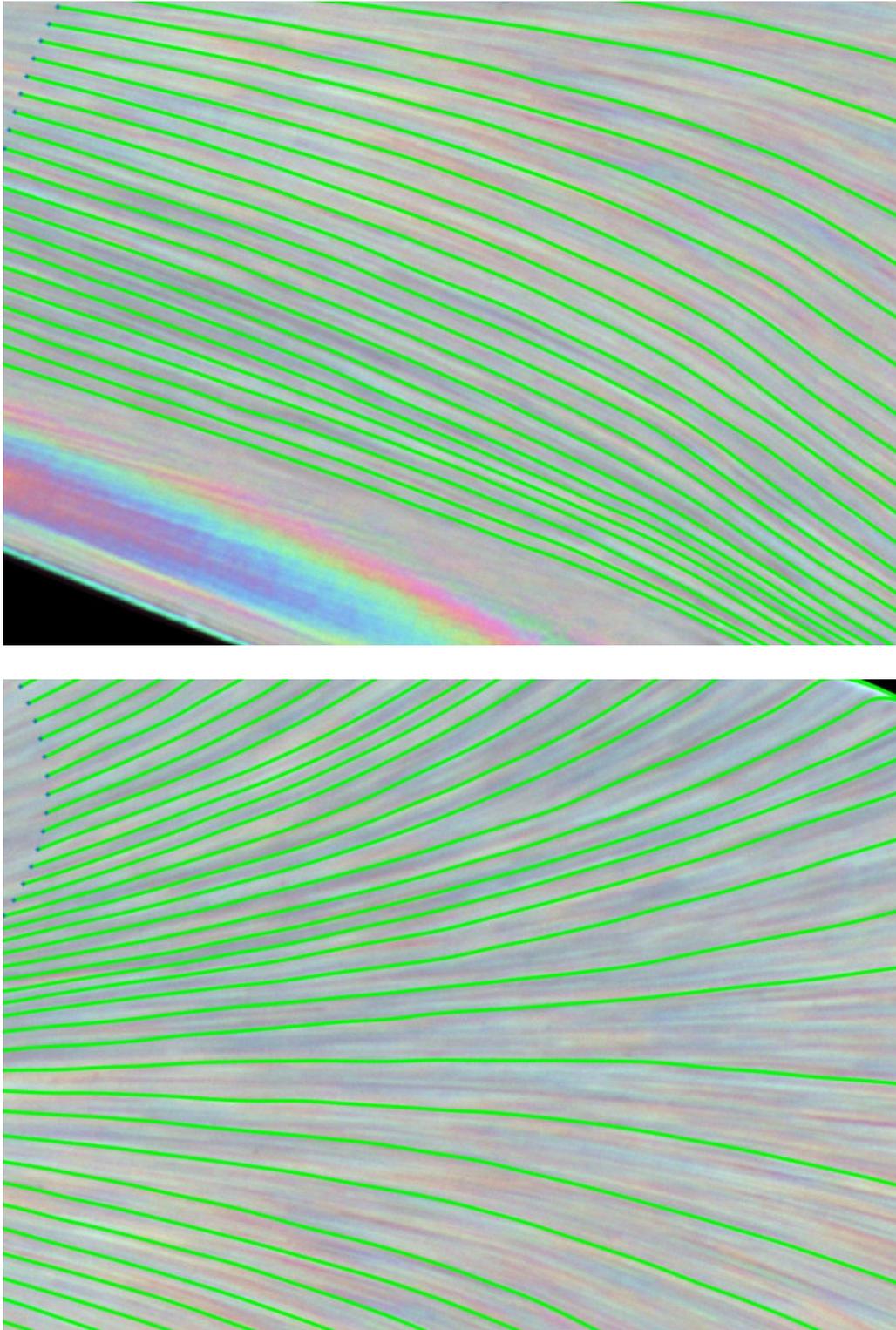


Abb. 6.6.: Nahaufnahmen der automatisch detektierten und gezeichneten Wandstromlinien bei einem Anstellwinkel von 25°

einige der eingezeichneten Wandstromlinien als Nahaufnahme. Im Hintergrund der Bilder ist das normierte Interferenzbild ohne weitere Bearbeitungsschritte gezeigt. Die Wandstromlinien folgen sehr gut den erkennbaren Streifenstrukturen des Bildes oder verlaufen parallel dazu. Divergenz und Konvergenz der Linien erfolgt gleichmäßig, was der physikalischen Intuition entspricht. Es sind keine Fehler zu finden, an denen eine Wandstromlinie signifikant anders verlaufen würde, als ein Mensch sie erkennen könnte. Dennoch weisen einige der Linien leichte Knicks auf oder krümmen sich nicht monoton nur in eine Richtung. Darin sind die Unsicherheiten der Richtungsbestimmung zu erkennen, die kleine lokale Einflüsse auf die resultierenden Wandstromlinien haben, solange sie nicht durch Glättungsverfahren eliminiert werden.

6.3. Ölfilmdickenauswertung

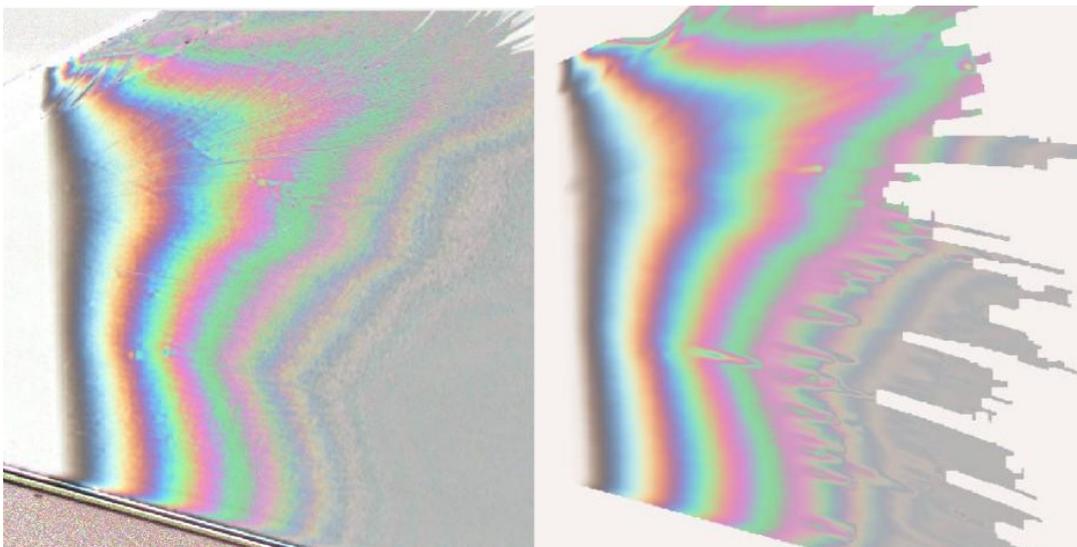


Abb. 6.7.: Beispiel der Ölfilmdickenauswertung im DNW-TWG. Vergleich des Original-Interferenzbildes (links) mit dem aus der ermittelten Ölfilmdickenverteilung berechneten Interferenzbild (rechts).

In Abb. 6.7 ist ein Beispiel der Dickenauswertung eines Experimentes am DNW-TWG gezeigt. Auf der linken Seite ist das originale Foto der Interferenzstreifen gezeigt, aus dem die Ölfilmdickenverteilung berechnet wird. Rechts davon ist das aus der erhaltenen Dicke rekonstruierte Interferenzbild zur Validierung der Ergebnisse. In den zentralen Bereichen des Bildes funktioniert diese Auswertung problemlos und

6. Transsonische Messungen am Flugkörper

selbst kleinskalige Strukturen können rekonstruiert werden. Die Breite und Form der Interferenzstreifen ist im rekonstruierten Bild identisch mit denen des Interferenzbildes. Die Dickenauswertung ist damit ein sehr zuverlässiger Teil der gesamten Auswertung. Die Qualität des Ergebnisses wird maßgeblich durch die Richtigkeit der Stromlinien beeinflusst, weshalb die Daten am Flugkörper noch besser sind als die der Auswertung des Deltaflügels.

Am Rand und in den jeweils rechten Bildhälften bei großen Ölfilmthicken sind Abweichungen erkennbar, welche den auswertbaren Bereich begrenzen. Einige Stromlinien konnten sehr weit ausgewertet werden und liefern auch bis Ölfilmthicken von $1,5 \mu\text{m}$ korrekte Ergebnisse, wo die Interferenzstreifen so schwach sind (vgl. Abb. 2.5), dass auch ein Mensch sie nicht weiter auswerten könnte. Andere Stromlinien erzeugen an dem dritten roten Maximum, also ab einer Ölfilmthicke von $0,8 \mu\text{m}$ Fehler, wodurch sie nicht weiter nach rechts ausgewertet werden. Es muss mit einem verstellbaren Parameter abgewogen werden, wie streng die Abschneidekriterien gewählt werden. In diesem Fall sorgen die sehr weichen Kriterien für eine riesige auswertbare Fläche, die aber an einigen Ecken offensichtliche Fehler enthält.

6.4. Wandschubspannungsverteilungen

Einige der untersuchten Anstellwinkel des Modells wurden großflächig vermessen. Hier werden nur die Wandschubspannungsverteilungen von 10° , 20° und 25° in Abb. 6.9, 6.8 und 6.10 gezeigt. An den Stellen, wo Daten von mehreren Ölstreifen vorliegen wurde der Mittelwert gebildet. Eine Interpolation zwischen den Datenstreifen ist denkbar, aber bisher noch nicht vorgesehen. Zusätzlich zur Wandschubspannung sind in der Tecplot-Figur einige Stromlinien eingezeichnet. Dies ist einfach möglich, da die lokale Strömungsrichtung tangential zur Oberfläche ebenfalls mit abgespeichert wird.

Bei einem Anstellwinkel von 10° sind dünne Streifen entlang der Strömungsrichtung zu sehen, in denen sich hohe und niedrige Werte der Wandschubspannung abwechseln. Diese setzen sich über die verschiedenen Messbereiche fort, sowohl in Intensität als auch in der Position. Dennoch sind die Linien gleicher Wandschubspannung nicht ganz parallel zu den Wandstromlinien, was manuell auch nochmal überprüft wurde. Bei diesem Winkel scheint es mehrere kleine Wirbel auf dem Flügel zu geben, die für eine sehr inhomogene Verteilung der Wandschubspannung sorgen. In dem Fall von 20° Anstellwinkel verschwinden diese kleinen Strukturen nahezu vollständig und es

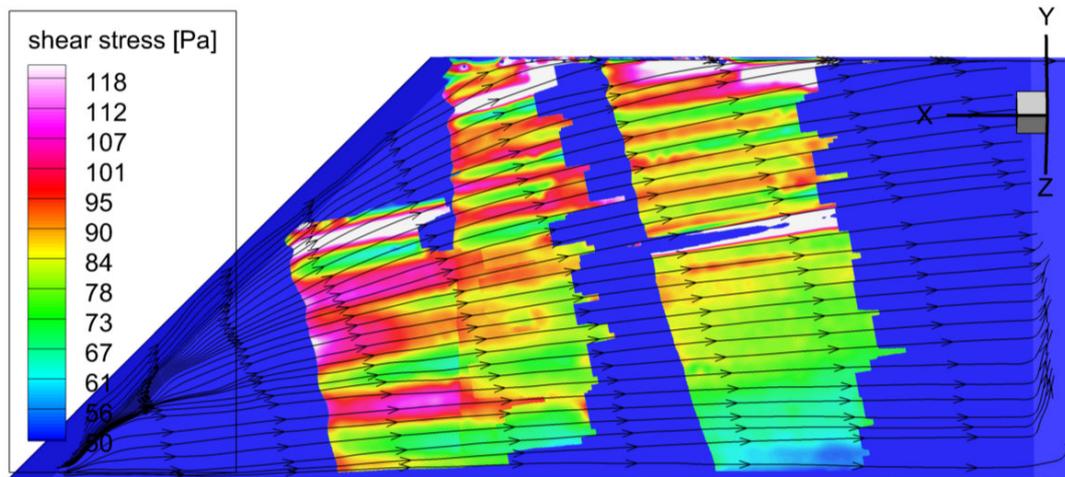


Abb. 6.8.: Wandschubspannung am Flugkörper bei einem Anstellwinkel von 10 Grad, aus 3 Streifen zusammengesetzt.

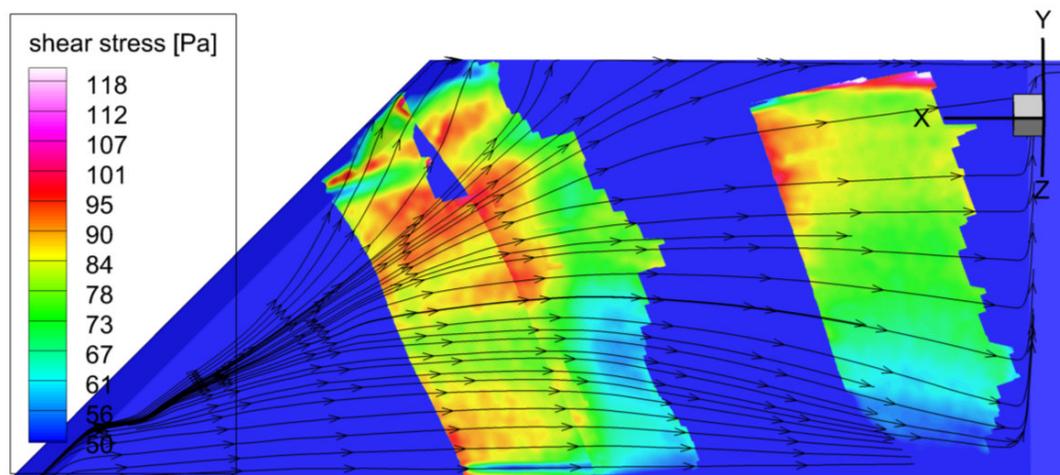


Abb. 6.9.: Wandschubspannung am Flugkörper bei einem Anstellwinkel von 20 Grad, aus 3 Streifen zusammengesetzt.

6. Transsonische Messungen am Flugkörper

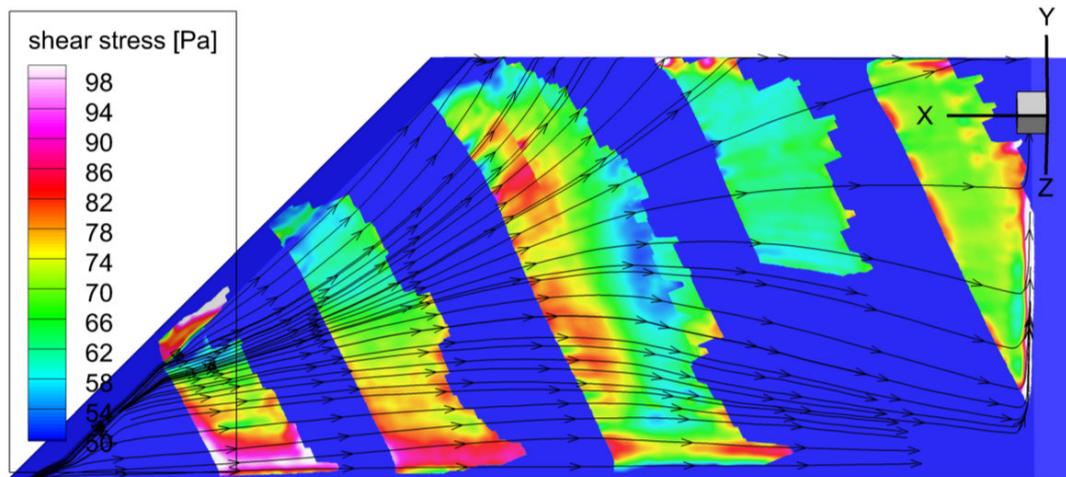


Abb. 6.10.: Wandschubspannung am Flugkörper bei einem Anstellwinkel von 25 Grad, aus 6 Streifen mit zwei unterschiedlichen Ölviskositäten zusammengesetzt.

gibt nur einen Bereich großer Wandschubspannung auf der oberen Hälfte des Flügels und geringere Wandschubspannung nahe des Rumpfes in den unteren Bereichen des Bildes. Am hinteren Ende des Flügels (rechts) liegt das Minimum direkt am Rumpf, während weiter vorne die Wandschubspannung am Rumpf nochmal ansteigt. Am rechten Streifen gibt es deutliche Änderungen der Werte entlang der Stromlinien, was an dieser Stelle nicht so zu erwarten ist. Dies könnte ein Messfehler sein. Bei 20° Anstellwinkel dominiert folglich eine große Wirbelstruktur mit der Ausnahme der linken oberen Kante, an der noch ein weiterer kleiner Streifen von großen Wandschubspannungswerten zu sehen ist. Die Auswertung der 25° Konfiguration ist nicht so gut gelungen und weist einige offensichtliche Fehlerstellen auf. Dennoch liegt die größte Wandschubspannung eindeutig in der vorderen Hälfte des Flügels direkt am Rumpf vor. Bei diesem großen Anstellwinkel wird der zylinderförmige Rumpf nicht mehr vollständig umströmt und erzeugt hohe Messwerte durch die entstehenden Verwirbelungen an der Kante zwischen Rumpf und Flügel. Solche Einflüsse des Rumpfes sind bei kleineren Anstellwinkeln nicht so ausgeprägt.

7. Diskussion

In den letzten beiden Kapiteln wurden bereits einige Stärken und Schwächen der implementierten automatischen Auswertung angesprochen. Die Ölfilmstärke wird anhand eines einzelnen Bildes mit einer Präzision von einigen Nanometern bestimmt. Dabei wird die Ölfilmvorderkante bei jeder Wandstromlinie automatisch gefunden und muss folglich weder gerade noch kontinuierlich sein. Sehr kleine Strukturen in der Ölfilmstärke werden zuverlässig rekonstruiert, sodass auch die räumliche Auflösung ausreichend gut für die durchgeführten Experimente ist. Ohne Probleme können in einem Bild sowohl Stromlinien mit einem großen Ölfilmstärkengradienten ausgewertet werden, bei denen die Intensitätsmaxima nur 40 Pixel auseinander liegen, als auch Stromlinien, bei denen auf 1000 Pixeln Länge nur ein bis zwei Interferenzstreifen pro Farbe zu sehen sind.

Die dreidimensionale Geometrieberechnungen ermöglichen eine Auswertung auf beliebig gekrümmten Oberflächen. Diesbezüglich ist nur die experimentelle Beleuchtung der Fläche und Aufnahme der Bilder begrenzend. In beiden vorgestellten Experimenten hatten die untersuchten Flügel gerade Oberflächen, jedoch wurde diese Funktionalität bereits in weiteren, nicht mehr zu dieser Arbeit gehörigen Experimenten bestätigt. Bei deutlichen Markerpunkten in den Bildern ist die Ermittlung der Ausrichtung des Modells auf unter einem Pixel genau möglich. Dafür werden scharfe und Blickwinkelunabhängige Ecken des Modells oder genau bekannte Druckbohrungen benötigt. Aber auch bei weniger guten Bedingungen wird die Modellposition erfolgreich erkannt. Der Deltaflügel lies sich maximal schwierig auswerten, da nur vier Marker vorhanden waren, jeweils 2 davon achsensymmetrisch zu den Markern auf der anderen Flügelseite lagen und als Bildpunkt der Übergang der geraden Seitenkante zur Vorderkantenkrümmung der Spitze gewählt wurde. Dieser Punkt konnte in einigen Bildern nur grob geschätzt werden, was in Fehlern von bis zu 5 Pixeln resultiert.

Am Problematischsten ist nach aktuellem Stand des Auswertungsprogrammes die Stromlinienerkennung. Auf großen Bereichen der auszuwertenden Fläche funktio-

7. Diskussion

niert sie besser, objektiver und deutlich schneller als jede mögliche manuelle Auswertung, ist aber im Gegensatz dazu anfällig gegen größere Störeffekte. Defekte in der Modelloberfläche, abrupte Modellkanten oder Knicke in der Oberfläche und Bereiche ohne deutliche Farbstreifen können nicht ausgewertet werden. Ein Mensch würde solche Problemstellen erkennen, die irreführenden Daten ignorieren und großflächig interpolieren können, wozu das Programm noch nicht immer in der Lage ist.

7.1. Mögliche Verbesserungen der Methodik

Neben dem in Kapitel 3.5 beschriebenen Verfahren zur Ölfilmdickenauswertung anhand eines einzelnen Bildes gibt es weitere Möglichkeiten, die lokale Ölfilmdicke aus dem Interferenzbild zu ermitteln. Die Interferenzstreifen könnten erkannt und zu Iso-Dickenlinien des Ölfilms umgewandelt werden. Vor Allem bei höheren Interferenzordnungen sind die Streifen als Ganzes noch zu erkennen, aber die Intensitätsmaxima entlang einer Stromlinie aufgrund des großen Rauschens nicht mehr. Diese Iso-Linien liefern keine vollflächigen Daten, könnten aber als Hilfe für andere Auswertungsverfahren verwendet werden.

Bei der Stromlinienerkennung müssten die drei Farbkanäle besser ausgenutzt werden. Die Kontrastverstärkung durch Subtraktion des originalen von einem gemittelten Bild liefert Daten in jedem Farbkanal, wovon nur das Maximum ausgewertet wird. Andere Ansätze waren bis jetzt noch nicht erfolgreich, könnten die Sicherheit der Auswertung aber potentiell noch steigern. Des Weiteren könnten mehr Kriterien für die Erkennung von Störobjekten eingebaut werden. Enge Kurven sind in den Stromlinien möglich, aber keine Doppelkurven. Bei einem deutlichen Knick einer Stromlinie in eine Richtung, direkt gefolgt von einem Knick in die andere Richtung und ein weiterer Verlauf parallel zur anfänglichen Strömungsrichtung liegt mit sehr hoher Sicherheit eine Störstelle vor. Dies müsste objektiv formuliert und implementiert werden. Bei der danach notwendigen Interpolation der entstehenden Datenlöchern gibt es auch noch Verbesserungsbedarf. Falls in einer zu großen Fläche keine Daten vorhanden sind, muss der Differentialgleichungsalgorithmus die Werte vom Rand des Datenlochs extrapolieren, wodurch noch unphysikalische Ergebnisse entstehen.

Neben den inhaltlichen Optimierungen sind auch weitere Geschwindigkeitsoptimierungen möglich. Die Dickenauswertung erfolgt entlang jeder Stromlinie, was in manchen Bereichen mit über 20 Stromlinien pro Pixel redundant ist. Dennoch ist die

Menge an Stromlinien erforderlich, da sich diese Stromlinien stromab mit einem Divergenzfaktor von bis zu 100 aufweiten und damit 5 Pixel Abstand zueinander haben. Zuletzt könnten mehr Teile der Anwendung auf der Grafikkarte berechnet werden. Dies würde erheblichen Programmieraufwand bedeuten, ermöglicht aber eine Entkoppelung des gesamten Tools von Matlab sowie potentielle Echtzeit-Anwendungen im Windkanal.

7.2. Optimale experimentelle Durchführung

Eine automatische Auswertung ist auf gute Rohdaten angewiesen, damit sie stabil funktioniert. Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass die Anzahl der Marker größer als vier und optimal ca. acht sein sollte um eine präzise Rekonstruktion der Modelloberfläche zu ermöglichen. Bei wenigen Markerpunkten kann die Verzerrung der Kamera nicht berücksichtigt werden.

Das Modell sollte überall gut ausgeleuchtet sein, aber die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung ist nicht so relevant. Alle Bilder werden mit den Referenzbildern normiert, was die Auswertung stabil genug gegen inhomogene Lichtverhältnisse macht. Dementsprechend ist im Experiment die Aufnahme solcher Referenzbilder unerlässlich. Idealerweise sollten diese unter Windlast aufgenommen werden, falls sich die Modellposition durch die Verbiegung der Haltestange signifikant verändern kann. Sehr wichtig für die Modelloberfläche ist die homogene Beschaffenheit und gleichmäßige Reflektivität. Dies ist beim Stahlmodell nicht problematisch, aber bei Verwendung von reflektierenden Folien. Falls durch wiederholtes Säubern deutliche Kratzer oder andere Streifen auf der Folie entstehen muss diese ausgetauscht werden. Auch Blasen in der Folie sind dringend zu vermeiden. Die Muster der Stromlinien auf dem Ölfilmbild sind sehr schwach, so dass jedes andere Muster fehlerhaft als Stromlinie interpretiert werden kann.

Der Zeitabstand zwischen den Bildern sollte auch an die Bedingungen angepasst werden. Zum einen gibt es den Abstand zwischen rotem, grünen und blauen Bild des gleichen Messpunktes. Diese sind mit 100 ms kurz genug. Größere Abstände würden theoretisch für Fehler sorgen, da sich die Ölfilmdicke in der Zeit zwischen den drei Farbbildern geringfügig ändert. Zum anderen gibt es den Zeitabstand zwischen den Bilder-Trios, der in diesen Tests bei 10 Sekunden lag. Zur Auswertung jedoch werden nur Bildpaare mit einem zeitlichen Mindestabstand von >40 s verwendet um die Differenz der Dicke zu beiden Zeitpunkten deutlich größer als die Unsicherheiten

7. Diskussion

der Dickenauswertung in einem Bild zu halten. Ein langer Messzeitraum ist also vorteilhaft um viele Bildpaare zu erhalten, die den Mindestabstand erfüllen.

Die Wahl des Öls ist ebenfalls entscheidend. In [5] wurden der Zusammenhang zwischen Wandschubspannung, Ölviskosität und benötigter Zeit aufgetragen, um den Ölfilm 1 cm von der Vorderkante entfernt auf 250 nm auszudünnen. Diese Zeit sollte für die Interferenzbilder bei wenigen Minuten liegen, für die Wandstromlinienbilder dahingegen nur bei etwa 10 Sekunden.

8. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde mittels Ölfilminterferometrie die Wandschubspannungsverteilung in dreidimensionalen Strömungen vermessen. Durch Verwendung von LEDs in drei Farben und mehreren Silikonölen können unterschiedliche Interferenzbilder erzeugt werden. Dies ermöglicht sowohl die automatische Auswertung der Wandstromlinien also auch die räumliche und zeitliche Variation der Ölfilmstärke. Mit diesen Messwerten und der dreidimensionalen Geometrie eines Gittermodells kann die Wandschubspannung flächendeckend und lokal aufgelöst berechnet werden. Die Ergebnisse sind nahezu identisch mit denen früherer Messreihen, wobei sich die Auswertung der Daten und Durchführung der Experimente gegenüber diesen signifikant vereinfacht hat.

Es wurde ein Matlab-Programm entwickelt, welches aus Ölfilm-Interferenzbildpaaren die Wandschubspannung an beliebigen dreidimensionalen Modellen berechnet. Dabei wurde der manuelle Anteil der Auswertung massiv reduziert, um große Datensätze in wenigen Stunden analysieren zu können. Des Weiteren konnten dadurch subjektive Fehler minimiert werden, die immer wieder in bisherigen Auswertungen zu finden waren.

Die experimentelle Umsetzung der Ölfilminterferometrie erweist sich auch als sehr einfach. Handelsübliche, preiswerte LEDs ermöglichen eine Beleuchtung mit ausreichender Intensität. Ein Nachteil ist, dass während des Experimentes optischer Zugang zum Modell im Windkanal ermöglicht werden muss. Eine optimale Ausnutzung vorhandener Fenster und Öffnungen im Windkanal lässt sich aber dank eines weiteren während der Arbeit dafür entwickelten Programmes schon vor der Durchführung des Experimentes planen.

An einem Deltaflügel wurde das neue Verfahren erfolgreich validiert, da frühere Ergebnisse sehr präzise reproduziert werden konnten. In der Untersuchung eines Flugkörpers bei transsonischen Geschwindigkeiten erweist sich die automatische Auswertung als robust gegenüber den neuen Strömungsbedingungen. Einige Parameter können Benutzerfreundlich durch eine GUI an die Gegebenheiten des aktuellen Ex-

8. Zusammenfassung

perimentes angepasst werden. Die Ergebnisse der Wandschubspannungsauswertung erweisen sich in allen Messreihen als konsistent und gut reproduzierbar. Sie hängen nicht von der Wahl des verwendeten Bildpaares innerhalb der Sequenz und somit nicht von der Zeitdifferenz zwischen den zwei Bildern ab, wobei große Zeitdifferenzen das Rauschen der Ergebnisse verringern. Folglich reichen zwei Interferenzbilder zur Auswertung aus, wodurch das gesamte Verfahren erneut beschleunigt wird. Alternativ kann eine Mittelung der Ergebnisse mehrerer Bildpaare zur Glättung der Daten und Entfernung von Rauschen verwendet werden, was jedoch nicht nötig war. Experimentell kann mit einem Messdurchlauf immer nur ein Bereich von etwa 3 Zentimeter entlang der Strömungsrichtung untersucht werden, bevor der Ölfilm zu dick für die Beobachtung von deutlichen Interferenzstreifen wird. Mehrere solcher vermessenen Bereiche lassen sich aneinanderfügen, um ein Gesamtbild als Ergebnis zu erhalten.

Mit diesen Verbesserungen der Ölfilminterferometrie gegenüber den bisherigen Veröffentlichungen könnte das Verfahren zeitnah wirtschaftlich sinnvoll einsetzbar werden. Flugzeug- und Autohersteller sowie mehrere andere Industriezweige könnten untersuchen, welche Teile des Modells maßgeblich für den Reibungswiderstand des ganzen Objektes verantwortlich sind. An diesen Stellen könnte gezielt versucht werden, den Widerstand zu verringern, wodurch Flugzeuge oder Flugkörper lokal optimiert werden können. Dies wird schon numerisch mit CFD-Verfahren optimiert, welche jedoch nicht immer zuverlässige Ergebnisse liefern. Mittels der gewonnenen Daten, die mit anderen Messmethoden nicht erzielt werden können ist eine wertvolle Validierung der Numerik möglich.

A. Weitere Details zur Computerauswertung

A.1. Zuordnung von Pixeln und Dreiecken

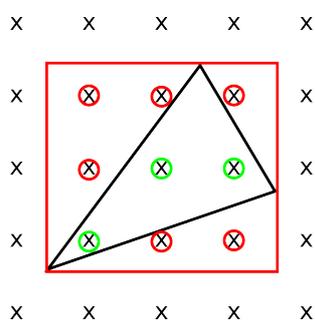


Abb. A.1.: Überprüfung, welche der Gitterpunkte in einem gegebenen Dreieck liegen

werden, welcher Pixel in welchem Dreieck liegt, aber dank des geordneten Pixelgitters müssen nicht alle Pixel und Dreiecke paarweise geprüft werden. Um jedes Dreieck wird das minimale Rechteck gezeichnet, indem die Minimal- und Maximalwerte der auftretenden x- und y-Koordinaten ermittelt werden. Dieses Rechteck enthält typischerweise 4 bis 10 Pixelpositionen, die darauf überprüft werden müssen ob sie tatsächlich im Dreieck liegen. Der in dieser Arbeit benutzte Algorithmus schafft diesen Test in nur 27 Operationen.

Für eine beliebige Ecke des Dreiecks wird der Vektor zur nächsten Ecke berechnet sowie der Vektor zum zu testenden Punkt. Da im zweidimensionalen Pixelbild gearbeitet wird, sind bis jetzt alle z-Komponenten gleich Null. Das Vorzeichen der z-Komponente des Kreuzproduktes dieser zwei Vektoren gibt an, auf welcher Seite der (unendlich verlängerten) Dreiecksseite der zu testende Punkt liegt. Das ist ge-

Für die beschriebenen Berechnungen ist es notwendig, jedem Pixel das entsprechende Dreieck des 3D-Modelles zuzuordnen, welches nach der Kameraprojektion den Pixel enthält. Ein üblicherweise verwendeter Ray-Tracing-Algorithmus (siehe Kapitel A.2) würde bei jedem Strahl durch jeden der Pixel überprüfen, welches der Dreiecke des Modells getroffen wird. Wie in Kap. 3.2 beschrieben dauert das zu lange.

Stattdessen werden alle Knotenpunkte des Modells mit den ermittelten Projektionsparametern auf das Pixelbild projiziert¹. Hier muss zwar ebenfalls getestet

¹Rechenaufwand: Menge der Knotenpunkte = 10^6

A. Weitere Details zur Computerauswertung

geben, wenn er bei allen drei Dreiecksseiten auf der richtigen Seite liegt. Für jeden Eckpunkt sind das zwei mal Subtraktionen in je zwei Komponenten zur Berechnung der Differenzvektoren, anschließend zur Berechnung des Kreuzproduktes 2 Multiplikationen (entspricht je 1,5 Operationen) und eine Subtraktion. Für jeden Eckpunkt ergibt das 8 Rechenoperationen plus die Vorzeichenüberprüfung des Ergebnisses.

Es kann durchaus sein, dass manchen Dreiecken mehrere Pixel zugeordnet werden und anderen gar keine, jeder Pixel sollte in genau einem Dreieck des Gittermodells liegen. Vorder- und Rückseite des Modells, welche auf den gleichen Pixel abgebildet werden, müssen auch voneinander getrennt werden. Offensichtlich gehört nur das Dreieck zum Pixel, welches näher an der Kamera ist.

A.2. Raytracing

Raytracing ist eine häufig verwendete Methode, um Pixel auf ein dreidimensionales Modell abzubilden. Mit bekannten Kameraparametern kann aus jedem Pixel ein Strahl gebildet werden, in dessen Richtung der zugehörige dreidimensionale Punkt liegt. Jedoch fehlt jegliche Information über die Distanz zum beobachteten Objekt. Daher muss bei jedem dieser Strahlen und jedem Dreieck des Modells paarweise geprüft werden, ob sie sich schneiden und wo sich der Schnittpunkt befindet. Es könnte mehrere Schnittpunkte geben, falls das Objekt Konkav ist oder die Rückseite mit berücksichtigt wird, in dem Fall ist der nächste Schnittpunkt zu wählen. Dies ist der gesuchte Punkt auf der Modelloberfläche.

Solch eine Suche kann schnell verlaufen, falls das Modell eine gerade Oberfläche hat und nur der Schnittpunkt mit dieser Ebene überprüft werden muss. In Computerspielen wird häufig die Auflösung des Gittermodells drastisch reduziert, um die Rechnung zu beschleunigen. Hier ist keine dieser Vereinfachungen möglich und die paarweise Überprüfung von allen Strahlen durch die Pixel und allen Modelldreiecken dauert länger als alle anderen Teile des Programms. Raytracing wurde von einigen Mitarbeitern als einfache Lösung vorgeschlagen, ist bei dem allgemeinen gekrümmten Modell mit der gegebenen Auflösung und der notwendigen Präzision des Ergebnisses jedoch nicht möglich.

Eine Ausnahme bildet das in Kapitel 4 beschriebene Tool zur experimentellen Positionsanalyse. Dort ist die Projektion aller Knoten auf die Windkanalwand gesucht, welche eine Ebene und kein hochaufgelöstes Gittermodell ist. Damit ist Raytracing sinnvoll nutzbar und wurde auch verwendet.

A.3. 3D-Modellpositionen der Pixel

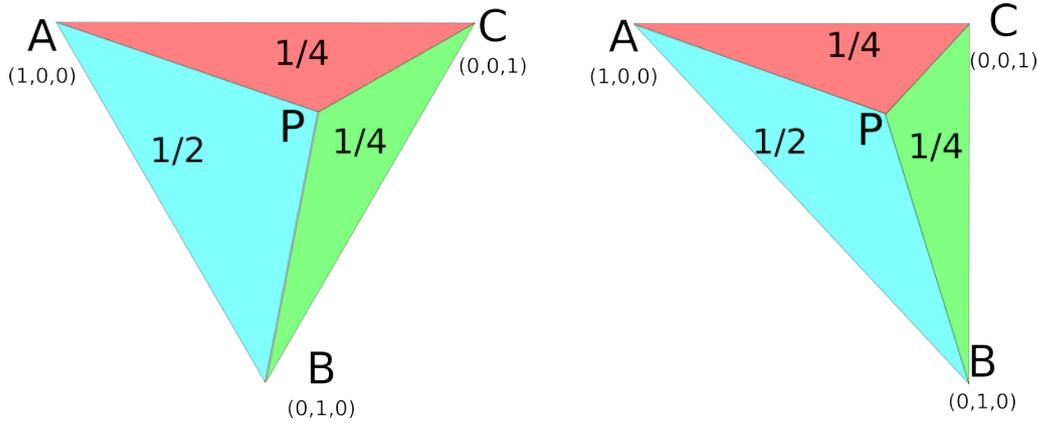


Abb. A.2.: Baryzentrische Koordinaten in einem Dreieck (verändert aus [34]). Position des Beispielpunktes P $(0,25;0,25;0,5)$ in zwei unterschiedlichen Dreiecken.

Die genaue Position der beobachteten Pixel auf dem Modell ist zur Berechnung dreidimensionaler Abstände unerlässlich. Durch die bekannte Zuordnung zu den Dreiecken des Modells und deren Projektion auf das Pixelbild lässt sich die Methode der baryzentrischen Koordinaten [34] anwenden. Dies sind drei Parameter K_1 , K_2 und K_3 , die die Position eines Punktes P relativ zu den Dreieckspunkten A , B , C angeben. Berechnet werden diese jeweils, wie in Abb. A.2 gezeigt, durch den Flächenanteil F des Teildreiecks vom gesamten Dreieck.

$$K_1 = \frac{F_{BCP}}{F_{ABC}} \quad (\text{A.1})$$

$$K_2 = \frac{F_{CAP}}{F_{ABC}} \quad (\text{A.2})$$

$$K_3 = \frac{F_{ABP}}{F_{ABC}} = 1 - K_1 - K_2 \quad (\text{A.3})$$

In einem Spezialfall der Auswertung zur Übertragung von Strömungsrichtungsvektoren liegt der Punkt P außerhalb des betrachteten Dreiecks. Diese Methode funktioniert dennoch, falls die Teildreiecke die außerhalb des Dreiecks ABC liegen negativ gewichtet werden. Dadurch können einige der baryzentrischen Koordinaten negativ werden, in Summe ergeben sie aber wieder 1. Die sogenannten *vorzeichenbehafteten Flächen* der Teildreiecke ergeben in Summe immer die Fläche des ursprünglichen Dreiecks.

Die Rückrechnung erfolgt anhand der Koordinaten des Dreiecks mit Gewichtung

A. Weitere Details zur Computerauswertung

entsprechend der baryzentrischen Koordinaten:

$$\vec{P} = \vec{A} \cdot K_1 + \vec{B} \cdot K_2 + \vec{C} \cdot K_3 \quad (\text{A.4})$$

Ihr großer Vorteil ist, dass Gleichung A.4 auch auf das beliebig gedrehte und gestreckte Dreieck $\triangle A_M B_M C_M$ auf dem dreidimensionalen Modell anwendbar ist. Das Ergebnis ist der korrekte 3D-Ort P_M .

In dieser Anwendung ist also die Pixelposition des Punktes P bekannt, aber auch das (nummerierte) Dreieck ABC in dem er liegt und die Subpixelkoordinaten von dessen Ecken. Die baryzentrischen Koordinaten K werden im Pixelraum berechnet, um mit den bekannten Modellkoordinaten des entsprechenden Dreiecks $\triangle A_M B_M C_M$ die Modellkoordinaten des gesuchten Punktes P_M zu finden.

Diese Methode unterscheidet sich deutlich von der umgekehrten Projektion des dreidimensionalen Gitterpunktes auf das Kamerabild in Anhang A.1, welche durch den Verlust einer Dimension nicht invertierbar ist. Zur Validierung der Berechnung mit baryzentrischen Koordinaten wird die dreidimensionalen Positionen aller Pixel berechnet und anschließend mit der exakten Kameraprojektion die Position im Pixelbild zurückgerechnet. Die Differenzen zu den Startwerten bewegen sich im Bereich von 10^7 Pixel, also nahe der numerischen Genauigkeit. Es sind auch keine systematischen Fehler erkennbar, die Umrechnung funktioniert also in beide Richtungen sehr gut.

Dieses Verfahren ermöglicht die Projektion eines Punktes vom Pixelraum auf die Modelloberfläche, falls das zugehörige Dreieck des Pixels oder Subpixels bekannt ist. Diese Zuordnung von Pixeln und Dreiecken konnte effizient für alle ganzzahligen Pixel durchgeführt werden, ist jedoch nicht für beliebige Mengen Subpixel beziehungsweise ein ungeordnetes Gitter anstelle der Pixelkoordinaten durchführbar.

Insgesamt stehen der Auswertung folgende Operationen zur Verfügung. Es bestehen einige Einschränkungen, die jedoch für die verwendete Auswertungsmethode nicht zwangsläufig notwendig sind:

- Beliebige dreidimensionale Koordinaten auf das Pixelbild projizieren
- Ganzzahlige Pixelkoordinaten auf das dreidimensionale Modell projizieren
- Interpolation von Daten im Pixelraum auf Subpixel
- KEINE Interpolation auf dem dreidimensionalen Modell

- KEINE Umrechnung von Subpixelkoordinaten auf die dreidimensionalen Modellkoordinaten.

A.4. Grafikkartenprogrammierung

In Kap. 3.4 wird beschrieben, wie die Strömungsrichtungen bestimmt werden. Der Rechenaufwand dieser Methode² ist immens: Schon erste Tests zeigten eine Rechenlaufzeit von über einer Stunde bei einem Testbereich von 100 mal 100 Pixeln. Auf das vollständige Bild hochgerechnet wären das mehrere Tage und nicht sinnvoll realisierbar. Ursache dafür ist größtenteils die große Menge an Speicherzugriffen, die der Algorithmus verwendet. Das Bild hat 12 Millionen Pixel, bei denen jeweils 180 mögliche Strömungsrichtungen überprüft werden. Entlang der Linien in jede Richtung werden 100 Subpixelwerte ausgelesen, die zur Interpolation die Daten der 4 benachbarten Pixel benötigen. Dies sind etwa 10^{12} Zugriffe auf Pixeldaten und ein vielfaches davon an Operationen, die auf die Daten angewendet werden. Gelöst wurde das zeitliche Problem durch die komplette Parallelisierung der Berechnung aller Pixel und Programmierung auf der Grafikkarte, die für genau solche parallele Berechnung und Speicherzugriffe ausgelegt ist. Dadurch sind die Richtungsberechnungen des gesamten Bildes in etwa einer Sekunde möglich. Ein Teil des zeitlichen Erfolges liegt daran, dass die Programmiersprache von Octave auf Matlab bzw. C auf der Grafikkarte gewechselt wurde. Aus Kompatibilitätsgründen wurden zur Programmierung CUDA 7.5 [35] und Microsoft Visual Studio 2015 verwendet. Nach erfolgreicher Kompilierung entsteht eine Datei des Formates `.mexw64` welche von Matlab wie eine gewöhnliche `.m` Funktion aufrufbar ist. Der Code ist jedoch nicht mehr in Matlab editierbar, es müssten die entsprechenden Quellcode-Dateien (`.cu`) in Visual Studio bearbeitet und erneut kompiliert werden.

Werden noch mehr Teile des gesamten Programms auf die Grafikkarte umgelagert, ist eine Echtzeitauswertung durchaus realistisch. Dies ist im Zeitrahmen der Masterarbeit noch nicht möglich, in der weiteren Entwicklung dieses Projektes jedoch wünschenswert.

²Insbesondere das initiale Suchen der Richtungen

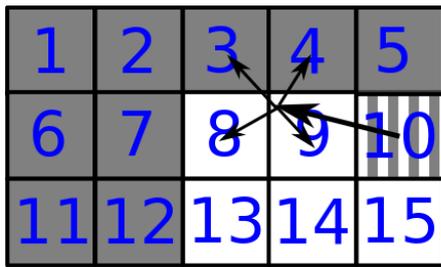
A.5. Rekursive Integration entlang der Stromlinien

Für den Auswertungsschritt von Kapitel 3.7 müssen die Daten entlang der Stromlinien integriert werden. Durch die meisten Pixel verlaufen 5 bis 10 Stromlinien, um auch an den Stellen großer Strömungsdivergenz in fast jedem Pixel mindestens eine Stromlinie zu erhalten. Entlang der Stromlinien wird jede 0,4 Pixel ein Punkt berechnet. Die Ergebnisse werden interpoliert und auf jedem ganzzahligen Pixel benötigt. Folglich würden entlang der Stromlinien unnötig viele Punkte ausgerechnet werden, was die Berechnung erheblich verlangsamt.

Die Lösung dazu ist eine rekursive Integration über das gesamte Bild, bei dem unabhängig von konkreten Stromlinien jedes Pixelergebnis nur genau ein mal berechnet und kein Aufwand für redundante Subpixel gebraucht wird. Es wird davon ausgegangen, dass durch jeden Pixel eine Stromröhre verläuft, die an der Ölfilmvorderkante eine auf 1 normierte Breite hat. Von dem zu berechnenden Punkt sucht der Algorithmus die Subpixelposition entlang dieser Stromlinie eine Strecke von 1,5 Pixelkantenlängen stromaufwärts. Dort werden die vorher berechneten Daten ausgelesen, d.h. von den umliegenden ganzzahligen Datenpunkten interpoliert. Diese Stromlinienbreite und Ölfilmstärke wird verwendet, um die Parameter der neuen Position zu bestimmen. Dabei ist vor Allem der dreidimensionale Abstand des neuen zum vorherigen Werte wichtig, da eine Distanz von 1,5 Pixeln je nach Blickwinkel und Strömungsrichtung unterschiedlich sein kann.

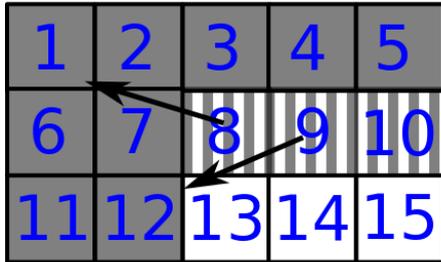
Wurden an den Pixeln stromaufwärts noch keine Ergebnisse berechnet, wird die ganze Funktion für diese Pixel rekursiv gestartet. Nur an der Ölfilmvorderkante ist eine Stromröhrenbreite von 1 und eine Ölfilmstärke von 0 bekannt. Dort können die ersten weiteren Pixel im Ölfilm berechnet werden und darauffolgend alle Pixel stromabwärts, die auf diese Werte zugreifen müssen. Abb. A.3 zeigt beispielhaft wie einige Pixel in der richtigen Reihenfolge berechnet werden.

A.5. Rekursive Integration entlang der Stromlinien



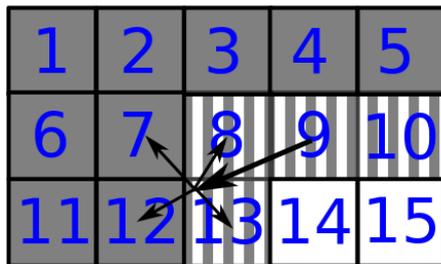
10 <- 3,4,8,9

Ein beliebiges noch nicht berechnetes Element, hier die 10, wird gewählt und abhängig von den Vorgängern berechnet.



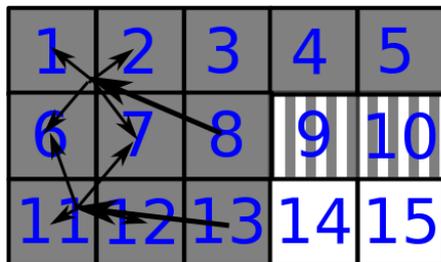
10 P <- 3,4,8,9
9
8

Nicht alle Vorgänger sind bekannt, die Berechnung der 10 wird Pausiert (P) und rekursiv die Berechnung der fehlenden Positionen aufgerufen.



10 P <- 3,4,8,9
9 P <- 7,8,12,13
8
13

Die 9 kann ebenfalls noch nicht berechnet werden und fügt alle benötigten Positionen der Liste hinzu. Die 8 landet kein zweites mal auf der Liste.



10 P <- 3,4,8,9
9 P <- 7,8,12,13
8 <- 1,2,6,7
13 <- 6,7,11,12

Die 13 kann berechnet werden, da alle Vorgängerpositionen bekannt sind. Genauso die 8.



10 P <- 3,4,8,9
9 <- 7,8,12,13

Nachdem alle von der 9 aus aufgerufenen rekursiven Aufrufe beendet wurden, wird der Wert berechnet. Genauso anschließend die 10. Die korrekte Reihenfolge 13,8,9,10 wird für weitere Berechnungen gespeichert.

Abb. A.3.: Beispiel der rekursiven Integration an 15 Pixeln in fünf Schritten. Graue Pixel sind bereits berechnete Werte, weiße Pixel sind noch unbekannt und schraffierte Pixel werden gerade berechnet.

A.6. Subpixelinterpolation

Die Interpolation eines Subpixelwertes auf den 4 angrenzenden Pixeln wird überall verwendet. Sei es die Interpolation der Strömungsrichtung um kleinschrittige Stromlinien zeichnen zu können, Interpolation der Interferenzbilder um entlang der Stromlinien Farbdaten auslesen zu können oder vieles mehr. Diese Funktion wird in allen Auswertungsteilen so häufig aufgerufen, dass jede einzelne Rechenoperation zu mehreren Minuten erhöhter Gesamtlaufzeit führt.

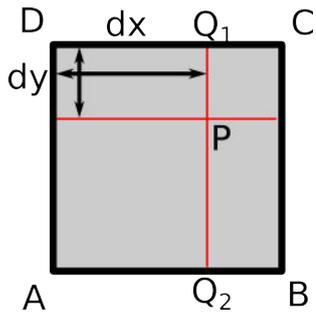


Abb. A.4.: Bilineare Interpolation in einem Quadrat aus ganzzahligen Pixelpositionen zu einer Subpixelposition P

Am Einfachsten wäre es, den Wert jedes benachbarten Pixels mit dem Abstand diesem zum Subpixel zu gewichten, aber das sind zu viele Wurzeloperationen. Stattdessen wird jeweils zwischen 2 Pixeln in einer Dimension interpoliert, was die Werte zweier neuer Subpixel Q_1 und Q_2 als Ergebnis hat. Diese werden in der anderen Dimension interpoliert, um zum Ergebnis zu kommen. Die Kantenlänge des Quadrates ist immer 1 Pixel

$$Q_1 = D \cdot (1 - dx) + C \cdot dx \quad (\text{A.5})$$

$$Q_2 = A \cdot (1 - dx) + B \cdot dx \quad (\text{A.6})$$

$$P = Q_1 \cdot (1 - dy) + Q_2 \cdot dy \quad (\text{A.7})$$

A.7. Interpolation fehlender Daten

In mehreren Fällen wenn Messdaten bei einigen aber nicht bei allen Pixeln vorhanden sind, müssen die fehlenden Pixel interpoliert werden. Beispiele sind alle Auswertungen entlang von Stromlinien, wenn nicht jeder Pixel Teil einer Stromlinie ist und dort nichts berechnet wurde. Aber auch die Strömungsrichtungen müssen interpoliert werden, nachdem viele Datenpunkte aufgrund mangelnder Zuverlässigkeit gelöscht wurden. Diese Interpolation ist angelehnt an die Matlab-interne Funktion *inpaint_nans* [36, 37, 38] wurde aber zu großen Teilen umgeschrieben. Wie im Original wird für jeden fehlenden Pixel in den Daten eine Gleichung aufgestellt, wie sich der Pixel aus der Umgebung berechnet, etwa eine zewidimensionale Interpolation. Die Umgebungswerte sind aber teilweise auch nicht vollständig und es entsteht ein gekoppeltes Gleichungssystem mit so vielen Gleichungen wie Daten im Bild fehlen. Außerhalb des Flügels im Hintergrundrauschen sind aber 95% der Daten 'fehlerhaft' und gelöscht. Wenn im gesamten Bild interpoliert werden soll ist der prozess extrem langsam. Dies ist die eingebaute Änderung in der Funktion, ermöglicht durch die schwarz-weiß Maske von Kap. 3.3 welche Modell und Hintergrund trennt. Es wird nur auf dem Modell interpoliert, Randeffekte werden im Gleichungssystem berücksichtigt und der beliebig geformte Rand ist durch die Maske einlesbar³.

Final werden aus den lokalen Strömungsrichtungen die Stromlinien integriert. Dies geschieht wie gewohnt durch schrittweises Vorgehen entlang der Strömungsrichtung mit einer Schrittweite von 0,4 Pixeln und Glättung der Daten.

³Die Interpolation ist längst nicht optimal, liefert aber akzeptable Ergebnisse

B. Stromlinienbilder des Flugkörpers

Der Flugkörper wurde bei weiteren Anstellwinkeln vermessen: 5, 10, 18, 20 und 25 Grad. In Kapitel 6.2 wird an zwei Beispielen gezeigt, dass die Bilder erfolgreich ausgewertet werden können. Der Vollständigkeit halber sind hier die Stromlinienbilder der anderen untersuchten Anstellwinkel dargestellt. Abb. B.1 zeigt den Flügel bei 15 Grad Anstellwinkel, Abb. B.2 bei 18 Grad und Abb. B.3 bei 20 Grad. Das Experiment bei 5 Grad Anstellwinkel konnte nicht ausgewertet werden.

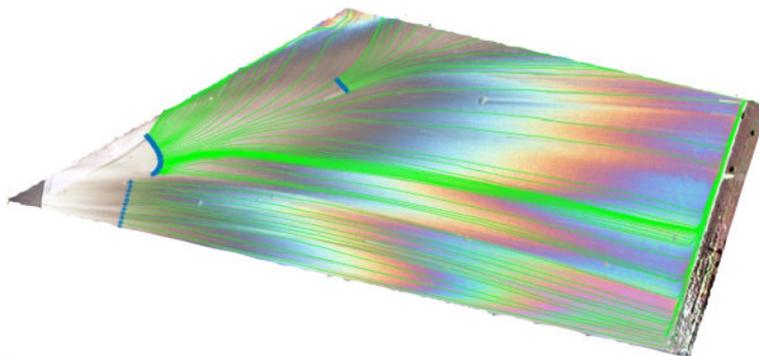


Abb. B.1.: Stromlinienbild des Flugkörperflügels bei einem Anstellwinkel von 15 Grad.

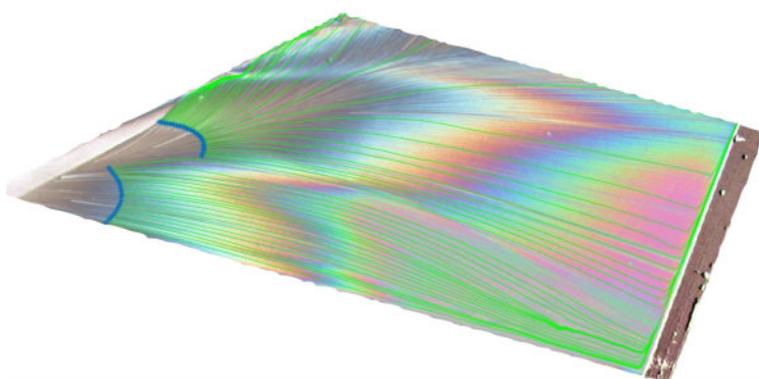


Abb. B.2.: Stromlinienbild des Flugkörperflügels bei einem Anstellwinkel von 18 Grad.

B. Stromlinienbilder des Flugkörpers

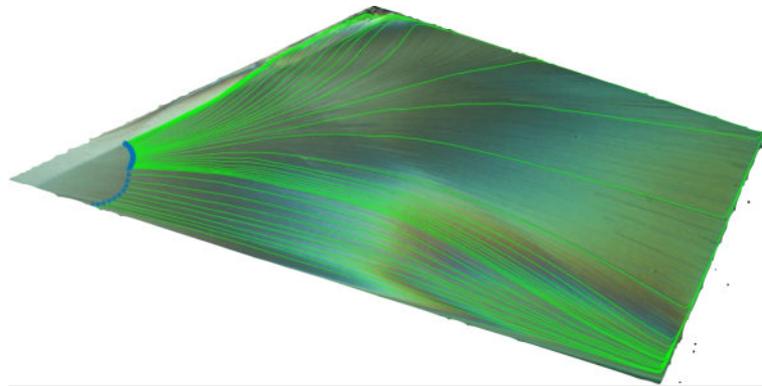


Abb. B.3.: Stromlinienbild des Flugkörperflügels bei einem Anstellwinkel von 20 Grad.

C. Matlab-Tool zur Ölfilmanalyse

Das Matlab-Tool wurde entwickelt, damit auch Benutzer ohne das notwendige Spezialwissen über die Auswertungsverfahren innerhalb kurzer Zeit die Auswertung durchführen können. Der Manuelle Eingabeaufwand wurde minimiert, dennoch sind einige unverzichtbare Schritte wie die Auswahl aller benötigten Daten manuell durchzuführen. Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über die Bedienung des Tools verschaffen. Das Programm ist in mehrere Tabs unterteilt, also Arbeitsbereiche durch die sich der Benutzer nacheinander durchklicken muss. Es kann immer zu früheren Tabs zurückgesprungen werden, um Daten zu ändern. Im Export-Tab können jederzeit die bisherigen Ergebnisse als Bild, Matlab-Matrix oder Tecplot-Datei gespeichert werden. Die meisten zeitaufwändigen Berechnungen werden erst am Ende des letzten Tabs ausgeführt, damit der Benutzer mit nur sehr kurzen Pausen alle Eingaben tätigen kann und anschließend das Programm ohne weitere Bedienung rechnet.

Tab 1

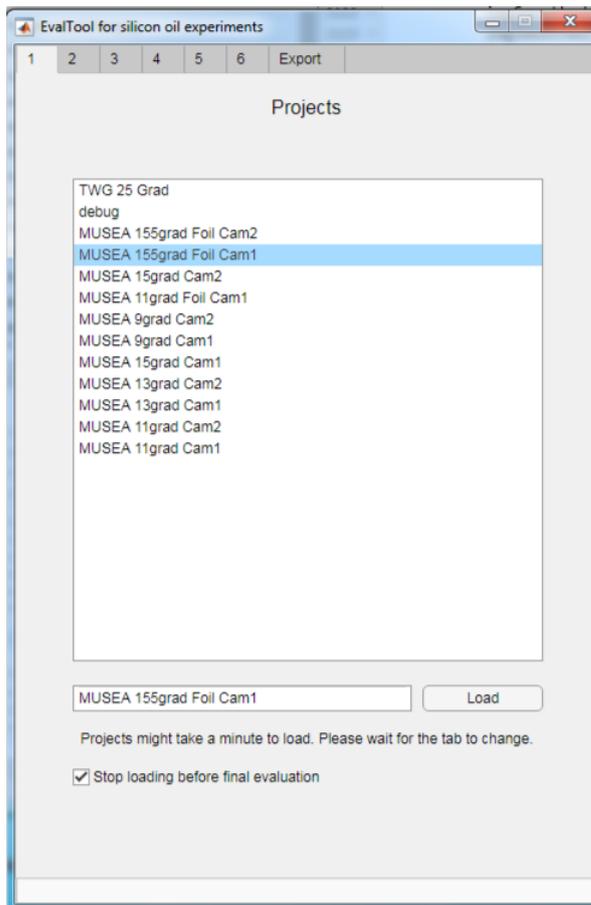


Abb. C.1.: Tab 1 der grafischen Oberfläche zum Erstellen eines neuen Projektes.

Für jede Berechnung kann ein neues Projekt gestartet oder ein bereits vorhandenes geladen werden. Dort werden alle Dateipfade der Bilder und des Modells gespeichert, sowie die gewählten Parameter und Markerpunkte im Bild. Außerdem werden während des Auswertungsschrittes berechnete Ergebnisse wie Geometrieparameter der Modellposition gespeichert. Diese Werte müssen nicht erneut eingegeben oder berechnet werden, wenn das Projekt geladen wird. Die Strömungsrichtungen werden neu berechnet und interpoliert, da solche flächendeckenden Ergebnisse nicht im Projekt gespeichert werden. Nach dem Laden springt das Tool direkt zum letzten gespeicherten Stand der Auswertung, welche von dem Punkt aus weitergeführt werden kann. Es ist jedoch immer möglich, Schritte zurück zu gehen und Teile der Auswertung nachträglich zu ändern.

Tab 2

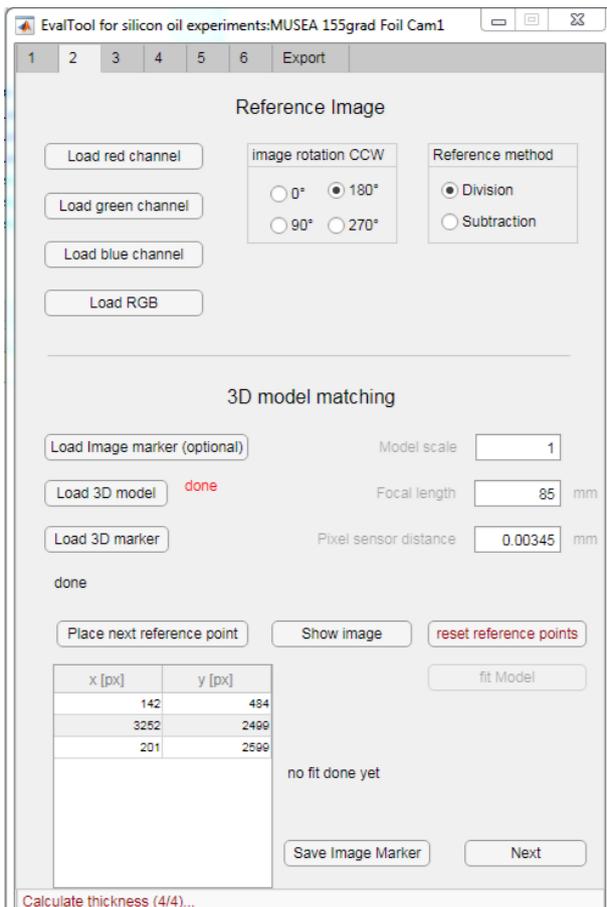


Abb. C.2.: Tab 2 der grafischen Oberfläche zum Laden des Referenzbildes und Erkennen der Modellposition.

Als erstes müssen die drei Farbkanäle des Referenzbildes geladen werden oder optional ein RGB-Bild. Die Rotationsangabe wirkt sich auch auf alle weiteren geladenen Bilder aus und muss so gewählt werden, dass die Strömung von links nach rechts verläuft. Division ist sowohl physikalisch als auch in bisherigen Auswertungen die sinnvollere Referenzierungsmethode, eine Subtraktion der Referenzbilder von den Interferenzbildern wäre dennoch denkbar.

Für die Berechnung der Kamera- und Modellposition muss das Modell und die Position der 3d-Marker jeweils als Datei geladen werden. Dabei sind drei Parameter wichtig:

Model Scale: Der Faktor, um den das Gittermodell größer ist als das fotografierte Windkanalmodell. Dies kann passieren, wenn das digitale Modell in Originalgröße des Flugzeuges oder Flugkörpers vorliegt. Falls es

zusätzlich noch gespiegelt ist, muss der Parameter ein negatives Vorzeichen bekommen.

Focal length: Brennweite des verwendeten Objektivs, notwendig für die Projektion.

Pixel sensor distance: Abstand der Pixel auf dem CCD-Sensor der Kamera. Notwendig für die Berechnung des Abstandes zum Objekt.

Das Tool wird ein dreidimensionales Bild von dem Modell einschließlich Markerpunkte gemäß der Modellmarker-Datei anzeigen. Daneben in einem anderen Fenster das Referenzbild, in dem mit dem Knopf **Place next reference point** diese Punkte im Bild gefunden und angeklickt werden müssen. Optional können die Bildmarker auch

als Datei eingelesen werden, um nicht jeden Punkt im Bild anklicken zu müssen. **Fit Model** führt die geometrische Optimierung durch und zeigt auf dem Referenzbild die Bildmarker und projizierten Modellmarker an sowie das Residuum, also den RMS der Distanz zwischen zusammengehörigen Markern, welcher unter 1 Pixel liegen sollte. Ist dieses Bild oder der RMS unzufriedenstellend, können die Marker gelöscht (**reset reference points**) und neu gesetzt werden. Für die Feinjustierung zeigt die Tabelle links unten alle aktuellen Bildmarker an. Diese Pixelkoordinaten können direkt in der Tabelle durch anklicken verändert oder durch den Knopf **Save Image Marker** als Datei gespeichert werden.

Der **Next**-Knopf führt mit den aktuellen Markern aus der Tabelle eine neue Optimierung durch und berechnet zusätzlich die Zuordnung von Pixeln zu Modelldreiecken, die Maske um Modell und Hintergrund zu trennen, die lokale Oberflächennormale und weitere aus der Modellposition resultierende geometrische Parameter. Dies kann eine Minute dauern und springt anschließend zu Tab 3.

Tab 3

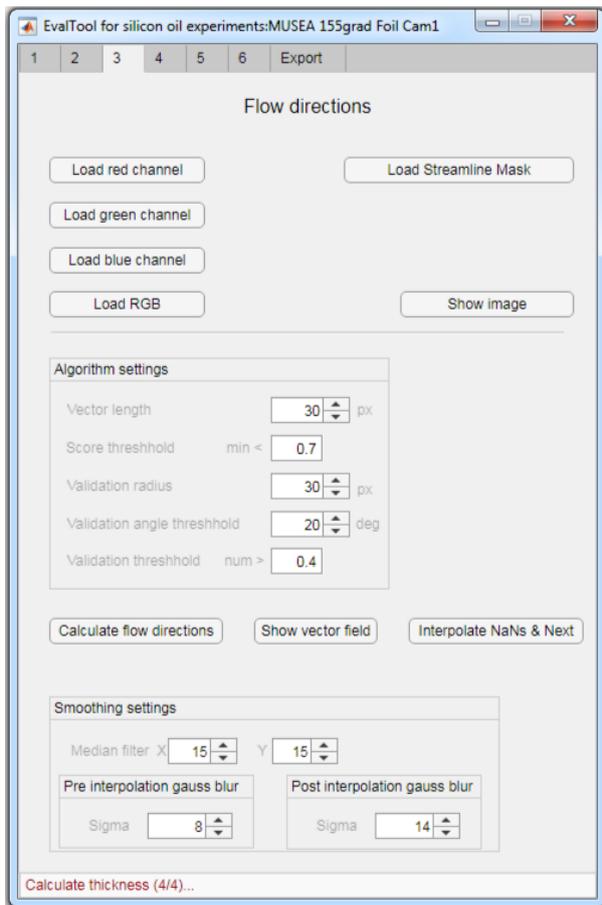


Abb. C.3.: Tab 3 der grafischen Oberfläche zum Einlesen der Stromlinienbilder und Erkennen der Strömungsrichtungen.

nachbarter Pixel. Bei der Interpolation wird dies wie ein gelöschter Datenpunkt behandelt, also aus den gültigen Daten interpoliert.

Für die Stromlinienerkennung gibt es folgende wählbare Parameter:

Vector length: Radius des Suchkreises von Abb. 3.3. Ein größerer Suchbereich liefert zuverlässigere Ergebnisse, scheitert jedoch an Stromlinien mit engen Kurven.

Score threshold: Grenze, ab der die gefundene Richtung akzeptiert wird: Das Minimum in den Plots von 3.3 muss unter dem Mittelwert mal diesem Faktor liegen.

¹Dies ist eine sehr neue Funktionalität und wurde in allen Auswertungen dieser Arbeit noch nicht verwendet

In diesem Tab müssen die Bilder des dünnflüssigen Öls für die Berechnung der Strömungsrichtung geladen werden, wieder optional als drei Graustufenbilder oder ein RGB. Diese werden automatisch gedreht, mit den Referenzbildern verrechnet und vom Hintergrund außerhalb des Modells getrennt. Zusätzlich kann (aber muss nicht) eine Maske zur manuellen Hilfe der Stromlinienerkennung eingelesen werden¹. Die Auswertung reagiert auf zwei Farben. Rot markierte Flächen werden gar nicht ausgewertet, was eventuell bei Bereichen ohne Beleuchtung oder aufgetragenes Öl wünschenswert ist. Störungen der Modelloberfläche können blau markiert werden. Diese Bereiche, zum Beispiel eine Druckbohrung oder ein Schlitz im Modell werden für die Strömungsrichtung ignoriert und zeigen so weder falsche Ergebnisse noch beeinflussen sie die Auswertung be-

C. Matlab-Tool zur Ölfilmanalyse

Die anderen drei Parameter sind für die Datenbereinigung: Von allen Pixeln innerhalb eines Kreises der Größe **Validation radius** muss mindestens ein Anteil von **Validation threshold** den gleichen Strömungswinkel \pm **Validation angle threshold** haben, sonst wird der Wert entfernt. Die Parameter im unteren Bereich sind für die Glättung der Rohdaten oder Ergebnisse zuständig: Der **Median filter** erzeugt das Bild 3.2 durch Subtraktion des gefilterten Bild vom Originalen. **Pre- und Post interpolation gauss blur** sorgt für eine Glättung der Richtungswerte vor- und nach der Interpolation aller Löcher, die durch gelöschte Daten entstehen. Nach der Wahl dieser Parameter berechnet der Knopf **Calculate flow directions** auf der Grafikkarte alle Strömungsrichtungen und führt den ersten Schritt der Datenbereinigung durch. Falls die Ergebnisse zufriedenstellend sind, kann mit **Interpolate NaNs & Next** die Datenbereinigung fortgesetzt und alle herausgefilterten Stellen interpoliert werden um ein kontinuierliches Richtungsfeld zu erhalten.

Tab 4

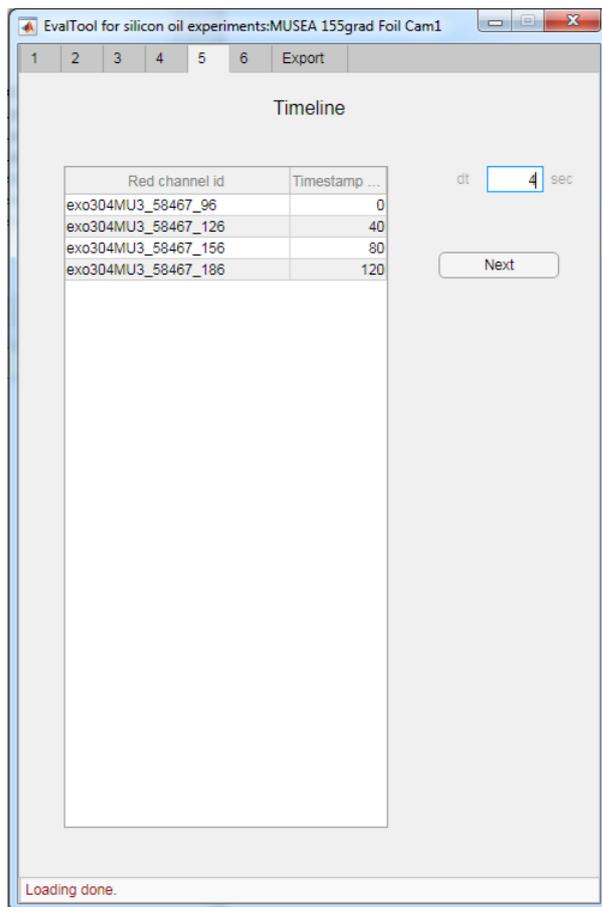


Abb. C.4.: Tab 4 der grafischen Oberfläche zum Laden der Interferenzbilder und Zeichnen der gewünschten Stromlinien.

Hier muss das Bild des roten Farbkanals vom ersten Interferenzbild geladen werden. Anhand der Namen und Speicherdaten werden die anderen Farbkanäle dem Bild zugeordnet und auch alle weiteren Triplets von späteren Bildern geladen. Bedingung dafür ist nur, dass die Bilder im gleichen Ordner gespeichert sind. Das erste RGB-Bild wird angezeigt. In dieses müssen die Startpunkte der auszuwertenden Stromlinien eingezeichnet werden, üblicherweise eine Linie kurz vor der Ölfilmvorderkante. Die Anzahl der Stromlinien muss im rechten Eingabefeld gewählt werden² und mit **New Spline** ein Spline in das Bild gezeichnet werden. Zwei gewählte Punkte erzeugen eine Gerade, mehr Punkte ermöglichen das Zeichnen von Kurven. Mit **Calculate flow lines** werden von den erzeugten Startpunkten aus Stromlinien gezeichnet.

²Richtwerte: 1 Linie pro Pixel für die vollständige Auswertung, auch bei Bereichen starker Divergenz sollten die Linien nicht mehr als 10 Pixel auseinander liegen.

Tab 5



Dieser Tab dient der Überprüfung der Interferenzbilderserie. Alle vollständig erkannten Bilder aus je drei Farbkämen werden hier aufgelistet. Außerdem wird die ermittelte Zeitdifferenz zum ersten Bild als vielfaches des Wertes dt angezeigt. Falls diese Zeit durch zu große Unterschiede von Aufnahme- und Speicherzeitpunkten nicht stimmt, können die Werte manuell in der Tabelle angepasst werden. Bei großen Bilderserien kann es sein, dass nicht von jedem Bild eine Auswertung gewünscht ist. Jedes Bild, dessen Zeitstempel in der Tabelle negativ ist, bleibt in der kompletten weiteren Auswertung unberücksichtigt.

Abb. C.5.: Tab 5 der grafischen Oberfläche zum korrigieren der Zeitabstände zwischen den Interferenzbildern.

Tab 6

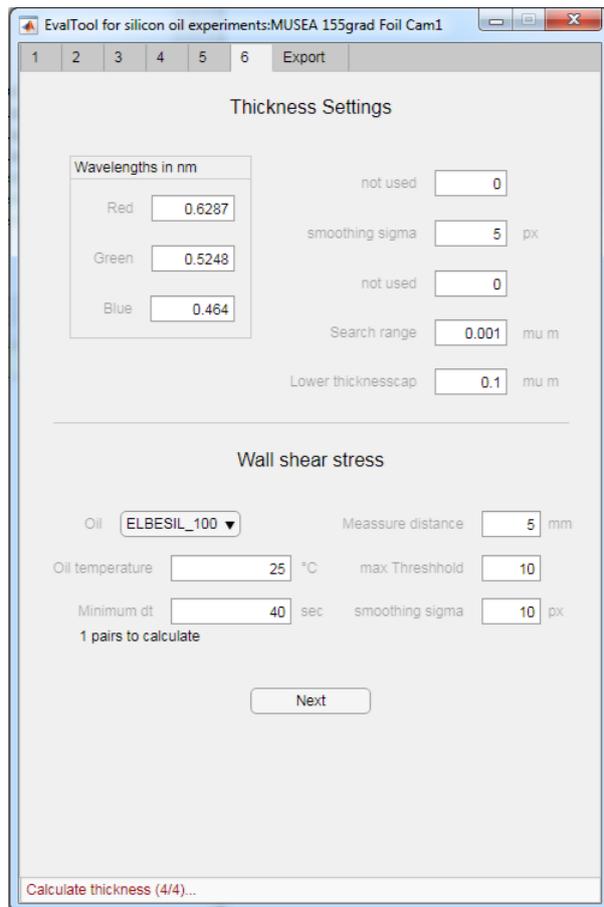


Abb. C.6.: Tab 6 der grafischen Oberfläche zur Auswahl wichtiger Parameter vor der finalen Berechnung.

Unterem Bereich, Wandschubspannung:

Oil: Verwendete nominelle Ölviskosität als Multiple Choice von allen bisher verwendeten Ölen. Hier sind alle Daten des Öls wie Dichte, Brechungsindex und experimentell vermessene Viskosität bei verschiedenen Temperaturen hinterlegt. Neue Öle lassen sich intuitiv außerhalb des Tools in der Datei *oil_config.json* hinzufügen.

Oil temperature: Mittlere Temperatur des Öls während der Messung.

Minimum dt: Falls die Bilderserie mehr als zwei Bilder enthält wird bei jedem Paar die Wandschubspannung berechnet. Bildpaare mit geringem Zeitabstand liefern aber durch zu kleine Ölfilm dickendifferenzen unsichere Ergebnisse. Alle Paare mit einem Zeitabstand unter diesem Wert werden ignoriert.

Measure distance: Für den Divergenzfaktor wird die lokale Strömungsrichtung

In diesem letzten Tab können weitere Parameter der Auswertung angepasst werden, falls die experimentellen Bedingungen sich im Gegensatz zu den aktuellen deutlich verändern.

Oberer Bereich, Ölfilm dicke:

Wavelengths: Die Hauptwellenlängen der Spektren der drei verwendeten Farbkanäle. Diese Werte müssen an den benutzten LEDs vermessen werden.

smoothing sigma: Gauß-Glättung der Ölfilm dicke.

Search range: Suchbereich in μm der Ölfilm dicke um den extrapolierten Wert herum, siehe Abb. 3.9.

Lower thicknesscap: Minimale Ölfilm dicke für die Auswertung. nach Kapitel 3.8 sorgen zu kleine Ölfilm dicken für große Fehler der Ergebnisse.

Unterem Bereich, Wandschubspannung:

Oil: Verwendete nominelle Ölviskosität

C. Matlab-Tool zur Ölfilmanalyse

wie in Abb. 3.10 linear gefittet. Hier kann die Distanz gewählt werden, bis zu welcher Daten der umliegenden Pixel verwendet werden.

smoothing sigma: Gauß-Glättung der finalen Wandschubspannungsverteilung.

Der Knopf **Next** startet die Dickenauswertung und anschließend paarweise die Wandschubspannungsberechnung.

Export

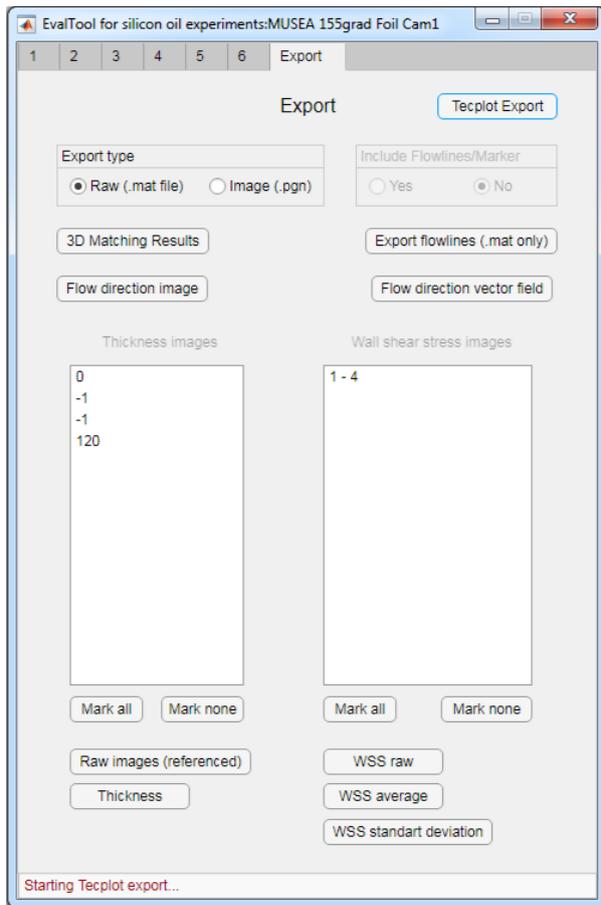


Abb. C.7.: Export-Tab zum Speichern aller Ergebnisse.

In dem Tab können Interferenzbilder, Strömungsrichtung, Ölfilm-dicke oder berechnete Wandschubspannungswerte gespeichert werden. Wird als Speichertyp ein Bildformat gewählt, können die Stromlinien mit eingezeichnet werden. Bei der Wandschubspannung können einzelne berechnete Paare, aber auch der Durchschnitt aller Paare sowie dessen Standardabweichung gespeichert werden.

Der Knopf **Tecplot Export** ist unabhängig von allen anderen Feldern und Knöpfen dieses Tabs und speichert alle bis zu dem Zeitpunkt berechneten Daten auf den dreidimensionalen Gitterkoordinaten. Es ist möglich, nach Tab 3 und vor der Interferenzauswertung schon die Strömungsrichtung zu speichern. Für jeden Knotenpunkt werden folgende Daten in der Datei gespeichert:

- x,y,z Koordinate des Knotens, wie in der Modelldatei die in Tab 2 eingelesen wird
- R,G,B Wert des originalen Stromlinien-Interferenzbildes wie Abb. 3.1
- x,y,z Komponente der lokalen Wandschubspannungsrichtung, tangential zur Modelloberfläche und auf 1 normiert.
- Die Ölfilmstärke von einem der Interferenzbilder
- Die berechnete Wandschubspannung
- Das Graustufenbild der Wandstromlinien wie Abb. 3.2

D. Literaturverzeichnis

- [1] T. J. Garrison and M. Ackman. Development of a global interferometer skin-friction meter. *AIAA Journal*, 36:62–68, 1998.
- [2] G. Zilliac. Further developments of the fringe-imaging skin friction technique. *NASA Technical Memorandum*, 110425:1–35, 1996.
- [3] R. C. Crites and R. L. Levy et al. Aerodynamic applications of pressure sensitive paint. *AIAA Journal*, 31:419–425, 1993.
- [4] J-M Desse. Oil-film interferometry skin-friction measurement under white light. *AIAA Journal*, 41:2468–2477, 2003.
- [5] J. W. Naughton and M. Sheplak. Modern developments in shear-stress measurement. *Progress in Aerospace Sciences*, 38:515–570, 2002.
- [6] L. H. Tanner and L. G. Blows. A study of the motion of oil films on surfaces in air flow, with application to the measurement of skin friction. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 9:194, 1975.
- [7] J. Robinson J. W. Naughton and V. Durgesh. Oil-film interferometry measurement of skin friction analysis summary and description of matlab program. *IEEE*, 20:169–178, 2003.
- [8] J. W. Naughton J. L. Brown. The thin oil film equation. *NASA/TM*, 208767, 1999.
- [9] A. Hijazi et al. High-speed imaging using 3ccd camera and multi-color led flashes. *Measurement Science and Technology*, 28:7150–7156, 2017.
- [10] T. Liu N. M. Husen and J. P. Sullivan. Luminescent oil film flow tagging skin friction meter applied to faith hill. *AIAA Journal*, 56:3875–3886, 2018.
- [11] L. C. Squire. The motion of a thin oil sheet under the steady boundary layer on a body. *Journal of Fluid Mechanics*, pages 161–179, 1961.
- [12] J-M Desse. Recording and processing of interferograms by spectral characterization of the interferometric setup. *Experiments in Fluids*, 23:256–271, 1997.
- [13] B. Aupoix P. Barricau M-C. Merienne G. Pailhas P. Reulet Y. Touvet Y. Le Sant. Surface mapping methods. *Optical Diagnostics of Flows*, 1:1–12, 2009.

D. Literaturverzeichnis

- [14] E. Schülein. Skin-friction and heat flux measurements in shock/boundary-layer interaction flows. *AIAA Journal*, 44:1732, 2006.
- [15] E. Schülein. Optical method for skin-friction measurements on fast-rotating blades. *Exp Fluids*, 55:1672, 2014.
- [16] D. M. Driver. Application of oil-film interferometry skin-friction measurement to large wind tunnels. *Experiments in Fluids*, 34,6:717–725, 2003.
- [17] J. Lunte. Masterarbeit: Optische wand Schubspannungsmessung in dreidimensionalen strömungen mittels weißlichtinterferometrie. *DLR Göttingen*, 2016.
- [18] E. Truckenbrodt H. Schlichting. *Aerodynamik des Flugzeuges*. Springer Verlag, 1967.
- [19] W. Demtröder. *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [20] A. A. Pavlov A. I. Maksimov and A. M. Shevchenko. Development of the optical skin friction measurement technique for supersonic gradient flows. *Proceedings of the International Conference on the Methods of Aerophysical Research*, pages 172–177, 1994.
- [21] J-M Desse. Three-color differential interferometry. *Applied Optics*, 36:115401–115410, 1997.
- [22] A. Khintchine. Korrelationstheorie der stationären stochastischen prozesse. *Mathematische Annalen*, 109:604–615, 1934.
- [23] N. Wiener. Generalized harmonic analysis. *Acta Mathematica*, 55:117–258, 1930.
- [24] P. E. Zamzow und W. Daum O. Ziemann, J. Krauser. Pof-handbuch: Optische kurzstrecken-Übertragungssysteme. *Springer Berlin Heidelberg*, 2007.
- [25] Wikipedia. Floating point operations per second. https://de.wikipedia.org/wiki/Floating_Point_Operations_Per_Second. [Online; accessed 17-December-2018].
- [26] N. Thein et al H. A. Thant. Mobile agents based load balancing method for parallel applications. *IEEE Xplore*, 2006.
- [27] E. Schülein. Effects of laminar-turbulent transition on the shock-wave/boundary-layer interaction. *AIAA Fluid Dynamics Conference*, 44:1–23, 2014.
- [28] Matlab Wiki. Piecewise cubic hermite interpolating polynomial (pchip). <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/pchip.html>. [Online; accessed 5-October-2018].

- [29] J. Große-Knetter und Peter Schaaf. *Das Physikalische Praktikum*. Universitätsdrucke Göttingen, 2013.
- [30] B. E. Bayer. Color imaging array. *US Patent 3971065A, expired*, 1975.
- [31] The Engineering ToolBox. Absolute, dynamic and kinematic viscosity. https://www.engineeringtoolbox.com/dynamic-absolute-kinematic-viscosity-d_412.html. [Online; accessed 25-September-2018].
- [32] L. Böwing GmbH. *Technische Informationen zu Elbesil-Öle B*.
- [33] L. Goehring O. Borgman P. Fantinel W. Lühder and R. Holtzman. Impact of spatially correlated pore-scale heterogeneity on drying porous media. *Water research*, 53,7:5645–5658, 2017.
- [34] Baryzentrische koordinaten. https://de.wikipedia.org/wiki/Baryzentrische_Koordinaten. [Online; accessed 5-June-2018].
- [35] NVIDIA. Cuda. <https://developer.nvidia.com/cuda-zone>.
- [36] MathWorks. inpaint-nans. https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4551-inpaint_nans, 2004. [Online; accessed 18-March-2018].
- [37] MathWorks. nanconv. <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/41961-nanconv>, 2011. [Online; accessed 18-March-2018].
- [38] MathWorks. interparc. <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34874-interparc>, 2011. [Online; accessed 5-June-2018].

Acknowledgements

Mein Dank geht an alle, die mir dabei geholfen haben, diese Arbeit zu verwirklichen:

Ich danke Erich Schülein und Jens Lunte, für die Einführung in die Grundlagen, spontane Hilfe bei jeder aufkommenden Frage und experimentelle Unterstützung in den Windkanälen.

Des weiteren Hartmut Haselmeyer und die Werkstatt für die technische Unterstützung bei allen Experimenten, insbesondere bei den Beleuchtungssystemen.

Des Weiteren Johann Bernhardt für zusätzliche Programmierideen und allen, die Teile der Arbeit gelesen haben um Rückmeldungen zu geben.

Ich danke auch den Professoren Martin Rein und Andreas Dillmann für die Übernahme der Gutachten dieser Arbeit.

Erklärung nach §18(8) der Prüfungsordnung für den Bachelor-Studiengang Physik und den Master-Studiengang Physik an der Universität Göttingen:

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Abschlussarbeit selbständig verfasst habe, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe.

Darüberhinaus erkläre ich, dass diese Abschlussarbeit nicht, auch nicht auszugsweise, im Rahmen einer nichtbestanden Prüfung an dieser oder einer anderen Hochschule eingereicht wurde.

Göttingen, 1. Februar 2019

(Wieland Lühder)