

---

# Sensorentwicklung für Turbulenzmessungen

Michael Hölling

---



Oldenburg 2008



---

# Sensorentwicklung für Turbulenzmessungen

**Michael Hölling**

---

Von der Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften  
der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
zur Erlangung des Grades und Titels eines

DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN  
DR. RER. NAT.

angenommene Dissertation

von Herrn Michael Hölling  
geboren am 15.07.1976 in Bremen

Gutachter: Prof. Dr. Joachim Peinke  
Zweitgutachter: Prof. Dr. Volker Mellert  
Tag der Disputation: 25.09.2008

---

# Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Charakterisierung und der Weiterentwicklung des Laser-Cantilever-Anemometers (LCA). Durchgeführte Messungen in einer mit Schneepartikeln geladenen Luftströmung zeigen, dass die Cantilever des LCAs Einschlüge solcher Schneepartikel bis zu einem gewissen Maße aushalten. Außerdem werden die mit dem LCA gemessenen Zeitreihen weniger durch Einschlüge verfälscht als bei Hitzfilm Anemometern, die sonst in solchen Strömungen eingesetzt werden. Durch den Einbau eines zweidimensionalen PSD Elements wurde ein LCA aufgebaut, welches die zeitgleiche Detektierung von Verbiegung und Torsion des Cantilevers ermöglicht. Auf Basis dieser Daten wurde eine Kalibrierungsmethode entwickelt, welche die simultane Messung von Strömungsgeschwindigkeit und Anströmwinkel ermöglicht und damit ebenfalls der longitudinalen und transversalen Geschwindigkeitskomponente der Strömung. Vergleichende Messungen des LCAs mit einem kommerziellen X-Draht Anemometer in dem Nachlauf eines Zylinders zeigen gute Übereinstimmung sowohl bei den absoluten Werten als auch in den Statistiken der gemessenen Zeitreihen.

## Abstract

This thesis deals with the characterization and further development of the Laser-Cantilever-Anemometer (LCA). Measurements carried out in an air flow laden with snow particles show that the LCA cantilevers withstand impacts of such snow particles up to a certain level. In addition, the measured time series using the LCA were less influenced by these impacts than time series measured with hot-film anemometers which are usually used for this kind of flow. The installation of a two dimensional PSD element led to a LCA which is capable of measuring the deflection and the torsion of the cantilever. Based on these data a calibration method was developed that enables simultaneous measurements of the flow velocity and angle of attack and therefore the longitudinal and transversal component of the flow. Comparison measurements of the LCA with a commercial X-wire anemometer in the wake of a cylinder show good agreement in the measured values as well as in the statistics of the time series.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>13</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung . . . . .	13
1.2	Aufbau dieser Arbeit . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Einführung in die Turbulenz</b>	<b>17</b>
2.1	Die Navier-Stokes-Gleichung . . . . .	17
2.2	Modellvorstellung der Turbulenz . . . . .	18
2.3	Statistische Beschreibung der Turbulenz . . . . .	18
2.3.1	Leistungsspektrum . . . . .	19
2.3.2	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion . . . . .	19
2.3.3	Strukturfunktionen . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Laser-Cantilever-Anemometer (LCA)</b>	<b>23</b>
3.1	Messprinzip - Biegebalken . . . . .	23
3.2	LCA - Aufbau . . . . .	25
<b>4</b>	<b>LCA - Kalibrierung</b>	<b>29</b>
4.1	Gemessene Kalibrierungsdaten . . . . .	29
4.2	Simulation des PSD Messsignals . . . . .	31
4.2.1	Reflexion an einer Fläche . . . . .	31
4.2.2	Reflexion an einer Fläche mit Intensitätsprofil . . . . .	33
4.2.3	Reflexion an einer Fläche mit Intensitätsprofil und Einstrahlwinkeländerung . . . . .	36
4.3	Diskussion und Ausblick . . . . .	39
<b>5</b>	<b>LCA - Messungen</b>	<b>41</b>
5.1	Zwei Phasen Strömung Luft - Schneepartikel . . . . .	41
5.1.1	LCA - Messungen im Schneewindkanal I . . . . .	42
5.1.2	LCA - Messungen im Schneewindkanal II . . . . .	48
5.2	Diskussion und Ausblick . . . . .	52

<b>6</b>	<b>Richtungsabhängigkeit des LCAs</b>	<b>53</b>
6.1	Messung der Richtungsabhängigkeit . . . . .	53
6.2	Messung der Richtungsabhängigkeit des LCAs mit eindimensionalem PSD . . . . .	55
6.3	Messung der Richtungsabhängigkeit des LCAs mit zweidimensionalem PSD . . . . .	61
<b>7</b>	<b>2D LCA - Kalibrierung</b>	<b>65</b>
7.1	2D LCA Kalibrierungsdaten . . . . .	65
7.2	Kalibrierung gemessener 2D LCA Zeitreihen . . . . .	66
7.3	Universalität der 2D Kalibrierung . . . . .	69
7.4	Diskussion und Ausblick . . . . .	72
<b>8</b>	<b>2D LCA - Messungen</b>	<b>75</b>
8.1	Messungen im Zylindernachlauf . . . . .	75
8.1.1	Zylindernachlauf - Anströmwinkel . . . . .	77
8.1.2	Zylindernachlauf - Geschwindigkeitsbetrag . . . . .	81
8.1.3	Zylindernachlauf - longitudinale Geschwindigkeitskomponente . . . . .	82
8.1.4	Zylindernachlauf - transversale Geschwindigkeitskomponente . . . . .	83
8.2	Weitere Statistische Analyse der Messdaten . . . . .	84
8.3	Diskussion und Ausblick . . . . .	87
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>89</b>
<b>A</b>	<b>Programm "Simulation PSD Signal"</b>	<b>91</b>
<b>B</b>	<b>LCA Modifikationen</b>	<b>99</b>
B.1	LCA - Motoransteuerung . . . . .	99
B.2	LCA - Laser-Driver . . . . .	100
B.3	LCA - Spannungsversorgung für Operationsverstärker . . . . .	101
B.4	LCA - 2D PSD Transimpedanzschaltung . . . . .	102
B.5	LCA - Verrechnungsbox . . . . .	103
<b>C</b>	<b>Programm zur 2D LCA Kalibrierung</b>	<b>105</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>112</b>

# Abbildungsverzeichnis

3.1	Lichtweg bei Biegung des Cantilevers . . . . .	25
3.2	Aufbau des Laser-Cantilever-Anemometers . . . . .	26
3.3	Cantileverchip mit Steg- und Fensterdesign . . . . .	27
4.1	LCA Kalibrierung mit Fit nach Theorie und bisher verwandter Gleichung . . . . .	30
4.2	Reflex mit Integral der Intensitätsverteilung für Simulation 1 . . .	32
4.3	Simulierte Kalibrierkurve für paralleles Licht mit homogener Intensitätsverteilung . . . . .	33
4.4	Intensitätsverteilung im Laserspot . . . . .	34
4.5	Reflex mit Integral der Intensitätsverteilung für Simulation 2 . . .	35
4.6	Simulierte Kalibrierkurve für paralleles Licht mit inhomogener Intensitätsverteilung . . . . .	36
4.7	Reflex mit Integral der Intensitätsverteilung für Simulation 3 . . .	37
4.8	Simulierte Kalibrierkurve für fokussiertes Licht mit inhomogener Intensitätsverteilung . . . . .	38
5.1	Schneewindkanal in Davos . . . . .	42
5.2	Sensoren im Schneewindkanal mit schematischem Messaufbau . .	43
5.3	Ausschnitt einer gemessenen Zeitserie von Hitzfilm und LCA im Schneewindkanal (2005) . . . . .	44
5.4	Leistungsspektren von Hitzfilm und LCA im Schneewindkanal (2005)	45
5.5	Vorstellung von Einschlägen von Schneepartikeln auf Hitzfilm-Anemometer und LCA . . . . .	46
5.6	Gemessene Einschläge von Schneepartikeln auf Hitzfilm-Anemometer und LCA . . . . .	47
5.7	Vergleich gemessener Einschläge von Schneepartikeln auf Hitzfilm-Anemometer und LCA . . . . .	48
5.8	Schematischer Aufbau des 2D-PSD Elements . . . . .	49
5.9	Schematischer Messaufbau des autarken LCA Messsystems im Schneewindkanal . . . . .	50
5.10	Ausschnitt einer gemessenen Zeitserie mit LCA und autarkem LCA Messsystem . . . . .	51

5.11	Vergleich gemessener Leistungsspektren mit Hitzfilm, LCA und autarkem LCA Messsystem. . . . .	52
6.1	Aufbau für Richtungsabhängigkeitsmessungen mit dem LCA . . .	54
6.2	Definition der Ausrichtung des Cantilevers zur Drehrichtung . . .	55
6.3	Polarplot gemessener Geschwindigkeiten für Cantileverchips mit Fenster- und Stegdesign für $\alpha = -40^\circ$ bis $\alpha = 40^\circ$ und $\beta = 90^\circ$ bzw. $\beta = 0^\circ$ . . . . .	56
6.4	Offener Aufbau zur Untersuchung der Richtungsabhängigkeit . . .	57
6.5	Polarplot der gemessenen Geschwindigkeit für Cantilever mit Fensterdesign und offenem Aufbau . . . . .	58
6.6	Einfluss schräger Anströmung auf Cantilever und Cantileverchip .	60
6.7	Zuordnung der Signale des 2D PSDs zu Cantileverbewegungen . .	61
6.8	Kalibrierung mit 2D PSD und $\alpha = 0^\circ$ Anströmwinkel . . . . .	62
6.9	Verlauf der vertikalen Signalkomponente und Polardiagramm der normierten Geschwindigkeit bestimmt aus der horizontalen Signalkomponente für Cantilever ohne verklebtem Fenster . . . . .	63
6.10	Biegung des Cantilevers bei gerader und schräger Anströmung . .	64
7.1	Verlauf von vertikaler Signalkomponente des PSD Messsignals über Horizontaler für variierende Anströmwinkel $\alpha$ und Strömungsgeschwindigkeiten $v$ . . . . .	66
7.2	Horizontale Signalkomponente über $v$ für festes $\alpha$ und über $\alpha$ für festes $v$ . . . . .	67
7.3	Schematische Darstellung der Kalibriermethode für das 2D LCA .	68
7.4	Verhältnis horizontaler und vertikaler Signalkomponenten unterschiedlicher Kalibrierungen für $\alpha = 0^\circ$ . . . . .	70
7.5	Vergleich zweier 2D Kalibrierungen nach Anpassung mittels Offset-Verschiebung und mittels Umrechnung . . . . .	72
8.1	Ausrichtung der Sensoren bei Messungen im Zylindernachlauf . .	76
8.2	Vergleich der vertikalen und horizontalen Signalomponente des 2D PSDs vor und nach Drehung um $90^\circ$ . . . . .	77
8.3	Vergleich der PDFs gemessener Anströmwinkelzeitreihen . . . . .	78
8.4	Vergleich der Leistungsspektren gemessener Anströmwinkelzeitreihen . . . . .	79
8.5	Vergleich des Leistungsspektrums der Anströmwinkelzeitreihen gemessen mit 2D LCA mit falscher Kalibrierung und X-Draht Anemometer . . . . .	80
8.6	Vergleich von Inkrement PDFs der Anströmwinkel gemessen mit 2D LCA und X-Draht . . . . .	81
8.7	Vergleich von Leistungsspektren und Inkrement PDFs des Geschwindigkeitsbetrags aller verwandten Sensoren . . . . .	82

---

8.8	Vergleich von Leistungsspektren und Inkrement PDFs der longitudinalen Geschwindigkeitskomponente gemessen mit 2D LCA und X-Draht . . . . .	83
8.9	Vergleich von Leistungsspektren und Inkrement PDFs der transversalen Geschwindigkeitskomponente gemessen mit 2D LCA und X-Draht . . . . .	84
8.10	Verlauf des Formparameters $\lambda^2$ mit steigendem $\tau$ für alle gemessenen Größen . . . . .	85
8.11	Verlauf der ersten 4 Strukturfunktionen mit steigendem $\tau$ für alle gemessenen Größen . . . . .	86
A.1	Definition der Parameter des Programms "Simulation PSD Signal"	93
A.2	Strahlengang des reflektierten Laserlichts - Positionierung des PSD Elements für Simulation . . . . .	95
B.1	Ansteuerung der Gleichstrommotoren . . . . .	99
B.2	Schaltbild Laser-Driver . . . . .	100
B.3	Schaltbild der batteriebetriebenen Spannungsversorgung für die interne Vorverstärkerschaltung . . . . .	101
B.4	Schaltbild der Transimpedanzschaltung für das 2D PSD Element .	102
B.5	Schaltbild des verwandten Divisors zweier analoger Spannungssignale	103



# Kapitel 1

## Einleitung

*In diesem Kapitel werden verschiedene bestehende Messmethoden für Geschwindigkeitsmessungen für unterschiedlichste Einsatzgebiete vorgestellt. Die Tatsache, dass es für die meisten Einsatzgebiete mehrere Alternativen für eine Messung gibt außer für räumlich und zeitlich hochaufgelöste Geschwindigkeitsmessungen, motiviert die Entwicklungsarbeit für einen neuen Geschwindigkeitssensor und definiert auch gleichzeitig das Ziel dieser Arbeit. Abschließend wird der Aufbau dieser Arbeit dargestellt.*

### 1.1 Motivation und Zielsetzung

Das Phänomen der Turbulenz tritt in vielen Bereichen des täglichen Lebens auf. Sei es auf großen Skalen bei der Wetterbildung, auf kleineren Skalen bei der Vermischung zweier Flüssigkeiten unterschiedlicher Temperatur und Dichte, wie z.B. beim Gießen von Milch in einen Kaffee oder auch bei von Menschenhand gesteuerten Transaktionen, wie z.B. am Aktienmarkt [33][28]. Die Komplexität der Turbulenz zeigt sich sobald man versucht diese Vorgänge mathematisch zu erfassen und analytisch zu beschreiben. Für den Bereich der Fluidodynamik existiert durch die Navier-Stokes-Gleichung eine mathematische Beschreibung, welche aber bis heute für allgemeine Fälle nicht analytisch gelöst werden konnte. Bei Simulationen von Strömungssituationen muss die Gleichung daher numerisch gelöst werden, wobei der Rechenaufwand mit steigender Komplexität der Strömung und der damit nötigen Genauigkeit schnell in Bereiche vorstößt, die von heutigen Rechnern nicht bewältigt werden können [18]. Wird nicht die Navier-Stokes-Gleichung direkt numerisch gelöst (DNS), kann z.B. mit Hilfe von Large Eddy Simulations (LES) oder Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) die Rechenzeit drastisch gesenkt werden [19]. In diesen Fällen sinkt die Genauigkeit der Lösung, wodurch die Ergebnisse kritisch beurteilt werden müssen.

Eine Folge dieser numerischen Probleme ist, dass man auch noch heute auf Messtechniken angewiesen ist, die Einblicke in die turbulenten Strömungen ermögli-

chen. Hier existieren die unterschiedlichsten Methoden, welche für verschiedenste Fragestellungen geeignete Daten liefern. Im Bereich der Wetter- und Windenergieforschung reichen meistens Anemometer, welche relativ langsam (einige Hertz) Daten aufnehmen und keine hohe räumliche Auflösung besitzen wie z.B. Schalenkreuzanemometer, Ultraschallanemometer oder auch ein LIDAR System [17][20]. Für Anwendungen, bei denen man an kompletten Geschwindigkeitsfeldern interessiert ist, ist man auf bildgebende Verfahren wie Particle Image Velocimetry (PIV) oder Particle Tracking Velocimetry (PTV) für zweidimensionale Geschwindigkeitsfelder angewiesen. Hierbei liegt die zeitliche Auflösung heutzutage bei bis zu  $10kHz$ , allerdings sinkt mit steigender Frequenz die zu untersuchende Querschnittsfläche [29]. Für dreidimensionale Geschwindigkeitsfelder existiert z.B. das Holographic Particle Image Velocimetry (HPIV), welches aber nur eine Momentaufnahme der Strömungsgeschwindigkeiten und deren Richtung liefert [31].

Für Messungen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung ist das Laser Doppler Anemometer (LDA) ein möglicher Sensor [15][35]. Hierbei werden Streupartikel in die Strömung gebracht, an denen das Laserlicht gestreut wird. Die zeitliche Auflösung (maximal ca.  $10kHz$ ) hängt hierbei von der Konzentration der Streupartikel ab und ist nicht konstant, was ein Nachteil für spätere Analysen ist. Das bis heute am häufigsten eingesetzte Anemometer für Messungen mit hoher räumlicher und konstanter hoher zeitlicher Auflösung ist das Hitzdraht-Anemometer [10]. Hierbei wird die Geschwindigkeit über die Kühlrate eines dünnen beheizten Drahtes (typischerweise  $D = 5\mu m$ ) und die daraus resultierende Widerstandsänderung des Drahtes bestimmt. Durch spezielles Anordnen mehrerer solcher Hitzdrähte können zwei Geschwindigkeitskomponenten (X-Draht) oder sogar alle drei Geschwindigkeitskomponenten (Dreidrahtsonde) einer Strömung gemessen werden. Diese dünnen Drähte sind allerdings sehr empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen, so dass Hitzdraht-Anemometer nicht in verschmutzten Strömungen eingesetzt werden können. Für Messungen in Wasser müssen die offenen Drähte z.B. mit Quarzglas beschichtet werden, wodurch die thermische Masse steigt und die Empfindlichkeit sinkt. Dennoch gibt es bis heute keine kommerziell erhältliche Alternative, mit der Messungen mit vergleichbarer räumlicher und zeitlicher Auflösung durchgeführt werden können.

Es wurde bereits in Vorarbeiten gezeigt, dass der an der Universität Oldenburg entwickelte Prototyp des Laser-Cantilever-Anemometers (LCA) das Potential hat Messungen mit vergleichbarer Auflösung zu der des Hitzdraht-Anemometers durchzuführen [3]. Ziel dieser Arbeit ist es das LCA weiter zu charakterisieren und in verschiedenen Strömungssituationen zu testen. Eine detaillierte Untersuchung der grundlegenden Vorgänge bei dieser Messmethode und deren Interpretation sollen das volle Potential dieser Messmethode aufzeigen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in Perspektiven für eine Weiterentwicklung des LCAs weg von einem reinen Prototypen resultieren.

## 1.2 Aufbau dieser Arbeit

In Kapitel 2 wird eine kurze Einführung in die Turbulenz und ihre Beschreibung gegeben. Methoden, mit denen im weiteren Verlauf dieser Arbeit die gemessenen Daten analysiert werden, werden dargestellt und auf ihre Aussagekraft hin bewertet.

Kapitel 3 beschreibt das in dieser Arbeit verwandte Messprinzip und den Aufbau des Laser-Cantilever-Anemometers (LCA) mit allen Komponenten.

In der Praxis auftretende Abweichungen der Kalibrierung des LCAs von der Theorie werden in Kapitel 4 dargestellt und auf ihren Ursprung hin untersucht. Dafür wird eine vereinfachte Simulation der Reflexion des Laserlichts an dem sich biegenden Cantilever durchgeführt, deren Ergebnisse auf die Kalibrierung der Messdaten in dieser Arbeit angewandt werden.

Erste Messungen, welche nicht unter idealen Laborbedingungen durchgeführt wurden, sind in Kapitel 5 dargestellt. Die dort beschriebenen Messkampagnen wurden in einem Schneewindkanal durchgeführt, bei denen Einschläge von Schneepartikeln auf dem Cantilever und deren Wirkung im Vordergrund standen. Standortbedingte Störeinflüsse auf die Messungen führten zusätzlich zu den in diesem Kapitel beschriebenen Modifikationen des LCA Messsystems hin zu einem kompakten und autarken System.

In Kapitel 6 wird das Problem der Richtungsabhängigkeit des LCAs, welches schon in einer Vorarbeit beschrieben wurde, noch einmal eingehender untersucht. Maßgeblich für weitere Erkenntnisse ist die Verwendung eines zweidimensionalen PSD Elements (**P**osition **S**ensitive **D**etector), welches eine auftretende Torsion des Cantilevers unter Schräganströmung messtechnisch belegt. Zusätzlich ermöglicht die Torsion des Cantilevers und deren Detektion die Bestimmung des Anströmwinkels und damit Messungen in zwei Dimensionen. Die Kalibrierung der Daten für die zweidimensionalen Messungen ist in Kapitel 7 dargestellt. Kapitel 8 beschreibt zweidimensionale Messungen in einem Zylindernachlauf, welche mit einem LCA und einem X-Draht Anemometer durchgeführt wurden. Ein Vergleich der Messdaten zeigt, dass das neue LCA vergleichbare Ergebnisse zu denen des X-Draht Anemometers liefert.

Abschließend wird in Kapitel 9 eine Zusammenfassung dieser Arbeit dargestellt.



# Kapitel 2

## Einführung in die Turbulenz

*In diesem Kapitel werden grundlegende Begriffe der Turbulenz eingeführt. Des Weiteren werden Methoden zur Analyse von Messdaten vorgestellt, mit denen in dieser Arbeit die gewonnenen Daten ausgewertet, verglichen und beurteilt werden.*

### 2.1 Die Navier-Stokes-Gleichung

Die grundlegende Bewegungsgleichung einer Strömung, sowohl im laminaren als auch im turbulenten Fall, ist die Navier-Stokes-Gleichung. Für inkompressible Fluida ist sie gegeben durch

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{v} + \vec{f}, \quad (2.1)$$

mit der Strömungsgeschwindigkeit  $\vec{v}$ , der spezifischen Dichte  $\rho$ , dem Druck  $p$ , der kinematischen Viskosität  $\nu$  und der Zusammenfassung aller übrigen äußeren Kräfte  $\vec{f}$ . Hierbei wird der Term  $(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}$  der linken Seite *Advektionsterm* genannt und gibt die Geschwindigkeitsänderung an, welche durch die räumliche Verlagerung des Fluidteilchens verursacht wird. Der Term  $\nu \Delta \vec{v}$  der rechten Seite wird als *Dissipationsterm* bezeichnet und stellt die innere Reibung des Fluids verursacht durch dessen Zähigkeit dar. Die Zähigkeit wirkt daher gegen die räumliche Verlagerung der Fluidteilchen, die einer Beweglichkeit gleichgesetzt werden kann. Je zäher eine Flüssigkeit, desto ruhiger oder laminarer ist sie, wohingegen eine höhere Geschwindigkeit in einer größeren Beweglichkeit oder größeren Turbulenz resultiert. Setzt man den Advektionsterm und den Dissipationsterm ins Verhältnis ergibt sich mit Hilfe einer Dimensionsbetrachtung von

$$\frac{(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}}{\nu \Delta \vec{v}},$$

mit der Länge  $L$ , der Zeit  $T$  und der Geschwindigkeit  $U = L/T$

$$\frac{(L/T \cdot 1/L) \cdot L/T}{\nu \cdot 1/L^2 \cdot L/T} = \frac{L \cdot U}{\nu} = Re. \quad (2.2)$$

Die dimensionslose Zahl  $Re$  wird Reynoldszahl genannt und ist ein Maß für die Turbulenz einer Strömung. Strömungen mit gleichen Randbedingungen und gleichen  $Re$  genügen derselben Differentialgleichung und verhalten sich daher ähnlich, so dass auch Messergebnisse vergleichbar werden. Da bis heute keine analytische Lösung der Gleichung (2.1) in Verbindung mit der Kontinuitätsgleichung  $\nabla \cdot \vec{v} = 0$  gefunden wurde, ist man immer noch auf Messdaten hochauflösender Sensoren angewiesen um Theorien und Modelle zu erstellen und zu belegen.

## 2.2 Modellvorstellung der Turbulenz

Eine weit verbreitete Modellvorstellung der Turbulenz ist die von L.F. Richardson [30]. Sie besagt, dass sich ein turbulentes Feld aus einer Kaskade zerfallender Wirbel zusammensetzt. Dabei wird auf einer großen Längenskala  $L_0$  Energie in das System gebracht und Wirbelstrukturen dieser Größe werden erzeugt. Diese Längenskala  $L_0$  wird integrale Länge genannt. Die erzeugten Wirbel sind jedoch nicht stabil, sondern zerfallen in kleinere Wirbel, welche auch wieder in kleinere Wirbel zerfallen. Bei diesem Prozess wird die gesamte Energie der größeren Wirbel vollständig auf die kleineren übertragen bis eine Wirbelgröße erreicht ist, ab der durch die Viskosität des Fluids Energie durch Reibung in Wärme umgewandelt wird. Beim weiteren Zerfall nimmt nun diese Energiedissipation durch Reibung immer mehr zu. Die Längenskala auf der sich der Energieübertrag auf kleinere Wirbel und der Verlust in Reibungswärme gerade die Waage halten, wird als Taylor-Länge  $r_\lambda$  bezeichnet. Die Kolmogorov-Länge  $\eta$  ist erreicht, wenn keine Energie mehr an kleinere Wirbel übertragen wird und die gesamte Energie in Wärme umgewandelt wird. In der gesamten Kaskade wird die Energie der größeren Wirbel nicht notwendigerweise zu gleichen Teilen an die kleineren Wirbel abgegeben; die Verteilung der Energie ist zufällig.

## 2.3 Statistische Beschreibung der Turbulenz

Diese Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit der Charakterisierung und Weiterentwicklung des Laser-Cantilever-Anemometers. Methoden zur Analyse von Messdaten sind daher nur Hilfsmittel zur Beurteilung dieser Daten. Deshalb wird bei der Beschreibung der Methoden weitestgehend auf Herleitungen verzichtet. Für detaillierte Beschreibungen wird auf die Quellen verwiesen.

### 2.3.1 Leistungsspektrum

Bei Messungen in turbulenten Geschwindigkeitsfeldern liefern der Mittelwert  $\langle v(t) \rangle$  und die Standardabweichung  $\sigma = \langle (v(t) - \langle v(t) \rangle)^2 \rangle^{1/2}$  einen ersten Vergleichswert für zwei Messreihen. Ein nächster Schritt ist die Betrachtung, aus welchen periodischen Signalen welcher Amplitude das turbulente Zeitsignal zusammengesetzt ist. Mit Hilfe der Fourier-Transformation [9]

$$\hat{v}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad (2.3)$$

wird die Spektralfunktion  $\hat{v}(f)$  der gemessenen Geschwindigkeitszeitreihe  $v(t)$  berechnet. Das Quadrat des Betrages dieser Spektralfunktion

$$P(f) = |\hat{v}(f)|^2 \quad (2.4)$$

liefert das Leistungsspektrum, welches Auskunft über die Energieverteilung in dem Signal gibt.

Mit Hilfe der Taylor-Hypothese, die davon ausgeht, dass sich turbulente Strukturen gegenüber ihrer Hauptströmung  $\langle v(t) \rangle$  nur langsam verändern, können Zeitdifferenzen in räumliche umgerechnet werden. Damit können den Frequenzen des Leistungsspektrums räumliche Wirbel der Größe  $r$  zugeordnet werden [26]

$$r = \langle v(t) \rangle \cdot \frac{1}{f}. \quad (2.5)$$

A.N. Kolmogorov leitete Hypothesen für den Energietransport innerhalb der Kaskade einer voll entwickelten, lokal isotropen und homogenen Turbulenz ab [24]. Demnach existiert in einer solchen Strömung ein Bereich von Wirbelstrukturen, in dem die Verteilung der Geschwindigkeit nur von der Energiedissipation abhängt und nicht von der Viskosität des Fluids. In diesem Bereich ist das Leistungsspektrum proportional zur Frequenz hoch  $-5/3$

$$P(f) \propto f^{-5/3}. \quad (2.6)$$

Ein solches Skalierungsverhalten des Spektrums ist daher ein erstes Anzeichen für voll entwickelte Turbulenz.

### 2.3.2 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Für eine genauere Untersuchung gemessener Zeitreihen werden die so genannten Inkremente herangezogen

$$v(\tau) = v(t + \tau) - v(t). \quad (2.7)$$

Dadurch werden die Mittelwerte der Zeitreihe eliminiert und nur noch die Fluktuationen über eine feste Zeitskala  $\tau$  betrachtet. Trägt man die Häufigkeit auftretender Inkremente über dem Wert der Inkremente auf und normiert in geeigneter Weise, so erhält man die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion oder auch *PDF* (Probability Density Function)<sup>1</sup>. Die Verteilungen sind nicht für alle Zeitskalen  $\tau$  Gauss-verteilt, sondern besitzen für große Inkremente höhere Wahrscheinlichkeiten als eine Gaussverteilung gleicher Varianz wiedergeben würde. Verursacht wird das beispielsweise durch kurz anhaltende chaotische Phasen, die in einem im allgemeinen regulären Signal auftreten. Dieses wird als Intermittenz bezeichnet. Die Beschreibung der Form der *PDF*s ist eine weitere Methode zur Charakterisierung von Zeitreihen. Ein Ansatz wurde von B. Castaing et al. vorgeschlagen [11]. Sie gehen davon aus, dass die Verteilung von Inkrementen durch eine Überlagerung von Gaussverteilungen mit lognormalverteilter Varianz beschrieben werden kann

$$PDF(v(\tau)) = \frac{1}{2\pi\lambda} \int \exp\left(\frac{-\ln^2(\sigma/\sigma_0)}{2\lambda^2}\right) \exp\left(\frac{-v(\tau)^2}{2\sigma^2}(1+\gamma)\right) \frac{d\ln\sigma}{\sigma} \quad (2.8)$$

mit

$$\gamma = a_s \frac{v(\tau)/\sigma}{\sqrt{1 - (v(\tau)/\sigma)^2}},$$

wobei  $\lambda$  als Formparameter ein Maß für die Stärke der Intermittenz ist,  $\gamma$  eine mögliche Asymmetrie repräsentiert und  $a_s$  der so genannte Skewness-Faktor ist. Zum Vergleich von gemessenen Zeitreihen wird der Formparameter  $\lambda$  aus Gleichung (2.8) herangezogen, welcher durch numerische Integration bestimmt werden kann.

Ein alternativer Ansatz zur Bestimmung des Formparameters  $\lambda$  wird in [4] vorgestellt. Hierbei wird  $\lambda$  direkt aus den gemessenen Zeitreihen bestimmt

$$\lambda^2 = \ln\left(\frac{\langle v(\tau)^4 \rangle}{3 \cdot \langle v(\tau)^2 \rangle^2}\right). \quad (2.9)$$

Mit den so bestimmten  $\lambda$  können mit Hilfe der Gleichung (2.8) die *PDF*s der Inkremente rekonstruiert werden. Bei der Rekonstruktion zeigt sich, dass beide Methoden Bereiche der Verteilungen unterschiedlich stark bewerten, in der Regel aber keine perfekte Übereinstimmung mit den gemessenen *PDF*s liefern. Basierend darauf hat ein Vergleich des Formparameters  $\lambda$  eher einen qualitativen Charakter.

---

<sup>1</sup>Im Folgenden wird die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion mit *PDF* bezeichnet

### 2.3.3 Strukturfunktionen

Eine weitere Methode zur Untersuchung der *PDFs* sind die Strukturfunktionen. Die Strukturfunktion  $n$ -ten Grades ist gegeben durch den Erwartungswert der  $n$ -ten Potenz<sup>2</sup> des Inkrements und wird meist über der Skala  $\tau$  aufgetragen. In dieser Arbeit werden die Strukturfunktionen des Betrags der Inkremente verwendet

$$S^n(|v(\tau)|) = \langle |v(\tau)|^n \rangle. \quad (2.10)$$

Hierbei bezeichnet  $S^1$  den Erwartungswert,  $S^2$  die Varianz,  $S^3$  und  $S^4$  nach Normierung die Schiefe und die Wölbung oder Kurtosis der *PDFs* der Inkremente. Diese Methode ermöglicht damit einen direkten Vergleich der Inkrement *PDFs* unterschiedlicher Zeitreihen über der Skala  $\tau$ .

---

<sup>2</sup>In dieser Arbeit werden die Strukturfunktionen vom Grade  $n = 1$  bis  $n = 4$  betrachtet



# Kapitel 3

## Laser-Cantilever-Anemometer (LCA)

*In diesem Kapitel wird das zugrunde liegende Messprinzip des Laser-Cantilever-Anemometers eingeführt. Die Umsetzung dieser Messmethode in einem kompakten Sensor und dessen Beschreibung beschließt dieses Kapitel.*

### 3.1 Messprinzip - Biegebalken

Das Laser-Cantilever-Anemometer (LCA) basiert auf dem Prinzip der Rasterkraftmikroskopie, bei der die wirkenden atomaren Kräfte zwischen Probenoberfläche und Messspitze in einer Verbiegung eines Biegebalkens, im Folgenden als Cantilever bezeichnet, resultieren. Die Verbiegung liefert hierbei Informationen über die Topografie der betrachteten Probe [6]. Im Falle des LCAs wird die wirkende Kraft durch das bewegende Fluid erzeugt

$$F = c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2, \quad (3.1)$$

mit dem Widerstandsbeiwert  $c_w$ , der spezifischen Dichte des Fluids  $\rho$ , der angeströmten Querschnittsfläche  $A$  und der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  [32]. Die Verbiegung des Cantilevers enthält somit Information über die lokale Geschwindigkeit an dem Cantilever. Es sei vermerkt, dass Gleichung (3.1) nur die Komponente der Kraft berücksichtigt, welche senkrecht auf die Querschnittsfläche  $A$  wirkt. Hierbei sind  $\rho$  und  $A$  konstante Größen. Der Widerstandsbeiwert  $c_w$  einer senkrecht angeströmten Platte wird fast ausschließlich durch den Druckwiderstand gegeben und wird nach [23] durch das Seitenverhältnis bestimmt. Der Widerstandsbeiwert  $c_w$  kann damit auch als konstant angesehen werden.

Die Auslenkung  $s$  an der Position  $x$  eines Cantilevers der Länge  $l$  unter der Flächenkraft  $F$  ergibt nach [16] die Biegelinie

$$s(x) = \underbrace{c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2}_F \cdot \frac{l^3}{E \cdot I_a \cdot 2} \cdot \left( \frac{x^4}{12 \cdot l^4} - \frac{x^3}{3 \cdot l^3} + \frac{x^2}{2 \cdot l^2} \right), \quad (3.2)$$

mit dem Elastizitätsmodul  $E$  und dem Flächenträgheitsmoment  $I_a$ , welche durch das Material und die Form des Cantilevers fest bestimmt werden. Damit ist die Auslenkung des Cantilevers an einer Stelle  $x$  proportional zu dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit  $v$

$$s(x) \propto v^2.$$

Für die Messung der Auslenkung und damit der Geschwindigkeit wird das Lichtzeiger-Prinzip genutzt. Die Reflexion eines auf den Cantilever fokussierten Lasers wird auf einen analog arbeitenden positionssensitiven Detektor (PSD) gelenkt [34] [21]. Hierbei hängt das gemessene Signal des PSDs linear von der Position der Reflexion ab. Durch dieses optische Abtasten wird die Änderung der Auslenkung  $s(x)$  indirekt durch die Änderung des Biegewinkels  $\gamma(x)$  des Cantilevers gemessen

$$\gamma(x) = \arctan\left(\frac{ds(x)}{dx}\right) = \arctan\left[\frac{c_w \cdot \rho \cdot A}{2 \cdot E \cdot I_a} \cdot v^2 \cdot \frac{l^3}{2} \cdot \left(\frac{x^3}{3 \cdot l^4} - \frac{x^2}{l^3} + \frac{x}{l^2}\right)\right]. \quad (3.3)$$

Der Biegewinkel  $\gamma(x)$  auf dem Cantilever resultiert auf dem PSD im Abstand  $D$  von dem Cantilever in einer Auslenkung  $\Delta b$ , gegeben durch

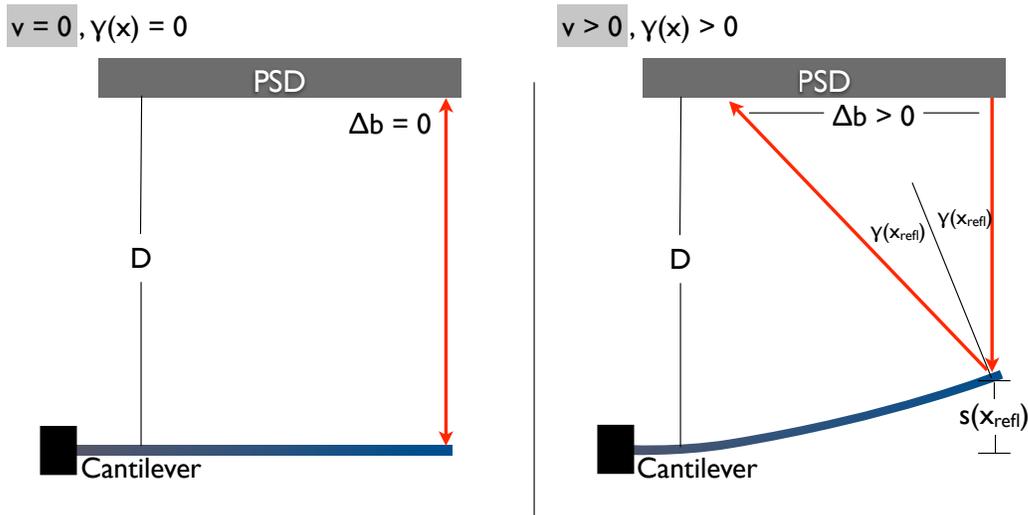
$$\Delta b = D \cdot \tan(2 \cdot \gamma(x)). \quad (3.4)$$

Abbildung 3.1 verdeutlicht schematisch den Weg des einfallenden und reflektierten Laserlichtes. Für  $v = 0$  wirkt keine Kraft auf den Cantilever, wodurch der einfallende Lichtstrahl auf direktem Wege reflektiert wird. Für  $v > 0$  wird der Cantilever durch die einwirkende Kraft ausgelenkt und der reflektierte Lichtstrahl wandert auf dem PSD Element. Das PSD Element liefert ein Signal  $Sig$ , welches linear von der Position des auftreffenden Lichtes abhängt. Damit ist das gemessene Signal proportional zu  $\Delta b$ . Bei einem LCA ist der Abstand  $D$  zwischen dem PSD Element und dem Cantilever im Bereich von  $80mm$ , die Auslenkung  $s(x_{refl})$  des Cantilevers liegt hingegen im Bereich weniger  $\mu m$ , womit  $D$  als konstant angesehen werden kann. Ebenso liegen die zu erwartenden Winkel im Bereich weniger Grad, so dass der Tangens in Gleichung (3.4) linear angenähert werden kann. Das gemessene Signal des PSD Elements, erzeugt durch die Reflexion an einer festen Position  $x_{refl}$ , ergibt sich somit für variierende Geschwindigkeiten zu

$$Sig(v) = \underbrace{\frac{D \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot l^3}{E \cdot I_a \cdot 2} \cdot \left(\frac{x_{refl}^3}{3 \cdot l^4} - \frac{x_{refl}^2}{l^3} + \frac{x_{refl}}{l^2}\right)}_{m=konstant} \cdot v^2. \quad (3.5)$$

Gemessene Signale des PSD Elements können somit mit einer Funktion nach

$$Sig(v) = const + m \cdot v^2 \quad (3.6)$$



**Abbildung 3.1:** Auslenkung  $\Delta b$  des reflektierten Laserlichts auf dem PSD Element. **Links:** Für  $v = 0$  wirkt keine Kraft auf den Cantilever; das Laserlicht wird auf direktem Wege reflektiert. **Rechts:** Für  $v > 0$  wirkt eine Kraft auf den Cantilever; das reflektierte Laserlicht wird um  $2 \cdot \gamma(x_{refl})$  abgelenkt.

angefittet werden, wobei die additive Konstante *const.* das PSD Signal für  $v = 0$  beschreibt. Die Kalibrierung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von dem gemessenen Signal ergibt sich somit zu

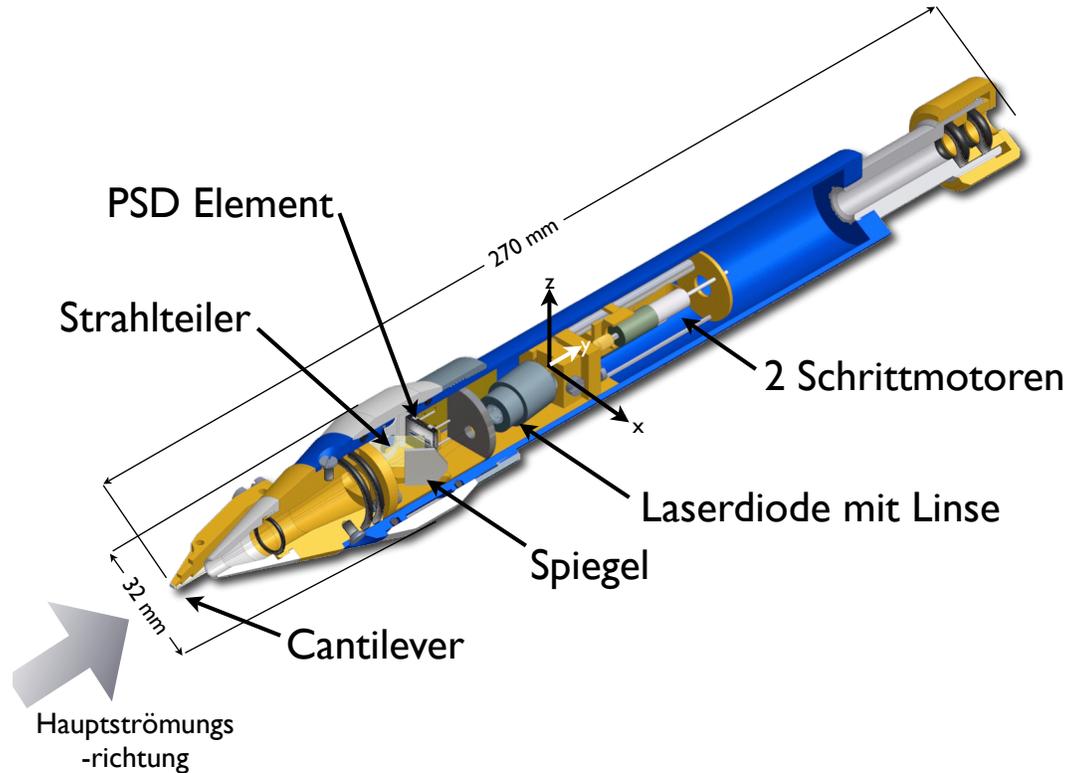
$$v(Sig) = m^* \cdot \sqrt{Sig - x_0}, \quad (3.7)$$

mit  $m^* = \sqrt{\frac{1}{m}}$  und  $x_0 = const.$ . Es sei vermerkt, dass unterschiedliche Positionen  $x_{refl}$  des Laserfokus auf dem Cantilever in unterschiedlichen  $m^*$  resultieren.

## 3.2 LCA - Aufbau

Das Laser-Cantilever-Anemometer wurde an der Universität Oldenburg zu einem kompakten Sensor entwickelt, mit dessen Hilfe zeitlich und räumlich hochaufgelöste Geschwindigkeitsmessungen sowohl in Gasen als auch in Flüssigkeiten durchgeführt werden können [2]. Abbildung 3.2 zeigt den Sensor mit dessen Abmessungen und seinen wichtigsten Komponenten. Das Laserlicht der Laserdiode wird über den Spiegel und den Strahlteiler auf den Cantilever fokussiert. Die eingebauten Schrittmotoren ermöglichen ein Verkappen der Laserdiode um die X- und Z-Raumachse, so dass der Laserstrahl auf den Cantilever positioniert werden kann. Das von der Cantileveroberfläche reflektierte Licht passiert den Strahlteiler und trifft auf das eindimensionale PSD Element. Wird der Cantilever durch die

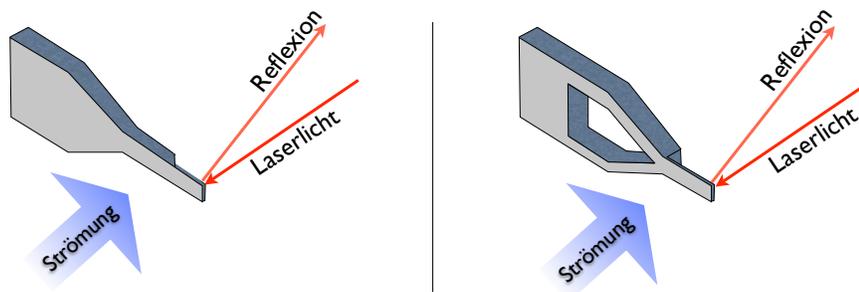
vorhandene Strömung verbogen, wandert der Reflex auf dem PSD Element und ruft eine Änderung des Ausgangssignals hervor. Eine genaue Beschreibung des Sensors und einzelner Komponenten sowie eine Diskussion des Designs ist in [3] dargestellt.



**Abbildung 3.2:** Schematische Zeichnung des Laser-Cantilever-Anemometers mit eingebauten Komponenten. Die Hauptströmungsrichtung verläuft senkrecht zum Cantilever.

Der Cantilever als aktives Messelement in diesem Sensor befindet sich an der Spitze eines Cantileverchips. Es stehen zwei unterschiedliche Designs dieses Chips zur Verfügung, eines mit einem Steg und eines mit einem Fenster (siehe Abb. 3.3). Beides sind speziell entwickelte Cantileverchips, die den Cantilever möglichst "frei" in der Strömung positionieren sollen. Die Unterseite des Cantilever ist mit einem reflektierenden Material beschichtet.

Der Entwicklungsstatus des Laser-Cantilever-Anemometers erlaubte die Durchführung von Messungen mit dem vollen Potential, welches diese Messmethode zu bieten hat. Allerdings war das LCA im Bereich der Bedienbarkeit und Handhabbarkeit noch auf dem Stand eines einzelnen Prototyps. Im Folgenden werden die Änderungen beschrieben, welche zu Beginn dieser Arbeit durchgeführt wurden.



**Abbildung 3.3:** Schematische Darstellung der Cantileverchips. **Links:** Cantileverchip mit Stegdesign und **rechts:** mit Fensterdesign.

Die Schrittmotoren, die im LCA die Bewegung der Laserdiode ermöglichen, wurden über Schalter angesteuert, die keinerlei Rückkopplung über die aktuelle Drehrichtung haben; in Verbindung mit vorhandenem Prell der Schalter, war eine Ausrichtung des Laserlichtes auf dem Cantilever sehr zeitaufwändig, da die Drehrichtung nicht gezielt eingestellt werden konnte. Um die Ausrichtung der Laserdiode zu vereinfachen, wurden die bestehenden Schrittmotoren durch Gleichstrommotoren (DC-Kleinstmotor der Serie 0615 4,5S in Verbindung mit einem Planetengetriebe der Serie 06/1 mit einem Untersetzungsverhältnis von 256:1 der Firma *Faulhaber*) ersetzt, deren Drehrichtungsänderung durch Umpolung der angelegten Spannung realisiert wird. Die Drehgeschwindigkeit wird hierbei über die angelegte Spannung geregelt. Die realisierte Ansteuerung ist in Anhang B.1 abgedruckt. Mit einem LCA dieser Bauart wurden Messungen unter anderem in einem Schneewindkanal in Davos durchgeführt, welche in Kapitel 5.1.1 beschrieben sind.



# Kapitel 4

## LCA - Kalibrierung

*In diesem Kapitel werden LCA Messdaten für eine Kalibrierung mit der im Kapitel 3.1 beschriebenen Theorie verglichen. Mögliche Ursachen für auftretende Abweichungen werden identifiziert und diskutiert. Abschließend wird eine Methode vorgestellt, mit der die in dieser Arbeit aufgenommenen Daten kalibriert wurden.*

### 4.1 Gemessene Kalibrierungsdaten

Bisherige Arbeiten mit dem LCA haben gezeigt, dass der Verlauf der Messdaten einer Kalibrierung nicht im Einklang mit der Theorie steht. Gemessene Kalibrierungsdaten sind in der Regel nicht mit einer Funktion gemäß Gleichung (3.7) zufriedenstellend anzufitten. Vielmehr zeigt die Erfahrung, dass die Daten in den meisten Fällen einer Funktion der Gleichung (4.1) folgen

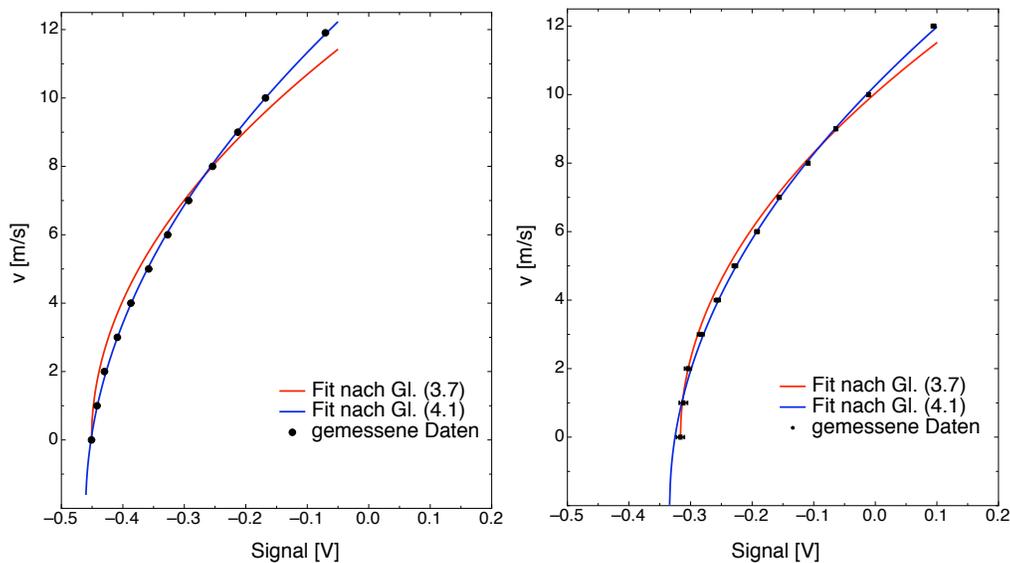
$$v(\text{Sig}) = \text{const}^* + m^* \cdot \sqrt{\text{Sig} - x_0}. \quad (4.1)$$

Wird die Gleichung (4.1) nach dem gemessenen Signal  $\text{Sig}$  aufgelöst, zeigt sich, dass der Zusatz der Konstanten  $\text{const}^*$  eine lineare Veränderung  $E(v)$  des Signals in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bewirkt

$$\text{Sig}(v) = \frac{1}{m^{*2}} \cdot v^2 + \underbrace{\frac{2 \cdot \text{const}^*}{m^{*2}} \cdot v}_{E(v)} + \frac{\text{const}^{*2}}{m^{*2}} + x_0. \quad (4.2)$$

Abbildung 4.1 zeigt zwei gemessene Kalibrierkurven, die mit demselben Sensor und demselben Cantilever aber an unterschiedlichen Tagen aufgenommen wurden; es musste demnach an beiden Tagen der Cantilever neu ausgerichtet werden. Die linke Grafik zeigt eine Kalibrierkurve, deren Daten (schwarze Kreise) gut durch Gleichung (4.1) (blaue Linie) angefitet werden. Auf Basis einer solchen Kalibrierung könnten Messungen durchgeführt und kalibriert werden. Ein Fit mit dem theoretisch zu erwartenden Verlauf (rote Linie) liefert hingegen ein

unzureichendes Ergebnis. In der rechten Grafik ist eine gemessene Kalibrierkurve (schwarze Kreise) nach erneuter Ausrichtung des Cantilevers dargestellt. Zusätzlich sind in dieser Darstellung die Fehlerbalken eingetragen, die sich vertikal aus der absoluten Anzeigegenauigkeit des Windkanals ( $0,05\text{m/s}$ ) und horizontal aus der Standardabweichung des gemessenen Signals ergeben. Zum einen fällt auf, dass bei dieser Ausrichtung ein anderer Offset  $x_0$  anliegt. Die Differenz von maximaler und minimaler Spannung ist hingegen bei beiden ungefähr gleich. Dennoch zeigt sich, dass der Fit nach Gleichung (4.1) (blaue Linie) in diesem Fall schlechter ist. Gerade im Bereich kleiner Geschwindigkeiten ( $0\text{m/s}$  bis  $3\text{m/s}$ ) und großer Geschwindigkeiten (ab  $9\text{m/s}$ ) treten größere Abweichungen zwischen Fit und gemessenen Daten auf. Die Abweichungen des Fits nach Gleichung (3.7) (rote Linie) hingegen sind im Vergleich zu der linken Grafik geringer. Diese unterschiedlichen Ergebnisse zeigen, dass die Theorie nicht die gesamte Realität erfasst.



**Abbildung 4.1:** Gemessene Kalibrierdaten (schwarze Kreise) eines LCAs mit identischem Cantilever an unterschiedlichen Tagen mit Fits nach Gl. (4.1) (blaue Linie) und nach Gl. (3.7) (rote Linie). **Links:** Tag 1, **rechts:** Tag 2 - die Fehlerbalken geben vertikal die Anzeigegenauigkeit des Windkanals und horizontal die Standardabweichung der gemessenen Daten an.

## 4.2 Simulation des PSD Messsignals

Das unterschiedliche Verhalten gemessener Kalibrierdaten eines Cantilevers nach wiederholtem Ausrichten ist Motivation für eine genauere Betrachtung der Reflexion von dem Laserlicht an der Cantileveroberfläche. Die in Kapitel 3.1 vorgestellte Theorie betrachtet eine idealisierte Reflexion an einer räumlich sehr begrenzten Position auf dem Cantilever  $x_{refl}$ . Bei dem LCA besitzt der Fokuspunkt des Lasers auf dem Cantilever hingegen eine räumliche Ausdehnung, welche Konsequenzen auf die Reflexion und das reflektierte Laserlicht hat. Die Auswirkungen folgender Eigenschaften des Fokuspunktes auf die Reflexion werden diskutiert:

- 1 Aufgrund der räumlichen Ausdehnung findet eine Reflexion an einer Fläche statt.
- 2 Innerhalb des Laserspots ist die Intensität nicht homogen verteilt.
- 3 Die Fokussierung resultiert in einer Änderung der Einstrahlwinkel über der Fläche des Laserspots.

Für die Untersuchung wurde ein Programm entwickelt, welches die Intensitätsverteilung des reflektierten Laserlichtes auf dem PSD Element simuliert. Dazu werden die Strahlengänge der Reflexion an diskreten Positionen auf dem Cantilever berechnet und an der Stelle des PSD Elementes zur Überlagerung gebracht. Der Schwerpunkt der Intensitätsverteilung auf dem PSD Element ergibt das Messsignal. Hierbei wird über die Breite des Cantilevers Homogenität vorausgesetzt, d.h. Effekte, welche durch inhomogene Konditionen (Lichtintensität, Änderungen des Einstrahlwinkels) über die Breite des Cantilevers zusätzlich auf die Reflexion wirken können werden hier nicht berücksichtigt, da hier nur der generelle Einfluss der oben aufgeführten Punkte dargestellt werden soll und keine komplette Beschreibung der Reflexion das Ziel ist. Das Programm "Simulation PSD Signal" und die genaue Funktionsweise ist im Anhang A abgedruckt.

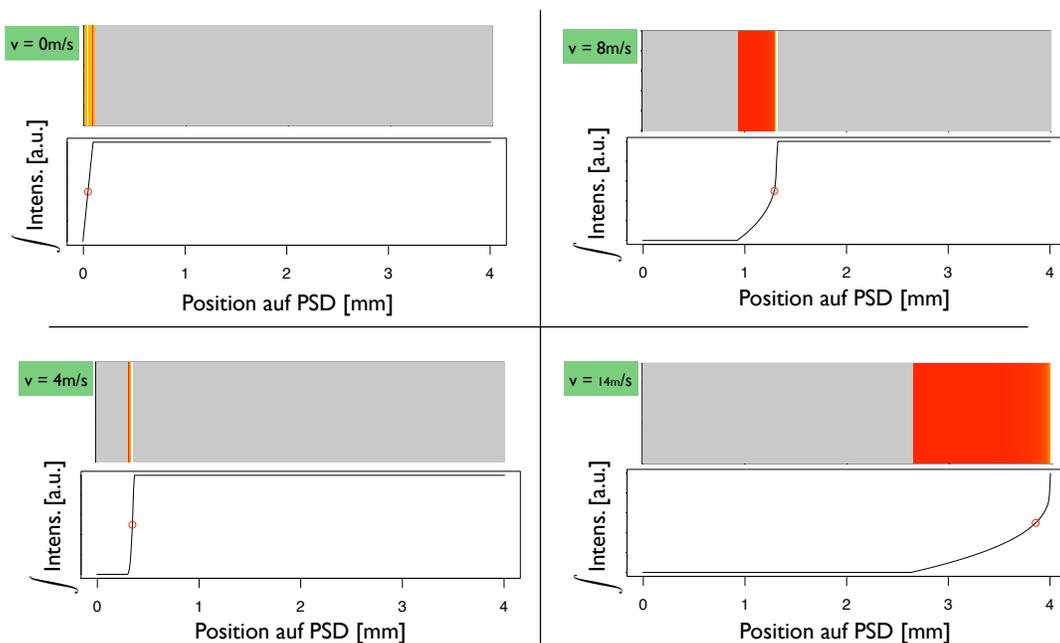
### 4.2.1 Reflexion an einer Fläche

Die Reflexion an einer Fläche bei einfallendem parallelen Licht mit homogener Intensitätsverteilung wird mit dem Programm "Simulation PSD Signal" durch folgende Parameterwahl realisiert:

$l : 140\mu m$	$C : 38989$	$xmin : 0\mu m$	$xmax : 140\mu m$
$v : 14m/s$	winkoeff : $0^\circ$	DSpot : $120\mu m$	wink0 : 100
VOR : TRUE	Abstand : $80mm$	PSD_Br : $4mm$	Profil : $c(1)$

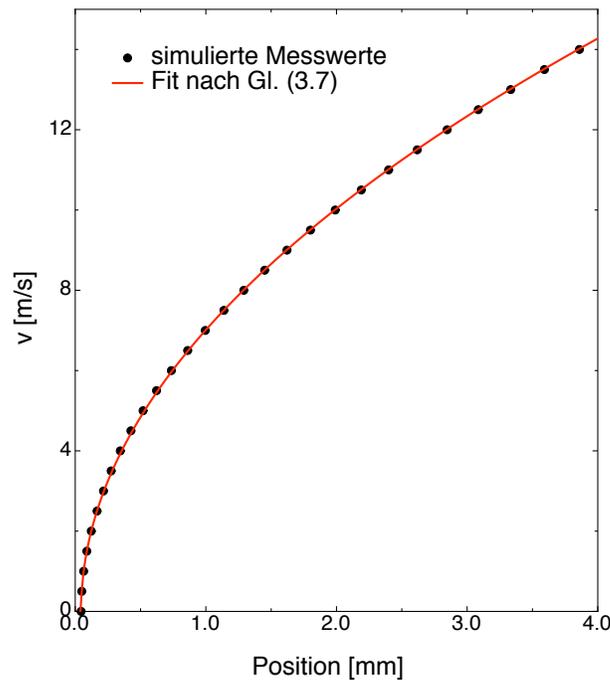
**Tabelle 4.1:** Parameterwahl für das Programm "Simulation PSD Signal" für die Situation der Reflexion an einer Fläche mit homogener Intensitätsverteilung des einfallenden parallelen Lichtes.

In Abbildung 4.2 ist für einige Geschwindigkeiten das reflektierte Laserlicht auf dem PSD Element dargestellt, wobei die Intensität von Dunkelrot nach Weiß ansteigt. Der graue Bereich beschreibt den aktiven Bereich des PSD Elements. Es zeigt sich, dass für kleine Geschwindigkeiten der Reflex schmal ist, mit zunehmender Geschwindigkeit und damit auch zunehmender Biegung des Cantilevers der Reflex breiter wird. Dieses wird durch den Gradienten im Biegewinkel des Cantilevers verursacht. Eine kleinere reflektierende Fläche würde in einem schmaleren Lichtreflex resultieren. Zusätzlich ist das Integral der Intensitätsverteilung des Laserlichts auf dem PSD Element dargestellt. Der berechnete Messwert ist mit einem roten Kreis markiert.



**Abbildung 4.2:** Darstellung des Reflexes auf dem PSD Element mit Integral der Intensitätsverteilung für Reflexion an einer Fläche mit homogener Laserspotintensität bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Den Schwerpunkt der Intensitätsverteilung (= Messsignal) markiert der rote Kreis.

Abbildung 4.3 stellt das simulierte PSD Messsignal dar. Zusätzlich ist in rot ein Fit nach Gleichung (3.7) eingezeichnet. Es ist zu erkennen, dass das Auseinanderlaufen des Lichtreflexes keinen großen Einfluss auf die erzeugte Kalibrierkurve hat; die berechneten Daten folgen wie von der Theorie prognostiziert einer Wurzelfunktion. Das Aufweiten des reflektierten Lichtflecks durch einen nicht einheitlichen Biegewinkel auf der Fläche des Cantilevers hat einen zu geringen Einfluss auf das Signal um alleine für die Abweichung der gemessenen Daten von der Theorie verantwortlich zu sein.



**Abbildung 4.3:** Simulierte Kalibrierkurve für paralleles Laserlicht mit homogener Intensitätsverteilung. Die rote Kurve beschreibt den Fit nach Gl. (3.7).

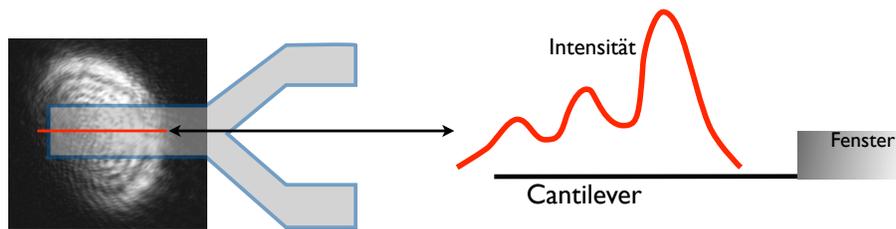
## 4.2.2 Reflexion an einer Fläche mit Intensitätsprofil

Im nächsten Schritt wird untersucht, welchen Einfluss eine nicht homogen verteilte Intensität im Laserspot bei der Reflexion an einer Fläche auf das Messsignal hat. In Abbildung 4.4 (links) ist eine Aufnahme der Intensitätsverteilung des Laserspots des verwandten LCAs dargestellt. Zusätzlich ist schematisch die Position des Cantilevers eingezeichnet. Die Intensitätsverteilung weist Interferenzmuster auf, die zum Beispiel durch Beugung am Bohrloch zur Laserdiode verursacht werden können oder durch Verunreinigungen auf den optischen Bauteilen. Des Weiteren ist die Intensität in Richtung des Fensters des Cantileverchips höher als

in Richtung der Cantileverspitze. Auf Basis dieser Beobachtung wurde eine Intensitätsverteilung für die Simulation festgelegt, welche die wesentlichen Merkmale der realen Intensitätsverteilung aufweist (Abb. 4.4 rechts). Die Simulation wurde mit identischen Parametern durchgeführt, wie sie in Tabelle 4.1 beschrieben sind. Das Profil wurde durch

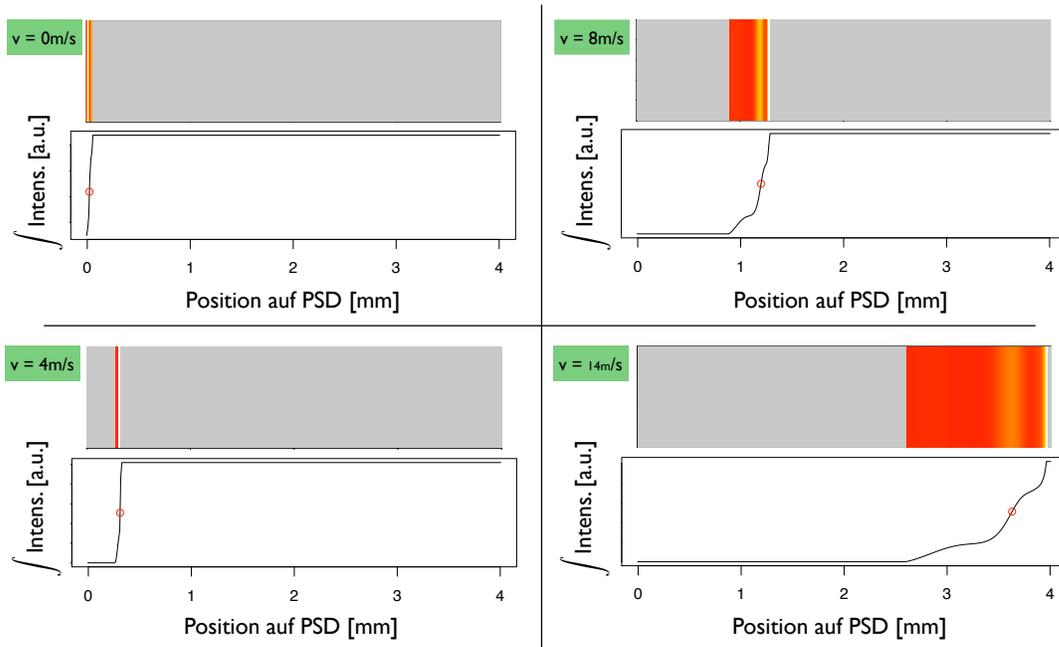
$$\text{Profil} = c(0.82, 1.30, 0.26, 1.42, 3.39, 1.18, 0.52, 0.71, 1.13, 0.36, 0.18, 0.64, 0.70, 0.67, 0.16)$$

ersetzt. In Abbildung 4.5 ist das reflektierte Laserlicht auf dem PSD Element



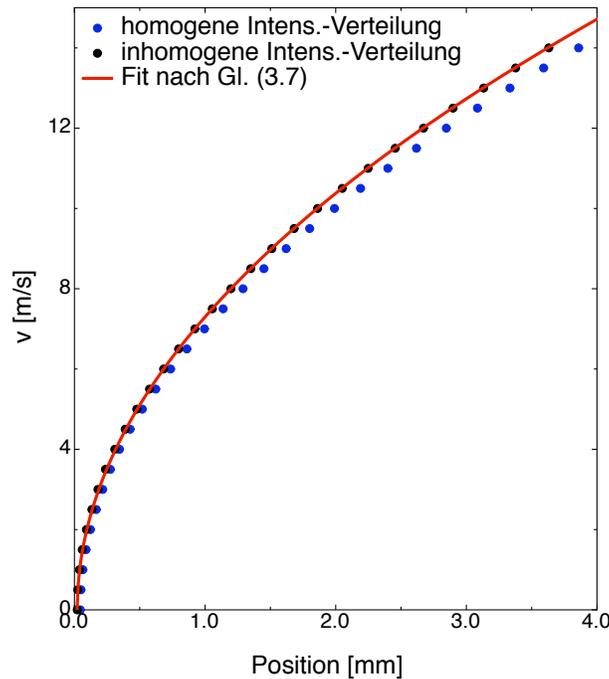
**Abbildung 4.4:** **Links:** Vermessene Intensitätsverteilung des Laserspots mit Lage des Cantilevers. **Rechts:** Angenäherte Intensitätsverteilung des Laserspots.

mit dem Integral der Intensitätsverteilung dargestellt. Durch die nicht-homogene Verteilung der Intensität auf dem Cantilever ändert sich ebenfalls die Verteilung der Intensität innerhalb des Reflexes, wodurch das Messsignal beeinflusst wird. Abbildung 4.6 zeigt das simulierte Messsignal (schwarze Kreise) mit dem Fit nach Gleichung (3.7) (rote Linie). Es zeigt sich, dass die Daten mit der Theorie gut in Einklang gebracht werden können. Zusätzlich ist das simulierte Messsignal für eine homogene Intensitätsverteilung (blaue Kreise) eingezeichnet. Diese Signale liegen unterhalb derer für die inhomogene Intensitätsverteilung. Das bedeutet, dass für eine gleiche Auslenkung des Cantilevers eine kleinere Geschwindigkeit und damit eine geringere Kraft nötig ist. Da dieselbe Konstante  $C$  für beide Simulationen genutzt wurde, die unter anderem das Elastizitätsmodul  $E$  enthält, besitzen beide dieselbe Steifigkeit. Daraus folgt, dass durch die inhomogene Intensitätsverteilung ein Bereich stärkeren Einfluss bekommt, der sich näher am Fenster des Cantileverchips befindet und sich damit weniger durchbiegt.



**Abbildung 4.5:** Darstellung des Reflexes auf dem PSD Element mit Integral der Intensitätsverteilung für Reflexion an einer Fläche mit inhomogener Laserspotintensität bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Den Schwerpunkt der Intensitätsverteilung (= Messsignal) markiert der rote Kreis.

Eine inhomogene Intensitätsverteilung des einfallenden Lichtes, wie sie hier gewählt wurde, hat somit einen zu geringen Einfluss auf das Messsignal, als dass sie für die Abweichungen der realen Daten verantwortlich sein kann. Sicher sind Verteilungen vorstellbar, die in einer stärkeren Abweichung von der Theorie resultieren. Mit den hier durchgeführten Simulationen soll allerdings nur versucht werden, die gemessenen LCA Daten zu erklären.

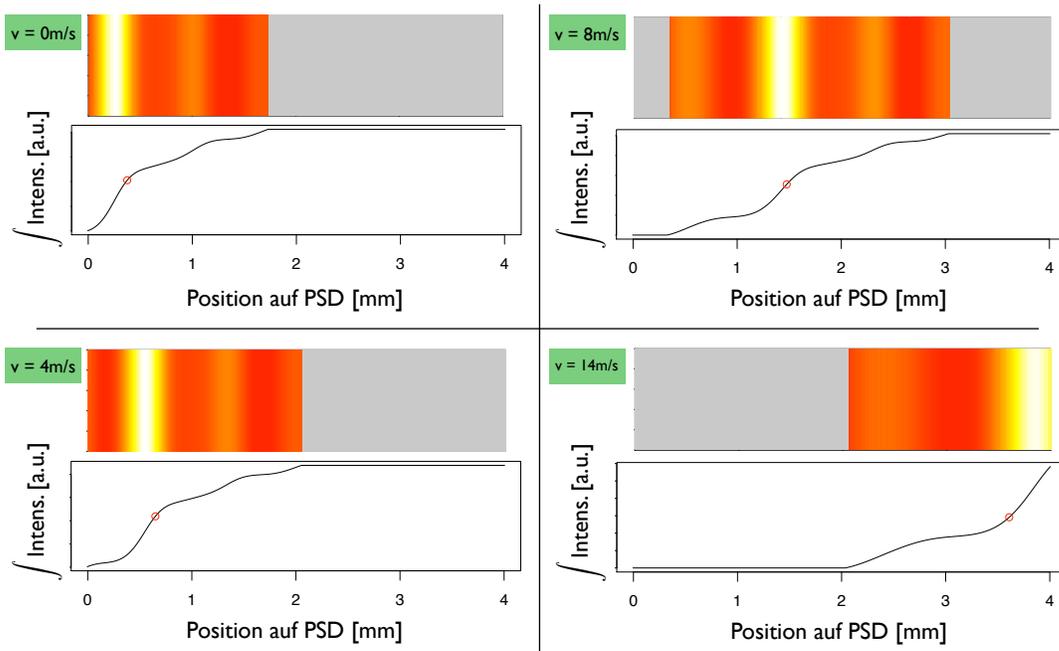


**Abbildung 4.6:** Simulierte Kalibrierkurve für paralleles Laserlicht mit inhomogener Intensitätsverteilung (schwarze Kreise). Die rote Linie beschreibt den Fit nach Gl. (3.7). Zusätzlich sind die simulierten Daten für eine homogene Intensitätsverteilung eingezeichnet (blaue Kreise).

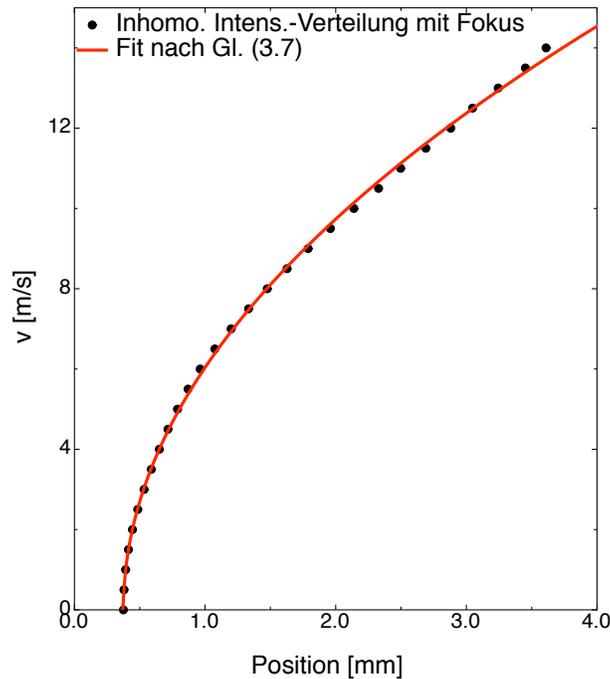
### 4.2.3 Reflexion an einer Fläche mit Intensitätsprofil und Einstrahlwinkeländerung

Durch die Fokussierung des Laserstrahls ist das Licht, welches auf den Cantilever trifft, nicht mehr parallel, sondern besitzt einen gewissen Öffnungswinkel, im Programm mit *winkoeff* bezeichnet. Dieser Öffnungswinkel bewirkt, dass der Einstrahlwinkel des Lichtes innerhalb des Laserspots variiert und den Winkeln, verursacht durch die Biegung des Cantilevers, überlagert ist. Außerdem kann sich der Cantilever entweder vor oder hinter dem "idealen" Fokuspunkt befinden, was einen Einfluss auf den Verlauf der Einstrahlwinkel hat (siehe Anhang A). Der Öffnungswinkel für das LCA wurde mit  $winkoeff = 2^\circ$  abgeschätzt und als Parameterwert eingegeben. Die "Fächerung" des Einstrahlwinkels hat zur Folge, dass schon bei einer Geschwindigkeit von  $v = 0\text{ m/s}$  der Reflex auseinanderläuft. Wie in Anhang A beschrieben, muss zu Beginn des Simulationsprogramms das linke Ende des PSD Elements festgelegt werden. In diesem Fall wurde es auf Basis der Reflexion für  $v = 0\text{ m/s}$  auf  $A = -0.8\text{ mm}$  gesetzt. Der Cantilever befindet sich vor dem "idealen" Fokuspunkt.

Mit diesen Einstellungen wurde eine Simulation durchgeführt. Abbildung 4.7 zeigt für einige Geschwindigkeiten den Reflex auf dem PSD Element mit dem Integral der Intensitätsverteilung. Durch die vorhandenen Einstrahlwinkel und die daraus resultierende Aufweitung des Reflexes befindet sich nicht bei allen Geschwindigkeiten  $v$  das gesamte reflektierte Licht auf der aktiven Fläche des PSD Elements. Zu Beginn wird ein Teil von links abgeschnitten, welcher mit steigender Geschwindigkeit in die aktive Fläche wandert, bei höheren Geschwindigkeiten wandert ein Teil des reflektierten Lichtes rechts aus der aktiven Fläche des PSD Elements heraus. Dieses hat zur Folge, dass sich die Gesamtintensität auf dem PSD Element ständig ändert, was wiederum einen Einfluss auf die Berechnung des optischen Schwerpunktes hat. Abbildung 4.8 zeigt die simulierte Kalibrierkurve (schwarze Kreise) mit einem Fit nach Gleichung (3.7). Es fällt auf, dass hier Abweichungen von dem Fit nach Gleichung (3.7) auftreten, die schon mit bloßem Auge zu erkennen sind. Das teilweise Herein- und Herauslaufen des reflektierten Laserlichts in die aktive Fläche des PSD Elements hat somit den stärksten Einfluss auf das Messsignal.



**Abbildung 4.7:** Darstellung des Reflexes auf dem PSD Element mit Integral der Intensitätsverteilung für Reflexion an einer Fläche mit inhomogener Laserspotintensität und Fokussierung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Den Schwerpunkt der Intensitätsverteilung (= Messsignal) markiert der rote Kreis.



**Abbildung 4.8:** Simulierte Kalibrierkurve für fokussiertes Laserlicht mit inhomogener Intensitätsverteilung (schwarze Kreise). Die rote Linie beschreibt den Fit nach Gl. (3.7).

Weitere Einflüsse, die hier nicht berücksichtigt wurden, sind zum einen die Oberflächenbeschaffenheit des Cantilevers. Es zeigt sich, dass die Oberfläche nicht gleichmäßig beschichtet ist. Dies hat zur Folge, dass eine erhöhte Rauigkeit vorliegt, was in einer diffusen Reflexion resultiert. Die Simulation geht hingegen von einer perfekt glatten Oberfläche aus, die homogen beschichtet ist. Eine diffuse Reflexion wird den Effekt der Aufweitung des reflektierten Laserlichts noch verstärken und das gemessene Signal stärker beeinflussen. Zum anderen wurde hier davon ausgegangen, dass die Intensitätsverteilung über die Breite des Cantilevers identisch ist. Wie in Abbildung 4.4 zu erkennen ist, ist dieses nicht der Fall. Die maximale Intensität liegt unten näher am Fenster des Cantileverchips als am oberen Rand. Für eine genauere Betrachtung müsste die Simulation für unterschiedliche Längsschnitte auf dem Cantilever durchgeführt werden. Die daraus resultierende Intensitätsverteilung auf dem PSD Element würde dann als Grundlage für die Berechnung des Schwerpunktes und damit des Messsignals dienen. Für die Erklärung der Abweichung der gemessenen Kalibrierkurve von der Theorie ist dieses jedoch nicht notwendig.

## 4.3 Diskussion und Ausblick

Die durchgeführten Simulationen haben ergeben, dass die Abweichung der Kalibrierfunktion des LCAs von der Theorie maßgeblich durch eine sich ändernde Gesamtintensität auf der aktiven Fläche des PSD Elements verursacht wird. Diese resultiert in einer Verschiebung des optischen Schwerpunktes, welcher das Signal des PSD Elements bestimmt. Diese Verschiebung kann jedoch nicht bestimmt werden, da sie auch von der Positionierung des Laserspots mit seiner inhomogenen Intensitätsverteilung auf dem Cantilever abhängt. Um die Daten dennoch mit einer Funktion anzunähern, wird in dieser Arbeit auf eine **Spline-Funktion** zurückgegriffen.

Als Resultat muss in einem nachfolgenden Design des LCAs eine Modifikation des Laserlichts erfolgen. Durch Parallelisieren des Laserlichts wird ein Auseinanderlaufen des Reflexes ohne Biegung minimiert.

Der Verlauf der Biegelinie des Cantilevers zeigt, dass die stärkste Biegung nahe der Befestigung am Fenster auftritt. An der Spitze des Cantilevers hingegen minimiert sich der Gradient der Biegung auf dem Cantilever bei einer wirkenden Flächenkraft. Wird nun ein kleiner Bereich an der Spitze des Cantilevers mit einem reflektierenden Material beschichtet, minimiert sich das Auseinanderlaufen des Reflexes aufgrund der unterschiedlichen Biegung. Eine Kombination der Optimierung des Lichtweges mit speziell beschichteten Cantilevern sollte das Signal so verändern, dass es der Theorie wesentlich besser folgt.



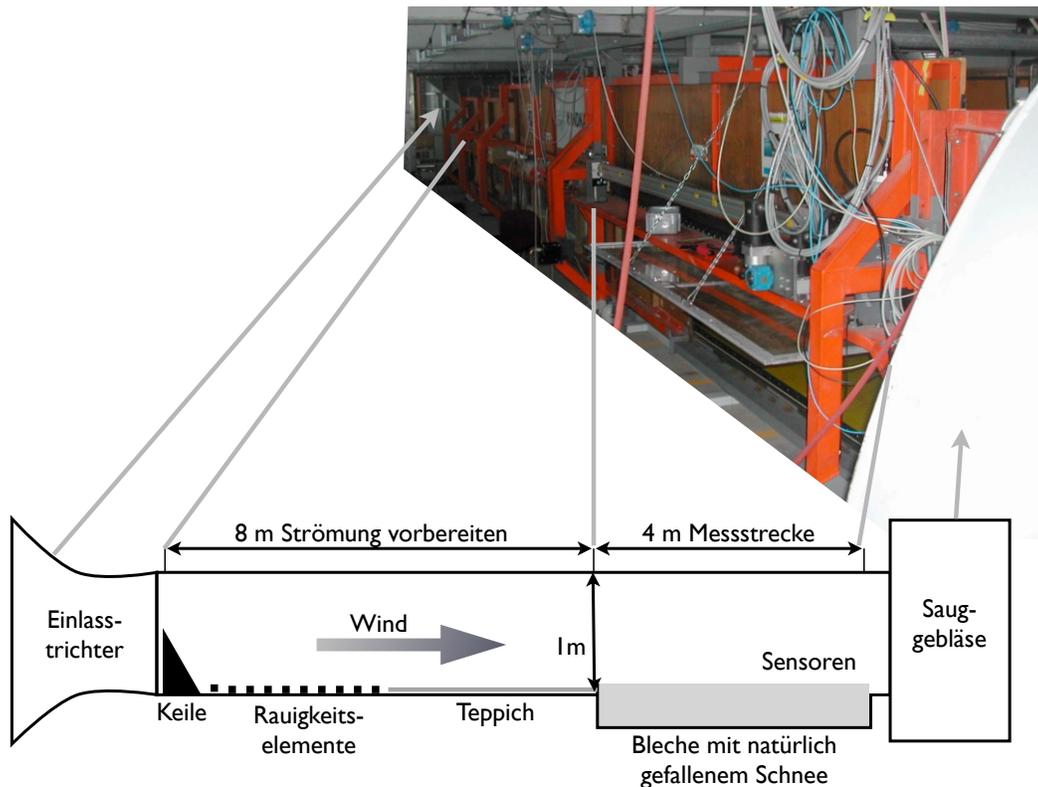
# Kapitel 5

## LCA - Messungen

*In diesem Kapitel werden Messungen vorgestellt und diskutiert, die in einer zwei-Phasen-Strömung (Luft - Schneepartikel) in einem Schneewindkanal in Davos durchgeführt wurden. Dabei lag der Fokus zum einen auf dem Verhalten des LCAs bei Einschlägen von Schneepartikeln auf dem Cantilever. Zum anderen wurden die Signale von Schneepartikeleinschlägen auf das LCA mit denen auf ein Hitzfilm-Anemometer verglichen, welche für Geschwindigkeitsmessungen in diesen Strömungen eingesetzt werden.*

### 5.1 Zwei Phasen Strömung Luft - Schneepartikel

Im Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) in Davos werden unter anderem Untersuchungen zur Schneeverwehung und Durchlüftung von Schneeschichten durchgeführt [13][14]. Dabei ist von Interesse ab welcher Windgeschwindigkeit Schneepartikel von dem Wind mitgetragen werden, wie dieses geschieht und wie die resultierende Oberfläche beschaffen ist. Im Schneewindkanal des SLF in Davos können diesbezüglich Messungen durchgeführt werden, bei denen unter anderem auch die Windgeschwindigkeit erfasst werden kann. Abbildung 5.1 zeigt den offenen Windkanal in Davos zusammen mit einer schematischen Zeichnung. Die Luft wird durch den Einlasstrichter direkt von draußen eingesaugt und wird auf einer Strecke von 8m mittels Keilen, Rauigkeitselementen und einem Teppich so konditioniert, dass eine Grenzschicht entsteht, die einer in der Natur vorkommenden ähnelt. In die Messstrecke werden Bleche eingebracht, die außerhalb des Windkanals natürlich gefallenen Schnee gesammelt haben. Oberhalb der Schneeschicht können die Sensoren mittels einer Traverse in unterschiedlichen Abständen zum Schnee positioniert werden. Der Windkanal ist in einem alten Bunker außerhalb von Davos aufgebaut und besitzt keine Heizung, so dass der Schnee in seiner Konsistenz nicht verändert wird. Auf diese Weise können Messungen bezüglich der Schneeverwehung unter realen Bedingungen im Windkanal durchgeführt werden. Eine ausführlichere Beschreibung und Charakterisierung findet sich in [12].

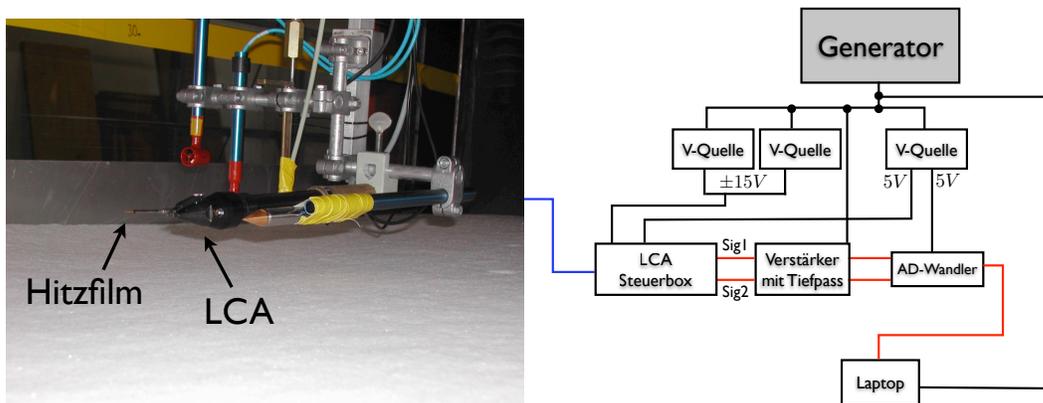


**Abbildung 5.1:** Schneewindkanal in Davos mit schematischer Zeichnung. Hinter dem Einlasstrichter wird die Strömung auf einer 8m langen Strecke mittels Keilen, Rauigkeitselementen und Teppich konditioniert. In die 4m lange Messstrecke werden Bleche mit natürlich gefallenem Schnee geschoben.

### 5.1.1 LCA - Messungen im Schneewindkanal I

Für Geschwindigkeitsmessungen in der zwei-Phasen-Strömung Luft - Schneepartikel wurden neben anderen Sensoren ein Hitzfilm-Anemometer und ein LCA, wie es in Kapitel 3.2 beschrieben ist, in die Messstrecke eingebracht und in einem Abstand von ca. 5cm über der Schneedecke positioniert (Abb. 5.2, links). Die Stromversorgung für den gesamten Komplex des Windkanals wurde mit Hilfe eines dieselbetriebenen Generators erzeugt. Zwei verbundene Spannungsversorgungen lieferten die erforderlichen  $\pm 15V$  für die im LCA integrierten Vorverstärker. Eine weitere Spannungsversorgung lieferte 5V für die Laserdiode und den AD-Wandler ADwin-pro mit CPU-T9 der Firma *ADwin*. Die beiden Ausgangssignale des PSD Elements (Sig1 und Sig2) wurden mit Hilfe eines Verstärkers vom Modell SR640 der Firma *Stanford Research System, INC* verstärkt und tiefpassgefiltert. Die verstärkten Signale wurden an den AD-Wandler weitergegeben und von dort

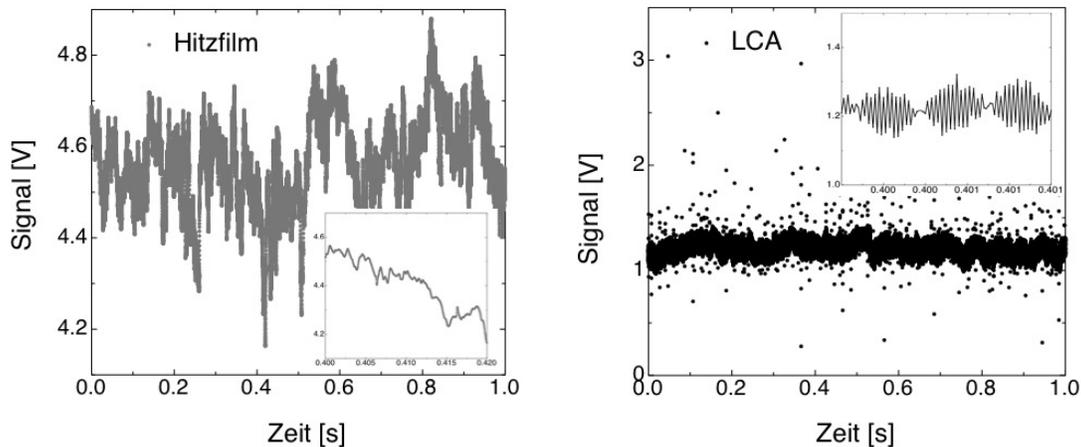
an den Rechner zum Speichern übertragen (Abb. 5.2, rechts). Die Daten der übrigen Sensoren wurden mit der Messtechnik des SLF aufgenommen. Es wurden Messungen bei schrittweise erhöhten Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Bei höheren Windgeschwindigkeiten werden mehr und mehr Schneepartikel von der Strömung erfasst und mitgetragen womit sich die Wahrscheinlichkeit, dass die Sensoren getroffen werden, erhöht. Treffen Schneepartikel auf die Sensoren werden die Messungen für eine gewisse Zeit verfälscht. Diese Einschläge sind der Grund für die Wahl von Hitzfilm-Anemometern für Geschwindigkeitsmessungen in dieser Luftströmung; Hitzdraht-Anemometer, die eine höhere zeitliche und räumliche Auflösung besitzen [10], sind zu fragil, um hier eingesetzt zu werden. In diesem Zusammenhang war es das Ziel dieses Versuches zu untersuchen in wieweit der Cantilever des LCAs robust gegenüber Einschlägen ist. Wie bereits in [2] gezeigt, besitzt das LCA eine vergleichbare Auflösung zu der eines Hitzdraht-Anemometers, womit, im Falle einer akzeptablen Robustheit gegenüber Einschlägen, das LCA eine alternative Messmethode in der zwei-Phasen-Strömung Luft - Schneepartikel mit erhöhter Auflösung darstellen würde. Während der Messungen wurden die



**Abbildung 5.2: Links:** Positionierung des Hitzfilm-Anemometers und des LCAs in der Messstrecke des Schneewindkanals. **Rechts:** Schematischer Messaufbau.

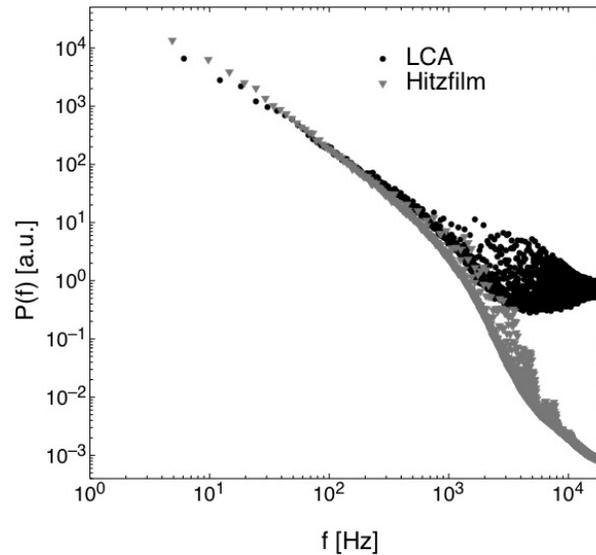
Daten des Hitzfilms mit einer Samplingfrequenz von  $40kHz$  und einem Tiefpassfilter von  $30kHz$  aufgenommen. Die Daten des Laser-Cantilever-Anemometers wurden mit einer Samplingfrequenz von  $100kHz$  und einem Tiefpassfilter von  $50kHz$  aufgenommen. Der verwandte Cantilever hatte eine Größe von  $140\mu m$  Länge und  $30\mu m$  Breite mit Fensterdesign. Abbildung 5.3 zeigt Ausschnitte der gemessenen Zeitserien des Hitzfilms und des LCAs. Dabei ist zu erkennen, dass das Signal des LCAs stark verrauscht ist. Zum einen wird das eigentliche Signal zusammengestaucht, da hohe Spannungspeaks eine bessere Aussteuerung des Signals verhindern; die maximale Ausgangsamplitude des verwandten Verstärkers lag bei  $\pm 5V$ . Beim detaillierten Betrachten des Signals (Abb. 5.3 rechts, Ausschnitt) wird

zum anderen deutlich, dass das eigentliche Signal von hochfrequenten Störsignalen überlagert ist. Als Ursache für die schlechte Qualität der gemessenen Signale des LCAs ist die Stromversorgung des Komplexes durch einen Generator heranzuziehen. Diese Versorgung unterliegt Schwankungen und Störungen, die sich in den Signalen des LCAs niederschlagen. Die genutzten Spannungsversorgungen für die einzelnen Komponenten des LCAs sowie deren Zusammenspiel und das Datenerfassungssystem sind anscheinend nicht in der Lage dieses zu kompensieren. Das Hitzfilm-Anemometer hingegen wurde mit einer Streamline der Firma Dantec angesteuert deren Elektronik besser die vorhandenen Störungen kompensieren kann (Abb. 5.3 links). Aufgrund der begrenzten Güte der Daten des LCAs



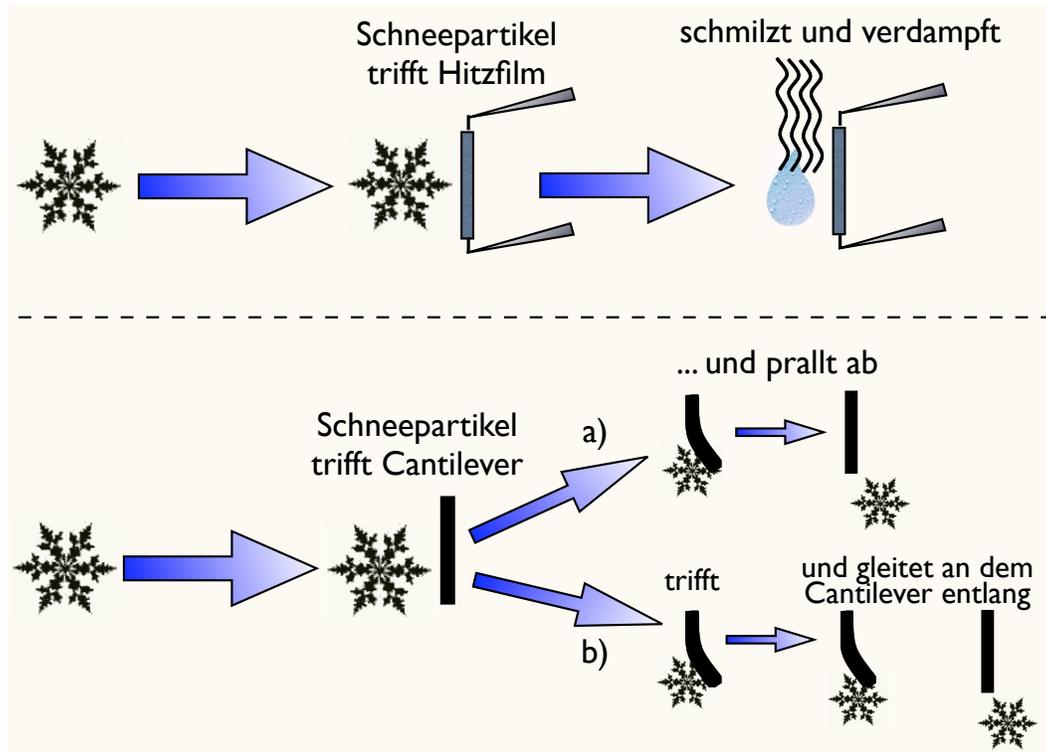
**Abbildung 5.3:** Links: Gemessenes Signal des Hitzfilm bei einer Windgeschwindigkeit von  $9\text{m/s}$ . Im kleinen Fenster ist ein Zoom auf  $20\text{ms}$  des Signals dargestellt. Rechts: Gemessenes Signal des LCAs bei einer Windgeschwindigkeit von  $9\text{m/s}$ . Im kleinen Fenster ist ein Zoom auf  $1\text{ms}$  des Signals dargestellt.

kann im Folgenden keine vollständige statistische Analyse dargestellt werden, die zum einen den Einfluss von Einschlägen auf das jeweilige Anemometer genauer untersucht, und zum anderen die Unterschiede in den Auflösungsvermögen aufzeigt. Abbildung 5.4 zeigt einen Vergleich der gemessenen Leistungsspektren des Hitzfilm Anemometers (grau) und des LCAs (schwarz). Die eingestellte Windgeschwindigkeit am Windkanal betrug  $9\text{m/s}$ . Es zeigt sich, dass das Signal des LCAs stärker verrauscht ist, als das des Hitzfilms. Auch die Dynamik des LCA Signals ist sehr viel schlechter, was auf die schlechte Aussteuerung des Messsignals zurückzuführen ist. Abbildung 5.5 zeigt schematisch, was bei Einschlägen auf die Anemometer geschieht. Bei einem Hitzfilm Anemometer tauen die Schneepartikel nach einem Einschlag und hinterlassen einen Wasserfilm auf dem Hitzfilm, der den Hitzfilm stärker abkühlt, als die vorhandene Strömung dieses würde. Bis das gesamte Wasser verdampft ist, täuscht das gemessene Signal eine zu hohe Wind-



**Abbildung 5.4:** Leistungsspektren von Hitzfilm (grau) und LCA (schwarz) bei einer Windgeschwindigkeit von  $9\text{m/s}$ .

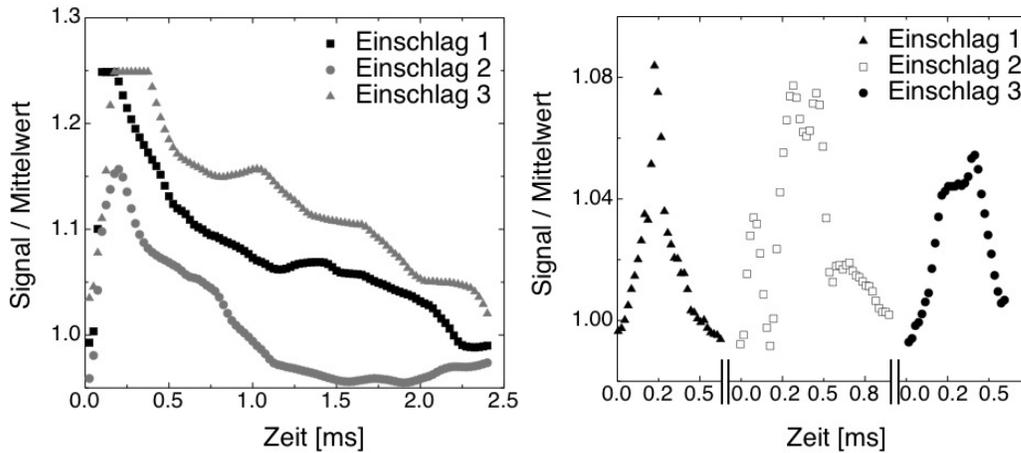
geschwindigkeit vor (Abb. 5.5 oben). Bei einem Einschlag auf den Cantilever des LCAs sind mehrere Interaktionen vorstellbar, die jeweils von der Struktur der Schneepartikel abhängen. Schneepartikel sind keine kugelförmigen Objekte sondern besitzen komplexe Strukturen. Abbildung 5.5 (unten) zeigt zwei mögliche Interaktionen zwischen einem solch komplexen Schneepartikel und dem Cantilever des LCAs. In a) trifft das Partikel den Cantilever und prallt sofort wieder ab, in b) trifft das Partikel auf den Cantilever, haftet aufgrund seiner Struktur an dem Cantilever und wird durch die Strömung entlang des Cantilevers geschoben bis es diesen schließlich verlässt. Nach diesen Annahmen sollten alle Einschläge auf dem Hitzfilm einen charakteristischen Verlauf zeigen, wonach Einschläge auf dem Cantilever des LCAs unterschiedliche Verläufe aufweisen sollten.



**Abbildung 5.5:** Schematische Zeichnung von Einschlägen von Schneepartikeln auf Hitzfilm und LCA. **Oben:** Beim Hitzfilm schmilzt der Schnee und hinterlässt Wasser auf dem Hitzfilm welches verdampft. **Unten:** a) das Partikel trifft den Cantilever und prallt sofort wieder ab, wo hingegen es bei b) an dem Cantilever haftet und an diesem entlang gleitet.

Abbildung 5.6 zeigt gemessene Daten von Einschlägen von Schneepartikeln auf den beiden Sensoren, normiert auf den jeweiligen Mittelwert der Zeitserie. Links sind exemplarisch drei Schneepartikeleinschläge auf dem Hitzfilm dargestellt. Für jeden Einschlag weisen die gemessenen Signale einen identischen Verlauf auf: Zunächst ein starkes Ansteigen welches dem Abtauen des Schneepartikels entspricht. Die fallende Flanke entsteht, wenn das Wasser auf dem Hitzfilm verdunstet und die zu hohe Kühlung durch das Wasser langsam nachlässt. Die unterschiedlichen Amplituden und Zeitkonstanten beim Abfallen sind mit Einschlägen von Schneepartikeln unterschiedlicher Größe zu erklären; je größer das Partikel, desto mehr Wasser trägt nach dem Tauen zur Kühlung bei. Bei Einschlägen von Schneepartikeln auf dem LCA (Abb. 5.6, rechts) weisen die gemessenen Daten unterschiedliche Charakteristika auf. Die schwarzen Dreiecke zeigen einen schnellen Anstieg des Signals, welches auf gleiche Weise sofort wieder abfällt. Dieses könnte durch ein Partikel erzeugt worden sein, welches den Cantilevers trifft und

wieder abprallt. Die beiden anderen Kurven steigen schnell an, verweilen kurze Zeit auf einem Plateau bevor sie wieder absinken. Dieses Verhalten könnte mit einem Einschlag auf dem Cantilever identifiziert werden bei dem das Partikel noch einige Zeit an dem Cantilever haftet bevor es von dem Wind weggetragen wird. Aus allen gemessenen Einschlägen auf dem Hitzfilm kann ein mittlerer Einschlag

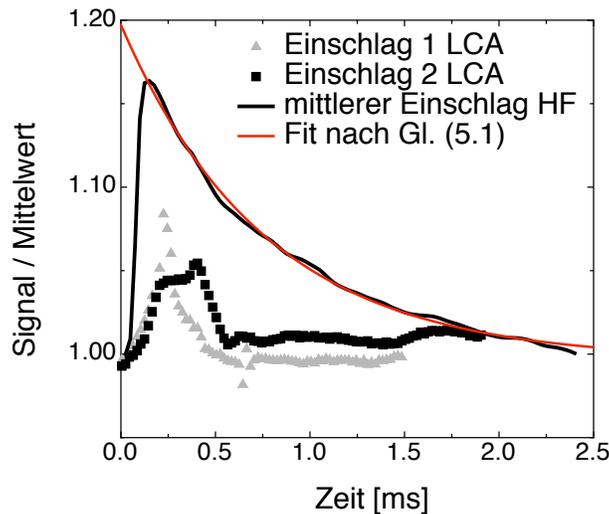


**Abbildung 5.6:** Links: Gemessene Daten von Einschlägen auf dem Hitzfilm. Rechts: Gemessene Daten von Einschlägen auf dem Cantilever des LCAs.

bestimmt werden, Abbildung 5.7 schwarze Linie, welcher mit einer exponentiell abfallenden Funktion

$$f(x) = A \cdot \exp\left(-\frac{x}{t_0}\right) + const., \quad (5.1)$$

hier als rote Linie dargestellt, angenähert werden kann. Mit  $t_0 = 0,72ms$  ergibt sich eine Zeit von  $t = 1,67ms$  nach der die Überschätzung um 90% gefallen ist. Im Vergleich zu Einschlägen auf dem Cantilever (Abb. 5.7) zeigt sich, dass das Signal des LCAs bei einem Einschlag zum einen in der Amplitude geringer überschießt und zum anderen die Messungen zeitlich kürzer beeinflusst werden. Bei den LCA Daten ist im Schnitt nach  $t = 0,6ms$  die Amplitude so weit abgefallen, dass man davon ausgehen kann, dass wieder das reale Signal gemessen wird.



**Abbildung 5.7:** Direkter Vergleich von zwei Einschlägen auf das LCA (graue und schwarze Symbole) mit dem bestimmten mittleren Einschlag auf dem Hitzfilm (schwarze Linie). Die rote Linie beschreibt den Fit nach Gl. (5.1) an den mittleren Einschlag auf dem Hitzfilm.

Resultierend aus diesen Messungen zeigt sich, dass das LCA durchaus in partikelgeladenen Strömungen eingesetzt werden kann. Speziell im Fall der Schneepartikel hat das LCA den Vorteil, dass das gemessene Signal weniger stark und zusätzlich kürzer beeinflusst wird, was bei nachfolgenden Analysen einen geringeren Fehler nach sich zieht.

### 5.1.2 LCA - Messungen im Schneewindkanal II

Die Messungen im Schneewindkanal mit dem LCA aus dem letzten Kapitel haben gezeigt, dass es Probleme mit Rauschekopplung über das Stromnetz gab, wodurch die gemessenen Signale für statistische Analysen unbrauchbar wurden. Um diesem Problem bei einer weiteren Messzeit im Schneewindkanal Herr zu werden wurde das bestehende LCA zu einem System umgebaut, welches unabhängig von einem örtlichen Stromnetz eingesetzt werden kann. Folgende Modifikationen wurden dafür vorgenommen:

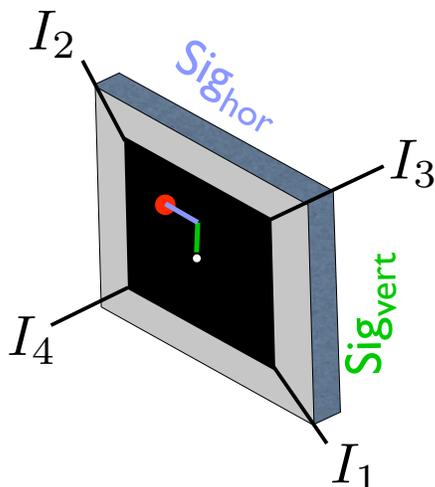
- Die Laserdiode wird mittels der am USB Port eines Computers anliegenden Spannung betrieben. Zusätzlich wurde ein Laser-Driver in das LCA integriert, welcher zum einen Spannungsspitzen abfängt und eine gleichbleibende Ausgangsleistung gewährleistet. Das Schaltbild ist im Anhang B.2 abgedruckt
- Die Spannungsversorgung des integrierten Vorverstärkers wird auf Batteriebetrieb umgestellt. Zwei 9V Batterien werden so verschaltet, dass sie

konstante 6V liefern, mit denen neue Operationsverstärker in der Vorverstärkerschaltung versorgt werden. Leuchtdioden zeigen an, wenn die Batteriespannung unter 5,8V fällt. Das Schaltbild ist im Anhang B.3 abgedruckt.

- Der AD-Wandler ADwin-pro wurde durch ein NI USB-6009 der Firma *National Instruments* ersetzt. Dieses System transferiert die Daten mittels USB und wird ebenfalls über USB mit Spannung versorgt [27].

Diese Veränderungen ergeben ein Messsystem, welches unabhängig von einem Stromnetz betrieben werden kann. **Im Folgenden werden alle Messungen mit diesem autarken LCA Messsystem durchgeführt.**

Um ein besseres Verständnis darüber zu bekommen, was bei einem Einschlag auf dem Cantilever passiert, wurde das bisherige eindimensionale PSD Element durch ein zweidimensionales PSD Element ersetzt. Dieses Bauteil ermöglicht die Vermessung der Verbiegung des Cantilevers in zwei Dimensionen. Abbildung 5.8 zeigt schematisch den Aufbau eines solchen Elements (für eine genauere Beschreibung siehe [21]). Durch Verrechnung der induzierten Photoströme  $I_1$  bis  $I_4$ , welche an den Ecken abgegriffen werden, können die horizontale und vertikale Signalkomponente ( $Sig_{hor}$  und  $Sig_{vert}$ ) bestimmt werden. Diese Signale beschreiben die Position des Lichtschwerpunktes relativ zu dem Mittelpunkt der aktiven Fläche des 2D PSD Elements. Die Photoströme werden mittels einer Transimpedanzschal-



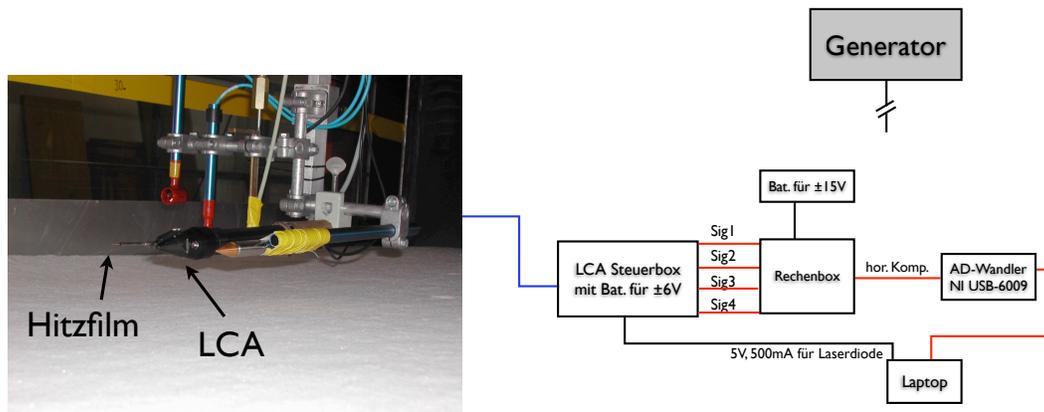
$$Sig_{hor} = \frac{(I_2 + I_4) - (I_1 + I_3)}{\sum_{n=1}^4 I_n}$$

$$Sig_{vert} = \frac{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)}{\sum_{n=1}^4 I_n}$$

**Abbildung 5.8:** Schematischer Aufbau des 2D PSD Elements. Die horizontale (hellblau) und vertikale (grün) Signalkomponente des Lichtschwerpunktes ergeben sich durch Verrechnung der induzierten Photoströme  $I_1$  bis  $I_4$ .

tung in Spannungen umgewandelt und verstärkt. Das Schaltbild ist in Anhang B.4 abgedruckt. Mit einem solchen PSD Element kann festgestellt werden, ob und in welchem Maße sich der Cantilever bei einem Einschlag eines Schneepartikels verdreht. Der genutzte AD-Wandler hat die Möglichkeit 8 Kanäle aufzunehmen, diese aber nicht gleichzeitig. Der AD-Wandler verfügt über einen Multiplexer, wodurch ein zeitlicher Versatz zwischen den einzelnen Kanälen entsteht. Bei der Verrechnung der vier Einzelsignale würde sich dadurch ein systematischer Fehler ergeben. Aus diesem Grund wurde eine Schaltung entwickelt, welche die analogen Signale vor der Digitalisierung verrechnet. Die Schwierigkeit lag hierbei in der Division, welche mit einer Schaltung, wie sie in Anhang B.5 abgedruckt ist, umgesetzt wurde. Die Spannungsversorgung für diese Schaltung (Rechenbox) erfolgt über Batterien.

Abbildung 5.9 zeigt schematisch den Messaufbau des autarken LCA Messsystems, welcher für die Messkampagne verwandt wurde. Leider konnte bis zum Beginn der Messphase nur eine dieser Rechenboxen fertiggestellt werden, wodurch nur die Aufnahme einer Komponente möglich war. Es wurde die horizontale Komponente aufgezeichnet, welche der Auslenkung des Cantilevers in Hauptbiegerichtung entspricht.



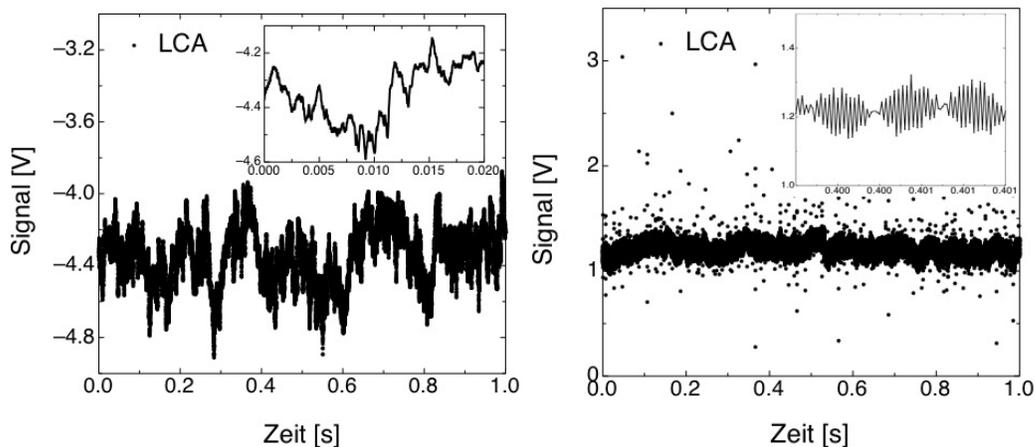
**Abbildung 5.9:** Schematischer Messaufbau des autarken LCA Messsystems im Schneewindkanal. Das System arbeitet unabhängig von dem Generator des Komplexes.

Während der Messzeit ist kein Neuschnee gefallen, weshalb die Versuche nicht mit frisch gefallenem Schnee durchgeführt werden konnten. Stattdessen wurde alter Schnee, der schon angetaut und wieder gefroren war, durch Sieben wieder aufbereitet. Resultierend waren schwerere, gröbere Schnee- und Eispartikel in der Strömung, welche bei Einschlägen einen größeren Impuls hatten und den Cantilever schon nach kurzer Zeit zerstörten. Aus diesem Grund liegen nur wenige Daten von Einschlägen vor.

Durch die Temperaturänderung von ca.  $22^{\circ}\text{C}$  Zimmertemperatur zu den ca.

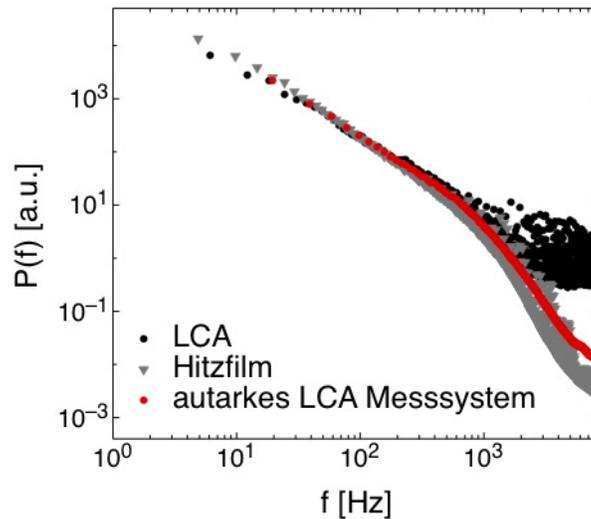
$-10^{\circ}\text{C}$ , die in dem Schneewindkanal vorherrschten, sind im LCA Verspannungen entstanden, so dass sich einige Kontaktstellen auf den Platinen zeitweise lösten. Dadurch wurden nicht alle vier Signale des PSD Elements an die Rechenbox weitergegeben, wodurch eine Kalibrierung und die Bestimmung der Geschwindigkeiten unmöglich wurde. Dieser Fehler konnte in den wenigen Tagen der Messzeit auch nicht behoben werden. Resultierend daraus können nur Aussagen über die Verbesserung der Signalqualität gemacht werden.

Abbildung 5.10 (links) zeigt einen Ausschnitt von 1s aus der gemessenen Zeitserie des Signals in Hauptbiegerichtung des Cantilevers bei einer Geschwindigkeit von  $9\text{m/s}$ . Rechts ist zum Vergleich noch einmal ein Ausschnitt eines gemessenen Signals eines LCAs aus Kapitel 5.1.1 dargestellt. Es zeigt sich, dass das Signal des neuen LCAs weniger Rauschen aufweist. Durch das Fehlen von Spannungspeaks kann das Signal besser angesteuert werden. Auch der Zoom in die Zeitreihe zeigt, dass die Umbauten zu einem autarken System, welches unabhängig von dem vorhandenen Stromnetz arbeitet, den gewünschten Erfolg in der Qualität des Messsignals gebracht haben. Selbiges spiegelt sich im Leistungsspektrum wi-



**Abbildung 5.10: Links:** Ausschnitt einer gemessenen Zeitserie mit einem neuen LCA. In dem kleinen Fenster ist ein Zoom auf  $20\text{ms}$  des Signals dargestellt. **Rechts:** Ausschnitt einer gemessenen Zeitserie mit einem "alten" LCA. In dem kleinen Fenster ist ein Zoom auf  $20\text{ms}$  des Signals dargestellt.

der. Abbildung 5.11 zeigt vergleichend ein Leistungsspektrum gemessen mit einem "alten" LCA (schwarze Kreise), eines gemessen mit einem autarken LCA Messsystem (rote Kreise) und eines gemessen mit Hitzfilm (graue Dreiecke, Daten aus Kapitel 5.1.1) für eine Windgeschwindigkeit von  $9\text{m/s}$ . Auch hier zeigt sich, dass das Rauschen in dem Signal des neuen LCAs sehr viel geringer ist.



**Abbildung 5.11:** Vergleich gemessener Leistungsspektren mit Hitzfilm (graue Dreiecke), LCA (schwarze Kreise) und autarkem LCA Messsystem (rote Kreise).

## 5.2 Diskussion und Ausblick

Die Messungen haben gezeigt, dass selbst Cantilever, die nicht speziell für partikelgeladene Strömungen konstruiert wurden, bis zu einem gewissen Maße Einschläge aushalten. Im Fall von Schneepartikeln konnte gezeigt werden, dass Einschläge auf dem Cantilever das Messsignal kürzer und weniger beeinflussen als Einschläge auf einem Hitzfilm. Für zukünftige Anwendungen ist es durchaus denkbar stabilere Cantilever herzustellen, die gezielt in solchen Strömungen eingesetzt werden können.

Die Entwicklung des LCAs von einem System mit externer Spannungsversorgung hin zu einem autarken Messsystem hat zu einer Verbesserung in der Signalqualität bewirkt und zum anderen die Mobilität erhöht. Mit dem neuen System ist es möglich auch an Orten zu messen, an denen keine Netzspannung zur Verfügung steht. Gleichzeitig müssen keine Einschränkungen in der Leistungsfähigkeit des LCAs hingenommen werden.

# Kapitel 6

## Richtungsabhängigkeit des LCAs

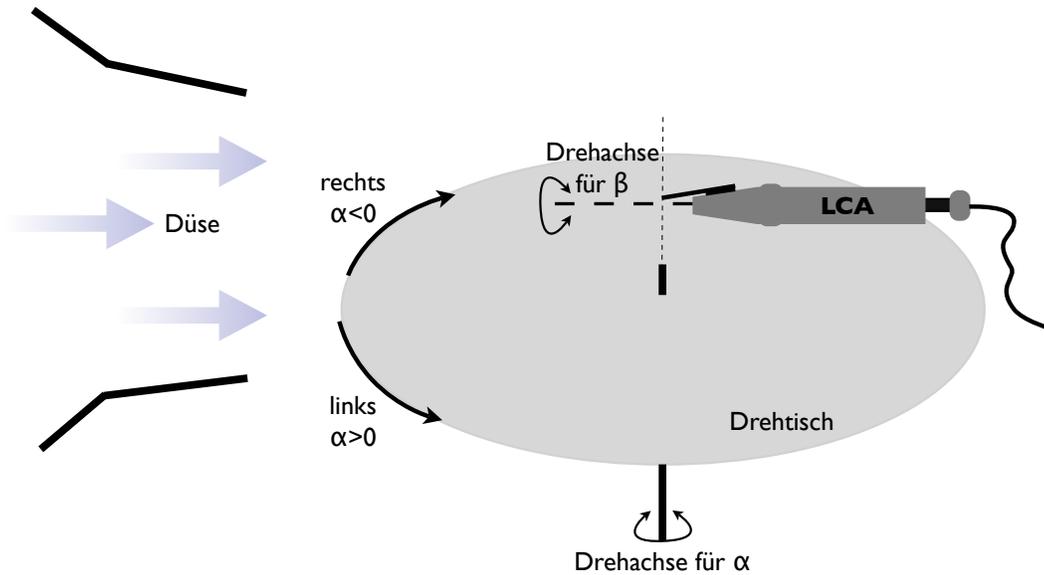
*Wie in [3] bereits in ersten Messungen gezeigt wurde, misst das LCA unter Schräganströmung Geschwindigkeiten, abweichend von den theoretisch prognostizierten. In diesem Kapitel wird die Richtungsabhängigkeit der Geschwindigkeitsmessungen systematisch untersucht. Abschließend wird eine Theorie vorgestellt, welche eine Erklärung für die Überschätzung bei schräger Anströmung liefert.*

### 6.1 Messung der Richtungsabhängigkeit

Die Geschwindigkeit wird durch die auf den Cantilever wirkende Kraft gemessen (siehe Kapitel 3.1), welche eine vektorielle Größe ist. Bei schräger Anströmung sollte die senkrechte Projektion der Kraft auf den Cantilever das Signal erzeugen [8], so dass sich die gemessene Geschwindigkeit bei Anströmung unter dem Winkel  $\alpha$  verhalten sollte wie

$$v(\alpha) = \cos(\alpha) \cdot v(0^\circ). \quad (6.1)$$

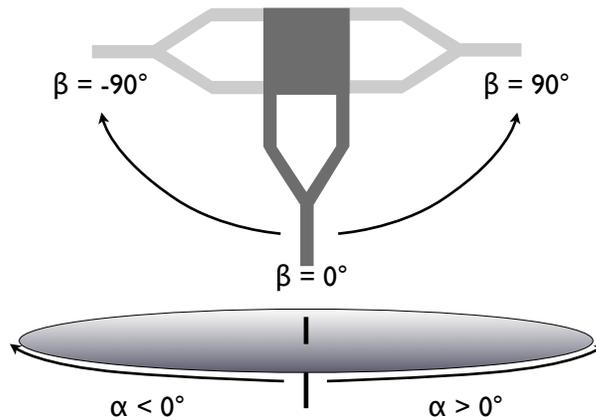
Um die Richtungsabhängigkeit der Geschwindigkeitsmessungen des LCAs zu untersuchen, wurde ein Cantilever von  $140\mu\text{m}$  Länge und  $35\mu\text{m}$  Breite verwendet. Das LCA wurde hierfür auf einem drehbaren Holztisch im Windkanal montiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Cantilever direkt auf der Drehachse positioniert ist, damit beim Drehen des Tisches der Cantilever ortsfest bleibt und nicht das Windprofil des Windkanals durchläuft. Ein negativer Drehwinkel  $\alpha$  entspricht hier einer Drehung nach rechts, ein positiver Drehwinkel  $\alpha$  entspricht einer Drehung nach links (Abbildung 6.1).



**Abbildung 6.1:** Aufbau zur Vermessung der Richtungsabhängigkeit des LCAs. Das LCA ist so positioniert, dass sich der Cantilever direkt auf der Drehachse des Drehtisches ( $\alpha$ ) befindet.  $\beta$  beschreibt die Drehung um die Längsachse des LCAs.

Die Ausrichtung des Cantilevers zur Drehrichtung kann ebenfalls einen Einfluss auf die Messungen haben; hier wurden zwei Ausrichtungen betrachtet:

- 1 waagerechte Ausrichtung zum Drehtisch; das Vorzeichen der Ausrichtung der Cantileverspitze ( $\beta = \pm 90^\circ$ ) ist analog zum Drehwinkel  $\alpha$  (vergleiche Abb. 6.2)
- 2 senkrechte Ausrichtung zum Drehtisch mit  $\beta = 0^\circ$  (vergleiche Abb. 6.2)



**Abbildung 6.2:** Definition der Ausrichtung des Cantilevers zur Drehrichtung.  $\beta = \pm 90^\circ$  entspricht einer waagerechten Ausrichtung zum Drehtisch. Dabei entspricht ein positives  $\beta$  einer Ausrichtung der Cantileverspitze in positiver Drehrichtung  $\alpha$  und umgekehrt.

## 6.2 Messung der Richtungsabhängigkeit des LCAs mit eindimensionalem PSD

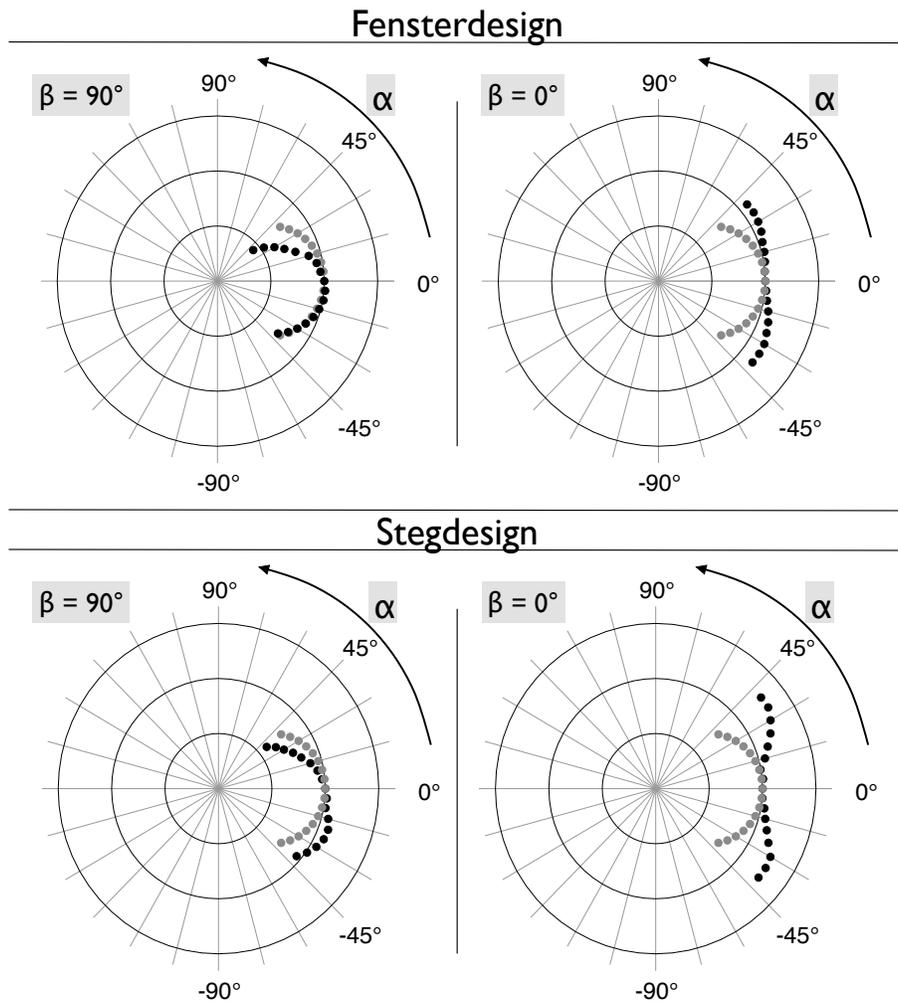
### Richtungsabhängigkeit bei Cantileverchips mit unterschiedlichen Designs

Ein LCA mit einem eindimensionalen PSD Element wurde mit einem Cantilever der Größe  $140\mu\text{m}$  Länge und  $35\mu\text{m}$  Breite und einem Fensterdesign und anschließend mit einem Cantilever gleicher Größe und Stegdesign versehen. Das LCA wurde jeweils auf dem Drehtisch montiert und Messungen bei einer festen Windgeschwindigkeit von  $8\text{m/s}$  mit schrittweise variierenden Anströmwindwinkeln ( $\Delta\alpha = 5^\circ$ ) wurden durchgeführt. Abbildung 6.3 zeigt im Polardiagramm den Verlauf der gemessenen Geschwindigkeiten (schwarze Kreise) für beide Designs bei Anströmwindwinkeln von  $\alpha = -40^\circ$  bis  $\alpha = 40^\circ$  für  $\beta = 90^\circ$  (links) und  $\beta = 0^\circ$  (rechts). Die Geschwindigkeiten sind auf die gemessene Geschwindigkeit bei  $\alpha = 0^\circ$  normiert. Die grauen Kreise repräsentieren die erwarteten Geschwindigkeiten, die sich aus der Kosinusprojektion der wirkenden Kraft bei schräger Anströmung ergeben.

Für  $\beta = 90^\circ$  (links) und  $\alpha > 0^\circ$  misst das LCA für beide Designs eine zu geringe Windgeschwindigkeit. Dieses kann damit erklärt werden, dass der Cantilever für steigende  $\alpha$  immer weiter in den Nachlauf des Armes gerät und dementsprechend weniger Kraft auf den Cantilever wirkt. Für  $\alpha < 0^\circ$  misst das LCA mit Fensterdesign (oben) die erwartete Kosinusprojektion, das LCA mit Stegdesign (unten) hingegen eine zu große Geschwindigkeit. Die Unterschiede hierfür müssen

im Design liegen. Welche Effekte genau hierfür verantwortlich sind, kann in dieser Arbeit nicht geklärt werden.

Für beide Designs zeigt sich eine Überschätzung der gemessenen Geschwindigkeiten für alle  $\alpha$  mit  $\beta = 0^\circ$  (rechts). Zusätzlich zu der Überschätzung ist eine leichte Asymmetrie zu erkennen. Für negative  $\alpha$  wurde eine höhere Geschwindigkeit gemessen als für positive  $\alpha$ . Im Folgenden werden Messungen dargestellt, die

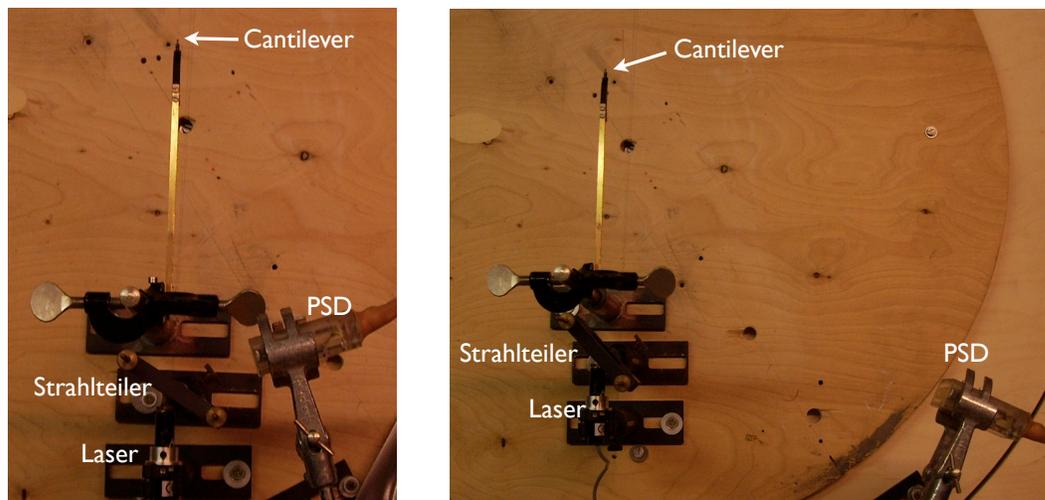


**Abbildung 6.3:** Polarplot für Cantilever mit Fenster- und Stegdesign für  $\alpha = -40^\circ$  bis  $\alpha = 40^\circ$  und  $\beta = 90^\circ$  (links) bzw.  $\beta = 0^\circ$  (rechts). Dargestellt sind die gemessenen Geschwindigkeiten normiert auf die Geschwindigkeit bei einem Anströmwinkel von  $\alpha = 0^\circ$  (schwarze Kreise) und die zu erwartende Kosinusprojektion der Geschwindigkeit (graue Kreise). Die radiale Einheit beträgt 0,5, die Zirkulare beträgt  $15^\circ$ .

zur Klärung dieser Überschätzungen und der Asymmetrie führen. Hierbei werden folgende Punkte untersucht:

- Einfluss des Gehäuses auf die Richtungsabhängigkeit
- Einfluss einer möglichen Torsion des Cantilevers auf die Richtungsabhängigkeit

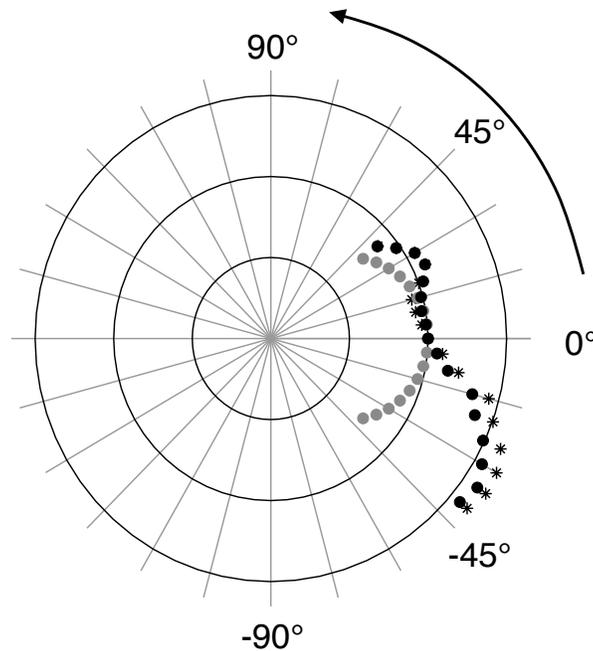
Um den Einfluss des LCA Gehäuses auf die Messungen zu untersuchen, wurde ein offener Aufbau gemäß Abbildung 6.4 realisiert. Hierbei wurde der Arm mit dem Cantilever an einer ca.  $17\text{cm}$  langen Verlängerung angeschraubt. Die längeren optischen Wege und die daraus resultierende größere Auslenkung des reflektieren Lichtes machten es erforderlich, das bisherige PSD Element mit einer aktiven Fläche von  $6\text{mm}$  Länge durch eines mit einer aktiven Fläche von  $30\text{mm}$  Länge zu ersetzen. Dieses PSD Element wurde in zwei unterschiedlichen Abständen montiert, um einen eventuellen Aufstau effekt an den Komponenten zu minimieren. Bei einer Windgeschwindigkeit von  $8\text{m/s}$  und einer Cantileverausrichtung von



**Abbildung 6.4:** Aufbau zur Untersuchung des Einflusses des LCA Gehäuses. **Links:** Cantilever an verlängertem Messingarm und PSD Element nah am Strahlteiler positioniert. **Rechts:** Cantilever an verlängertem Messingarm und PSD zur Minimierung des Aufstau effektes seitlich vom Strahlteiler entfernt.

$\beta = 0^\circ$  wurden die Anströmwinkel von  $\alpha = -40^\circ$  bis  $\alpha = 40^\circ$  durchgefahren. Die mit dem offenen Aufbau gemessenen Geschwindigkeiten sind in Abbildung 6.5 dargestellt. Dabei stellen die schwarzen Kreise die Ergebnisse dar, die mit dem PSD nahe am Strahlteiler gemessen wurden, die schwarzen Sterne die Ergebnisse mit dem größeren Abstand des PSD Elements zum Strahlteiler. Die Daten wurden jeweils auf die Geschwindigkeit normiert, die bei  $\alpha = 0^\circ$  gemessen wurden.

Die grauen Kreise repräsentieren die erwartete Kosinusprojektion der Geschwindigkeit. Die Ergebnisse aus Abbildung 6.5 zeigen, dass der Trend der Überhöhung der gemessenen Geschwindigkeit unter schräger Anströmung auch mit dem offenen Aufbau vorhanden ist. Dies deutet darauf hin, dass das Gehäuse nicht oder nicht ausschließlich für die Überschätzung der Geschwindigkeit bei schräger Anströmung verantwortlich ist. Zusätzlich tritt bei dem offenen Aufbau eine extreme



**Abbildung 6.5:** Polarplot für Cantilever mit Fensterdesign und offenem Aufbau. Dargestellt sind die gemessenen Geschwindigkeiten normiert auf die Geschwindigkeit bei einem Anströmwinkel von  $\alpha = 0^\circ$ . Die radiale Einheit beträgt 0,5, die Zirkulare beträgt  $15^\circ$ . Die schwarzen Kreise stellen die Ergebnisse mit dem PSD Element nahe dem Strahlteiler dar, die schwarzen Sterne die Ergebnisse, die mit dem größeren Abstand zwischen PSD Element und Strahlteiler gemessen wurden. Die grauen Kreise repräsentieren die ideale Kosinusprojektion

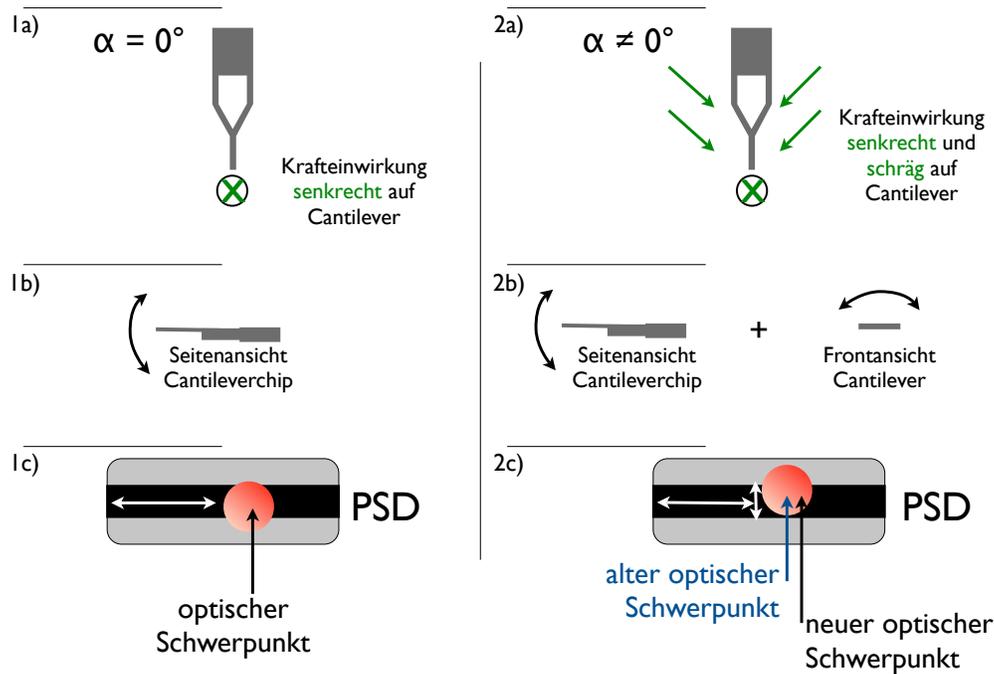
Asymmetrie auf, die die Überhöhung für  $\alpha < 0^\circ$  stärker hervorhebt als für  $\alpha > 0^\circ$ . Dieses kann dadurch verursacht werden, dass zum einen der Cantilever an einem längeren Arm befestigt ist, der sich unter Krafteinwirkung verbiegen kann. Zum anderen sind auch alle anderen Komponenten dem Wind ausgesetzt, wodurch sich ebenfalls kleine Veränderungen ergeben können. Solche Einflüsse verändern den Lichtweg des Lasers und wirken sich auf die gemessenen Signale und damit auf die gemessene Geschwindigkeit aus. Bei dem offenen Aufbau kann das die Asymmetrie erklären. Bei der kompakten Bauweise des LCAs ist die einzige Komponente, die sich aufgrund von Krafteinwirkung verbiegen kann und einen

negativen Einfluss auf die Messung haben kann, der Arm, auf dem der Cantilever montiert ist. Durch die große Steifigkeit des Armes kann eine Verbiegung als Grund für die Überschätzung ausgeschlossen werden.

Zusammenfassend konnten das Gehäuse und eine Verbiegung des Armes aufgrund der Messergebnisse für die Winkelabhängigkeit des LCAs als Hauptursache ausgeschlossen werden. Als letzte Komponente bleibt nur noch der Cantilever und der Cantileverchip, die einen Einfluss auf die Messungen bei schräger Anströmung haben können. Abbildung 6.6 2a bis 2c illustriert, was bei schräger Anströmung mit  $\alpha \neq 0^\circ$  im Vergleich zur Anströmung mit  $\alpha = 0^\circ$  (Abb. 6.6 1a bis 1c) mit dem Cantilever geschehen könnte, sowie den Einfluss auf den reflektierten Laserstrahl und den resultierenden Effekt auf das Signal des PSD Elements.

Wie schon in Kapitel 4 dargestellt, besitzt der Laserspot ein unregelmäßiges Intensitätsprofil welches sich auch in der Reflexion widerspiegelt. Ein solcher Reflex wird in Abb. 6.6 1c und 2c durch einen nicht homogen ausgefüllten Spot symbolisiert. Das PSD Element liefert zwei Photoströme, die durch Verrechnung ein Signal liefern, welches der Position des optischen Schwerpunktes des eingestrahlt Lichtfleckes zugeordnet werden kann. Im Falle eines Anströmwinkels von  $\alpha = 0^\circ$  wirkt die Kraft ausschließlich senkrecht auf den Cantilever (Abb. 6.6 1a). Der Cantilever biegt sich daher nur in der Hauptbiegerichtung (Abb. 6.6 1b) und der optische Schwerpunkt des Laserlichtes liefert das zugehörige Signal für diese Position (Abb. 6.6 1c). Bei der Kalibrierung des LCAs wird die Bewegung des Laserspots auf dem PSD Element für eine senkrechte Anströmung ( $\alpha = 0^\circ$ ) abgetastet und den entsprechenden Geschwindigkeiten zugeordnet.

Für einen Anströmwinkel  $\alpha \neq 0^\circ$  wirkt zum einen die Kosinusprojektion der Kraft senkrecht auf den Cantilever, zusätzlich wirken aber auch Kräfte, welche schräg angreifen (Abb. 6.6 2a). Die Kombination der wirkenden Kräfte verursacht zum einen eine Verbiegung in Hauptbiegerichtung des Cantilevers, zum anderen eine Torsion um die Achse des Cantilevers (Abb. 6.6 2b). Eine Verbiegung mit gleichzeitiger Torsion würde den Laserspot in zwei Raumrichtungen bewegen lassen, wodurch ein anderer Bereich des Laserspots auf der aktiven Fläche des PSD Elements ist, im Vergleich zu einer Anströmung mit  $\alpha = 0^\circ$  (Abb. 6.6 2c). Die Intensität des Laserspots resultiert so in einem neuen optischen Schwerpunkt, welcher, angewandt auf die Kalibrierung für  $\alpha = 0^\circ$ , eine Missinterpretation der Geschwindigkeit zur Folge hat.



**Abbildung 6.6:** **1a:** Für einen Anströmwinkel von  $\alpha = 0^\circ$  wirkt die Kraft senkrecht auf den Cantilever. **1b:** Die Verbiegung findet nur in Hauptbiegerichtung statt. **1c:** Der optische Schwerpunkt liefert zu der Geschwindigkeit zugehöriges Signal. **2a:** Bei Anströmung mit  $\alpha \neq 0^\circ$  wirken Kräfte sowohl senkrecht (Kosinusprojektion) als auch schräg auf den Cantilever. **2b:** Kombination der Kräfte resultiert in Verbiegung in Hauptbiegerichtung und Torsion des Cantilevers. **2c:** Der Reflex bewegt sich in zwei Raumrichtungen auf dem PSD Element, wodurch sich ein neuer Bereich des Laserspots auf der aktiven Fläche des PSD Elements befindet, welcher einen neuen optischen Schwerpunkt liefert. Neues Signal sorgt für Missinterpretation der Geschwindigkeit.

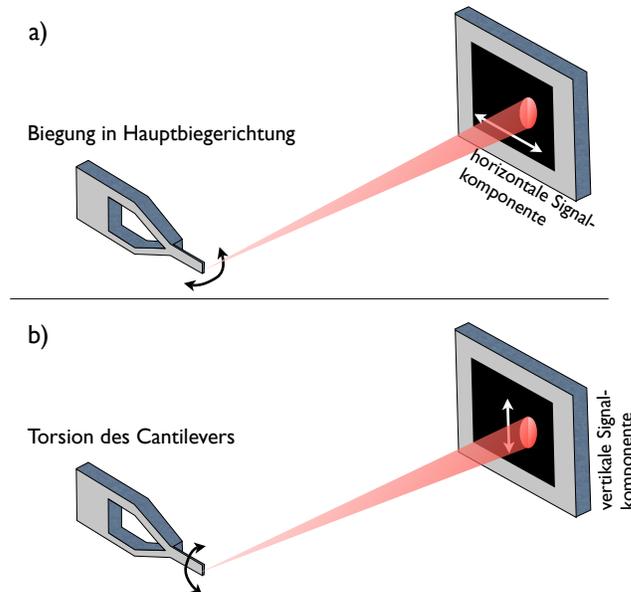
Bei dieser Interpretation der gemessenen Daten könnte bei einer entsprechenden Verteilung der Intensitäten des reflektierten Laserlichts auch eine systematische Unterschätzung der Geschwindigkeiten auftreten. Bei den hier durchgeführten Messungen, sowie bei den in [3] zu diesem Thema durchgeführten Messungen, wurden nur Überschätzungen der Geschwindigkeiten gemessen. Ob dieses Zufall ist, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden.

Um die Theorie der Bewegung des Laserreflexes in zwei Raumrichtungen weiter untersuchen zu können, wird ein LCA eingesetzt, welches statt eines eindimensionalen PSD Elements ein zweidimensionales besitzt (siehe Kapitel 5.1.2).

## 6.3 Messung der Richtungsabhängigkeit des LCAs mit zweidimensionalem PSD

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Richtungsabhängigkeit des LCAs mit einem Sensor vermessen, in dem ein eindimensionales PSD Element eingebaut war. Im Folgenden wird ein LCA verwandt, welches mit einem zweidimensionalen PSD Element ausgestattet wurde (2D LCA). Damit kann eine eventuelle Torsion des Cantilevers vermessen werden.

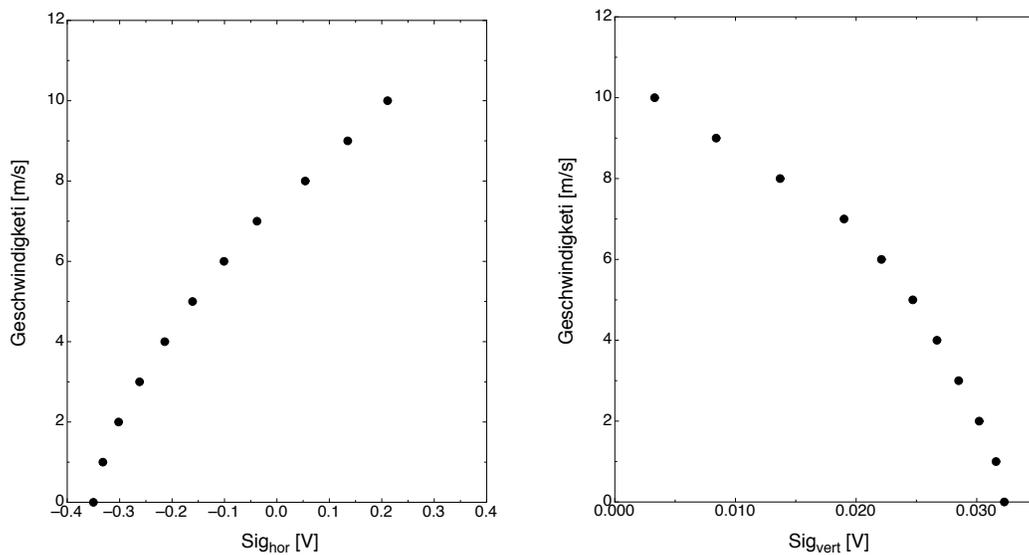
Für die Messungen wurde derselbe Cantilever genutzt, der auch schon in Kapitel 6.2 auf dem LCA montiert wurde:  $140\mu\text{m}$  Länge und  $35\mu\text{m}$  Breite mit Fenster Design. Wie in Kapitel 5.1.2 bereits beschrieben, liefert das zweidimensionale PSD Element vier Photoströme, die nach Verrechnung die horizontale und vertikale Signalkomponente der Position des Lichtschwerpunkts auf der aktiven Fläche des PSD Elements liefern. Das PSD Element und der Cantilever sind so zueinander ausgerichtet, dass die Verbiegung des Cantilevers in Hauptbiegerichtung der horizontalen Signalkomponente der Position entspricht. Eine Torsion bewirkt eine Veränderung der vertikalen Signalkomponente (vergleiche Abb. 6.7). Abbildung 6.8 zeigt den Verlauf der gemessenen Spannungen der horizon-



**Abbildung 6.7:** **a:** Biegung des Cantilevers in Hauptbiegerichtung liefert horizontale Signalkomponente der Position des Laserspots auf dem PSD Element. **b:** Torsion des Cantilevers liefert vertikale Signalkomponente der Position des Laserspots auf dem PSD Element

talen (links) und vertikalen (rechts) Signalkomponente für einen Anströmwinkel

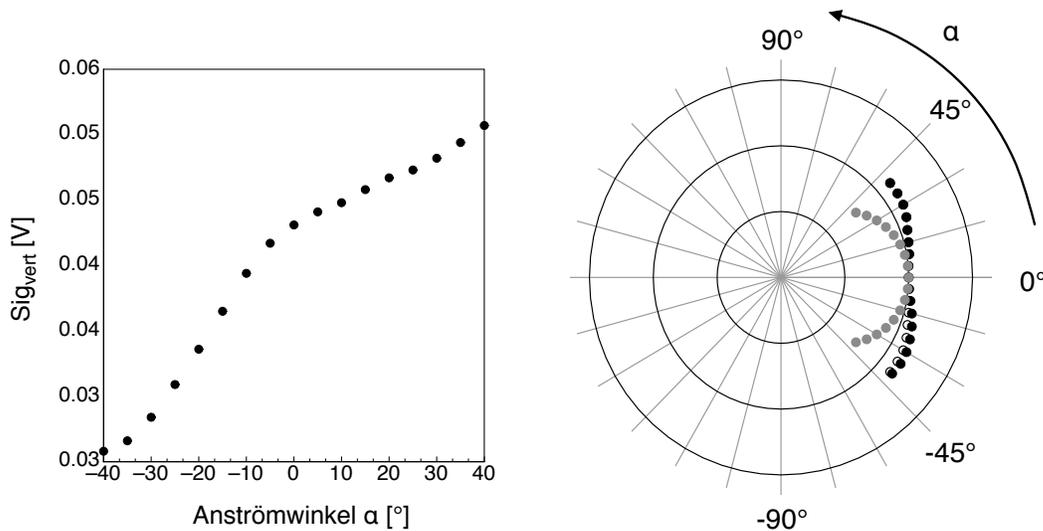
von  $\alpha = 0^\circ$ . Es zeigt sich, dass nicht nur die horizontale Signalkomponente mit steigender Strömungsgeschwindigkeit ansteigt, sondern auch die vertikale. Dieses ist damit zu erklären, dass der Cantilever nicht perfekt parallel zu dem PSD Element ausgerichtet ist, und der Reflex daher schräg über die aktive Fläche des PSD Elements läuft, wodurch sich auch die vertikale Signalkomponente verändert. Der geringe Spannungsbereich der vertikalen Signalkomponente weist darauf hin, dass die Schrägstellung minimal ist. Bei winkelabhängigen Messungen sollten,



**Abbildung 6.8: Links:** Kalibrierkurve der horizontalen Signalkomponente für einen Anströmwinkel von  $\alpha = 0^\circ$ . **Rechts:** Kalibrierkurve der vertikalen Signalkomponente für einen Anströmwinkel von  $\alpha = 0^\circ$ .

wenn eine Torsion auftritt, sowohl die horizontale Signalkomponente als auch die vertikale Signalkomponente von diesen Messungen für  $\alpha = 0^\circ$  abweichen. Abbildung 6.9 (links) zeigt den Verlauf der vertikalen Signalkomponente bei einer Anströmgeschwindigkeit von  $v = 8\text{ m/s}$  für variierende Anströmwinkel  $\alpha$  im Bereich von  $-40^\circ < \alpha < 40^\circ$ . Es zeigt sich, dass sich die vertikale Signalkomponente in Abhängigkeit von dem Anströmwinkel  $\alpha$  verändert. Zusätzlich ist zu erkennen, dass sich für Winkel  $\alpha < 0^\circ$  das Signal stärker ändert, als für Winkel  $\alpha > 0^\circ$ . Die gemessenen Spannungen sind im Vergleich zum maximal möglichen Spannungsbereich in vertikaler Richtung von ca.  $\pm 0,6\text{ V}$  so gering, dass angenommen werden kann, dass in vertikaler Richtung immer der gesamte Reflex auf der aktiven Fläche liegt. Der rechte Graph der Abbildung 6.9 zeigt im Polardiagramm die aus der horizontalen Signalkomponente bestimmten Geschwindigkeiten für variierende Anströmwinkel (scharze Kreise) basierend auf der Kalibrierung für  $\alpha = 0^\circ$  (siehe Abb. 6.8, links). Die Geschwindigkeiten sind auf die Geschwindigkeit für  $\alpha = 0^\circ$  normiert. Die grauen Kreise stellen die theoretisch zu erwartende Kosi-

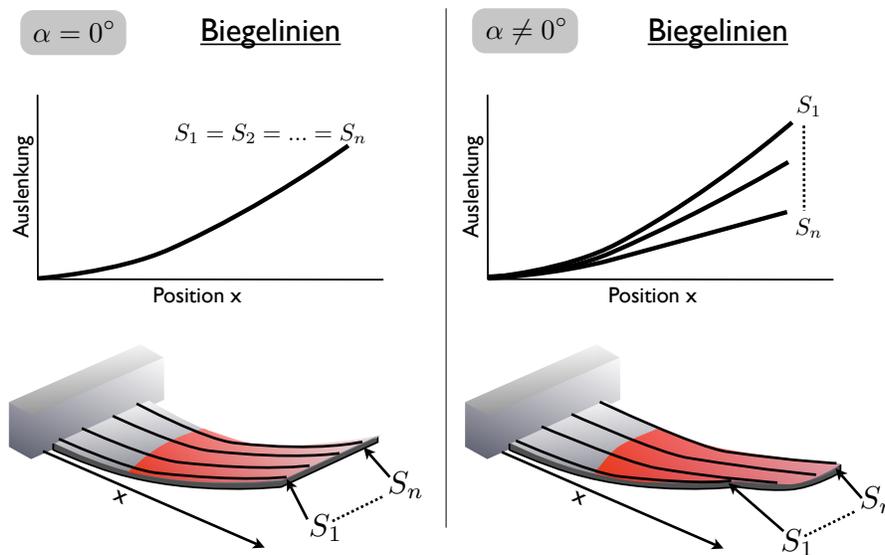
nusprojektion dar. Es zeigt sich, dass auch die Messungen mit dem zweidimensionalen PSD Element die Überhöhung bei schräger Anströmung aufweisen. Die offenen Kreise in dem Polardiagramm stellen die Messwerte für  $\alpha > 0^\circ$  gespiegelt an der  $0^\circ$  Achse dar. Es zeigt sich, dass Werte der horizontalen Signalkomponente ebenfalls für Anströmwinkel von  $\alpha > 0^\circ$  kleiner sind, als jene für Winkel  $\alpha < 0^\circ$ . Diese Tatsache zeigt, dass die horizontale und vertikale Signalkomponente nicht unabhängig voneinander sind. Die Messungen mit dem 2D LCA haben gezeigt,



**Abbildung 6.9:** **Links:** Verlauf der vertikalen Signalkomponente für variierende Anströmwinkel  $\alpha$ . **Rechts:** Polardiagramm der normierten Geschwindigkeiten bestimmt aus der horizontalen Signalkomponente des 2D PSDs. Normiert wurde auf die Geschwindigkeit bei einem Anströmwinkel von  $\alpha = 0^\circ$ . Die radiale Einheit beträgt 0,5, die Zirkulare beträgt  $15^\circ$ . Die schwarzen Kreise stellen die gemessenen Daten dar, die offenen Kreise die Spiegelung der Messwerte für  $\alpha > 0^\circ$  an der  $0^\circ$  Achse. Die grauen Kreise repräsentieren die ideale Kosinusprojektion.

dass eine Verdrehung des Cantilevers bei schräger Anströmung auftritt. Es zeigt sich weiter, dass diese Verdrehung einen Einfluss auf die horizontale Signalkomponente des PSD Elements hat. Eine mögliche Erklärung für die Überschätzung der Geschwindigkeit bei schräger Anströmung aufgrund einer Torsion liefert Abbildung 6.10. Die linke Skizze zeigt die Verbiegung eines Cantilevers ohne Torsion. Die Intensitätsverteilung des reflektierten Lichts auf dem PSD Element wird durch eine Überlagerung von Reflexionen an jeder Stelle des Cantilevers erzeugt. Dieses wurde schon in Kapitel 4.2 genutzt, um das PSD Signal zu simulieren. Für die Simulationen wurde die Verteilung über die Breite des Cantilevers als homogen angesehen, so dass die Berücksichtigung eines Längsschnitts ausreichte

(hier z.B.  $S_1$ ). In der Realität ist die Verteilung der Intensität über die Breite inhomogen, wodurch sich der resultierende Schwerpunkt aus einer erneuten Überlagerung der Schwerpunkte der einzelnen Längsschnitte  $S_1$  bis  $S_n$  ergibt. Bei einem Anströmwinkel von  $\alpha = 0^\circ$  besitzen die Längsschnitte  $S_1$  bis  $S_n$  alle dieselbe Biegelinie (Abb. 6.10, links), was in einer Bewegung der Reflexion nur in horizontaler Richtung resultiert. Bei schräger Anströmung (Abb. 6.10, rechts) findet eine Torsion des Cantilevers statt, was in unterschiedlichen Biegelinien  $S_1$  bis  $S_n$  resultiert. Die Überlagerung der Schwerpunkte dieser neuen Biegelinien führt zu einer Bewegung sowohl in vertikaler Richtung als auch in horizontaler Richtung, welche der einfachen Kosinusprojektion nicht mehr folgt. Wegen der inhomogenen Intensitätsverteilung auf dem Cantilever hat auch jeder Längsschnitt eine unterschiedliche Verteilung. Daraus resultierend ergibt sich ein anderes Signal, je nachdem, ob  $S_1$  oder  $S_n$  die größte Auslenkung aufweist, was die auftretende Asymmetrie in der Richtungsabhängigkeit erklärt. Dieser Ansatz



**Abbildung 6.10:** Links: Biegung des Cantilevers bei gerader Anströmung mit  $\alpha = 0^\circ$ . Die Biegelinien auf allen Längsschnitten  $S_1$  bis  $S_n$  sind alle identisch. Rechts: Biegung des Cantilevers für  $\alpha \neq 0^\circ$ . Die Biegelinien der Längsschnitte  $S_1$  bis  $S_n$  sind alle unterschiedlich.

erklärt zusätzlich das geringe Signal in vertikaler Richtung. Das Maximum der Intensität des Laserlichts befindet sich nicht an der Spitze Cantilevers sondern ist näher zum Fenster lokalisiert. Dort sind die Unterschiede in den Biegelinien  $S_1$  bis  $S_n$  nur noch gering, so dass das resultierende Signal nur wenig in vertikaler Richtung wandert. Im Kapitel 9 werden Modifikationen an dem LCA vorgestellt, die unter anderem auch eine Verstärkung der vertikalen Signalkomponente bewirken könnten.

# Kapitel 7

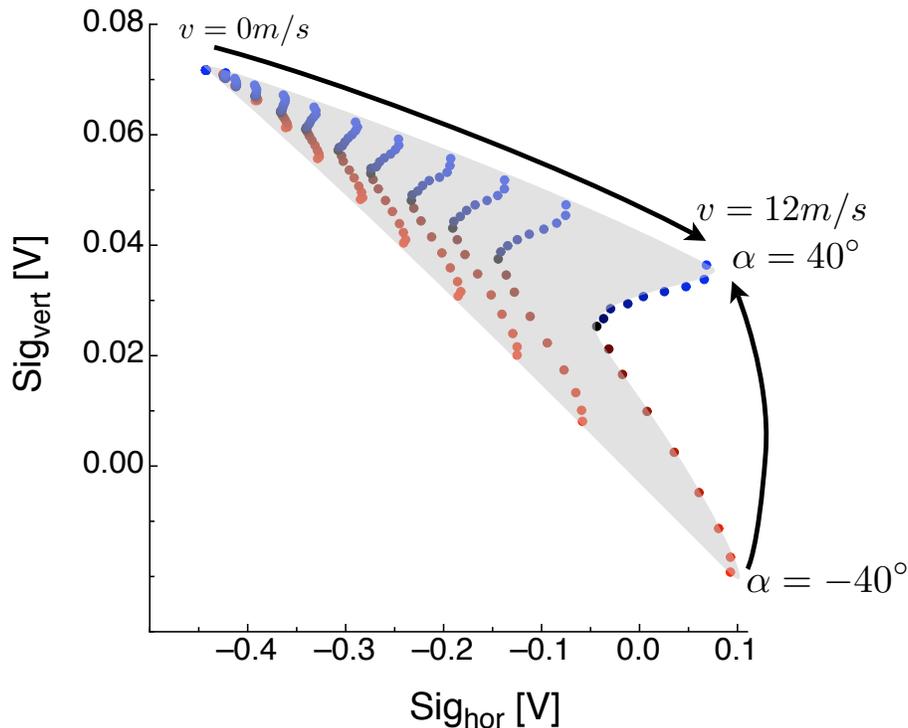
## 2D LCA - Kalibrierung

*Die Ergebnisse aus Kapitel 6.3 haben gezeigt, dass sich die gemessene horizontale und vertikale Signalkomponente des 2D LCA mit dem Anströmwinkel ändern. In diesem Kapitel wird dargestellt, dass die Kombination von diesen beiden Signalen eindeutig einem Anströmwinkel zugeordnet werden kann. Resultierend daraus wird eine Routine vorgestellt, die es ermöglicht sowohl den Anströmwinkel als auch die resultierende Geschwindigkeit und damit die longitudinale und transversale Geschwindigkeitskomponente der Strömung zu bestimmen.*

### 7.1 2D LCA Kalibrierungsdaten

In Kapitel 6.3 wurde für eine feste Geschwindigkeit die horizontale und vertikale Signalkomponente des 2D PSD Elements für unterschiedliche Anströmwinkel betrachtet. Abbildung 7.1 zeigt den Verlauf der vertikalen Signalkomponente über der horizontalen für  $-40^\circ < \alpha < 40^\circ$  mit  $\Delta\alpha = 5^\circ$  und variierende Geschwindigkeiten  $v$ , aufgenommen für eine Ausrichtung von  $\beta = 0^\circ$ . Es zeigt sich, dass für jede Kombination von Anströmwinkel  $\alpha$  und Strömungsgeschwindigkeit  $v$  genau eine Kombination von horizontalem und vertikalem Messsignal des PSD Elements vorliegt. Nur bei sehr kleinen Strömungsgeschwindigkeiten ( $v < 3\text{m/s}$ ) liegen die Messwerte zu nah beieinander, um noch eine eindeutige Zuordnung im gesamten Winkelbereich zu ermöglichen. Diese eindeutige Zuordnung der gemessenen Daten liefert somit die Grundlage für eine Kalibrierung, mit deren Hilfe Anströmwinkel und resultierende Geschwindigkeit sowie die longitudinale und transversale Komponente der Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden können.

Wie schon in Kapitel 4 gezeigt wurde, hängt das gemessene Signal von der Intensitätsverteilung im Laserspot, der Oberflächenbeschaffenheit der reflektierenden Fläche, der Fokussierung des Laserlichts und der Position des Cantilevers innerhalb des Laserstrahls ab. Leichte Veränderungen in diesen Parametern haben einen Einfluss auf die gemessenen Signale. Daher muss vor jeder Messreihe eine neue Kalibrierung vorgenommen werden.



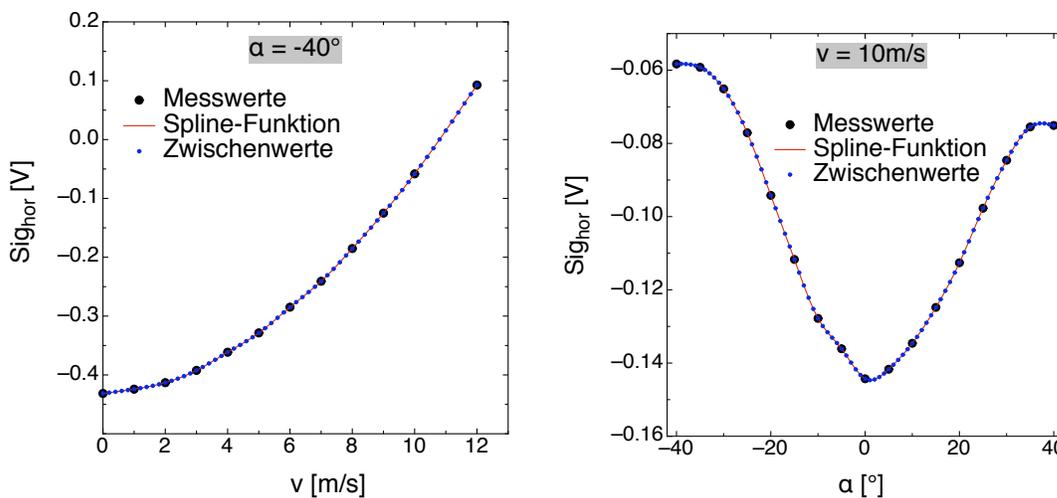
**Abbildung 7.1:** Verlauf von vertikaler Signalkomponente des PSD Messsignals ( $Sig_{vert}$ ) über horizontaler ( $Sig_{hor}$ ) für Anströmwinkel  $-40^\circ < \alpha < 40^\circ$  mit  $\Delta\alpha = 5^\circ$  und variierenden Strömungsgeschwindigkeiten  $v$ . Die graue Fläche markiert den von der Kalibrierung erfassten Bereich.

## 7.2 Kalibrierung gemessener 2D LCA Zeitreihen

Die gemessene Kalibrierung des 2D LCAs besteht nicht aus einer einfachen Funktion, sondern beschreibt eine Fläche in der Ebene, die sich aus den horizontalen und den vertikalen Signalkomponenten aufspannt (vergleiche Abb. 7.1). Für die Kalibrierung gemessener Daten werden zunächst weitere Datenpunkte erzeugt, die in die graue Fläche aus Abb. 7.1 fallen. Dazu werden mit Hilfe von Spline-Funktionen Zwischenwerte sowohl im Geschwindigkeits- als auch im Anströmwinkelbereich erzeugt. Dafür werden zunächst für jeden vermessenen Anströmwinkel  $\alpha$  die horizontalen und vertikalen Signalkomponenten über der Geschwindigkeit aufgetragen und mit Spline-Funktionen angenähert. Mit diesen Funktionen können dann Zwischenwerte für beliebige Geschwindigkeiten berechnet werden. In Abbildung 7.2 (links) sind exemplarisch die Messwerte der horizontalen Signalkomponente (schwarze Kreise) für einen festen Anströmwinkel von  $\alpha = -40^\circ$  über der Geschwindigkeit dargestellt. Die rote Linie beschreibt die Spline-Funktion mit der die Messwerte angenähert wurden. Die blauen Punkte markieren die erzeug-

ten Zwischenwerte mit einer Auflösung  $\Delta v = 0,2\text{m/s}$ .

Anschließend werden für alle  $v$ , auch die zuvor neu berechneten Strömungsgeschwindigkeiten, die horizontalen und vertikalen Signalkomponenten über den Anströmwinkel aufgetragen und mit Spline-Funktionen angenähert. Auf diese Weise können Zwischenwerte für beliebige Anströmwinkel berechnet werden. In Abbildung 7.2 (rechts) sind exemplarisch die Messwerte der horizontalen Signalkomponente (schwarze Kreise) für eine feste Anströmgeschwindigkeit von  $v = 10\text{m/s}$  dargestellt. Die rote Linie beschreibt die zugrundeliegende Spline-Funktion. Die blauen Punkte markieren die erzeugten Zwischenwerte mit einer Auflösung  $\Delta\alpha = 1^\circ$ .

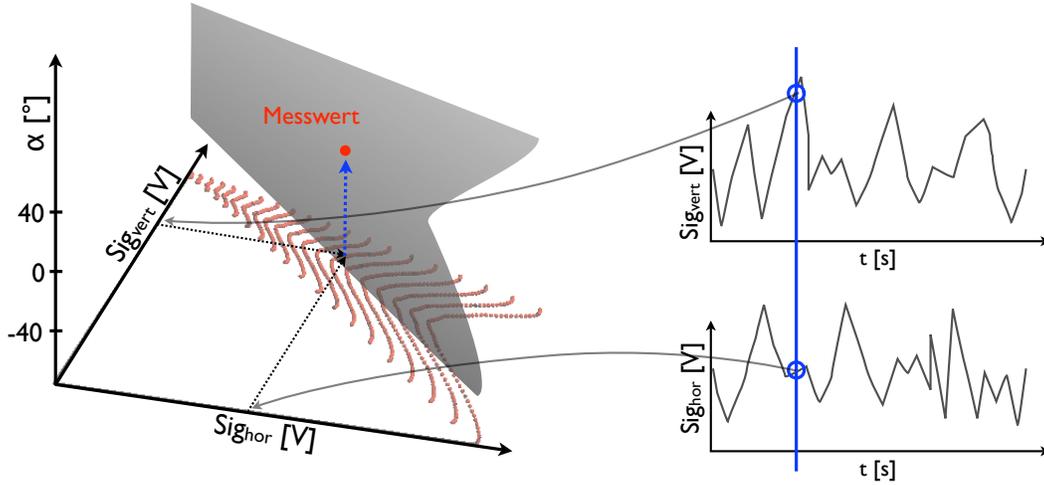


**Abbildung 7.2:** Links: Horizontale Signalkomponente (schwarze Kreise) über Geschwindigkeit für  $\alpha = -40^\circ$ . Die rote Linie beschreibt die Spline-Funktion, die blauen Punkte die erzeugten Zwischenwerte. Rechts: Horizontale Signalkomponente (schwarze Kreise) über Anströmwinkel für  $v = 10\text{m/s}$ . Die rote Linie beschreibt die Spline-Funktion, die blauen Punkte die erzeugten Zwischenwerte.

Basierend auf diesen erweiterten Kalibrierdaten wird ein Raum mit

- $x$  = horizontale Signalkomponente,  $y$  = vertikale Signalkomponente,  $z$  = Anströmwinkel

aufgespannt, wobei die  $z$ -Werte auf einer Fläche in dem Raum liegen. Bei der Kalibrierung wird jeder gemessenen Kombination aus horizontaler und vertikaler Signalkomponente der zugehörige Punkt auf der Fläche zugeordnet, welcher den Anströmwinkel als Messwert widerspiegelt. In Abbildung 7.3 ist diese Methode schematisch dargestellt. Die Realisierung dieser Methode wurde in der Programmiersprache "R" umgesetzt. Wichtigste Auszüge dieses Programms mit Erläuterungen sind im Anhang C abgedruckt. Grundlegend dafür ist ein Algorithmus,



**Abbildung 7.3:** Schematische Darstellung der Kalibriermethode für das 2D LCA. Jeder gemessenen Kombination aus horizontaler und vertikaler Signalkomponente (rechte Seite) wird der Messwert auf der Fläche der Anströmwinkel (graue Fläche, links) zugeordnet.

welcher an nicht äquidistante Daten einer dreidimensionalen Matrix eine Oberfläche fittet [22]<sup>1</sup>. Er liefert eine Beschreibung dieser Oberfläche, die es ermöglicht, auch Punkte zwischen den diskreten Messwerten zu bestimmen. Mit dieser Kalibriermethode kann der Anströmwinkel  $\alpha$  zu jedem gemessenen Zeitpunkt  $t$  bestimmt werden.

Mit den bestimmten Anströmwinkeln  $\alpha(t)$  kann in einem zweiten Schritt der Geschwindigkeitsbetrag  $v(t)$  bestimmt werden. Dazu wird zu jedem Anströmwinkel  $\alpha(t_n)$  der zugehörige Verlauf der Anströmgeschwindigkeit über der horizontalen Signalkomponente  $v(\text{Sig}_{hor}, \alpha(t_n))$  erzeugt. Das Inverse ist im linken Graphen der Abbildung 7.2 dargestellt. Mit Hilfe der horizontalen Signalkomponente  $\text{Sig}_{hor}(t_n)$  kann dann der Geschwindigkeitsbetrag  $v(\text{Sig}_{hor}(t_n), \alpha(t_n))$  berechnet werden. Dieses wird für jeden Zeitschritt  $t_n$  wiederholt und liefert damit die gesamte Zeitreihe  $v(t)$ . Aus den Anströmwinkeln  $\alpha(t)$  und den Geschwindigkeitsbeträgen  $v(t)$  können dann die longitudinale  $v_{long}(t)$  und transversale  $v_{trans}(t)$  Komponente der Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden.

$$v_{long}(t) = v(t) \cdot \cos(\alpha(t)) \quad (7.1)$$

$$v_{trans}(t) = v(t) \cdot \sin(\alpha(t)) \quad (7.2)$$

Das 2D LCA bietet somit grundlegend die Möglichkeit auf der Größe des Cantilevers Geschwindigkeitsmessungen in zwei Dimensionen durchzuführen.

<sup>1</sup>Dieser Algorithmus ist in "R" bereits implementiert und wird ohne Diskussion auf mögliche Fehler verwandt.

## 7.3 Universalität der 2D Kalibrierung

Das Biegeverhalten, sei es bei gerader oder schräger Anströmung, ist durch die mechanischen Eigenschaften des Cantilevers bestimmt. Unterschiede in der Stärke der gemessenen Auslenkung hängen, im Fall der idealen Abtastung an nur einem Punkt, lediglich von dem Abtastpunkt auf dem Cantilever ab und können daher durch eine Verschiebung und einen Faktor ausgeglichen werden. Betrachtet man zwei beliebige Signale in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit die sich verhalten wie

$$Sig_1(\alpha, v) = const_1 + m_1(\alpha) \cdot v^2 \quad (7.3)$$

$$Sig_2(\alpha, v) = const_2 + m_2(\alpha) \cdot v^2 \quad (7.4)$$

und damit der Theorie des Biegebalkens folgen, erreicht man durch Auflösen der Gleichung (7.4) nach  $v^2$  und anschließendem Einsetzen in Gleichung (7.3)

$$Sig_1(\alpha, v) = (const_1 - \frac{m_1(\alpha)}{m_2(\alpha)} \cdot const_2) + \frac{m_1(\alpha)}{m_2(\alpha)} \cdot Sig_2(\alpha, v). \quad (7.5)$$

Zwei ideale Richtungskalibrierungen eines Cantilevers mit unterschiedlichen Abtastpunkten können daher einfach ineinander überführt werden<sup>2</sup>. Die Charakteristik der Richtungsabhängigkeit bleibt somit erhalten und ist eindeutig für jeden Cantilever.

Bei dem 2D LCA wurde bisher gezeigt, dass eben nicht dieser ideale Fall der Reflexion an einem Punkt vorliegt, sondern dass die Eigenschaften des Laserspots einen erheblichen Einfluss auf das Signal haben. Es kann daher nicht von vornherein davon ausgegangen werden, dass unterschiedliche Richtungskalibrierungen ineinander überführt werden können. Ist der Einfluss der Intensitätsverteilung auf dem Cantilever oder des Herauslaufens des Reflexes aus der aktiven Fläche des PSD Elements dominierend, so ist ein Verhalten nach Gleichung (7.5) nicht zu erwarten.

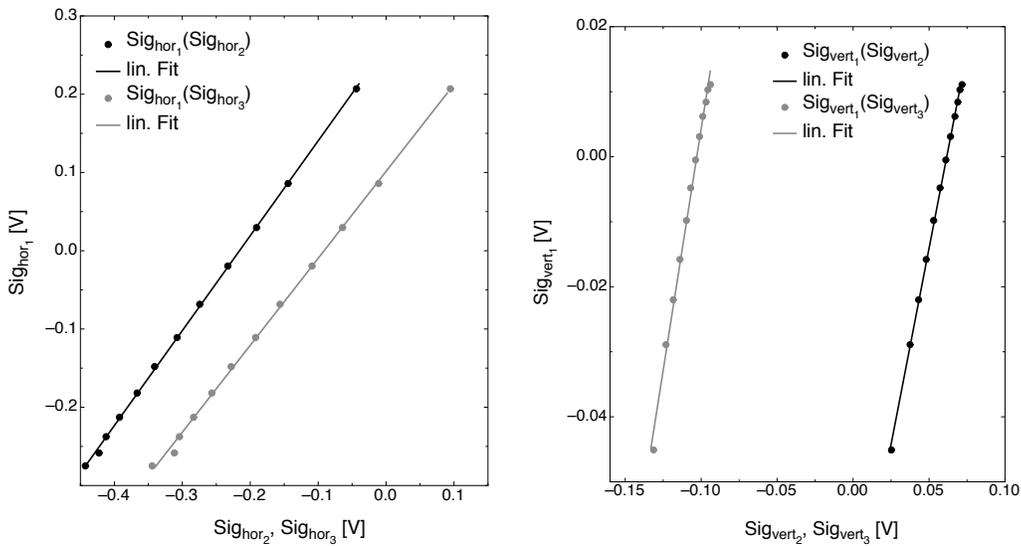
Abbildung 7.4 (links) zeigt die horizontale Signalkomponente ( $Sig_{hor_1}$ ) einer gemessenen *Kalibrierung 1* für  $\alpha = 0^\circ$  aufgetragen über der horizontalen Signalkomponente zweier *Kalibrierungen 2 und 3* ( $Sig_{hor_2}$  bzw.  $Sig_{hor_3}$ ), welche ebenfalls für  $\alpha = 0^\circ$  aber an anderen Tagen und damit mit anderer Ausrichtung des Cantilevers aufgenommen wurden. Die rechte Grafik der Abbildung 7.4 zeigt das gleiche für die vertikale Signalkomponente. Alle Daten wurden mit demselben Cantilever aufgenommen. Es zeigt sich, dass die Verläufe einen linearen Trend haben. Gerade im mittleren Bereich, in dem der Einfluss des hereinlaufenden und herauslaufenden Reflexes von der aktiven Fläche des PSD Elements gering ist, ist der lineare Verlauf sehr gut ausgeprägt. Am Anfang und Ende der jeweiligen Kurven ist dieser Einfluss stärker und Abweichungen treten auf, wobei diese bei der

<sup>2</sup>Ein linearer Verlauf des Verhältnisses zweier Signale ist natürlich nicht auf Signale quadratischer Abhängigkeiten beschränkt.

grauen Kurve stärker ausgeprägt sind. Analoge Betrachtungen der horizontalen und vertikalen Signalkomponenten unterschiedlicher Richtungskalibrierungen für  $\alpha \neq 0^\circ$  weisen ebenfalls lineare Verläufe auf. Dabei zeigt sich, dass das Verhältnis von  $m_1(\alpha)$  zu  $m_2(\alpha)$  für identische Anströmwinkel konstant ist

$$\frac{m_1(\alpha_1)}{m_2(\alpha_1)} = \frac{m_1(\alpha_2)}{m_2(\alpha_2)} = \dots \frac{m_1(\alpha_n)}{m_2(\alpha_n)} = \textit{konstant}. \quad (7.6)$$

Dieses zeigt, dass Kalibrierungen mit unterschiedlichen Ausrichtungen des Cantilevers ineinander umgerechnet werden können. Auftretende Fehler sind hierbei dem Einfluss des Laserspots zuzuschreiben. Je geringer der Einfluss des Laser-



**Abbildung 7.4:** Verhältnis horizontaler und vertikaler Signalkomponente unterschiedlicher Kalibrierungen 1, 2 und 3 für  $\alpha = 0^\circ$  **Links:** Verhältnis horizontaler Signalkomponenten mit linearem Fit. **Rechts:** Verhältnis vertikaler Signalkomponenten mit linearem Fit.

spots auf die Kalibrierung ist, desto genauer können Kalibrierungen ineinander überführt werden. Diese Eigenschaft ist grundlegend für die nachfolgende Betrachtung.

Im Idealfall, bei dem der Einfluss des Laserspots vernachlässigbar klein ist, existiert für jeden individuellen Cantilever ein charakteristischer Verlauf der 2D Kalibrierung. Diese Tatsache kann ausgenutzt werden, so dass die Vermessung der winkelabhängigen Kalibrierung nur einmal für jeden Cantilever nötig ist. Gegeben seien zwei 2D Kalibrierungen, deren Signalkomponenten  $Sig(\alpha, v)$  und  $Sig^*(\alpha, v)$  (sowohl horizontal als auch vertikal) der Theorie folgen

$$Sig(\alpha, v) = \textit{const.} + m(\alpha) \cdot v^2 \quad (7.7)$$

$$Sig^*(\alpha, v) = \textit{const.*} + m^*(\alpha) \cdot v^2. \quad (7.8)$$

Durch Transformation der Geschwindigkeit  $v$  in eine winkelabhängige Geschwindigkeit  $v'(\alpha)$  können aus den Signalen für  $\alpha = 0^\circ$  die Signale für  $\alpha \neq 0^\circ$  berechnet werden

$$\text{Sig}(\alpha, v) = \text{Sig}(\alpha = 0^\circ, v') = \text{const.} + m(\alpha = 0^\circ) \cdot v'(\alpha)^2, \quad (7.9)$$

$$\text{mit } v'(\alpha)^2 = \frac{m(\alpha)}{m(\alpha=0^\circ)} \cdot v^2.$$

Dasselbe gilt für

$$\text{Sig}^*(\alpha, v) = \text{Sig}^*(\alpha = 0^\circ, v'^*) = \text{const.}^* + m^*(\alpha = 0^\circ) \cdot v'^*(\alpha)^2, \quad (7.10)$$

$$\text{mit } v'^*(\alpha)^2 = \frac{m^*(\alpha)}{m^*(\alpha=0^\circ)} \cdot v^2.$$

Unter Verwendung der Beziehung aus Gleichung (7.6) folgt

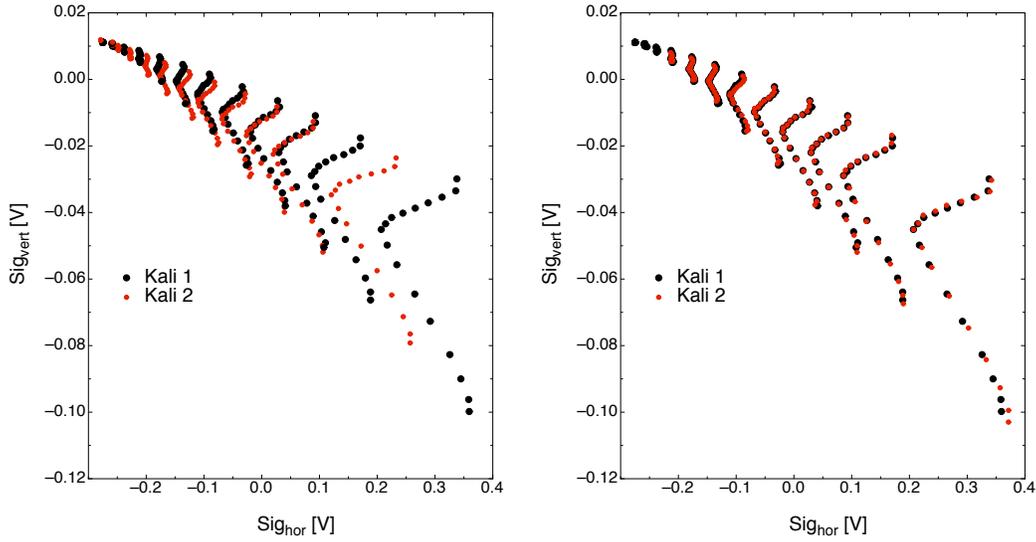
$$\frac{m(\alpha = 0^\circ)}{m^*(\alpha = 0^\circ)} = \frac{m(\alpha)}{m^*(\alpha)} \Leftrightarrow \frac{m(\alpha)}{m(\alpha = 0^\circ)} = \frac{m^*(\alpha)}{m^*(\alpha = 0^\circ)}, \quad (7.11)$$

und damit

$$v'(\alpha)^2 = v'^*(\alpha)^2. \quad (7.12)$$

Dieses hat zur Folge, dass aus einer einmaligen 2D Kalibrierung die winkelabhängige Geschwindigkeit  $v'(\alpha)$  bestimmt werden kann, welche charakteristisch für den verwandten Cantilever ist. Für eine erneute 2D Kalibrierung kann somit auf Basis einer Kalibrierung für  $\alpha = 0^\circ$  mittels Gleichung (7.9) eine komplette 2D Kalibrierung erzeugt werden.

Ist der Unterschied verursacht durch den Einfluss des Laserspots zwischen zwei 2D Kalibrierungen gering, kann dieses auch auf die hier gemessenen Daten angewandt werden. Abbildung 7.5 (links) zeigt zwei gemessene 2D Kalibrierungen, welche mit unterschiedlichen Cantilever Ausrichtungen aufgenommen wurden. Zur Verdeutlichung der Unterschiede wurden beide auf denselben Nullpunkt geschoben. Die rechte Grafik zeigt die Umrechnung der Kalibrierung 2 (rot) auf Kalibrierung 1 (schwarz) nach dem eben vorgestellten Verfahren, angewandt auf die horizontale und vertikale Signalkomponente. Die Bestimmung von  $v'$  wurde in diesem Fall numerisch durchgeführt. Die Berechnung konnte nur für Geschwindigkeiten  $v > 2\text{m/s}$  durchgeführt werden. Es ist zu erkennen, dass durch eine reine Verschiebung (links) die beiden Kalibrierungen nicht in Einklang zu bringen sind. Eine Umrechnung der Daten hingegen zeigt, dass die Abweichungen nur noch gering sind. Die Gründe für die noch vorhandenen Abweichungen liegen auch hier wieder in dem Einfluss des Laserspots und dessen Position auf dem Cantilever. Ein weiterer Punkt ist die Unsicherheit in der Ausrichtung des 2D LCAs in der Strömung und der Einstellung des Anströmwinkels. Ein Schlupf des Schrittmotors ist nicht auszuschließen. Kleine Abweichungen in der Positionierung wirken sich auch auf die Umrechnung aus. Dennoch ist zu erkennen, dass das vorgestellte Verfahren sehr gute Ergebnisse liefert.



**Abbildung 7.5: Links:** Anpassung zweier 2D Kalibrierungen mittels Offset-Anpassung der horizontalen und vertikalen Signalkomponenten. **Rechts:** Anpassung zweier 2D Kalibrierungen durch Umrechnung.

## 7.4 Diskussion und Ausblick

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass Biegung und Torsion des Cantilevers in Signalen des 2D PSD Elements resultieren, die eine gleichzeitige Bestimmung des Anströmwindwinkels und des Geschwindigkeitsbetrages ermöglichen. Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Messsignale, welche weitestgehend von den mechanischen Eigenschaften des Cantilevers abhängen<sup>3</sup>, eine universelle 2D Kalibrierung ermöglichen. Damit wird in Zukunft nur noch eine Kalibrierung für  $\alpha = 0^\circ$  nötig sein, um eine komplette 2D Kalibrierung bestimmen zu können. Die schon vorher angesprochenen Modifikationen bezüglich des Lasers und des Cantilevers werden dieses noch deutlicher machen.

Folgen die vertikale und horizontale Signalkomponente dann der Theorie, können diese beschrieben werden durch

$$Sig_{hor}(\alpha, v) = const._h + m_h(\alpha) \cdot v^2 \quad (7.13)$$

$$Sig_{vert}(\alpha, v) = const._v + m_v(\alpha) \cdot v^2. \quad (7.14)$$

Durch Ersetzen von  $v^2$  in Gleichung (7.13) nach Umstellung der Gleichung (7.14) ergibt sich

$$Sig_{hor}(\alpha, v) = const._h + \frac{m_h(\alpha)}{m_v(\alpha)} \cdot (Sig_{vert}(\alpha, v) - const._v). \quad (7.15)$$

<sup>3</sup>Der Einfluss von äußeren Bedingungen wie z.B. der Temperatur wurde nicht untersucht

---

Je nach Beschaffenheit der Funktionen  $m_h(\alpha)$  und  $m_v(\alpha)$  kann auf Basis von Gleichung (7.15) zu jeder Kombination der Signalkomponenten  $Sig_{hor}(\alpha, v)$  und  $Sig_{vert}(\alpha, v)$  analytisch oder numerisch der Anströmwinkel bestimmt werden. Damit entfällt für die Kalibrierung die Verwendung eines Fits an eine Oberfläche.



# Kapitel 8

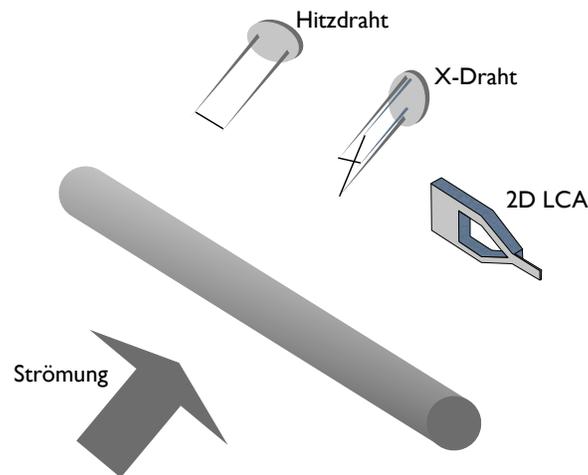
## 2D LCA - Messungen

*In Kapitel 7 wurde die grundlegende Möglichkeit dargestellt, mit dem 2D LCA zweidimensionale Messungen in turbulenten Strömungen durchzuführen. In diesem Kapitel werden Messungen präsentiert, die mit einem 2D LCA im Vergleich zu kommerziellen X-Draht- und Hitzdrahtanemometern durchgeführt wurden. Dabei sei vermerkt, dass der verwandte Cantilever, im Gegensatz zu den X-Draht Anemometern, nicht für diese Anwendung optimiert wurde. Die Messungen sollen in erster Linie aufzeigen, in wie weit das 2D LCA vergleichbare Ergebnisse zu denen der kommerziellen Sensoren liefert. Statistische Auswertungen werden hierbei zur Beurteilung der Messergebnisse herangezogen.*

### 8.1 Messungen im Zylindernachlauf

Die nachfolgenden Messungen wurden im Windkanal der Universität Oldenburg durchgeführt. Dabei wurde der Nachlauf eines Zylinders mit einem Durchmesser von  $D = 1\text{cm}$  bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von  $v = 10\text{m/s}$  vermessen, was einer Reynoldszahl von  $Re = 6666$  entspricht. Ein 2D LCA mit einem Cantilever von  $35\mu\text{m}$  Breite und  $140\mu\text{m}$  Länge mit Fensterdesign, ein X-Draht der Firma Dantec und ein Hitzdraht der Firma Dantec wurden in einem Abstand von  $68\text{cm}$  ( $68D$ ) hinter dem Zylinder positioniert. Das 2D LCA und das X-Draht Anemometer wurden dabei so ausgerichtet, dass sie Fluktuationen in vertikaler Richtung und in Hauptströmungsrichtung aufnehmen; das Hitzdraht Anemometer wurde waagrecht ausgerichtet (vergleiche Abb. 8.1). Das 2D LCA hatte hierfür eine Ausrichtung von  $\beta = 90^\circ$ .

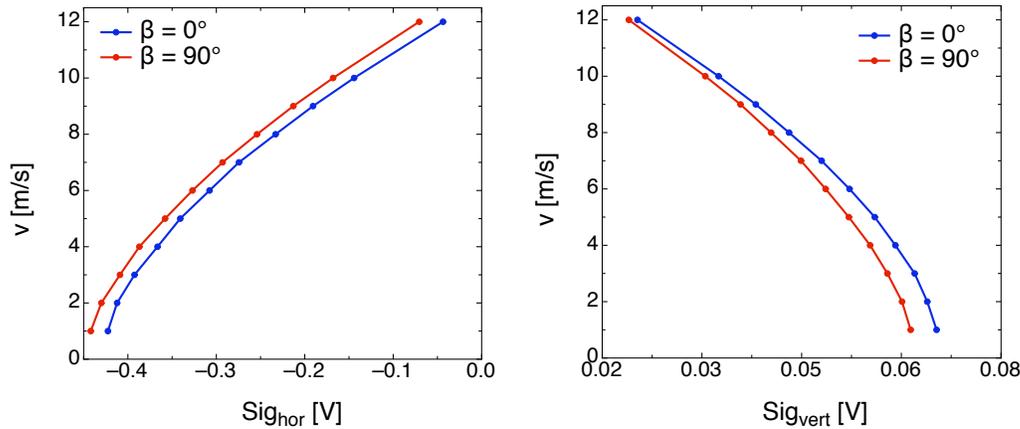
Bei diesen Messungen wurden die vier Signale des 2D LCAs einzeln aufgenommen und später am Rechner in die horizontale und vertikale Signalkomponente umgerechnet. Die Daten wurden mit einer Samplingfrequenz von  $40.000\text{Hz}$  aufgenommen, wobei jeder Datensatz aus  $1,5 \cdot 10^7$  Messpunkten besteht. Die Daten des 2D LCA wurden analog zu der in Kapitel 7.2 vorgestellten Methode kalibriert, die des X-Draht Anemometers nach der Methode des effektiven Anstellwinkels [7].



**Abbildung 8.1:** Ausrichtung der Sensoren bei Messungen im Zylindernachlauf. Das 2D LCA und das X-Draht Anemometer messen dabei Fluktuationen in vertikaler Richtung und in Hauptströmungsrichtung.

Vor Beginn der Messungen im Zylindernachlauf wurden die Richtungskalibrierungen für den X-Draht und das 2D LCA aufgenommen. Die Ausrichtung des 2D LCAs für die Kalibrierung war daher  $\beta = 0^\circ$ . Nach der Drehung des 2D LCAs um  $90^\circ$  in die Messposition wurde erneut eine Kalibrierung aufgenommen, in diesem Fall nur für einen Anströmwinkel von  $\alpha = 0^\circ$ . Abbildung 8.2 zeigt im Vergleich die horizontale Signalkomponente (links) gemessen für  $\beta = 0^\circ$  (blau) und für  $\beta = 90^\circ$  (rot) und die vertikale Signalkomponente (rechts) für beide Ausrichtungen. Es zeigt sich, dass die Kalibrierungen nicht mehr übereinander liegen. Diese Verschiebung kann, zumindest bei der vertikalen Signalkomponente, nicht durch eine reine Offsetkorrektur behoben werden. Um das zu kompensieren, wird die in Kapitel 7.3 vorgestellte Universalität der Richtungsabhängigkeit ausgenutzt. Auf Basis der neuen Kalibrierung für  $\alpha = 0^\circ$  und  $\beta = 90^\circ$  wird nach dem vorgestellten Verfahren eine neue komplette Richtungskalibrierung für  $\beta = 90^\circ$  berechnet, mit der die Messdaten kalibriert werden. Durch die von vornherein kleinen Unterschiede der Kalibrierungen für  $\beta = 0^\circ$  und  $\beta = 90^\circ$  wird der durch diese Verrechnung eingebrachte Fehler als eher gering eingeschätzt.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Die Tatsache, dass sich durch einfaches Drehen des 2D LCAs das Signal verschiebt, zeigt dass sich der Sensor immer noch in einem Status des Prototyps befindet. In diesem Fall liegt die Vermutung nahe, dass sich optische Komponenten (z.B. Laser oder Linse) leicht verstellen. Da bei dem 2D LCA Veränderungen auf Skalen von  $\mu\text{m}$  gemessen werden, wirken sich auch kleinste Variationen auf das Signal aus.

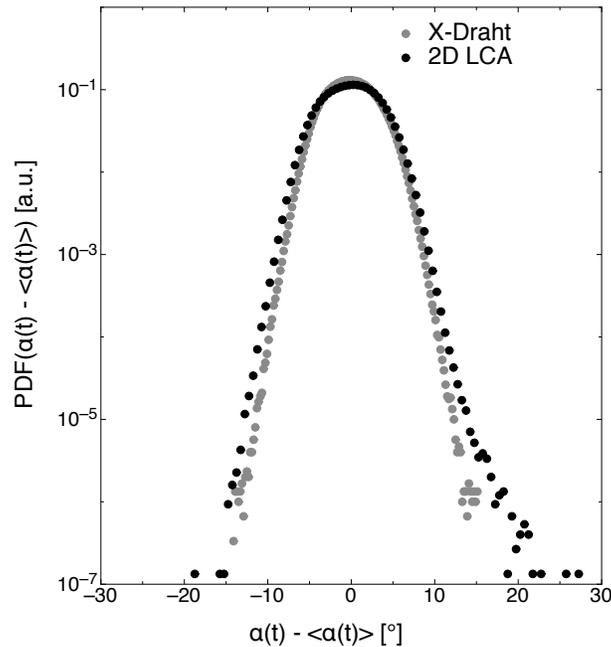


**Abbildung 8.2: Links:** Vergleich der horizontalen Signalkomponente des 2D PSDs vor (blau) und nach Drehung um  $90^\circ$  (rot). **Rechts:** Vergleich der vertikalen Signalkomponente des 2D PSDs vor (blau) und nach Drehung um  $90^\circ$  (rot).

### 8.1.1 Zylindernachlauf - Anströmwinkel

Für eine erste Einschätzung der gemessenen Daten werden die mit 2D LCA und X-Draht gemessenen Mittelwerte und die Standardabweichungen des Anströmwinkels betrachtet. Mit  $\langle \alpha_{2D LCA} \rangle = 3,59^\circ$  und  $\langle \alpha_{X-Draht} \rangle = -1,26^\circ$  weist keiner der beiden Sensoren den erwarteten Mittelwert von  $\alpha = 0^\circ$  auf. Dieses kann auf die Ausrichtung der Sensoren mit dem bloßen Auge zurückgeführt werden. Schräglagen um wenige Grad sind so nur schwer zu erkennen. Die Standardabweichung des 2D LCAs von  $\sigma_{\alpha_{2D LCA}} = 3,18^\circ$  liegt ca. 10% über der des X-Drahtes mit  $\sigma_{\alpha_{X-Draht}} = 2,85^\circ$ .

Abbildung 8.3 zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDF) der gemessenen Zeitreihen der Anströmwinkel für das 2D LCA (schwarze Kreise) und das X-Draht Anemometer (graue Kreise). Für einen besseren Vergleich wurden die Mittelwerte der jeweiligen Zeitreihen abgezogen, so dass bei beiden der Mittelwert  $0^\circ$  vorliegt. Es zeigt sich, dass die Verteilung des 2D LCAs breiter ist als die des X-Drahtes. Dies bedeutet, dass das 2D LCA tendenziell häufiger zu große Beträge der Anströmwinkel misst. Außerdem ist zu erkennen, dass im positiven Bereich wenige Winkel gemessen wurden, die viel zu große Werte aufweisen. Diese können mit auftretenden Störungspeaks erklärt werden, die in einer fehlerhaften Zuordnung in der Kalibrierungsmatrix resultieren.



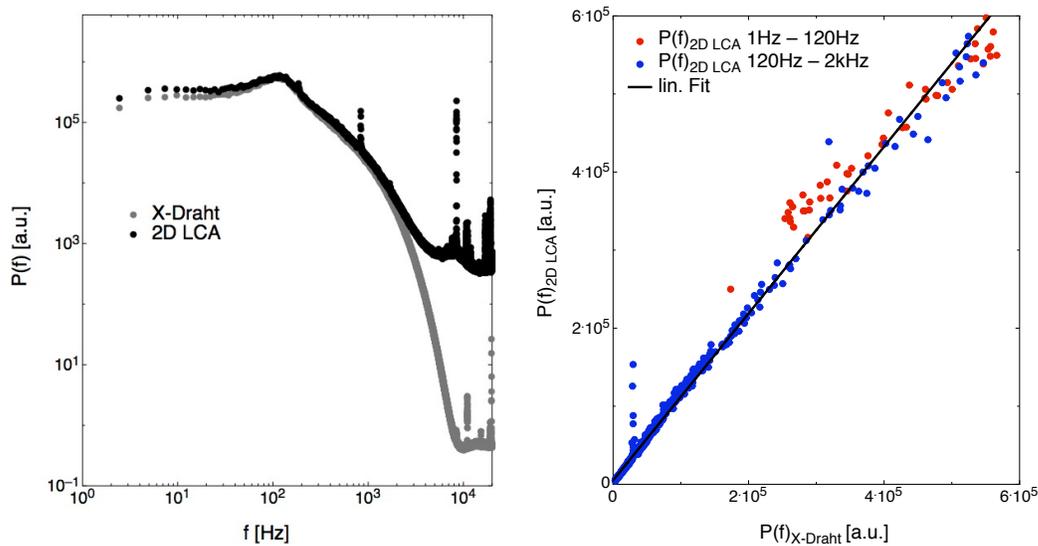
**Abbildung 8.3:** Vergleich der PDFs der Anströmwinkelzeitreihe gemessen mit 2D LCA (schwarze Kreise) und X-Draht Anemometer (graue Kreise).

Zur Klärung der systematischen Überschätzung der gemessenen Anströmwinkel des 2D LCAs wird im Folgenden näher auf das Leistungsspektrum und die Verteilung der Inkremente eingegangen. Die linke Grafik der Abbildung 8.4 zeigt die Leistungsspektren der Anströmwinkelzeitreihen gemessen mit dem 2D LCA (schwarze Kreise) und mit dem X-Draht Anemometer (graue Kreise). Es zeigt sich, dass die Dynamik des 2D LCAs um mehr als drei Größenordnungen geringer ist, als die des X-Drahts. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass die Torsion des Cantilevers in sehr kleinen Signalen resultiert und schnell im Rauschen untergeht<sup>2</sup>.

Der Verlauf beider Spektren ist bis ca.  $2\text{kHz}$  sehr ähnlich, wobei das des 2D LCAs immer leicht über dem Spektrum des X-Drahtes liegt. Dieses resultiert aus den Unterschieden der absolut gemessenen Werte, wie sie auch schon in Abbildung 8.3 zu erkennen sind. Die rechte Grafik der Abbildung 8.4 stellt die frequenzabhängige Leistung des 2D LCAs über der des X-Drahtes für den Bereich von  $1\text{Hz}$  bis  $2\text{kHz}$  dar. Dabei ist der Bereich von  $1\text{Hz}$  bis  $120\text{Hz}$  rot und der Bereich von  $120\text{Hz}$  bis  $2\text{kHz}$  blau dargestellt. Die schwarze Linie beschreibt einen linearen Fit über den gesamten Bereich. Es zeigt sich, dass die beiden Spektren nicht durch einen einzigen Skalierungsfaktor ineinander überführt werden können. Daraus folgt, dass die

<sup>2</sup>Dieses kann bei zukünftigen 2D LCAs durch ein modifiziertes Design des Cantilevers verbessert werden.

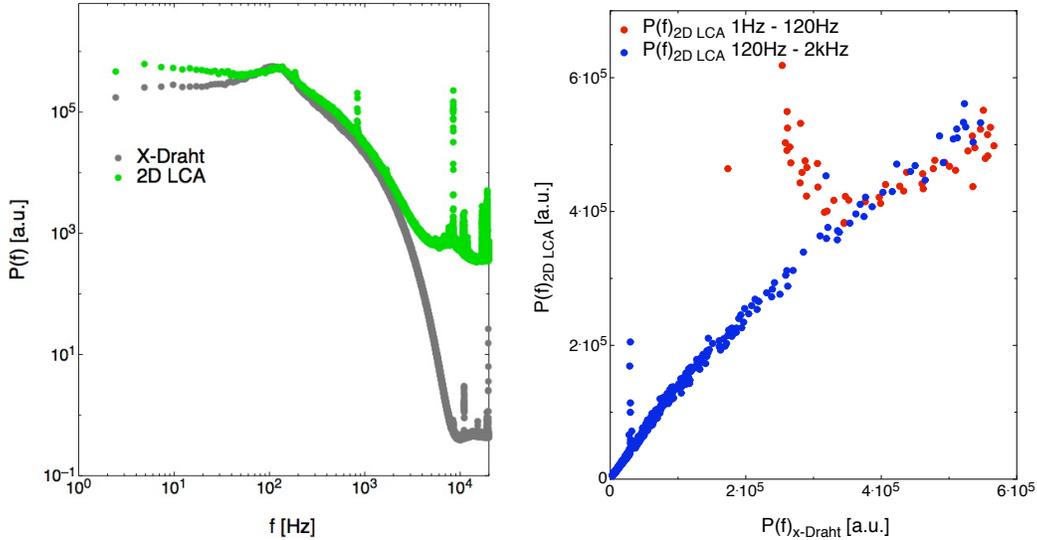
Unterschiede in der Skalierung von der Frequenz abhängen. Die Ursache hierfür ist in der Kalibrierung zu finden. Wie schon erwähnt, wurde das 2D LCA nach der Kalibrierung gedreht wodurch sich das Signal leicht verschoben hat. Mittels einer für  $\alpha = 0^\circ$  erneut durchgeführten Kalibrierung wurde eine 2D Kalibrierung für die neue Position berechnet. Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass sich aufgrund von Vibrationen im Laufe der Messungen noch weitere Verstellungen ergeben haben, die durch die erneute Kalibrierung nicht erfasst wurden. Zur Ver-



**Abbildung 8.4: Links:** Leistungsspektren von Anströmwinkelzeitreihen gemessen mit 2D LCA (schwarze Kreise) und X-Draht (graue Kreise). **Rechts:** Frequenzabhängige Leistung des 2D LCAs über der des X-Drahts von  $1\text{Hz}$  bis  $120\text{Hz}$  (rote Kreise) und von  $120\text{Hz}$  bis  $2\text{kHz}$  (blaue Kreise). Die schwarze Linie beschreibt einen linearen Fit.

deutlichung, dass eine falsche Kalibrierung sich auch auf die Frequenz auswirkt, ist in Abbildung 8.5 (links) das Leistungsspektrum der kalibrierten Anströmwinkel auf Basis einer falschen 2D Kalibrierung (grüne Kreise) im Vergleich zu dem des X-Drahtes (graue Kreise) dargestellt. Die größeren Abweichungen zwischen den beiden Spektren sind besonders im Bereich bis ca.  $100\text{Hz}$  leicht zu erkennen. In der rechten Grafik der Abbildung 8.5 zeigen sich die Unterschiede noch deutlicher. Hier sind die frequenzabhängigen Leistungen des 2D LCAs über denen des X-Drahtes dargestellt. Der Bereich von  $1\text{Hz}$  bis  $120\text{Hz}$  ist rot, der Bereich von  $120\text{Hz}$  bis  $2\text{kHz}$  ist blau markiert. Hier ist im Vergleich zur Darstellung der besser kalibrierten Daten aus Abbildung 8.4 (rechts) deutlich zu erkennen, dass die beiden Spektren nicht durch einen Faktor ineinander überführt werden können, sondern dass die Unterschiede von der Frequenz abhängig sind. Die berechneten Anströmwinkel mit der falschen Kalibrierung haben einen Mittel-

wert von  $\langle \alpha_{2D LCA}^* \rangle = -14,4^\circ$  und eine Standardabweichung von  $\sigma_{\alpha_{2D LCA}^*} = 3,33^\circ$  und liegen damit weiter von denen des X-Drahtes entfernt als die vorher bestimmten. Bei der weiteren Analyse der gemessenen Winkel werden ebenfalls die Daten der bewusst falschen Kalibrierung mit ausgewertet, um den Einfluss einer falschen Kalibrierung mit deren Nichtlinearität einschätzen zu können. Die in Abbildung



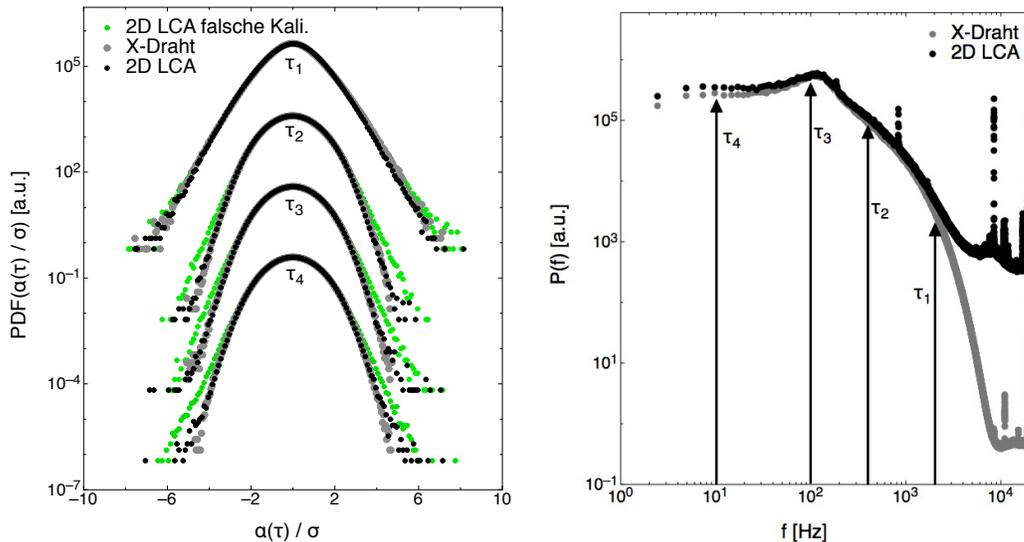
**Abbildung 8.5: Links:** Leistungsspektren von Anströmwinkelzeitreihen gemessen mit 2D LCA mit falscher Kalibrierung (grüne Kreise) und X-Draht (graue Kreise). **Rechts:** Frequenzabhängige Leistung des 2D LCAs mit falscher Kalibrierung über der des X-Drahts von  $1\text{Hz}$  bis  $120\text{Hz}$  (rote Kreise) und von  $120\text{Hz}$  bis  $2\text{kHz}$  (blaue Kreise).

8.6 (links) dargestellten PDFs der Inkremente der Winkel  $\alpha(\tau_1)$  bis  $\alpha(\tau_4)$  mit

$$\alpha(\tau) = \alpha(t + \tau) - \alpha(t) \quad (8.1)$$

sind auf die jeweilige Standardabweichung  $\sigma$  normiert. Die einzelnen PDFs sind vertikal gegeneinander verschoben. In dieser Darstellung zeigt sich, dass die Zeitreihen des 2D LCAs (schwarze Kreise) und des X-Drahtes (graue Kreise) gut übereinstimmende Statistiken aufweisen. Die leicht verschobene Kalibrierung wirkt sich hier vorwiegend auf die absoluten Werte aus, weniger aber auf die Statistik einzelner Skalen. Bei stärkeren Abweichungen der verwandten Kalibrierung von der "realen" Kalibrierung treten auch größere Unterschiede in den Statistiken auf. Die grünen Kreise zeigen die Inkrement PDFs des 2D LCAs mit der bewusst falschen Kalibrierung. Hier sind die Flügel der Verteilungen stärker ausgeprägt. Eine falsche Kalibrierung resultiert somit nicht nur in falschen absoluten Werten sondern auch in verstärkter Intermittenz. Da die restlichen Größen auf Basis der Anströmwinkel berechnet werden, können auch dort auftretende Abweichungen

zwischen den X-Draht Daten und denen des 2D LCAs mit einer leicht verschobenen Kalibrierung begründet werden. Die rechte Grafik der Abbildung 8.6 zeigt die zugehörigen Frequenzen zu den gewählten Skalen  $\tau_1$  bis  $\tau_4$ , die auch im Folgenden verwandt werden.



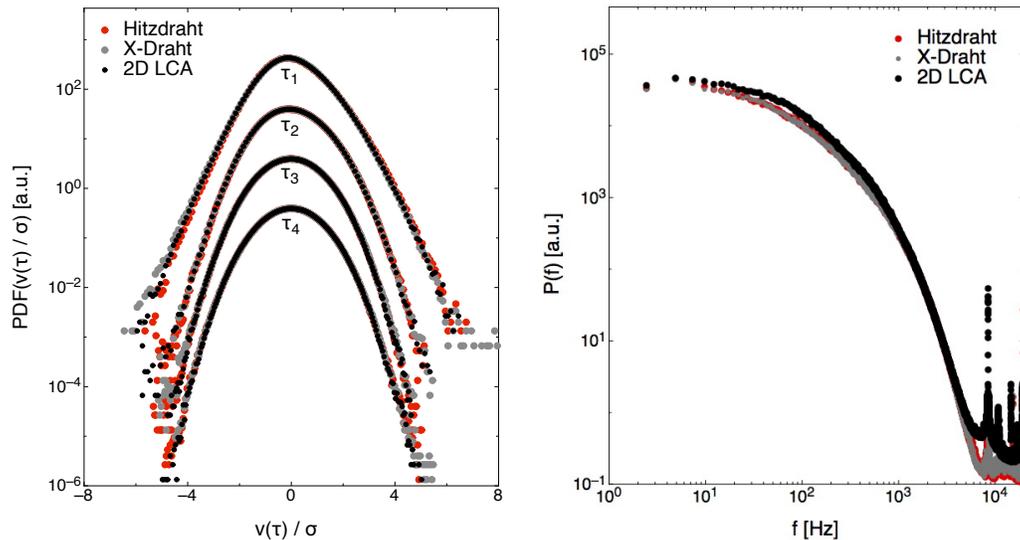
**Abbildung 8.6:** Links: Vergleich von Inkrement PDFs der Anströmwinkel gemessen mit 2D LCA (schwarze Kreise), 2D LCA mit falscher Kalibrierung (grüne Kreise) und X-Draht (graue Kreise). Rechts: Zuordnung der verwandten  $\tau$  zu Frequenzen im Leistungsspektrum.

### 8.1.2 Zylindernachlauf - Geschwindigkeitsbetrag

Mit dem ermittelten Anströmwinkel  $\alpha(t)$  wird als nächstes der Betrag der Geschwindigkeit berechnet. Das verwandte Hitzdraht Anemometer dient hier als weiterer Vergleich, da dieses Anemometer ebenfalls den Betrag der Geschwindigkeit misst. Mit einem Mittelwert von jeweils  $8,94m/s$  und einer Standardabweichung von  $\sigma = 0,46m/s$  passen die Werte von dem Hitzdraht und dem X-Draht Anemometer sehr gut. Der Mittelwert des 2D LCAs liegt mit  $9,07m/s$  nur  $1,4\%$  über denen der anderen beiden Sensoren. Die Standardabweichung liegt mit  $0,53m/s$  etwa  $14\%$  über den Werten der anderen Sensoren.

In Abbildung 8.7 ist das Leistungsspektrum des bestimmten Geschwindigkeitsbetrags der drei Sensoren dargestellt (rechts). Es zeigt sich, dass der Verlauf der Spektren von X-Draht und Hitzdraht Anemometer gut übereinstimmen. Das Spektrum des 2D LCAs liegt in weiten Bereichen über denen des X-Draht und Hitzdraht Anemometers. Dieses deckt sich mit den Abweichungen, die schon bei den Spektren der Anströmwinkel aufgetreten sind. Bei der Betrachtung der auf

die jeweilige Standardabweichung  $\sigma$  normierten PDFs der Inkremente zeigt sich, dass auch für den Geschwindigkeitsbetrag die Statistiken aller verwandten Sensoren gut übereinstimmen.

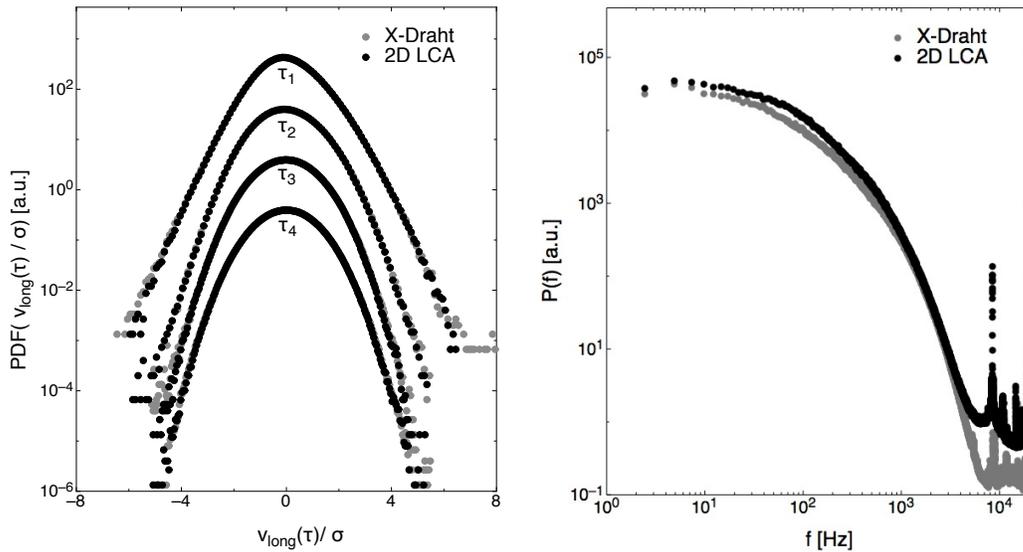


**Abbildung 8.7:** Links: Vergleich von Inkrement PDFs des Geschwindigkeitsbetrags gemessen mit 2D LCA (schwarze Kreise), X-Draht (graue Kreise) und Hitzdraht Anemometer (rote Kreise). Rechts: Leistungsspektren des Geschwindigkeitsbetrags gemessen mit 2D LCA (schwarze Kreise), X-Draht Anemometer (graue Kreise) und Hitzdraht Anemometer (rote Kreise).

Der Anströmwinkel  $\alpha(t)$  und der Geschwindigkeitsbetrag  $v(t)$  ergeben sich direkt aus der Kalibrierfunktion. Über die Kombination dieser beiden Größen kann zu jedem Zeitpunkt  $t$  die longitudinale  $v_{long}(t)$  und transversale  $v_{trans}(t)$  Geschwindigkeitskomponente berechnet werden.

### 8.1.3 Zylindernachlauf - longitudinale Geschwindigkeitskomponente

Abbildung 8.8 (rechts) zeigt die Leistungsspektren der longitudinalen Geschwindigkeitskomponente gemessen mit dem 2D LCA (schwarze Kreise) und dem X-Draht (graue Kreise). Auch hier liegt das Spektrum des 2D LCAs leicht über dem des X-Drahts. Die normierten PDFs der Inkremente (Abb. 8.8, links) zeigen, dass auch für die longitudinale Geschwindigkeitskomponente identische Statistiken vorliegen.

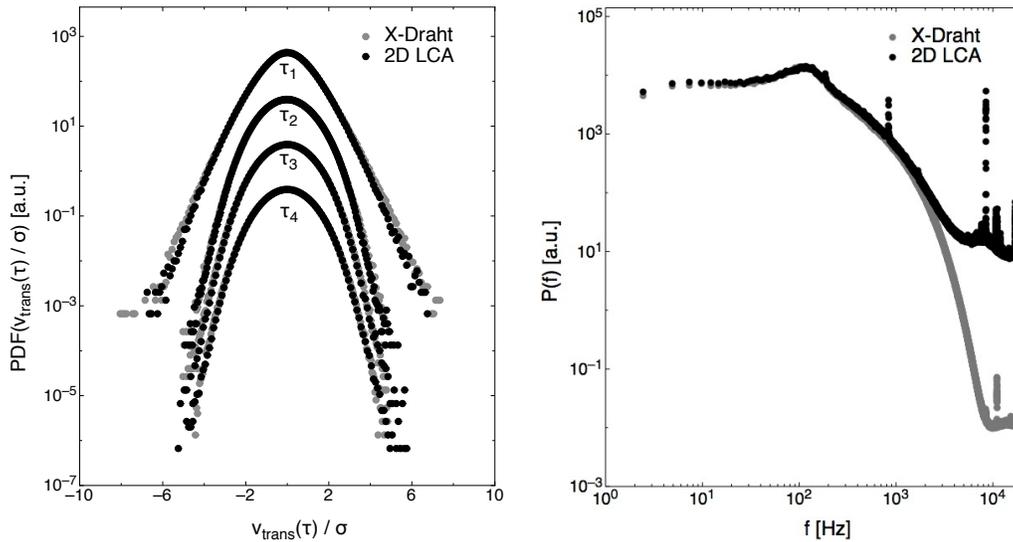


**Abbildung 8.8:** Links: Vergleich von Inkrement PDFs der longitudinalen Geschwindigkeitskomponente gemessen mit 2D LCA (schwarze Kreise) und X-Draht (graue Kreise). Rechts: Leistungsspektren der longitudinalen Geschwindigkeitskomponente gemessen mit 2D LCA (schwarze Kreise) und X-Draht Anemometer (graue Kreise).

#### 8.1.4 Zylindernachlauf - transversale Geschwindigkeitskomponente

Abbildung 8.9 zeigt die Leistungsspektren (rechts) und die normierten PDFs der Inkremente (links) gemessen mit dem 2D LCA (schwarze Kreise) und dem X-Draht (graue Kreise). Auch hier zeigen sich identische Resultate, wie sie schon für  $\alpha(t)$ ,  $v(t)$  und  $v_{\text{long}}(t)$  gezeigt wurden.

Die bisherigen Analysen haben gezeigt, dass die gemessenen Werte gut übereinstimmen. Die ausgewählten Verteilungen sehen mit dem bloßen Auge stimmig aus. Im Folgenden werden die genauen Formen und Eigenschaften dieser Verteilungen über einen weiten Bereich von Skalen  $\tau$  untersucht.



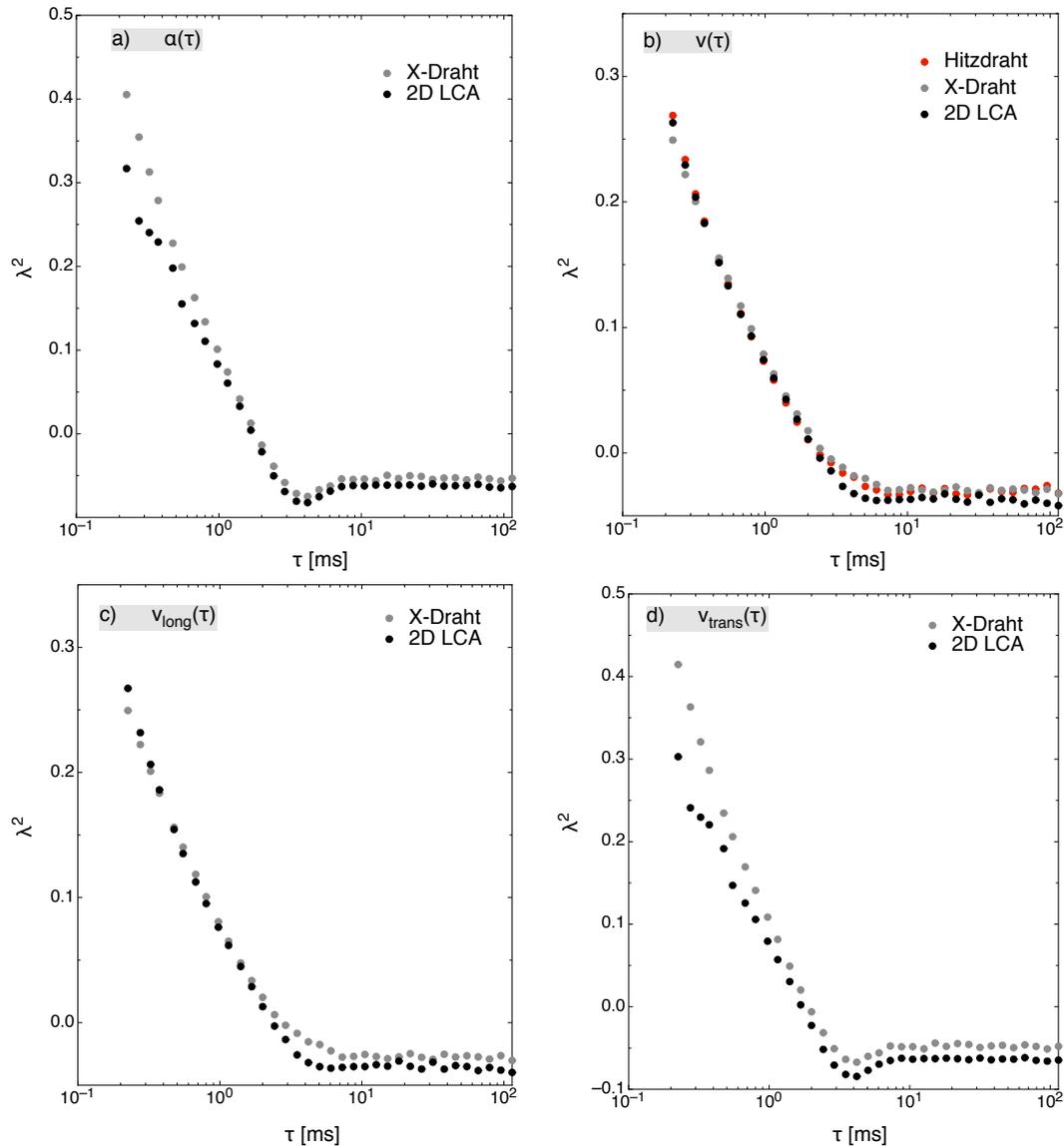
**Abbildung 8.9:** Links: Vergleich von Inkrement PDFs der transversalen Geschwindigkeitskomponente gemessen mit 2D LCA (schwarze Kreise) und X-Draht (graue Kreise). Rechts: Leistungsspektren der transversalen Geschwindigkeitskomponente gemessen mit 2D LCA (schwarze Kreise) und X-Draht Anemometer (graue Kreise).

## 8.2 Weitere Statistische Analyse der Messdaten

Der Formparameter  $\lambda^2$  beschreibt, wie schon in Kapitel 2.3.2 erläutert, die Abweichung einer Verteilung von einer Gaussverteilung. Je größer  $\lambda^2$ , desto größer ist auch diese Abweichung einzuschätzen. Für die Bestimmung von  $\lambda^2$  wird Gleichung (2.9) genutzt, mit der der Formparameter direkt aus den Messdaten bestimmt werden kann<sup>3</sup>. Abbildung 8.10 a) bis d) zeigt die berechneten  $\lambda^2$  für alle gemessenen Größen in dem Bereich von  $\tau = 0,225ms$  bis  $\tau = 114ms$ , was im Spektrum einem Bereich von  $4,44kHz$  bis hinunter zu  $8,7Hz$  entspricht. Es zeigt sich, dass für alle gemessenen Größen die Verläufe ähnlich sind. Die auftretenden Unterschiede sind auch hier mit der leicht verschobenen Kalibrierung zu erklären. Für große Inkremente erwartet man eine Gaussverteilung, die sich durch  $\lambda^2 = 0$  äußert. Hier liegen die Werte allerdings im negativen Bereich, was einer Unterdrückung der Flügel entspricht. Dieses kann mit dem Ansatz erklärt werden, dass in diesem Abstand noch keine voll entwickelte Turbulenz vorhanden ist, sondern noch periodische gegenläufig drehende Strukturen vorhanden sind. Der dadurch im nahen Abstand hinter dem Zylinder auftretende Doppelbuckel in

<sup>3</sup>Die Berechnung nach Gleichung (2.8) führte qualitativ zu gleichen Ergebnissen und wird hier nicht explizit aufgeführt.

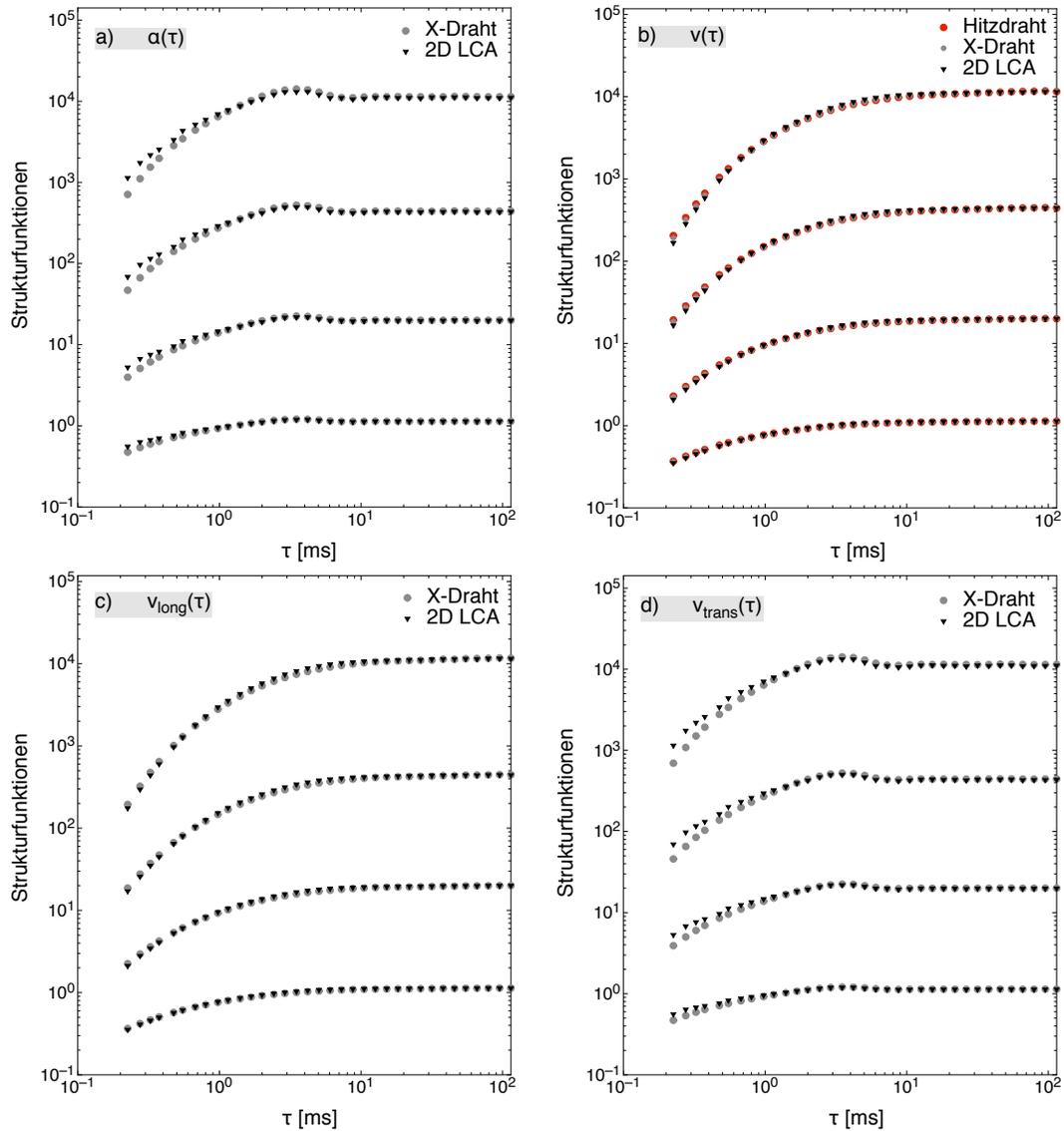
den Inkrement PDFs flacht mit zunehmenden Abstand ab und nähert sich einer Gaussverteilung [25]. In dem hier gemessenen Abstand scheinen solche oder ähnliche Strukturen noch vorhanden zu sein.



**Abbildung 8.10:** Verlauf des Formparameters  $\lambda^2$  mit steigendem  $\tau$ . Dargestellt sind die gemessenen Werte für X-Draht (graue Kreise), 2D LCA (schwarze Kreise) und Hitzdraht Anemometer (rote Kreise). **a)** Anströmwinkel, **b)** Geschwindigkeitsbetrag, **c)** longitudinale Geschwindigkeitskomponente und **d)** transversale Geschwindigkeitskomponente

Für eine weitere Charakterisierung der Verteilungen der Inkremente werden

die Strukturfunktionen herangezogen. In Abbildung 8.11 sind die ersten vier



**Abbildung 8.11:** Verlauf der Strukturfunktionen 1. bis 4. Ordnung (von unten nach oben) mit steigendem  $\tau$ . Dargestellt sind die gemessenen Werte für X-Draht (graue Kreise), 2D LCA (schwarze Dreiecke) und Hitzdraht Anemometer (rote Kreise). **a)** Anströmwinkel, **b)** Geschwindigkeitsbetrag, **c)** longitudinale Geschwindigkeitskomponente und **d)** transversale Geschwindigkeitskomponente

Strukturfunktionen a) des Anströmwinkels, b) des Geschwindigkeitsbetrags, c) der longitudinalen Geschwindigkeitskomponente und d) der transversalen Geschwindigkeitskomponente dargestellt. Die Strukturfunktionen wurden für eine

deutlichere Darstellung vertikal gegeneinander verschoben. Es zeigt sich, dass ebenso wie bei dem Formparameter  $\lambda^2$  die größten Abweichungen bei den Anströmwinden und der transversalen Geschwindigkeitskomponente auftreten.

### 8.3 Diskussion und Ausblick

Die Messungen haben gezeigt, dass die 2D Kalibrierung auf in turbulenten Feldern gemessene Daten angewandt werden kann. Die gewonnenen Daten stimmen, bis auf kleine Abweichungen, die einer leicht verschobenen Kalibrierung zuzuordnen sind, mit denen kommerzieller Sensoren überein. Das Ziel, die prinzipielle Möglichkeit aufzuzeigen, das 2D LCA für zweidimensionale Messungen einzusetzen, wurde damit erreicht.

Eine Optimierung des Cantileverdesigns mit Hinblick auf eine stärker auftretende Torsion des Cantilevers bei schräger Anströmung kann in Zukunft die Auflösung verbessern. Zusätzlich muss mehr Aufwand betrieben werden, die Sensoren genauer in der Strömung auszurichten, um durch schlechte Ausrichtung auftretende Fehler zu minimieren.



# Kapitel 9

## Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das aus Vorarbeiten übernommene Laser-Cantilever-Anemometer zu Beginn leicht modifiziert, um dessen Handhabbarkeit zu verbessern. Die auftretende Abweichung gemessener Kalibrierungsdaten von der Theorie führte zu einer genaueren Betrachtung der Reflexion des Laserlichts an der Cantileveroberfläche. Der Einfluss der Fokussierung und der Intensitätsverteilung innerhalb des Laserspots wurde mit einem Simulationsprogramm untersucht. Es zeigte sich, dass die Fokussierung des Lasers den Reflex auseinanderlaufen lässt, wodurch der Reflex bei Biegung des Cantilevers teilweise von der aktiven Fläche des PSD Elements läuft und das Signal beeinflusst wird. Dieses Ergebnis hat zum einen Einfluss auf die Kalibrierung der Daten in dieser Arbeit, zum anderen motiviert es zu einer Modifikation des Lasers in zukünftigen LCA Modellen.

Zwei Messkampagnen im Schneewindkanal in Davos sollten zum einen aufzeigen, ob das LCA auch unter nicht-Laborbedingungen eingesetzt werden kann und zum anderen das Verhalten und die Stabilität des Cantilevers in der zwei Phasen Strömung "Luft-Schneepartikel" testen. Es zeigte sich, dass das LCA durchaus in einer zwei Phasen Strömung eingesetzt werden kann und der Cantilever direkte Einschläge von Partikeln bis zu einem gewissen Maße aushält. Die Dauer und Intensität der Signalbeeinflussung bei einem Partikeleinschlag war bei dem LCA kürzer und geringer als bei kommerziell genutzten Sensoren. Probleme mit auftretenden Störsignalen bei der ersten Messkampagne, welche über Versorgungsleitungen in das Messsignal einkoppelten, führten zu Modifikationen des LCAs hin zu einem kompakten autarken Messsystem. Die mit diesem System gemessenen Daten bei der zweiten Messkampagne waren weitestgehend von Störungen befreit.

Die schon in Vorarbeiten untersuchte Richtungsabhängigkeit des LCAs wurde erneut aufgegriffen und detaillierter untersucht. Hierzu wurde das LCA mit einem zweidimensionalen PSD Element aufgebaut, welches die Detektierung der Bewegung des reflektierten Laserlichts in zwei Raumrichtungen erlaubt. Auf Basis der durchgeführten Messungen wurde die Theorie aufgestellt, dass sich der Cantile-

ver bei schräger Anströmung verbiegt und zusätzlich verdreht. Diese Verdrehung beeinflusst die Reflexion an dem Cantilever und resultiert in Messsignalen abweichend von den erwarteten bei einfacher Verbiegung.

Mit einem LCA mit eingebautem zweidimensionalen PSD Element (2D LCA) kann zusätzlich die Torsion des Cantilevers gemessen werden, die von der Anströmungsrichtung abhängt. Auf Basis dieser Signale wurde eine Kalibrierungsmethode erarbeitet, welche es ermöglicht den Anströmwinkel, den Geschwindigkeitsbetrag und damit ebenfalls die longitudinale und transversale Geschwindigkeitskomponente zu bestimmen.

Im Folgenden wurde diese Kalibrierung auf Daten angewandt, welche im turbulenten Nachlauf eines Zylinders aufgenommen wurden. Vergleichende Messungen mit einem X-Draht und Hitzdraht Anemometer zeigen, dass die Ergebnisse des 2D LCAs qualitativ gleichwertig sind.

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass das 2D LCA für zweidimensionale Messungen eingesetzt werden kann. Bei dem vorhandenen Design besitzt jedoch das Signal, welches die Torsion misst, eine sehr kleine Amplitude. Dies hat zur Folge, dass kleine Veränderungen im Lichtweg des Lasers, die z.B. durch Drehung des 2D LCAs oder durch Vibrationen verursacht werden können, zu großen Fehlern führen. Ein nächster Schritt ist es daher zum einen die Stabilität der einzelnen Komponenten im 2D LCA zu verbessern. Zum anderen ist das geringe Signal der Torsion darauf zurückzuführen, dass der Cantilever komplett mit reflektierendem Material beschichtet ist und daher auch die gesamte beleuchtete Fläche zur Reflexion beiträgt. Der Cantilever verdreht sich allerdings an der Spitze am stärksten, so dass das Aufbringen von reflektierendem Material nur im Bereich der Spitze des Cantilevers eine Verstärkung des Signals bringen wird.

Ein weiterer Schritt zur Optimierung ist das Parallelsieren des Laserlichts. Dadurch wird der Reflex des Cantilevers schärfer auf das PSD Element abgebildet und die Kalibrierungsdaten folgen besser der Theorie, wodurch diese eher analytisch erfasst werden können. Mit einer analytischen Beschreibung werden die Messdaten leichter zugänglich. Bei der 2D Kalibrierung kann somit, wie dargestellt, auf das Anfitten einer Oberfläche im Raum verzichtet werden. Nicht identifizierbare Fehlerquellen werden damit eliminiert oder zumindest reduziert.

Auf Basis der hier vorgestellten Messungen und mit den vorgeschlagenen Modifikationen hat das 2D LCA das Potential als alternatives Messsystem zu kommerziellen Sensoren genutzt zu werden.

# Anhang A

## Programm "Simulation PSD Signal"

Dieses Programm wurde in der Programmiersprache "R" realisiert und simuliert die Messsignale des PSD Elements durch Berechnung des Schwerpunktes der Intensitätsverteilung des reflektierten Laserlichts. Die Intensitätsverteilung auf dem PSD Element ergibt sich dabei durch die Überlagerung der Reflexion an diskreten Positionen auf dem Cantilever. Die grundlegende Gleichung zur Berechnung der einzelnen Strahlengänge ist gegeben durch den lokalen Biegewinkel  $\gamma(v, x)$  des Cantilevers an der Position  $x$  bei der Geschwindigkeit  $v$

$$\gamma(v, x) = \arctan \left[ \underbrace{\frac{c_w \cdot \rho \cdot A}{2 \cdot E \cdot I_a}}_C \cdot v^2 \cdot \frac{l^3}{2} \cdot \left( \frac{x^3}{3 \cdot l^4} - \frac{x^2}{l^3} + \frac{x}{l^2} \right) \right],$$

wobei die Konstante  $C$  so bestimmt wird, dass eine Reflexion an der Spitze des Cantilevers bei einer vorgegebenen Geschwindigkeit den Rand des PSD Elements trifft und somit die maximal messbare Auslenkung widerspiegelt. In dem hier betrachteten Fall liegt bei  $v = 14m/s$  eine Auslenkung von  $4mm$  vor was zu einer Konstante von  $C = 38989s/m^4$  führt.

Im Folgenden wird das Programm Schritt für Schritt dargestellt und kommentiert. Zu Beginn werden alle notwendigen Parameter eingegeben:

l: Länge [ $\mu m$ ] des Cantilevers

C: Konstante [ $s/m^4$ ], bestimmt durch Randbedingungen

xmin: Startposition [ $\mu m$ ] der reflektierenden Fläche auf dem Cantilever

xmax: Endposition [ $\mu m$ ] der reflektierenden Fläche auf dem Cantilever

v: maximale Geschwindigkeit

winkoeff: Öffnungswinkel [°] des Laserstrahls verursacht durch Fokussierung; für 0° wird paralleles Licht angenommen

DSpot: Durchmesser des Laserspots [ $\mu m$ ]

wink0: Position des Laserspotmittelpunkts auf dem Cantilever [ $\mu m$ ]

VOR: befindet sich der Cantilever vor dem optimalen Fokuspunkt (VOR = TRUE) oder dahinter (VOR = FALSE)

Abstand: Abstand [ $mm$ ] zwischen Cantilever und PSD Element; wird als konstant angenommen

PSD\_Br: Breite des verwandten PSD Elements [ $mm$ ]

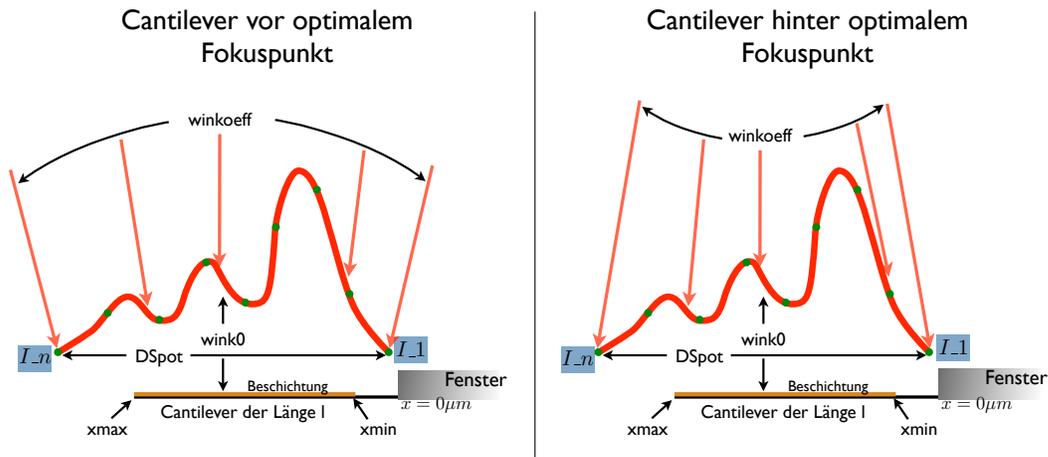
Profil: Vektor, der das Intensitätsprofil des Laserspots enthält; der letzte Wert (I\_n) repräsentiert die Intensität auf der Seite der Cantileverspitze. Für eine konstante Intensitätsverteilung muss nur I\_1 = 1 gesetzt werden.

```
l      <- 140
C      <- 38989
xmin   <- 0
xmax   <- 140
v      <- 14
winkoeff <- 2
DSpot  <- 120
wink0  <- 100
VOR    <- TRUE
Abstand <- 80
PSD_Br <- 4
Profil  <- c(I_1, ..., I_n)
```

Im Folgenden werden der Speicherpfad *file* eingegeben sowie die Vektoren definiert, welche die Geschwindigkeit *v*, den durch Beleuchtung und Beschichtung zur Reflexion beitragenden Bereich auf dem Cantilever *x*, die Einstrahlwinkel innerhalb des Laserspots *wink* und das Intensitätsprofil auf dem Cantilever *Intens* bestimmen. Abbildung A.1 zeigt schematisch den Zusammenhang der einzelnen Parameter.

```
file      <- "...Pfad/Zieldatei.txt"
v         <- seq(0, v, 0.5)

if ((wink0 - (DSpot/2)) > xmin) xstart <- (wink0 - (DSpot/2))
    else xstart <- xmin
if ((wink0 + (DSpot/2)) < xmax) xstop  <- (wink0 + (DSpot/2))
```



**Abbildung A.1:** Definition der Eingabeparameter des Programms "Simulation PSD Signal". **Links:** Cantilever befindet sich vor dem optimalen Fokuspunkt. **Rechts:** Cantilever befindet sich hinter dem optimalen Fokuspunkt.

```

else xstop <- xmax

x      <- seq(xstart, xstop, 0.01)
x      <- x / 1000000    # in Meter umrechnen
l      <- l / 1000000    # in Meter umrechnen

# Verlauf des Einstrahlwinkels
if (VOR)
{
  m <- (winkoeff) / (DSpot)
  const <- (-wink0*m)
  wink <- function(w) const + m*w
}
if (!VOR)
{
  m <- (-winkoeff) / (DSpot)
  const <- (-wink0*m)
  wink <- function(w) const + m*w
}
# Intensitätsverteilung auf reflektierenden Bereich
# des Cantilevers
if (length(Profil) > 1)
{

```

```

xw      <- seq((wink0-(DSpot/2)),(wink0+(DSpot/2)),
              (DSpot/(length(Profil)-1)))
splfit  <- splinefun(xw,Profil)
Intens  <- splfit(x*1000000)
} else Intens <- matrix(data = 1, length(x), 1)

```

In der Matrix *data* werden die simulierten Daten abgelegt, wobei in der ersten Spalte die Position des Schwerpunktes der Intensitätsverteilung auf dem PSD Element steht und in der zweiten Spalte die zugehörige Geschwindigkeit.

```

data     <- matrix(data = 0, length(v), 2)
data[,2] <- v

```

Zunächst wird die Intensitätsverteilung auf dem PSD Element berechnet, die bei einer Geschwindigkeit von  $v = 0m/s$  auf dem PSD Element erzeugt wird. Dabei wird die Position *pos* (in *mm*) jedes Lichtstrahls auf dem PSD Element bestimmt, die durch Reflexion an den Cantileverstellen *x* erzeugt wird. Zusätzlich wird die Intensität des einfallenden Lichtes auf dem Cantilever berücksichtigt. Das Histogramm dieser einzelnen Positionen liefert die Intensitätsverteilung *H\_pos*. Diese entspricht der Situation, die beim Ausrichten des Cantilevers vorherrscht.

```

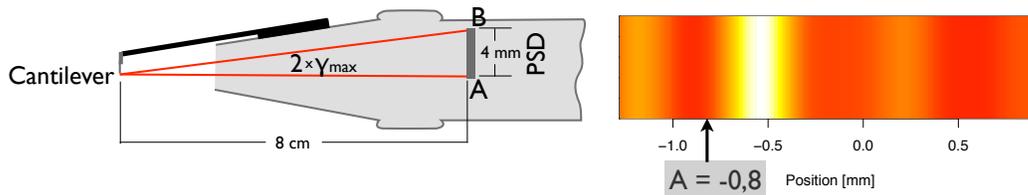
winkel   <- wink(x*1000000)
pos      <- Abstand * tan((winkel) *2*pi/360) + (1*1000) - (x*1000)

# Histogramm der beleuchteten Position bestimmen mit Gewichtung
BR       <- seq(-8, 8, 0.01)
H        <- c(1:(length(BR)-1))
H[1:length(H)] <- 0
Mids_H   <- 0.5 * (BR[1:(length(BR)-1)] + BR[2:length(BR)])

for (b in 1:length(pos))
{
  H[max(which(BR < pos[b]))] <- H[max(which(BR < pos[b]))] + Intens[b]
}
H_werte  <- which(H != 0)
H_werte  <- H_werte[2:(length(H_werte)-1)]
H_pos    <- H[H_werte]
Mids_pos <- Mids_H[H_werte]

```

Anschließend wird die Intensitätsverteilung auf dem PSD Element grafisch dargestellt und als pdf-Datei abgespeichert, wobei Weiß die höchste Intensität widerspiegelt. Die x-Achse stellt die Position auf dem PSD Element dar. Mit Hilfe der nachfolgenden Abfrage wird festgelegt, an welcher x-Position das PSD Element beginnen soll. **A** definiert das linke Ende des PSD Elements (Abb. A.2). Dadurch wird das PSD Element in die richtige Position gebracht, so dass das Intensitätsmaximum möglichst weit links liegt.



**Abbildung A.2:** Links: Schematische Darstellung des Strahlenganges des reflektierten Laserlichts. **A** bestimmt das linke Ende des PSD Elements und muss möglichst nah am Intensitätsmaximum der Reflexion positioniert werden. **B** markiert das rechte Ende des PSD Elements. Rechts: Beispiel einer Intensitätsverteilung für  $v = 0\text{ m/s}$  mit bestimmter Position **A**.

```
# Intensitätsverteilung auf dem PSD Element plotten
z      <- matrix(data = 0, length(Mids_pos)-1, 1)
z[,1]  <- H_pos[2:length(H_pos)]
quartz("Intensitätsverteilung auf dem PSD Element", width = 10,
       height = 4)
image(Mids_pos[2:length(Mids_pos)], c(0,1), z, col = heat.colors(128),
      xlab = "Position [mm]", ylab = "")
pdf(paste(strsplit(file, ".txt"), "_0_ms_Reflexion.pdf", sep = ""))
split.screen(c(2,1))
screen(1)
image(Mids_pos[2:length(Mids_pos)], c(0,1), z, col = heat.colors(128),
      xlab = "Position [mm]", ylab = "")
dev.off()
```

```
A <- as.numeric(readline("An welcher Position A fängt das PSD
                          Element an ? "))
```

Die numerische Integration liefert die Gesamtintensität auf dem PSD Element. Die Position, an der die Hälfte der Gesamtintensität erreicht ist, liefert das Messsignal. In einem Plot werden zum einen das reflektierte Licht auf dem PSD Element und zum anderen das Integral der Intensitätsverteilung mit berechneten Messsignal als pdf-Datei abgespeichert.

```
PSD_end  <- A + PSD_Br
PSD_begin <- max(which(Mids_H <= A))
PSD_end  <- min(which(Mids_H >= PSD_end))
```

```
# Histogramm numerisch integrieren von PSD_begin bis PSD_end
int_pos  <- diffinv(H[PSD_begin:PSD_end])
```

```

int_pos <- int_pos[2:length(int_pos)]
int_func <- splinefun(Mids_H[PSD_begin:PSD_end], int_pos)

# Position der Hälfte der Intensität
mitt_wert <- 0.5 *max(int_pos)
f <- function(x) int_func(x) - mitt_wert
data[1,1] <- uniroot(f, c(Mids_H[PSD_begin], Mids_H[PSD_end]))$root
                - A

# Plots in Datei abspeichern
pdf(paste(strsplit(file, ".txt"), "_0_ms.pdf", sep = ""))
split.screen(c(2,1))
screen(1)
image(c(0,PSD_Br), c(0,1), matrix(data = 1, length(c(0,PSD_Br))-1,1),
      col = "GRAY", xlim = c(0,4),xlab = "Position [mm]", ylab = "")
image((Mids_pos[2:length(Mids_pos)]-A), c(0,1), z, col = heat.colors(128),
      add = TRUE)
screen(2)
plot((Mids_H[PSD_begin:PSD_end]-A), int_pos, type = "l",
      xlab = "Position [mm]", ylab = "Intensität [a.u.]", xlim = c(0,4))
points(data[1,1], mitt_wert, col = 2)
dev.off()

```

Die restlichen Geschwindigkeiten  $v > 0$  werden in einer Schleife abgearbeitet. Zu den vorhandenen Winkeln aus der Fokussierung addieren sich nun die, die aus der Biegung des Cantilevers resultieren, hier mit  $g$  bezeichnet. Für jede Geschwindigkeit wird ein Plot abgespeichert, in dem das reflektierte Licht auf dem PSD Element und das Integral der Intensitätsverteilung mit Messsignal dargestellt ist. Zum Schluss werden die simulierten Daten sowie die verwandten Parameter abgespeichert.

```

for (i in 2:length(v) )
{
  print(paste("v = ",v[i],"m/s"))
# Berechnen der Winkel des Cantilevers
g <- atan( C*v[i]^2*(1^3/2)* ( x^3/(3*1^4) - x^2/1^3 + x/1^2 ) ) * 360/(2*pi)
winkel <- wink(x*1000000)
pos <-Abstand * tan((2*g + winkel) *2*pi/360) + (1*1000) - (x*1000)

# Histogramm
H <- c(1:(length(BR)-1))
H[1:length(H)] <- 0
Mids_H <- 0.5 * (BR[1:(length(BR)-1)] + BR[2:length(BR)])

```

---

```

for (b in 1:length(pos))
{
  H[max(which(BR < pos[b]))] <- H[max(which(BR < pos[b]))] + Intens[b]
}
H_werte <- which(H != 0)
H_werte <- H_werte[2:(length(H_werte)-1)]
H_pos <- H[H_werte]
Mids_pos <- Mids_H[H_werte]

# Histogramm numerisch integrieren
int_pos <- diffinv(H[PSD_begin:PSD_end])
int_pos <- int_pos[2:length(int_pos)]
int_func <- splinefun(Mids_H[PSD_begin:PSD_end], int_pos)

# Position der Hälfte der Intensität
mitt_wert <- 0.5 *max(int_pos)
f <- function(x) int_func(x) - mitt_wert
data[i,1] <- uniroot(f, c(Mids_H[PSD_begin], Mids_H[PSD_end]))$root
      -A

# Plots in Datei abspeichern
pdf(paste(strsplit(file, ".txt"), "_", v[i], "_ms.pdf", sep = ""))
split.screen(c(2,1))
screen(1)
z <- matrix(data = 0, length(Mids_pos)-1, 1)
z[,1] <- H_pos[2:length(H_pos)]
image(c(0,PSD_Br), c(0,1), matrix(data = 1, length(c(0,PSD_Br))-1,1),
      col = "GRAY", xlim = c(0,4),xlab = "Position [mm]", ylab = "")
image((Mids_pos[2:length(Mids_pos)]-A), c(0,1), z, col = heat.colors(128),
      add = TRUE)
screen(2)
plot((Mids_H[PSD_begin:PSD_end]-A), int_pos, type = "l",
      xlab = "Position [mm]", ylab = "Intensität [a.u.]", xlim = c(0,4))
points(data[i,1], mitt_wert, col = 2)
dev.off()
}

# Speichern der simulierten Daten
write.table(data, file, row.names = FALSE, col.names = c("pos_[mm]",
      "vel_[m/s]"))

```

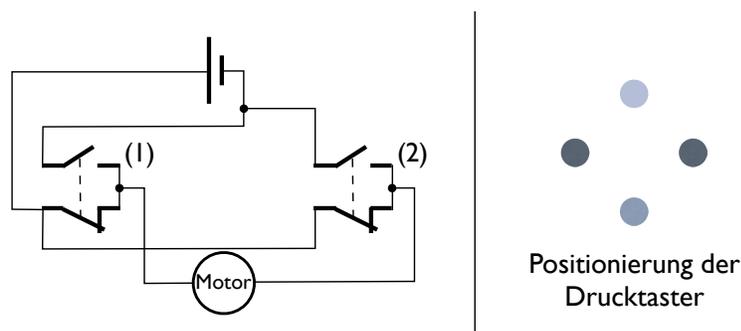


# Anhang B

## LCA Modifikationen

### B.1 LCA - Motoransteuerung

Die Abbildung B.1 (links) zeigt die verwandte Verkabelung der Motoren mit jeweils zwei Drucktastern (rechts - links oder hoch - runter), über die die Ansteuerung vorgenommen wird. In der Ausgangsstellung der Drucktaster liegt an beiden Polen des Motors eine positive Spannung an; der Motor steht still. Wird einer der beiden Taster (1) bzw. (2) betätigt, wird eine negative Spannung an den jeweiligen Pol des Motors angelegt; der Motor dreht sich. Durch Betätigen des anderen Tasters wird die Drehrichtung geändert. Über die angelegte Spannung wird die Drehgeschwindigkeit des Motors geregelt. Die Positionierung der Drucktaster auf der Steuerbox (B.1, rechts) ermöglicht ein intuitives Bedienen der Motorsteuerung (rechts - links, hoch - runter).



**Abbildung B.1: Links:** Schaltplan zur Ansteuerung der Motoren. In Grundstellung liegt an beiden Polen des Motors positive Spannung an; durch Betätigen der Drucktaster (1) bzw. (2) wird eine negative Spannung am entsprechenden Pol angelegt - der Motor dreht. **Rechts:** Positionierung des Drucktaster auf der Steuerbox

## B.2 LCA - Laser-Driver

Abbildung B.2 zeigt das Schaltbild des realisierten Laser-Drivers. Der verwendete IC-WKM wird über die Spannung eines USB Ports ( $+5V$  und  $500mA$ ) gespeist. Das Signal der Pindiode (PD) der Laserdiode ist in einer Rückkopplungsschleife eingebunden, wodurch die Ausgangsleistung der Laserdiode (LD) konstant gehalten wird. Diese Rückkopplung funktioniert nur, wenn die Verbindungskabel zwischen Laser-Driver und Laserdiode nicht länger als  $50cm$  sind. Aus diesem Grunde wurde der Laser-Driver so konstruiert, dass er in das Gehäuse des LCAs eingesetzt werden konnte.

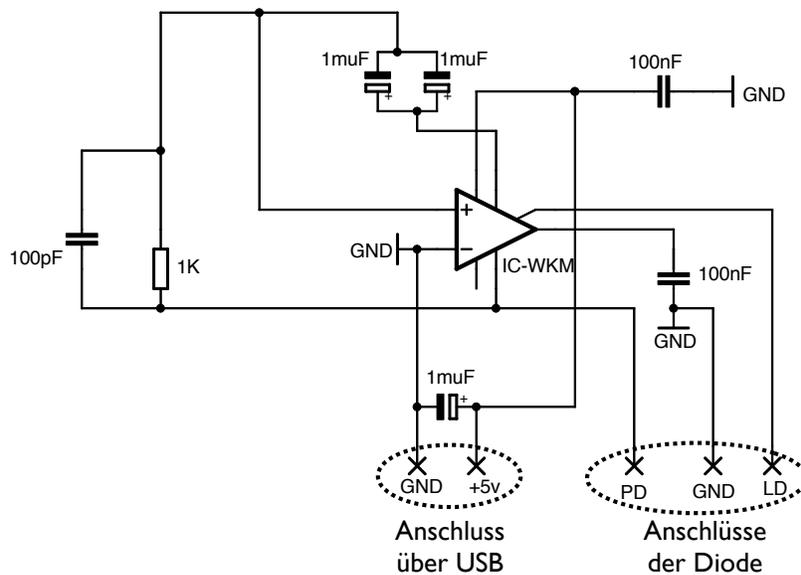


Abbildung B.2: Schaltbild des entwickelten Laser-Drivers.

## B.3 LCA - Spannungsversorgung für Operationsverstärker

Für die Umstellung der Spannungsversorgung der Vorverstärkerschaltung des LCAs auf Batterie wurde zunächst der bisher verwendete Operationsverstärker durch einen OPA2227 ersetzt. Die Versorgung mit  $V_{OP} = \pm 6V$  wurde mit einer Schaltung gemäß Abbildung B.3 realisiert.

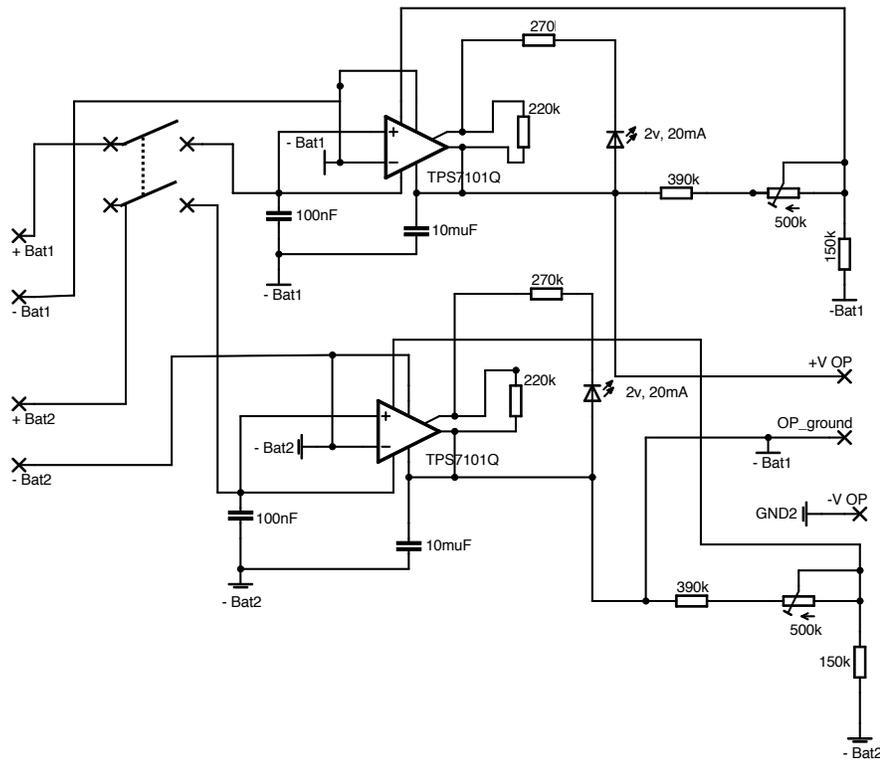


Abbildung B.3: Schaltbild der batteriebetriebenen Spannungsversorgung für die interne Vorverstärkerschaltung.

## B.4 LCA - 2D PSD Transimpedanzschaltung

Abbildung B.4 zeigt das Schaltbild der realisierten Transimpedanzschaltung für das 2D PSD Element.

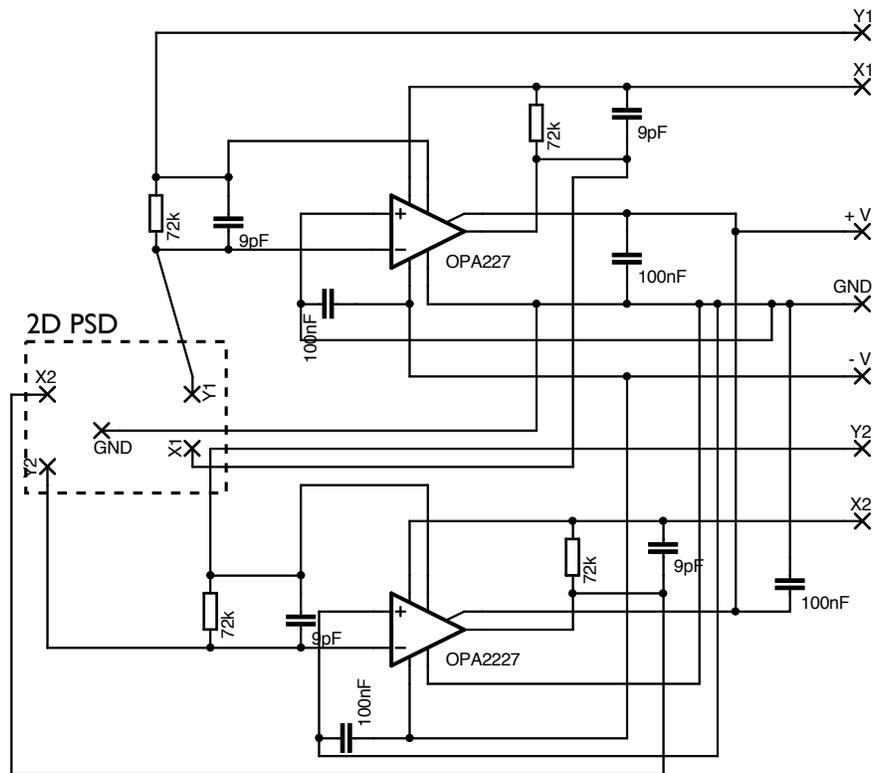


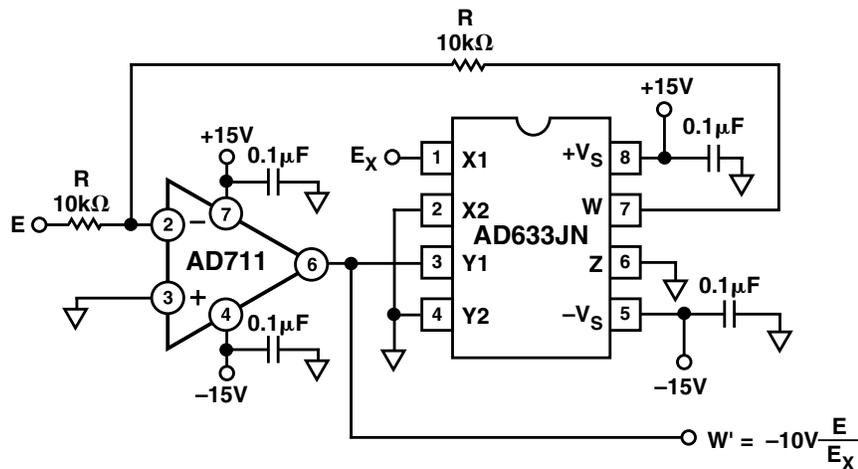
Abbildung B.4: Schaltbild der Transimpedanzschaltung für das 2D PSD Element.

## B.5 LCA - Verrechnungsbox

Abbildung B.5 zeigt das Schaltbild des realisierten Divisors zur Verrechnung der vier analogen Spannungssignale des 2D PSD Elements

$$A_{\text{ausg}} = \frac{(Sig_1 + Sig_2) - (Sig_3 + Sig_4)}{\sum_{n=1}^4 Sig_{-n}} = \frac{E}{E_x},$$

wobei die nötigen Additionen und Subtraktionen in Zähler und Nenner durch vorgeschaltete Operationsverstärker realisiert wird. Je nach Belegung der Anschlüsse  $Sig_1$  bis  $Sig_4$  berechnet die Schaltung die horizontale oder vertikale Signalkomponente.



**Abbildung B.5:** Schaltbild des verwandten Divisors zweier analoger Spannungssignale (aus [1]).



# Anhang C

## Programm zur 2D LCA Kalibrierung

Im Folgenden werden die wichtigsten Ausschnitte aus dem Programm dargestellt, welches aus den gemessenen horizontalen und vertikalen Signalkomponenten den Anströmwinkel  $\alpha$  bestimmt. Dieses Programm wurde in der Programmiersprache "R" realisiert.

Zu Beginn wird die Richtungskalibrierung eingelesen und Zwischenwerte für Winkel und Geschwindigkeit werden auf Basis von Spline Funktionen erzeugt. Die Anzahl der Zwischenwerte wird durch *winkelvoll* und *velvoll* festgelegt.

```
library(fields)

vel <- c(0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12)
winkel <- seq(-40,40,5)

winkelvoll <- seq(-40,40,1.25)
velvoll <- seq(4,12,0.5)

# Einlesen einer Richtungskalibrierung
file = "... "
data <- as.matrix(read.table(file, dec = ".", skip = 1))

# Erstellen von Zwischenwerten für Geschwindigkeiten mit Spline-
# Funktionen
datav_voll <- matrix(data = 0, length(velvoll), (2*length(winkel)+1))
datav_voll[,1] <- velvoll

for (i in 1:length(winkel))
{
  vhorfunc <- splinefun(vel, data[, (i*2)])
  vvertfunc <- splinefun(vel, data[, (i*2+1)])
}
```

```

    datav_voll[, (i*2)] <- vhorfunc(velvoll)
    datav_voll[, (i*2+1)] <- vvertfunc(velvoll)
}

#    Erstellen von Zwischenwerten für Anströmwinkel mit Spline-Funktionen
#    datavoll enthält damit alle Zwischenpunkte
datavoll <- matrix(data = 0, length(velvoll), (2*length(winkelvoll)+1))
datavoll[,1] <- velvoll

for (i in 1:length(velvoll))
{
    alphahorfunc <- splinefun(winkel, datav_voll[i,seq(2,length(
        datav_voll[1,]),2)])
    alphavertfunc <- splinefun(winkel, datav_voll[i,seq(3,length(
        datav_voll[1,]),2)])

    datavoll[i,seq(2,length(datavoll[1,]),2)] <- alphahorfunc(winkelvoll)
    datavoll[i,seq(3,length(datavoll[1,]),2)] <- alphavertfunc(winkelvoll)
}

```

Mit den Daten aus *datavoll* und *winkelvoll* wird die Matrix erstellt, auf deren Basis der Fit an die Oberfläche geschieht.

```

#    Erstellen der Matrix mit Oberflächendaten
xnew <- rbind(c(datavoll[1,2], datavoll[1,3]))
ynew <- winkelvoll[1]

for (i in 1:length(winkelvoll))
{
    for (b in 2:length(velvoll))
    {
        xnew <- rbind(xnew, c(datavoll[b,(i*2)], datavoll[b,(i*2+1)]))
        ynew <- c(ynew, winkelvoll[i])
    }
}

#    Fitten der Daten

fit <- Krig(xnew, ynew, theta = length(ynew))

```

Nach Einlesen der horizontalen und vertikalen Signalkomponenten wird der zugehörige Wert des Anströmwinkels auf der Oberfläche mit *predict()* bestimmt. Ist die gemessene Zeitreihe zu lang, muss dieser letzte Schritt gegebenenfalls in kleineren Teilstücken abgearbeitet werden.

```
load("filename für horizontale Signalkomponente")
load("filename für vertikale Signalkomponente")

alfa <- c()

winkres <- matrix(data = 0, length(hor) , 2)

winkres[,1] <- hor
winkres[,2] <- vert

alfa <- c(alfa, predict(fit, winkres))

save(alfa, "filename")
```



# Literaturverzeichnis

- [1] ANALOG DEVICES Low Cost Analog Multiplier Datenblatt, Analog Devices, Inc. , 2002
- [2] BARTH S. ET AL. Laser-Cantilever-Anemometer - A new high resolution sensor for air and liquid flows *Rev. Sci. Instrum.* 76 075110, 2005.
- [3] BARTH S. Entwicklung eines hochauflösenden Geschwindigkeitssensors Doktorarbeit, Universität Oldenburg, 2004.
- [4] BECK C. Superstatistics in hydrodynamic turbulence *Physica D* 193 195-207, 2004
- [5] BENZI R., CILIBERTO S., TRIPICCIONE R., BAUDET C. & SUCCI S. Extended self-similarity in turbulent flows *Phys. Rev. E* 48(1), 29, 1993.
- [6] BINNING G., QUATE C. F. AND GERBER C. Atomic force microscope *Phys. Rev. Lett.* 56, 930-933, 1986.
- [7] BRADSHAW P. Turbulence *Springer, New York*, 1976
- [8] BROMMUNDT E., SACHS G., SACHSU D. Technische Mechanik: Eine Einführung *Oldenbourg Verlag München Wien*, 2007
- [9] BRONSTEIN I.N., SEMENDJAJEW K.A. Taschenbuch der Mathematik *B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart - Leipzig*, 1991
- [10] BRUUN H.H. Hot-wire Anemometry (Principles and signal analysis) *Oxford Science Publications*, 1995.
- [11] CASTAING B., GAGNE Y. AND HOPFINGER E.J. Velocity Probability Density Functions of High Reynolds Number Turbulence *Physica D* 46 177-200, 1990
- [12] CLIFTON A. Wind tunnel investigations of boundary layer conditions before and during snow drift Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, 2007.

- [13] CLIFTON A., RÜEDI J.-D., LEHNING M. Snow saltation threshold measurements in a drifting-snow wind tunnel *Journal of Glaciology, Vol. 52, No 179* 585 - 596, 2006
- [14] CLIFTON A., MANES C., RÜEDI J.-D., GUALA M., LEHNING M. On Shear-Driven Ventilation of Snow *Boundary-Layer Meteorol, DOI 10.1007/s10546-007-9235-0*, 2007
- [15] DRAIN L. E. The Laser Doppler Technique *J. Wiley*, 1980
- [16] ETTMEYER A., WALLRAPP O., SCHÄFER B. Technische Mechanik Teil 2: Elastostatik *Vorlesungsskript, Fachhochschule München*, 2006
- [17] ECKELMANN H. Einführung in die Strömungsmesstechnik *B. G. Teubner Verlag*, 1997
- [18] FRISCH U. Turbulence *Cambridge University Press*, 1995.
- [19] FRÖHLICH J. Large Eddy Simulation trubulenter Strömungen *B. G. Teubner Verlag*, 2006.
- [20] FUJII T., FUKUCHI T. Laser Remote Sensing *CRC Press*, 2005.
- [21] HAMAMATSU PSD (Position Sensitive Detector) *Datenblatt, Hamamatsu Photonics*
- [22] HASTIE T.J., TIBSHIRANI R.J. Generalized Additive Models (CRC Monographs on Statistics & Applied Probability) *Chapman & Hall/CRC*, 1990
- [23] KOCH M. Technische Hydraulik *Vorlesungsskript, Universität Kassel*
- [24] KOLMOGOROV A.N. The local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid for very high Reynolds number. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 1941.
- [25] LÜCK S., AND PEINKE J. Uniform Statistical Destription of the Transition between Near and Far Field Turbulence in a Wake Flow *Phys. Rev. Lett.* 83, 5495-5498, 1999.
- [26] MCCOMB W.D. The Physics of Fluid Turbulence. *Clarendon Press, Oxford*, 1996.
- [27] NATIONAL INSTRUMENTS NI USB-6009 *Datenblatt, National Instruments*
- [28] NAWROTH A.P. Stochastische Analyse und Modellierung von Finanz- und Turbulenzzeitreihen Doktorarbeit, Universität Oldenburg, 2007.
- [29] RAFFEL M., WILLERT C., WERELY S., KOMPENHANS J. PIV - A Practical Guide, Second Edition *Springer*, 2007.

- 
- [30] RICHARDSON L.F. *Weather Prediction by Numerical Process Cambridge University Press, Cambridge, 1922.*
- [31] SCHROEDER A., WILLERTS C. (EDS.) *PIV: New Developments and Recent Applications Springer, 2008.*
- [32] TRITTON D.J. *Physical Fluid Dynamics Oxford Science Publications, 1988.*
- [33] WALCH D. *Wetter und Klima Springer, 2003.*
- [34] WALLMARK J. T. *A new semiconductor photocell using lateral photoeffect Proceedings of the IRE, Band 45, S. 474-483, 1957.*
- [35] WIEDEMANN J. *Laser-Doppler-Anemometrie Springer, 1984.*



# Danksagung

Herrn Prof. Dr. Joachim Peinke danke ich für die Ermöglichung dieser Arbeit in der Arbeitsgruppe Hydrodynamik an der Universität Oldenburg. In vielen Diskussionen hat er mich hilfreich unterstützt und mir zugleich die Freiheit gegeben meine eigenen Ideen umzusetzen.

Ein weiterer Dank geht an Herrn Prof. Dr. Volker Mellert für die Bereitschaft als Zweitgutachter zur Verfügung zu stehen.

Dr. Stephan Barth danke ich für seine Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit und seine oft kritischen Kommentare. Dr. Matthias Wächter und Hendrik Heißelmann danke ich dafür, dass sie sich die Zeit genommen haben diese Arbeit auf inhaltliche und sprachliche Unstimmigkeiten hin zu durchforsten. Akil Srinivasan danke ich für die tatkräftige Unterstützung bei der Entwicklung der genutzten elektrischen Schaltungen. Der gesamten Arbeitsgruppe Hydrodynamik danke ich für die gute Zusammenarbeit während dieser Zeit.

Außerhalb der Universität danke ich meinen Freunden, die es immer verstanden haben mich aus einer 'turbulenten physikalisch Welt' in die reale Welt zurückzuholen.

Großer Dank gilt auch meiner Familie und besonders meinen Eltern, die mich stets in meiner Entscheidung wissenschaftlich zu arbeiten unterstützt und gefördert haben.



# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name Michael Hölling  
Geburtsdatum 15. Juli 1976  
Geburtsort Bremen

## Schulbildung

08/1983–05/1996 Grundschule, Orientierungsstufe und Gymnasium  
in Delmenhorst

## Zivildienst

08/1996–08/1997 Fahrer beim Malteser-Hilfsdienst e.V.  
in Delmenhorst

## Studium

09/1997–08/2000 Studium der Physik (Diplom) an der Carl von Ossietzky  
Universität Oldenburg  
08/2000–05/2001 Physik (Diplom) an der Oakland University, Michigan USA  
05/2001–06/2004 Studium der Physik (Diplom) an der Carl von Ossietzky  
Universität Oldenburg  
05/2002–07/2002 Studienarbeit im Fachbereich Physik der Carl von Ossietzky  
Universität Oldenburg, Arbeitsgruppe GRECO  
unter Prof. Dr. G.H. Bauer, mit dem Titel  
“Winkelaufgelöste Streulichtanalyse in Transmission  
und Reflektion mit Hilfe eines Goniometers”

03/2003–06/2004 Diplomarbeit im Fachbereich Physik der Carl von Ossietzky  
Universität Oldenburg, Arbeitsgruppe Akustik  
unter Prof. Dr. V. Mellert, mit dem Titel  
“Entwicklung eines Aufbaus zur Untersuchung  
von Ganzkörpervibrationen in zwei Raumrichtungen”

### **Wissenschaftliche Arbeit**

06/2004–06/2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Physik  
der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

# Erklärungen

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbst verfasst und nur die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Oldenburg, den 26. Mai 2008

.....  
(Michael Hölling)

### Zeitschriften und Proceedings

- M. HÖLLING, B. SCHULTE, S. BARTH AND J. PEINKE Sphere anemometer - a faster alternative solution to cup anemometry *Journal of Physics: Conference Series 75, 012064*, 2007.
- M. HÖLLING, S. BARTH, J. PEINKE AND J.-D. RÜEDI Using laser-cantilever anemometry under various flow conditions *PAMM - Proc. Appl Math. Mech. 6, 525-526*, 2007.
- M. HÖLLING, S. BARTH, J. PEINKE AND J.-D. RÜEDI Anemometry in snow particle flows *Progress in Turbulence II, Proceedings of the iTi Conference in Turbulence 2005, pp 75-78 (Springer)*, 2006.
- M. HÖLLING AND J. PEINKE Hochauflösender Geschwindigkeitssensor *ti Sensorik 2/2006, 8*, 2006.
- M. HÖLLING, S. BARTH AND J. PEINKE Alternative high resolution sensor to hot-wire and hot-film anemometer *PAMM - Proc. Appl Math. Mech. 5, 503-504*, 2005.
- 

### Vorträge

- M. HÖLLING AND J. PEINKE Using a Laser-Cantilever-Anemometer for two dimensional measurements in turbulent flows *60th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics of the APS*, 18.-20. November 2007, Salt Lake City USA
- M. HÖLLING, B. SCHULTE, S. BARTH AND J. PEINKE Sphere anemometer - a faster alternative solution to cup anemometry *The Science of making Torque from Wind*, 28.-31. August 2007, Lyngby Dänemark
- M. HÖLLING AND J. PEINKE Simultaneous velocity and temperature measurements in turbulent flows using laser-cantilver anemometry and a thermocouple sensor *59th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics of the APS*, 19.-21. November 2006, Tampa USA
- M. HÖLLING, S. BARTH, J. PEINKE AND J.-D. RÜEDI Using laser-cantilever anemometry under various flow conditions *Annual Meeting of the "Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik e. V."*, 27.-31. März 2006, Berlin GER
- M. HÖLLING, S. BARTH, J. PEINKE AND J.-D. RÜEDI Using laser-cantilever anemometry under various flow conditions *58th Annual Meeting*

*of the Division of Fluid Dynamics of the APS*, 20.-22. November 2005, Chicago USA

- M. HÖLLING, S. BARTH AND J. PEINKE Alternative high resolution sensor to hot-wire and hot-film anemometer *Annual Meeting of the "Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik e. V."*, 28 März -1. April 2005, Luxemburg LUX
- M. HÖLLING, S. BARTH AND J. PEINKE Turbulent flow measurements in air and water using a Laser-Cantilever-Anemometer *57th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics of the APS*, 21.-23. November 2004, Seattle USA

#### Poster

- M. HÖLLING, S. BARTH, J. PEINKE AND J.-D. RÜEDI Anemometry in snow particle flows *iTi Conference on Turbulence 2005*, 25.-28. September 2005, Bad Zwischenahn GER