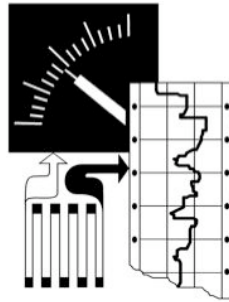


**Sensor zur zweidimensionalen
Strömungsmessung
von Newtonschen Fluiden**



Von der Fakultät Maschinenbau
der Universität Dortmund
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Oliver Martens
aus
Düsseldorf

2006

Dissertation eingereicht am: 8. August 2006

Mündliche Prüfung am: 29. September 2006

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. M. Uhle (Universität Dortmund)

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. K. Thermann (Universität Dortmund)

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Assistent am Fachgebiet Messtechnik im Fachbereich Maschinenbau der Universität Dortmund. Allen, die hierzu beigetragen haben, gilt mein persönlicher Dank.

Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Univ.- Prof. Dr.-Ing. M. Uhle bedanken, der mir den Freiraum gegeben hat, mich persönlich weiterzuentwickeln, sowie die Möglichkeit gegeben hat, als wissenschaftlicher Angestellter zu arbeiten und diese Arbeit abzuschließen.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Thermann vom Fachgebiet Maschinendynamik danke ich für sein Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Koreferates.

Herrn Wilhelm Cleves danke ich für die vielen persönlichen Gespräche und für die aufmunternden Worte in schweren Phasen. Den Studenten Patrick Wieland und Jan Eggert gilt ein besonderer Dank für die Hilfe bei der Konstruktion und der Messdatenaufnahme.

Abschließend möchte ich meiner lieben Frau Martina Vogt-Martens für die lange Geduld, die endlose Durchsicht und Korrektur des Textes danken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik bei der Windmessung	3
2.1	Beaufortskala	3
2.2	Messverfahren für die Messung von Windgeschwindigkeiten	4
2.2.1	Thermische Anemometer	5
2.2.2	Flügelradanemometer	6
2.2.3	Prandtl'sches Staurohr	7
2.2.4	Mehrlochsonden	7
2.3	Messverfahren zur Bestimmung des Strömungsvektors	8
2.3.1	Schalenkreuzanemometer	9
2.3.2	Ultraschallanemometer	9
2.3.3	Lidar	12
2.3.4	Sodar	13
2.4	Bewertung der vorhandenen Verfahren	14
3	Konzept des neuen Sensors	15
3.1	Anforderungen an den neuen Sensor	15
3.2	Wirkprinzip	15
3.3	Systemanalyse	16
3.3.1	Sondenkörper	16
3.3.2	Kraftmessung	16
3.3.3	Federsystem	17
3.3.4	Messung der Auslenkung	18
3.3.5	Gesamtsystem	20

4	Theoretische Überlegungen	21
4.1	Mechanische Betrachtungen	21
4.1.1	Mechanisches Modell	21
4.1.2	Bestimmung des Kraftvektors	23
4.2	Plattentheorie	24
4.3	FEM - Modell zur Überprüfung der Plattenmechanik	29
4.3.1	Finite-Elemente Programm Z88	29
4.3.2	Mechanisches Modell für die FEM	30
4.3.3	Erstellen der Superstruktur	31
4.3.4	Plausibilitätsprüfung	33
4.3.5	Abschließende Bemerkungen zur FEM	33
4.4	Strömung an der Kugel	35
4.4.1	Ähnlichkeit bei Strömungsproblemen	37
4.4.2	Strömungsformen an der Kugel	38
4.4.3	Kraft auf die Kugel	39
4.4.4	Kraft auf den Zylinder	43
4.4.5	Temperaturabhängigkeit der kinematischen Viskosität	44
4.4.6	Iteratives Verfahren für die Strömungskraftberechnung	45
5	Aufbau des Sensor-Prototypen	46
5.1	Mechanischer Aufbau	46
5.1.1	Aufnahme Messoptik	47
5.1.2	Die Messfahne	49
5.1.3	Kugel- und Zylindersonden	49
5.2	Elastische Platte	50
5.2.1	E-Modul gewalzter Bleche	50
5.3	Kantendetektoren	51
5.4	Messelektronik	52
5.5	Messkarte	53

6	Software	56
6.1	Messprogramm	56
6.1.1	Funktionenbeschreibung Funktion v8	59
6.1.2	FIR-Filter	59
6.1.3	Hammingwindow	62
6.1.4	Visualisierung	63
6.2	Kalibrierungsprogramm	63
7	Versuchsaufbau Messstrecke	64
7.1	Bestimmung der Fluidgeschwindigkeit als Referenz	66
8	Versuchsdurchführung	69
8.1	Abgleich der Kantendetektorkarten	69
8.2	Ermittlung der Weg-Messspannungskurve	69
8.3	Bestimmung der Federkonstanten des reduzierten Modells	71
8.3.1	Messung der Federkonstanten des reduzierten Modells	71
8.3.2	Fehleranalyse	74
8.3.3	Messungen mit verändertem Deckel	76
8.3.4	Fazit	80
8.4	Variation von Kugelgröße und Plattendicke	81
8.4.1	Bewertung der Plattendicken	81
8.4.2	Bewertung der Kugelgrößen	82
8.4.3	Messbereiche der Platten/Kugel Kombinationen	83
8.5	Messreihen mit der Sprungfunktion	84
8.6	Winkelmessung und Nachweis für die 2D-Messung	89
8.7	Fehlerbetrachtung	90

9 Messungen im Windkanal	91
9.1 Messergebnisse Windkanal	92
10 Ausblick	95
11 Zusammenfassung	96

Formelzeichen

α	Winkel
a	Beschleunigung
a	Abstand
A	Fläche
b	Länge
c	Strömungsgeschwindigkeit
c	Luftwiderstandsbeiwert
c	Federkonstante
C	Konstante
d	Entfernung
d	Durchmesser
δ	Dicke
δ	Winkel
η	Viskosität
E	Elastizitätsmodul
f	Frequenz
f	Fehler
F	Kraft
g	Erdbeschleunigung
h	Höhe
h	Übertragungsfunktion
H	Übertragungsfunktion
k	Konstante
K	Biegesteifigkeit
l	Länge
l	Hebelarm
m	Masse
M	Drehmoment
n	Drehzahl
n	Anzahl
n	Länge
ν	Viskosität

ν	Querkontraktionszahl
ω	Winkelgeschwindigkeit
p	Druck
P	Leistung
q	Flächenlast
r	Radius
ρ	Dichte
Re	Reynoldszahl
s	Länge
t	Temperatur
t	Zeit
T	Periode
τ	Schubspannung
θ	Winkel
u	Geschwindigkeit
U	Spannung
φ	Winkel
v	Geschwindigkeit
v	Ersatzquerkraft
V	Volumen
ψ	Winkel
w	Verschiebung
W	Verschiebung
W	Arbeit
x	Koordinate (Weg)
y	Koordinate (Weg)
z	Koordinate (Weg)

Indizes

a	außen
A	Aus
c	Feder
D	Doppler
E	Ein
End	Endwert
Feld	Feld
g	gewichts
i	innen
Ist	Istwert
Luft	Luft
max	maximal
mess	gemessen
min	minimal
M	Moment
Motor	Motor
Nenn	Nenn
P	Druck
Q	Quer
r	radial
rr	radial
rel	relativ
R	Reibung
Schraube	Schiffsschraube
Soll	Sollwert
Strömung	Strömung
T	Periode
T	Trägheit
vergl	Vergleich
w	Strömungswiderstand
∞	unendlich
*	reduziert

1 Einleitung

Bei der Messung von Strömungsgeschwindigkeiten gibt es für unterschiedliche Medien und Messbereiche jeweils verschiedene Messverfahren. Nicht jedes Verfahren ist in jedem Bereich geeignet. In dieser Arbeit soll ein Messverfahren gezeigt werden, das einerseits einen großen Messbereich aufweist und andererseits vom Prinzip her für unterschiedliche Newtonsche Fluide geeignet ist.

Bei der Bestimmung von c_w -Werten, vor allem in der Automobilindustrie, wird ein Gegenstand, in diesem Fall ein Fahrzeug, mit einer bekannten Strömung beaufschlagt. Mit der angeströmten Fläche und der gemessenen Widerstandskraft lässt sich der c_w -Wert ermitteln. Der neue Sensor geht nun den umgekehrten Weg. Mit einem bekannten c_w -Wert muss, bei gemessener Kraft, auf die Strömungsgeschwindigkeit zurückgeschlossen werden können.

Bei Halbschalenanemometern entsteht aufgrund der unterschiedlichen Strömungswiderstände je nach Anströmung eine Drehbewegung. Die Messung der Drehzahl lässt einen Schluss auf die Windgeschwindigkeit zu. Eine Bestimmung der Strömungsrichtung gelingt prinzipbedingt nicht.

Möchte man nun bewegliche Teile vermeiden, da diese mit der Zeit ihre Eigenschaften, insbesondere ihre Reibwerte, verändern, muss man eine alternative Kraftmessung finden.

In dieser Arbeit wird ein neuer Sensor vorgestellt, der über die Messung des Kraftvektors auf eine angeströmte Kugel die Strömungsgeschwindigkeit und die Richtung der Strömung bestimmt.

Da eine Kugel von allen Seiten dieselbe projizierte Oberfläche bietet, ist es irrelevant, aus welcher Richtung innerhalb der Strömungsebene die Kugel angeströmt wird.

Am Beispiel der Geschwindigkeitsmessung von Wasser in einer Rohrleitung wird das Prinzip entwickelt und im Windkanal verifiziert, um nachzuweisen, dass dieses Prinzip für unterschiedliche Medien funktionsfähig ist. Vorteilhaft gerade bei der Messung der Windgeschwindigkeit ist, dass auf bewegte Teile an der Sensorik verzichtet werden kann, d.h. dass es nicht notwendig sein wird, die Sensorik in kurzen Abständen neu kalibrieren zu müssen. Prinzipbedingt wird dieses neuartige Messkonzept weitgehend wartungsfrei sein und reproduzierbar genaue Werte liefern.

Bei der Windgeschwindigkeitsmessung werden der Betrag der Windgeschwindigkeit und die Richtung des Geschwindigkeitsvektors ermittelt. Dies geschieht ohne ein separates

Messverfahren. Die Richtungsdaten können direkt aus den Messdaten gewonnen werden. Die Information ist prinzipbedingt vorhanden.

2 Stand der Technik bei der Windmessung

Am Sonntag, den 25. Juni 2006, war in der Netzzeitung Folgendes zu lesen:

<http://www.netzeitung.de/sport/wm2006/412835.html>

Unwetter treiben Fußball-Fans von der Straße

25. Jun 21:56



Foto: dpa

 Sturmschäden in Düsseldorf

Im Süden und Westen Deutschlands gibt es heftige Unwetter mit Regen, Gewitter und Sturm. In einigen Regionen richteten die Unwetter hohe Schäden an - und verdarben den Fußballfans das Feiern.

Über Deutschlands Süden und Westen ist eine Schlechtwetterfront hereingebrochen. In Stuttgart trieb ein heftiges Gewitter am Sonntagabend tausende englische Fußballfans nach dem Sieg ihrer Mannschaft auseinander. Bei Windstärke neun tanzte nur noch der harte Kern der Fangemeinde im Regen.

...

Wegen einer Sturmwarnung wurden in Nordrhein-Westfalen viele Übertragungen der Fußball-WM-Spiele auf öffentlichen Plätzen abgesagt oder vorzeitig beendet. In Dortmund fielen die so genannten «Public-Viewing»-Veranstaltungen am Abend aus. Auch andernorts wurden sie nach Polizeiangaben aus Sicherheitsgründen abgesagt.

...

(nz)

In diesem Zeitungsartikel ist von einem Wind der Windstärke neun die Rede. Offensichtlich handelt es sich um keine leichte Brise. Aber was beschreibt der Begriff Windstärke. Die Windstärke ist eine alte, traditionelle Bezeichnung für die Windgeschwindigkeit, die in der Beaufortskala beschrieben wird.

2.1 Beaufortskala

Bei der Beaufortskala handelt es sich um eine gebräuchliche Skala für Windgeschwindigkeiten. Sir Francis Beaufort erfand die zwölftellige Skala 1806. Als Messinstrument diente

ihm das Gesamtverhalten des Segels seines Schiffes bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten. Die Einheit ist *Beaufort*, abgekürzt *bft*. Abbildung 1 zeigt die gebräuchlichsten Einheiten für die Windgeschwindigkeiten.

Windstärke in Bft	Windgeschwindigkeit				Wellenhöhe (m)	
	m/s	km/h	mph	kn	Tiefsee (Atlantik)	Flachsee (Nord- und Ostsee)
0	0,0 – <0,5	0,0 – <1,9	0 – <1,2	0 – <1	–	–
1	0,5 – <2,1	1,9 – <7,4	1,2 – <4,6	1 – <4	0,0 – 0,2	0,05
2	2,1 – <3,6	7,4 – <13,0	4,6 – <8,1	4 – <7	0,5 – 0,75	0,6
3	3,6 – <5,7	13,0 – <20,4	8,1 – <12,7	7 – <11		
4	5,7 – <8,2	20,4 – <29,6	12,7 – <18,4	11 – <16	0,8 – 1,2	1,0
5	8,2 – <11,3	29,6 – <40,7	18,4 – <25,3	16 – <22	1,2 – 2,0	1,5
6	11,3 – <14,4	40,7 – <51,9	25,3 – <32,2	22 – <28	2,0 – 3,5	2,3
7	14,4 – <17,5	51,9 – <63,0	32,2 – <39,1	28 – <34	3,5 – 6,0	3,0
8	17,5 – <21,1	63,0 – <75,9	39,1 – <47,2	34 – <41	mehr als 6,0	4,0
9	21,1 – <24,7	75,9 – <88,9	47,2 – <55,2	41 – <48		
10	24,7 – <28,8	88,9 – <103,7	55,2 – <64,4	48 – <56	bis 20,0	5,5
11	28,8 – <32,9	103,7 – <118,5	64,4 – <73,6	56 – <64	bis 20,0	–
12	>32,9	>118,5	>73,6	>64		

Abbildung 1: **Beaufortskala nach [81]**

Um in Wettervorhersagen Aussagen über die Windgeschwindigkeit zu machen, ist die Windstärke eine gebräuchliche Skala, die in vielen Fällen ausreichend ist. In technischen Anwendungen ist diese Skala in der Regel zu grob. Hier muss mit exakteren Verfahren gearbeitet werden. Das folgende Kapitel gibt eine Übersicht über die bekannten Verfahren.

2.2 Messverfahren für die Messung von Windgeschwindigkeiten

Für die Messung von Windgeschwindigkeiten werden Anemometer (griechisch; anemon: Wind; metron: Messgerät) verwendet. In diesem Kapitel wird eine Übersicht über die klassischen Messverfahren gegeben.

Eine Übersicht über die Mess- und Einsatzbereiche der verschiedenen Sondentypen liefert Abbildung 2.

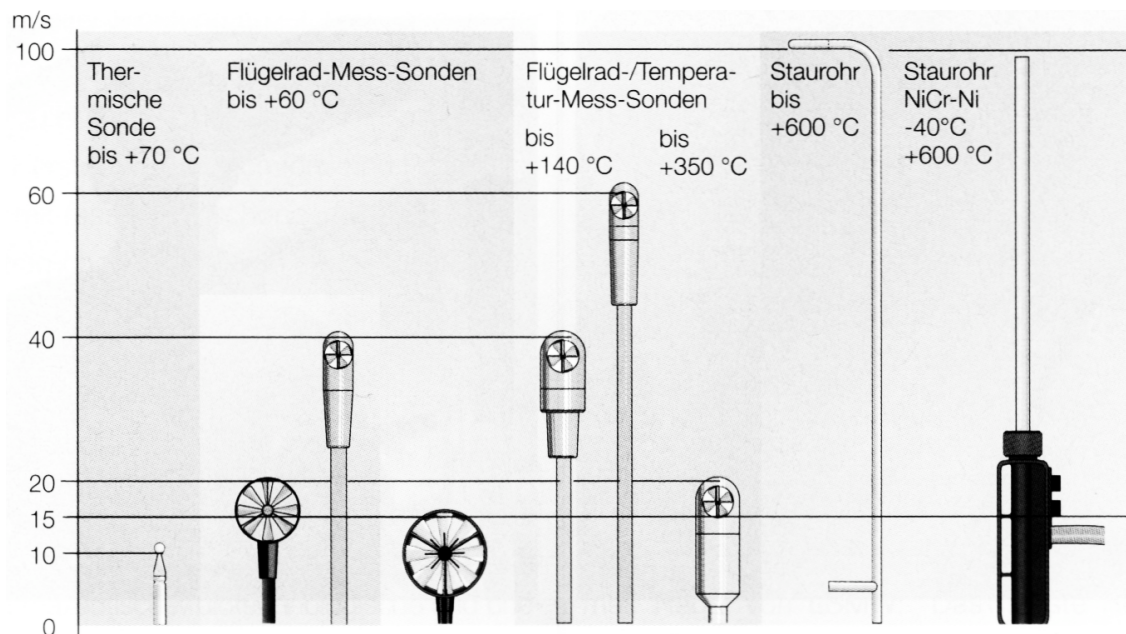


Abbildung 2: Anemometer nach Einsatzbereichen eingeteilt [74]

2.2.1 Thermische Anemometer

Bei thermischen Anemometern wird der Sonde Wärme zugeführt, die dann von der Strömung aufgenommen wird. Durch Messung der von der Sonde abgegebenen Wärmemenge kann die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Man unterscheidet Hitzdraht- und Heißfilmsonden.

In [61] wird die Funktion der thermischen Anemometer folgendermaßen beschrieben:

Die Hitzdrahtanemometrie ist ein weitverbreitetes Verfahren zur elektrischen Messung von Strömungsgeschwindigkeiten in gasförmigen oder flüssigen Medien. Hierbei wird der physikalische Vorgang des geschwindigkeitsabhängigen konvektiven Wärmetransportes zwischen erwärmtem Körper und umgebendem Fluid ausgenutzt. Thermische Anemometer sind für viele Einsatzfälle universell verwendbar. Spezielle Einsatzfälle erfordern Anpassungen und Weiterentwicklungen.

Die Hitzdrähte werden zwischen Haltespitzen gespannt, an die sie mit ihren Enden angelötet oder angeschweißt werden. Sie werden in der zu untersuchenden Strömung angeordnet und mittels eines elektrischen Stroms beheizt, so dass ein Temperaturgefälle zwischen Aufnehmer und umströmendem Medium

entsteht. Die Höhe des Temperaturgefälles muss unter Berücksichtigung der Eigenschaft des Drahtes und des zu untersuchenden Mediums gewählt werden. Hohe Übertemperaturen ergeben hohe Messempfindlichkeiten bezüglich der Geschwindigkeitsänderung und kleine Störemfindlichkeiten bezüglich möglicher Schwankungen der jeweiligen Medientemperatur.

Um aus dem geschwindigkeitsabhängigen Wärmeverlust des Messgrößenaufnehmers auf die Geschwindigkeit zu schließen, kann man zwei Methoden unterscheiden. Prägt man dem Fühler einen konstanten Strom auf, so wird die Drahttemperatur bzw. der elektrische Widerstand des Fühlers als Maß für die Strömungsgeschwindigkeit verwendet. Diese Methode nennt man auch Konstant-Strom-Methode (CCA engl. Constant Current Anemometer). Wird der Heizstrom bei Geschwindigkeitsänderung nachgeregelt, sodass die Temperatur und der Widerstand des Drahtes konstant bleiben, so spricht man von der Konstant-Temperatur-Methode (CTA engl. Constant Temperature Anemometry). Hierbei dient der Strom oder der Spannungsabfall über dem Hitzdraht zur Messung der Geschwindigkeit. Diese Methode hat den Vorteil einer höheren Empfindlichkeit und es besteht hier nicht die Gefahr des Durchbrennens des Drahtes bei unerwartetem Abfall der Anströmung.

Bei der Messung mit der CTA-Methode wird der Sensor in einer Wheatstoneschen Brückenschaltung verschaltet. Die Widerstandsänderung des Sensors wird über einen Operationsverstärker kompensiert, sodass der Fühler auf einer konstanten Übertemperatur gehalten werden kann. Die dafür benötigte Regelspannung dient als Maß für die Strömungsgeschwindigkeit.

Kleinste thermische Anemometer, so genannte Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS), werden in [66], [35], [67], [83], [11] und anderen vorgestellt. Hierbei können kleinste Strömungsgeschwindigkeiten und Volumenströme, bis zu einigen $\mu l/min$, gemessen werden. Spezielle 3D- Hitzdrahtanemometer werden beispielsweise in [61] vorgestellt.

Die Heißfilmsonde hat an Stelle des Hitzdrahtes einen dünnen Metallfilm auf einem Quarzglassubstrat. Die Funktion ist aber ähnlich.

2.2.2 Flügelradanemometer

Das Flügelradanemometer enthält ein kleines Flügelrad, das sich bei Anströmung dreht. Die Drehzahl des leichtlaufenden Flügelrades ist ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. Es gibt dieses in verschiedenen Größen für unterschiedliche Anwendungsfälle. Kleine

Anemometer dieser Bauform werden für die Vermessung in der Klimatechnik eingesetzt. Es wird dann beispielsweise in mehreren Punkten in einer Strömung gemessen und relativ genau die Gesamtströmung berechnet. Die Messgeräte sind heutzutage microprozessor-gesteuert und man kann das Prüfprogramm automatisiert ablaufen lassen. Diese Mess-geräte bedürfen einer regelmäßigen Wartung und einer Neukalibrierung. Außerdem sind sie anfällig für Verschmutzungen.

2.2.3 Prandtl'sches Staurohr

Das Prandtl'sche Staurohr, wie in Abbildung 3 dargestellt, dient zur Geschwindigkeits-messung in offener Strömung. Hierzu werden der Gesamtdruck und der statische Druck gemessen. Die Differenz der Drücke liefert dann nach [22] mit der Formel

$$v = \sqrt{2\Delta p/\rho}$$

die Geschwindigkeit. Durch die genaue Festlegung der mechanischen Dimensionen ist gewährleistet, dass der Differenzdruck gleich dem Staudruck $\rho v^2/2$ ist. Eine Kalibrierung ist deshalb nicht nötig.

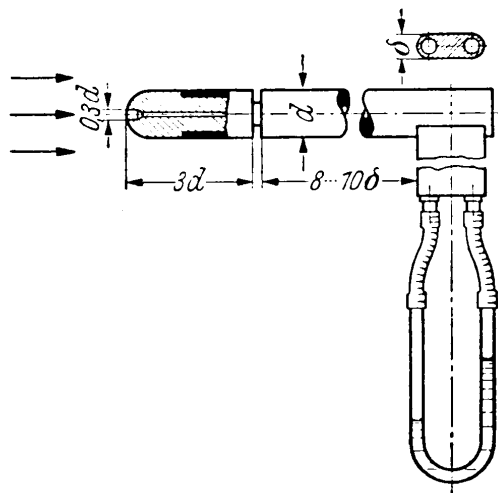


Abbildung 3: Prandtl'sches Staurohr nach [22]

2.2.4 Mehrlochsonden

Möchte man bei der Strömungsmessung nicht nur den Betrag der Strömung messen, sondern auch die Richtung bestimmen, bieten sich Mehrlochsonden an. Mit der Fünfloch-Staukugel nach van der Hegge Zijnen aus Abbildung 4 lässt sich unter Zuhilfenahme von

Eichkurven die Strömungsrichtung bestimmen. Zuvor wird die Kugel auf die senkrechte Bezugsebene eingestellt, das heißt, die Kugel wird so eingestellt, dass die Löcher 4 und 5 den gleichen Druck anzeigen. Nun kann anhand von Eichkurven eine Richtungsänderung festgestellt werden.

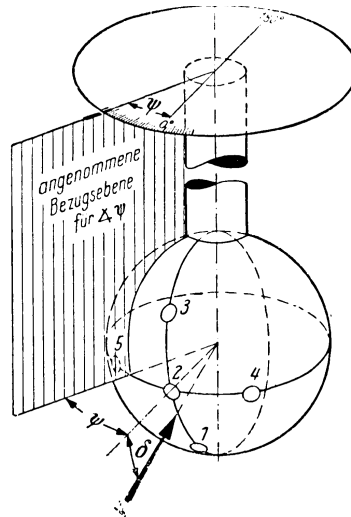


Abbildung 4: Fünflochsonde nach [22]

2.3 Messverfahren zur Bestimmung des Strömungsvektors

Für die Messung der Windgeschwindigkeit bei Windenergieanlagen werden im Wesentlichen zwei Messmethoden angewendet, zwei weitere sind in der Erprobung. Für Standortprognosen von Windkraftanlagen ist das Schalensternanemometer mit Windfahne noch Standard, das Ultraschallanemometer gewinnt langsam an Bedeutung. Bei Windkraftanlagen ist es weniger wichtig, den Betrag des Strömungsvektors exakt zu bestimmen, vielmehr ist die Ausrichtung der Gondel zur Windrichtung entscheidend. Daher werden Messgeräte, die zweidimensional messen können, immer beliebter. Zweidimensional messende Sensoren sind im Einzelnen:

- Schalenkreuzanemometer mit Windfahne
- Ultraschallanemometer
- Sodar
- Lidar

2.3.1 Schalenkreuzanemometer

In der Windenergie-Messtechnik haben sich für die Erfassung der Windgeschwindigkeit Schalenkreuzanemometer durchgesetzt. Die Schalenkreuz- oder auch Schalensternanemometer sind die einzigen, die nach IEC-Richtlinie 61400 zur Bestimmung von Leistungskurven bei Windenergieanlagen zugelassen sind (siehe [46]). In Abbildung 5 ist ein Schalenkreuzanemometer der Fa. Ammonit Messtechnik dargestellt. Da die Halbkugel einen anderen Widerstandsbeiwert als die Halbschale besitzt, entsteht bei Anströmung des Sensors eine Kräfteffferenz zwischen den Halbschalen. Das führt zu einem Drehmoment auf das Kreuz. Gemessen wird die Umdrehungsgeschwindigkeit, die proportional zur Strömungsgeschwindigkeit ist. Durch Kalibrierung wird ein großer Messbereich zuverlässig erfasst. Als Nachteile lassen sich die Trägheit der Schalen und ein Nachlaufen des Drehkreuzes bei plötzlicher Windänderung, zum Beispiel bei Windböen, nennen (Overspeeding-Effekt). Als Signalwandler haben sich wegen ihrer Robustheit optoelektronische Übertrager besonders bewährt. Häufig werden die Lagerungen auch beheizbar ausgelegt, damit auch bei tiefen Temperaturen Messungen möglich sind.



Abbildung 5: Schalenkreuzanemometer nach [3]

2.3.2 Ultraschallanemometer

Das Ultraschallanemometer dient zur zweidimensionalen Erfassung der horizontalen Komponenten der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung. Es eignet sich auch zur trägheitslosen Böen- und Spitzenwertmessung. Die Sensorarme werden im Bedarfsfall bei kritischen Umgebungstemperaturen automatisch beheizt. Das Anemometer aus Abbildung 6 besteht aus 4 Ultraschall-Wandlern, von denen sich jeweils 2 Wandler im Abstand von 200

mm gegenüberstehen. Die dadurch gebildeten zwei Messstrecken stehen senkrecht zueinander. Die Wandler fungieren sowohl als Schallsender als auch als Schallempfänger. Über die Steuerungselektronik werden die jeweilige Messstrecke und deren Messrichtung angewählt. Bei einer Messung wird nun in jeder der vier möglichen Richtungen, im Uhrzeigersinn, gemessen. Aus den 4 Einzelmessungen der Streckenrichtungen werden die Mittelwerte gebildet und zur weiteren Berechnung verwendet. Die benötigte Zeit für eine Messsequenz liegt bei ca. 10 msec bei $+20^{\circ}\text{C}$.

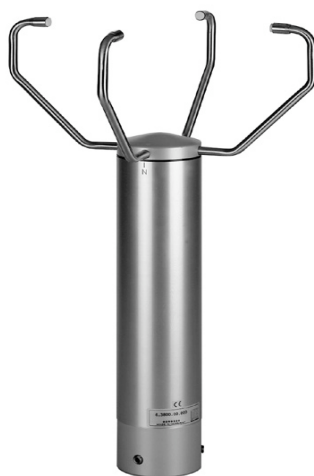


Abbildung 6: **Ultraschallanemometer nach [24]**

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in ruhender Luft überlagert sich mit der Windgeschwindigkeit. Eine Windgeschwindigkeitskomponente in Ausbreitungsrichtung des Schalls steigert dessen Ausbreitungsgeschwindigkeit, eine Windgeschwindigkeitskomponente entgegen der Ausbreitungsrichtung führt dagegen zu einer Verringerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die so überlagerte Ausbreitungsgeschwindigkeit hat unterschiedliche Schalllaufzeiten bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und -richtungen zur Folge.

Zur Messung werden an den gegenüberliegenden Sensorköpfen Ultraschallimpulse gesendet und empfangen. Die gemessenen Laufzeiten zwischen den Sensoren sind neben der Schallgeschwindigkeit c in ruhender Luft von der Strömungsgeschwindigkeit v abhängig. Die Abfolge der Impulse wird in Abbildung 7 gezeigt. Der erste Impuls von S_1 nach S_2 legt mit der Schallgeschwindigkeit c in der Zeit t_1 die Strecke ct_1 zurück. Der Weg wird mit der Luftgeschwindigkeit v um vt_1 verlängert. Jetzt wird die Laufzeit t_1 des ersten Impulses registriert. Der zweite Impuls wird vom Sender S_2 in Richtung S_1 geschickt. Bei kurzen

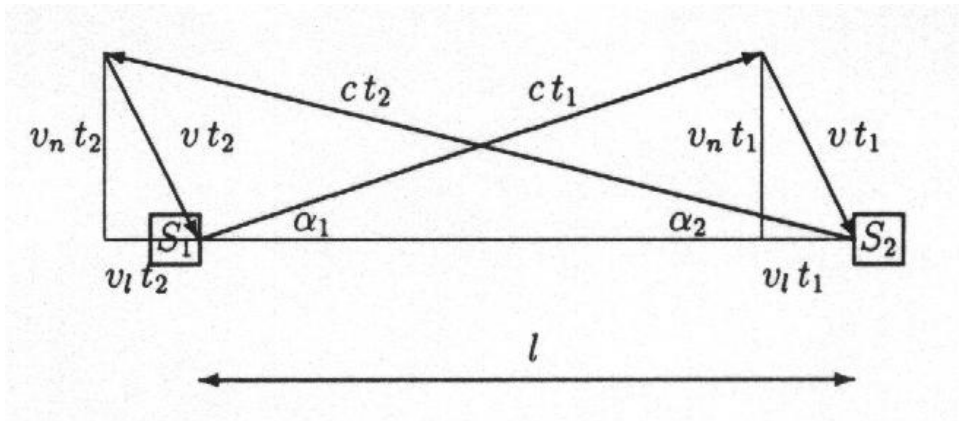


Abbildung 7: Darstellung der Geschwindigkeitskomponenten nach [26]

Zeiten zwischen t_1 und t_2 kann davon ausgegangen werden, dass die Luftgeschwindigkeit v konstant geblieben ist und die Winkel $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$. Für das Dreieck aus Abbildung 7 ergibt sich mit den Seiten ct_1 , $v_n t_1$ und $l - v_l t_1$ die Beziehung:

$$\cos(\alpha) = \frac{l - v_l t_1}{ct_1}$$

Umgestellt nach t_1 ergibt sich

$$t_1 = \frac{l}{c \cdot \cos(\alpha) + v_l}$$

Entsprechendes ergibt sich für t_2 , sodass sich in der Kombination eine Bestimmungsgleichung für

$$v_l = \frac{l}{2} \cdot \frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2}$$

ergibt.

In dieser Gleichung ist die Medientemperatur nicht mehr vorhanden, also ist das Messsystem temperaturunabhängig.

Da die Schallgeschwindigkeit stark von der Temperatur der Luft abhängig ist, wird die Laufzeit des Schalls auf jeder der beiden Messstrecken in beiden Richtungen gemessen. Dadurch kann der Einfluss der Temperatur auf das Messergebnis ausgeschaltet werden. Durch die Anordnung zweier senkrecht aufeinander stehender Messstrecken erhält man den Betrag und die Richtung des Windgeschwindigkeitsvektors. Ein Microprozessor im Sensor liefert die Messwerte.

2.3.3 Lidar

Das Lidar-Messverfahren (light detection and ranging) gleicht der Messung mit einem Mikrowellen-Radargerät. Der wichtigste Unterschied ist die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung, die bei Radar zwischen 1cm und 50cm liegt, bei Lidar aber bei $1\mu\text{m}$ liegt. Bei dem Lidar-Verfahren wird ein kurzer Lichtimpuls in die Atmosphäre ausgesandt, der sich an Aerosolschichten in der Luft reflektiert. Die rückgestreute Leistung wird registriert und nach Zeitverhalten, Intensität und Wellenlänge analysiert. Aus den Ergebnissen kann auf Geschwindigkeit und Zusammensetzung der einzelnen Luftschichten geschlossen werden, wobei nur die Komponente parallel zum ausgehenden Strahl gemessen werden kann (siehe auch [46], [77] und [15]). Abbildung 8 zeigt ein Lidar-System von 1971.

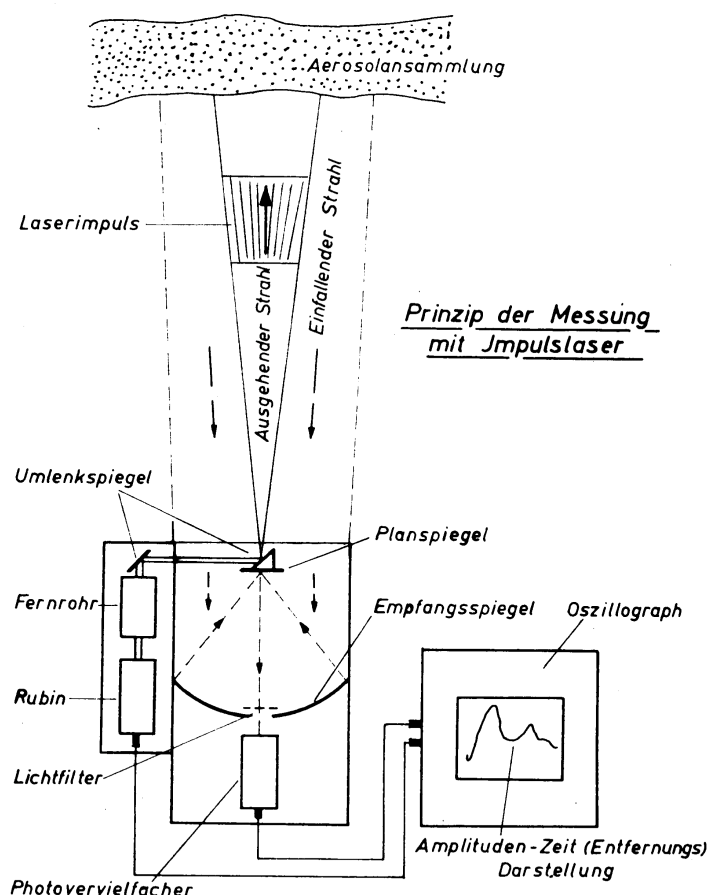


Abbildung 8: Lidar nach [77]

Wie auch bei der Radar-Messung gibt es bei der Messung mit einem Lidar-Gerät die Möglichkeit, die Geschwindigkeit eines Messkörpers über die Frequenzverschiebung durch

den Doppler-Effekt zu bestimmen (dazu auch [78]). Der Laser wird an den Aerosolpartikeln, die der Wind durch das Messvolumen transportiert, zurückgestreut. Dabei erfährt die gestreute Strahlung eine Dopplerverschiebung von

$$\Delta f_D = 2 \frac{V_{LOS}}{c} \cdot f_0$$

mit f_0 = Frequenz des CO_2 -Lasers ($28,3 \cdot 10^{12} Hz$), c = Lichtgeschwindigkeit und V_{LOS} = Komponente des Windvektors in Messrichtung (Line of Sight). Abbildung 9 veranschaulicht die Funktion eines Laser-Doppler-Anemometers.

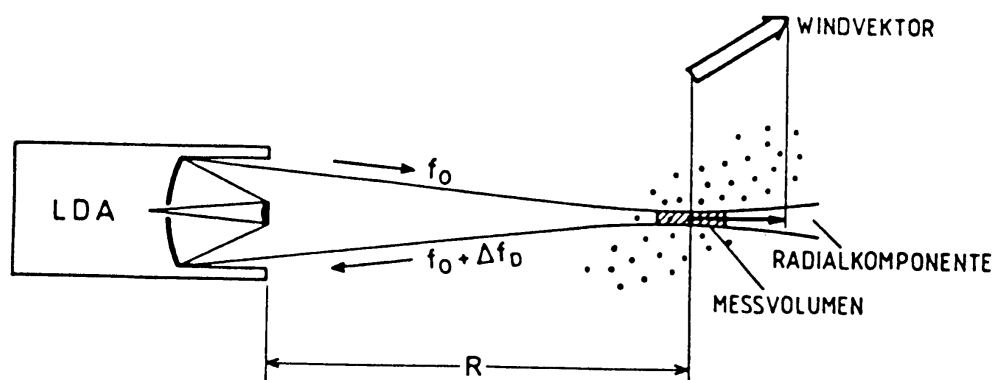


Abbildung 9: Funktion eines Doppler-Lidar nach [15]

Einer Windgeschwindigkeit von $1m/s$ entspricht eine Doppler-Frequenzverschiebung von $189kHz$. Dieses Messverfahren wird als Doppler-Lidar-Verfahren bezeichnet.

2.3.4 Sodar

Mit einem Sodar (Sound Detection and Ranging) kann das Windfeld der unteren Schichten der Atmosphäre vermessen werden. Analog zum Radar und Lidar wird entweder die rückgestreute Energie (siehe [47]) gemessen oder es wird die Frequenzverschiebung des zurückgestreuten Signals bestimmt (siehe [85]). Die Reichweiten eines Sodars liegen zwischen 200 und 500m in der Vertikalen. Somit kann ein Sodar für die Überprüfung von Standorten zur Eignung für Windkraftanlagen eingesetzt werden. Abbildung 10 zeigt ein mobiles Sodar nach [85]. Gemessen wird durch Aussendung und Auswertung von rückgestreuten Schallwellen(siehe [46]). Die Messungen liefern alle 10 Meter Werte über Windrichtung und Windstärke. Bei dem Aufbau von Sodar-Messgeräten spielt die Standortwahl eine wichtige Rolle. Akustische Störquellen können das Ergebnis unbrauchbar machen.



Abbildung 10: Sodar nach [85]

2.4 Bewertung der vorhandenen Verfahren

Die Verfahren zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit sind, bis auf die Mehrlochsonde, nicht in der Lage die Strömungsrichtung zu bestimmen. Bei den Verfahren zur Bestimmung des Strömungsvektors sind das Sodar und das Lidar sehr aufwendige Verfahren, die eine teure und unhandliche Hardware erfordern. Dafür sind diese in der Lage, ein Strömungsfeld vollständig aufzunehmen.

Für die Bestimmung eines Strömungsvektors in einem Punkt, zumindest die Bestimmung des ebenen Strömungsvektors, sind die Ultraschallanemometer und das Schalenkreuzanemometer mit Windfahne preiswerte und gebräuchliche Lösungen.

In dieser Arbeit wird nun ein neuer Sensor vorgestellt, der ebenfalls in der Lage ist, den Strömungsvektor zu bestimmen, ohne bewegliche Teile auszukommen und auch noch kostengünstig zu sein.

3 Konzept des neuen Sensors

Für die Konstruktion des neuen Strömungssensors werden als Erstes die Anforderungen definiert, die die Neukonstruktion erfüllen soll. Anschließend wird nach Vorstellung des Wirkprinzips (nach [MU]) durch eine Systemanalyse die Funktionsstruktur erstellt, an die sich die Auswahl der Funktionsblöcke anschließt.

3.1 Anforderungen an den neuen Sensor

Der Sensor soll möglichst wartungsfrei arbeiten. Herkömmliche Systeme setzen eine regelmäßige Kalibrierung voraus, da sie häufig mit sich bewegenden Teilen ausgestattet sind. Lagerungen ändern mit der Zeit ihre Reibwerte und führen dadurch zu Messfehlern. Der Sensor soll sowohl Betrag und Richtung der Strömung erfassen können als auch Strömungen unterschiedlicher Medien messen können. Der Sensor soll so konstruiert sein, dass Umwelteinflüsse die Messungen nicht beeinträchtigen. Selbstverständlich soll der Sensor einfach und kostengünstig sein.

Die Anforderungen lassen sich also zusammenfassen zu:

- Messung von Betrag und Richtung der Strömung,
- wartungsfrei,
- kostengünstig,
- robust gegenüber Umwelteinflüssen.

3.2 Wirkprinzip

Bei Kraftfahrzeugen wird immer mehr Wert auf geringen Kraftstoffverbrauch gelegt. Wesentlich für den Verbrauch an Kraftstoffen, vor allem bei höheren Geschwindigkeiten, ist der Luftwiderstand des Fahrzeuges. Dieser setzt sich zusammen aus der projizierten Fläche des Fahrzeuges in Strömungsrichtung und dem c_w -Wert. Der c_w -Wert ist der Luftwiderstandsbeiwert und ist ein Maß für die „Windschlüpfrigkeit“ eines Fahrzeuges.

Für die Kraft auf ein Fahrzeug oder auch einen Gegenstand ergibt sich somit:

$$F_{Luft} = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho v^2}{2}.$$

Nehme man nun an, dass der c_w -Wert und die Fläche eines Gegenstandes bekannt sind. Weiterhin nehme man an, dass der Gegenstand von jeder Anströmungsrichtung dieselbe Fläche und denselben c_w -Wert bietet, dann ist es möglich, durch Bestimmung des ebenen Kraftvektors auf den Gegenstand die Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen.

3.3 Systemanalyse

3.3.1 Sondenkörper

Um einen Strömungsvektor in der horizontalen Ebene bestimmen zu können, muss nicht nur der Betrag der Strömung, sondern auch die Strömungsrichtung gemessen werden. Möchte man nach dem oben erläuterten Prinzip einen Sensor aufbauen, ist es wünschenswert, dass der Sondenkörper aus allen Richtungen der Strömungsebene denselben c_w -Wert und dieselbe Oberfläche hat.

Der Körper, der von allen Seiten dieselbe projizierte Oberfläche bietet, ist eine Kugel. Es gilt also eine Kraft zu messen, die von der Strömung auf die Kugel ausgeübt wird.

3.3.2 Kraftmessung

Für die Kraftmessung stehen viele Prinzipien zur Verfügung, von denen zwei hier besonders interessant sind.

- Messung der elastischen Formänderung einer Feder
- Messung mit Piezoelementen

Bei der Messung der Kraft über eine Feder wird bei bekannter Federkonstante aufgrund der Auslenkung auf die Kraft geschlossen. Es ergibt sich die Kraft F zu

$$F = c \cdot x$$

Hierbei wird die Federkonstante c in $[N/m]$ und der Weg x allgemein in $[m]$ angegeben. Bei Messung des Weges ist also bei bekannter Federkonstante die Kraft berechenbar.

Die Kraftmessung mit Piezoelementen mithilfe des piezoelektrischen Effekts ist nur für dynamische Messungen geeignet. Die Verwendung von piezoresistiven Aufnehmern hingegen wäre hier möglich, da sich in diesem Fall die statische Widerstandsänderung des Quarzes

aufgrund von Veränderungen der Gitterstruktur problemlos messen lässt. Bei Verwendung dieser Methode müsste eine Lagerung vorgesehen werden, die möglichst reibfrei arbeitet. Da jede Lagerung hier aber zu Verlusten führt (Stick-Slip-Effekt, Haftreibung und Gleitreibung) und mit nur sehr kleinen Kräften zu rechnen ist, scheidet diese Möglichkeit hier auch aus.

Es wird eine Kraftmessung mit Hilfe einer Feder ausgewählt. Bei bekannter Federkonstante kann dann die Kraft über die Bestimmung des Federweges berechnet werden.

3.3.3 Federsystem

Um die Kraft zu bestimmen, soll eine Feder eingesetzt werden. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, einen elastischen Stab fest zu lagern und die Auslenkung durch eine Kraft zu bestimmen. Die Biegung des Stabes kann mithilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS) erfasst werden. Durch Befestigung mehrerer DMS kann die Anordnung temperaturkompensiert werden und die Kraft kann zuverlässig erfasst werden. Dieses Verfahren wird im Labor und in Windkanälen zuverlässig eingesetzt. In dieser Anordnung ist ein Schutz der Messeinrichtung vor Umwelteinflüssen nicht einfach realisierbar. Ein berührendes Dichtsystem würde einen Einfluss auf die Messung haben. Weiterhin sind DMS in der Serienproduktion nicht einfach montierbar und eine Kalibrierung ist in jedem Fall notwendig. Alternative Federungssysteme, die auch noch die Möglichkeit bieten, den Messraum

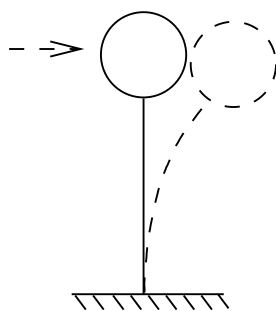


Abbildung 11: **Mechanisches Modell**

vom Sondenbereich zu trennen, um Umwelteinflüsse fernzuhalten, sind in Abbildung 12 dargestellt. Die räumliche Trennung kann durch eine Kraftumleitung erreicht werden. Es wird also eine starre Stange vorgesehen, die gelagert werden muss. Die Federn dienen nun zur Aufnahme der Kräfte. Die Messung der Auslenkung der Federn liefert dann, bei bekanntem Federsteifigkeitswert, die Kraft. Die Stange muss möglichst reibungsfrei aus-

lenkbar sein. Für die reibungsarme Lagerung wurden die drei Systeme aus Abbildung 12 gefunden.

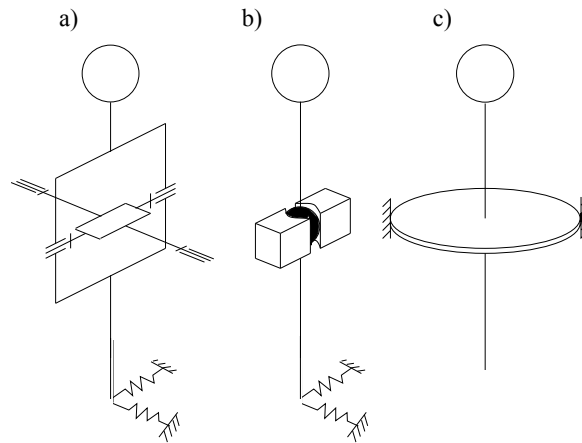


Abbildung 12: **Mechanische Modelle**

Zur ersten Überprüfung wurden Prototypen der drei Möglichkeiten erstellt. Für den Fall 12-a wurden Kugellager verwendet. Für den Fall 12-b wurde ein Wellengleitlager der Firma Igus verwendet, das über eine Kugel zum Ausgleich von Lagefehlern verfügt.

Genauere Betrachtungen der Entwürfe 12 a und b zeigten, dass in diesem Fall der bei reibbehafteten Lagerungen immer auftretende Stick-Slip-Effekt nicht zu vernachlässigen ist. Es wurde also der Fall 12-c gewählt. Hierbei hat die Lagerung mit der Platte mehrere Aufgaben zu erfüllen. Einerseits trennt sie den Messraum von dem Kraftwirkungsbereich und andererseits stellt sie gleichzeitig die Lagerung und die Federung zur Verfügung. Ein weiterer Vorteil ist die vollständige Symmetrie dieser Anordnung. Sowohl die Sonde als auch die Feder haben völlig symmetrische Eigenschaften.

3.3.4 Messung der Auslenkung

Für die Bestimmung der Auslenkung einer Feder stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Ein gebräuchliches Verfahren ist die Verwendung von Dehnungsmessstreifen, die bei einer Längenänderung ihren elektrischen Widerstand ändern. Weitere Prinzipien sind optische, magnetische und kapazitive Verfahren für die Bestimmung von Abständen.

Die Messung der Auslenkung, oder anders gesagt des Federweges, muss in jedem Fall reibungsarm, am besten reibungsfrei erfolgen. Eine Möglichkeit, berührungsfrei, das heißt

reibungsfrei, Lageverschiebungen zu ermitteln, ist die Verwendung eines Kantendetektors (nach [MU]).

Der Kantendetektor beschreibt ein optisches Messverfahren für kleinste Längen mit hoher Auflösung. Die optische Anordnung, wie in Abbildung 13 gezeigt, besteht darin, dass eine Photodiode, die von einer IR-Diode beleuchtet wird, mit einer Kante teilweise abgeschattet wird. Nun dient der Grad der Abschattung als Messwert für die Lage der Kante.

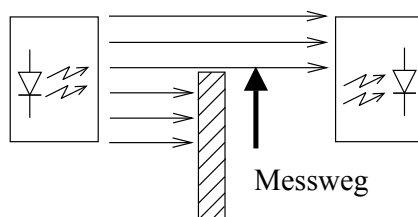


Abbildung 13: **Funktionsprinzip der Kantendetektion**

Eine elektronische Schaltung wertet die Abschattung aus und liefert eine analoge Messspannung. Die Messspannung ist zu dem Messweg nahezu proportional.

Kantendetektion ist in hoher Auflösung und hoher Genauigkeit im Mikrometerbereich möglich. Vorherige Anwendungen waren die Messung des Durchmessers während der Fertigung von Drehteilen sowie die Foliendickenmessung bei der Produktion von Folien.

3.3.5 Gesamtsystem

Das Gesamtsystem besteht, wie in Abbildung 14 dargestellt, aus der auf dem Stab montierten Kugel, einem Federblech, das mit dem Stab fest verbunden ist, und den Messfahnen für x- und y-Richtung. Die Strömung übt auf die Kugel eine Kraft aus. Die Stange sei als starr angenommen. Die Feder wird als Blechplatte ausgeführt. Die Stange übt über die starre Verbindung mit der Platte auf diese ein Drehmoment aus und verformt die Platte elastisch. Der untere Teil der Stange wird ausgelenkt. An diesem unteren Ende der Stange sind zwei scharfe Kanten befestigt, jeweils eine für die x-Richtung und eine für die y-Richtung. Die Kanten schatten dann in der Optikaufnahme die entsprechenden Photoempfänger ab. Die gesamte Apparatur soll gegen Umwelteinflüsse geschützt werden. Weiterhin sollte die Abtastvorrichtung gegen Störeinflüsse geschützt werden.

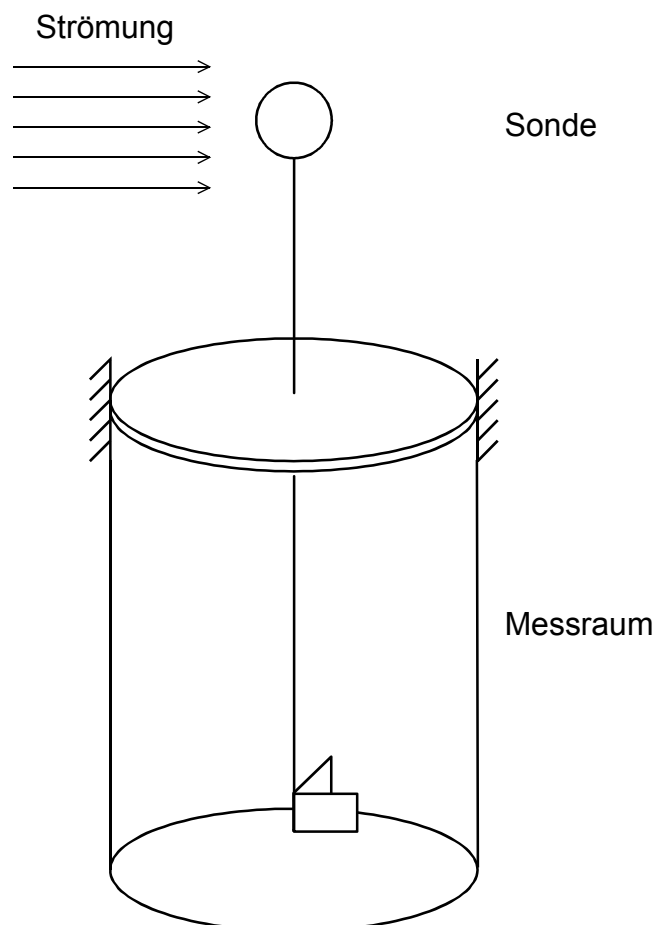


Abbildung 14: Aufbau des Gesamtsystems

4 Theoretische Überlegungen

In diesem Kapitel sollen die theoretischen Grundlagen der einzelnen Komponenten erarbeitet werden. Anschließend werden die einzelnen Teile zu einem Ganzen zusammengefügt. Zunächst wird das mechanische Modell und anschließend das strömungsmechanische Modell betrachtet.

4.1 Mechanische Betrachtungen

Das mechanische Modell besteht aus einer als starr angenommenen Stange, der Kugel als Sonde und der elastischen Platte. Bei dieser Anordnung ergibt sich ein völlig symmetrisches Verhalten in der Strömungsebene beziehungsweise der Messebene. Es spielt also für die Messung keine Rolle, aus welcher Richtung die Sonde angeströmt wird.

Für die weitere Betrachtung wird das Modell folgendermaßen entwickelt. Die Kugel wird mit einer Strömung mit der Strömungsgeschwindigkeit v_∞ angeströmt. Dies bewirkt eine Kraft auf die als starr angenommene Stange. Die Stange sei in das Federblech eingespannt. Die Verschiebung des unteren Stangenendes wird optisch in zwei zueinander senkrechten Richtungen gemessen.

4.1.1 Mechanisches Modell

Zur Beschreibung der Federeigenschaften des Modells wurde ein Ersatz-Modell, wie es in Abbildung 15 dargestellt ist, verwendet. Die Stange, an der die Kugel befestigt ist, gilt als starr. Die Federung der Platte wird in zwei an der Messfahne angebrachten Federn umgerechnet. Aufgabe ist nun, die Federsteifigkeiten der beiden Ersatzfedern zu bestimmen. Hierzu werden die Federkonstanten direkt bestimmt, indem mit bekannten Kräften die Auslenkung gemessen wird. Über das Hooksche-Gesetz lässt sich dann die Federsteifigkeit berechnen:

$$c = \frac{F_c}{x}$$

Für das ebene Modell nach Abbildung 16 liefert die Momentenbilanz

$$F = F_c \cdot \frac{l_2}{l_1} \Rightarrow F = c \cdot x \cdot \frac{l_2}{l_1}$$

Das bedeutet, dass die Kraft F direkt gemessen werden kann, indem man die Federauslenkung x misst. Voraussetzung ist allerdings, dass die Federkonstante c bekannt ist. Das Verhältnis l_2/l_1 ändert sich nicht.

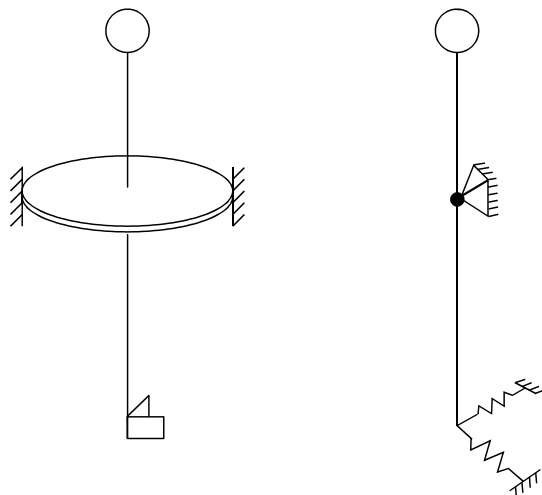


Abbildung 15: Mechanisches Modell und äquivalentes Ersatzsystem

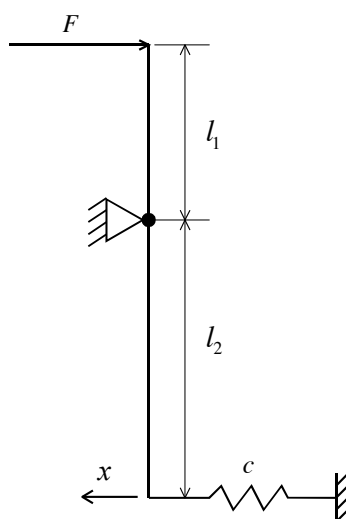


Abbildung 16: Ebenes, mechanisches Modell

4.1.2 Bestimmung des Kraftvektors

Sind die beiden Komponenten F_x und F_y des Kraftvektors, wie in Abbildung 17 gezeigt, durch Messung bekannt, dann gilt für den Betrag des Kraftvektors

$$|\vec{F}| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

Die Richtung des Kraftvektors, also der Winkel φ , ergibt sich zu

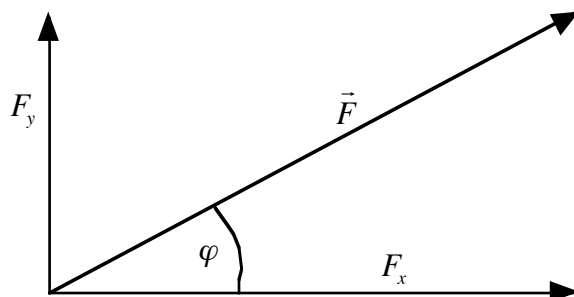


Abbildung 17: **Kraftvektor**

$$\tan(\varphi) = \frac{F_y}{F_x}$$
$$\varphi = \operatorname{atan} \frac{F_y}{F_x}.$$

Um den Kraftvektor in allen Quadranten beschreiben zu können, muss bei negativem F_x eine Korrektur um π vorgenommen werden. Somit ist der Kraftvektor in Richtung und Betrag bekannt. Das bedeutet aber auch, dass der Strömungsvektor in Betrag und Richtung bekannt ist, wenn die x- und y-Komponenten gemessen werden können.

4.2 Plattentheorie

Das Federblech kann als Kreisringplatte, wie in Abbildung 18 gezeigt, modelliert werden (nach [54] und [KT]). Die Platte ist am Außenradius r_a im Gehäuse und am Innenradius r_i in einen starren Körper eingespannt. Die starr angenommene Innenplatte berücksichtigt dabei die im Vergleich zum Federblech praktisch undeformierbare Schraubenmutter zur Befestigung des zylindrischen Stabes mit Messkugel und -fahne. Unter der Wirkung des

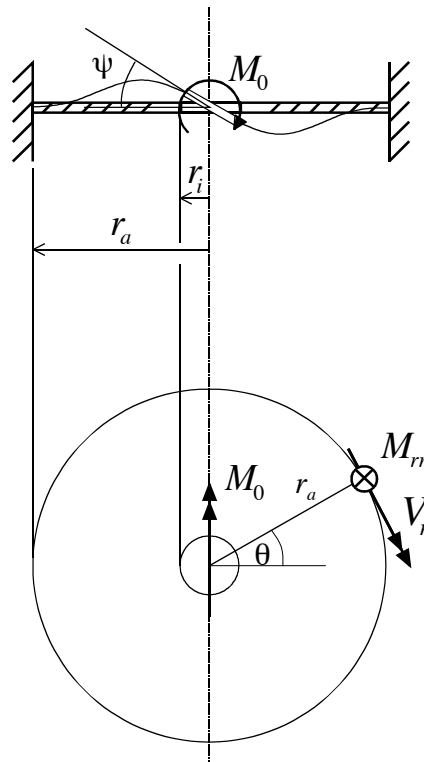


Abbildung 18: **Bezeichnungen an der Platte**

äußeren Momentes M_0 (aus der Kraft auf die angeströmte Messkugel) verdreht sich die starre Innenplatte um einen kleinen, zunächst noch unbekanntem Winkel ψ und prägt dem Innenrand die Verschiebung

$$w(r_i, \theta) = \psi r_i \cos \theta$$

auf. Es ist daher naheliegend, die Verschiebung in einem beliebigen Punkt $(r_i \leq r \leq r_a, \theta)$ der elastischen Platte in der Form

$$w(r, \theta) = W(r) \cos \theta$$

anzusetzen. Tatsächlich erfüllt dieser Separationsansatz die partielle Differentialgleichung

$$\Delta\Delta w = \frac{q}{K}$$

für die Durchbiegung $w(r, \theta)$ der dünnen, elastisch isotropen Platte mit der Biegesteifigkeit

$$K = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}$$

h = Plattendicke

E = Elastizitätsmodul

ν = Querkontraktionszahl

und der Flächenlast $q(r, \theta)$. Flächenlasten sind für den hier betrachteten Anwendungsfall nicht relevant, sodass mit $q \equiv 0$ die homogene Plattengleichung betrachtet werden kann.

Mit dem Operator

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$$

in Polarkoordinaten und dem obigen Separationsansatz geht sie in die gewöhnliche Differentialgleichung

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} - \frac{1}{r^2} \right) \left(\frac{d^2 W}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dW}{dr} - \frac{1}{r^2} W \right) = 0$$

für die nur noch von der Koordinate r abhängigen Funktion $W(r)$ über. Die Lösung dieser Eulerschen Differentialgleichung lautet

$$W(r) = C_1 r + C_2 r^{-1} + C_3 r^3 + C_4 r \ln r.$$

Die Konstanten C_1 bis C_4 ergeben sich aus den Randbedingungen

$$W(r_a) = 0$$

$$W'(r_a) = 0$$

$$W(r_i) = r_i \psi$$

$$W'(r_i) = \psi$$

durch Lösen des zugehörigen linearen Gleichungssystems.

Um den Zusammenhang zwischen dem äußeren Moment M_0 und der Verdrehung ψ der starren Innenplatte anschreiben zu können, benötigt man noch die Schnittgrößen der Platte im Schnitt $r = \text{const}$. Ausgehend von den Grundgleichungen der Plattentheorie findet man für das

radiale Biegemoment

$$\begin{aligned} m_{rr}(r, \theta) &= -K \left[w'' + \nu \left(\frac{w'}{r} + \frac{w''}{r^2} \right) \right] \\ &= -K \underbrace{\left[W'' + \nu \left(\frac{W'}{r} - \frac{W}{r^2} \right) \right]}_{M_{rr}(r)} \cos \theta \end{aligned}$$

und die Ersatzquerkraft

$$\begin{aligned} v_r(r, \theta) &= -K \left[(\Delta w)' + (1 - \nu) \frac{1}{r} \left(\frac{w''}{r} \right)' \right] \\ &= -K \underbrace{\left[\left(W'' + \frac{1}{r} W' - \frac{1}{r^2} W \right)' - (1 - \nu) \frac{1}{r} \left(\frac{W}{r} \right)' \right]}_{V_r(r)} \cos \theta \end{aligned}$$

wieder Darstellungen mit harmonischer Abhängigkeit in Umfangsrichtung. In Abbildung 18 sind die positiven Schnittgrößen im Radialschnitt dargestellt. Die Gleichgewichtsbedingung der Kräfte senkrecht zur Plattenebene

$$\int_0^{2\pi} V_r(r) \cos \theta \, r d\theta = 0$$

ist offensichtlich erfüllt, da das Integral der Kosinusfunktion über eine Periode verschwindet. Mit entsprechender Begründung gilt dies auch für die Momentenbilanz um die horizontale Achse (senkrecht zu M_0)

$$\int_0^{2\pi} [M_{rr}(r) \cos \theta \sin \theta - V_r(r) \cos \theta \cdot r \sin \theta] r d\theta = 0.$$

Den gesuchten Zusammenhang zwischen M_0 und ψ findet man aus der dritten, nicht identisch erfüllten Gleichgewichtsbedingung, der Momentenbilanz in M_0 Richtung:

$$M_0 = \int_0^{2\pi} [M_{rr}(r) \cos^2 \theta - V(r)r \cos^2 \theta] r d\theta = \pi r [M_{rr}(r) - rV_r(r)].$$

Als Rechenkontrolle kann benutzt werden, dass die rechte Seite unabhängig von r sein muss. Die Auswertung führt auf die handliche Formel

$$M_0 = \frac{4\pi K}{\underbrace{\ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right) - \frac{r_a^2 - r_i^2}{r_a^2 + r_i^2}}_k} \psi = k\psi.$$

Aus der Drehfederkonstanten

$$k = \frac{4\pi K}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) - \frac{r_a^2 - r_i^2}{r_a^2 + r_i^2}}$$

ergibt sich schließlich die in Abbildung 16 eingeführte Federkonstante zu

$$c = \frac{k}{l_2^2}.$$

Führt man die Berechnung der Biegelinie mit den obigen Annahmen und den Werten aus Tabelle 1 durch, ergibt sich die Darstellung aus Abbildung 19.

Tabelle 1: Annahmen für die Rechnung

Var	Wert	Bemerkung
ν	0,3	Querkontraktionszahl
l_2	83,75 mm	untere Stablänge
E	$2 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$	E-Modul
r_i	6 mm	Innenradius Platte
r_a	19,5 mm	Außenradius Platte
d	0,2 mm	Plattendicke

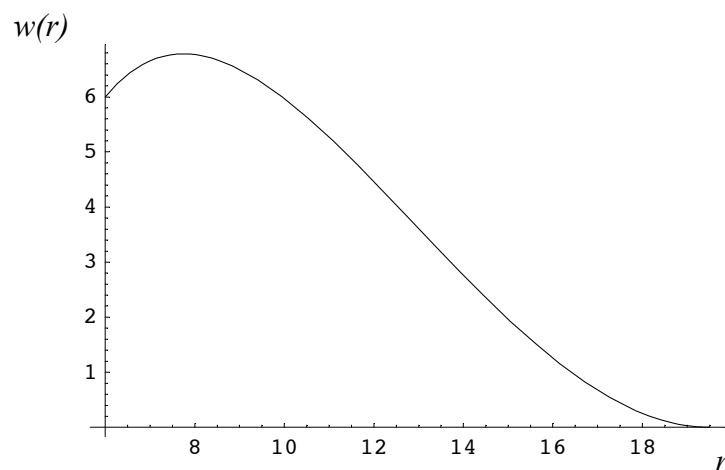


Abbildung 19: **Biegelinie der Platte**

Die Ergebnisse für die Federkonstanten c für die verschiedenen Plattendicken sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Federkonstanten

Plattendicke	c
0,2mm	679,4 N/m
0,1mm	84,5 N/m
0,05mm	10,6 N/m

4.3 FEM - Modell zur Überprüfung der Plattenmechanik

Die Finite-Elemente-Methode (FEM, englisch: finite element method) wird in vielen Ingenieurbereichen für komplizierte Probleme standardmäßig eingesetzt. Dies umfasst sowohl mechanische, elektrische als auch strömungstechnische Gebiete. Der Einsatz der FEM ermöglicht in einem weiteren Schritt auch die Berücksichtigung von anisotropen Werkstoffen, also den Einfluss verschiedener E-Module der Bleche in Walzrichtung oder senkrecht dazu.

Der Ablauf für die Lösung eines technischen Problems mit Hilfe der FEM läuft im Allgemeinen nach folgendem Schema ab:

1. Erstellung eines Modells
2. Diskretisierung des Modells (i.d.R. durch eine Softwarelösung)
3. Erstellung des FE-Modells
4. Berechnung des Ergebnisses
5. Darstellung der Ergebnisse
6. Interpretation der Ergebnisse

Dem letzten Punkt kommt eine ganz besondere Bedeutung zu. Es ist ganz entscheidend, dass die Ergebnisse des FEM-Programms auf Plausibilität überprüft werden. Kleinste Fehler in der Auswahl der Elementtypen oder in der Festlegung der Rand- und Übergangsbedingungen können zu völlig unzureichenden Ergebnissen führen. Eine Kenntnis oder wenigstens eine Abschätzung der groben Ergebnisse ist im Vorfeld unbedingt notwendig.

4.3.1 Finite-Elemente Programm Z88

Bei der verwendeten FEM-Software handelt es sich um das Programmpaket Z88, das an der Universität Bayreuth unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. F. Rieg entwickelt wurde. Es handelt sich um ein kompaktes, modulares und schnelles Programmpaket für UNIX-Systeme und Windowsrechner. Das Programm steht als Freeware unter der GNU GPL zur Verfügung und beschränkt sich auf die Berechnung von mechanischen Problemen.

4.3.2 Mechanisches Modell für die FEM

Bei der Erstellung des mechanischen Modells für die FE-Analyse ist auf die korrekte Erstellung der Rand- und Übergangsbedingungen zu achten. Das verwendete Modell wurde wie im linken Teil der Abbildung 20 aufgebaut. An der Stange greift die Kraft an, die aus der Strömung resultiert. Die Platte ist rundherum in der Form gelagert, sodass sie Kräfte, aber keine Drehmomente aufnehmen kann. Die rechte Seite der Abbildung 20 zeigt die Schnittkräfte, die bei der Freischneidung (nach [SK]) der Platte entstehen. Die

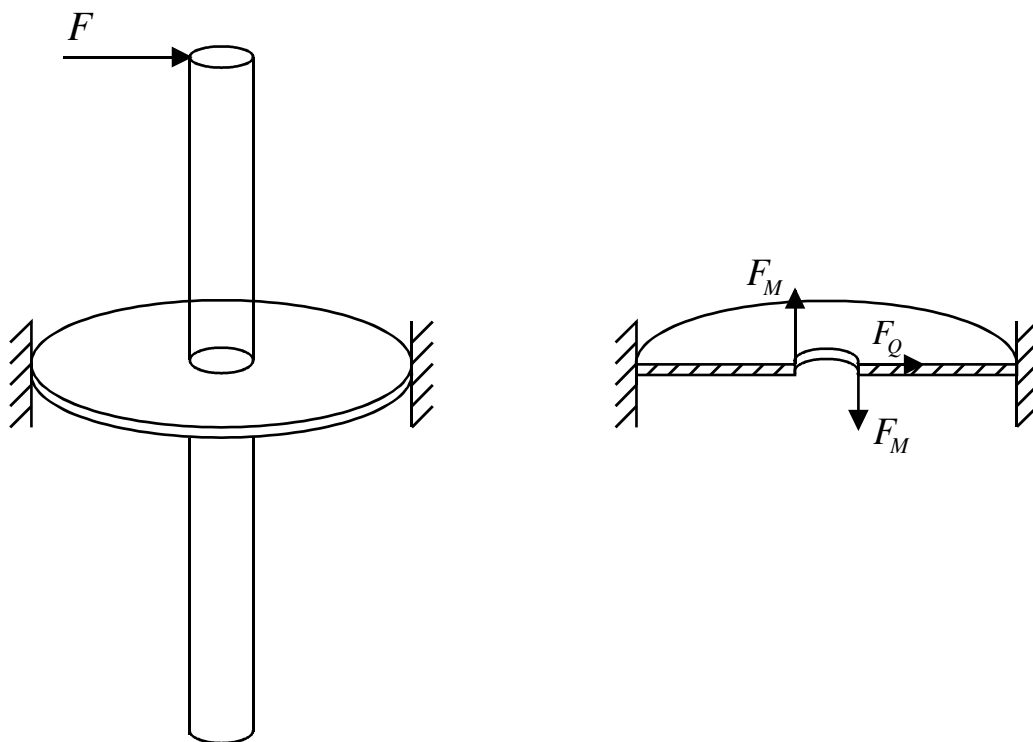


Abbildung 20: Mechanisches Modell für die FEM

Kräfte F_M bilden das Kräftepaar, das dem Moment entspricht, welches durch die Kraft und den Hebelarm entsteht. Die Querkraft F_Q kann später vernachlässigt werden, da sie keinen Einfluss auf die Verformung bringt. Die Platte ist in Querrichtung schubsteif, was in einem FE-Modell sicherheitshalber überprüft wurde.

Es wird für die Berechnung eine halbe Platte betrachtet. Hierbei sind jetzt die Übergangsbedingungen zu beachten. Die Schnittfläche kann sich nur noch in der Schnittebene bewegen. Die Platte wird am äußeren Umfang fest eingespannt.

4.3.3 Erstellen der Superstruktur

Nach der Erstellung des mechanischen Modells für die FE-Analyse ist es notwendig, die Elementtypen der Superstruktur festzulegen. Besonders bei Scheiben und Platten ist darauf zu achten, dass ein geeigneter Elementtyp gewählt wird. Bei dünnen Scheiben oder Platten kann bei falscher Elementwahl der Effekt von Schubversteifungen, also die Überbewertung der Schubfestigkeit im Verhältnis zur Biegung (siehe dazu auch [1] und [30]), auftreten.

Die Tabelle aus Abbildung 21 gibt Aufschluss über die Anfälligkeiten der verschiedenen Finiten Elementtypen auf unterschiedliche Effekte, die bei dünnen Platten das Ergebnis entscheidend beeinflussen können. Insbesondere die Schubversteifungen können bei dünnen Platten das Ergebnis unbrauchbar machen. Es wurde der in Abbildung 21 markierte Elementtyp gewählt, da dieser auf der einen Seite kaum auf Schubversteifungen reagiert, auf der anderen Seite aber von dem Softwarepaket noch angeboten wurde.

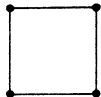
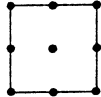
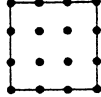
						
Integration	voll	selektiv	voll	selektiv	voll	selektiv
Integrationspunkte	$S_{\kappa e} : 2 \times 2$ $S_{\gamma e} : 2 \times 2$	2×2 1×1	3×3 3×3	3×3 2×2	4×4 4×4	4×4 3×3
unzulässige Null-Energie-Eigenformen	0	2	0	1	0	1
Auftreten von Schubversteifung	stark	sehr schwach	schwach	praktisch nicht	nicht	nicht
Durchsenkung bei dünnen Platten	–	etwas zu gering	etwas zu gering	korrekt	korrekt	korrekt

Abbildung 21: Vergleich von Schubversteifungen bei quadratischen Platten nach [45]

Es werden für die Superstruktur dreidimensionale Serendipity Element Hexaeder mit 20 Knoten und quadratischem Ansatz, wie in Abbildung 22, verwendet. Zur besseren Darstellung und schnelleren Berechnung wird lediglich eine halbe Platte mit entsprechenden Übergangsbedingungen betrachtet.

Abbildung 23 zeigt die halbe Platte als Gittermodell aus finiten Elementen. Die Platte

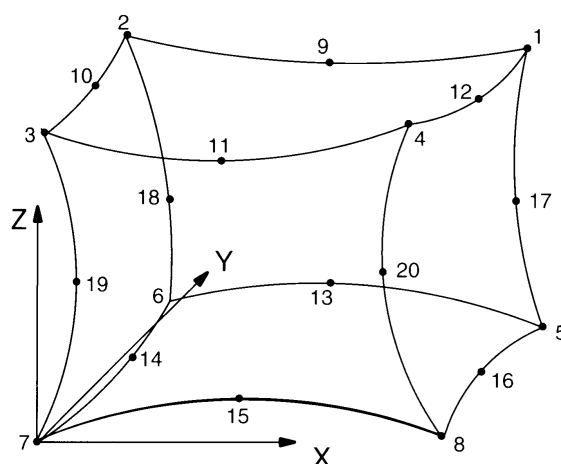


Abbildung 22: Hexaeder Nr. 10 nach [62]

besteht aus der äußeren Platte, die an jedem Knoten am Umfang festgelegt ist, und einem inneren Ring, der quasi steif ist, da sein E-Modul mit $99,9 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2$ sehr groß gewählt wurde.

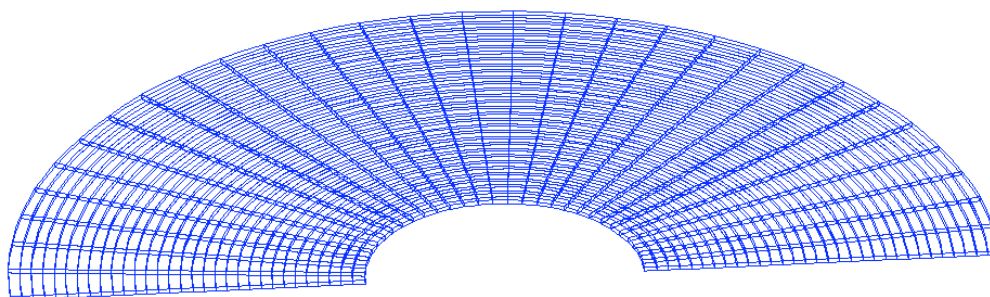
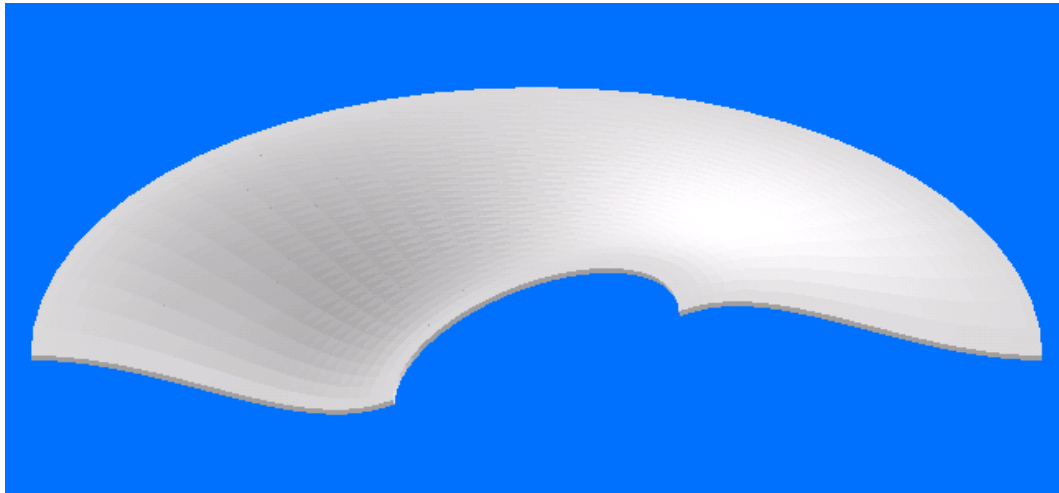


Abbildung 23: FE-Modell der halben Platte

Die Kraft F_M wird, wie in Abbildung 20 beschrieben, an zwei Punkten am Innenring angetragen.

Abbildung 24 zeigt das verformte Modell der halben Platte. Im Schnitt lässt sich die Biegelinie erkennen, die in ihrer Form auch der Plattentheorie entspricht.

Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse für die Plattendicken 0,05mm, 0,1mm und 0,2mm. Die

Abbildung 24: **Verformtes Plattenmodell**

Federkonstante bezieht sich wieder auf eine Feder, wie sie in Abbildung 16 eingeführt wurde.

Ersatzfedersteifigkeiten $c[N/m]$ bei $r_i = 6mm$			
E-Modul [N/mm^2]	Plattendicke		
	0,2mm	0,1mm	0,05mm
190000	679	85	10,6

Tabelle 3: Ergebnisse der FEM-Berechnung

4.3.4 Plausibilitätsprüfung

Die Berechnungen der Plattentheorie und die Simulation mithilfe der FE-Methode lieferten nahezu übereinstimmende Ergebnisse. Die Messungen der Federkonstante wichen jedoch zunächst extrem von den vorhergesagten Ergebnissen ab. Zu Erklärung und Ursache der Abweichung siehe weiter unten.

4.3.5 Abschließende Bemerkungen zur FEM

Der Einsatz von FEM ist nur mit großer Sorgfalt und in Kenntnis des ungefähren Ergebnisses möglich. Bei den ersten Versuchen, ein passendes Modell zu erstellen, zeigten sich die

Ergebnisse als völlig unzureichend. Die Verformungen der Platte waren um Größenordnungen zu gering. Die Ursache hierfür war eine für diesen Fall ungeeignete Elementauswahl. Aufgefallen war der Fehler, weil sich der massive Stab stärker verformte als die dünne Platte. Ein Vergleich der FEM-Ergebnisse für den Stab mit der bekannten geschlossenen Lösung zeigte, dass die FEM-Berechnung des Stabes korrekt war. Also musste die Platte falsch berechnet worden sein. Es stellte sich heraus, dass für dünne Platten ein anderer Ansatz notwendig wurde.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei der Analyse mit der Methode der finiten Elemente der Ingenieur gefragt ist, der die Ergebnisse auf Plausibilität überprüfen muss.

4.4 Strömung an der Kugel

Alle realen Flüssigkeiten besitzen eine Zähigkeit, man denke hier insbesondere an Flüssigkeiten wie Honig oder Teer. Bei diesen Fluiden kann dann nicht von einer reibfreien Strömung ausgegangen werden.

Der Geschwindigkeitsverlauf v einer Strömung einer viskosen Flüssigkeit zwischen zwei unendlich großen Platten, wobei die eine Platte still steht und die andere Platte mit der Geschwindigkeit u bewegt wird, ist linear von 0 bis u , wie in Bild 25 dargestellt. Dieser Verlauf entsteht durch die Haftung des Fluides an den beiden Plattenoberflächen.

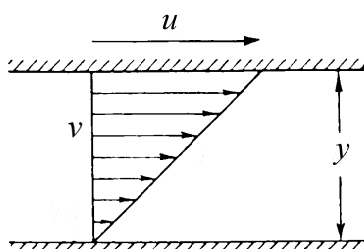


Abbildung 25: Viskose Plattenströmung nach [65]

Reale Medien, seien sie flüssig oder gasförmig, verhalten sich nach diesem Gesetz. Man bezeichnet sie als Newtonsche Fluide. Es gibt jedoch auch Medien, die diesem Gesetz nicht gehorchen. Abbildung 26 gibt eine Übersicht über das Verhalten der verschiedenen Medientypen. Reibungsfreie Flüssigkeiten gibt es in der Natur nicht. Nicht Newtonsche Medien sind breiartige Flüssigkeiten und Pasten.

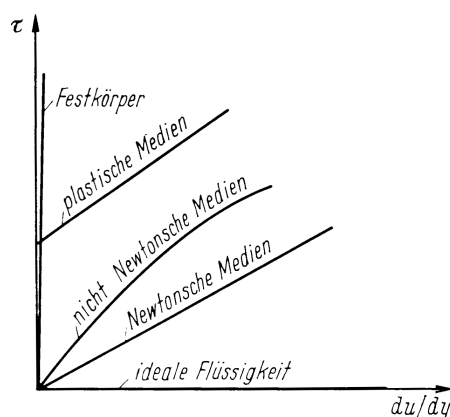


Abbildung 26: Verhalten verschiedener Medien nach [22]

Hat man es mit Newtonschen Fluiden zu tun, was in den meisten realen Anwendungen der Fall ist, ergibt sich die Schubspannung τ aus Abbildung 25 zu

$$\tau = \eta \cdot \frac{u}{y}$$

oder für einen nichtlinearen Verlauf

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy}.$$

η ist hierbei die dynamische Viskosität oder die Zähigkeit.

Reale Flüssigkeiten können somit nicht nur Normaldrücke an den Oberflächen eines Volumenelementes aufnehmen, sondern auch Tangentialkräfte. Zusammenfassend greifen dann an einem Volumenelement eines Newtonschen Fluides folgende Kräfte an:

- Reibungskräfte F_R
- Trägheitskräfte F_T
- Druckkräfte F_P

Zwischen diesen Kräften besteht die Beziehung:

$$F_T = F_P + F_R.$$

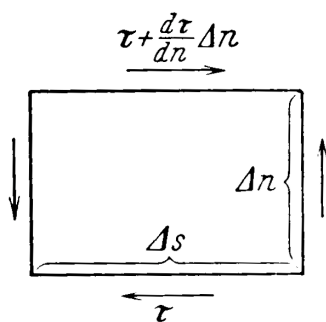


Abbildung 27: Schubspannung am Volumenelement nach [22]

Reibungskraft

Betrachtet man nun das Volumenelement aus Abbildung 27, so ergibt sich mit der Tiefe b des Elementes die Reibungskraft zu:

$$F_R = \eta \frac{d^2v}{dn^2} \Delta n \Delta s b.$$

Trägheitskraft

Die Trägheitskraft ergibt sich einfach aus $F = m \cdot a$. Also:

$$F_T = \Delta s \Delta n b \rho \frac{dv}{ds} v.$$

Druckkraft

Die Druckkraft ergibt sich aus der Normalkraft je Flächeneinheit eines Volumenelementes. Also:

$$F_P = \frac{N}{A}.$$

4.4.1 Ähnlichkeit bei Strömungsproblemen

Bei geometrisch ähnlichen Stromlinienbildern und geometrisch ähnlichen Begrenzungen heißen Strömungen mechanisch ähnlich. Betrachtet man zwei geometrisch ähnlich liegende Flüssigkeitsteilchen, die einen geometrisch ähnlichen Körper wie in Abbildung 28 umströmen, dann müssen bei geometrischer Ähnlichkeit der Strömungen die beiden Winkel α_1 und α_2 gleich sein. Das kann nur dann der Fall sein, wenn die an den Teilchen angreifenden Kräfte, also Druck-, Trägheits- und Reibungskräfte, in gleichem Verhältnis zueinander stehen. Eine gleiche Strömung ist also möglich für gleiche Kräfteverhältnisse.

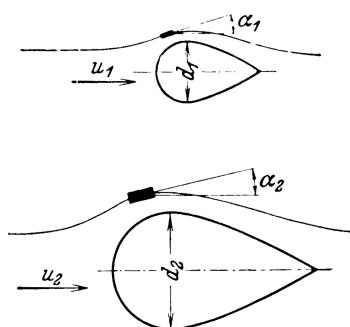


Abbildung 28: Ähnlichkeit bei Strömungen nach [22]

Hier reicht es dann, wenn zwei Kräfteverhältnisse stimmen. Zweckmäßigerweise verwendet man das Verhältnis zwischen Trägheitskraft und Reibungskraft. Somit ergibt sich für die

beiden Volumenelemente:

$$\begin{aligned} F_{T1} &= F_{P1} + F_{R1}; \\ F_{T2} &= F_{P2} + F_{R2}. \end{aligned}$$

Bildet man nun das Verhältnis zwischen Trägheitskraft und Reibungskraft, ergibt sich

$$\frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Reibungskraft}} = \frac{F_T}{F_R} = \frac{\Delta s \Delta n b \rho \frac{dv}{ds} v}{\eta \frac{d^2 v}{dn^2} \Delta n \Delta s b} = \frac{\rho \frac{dv}{ds} v}{\eta \frac{d^2 v}{dn^2}}$$

Diesem Kräfteverhältnis kommt in der Praxis eine große Bedeutung zu. Daher wurde für dieses Verhältnis eine Kennzahl, die Reynoldszahl, eingeführt.

Mit den proportionalen Beziehungen

$$\begin{aligned} v &\sim u; \\ ds &\sim d; \\ dv &\sim v \end{aligned}$$

ergibt sich dann die Reynoldszahl Re zu

$$\frac{\rho \frac{dv}{ds} v}{\eta \frac{d^2 v}{dn^2}} \sim \frac{\rho \frac{u^2}{d}}{\eta \frac{u}{d^2}} = \frac{ud}{\eta/\rho} = Re.$$

Das bedeutet, dass zwei Strömungen um geometrisch ähnliche Körper nur dann ähnlich zueinander sind, wenn ihre Reynoldszahlen gleich sind.

Das erlaubt bei Versuchen Modellgröße, Geschwindigkeit und sogar das Medium zu verändern. Es herrschen gleiche Verhältnisse, solange die Reynoldszahlen übereinstimmen.

Die Größe η/ρ wird als kinematische Viskosität bezeichnet und erhält den Buchstaben ν . Somit wird die Reynoldszahl

$$Re = \frac{vd}{\nu}.$$

4.4.2 Strömungsformen an der Kugel

Bei der Kugel werden dreidimensionale Strömungsformen beobachtet. Daraus resultiert, dass eine einfache zweidimensionale Betrachtung und daher idealisierte Modellvorstellung hier keinen großen Gültigkeitsbereich besitzt. Nach [68] lassen sich die Bereiche, wie in Abbildung 29 dargestellt, unterscheiden. In a) findet keine Ablösung hinter der Kugel statt.

Hier ist die analytische Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen möglich. In b) bildet sich ein ringförmiger, stationärer Nachlaufwirbel. Bei Re-Zahlen über 130 oszilliert der freie Staupunkt zunehmend und der Nachlauf wird instabil. In c) bildet sich eine Wirbelkette, infolge periodischer Ringwirbelablösung. In d) zerfallen die Ringwirbel und bilden periodische Ballen. In e) lässt sich ein helixartiger, wellenförmiger Nachlauf erkennen. In f) führt die turbulente Grenzschicht an der Kugel zu einer starken Widerstandsverminderung. In regelmäßigen Abständen zeigen sich hufeisenförmige Ablösungen einer Wirbelfläche. Diese

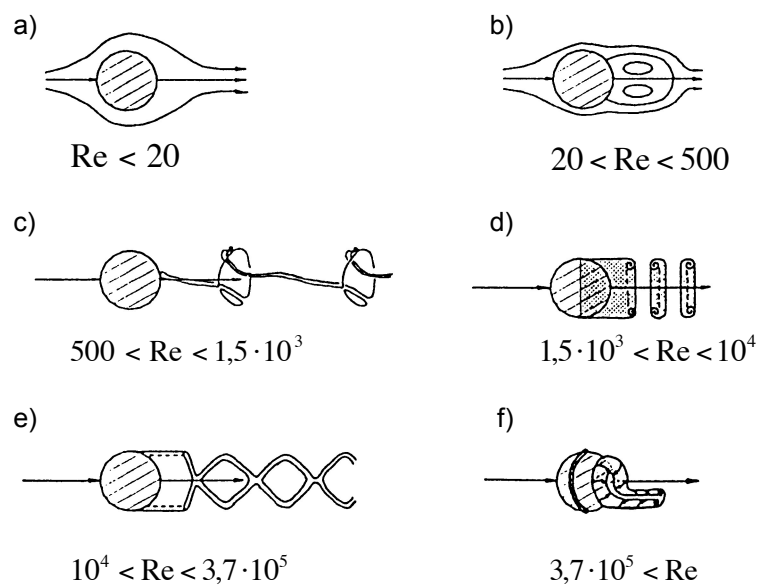


Abbildung 29: Formen der Kugelströmung nach [68]

Klassifizierung stellt selbstverständlich nur eine grobe Übersicht dar, die nicht eindeutig ist, da sich die Nachlaufentwicklung immer als instationäres, dreidimensionales Phänomen darstellt.

4.4.3 Kraft auf die Kugel

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit wird die Kraft ermittelt, die auf einen umströmten Körper ausgeübt wird. Die zahlenmäßige Erfassung des Strömungswiderstandes erfolgt über den dimensionslosen Widerstandsbeiwert c_w und die angeströmte, projizierte Fläche A . Der c_w -Wert beschreibt das Verhältnis zwischen der Widerstandskraft und dem Staudruck.

$$c_w = \frac{F/A}{v_\infty^2 \rho / 2}$$

Durch Umstellung erhält man für die Strömungsgeschwindigkeit¹ v_∞ :

$$v_\infty = \sqrt{\frac{F/A}{c_w \rho / 2}}$$

Zur Ermittlung der Geschwindigkeit ist nun nur noch die Bestimmung der Kraft notwendig, da die übrigen Faktoren aus der Wahl des Körpers und des zu messenden Mediums resultieren. Es ist allerdings zu beachten, dass sich der c_w -Wert mit Re , je nach Körper, ändern kann.

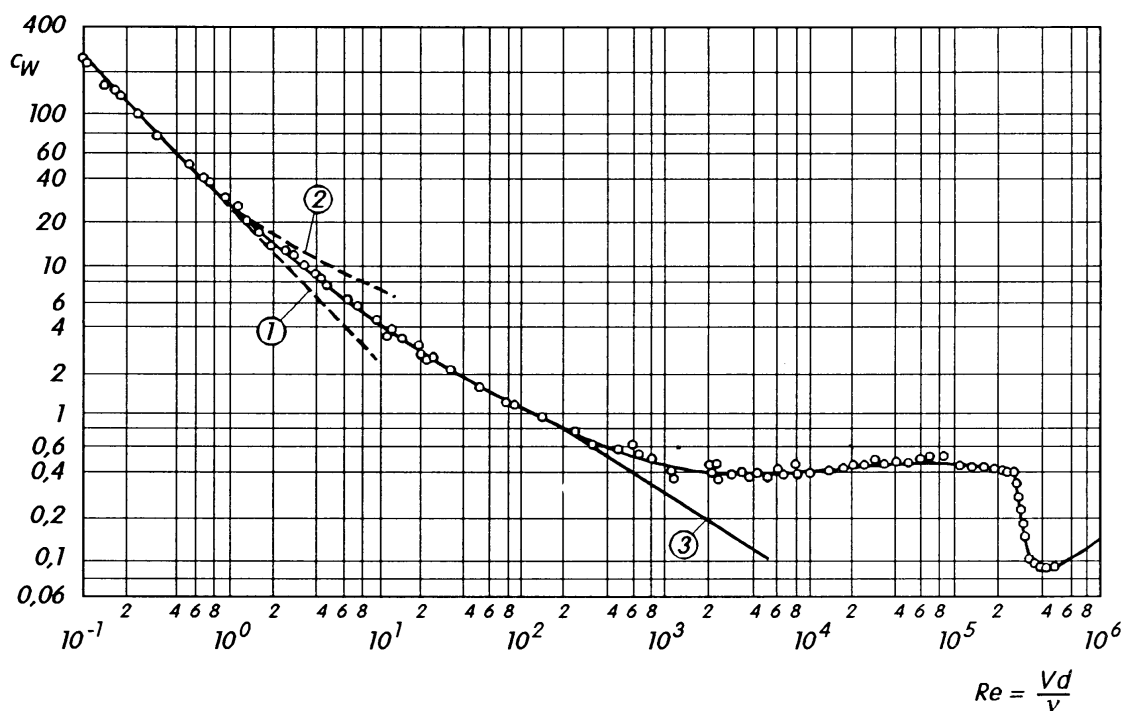


Abbildung 30: Abhängigkeit des c_w -Wertes von der Reynoldszahl nach [65]

In Abbildung 30 ist der c_w -Wert über der Reynoldszahl für die Kugel dargestellt. Hierbei sind die Kurven 1 bis 3 theoretische Kurven, und die markierten Punkte kennzeichnen experimentell ermittelte Werte. Kurve 1 ist nach einer Theorie von Stokes (1865), Kurve 2 nach einer Theorie von Oseen (1911) und Kurve 3 nach numerischen Ergebnissen von Fornberg (1988) erstellt worden. Man beachte die doppelt-logarithmische Darstellung. Dieser Verlauf liegt in den unterschiedlichen Strömungsformen und Ablösungseigenschaften an der Kugel bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten begründet (s.o.). Es zeigt sich

¹Hiermit ist eine quasi aus dem Unendlichen kommende Strömung gemeint, die sowohl drallfrei ist als auch parallele Stromlinien aufweist.

also ein geschwindigkeitsabhängiger Strömungswiderstand (c_w -Wert) an der Kugel, denn $Re = v \cdot d/\nu$.

Untersucht man nun dieses Diagramm für unterschiedliche Kugeldurchmesser, entstehen die Diagramme aus Abbildung 31. Hier ist für unterschiedliche Kugeldurchmesser, $d=5\text{mm}$ bis $d=40\text{mm}$, die zu erwartende Kraft aufgetragen, die auf die Kugel wirkt. Als Medium wird Wasser bei 20C angenommen. Es wird die Kraft

$$F = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot c_w \cdot A.$$

Diese wird nun für steigende Strömungsgeschwindigkeit berechnet. Man beachte, dass der c_w -Wert abhängig von der Geschwindigkeit ist.

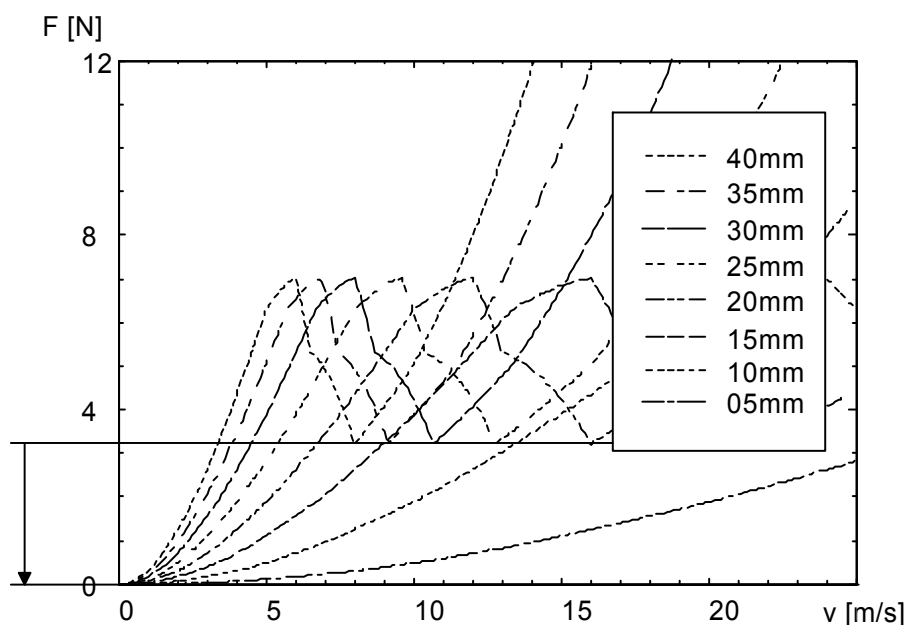


Abbildung 31: Kraft über Strömungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Kugeldurchmessern und Wasserströmung

Die Kurven aus Abbildung 31 haben zunächst einen quadratischen Verlauf, um dann bei einer bestimmten Geschwindigkeit einzubrechen und dann weiterhin quadratisch zu steigen. Dieser Einbruch entsteht durch das Strömungsverhalten der Kugel und ist im $Re - c_w$ -Diagramm aus Abbildung 30 in dem Bereich von $Re = 2,5 \cdot 10^5$ zu entdecken. An dieser Stelle bricht der Strömungswiderstand der Kugel plötzlich ein. Das macht sich dann in einem lokalen Maximum in den Kurven aus Abbildung 31 bemerkbar.

Bemerkenswerterweise ist bei allen Kugelgrößen das lokale Maximum und das lokale Minimum bei derselben Kraft von ca. $7N$ bzw. von $3,2N$. Der einzige Unterschied ist, dass die Strömungsgeschwindigkeit, bei der die Kraft erreicht wird, unterschiedlich ist.

Für eine Re-Zahl von

$$Re = 2,1 \cdot 10^5$$

wird aus Abbildung 30 der zugehörige c_w -Wert

$$c_w = 0,4$$

abgelesen. Mit

$$Re = \frac{vd}{\nu} \Rightarrow v = \frac{Re \cdot \nu}{d}$$

und den Werten $d = 15mm$, $\nu_{Wasser,20C} = 1 \cdot 10^{-6}m^2/s$, $\rho_{Wasser} = 1000kg/m^3$ ergibt sich die Kraft zu

$$F = \frac{\rho}{2} \cdot c_w \cdot v_\infty^2 \cdot A$$

$$F = \frac{\rho}{2} \cdot c_w \cdot \left(\frac{Re \cdot \nu}{d}\right)^2 \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 6,92N$$

Kürzt man in der Gleichung d^2 , wird die Kraft unabhängig von den geometrischen Größe. Daher haben alle Kugeln ein lokales Maximum bei derselben Kraft.

Um also von der gemessenen Kraft auf die Strömungsgeschwindigkeit schließen zu können, kann nur der Bereich bis zum lokalen Maximum verwendet werden, wenn man eine weitere Information, zum Beispiel über die maximal vorkommende Strömungsgeschwindigkeit, besitzt. Ohne weitere Kenntnisse sind, um Doppeldeutigkeiten zu vermeiden, nur Kräfte unterhalb des lokalen Minimums (eingezeichnete Linie in Abbildung 31) zulässig. Bei dem verwendeten Sensor werden Kräfte von maximal $0,25N$ gemessen, also innerhalb des eindeutigen Bereiches.

In Abbildung 32 sind die Kräftebereiche und Strömungsgeschwindigkeitsbereiche dargestellt, die für die Messung interessant sind. Es handelt sich um eine $15mm$ Kugel und die Strömungskräfte über der Strömungsgeschwindigkeit für Wasser und für Luft.

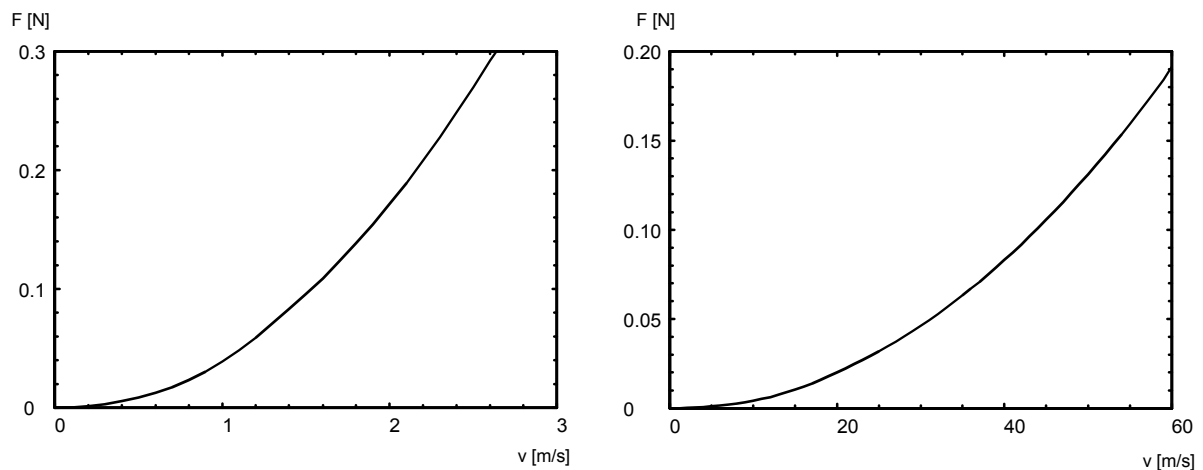


Abbildung 32: Kraft auf die Kugel über der Strömungsgeschwindigkeit bei $d=15\text{mm}$, Wasser (linke Kurve) und Luft (rechte Kurve) als Medium

4.4.4 Kraft auf den Zylinder

Für den Strömungswiderstand am Zylinder gilt ähnliches wie für die Kugel. Für die Messungen wurde eine Zylinderfläche von $A_{Zyl} = 0,003 \cdot 0,01\text{m}$ angenommen. Für $l/d = 5$ ergibt sich für einen weiten Re-Bereich ein c_w -Wert von 0,74 für den Zylinder. In den Versuchen zeigte sich, dass diese Annahmen das Verhalten gut widerspiegeln.

4.4.5 Temperaturabhängigkeit der kinematischen Viskosität

Strömungen um oder durch geometrisch ähnliche Körper sind nur dann geometrisch ähnlich, wenn die Reynolds-Zahlen gleich sind. Innerhalb dieser Forderung können sich die einzelnen Werte, die die Reynolds-Zahl ergeben, ändern. Die kinematische Viskosität ändert sich mit der Temperatur, und zwar so, dass ν bei Flüssigkeiten mit steigender Temperatur kleiner wird, während bei Gasen ein entgegengesetztes Verhalten bemerkt wird.

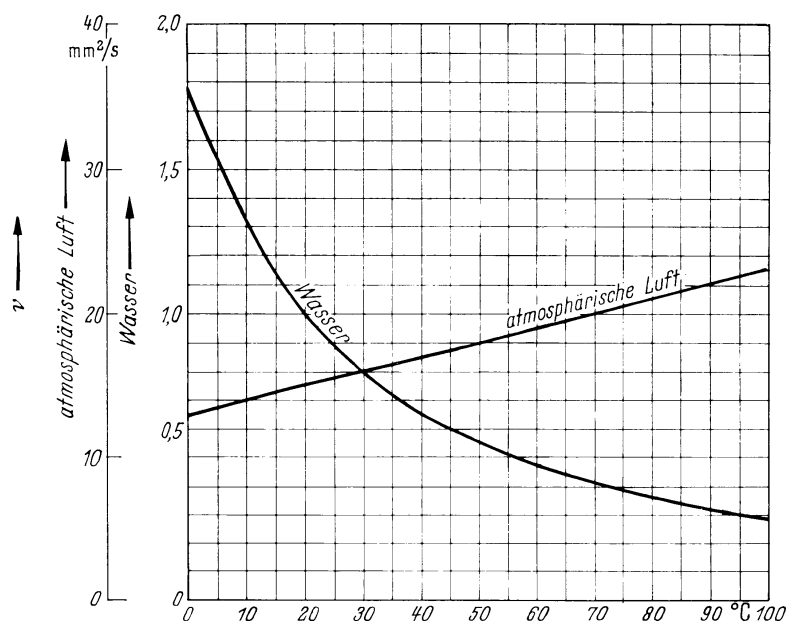


Abbildung 33: Temperaturabhängigkeit des ν -Wertes nach [22]

Die Messung der Temperatur ist für die zuverlässige Messung der Strömungsgeschwindigkeit unabdingbar. Die Software und die Sensorik sind für die Einbeziehung der Temperatur vorgesehen. Es wurde für die Laborversuche allerdings mit festen Werten gemessen, da die Temperatur unter Laborbedingungen nur gering schwankt.

4.4.6 Iteratives Verfahren für die Strömungskraftberechnung

Da der c_w -Wert einer Kugel von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig ist, lässt sich von der Kraft auf die Kugel nicht direkt auf die Geschwindigkeit schließen. Das Verfahren läuft folgendermaßen ab:

1. Start mit einem Schätzwert für c_w
2. Einsetzen in die Formel für die Geschwindigkeit
3. Berechnung von Re
4. Bestimmung eines neuen c_w -Wertes im Diagramm
5. Weiter mit Nr. 2 (Abbruch nach 10 Durchläufen)

Man kann zeigen, dass das Verfahren sehr schnell konvergiert. Dieses iterative Verfahren wird bei der Messung für jeden Messwert durchlaufen.

5 Aufbau des Sensor-Prototypen

Bei der Konstruktion des Sensors wurde auf einfache Montage Wert gelegt. Er sollte robust für den Messeinsatz sein und die Variation der Federplatten und Kugelsonden ermöglichen. Weiterhin musste eine Einstellbarkeit der Optik vorgesehen werden, da aufgrund der hohen Empfindlichkeit der Kantendetektoren für die Labormuster der Nullpunkt mechanisch justierbar sein muss. Bei einer Serienfertigung könnte man auf die Einstellbarkeit sicher verzichten.

5.1 Mechanischer Aufbau

Der Sensor besteht aus einem Gehäuse, das die Messoptik schützt, die Einspannung der Platten ermöglicht und die Räume gegeneinander abdichtet. Ein Stab trägt eine Sonde und die Messfahne. Die elastische Platte wird mit einer Schraubverbindung an dem Stab befestigt.

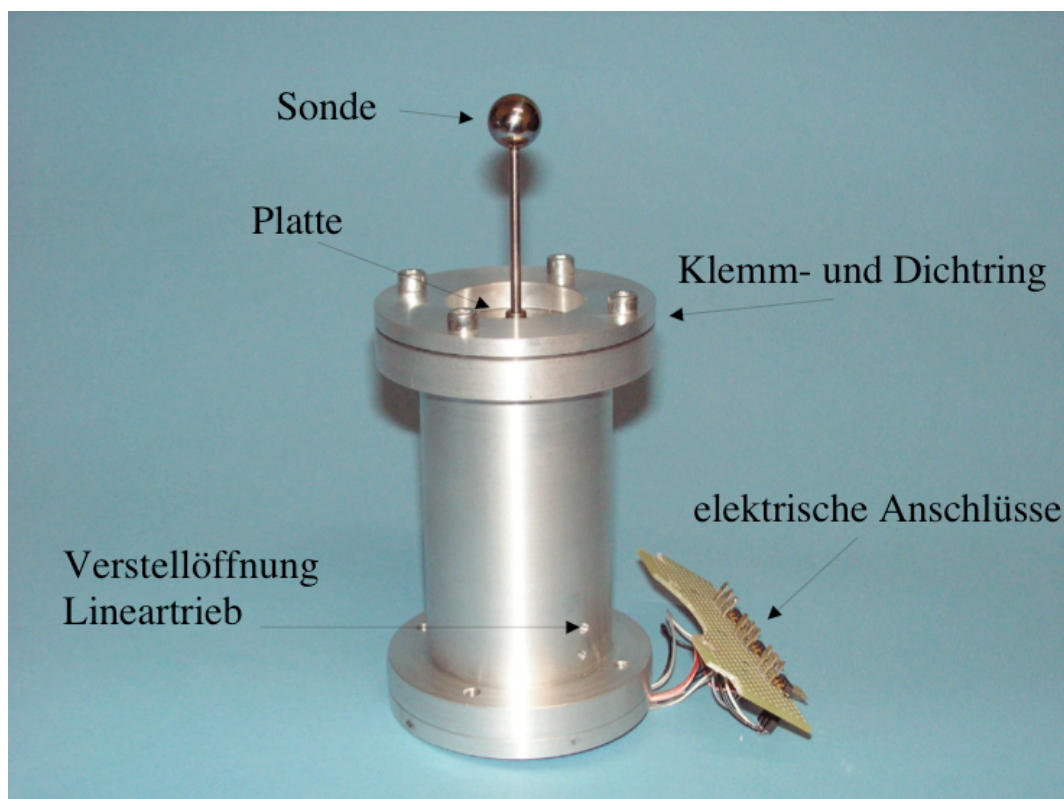


Abbildung 34: Sensor-Prototyp

Das Gehäuse ist aus Aluminium gefertigt. Es sorgt mit einem Flansch für die Klemmung der elastischen Platte. Ein Dichtring im Flansch gewährleistet den Schutz der eingebauten Mechanik und Elektronik vor Spritzwasser. Eine Halterung ist vorgesehen, die zusätzlich montiert werden kann.

5.1.1 Aufnahme Messoptik

Die Aufnahme der Messoptik ist bei diesem Prototypen noch aufwändig gestaltet. Sie hat die Aufgabe, die beiden Messoptiken gegeneinander optisch zu isolieren. Weiterhin muss jede Messoptik einzeln von außen einstellbar sein, da die präzise Positionierung der Photodioden erst nach dem Zusammenbau vorgenommen werden kann. Hier wird die Kante möglichst genau auf die Mittelposition der messenden Photodiode eingestellt. Softwareseitig wird die Nullposition anschließend noch genauer aufgenommen und die Messkurven aus Abbildung 58 und Abbildung 59 werden entsprechend angepasst.

Um die Einstellbarkeit zu gewährleisten, wurde für jeden Photoempfänger eine Linearführung konstruiert. Diese besteht aus zwei Führungsstangen und einem Gewindetrieb für die Verschiebung. Die Gewindestange ist mit einem Kugellager im Gehäuse drehbar gelagert. Der Schlitten ist aus Messing gefertigt, um günstige Reibwerte zwischen den Materialien zu gewährleisten. Weiterhin wird der Schlitten mit einer Feder vorgespannt, um das Spiel im Gewinde zu minimieren. Der Schlitten legt sich so an einer Schraubenflanke an und es herrschen definierte Zustände.

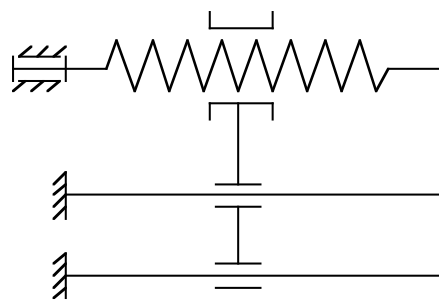


Abbildung 35: **Lineartrieb**

Ein optisches Labyrinth sorgt zum einen dafür, dass die Reflexionen minimiert werden, und zum anderen dafür, dass der Messstab mechanisch in seinem Weg begrenzt wird. So ist die Gefahr einer Beschädigung der elastischen Platte oder der Optik minimiert.

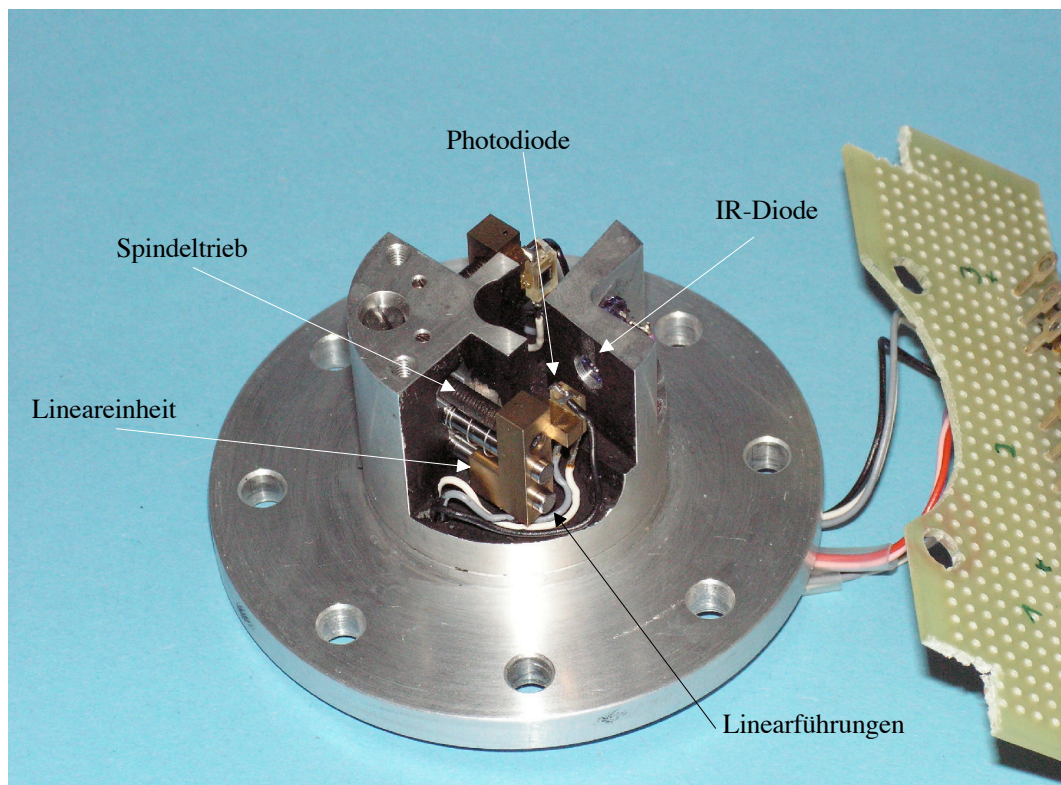


Abbildung 36: Optikaufnahme mit Lineareinheiten

5.1.2 Die Messfahne

Die Messfahne behindert den Lichtfluss von der Quelle zum Empfänger. Die Fahne ist scharfkantig ausgeführt. Um dies zu erreichen, wurde die Fahne mit dem Elektroerosionsverfahren aus einem massiven Halbzeug geschnitten. Durch die in einem Winkel zueinander laufenden Schnittebenen wurde eine optimal scharfe Kante erreicht. Nur die genaue Lage der Kante ist durch diese Art der Fertigung nicht zu gewährleisten. Das stellt aber keine weitere Schwierigkeit dar, da mit den Linearführungen die Messoptik eingestellt wird. Für eine preiswertere Variante würde eine scharfe Kante, realisiert durch ein dünnes Blech (0,1mm), reichen.

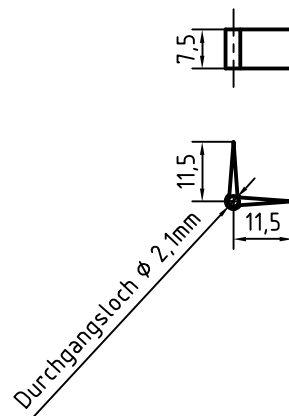


Abbildung 37: Messfahne

5.1.3 Kugel- und Zylindersonden

Als Sonden wurden verschiedene Kugeln und ein Zylinder ausgewählt. In ersten Übersichtsrechnungen wurden die Größen abgeschätzt. Abbildung 38 zeigt die verwendeten Kugelsonden und die verwendete Zylindersonde.

Bei den Kugeln handelte es sich um Kugellagerkugeln. Diese sind optimal rund und besitzen eine technisch glatte Oberfläche. Für die Befestigung der Kugeln an den Stäben mussten die Kugeln mit Löchern versehen werden. Da Kugellagerkugeln gehärtet sind, wurde auf ein Gewinde verzichtet, und mit dem Erosionsverfahren wurden die Kugeln mit einer Bohrung versehen. Die Stäbe wurden schließlich eingeklebt. Um möglichst geringes Spiel zu erreichen, wurden zunächst die Kugeln mit den Löchern versehen und anschließend die Stäbe entsprechend gefertigt.

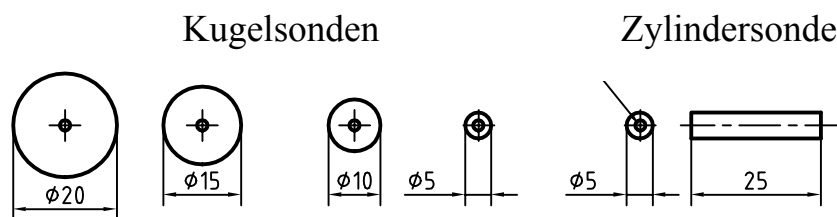


Abbildung 38: Verwendete Sonden

5.2 Elastische Platte

Die Platten sind in den Dicken 0,05mm, 0,1mm und 0,2mm untersucht worden. Als Werkstoff für die Platten wird der Werkstoff mit der Nr. 1.4301, also X5CrNi18-10, verwendet. Es handelt sich hierbei um hartgewalzten Bandstahl. Der E-Modul des Werkstoffs beträgt bei 20C etwa $2,0 \cdot 10^5 N/mm^2$.

Die Federkonstanten wurden im Prototypenstadium zunächst mechanisch über eine Balkenwaage bestimmt. Hierzu wurde der Sensor in einer Halterung montiert und über eine, mit einer Klinge gelagerte, Balkenwaage mit Gewichten belastet. Die Auslenkung wurde gemessen und die Federkonstante bestimmt (siehe dazu auch Kapitel 8.3).

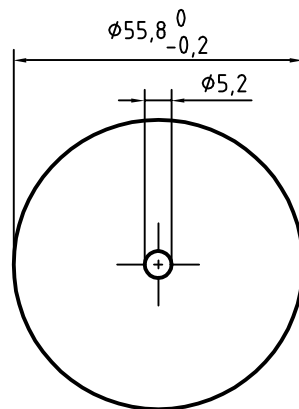
Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Walzrichtung der Platten immer in eine Hauptmessrichtung gelegt wurde. Weiterhin wurde die Krümmung der Platten, die durch das Aufrollen des Bandes nach dem Walzprozess entsteht, immer in x-Richtung montiert.

Durch diese Maßnahmen sollten immer dieselben Voraussetzungen erfüllt sein. Es stellte sich jedoch heraus, dass für die Messung lediglich die Bestimmung der reduzierten Federkonstanten nötig war, die bereits alle Effekte berücksichtigt.

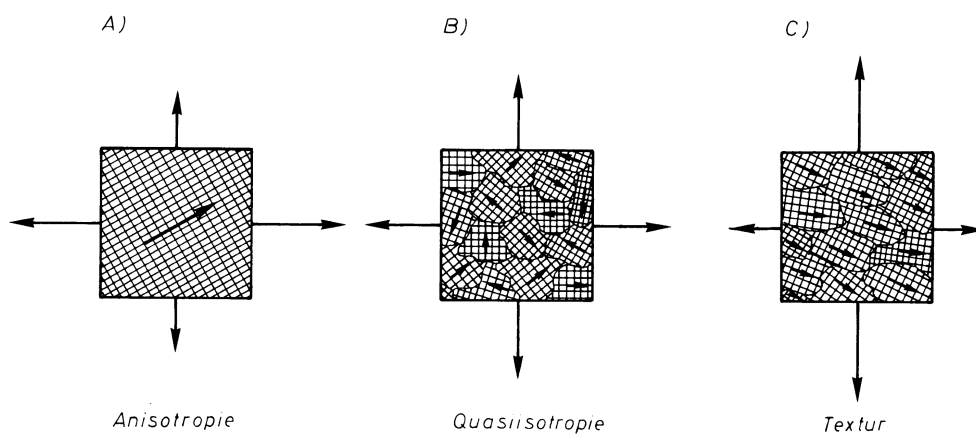
Abbildung 39 zeigt die verwendete Plattengeometrie. Von jeder Dicke waren 4 Platten vorhanden. Die erste Ziffer codiert die Blechdicke; eine 1 für die 0,2mm dicke Platte, eine 2 für die 0,1mm dicke Platte und eine 3 für die 0,05mm dicke Platte. Um eine Zuordnung vereinfachen zu können, wurden die Platten durchnummeriert. Somit ergibt sich für eine dicke Platte beispielsweise die Nummer 1.3.

5.2.1 E-Modul gewalzter Bleche

Der E-Modul ist abhängig von der Orientierung der Kristalle. In homogenem Gefüge ergibt sich ein mittlerer E-Modul. Bei kaltgewalztem Blech hingegen ordnen sich die Kristalle in

Abbildung 39: **Verwendete Platten**

Walzrichtung an, siehe Abbildung 40 c), und werden entsprechend verformt. Dies führt zu einer Härtung des Materials, aber auch zu einem richtungsabhängigen E-Modul.

Abbildung 40: **Ausrichtung der Textur beim gewalzten Blech**

Um konstante Bedingungen zu erhalten, wurden die Platten in Walzrichtung = x-Richtung montiert. Anschließend wurden die reduzierten Federkonstanten sowohl in x-Richtung als auch in y-Richtung bestimmt.

5.3 Kantendetektoren

Der Kantendetektor, das heißt, die optische Abtastung der Position des Stabes und damit die Auslenkung der Kugel, hat den großen Vorteil einer völlig berührungsfreien Abtastung.

Dieser besteht aus einer IR-Diode, die als Lichtquelle dient und zwei Photoempfängern (siehe Abbildung 41). Der Photoempfänger 2 wird vollständig beleuchtet. Der Photoempfänger 1 erhält nur einen Teil der Lichtmenge, da er mit einer scharf zulaufenden Kante teilweise abgedeckt wird. Die Kante kann nun verschoben werden und die abgedeckte Fläche des Photoempfängers 1 kann in Beziehung gesetzt werden zu der Verschiebung x . Je kleiner der Abstand a gewählt wird, desto linearer ist das Verhalten dieser Anordnung. Der Photoempfänger 2 wird benutzt, um einen Vergleich zwischen der vollen Beleuchtung und der abgeschatteten Beleuchtung zu ermöglichen. Somit können Veränderungen der Lichtquellen beispielsweise aufgrund von Alterung berücksichtigt werden. Eine häufige Kalibrierung ist damit unnötig.

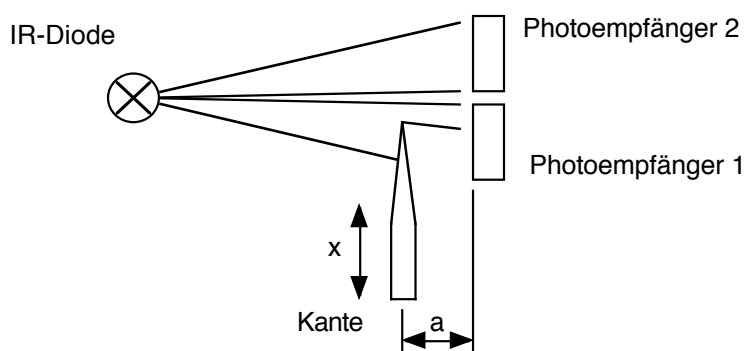


Abbildung 41: Funktionsweise des Kantendetektors

Eine Analogelektronik ermittelt nun den Grad der Abdeckung des Photoempfängers anhand der empfangenen Lichtmenge im Vergleich zur vollständigen Beleuchtung. Am Ausgang der Elektronik liegt die Messspannung als Funktion der Kantenposition vor.

5.4 Messelektronik

An dieser Stelle sollen die verwendeten elektronischen Komponenten kurz erwähnt werden. Das Blockbild der Kantendetektorkarte ist in Abbildung 42 dargestellt. Im oberen Strang wird eine gepulste Spannung für die Infrarotdiode erzeugt. Diese beleuchtet die beiden Photodioden. Die obere Diode wird voll beleuchtet und dient mit den folgenden Komponenten, Verstärker, Bandpass und Gleichrichtung, als Istwert für die Regelung der Beleuchtung. Im unteren Strang wird die Photodiode durch die scharfe Kante abgeschattet und liefert mit den folgenden Komponenten, Verstärker, Bandpass, Gleichrichtung und

Verstärkung, die Messspannung U_{mess} .

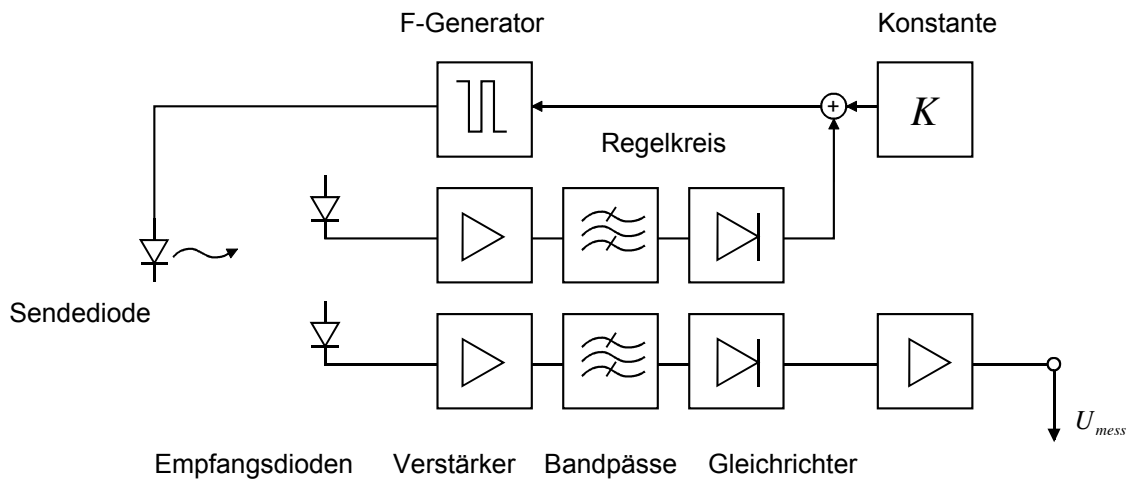


Abbildung 42: **Blockbild Kantendetektorkarte**

Bei der gewählten Photodiode handelt es sich um die Doppeldiode BPX-48, wie in Abbildung 43 gezeigt. Sie besteht aus zwei Photodioden auf einem Chip, die durch eine inaktive Zone voneinander getrennt sind. Vorteilhaft an dieser Anordnung ist die kompakte Bauform und die einfachere Positionierbarkeit der beiden Photoempfänger zur Beleuchtung.

Die gewählte IR-Diode SFH485P ist in Abbildung 45 dargestellt. Sie liefert die Beleuchtung für die Photodioden.

5.5 Messkarte

Bei der A/D-Wandlerkarte handelt es sich um eine Messkarte für den PC mit ISA-Bus. Die Karte hat 16 Eingänge und eine Abtastfrequenz von maximal 20kHz. Die Auflösung der einzelnen Kanäle beträgt 12bit, das heißt, der Messbereich lässt sich in 4096 Werten darstellen. Die Messkarte lässt sich im Bereich von -15V..+15V betreiben. Die Kantendetektorkarten liefern eine analoge Spannung von 0..10V.

Es folgt also

$$\frac{30V}{4096} = 7,3mV/Digit$$

Die Auflösung beträgt also 7,3mV. Somit lässt sich das Signal in

$$\frac{10V}{7,3mV} = 1370$$

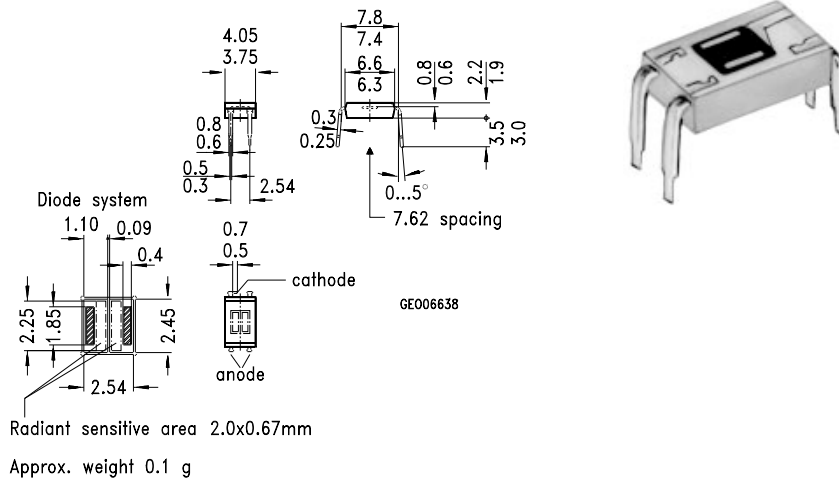


Abbildung 43: Doppeldiode BPX-48

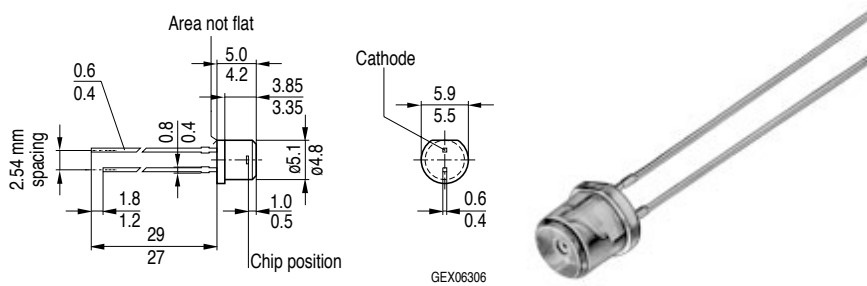


Abbildung 44: Infrarotdiode SFH485P

Werten darstellen. Das bedeutet, dass bei einem Messweg von 0,6mm eine Auflösung von $\pm 0,43\mu m$ erreichbar ist. Mit der unvermeidlichen Ungenauigkeit von ± 1 Digit ergibt sich somit eine Genauigkeit bis auf $1\mu m$. Ein einfacher Verstärker hätte die Auflösung noch erhöhen können, sie reichte aber bereits so schon vollkommen aus.

Die Messkarte enthält die nötigen Bauteile, um die Messkette zu vervollständigen. Die Messkette besteht aus:

- Umsetzung des Weges in eine Spannung (Kantendetektorkarten),
- Tiefpass (auf der Detektorkarte), um das Shannontheorem einzuhalten,
- Sample und Hold Schaltung, um den Wert für die Wandlung konstant zu halten,
- A/D-Wandler, um den analogen Wert in einen digitalen Wert umzusetzen, und
- dem PC, um die Daten weiter zu verarbeiten.

Die Messkarte ist direkt unter Turbo Pascal oder unter Turbo C von Borland programmierbar. Als Betriebssystem stand ein MS-Dos 6.22 zur Verfügung. Die Arbeit mit dieser Hard- und Software hat einerseits den Vorteil, dass die Messkarte bereits vorhanden war und mit Programmbeispielen die hardwarenahe Programmierung leicht nachvollziehbar ist, und andererseits die Rechenleistung eines Intel-Prozessors vom Typ 80486 völlig ausreichend ist. Eine ressourcensparende Programmierung wird so erzwungen und eine Portierung auf einen Mikroprozessor leichter möglich.

6 Software

Der Software kommt bei diesem Sensor eine besondere Aufgabe zu. Aufgrund der Abhängigkeit des Strömungswiderstandes von der Strömungsgeschwindigkeit ist es nötig, bei jedem Messwert durch eine Iteration die Strömungsgeschwindigkeit zu bestimmen. Das heißt, dass dieser Sensor erst durch Rechnertechnik in dieser Form möglich ist. In einer kommerziellen Ausführung des Sensors wird es nötig sein, die entwickelte Software in einem Microprozessor ausführen zu lassen, der anschließend einen Messwert über eine Standard-schnittstelle ausgeben kann.

6.1 Messprogramm

Beim Starten des Programms werden als Erstes die Variablen und die Messkarte initialisiert. Das Programm stellt nach dem Start ein einfaches Menüsystem zur Verfügung, das über Tastaturkommandos bedienbar ist. Das Menü stellt den Zugriff auf die einzelnen Programmmodule zur Verfügung.

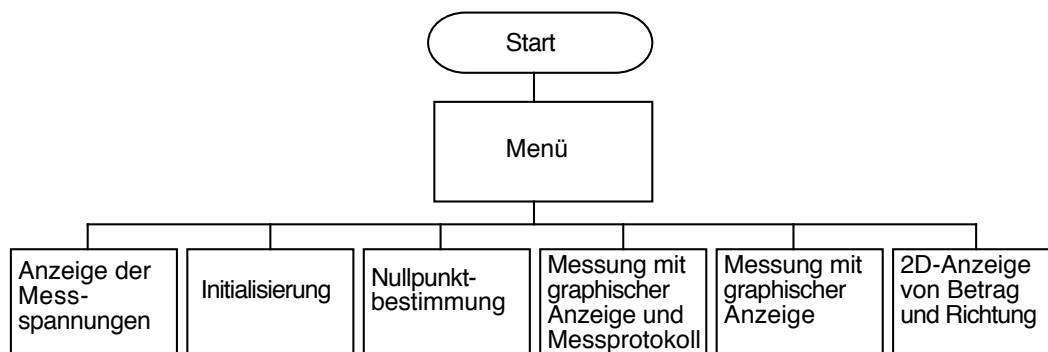


Abbildung 45: Struktur des Messprogramms

Das Modul „Messspannungen“ zeigt die momentanen Messspannungen der beiden Kantendetektorkarten an. Die ungefähre Nullposition lässt sich somit leicht über die Linearführungen einstellen. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit der Messoptik ist bereits bei unterschiedlichen Anzugsmomenten der oberen Deckelschrauben eine Veränderung des Nullpunktes zu bemerken. Daher ist eine Grobeinstellung über die Linearführung nach einer Montage notwendig. Die beiden Messspannungen können so auf die Mittelstellung gebracht werden. Die Mittelstellung ist erreicht, wenn die Messwerte 5V erreichen.

Der zweite Menüpunkt „Initialisierung“ legt die Grundeinstellungen fest, die für die korrekte Funktion notwendig sind. Hier werden Größen wie Kugeldurchmesser der verwendeten Sonde, Plattennummer und Federkonstanten der Platten eingegeben. Diese Werte stehen bis zum Programmende zur Verfügung.

Der Menüpunkt „Nullpunktbestimmung“ passt die Kurve des Kantendetektors an den aktuellen Nullpunkt an. Die Kurve wurde aufgenommen, um einer bestimmten Spannung eine entsprechende Verschiebung am Kantendetektor zuzuordnen. Damit die Kurve nun exakte Werte liefert, wäre es notwendig, den Nullpunkt exakt zu erreichen. Da dies zumindest umständlich bis unmöglich ist, wird die Messkurve entsprechend angepasst. Befindet sich der Sensor in Ruhe, wird der aktuelle Messwert aufgenommen und die kodierte Kurve entsprechend verschoben.

Der folgende Menüpunkt „Messung mit Protokoll und graphischer Anzeige“ stellt das eigentliche Messprogramm dar. Es ist im Ablaufplan in Abbildung 46 dargestellt.

Das Programm erzeugt eine ASCII-Datei, die alle nötigen Messwerte und Einstellungen der Messung enthält. Die eigentliche Messung läuft folgendermaßen ab:

1. Anforderung von 20 Messwerten
2. Mittelwertbildung über die 20 Werte (x- und y-Richtung)
3. Umrechnung Messspannung in Messweg
4. Umrechnung Messweg in Kraft (Betrag und Richtung über die Federkonstanten)
5. Iteration zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit
6. Übergabe des Messwertes in den FIR-Filter
7. Darstellung und/oder Aufzeichnung des Messwertes

Der nächste Programmteil „Messung mit graphischer Darstellung“ funktioniert entsprechend dem oben Beschriebenen, jedoch ohne Protokollierung. Er dient dazu, sich einen Überblick über die Messung zu verschaffen.

Der folgende Programmpunkt „Messung und Anzeige von Betrag und Richtung“ stellt visuell die Messung dar. Ein Vektorpfeil stellt die Richtung der Strömung dar, und ein Betragsbalken veranschaulicht den Betrag der Strömung. Dieser Programmteil dient zur Veranschaulichung der zweidimensionalen Strömungsmessung.

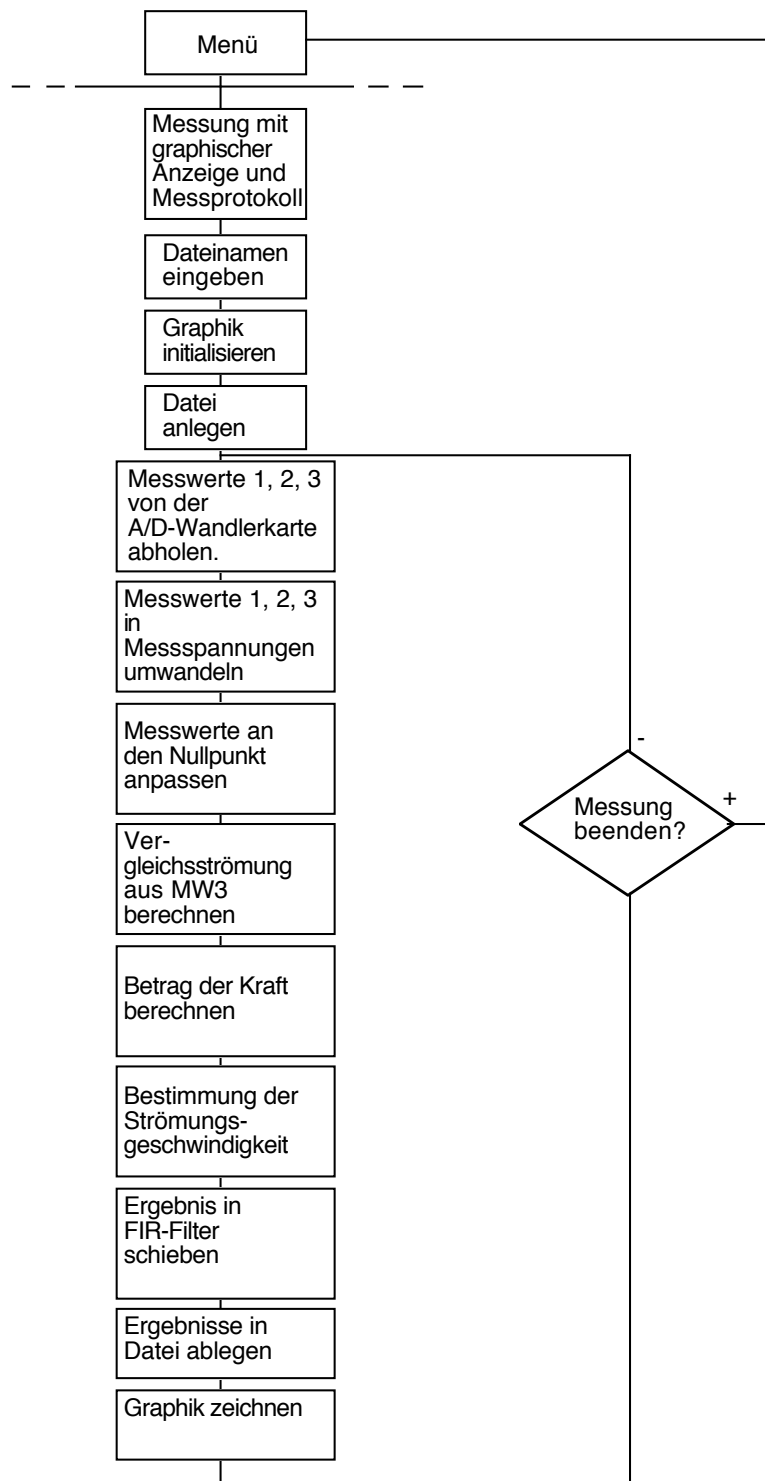


Abbildung 46: Struktur des Menüpunktes 4

6.1.1 Funktionenbeschreibung Funktion v8

Bei der Funktion v8 handelt es sich um die Iterationsfunktion zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten, wie bereits weiter oben beschrieben. Diese Funktion setzt das Verfahren zur iterativen Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit in Code um. Abbildung 47 zeigt den Programmablaufplan dieser Funktion.

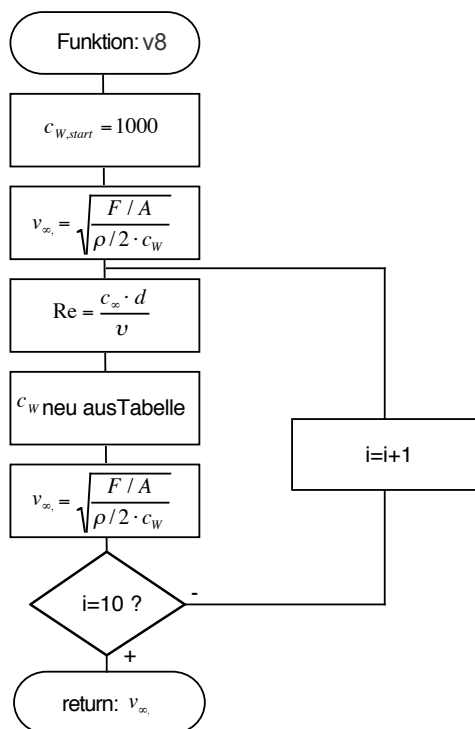


Abbildung 47: **Struktur der Funktion v8**

Die c_w -Werte liegen in der Software als fest kodierte Wertepaare (Tabelle) vor. Hierfür wurde ein Re/c_w -Diagramm digitalisiert. Werte zwischen zwei Punkten werden linear interpoliert.

6.1.2 FIR-Filter

Liegen Messwerte in diskreter Form vor, nutzt man zur Verbesserung der Aussagekraft der Messwerte digitale Filter. In der digitalen Signalverarbeitung unterscheidet man im Allgemeinen zwischen FIR- und IIR-Filtern. Der grundsätzliche Unterschied besteht in der Signlrückführung bei IIR-Filtern, die dann aber instabil werden können. Aus diesem Grund ist bei IIR-Filtern die Stabilität immer zu überprüfen. Stabilität wird über

das BIBO-Kriterium definiert und lässt sich über die Summierbarkeit der Impulsantwort überprüfen. Die Stabilität muss bei FIR-Filtern nicht überprüft werden, da diese, aufgrund ihrer Funktionsweise, immer stabil sind.

Um die Messkurven von hochfrequenten Störfrequenzen, hervorgerufen beispielsweise durch Stöße oder hohe Turbulenzen im Strömungskanal, zu befreien, wurde ein Tiefpassfilter implementiert. Dieses Filter lässt die Signale mit einer Frequenz, die kleiner als die Grenzfrequenz ist, ungehindert passieren. Frequenzen, die größer als die eingestellte Grenzfrequenz sind, werden idealerweise vollständig gelöscht. Die Güte eines digitalen Filters lässt sich mit steigender Anzahl der Koeffizienten verbessern. Allerdings nimmt die Rechenzeit entsprechend zu. Man muss also einen Kompromiss zwischen Verbrauch an Rechenzeit und Güte des gewünschten Filters finden.

Bild 48 zeigt den Aufbau eines FIR-Filters. Durch die Auswahl der Koeffizienten b_0 bis b_n lässt sich die Charakteristik des Filters einstellen.

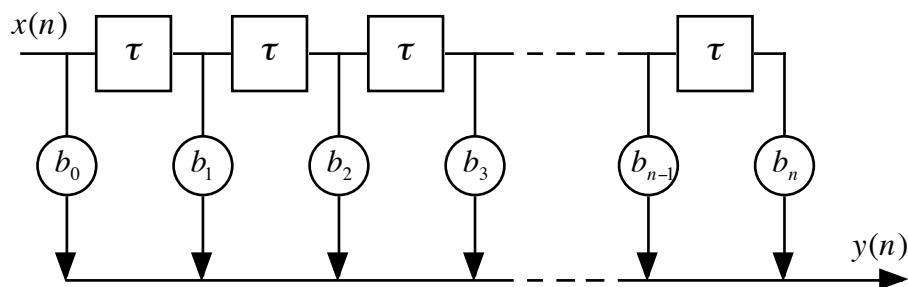


Abbildung 48: Aufbau eines FIR-Filters

Die Koeffizienten eines Tiefpass-Filters lassen sich nach [64] mit

$$h(n) = \frac{T}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{T}} H(\omega) \cdot \cos(\omega n T) d\omega = h(-n)$$

berechnen.

Setzt man als Grenzfrequenz $\omega_T/10$, dann ergibt sich

$$\begin{aligned} h(n) &= \frac{T}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{5T}} H(\omega) \cdot \cos(\omega n T) d\omega \\ &= \frac{T}{\pi} \left[\frac{\sin(\omega n T)}{nT} \right]_0^{\frac{\pi}{5T}} \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{\pi \cdot n} \cdot \sin\left(n \cdot \frac{\pi}{5}\right) = h(-n)$$

Weiterhin gilt für $h(0)$:

$$h(0) = \frac{T}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{5T}} d\omega = \frac{1}{5}$$

Ersetzt man $h(n)$ durch $b(n)$, erhält man die Beziehung zwischen der Übertragungsfunktion und den Filterkoeffizienten. Man berechnet mit dem oben vorgestellten Verfahren die Koeffizienten in der Form

$$h(n) = h(-n).$$

Somit ist eine ungerade Anzahl von Koeffizienten zu berechnen, da $h(0)$ nur einmal vorkommt. Berechnet man 51 Koeffizienten, so ergibt sich die Koeffizientenverteilung wie in Bild 49. In diesem Fall müssen dann die Koeffizienten zur Gewährleistung der Kausalitätsbedingung noch um $(N-1)/2$ verschoben werden, sodass $h(1)$ zu $h(26)$ wird. Ebenso wird $h(0)$ zu $h(25)$ und $h(-25)$ zu $h(0)$.

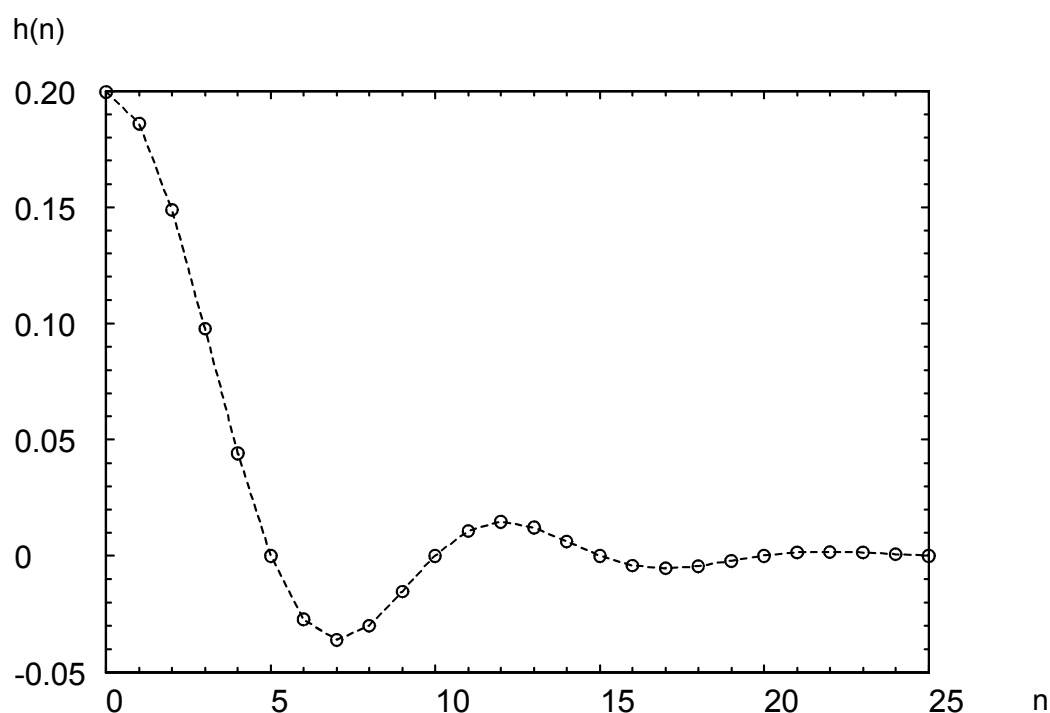


Abbildung 49: Koeffizienten des FIR-Filters

Für den Einsatz im Messprogramm wird das Filter auf die Grenzfrequenz $\omega_T/10$ gesetzt. Das bedeutet, dass sich bei einer Abtastung von 20 Messwerten/sec eine Grenzfrequenz von $2Hz$ ergibt.

6.1.3 Hammingwindow

Eine Möglichkeit, ein digitales Filter zu verbessern, besteht in der Fensterung der Koeffizienten. Durch die Fensterung werden die Koeffizienten an den „Rändern“ gedämpft, um einen weicheren Übergang bei der Periodisierung zu erhalten. Auf diese Weise verbessert sich das Spektrum der Übertragungsfunktion. Die Fensterung der Filterkoeffizienten wird im Programm ebenfalls implementiert.

Mit der Auswahl der Koeffizienten und deren Fensterung entsteht der Frequenzgang aus Abbildung 50.

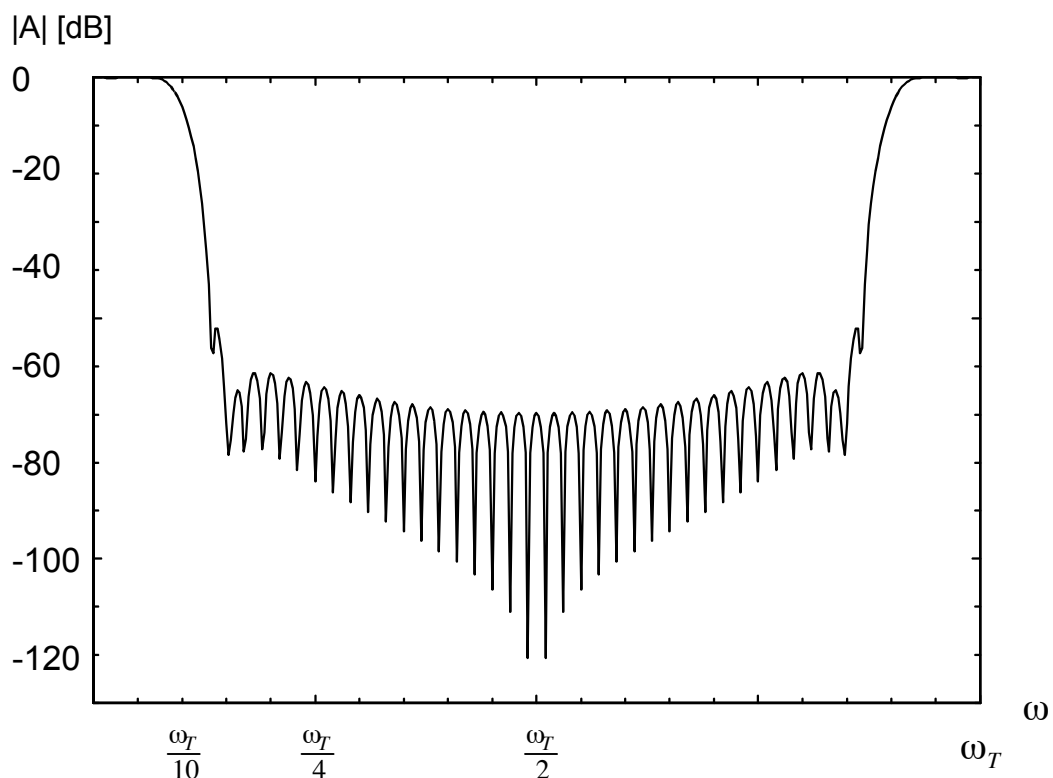


Abbildung 50: Frequenzgang des FIR-Filters

6.1.4 Visualisierung

Abbildung 51 zeigt die Bildschirmausgabe zur Visualisierung der Messung. Der Pfeil zeigt die Richtung der Strömung relativ zum xy-System des Sensors an. Der Balken veranschaulicht den Betrag der Strömung. Die Zahl unterhalb des Balkens liefert die gemessene Strömungsgeschwindigkeit in m/s.

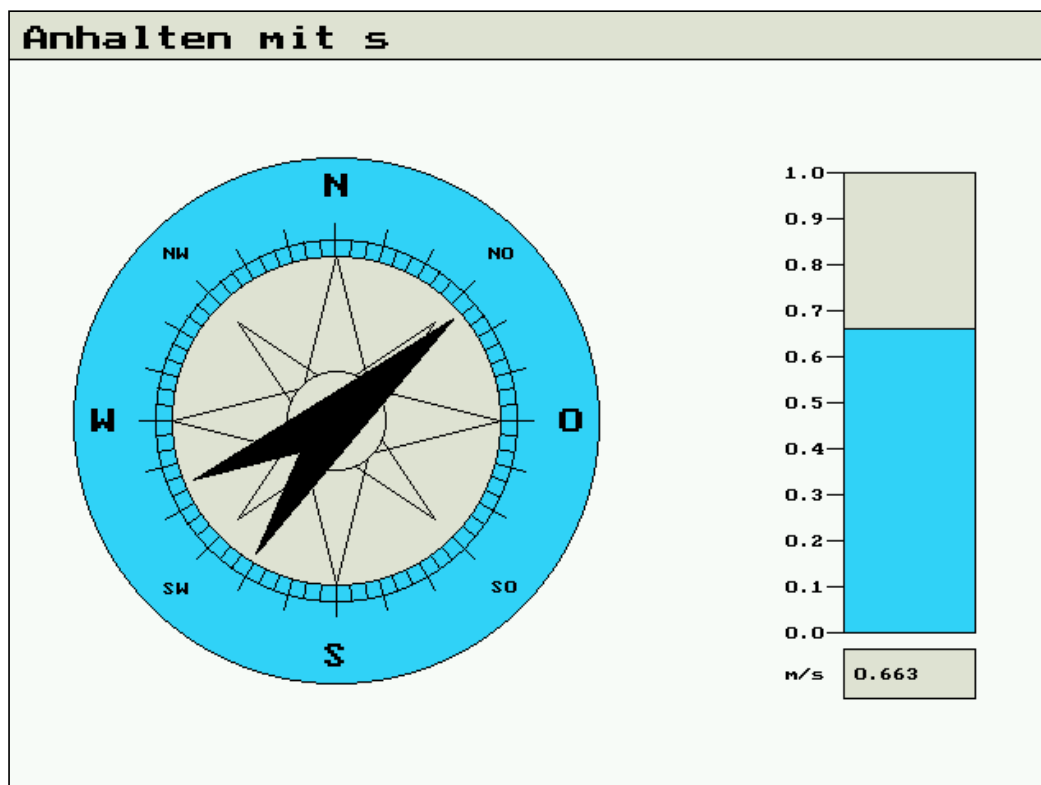


Abbildung 51: Visualisierung der Messung

6.2 Kalibrierungsprogramm

Das Kalibrierungsprogramm dient zur Bestimmung der umgerechneten Federkonstanten. An der Balkenwaagenkonstruktion werden die einzelnen Gewichte aufgelegt. Das aufgelegte Gewicht wird eingegeben, und der Messwert wird bei Abschluss der Eingabe aufgenommen. Die Messspannungen U werden in der Software umgerechnet auf einen Weg x,y . Mit der Kraft, errechnet aus dem aufgelegten Gewicht, ergibt sich die Federkonstante.

7 Versuchsaufbau Messstrecke

Zur Überprüfung der Sensorfunktion wird ein Strömungskanal benötigt, der eine gleichmäßige, drallfreie Strömung liefert. Wasser wird als Fluid ausgewählt. Ein Gleichstromelektromotor mit 190W Ausgangsleistung treibt über ein Stevenrohr eine Schiffsschraube mit 45mm Außendurchmesser und beschleunigt das Wasser auf bis zu 1m/s. Um die Strömung beurteilen zu können, wurde die Messstrecke - dickere Rohrleitung aus Abbildung 52 - als Plexiglasrohr mit 60mm Innendurchmesser ausgelegt. Eine kleine Öffnung dient zur Einführung des Sensorkopfes. Ein Strömungsberuhiger, wie in Abbildung 53, aus zwei

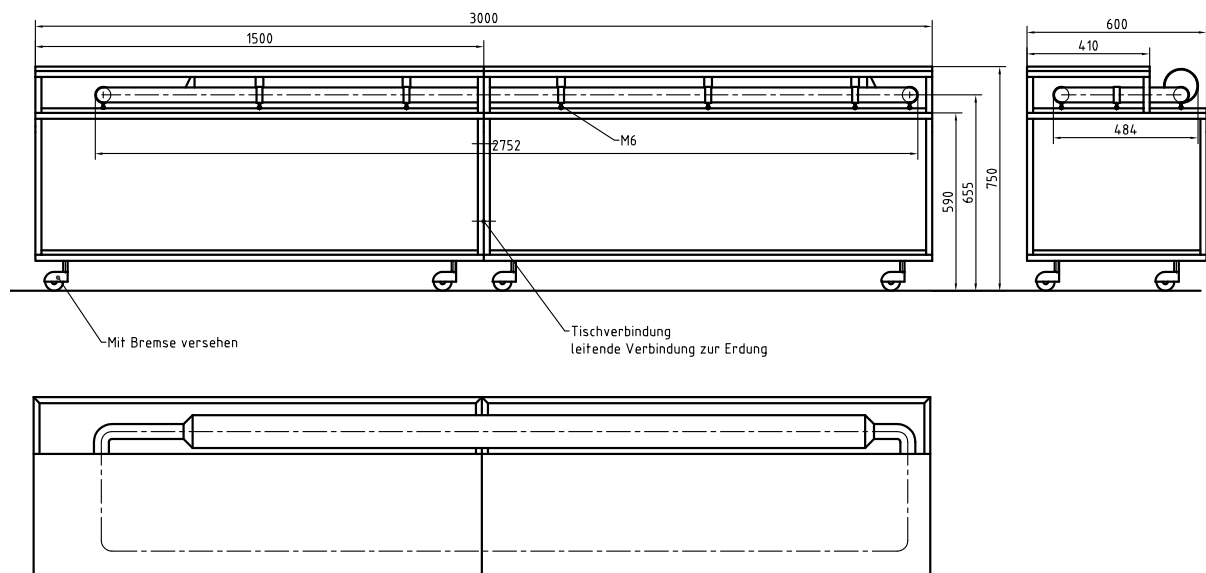


Abbildung 52: Versuchsstrecke

Kunststoffplatten von 80mm Länge sorgt für die Drallfreiheit der Strömung.

Abbildung 54 zeigt den Antriebsstrang zur Erzeugung der Strömung. Der Elektromotor ist mit einer Kupplung an der Welle befestigt. Das Stevenrohr ist im Deckel verklebt. Die Antriebsschraube befindet sich in der 45° Rohrabzweigung.

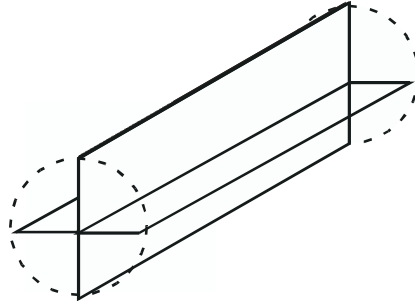


Abbildung 53: Strömungsberuhiger

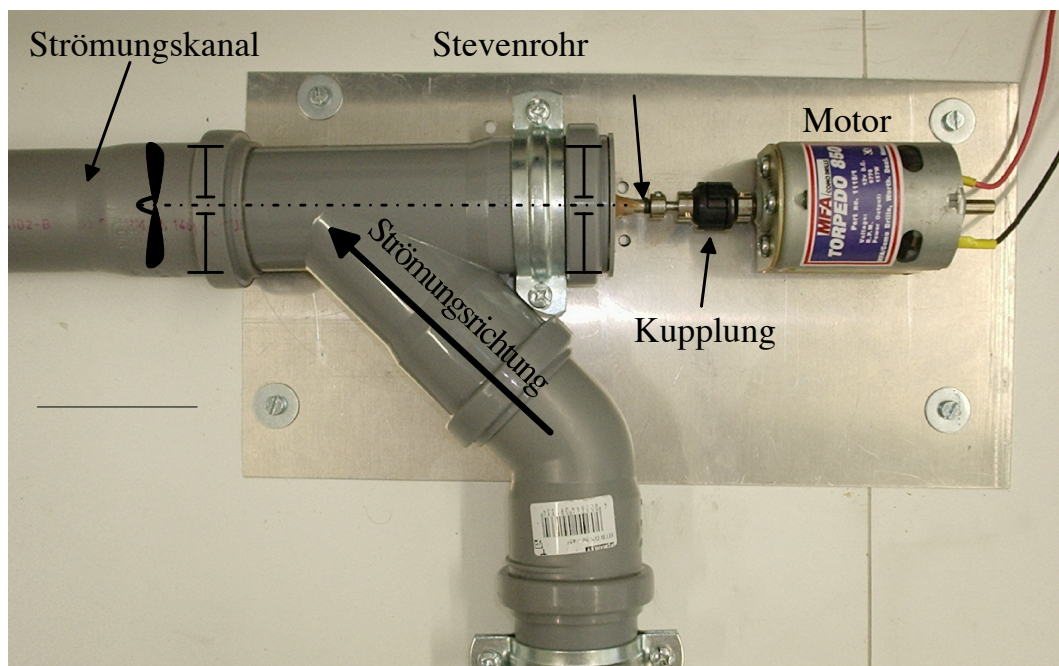


Abbildung 54: Elektromotor zur Erzeugung der Strömung

7.1 Bestimmung der Fluidgeschwindigkeit als Referenz

Zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit werden kleine Luftbläschen in die Strömung eingebracht. Diese werden mit einem Stroboskop mit einer Frequenz von 100Hz angeblitzt, und von der Strömung werden Bilder in einem abgedunkelten Messraum mit langer Belichtungszeit angefertigt. Das Stroboskop beleuchtet durch eine Schablone mit einem Schlitz nur einen möglichst dünnen Streifen in der Mitte des Plexiglasrohres. Es wird sozusagen ein Lichtschnitt der Strömung hergestellt. Auf den Bildern können Bahnen einer Blase verfolgt werden. Mit einem mitfotografierten Vergleichsmaßstab kann bei bekannter Stroboskopfrequenz die Geschwindigkeit der Strömung berechnet werden. Es zeigte sich, dass die Strömung in erster Näherung proportional zur Antriebsspannung des Motors ist.

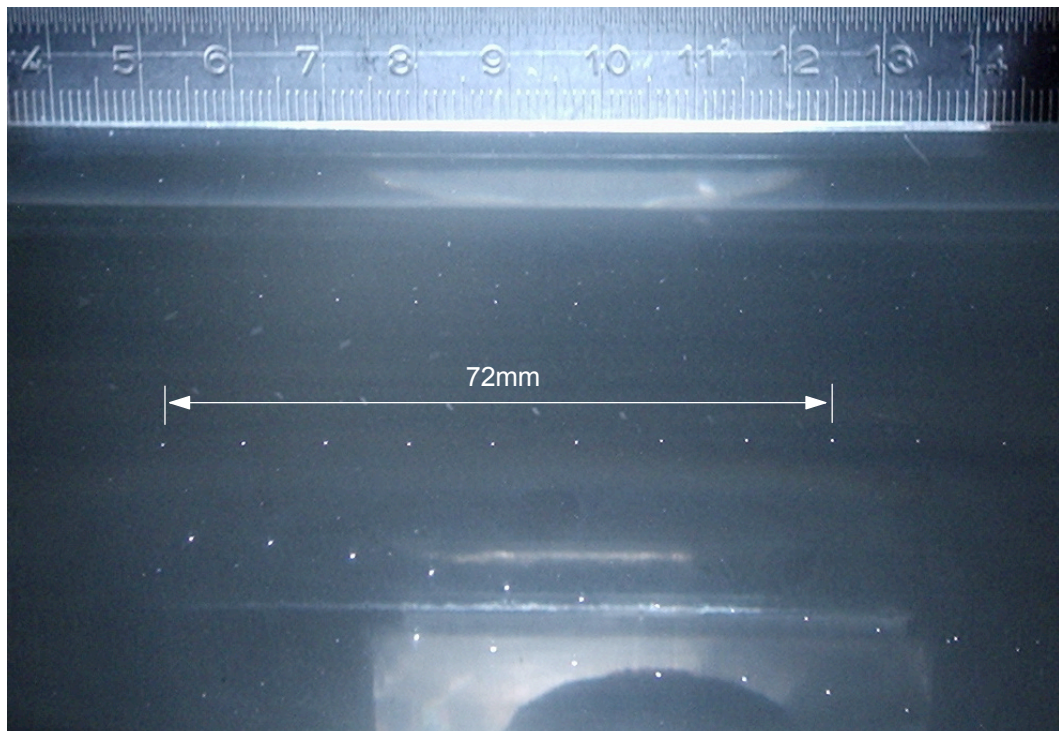


Abbildung 55: **Bahn einer Luftblase**

Abbildung 55 ist ein Foto einer Messreihe zur Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit. Man kann die Bahnen der einzelnen Luftblasen hier gut erkennen. Die eingezeichnete Entfernung kennzeichnet die Bahn einer Luftblase und ist von dem Vergleichsmaßstab abgenommen. Die Blitzfrequenz beträgt hier 100Hz.

Bei einer Blitzfrequenz von 100Hz ergibt sich zwischen den einzelnen Blitzen ein Zeitraum

von $10ms$. Betrachtet man nun das Beispiel aus Abbildung 55, so ergibt sich für die acht Bilder der Luftblase eine Zeit von $80ms$. Aus den gemessenen und mit dem Vergleichsmaßstab verglichenen $72mm$ ergibt sich die Fluidgeschwindigkeit zu

$$v_{Stromung} = \frac{s}{t} = \frac{0,072m}{0,08s} = 0,9m/s$$

Diese Rechnung wurde bei mehreren Geschwindigkeiten durchgeführt. Die Tabelle aus Abbildung 56 zeigt alle verwendeten Messwerte. Die dritte Spalte zeigt die eingestellte Spannung am Antriebsmotor, sodass ein Zusammenhang zwischen Antriebsspannung und Geschwindigkeit zu finden ist.

Messung	Bild Nr.	Maßstabsermittlung				Geschwindigkeitsbestimmung							
		U [V]	cm [Anlage]	cm [Foto]	[Anlage]/[Foto]	Abstände	Gesamtzeit [s]	cm [Foto]	cm [Anlage]	v [cm/s]	v [m/s]		
		0											0
1	2	2,5	5,00	7,10	0,704225	17	0,17	6,00	4,23	24,86	0,2486		
2	5	3,0	6,00	8,55	0,701754	13	0,13	5,20	3,65	28,07	0,2807		
3	9	3,5	7,00	9,90	0,707071	14	0,14	7,00	4,95	35,35	0,3535		
4	14	4,0	6,00	8,50	0,705882	13	0,13	7,60	5,36	41,27	0,4127		
5	18	4,5	7,00	9,95	0,703518	15	0,15	8,40	5,91	39,40	0,3940		
6	22	5,0	3,00	4,15	0,722892	5	0,05	3,30	2,39	47,71	0,4771		
7	28	5,5	7,00	10,00	0,700000	11	0,11	9,15	6,41	58,23	0,5823		
8	30	6,0	10,00	14,20	0,704225	11	0,11	9,40	6,62	60,18	0,6018		
9	34	6,5	10,00	14,20	0,704225	11	0,11	11,20	7,89	71,70	0,7170		
10	40	7,0	10,00	14,20	0,704225	5	0,05	5,90	4,15	83,10	0,8310		
11	41	7,5	8,00	11,40	0,701754	9	0,09	10,45	7,33	81,48	0,8148		
12	47	8,0	10,00	14,15	0,706714	8	0,08	8,25	5,83	72,88	0,7288		
13	51	8,5	10,00	14,15	0,706714	6	0,06	7,95	5,62	93,64	0,9364		
14	53	9,0	10,00	14,20	0,704225	11	0,11	14,30	10,07	91,55	0,9155		
15	58	9,5	10,00	14,20	0,704225	7	0,07	9,70	6,83	97,59	0,9759		
16	62	10,0	10,00	14,20	0,704225	8	0,08	11,75	8,27	103,43	1,0343		
17	68	10,5	10,00	14,20	0,704225	11	0,11	16,20	11,41	103,71	1,0371		
18	69	11,0	10,00	14,20	0,704225	7	0,07	10,50	7,39	105,63	1,0563		

Abbildung 56: Messwerte der Geschwindigkeitsbestimmung der Strömung

Trägt man die gewonnenen Ergebnisse in ein Diagramm ein und betrachtet die Antriebsspannung U über der Strömungsgeschwindigkeit v , so ergibt sich ein in erster Näherung linearer Zusammenhang für den betrachteten Bereich.

Dieser wird im Messprogramm verwendet, um eine Vergleichsströmung zu berechnen. Diese lässt sich dann leicht aus der Antriebsspannung gewinnen, die bei der Messaufnahme mit aufgenommen wird. Abbildung 57 verdeutlicht den linearen Zusammenhang, der so auch erwartet wurde. Die Motordrehzahl ist bei Gleichstrommotoren proportional zur angelegten Spannung. Die Strömungsgeschwindigkeit ist bei Schiffsschrauben in weiten Bereichen proportional zur Drehzahl, sodass sich ein proportionaler Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Antriebsspannung ergibt.

Somit gilt

$$n_{Motor} \sim U$$

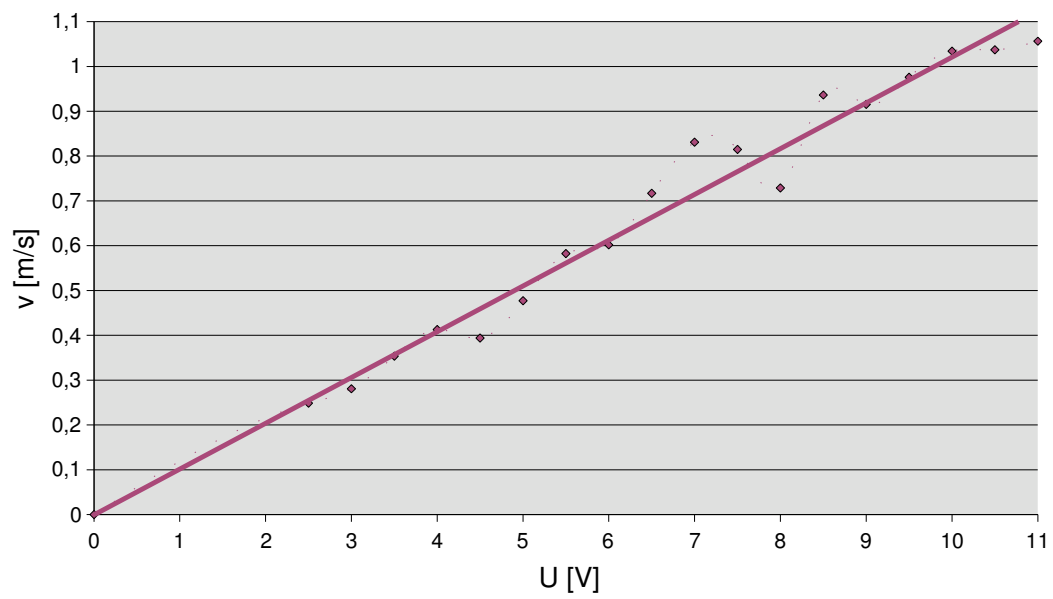


Abbildung 57: Strömungsgeschwindigkeit über Antriebsspannung

$$n_{\text{Schraube}} \sim v_{\text{Stroemung}}$$

$$v_{\text{Stroemung}} \sim U.$$

8 Versuchsdurchführung

8.1 Abgleich der Kantendetektorkarten

Zunächst wurden die Kantendetektorkarten abgeglichen, sodass eine maximale Empfindlichkeit über den gesamten Messbereich erreicht werden konnte. Hierzu wurden die Karten auf einen Messspannungsbereich von 0..10V eingestellt. Die Mittelstellung war bei 5V eingestellt.

8.2 Ermittlung der Weg-Messspannungskurve

Um einen Zusammenhang zwischen den Messspannungen an den Kantendetektorkarten und dem tatsächlich verfahrenen Messweg zu ermitteln, wurde der Sensor auf einer Halterung montiert. Anschließend wurde mittels eines x-y-Tisches und Mikrometerschrauben die Kugel ausgelenkt, und die Spannungen der Messkarten wurden notiert. Aus den aufgenommenen Messwerten wurde die Weg-Spannungskurve generiert. Die Werte wurden auch direkt in die Software implementiert. Jede Änderung der Einstellungen der Kantendetektorkarten machte eine Neuaufnahme der Kurve notwendig. Die Kurve wurde mit unterschiedlichen Federplatten aufgenommen. Die Ergebnisse waren im Rahmen der Messgenauigkeit identisch.

Der Sensor war mit Platte 1.1 und der 10mm Kugel versehen. Es wurde auch die Platte 3.1 verwendet, deren Ergebnisse jedoch nicht abwichen. Liegt ein Messwert zwischen zwei Punkten, wird linear interpoliert.

Die Breite der Photodiode beträgt lediglich 0,6mm. Wie man an den Diagrammen sehen kann, ist der Bereich $\pm 0.3mm$ über einen weiten Bereich quasi linear. Das ist der Bereich, in dem die Fahne die Photodiode abschattet. Die Mittenposition ist also genau bei halbabgeschatteter Diode erreicht. Das nutzt man später aus, um den Nullabgleich mit den Lineareinheiten durchzuführen. Hierzu wird der Sensor in Ruhelage gebracht. Anschließend werden die Lineareinheiten so eingestellt, dass die Messkarten in etwa die halbe, maximale Messspannung liefern. Weitere Abweichungen werden durch einen Nullabgleich in der Messsoftware korrigiert.

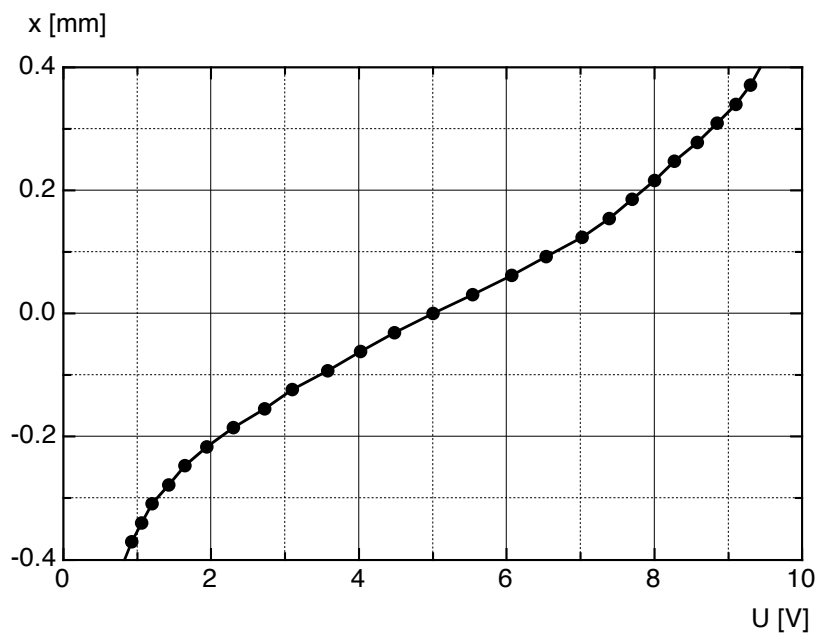


Abbildung 58: Spannungs-Weg-Diagramm in x-Richtung

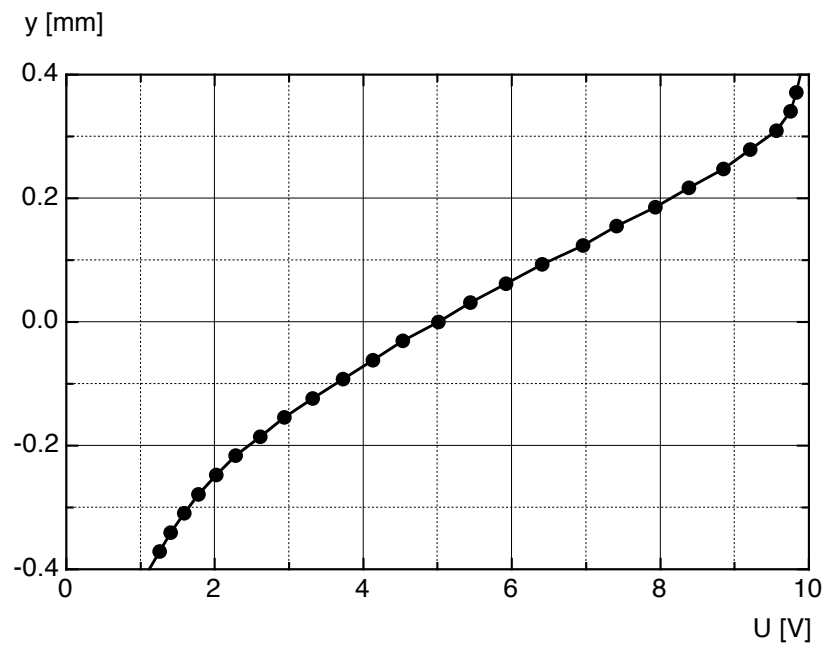


Abbildung 59: Spannungs-Weg-Diagramm in y-Richtung

8.3 Bestimmung der Federkonstanten des reduzierten Modells

8.3.1 Messung der Federkonstanten des reduzierten Modells

Um die resultierenden Federkonstanten der Platten experimentell zu ermitteln, wurde der Sensor in einer Halterung montiert und die Kugel wurde mit einer definierten Kraft beaufschlagt. Hierzu wurde eine Balkenwaage vorgesehen, die auf einer Klinge gelagert wurde, um nahezu Reibfreiheit zu garantieren. Es wurden Gewichte aufgelegt und die Auslenkung der Fahne gemessen. Ein Programm wertete die Messung aus und protokollierte die Messwerte. In der Protokolldatei konnte der ermittelte Wert der Federkonstante abgelesen werden. Der Wert wurde für die x- und die y-Koordinate aufgenommen. Da die Platten immer in x-Richtung = Walzrichtung montiert wurden, erhielt man leicht unterschiedliche Federkonstanten für die x- und die y-Richtung.

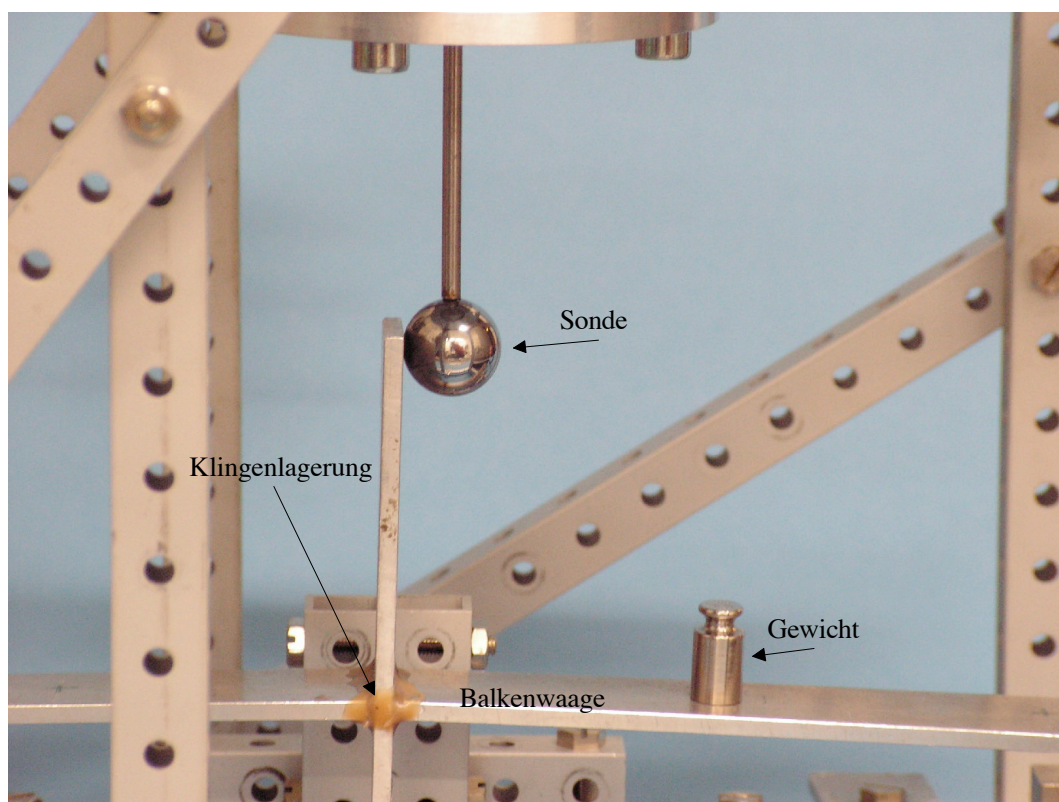


Abbildung 60: Balkenwaage für die Bestimmung der Federkonstanten

Der Sensor wurde mit der Kugel nach unten in eine Halterung montiert. Durch Auflage von Gewichten wurde eine Balkenwaage ausgelenkt, die mittels eines Hebels direkt auf die Kugel mit der Kraft des aufgelegten Gewichtes drückte. Die Balkenwaage wurde auf

einer Klinge gelagert, um Reibung soweit wie möglich zu reduzieren. Die Waage reagierte bereits bei Gewichten ab 10mg, und es wurden je nach eingesetzter Platte Gewichte von 0,01g bis 20g aufgelegt.

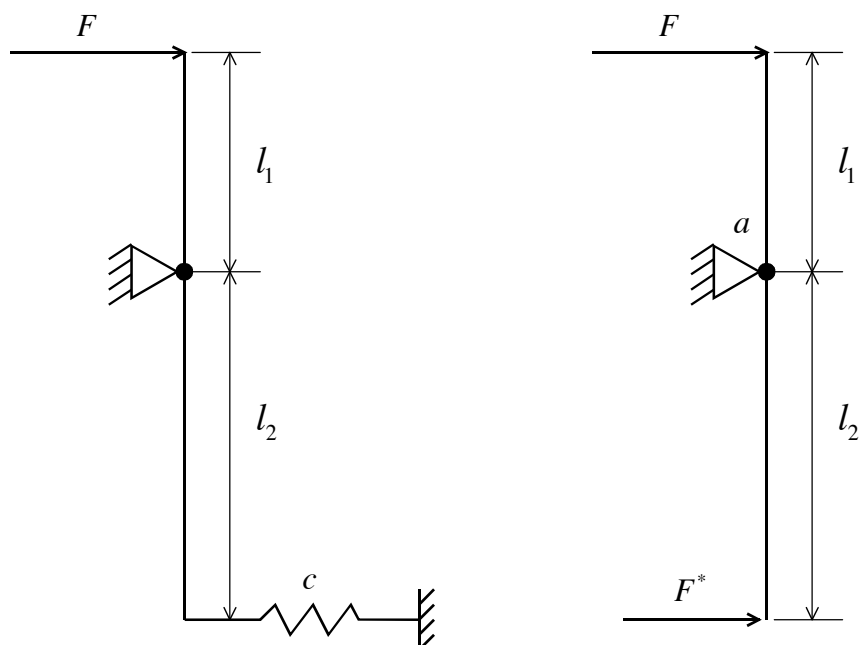


Abbildung 61: **Bestimmung der Ersatzfedersteifigkeit**

Die Berechnung der Federkonstanten c geschieht nach dem Modell aus Abbildung 61. Nach Freischneiden des Ersatzmodells und Einführung der Kraft F^* ergibt das Momentengleichgewicht um den Punkt a

$$F^* \cdot l_2 - F \cdot l_1 = 0$$

$$F^* = F \cdot \frac{l_1}{l_2}$$

Mit $F^* = c \cdot x$ wird

$$c = \frac{F}{x} \cdot \frac{l_1}{l_2}$$

Der Federsteifigkeitswert wurde für die x-Richtung und die y-Richtung jeweils in positiver und negativer Richtung bestimmt. Die ermittelten Werte wurden in die Messsoftware eingegeben. Abbildung 62 zeigt das Ergebnis einer Messung zur Bestimmung der Federkonstanten. Die Tabelle beginnt mit der Masse in g . Diese wird am Programm eingegeben. Die Werte $U1$ und $U2$ sind die Messspannungen der Kantendetektorkarten. Daraus errechnet sich der ermittelte Weg in $[m]$, und mit der Kraft F^* in $[N]$ ergeben sich die

13.6.2005
 Platte: 1.3

Masse	U1	U2	Weg x	Weg y	Kraft	Federkonstante
1	5.41	4.576	-2.61399926e-05	-1.79391019e-06	0.006	220.272
2	5.789	4.619	-5.02775671e-05	-4.84139619e-06	0.012	228.527
3	6.149	4.67	-7.41462949e-05	-8.45082995e-06	0.017	232.014
4	6.49	4.711	-9.9338094e-05	-1.13686357e-05	0.023	230.889
5	6.804	4.755	-0.00012133	-1.44809618e-05	0.029	236.171
6	7.112	4.814	-0.00014473	-1.863073e-05	0.035	237.299
7	7.35	4.843	-0.00016666	-2.0705614e-05	0.04	240.56
8	7.568	4.921	-0.00018985	-2.62170249e-05	0.046	240.911
9	7.766	4.897	-0.00021181	-2.44879548e-05	0.052	243.606
10	7.949	4.972	-0.00023253	-2.98048453e-05	0.058	246.189
11	8.141	5.014	-0.00025598	-3.28664855e-05	0.063	245.991
12	8.338	5.038	-0.0002797	-3.47242306e-05	0.069	245.724
13	8.54	5.096	-0.00030186	-3.93565299e-05	0.075	246.471
14	8.718	5.193	-0.00032368	-4.70046491e-05	0.081	247.038
15	8.871	5.161	-0.0003431	-4.4495487e-05	0.087	250.225

Abbildung 62: Messprotokoll zur Bestimmung der Federsteifigkeit

einzelnen Werte der Federkonstanten c in $[N/m]$. Durch Bildung des Mittelwertes der Messreihe erhält man die Federkonstante der Messung, in diesem Fall etwa $239N/m$.

Die Messergebnisse für die reduzierte Federkonstante sind in Tabelle 6 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Platten untereinander unterschiedliche Messergebnisse erreichen, wobei es merkwürdig ist, dass dieselbe Platte in einem solch großen Bereich variiert. In Tabelle

Tabelle 4: Gemessene Werte für c der einzelnen Platten

Platte	c gemessen in N/m
1.1	230 - 385
1.2	233 - 400
1.3	215 - 270
2.1	54 - 122
2.2	78
2.3	85
3.1	14 - 30

5 sind häufig gemessene Werte den berechneten Werten der FEM sowie der geschlossenen Lösung gegenübergestellt. Die Tabelle zeigt, dass zwischen den gemessenen und den berechneten Werten eine erhebliche Abweichung auftritt.

Tabelle 5: Gemessene Werte im Vergleich mit berechneten Werten für c der einzelnen Platten

Platte	c gemessen	c berechnet	c mit FEM berechnet
1	230 N/m	645,4	679,2
2	70 N/m	80,7	85,02
3	5,3 N/m	10,1	10,6

Bei den Messungen der Ersatzfedersteifigkeiten wurde der Sensor für die Montage der unterschiedlichen Platten demontiert. Bei der Messung stellte sich dann heraus, dass die gemessenen Federkonstanten selbst bei derselben Platte nicht übereinstimmten. Diese Abweichungen mussten genauer untersucht werden. Das folgende Kapitel gibt eine Erklärung für die Abweichungen.

Der Einfluss der Walzrichtung auf den E-Modul in diesen Beispielen ließ sich auf etwa 10% abschätzen.

8.3.2 Fehleranalyse

Für die unterschiedlichen Messergebnisse konnte nur die Montage der Platten verantwortlich sein. Die übrigen Parameter blieben bei den Messungen unangetastet. Lediglich zur Messung mit einer weiteren Platte musste ein Umbau des Sensors vorgenommen werden. Der Zusammenbau war immer derselbe. Nur das Anzugsmoment der Schrauben war unterschiedlich.

Es schien so, dass sich die Platten durch unterschiedliche Anzugsmomente der Schrauben in ihrer Federeigenschaft veränderten. Erstaunlicherweise wurden die Federn steifer, wenn die Deckelschrauben gelockert wurden.

Abbildung 63 zeigt die montierte Platte im Schnitt. Der Deckel - die Einzelteilzeichnung ist in Abbildung 64 zu sehen - klemmt die Platte am Umfang, sowohl mit dem inneren als auch mit dem äußeren Ring.

Wenn die Federsteifigkeit der Platte bei stark angezogenen Schrauben geringer wird, das heißt, die Platte weicher wird, muss sich in diesem Fall die Einspannsituation verändern. Abbildung 65 zeigt den eingespannten Fall. Die Vermutung ist nun, dass sich der Deckel durch Erhöhung der Schraubenkraft verformt und der innere Klemmring seinen Beitrag an der Klemmung der Platte verliert. Schließlich wird der Deckel wohl nur noch auf einem

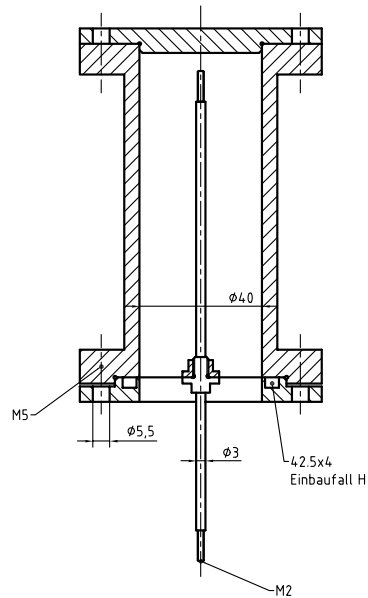


Abbildung 63: Position der elastischen Platte im Sensor

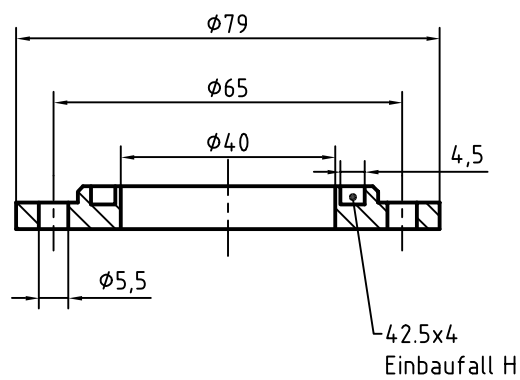


Abbildung 64: Deckel zur Spannung der Platte

Ring, der hier mit äußerer Klemmung beschrieben ist, eine ringförmige Kraft auf die Platte ausüben. Ursprünglich wurde die Lagerung der Platte wie in Abbildung 65 a) angenom-

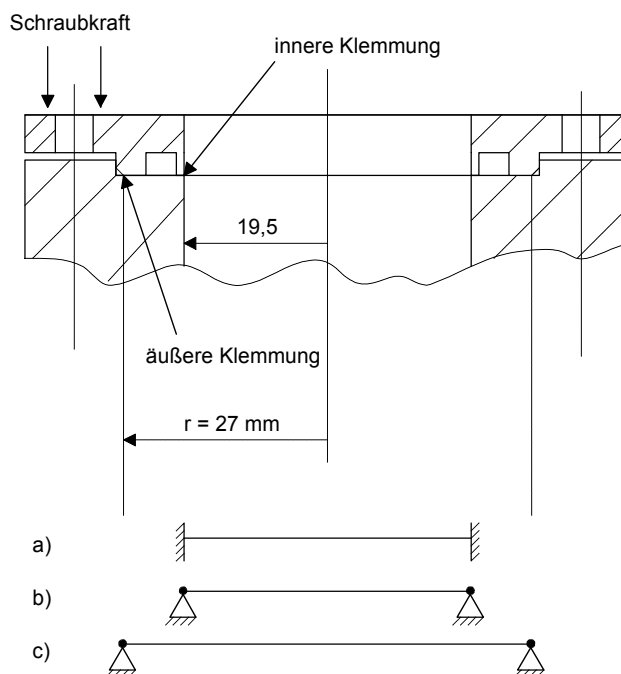


Abbildung 65: **Eingespannte Platte**

men. Da der innere Klemmring relativ dünn ist und sich dahinter, von der Plattenmitte aus betrachtet, die Nut für den O-Ring befindet, ist es wohl zulässig, die Lagerung 65 b) anzunehmen. Verformt sich der Klemmring aufgrund hoher Schraubenkräfte, dann wird das möglicherweise zu der Lagerung im Fall 65 c) führen.

Zur Überprüfung der Annahmen wurden die Federkonstanten für fest angezogene und gelockerte Schrauben beispielhaft für die Platte 1.2 bestimmt und mit den Berechnungen für die drei oben beschriebenen Lagerungsfälle durchgeführt.

8.3.3 Messungen mit verändertem Deckel

Um die oben gemachten Annahmen zu bestätigen, wurde am Deckel der äußere Klemmring abgedreht und auf eine O-Ring-Dichtung für diese Messung verzichtet. Es wurden nochmals die Federkonstanten gemessen.

Werden die Schrauben vorsichtig angezogen, sodass der innere Ring das Blech gerade gut klemmt, erhält man die Messwerte aus Abbildung 66. Trägt man nun den gemessenen

Tabelle 6: Messung und Berechnung von c bei unterschiedlichen Lagerungsfällen

c gemessen angezogene Schrauben	230 N/m
c gemessen gelockerte Schrauben	385 N/m
c berechnet Lagerungsfall a)	645 N/m
c berechnet Lagerungsfall b)	407 N/m
c berechnet Lagerungsfall c)	244 N/m

19.7.2006

Platte: 1.2

Masse	U1	U2	Weg x	Weg y	Kraft	Federkonstante
1	5.155	5.234	-2.97784289e-06	-1.65990726e-05	0.006	342.234
2	5.205	5.434	-6.14780468e-06	-3.24019688e-05	0.012	349.997
3	5.244	5.639	-8.60692655e-06	-4.69733851e-05	0.017	362.563
4	5.297	5.833	-1.19305835e-05	-6.06762654e-05	0.023	373.327
5	5.333	6.011	-1.41783745e-05	-7.31880528e-05	0.029	387.093
6	5.385	6.21	-1.74828196e-05	-8.69712114e-05	0.035	390.354
7	5.439	6.42	-2.09025359e-05	-0.00010144	0.04	390.059
8	5.487	6.608	-2.39188026e-05	-0.0001131	0.046	399.402
9	5.524	6.835	-2.62434412e-05	-0.00012713	0.052	400.133
10	5.566	7.045	-2.88868986e-05	-0.00014124	0.058	400.348
11	5.621	7.264	-3.24494355e-05	-0.00015779	0.063	394.098
12	5.65	7.461	-3.4289427e-05	-0.00017216	0.069	394.525
13	5.706	7.669	-3.7910687e-05	-0.00018579	0.075	395.681
14	5.74	7.887	-4.00442942e-05	-0.00020002	0.081	396.108
15	5.771	8.08	-4.20800295e-05	-0.00021413	0.087	396.715
16	5.81	8.283	-4.45268268e-05	-0.00022948	0.092	395.035
17	5.883	8.474	-4.92638263e-05	-0.00024363	0.098	394.727
18	5.928	8.643	-5.21412598e-05	-0.00025586	0.104	397.849
19	5.962	8.782	-5.42944414e-05	-0.00026593	0.11	404.026
20	5.963	8.875	-5.4372739e-05	-0.00027316	0.115	414.434

Abbildung 66: Messprotokoll zur Bestimmung der Federsteifigkeit mit abgedrehtem Deckel, Platte 1.2

Wert der Ersatzfedersteifigkeit über der Kraft auf, ergibt sich der Plot aus Abbildung 67. Wie man erkennen kann, ist der Wert für die Federkonstante zunächst etwas niedriger, was auf Messungenauigkeiten zurückzuführen ist. Der Wert wird jedoch zunehmend stabiler und konvergiert gegen einen festen Wert, in diesem Fall etwa 396N/m .

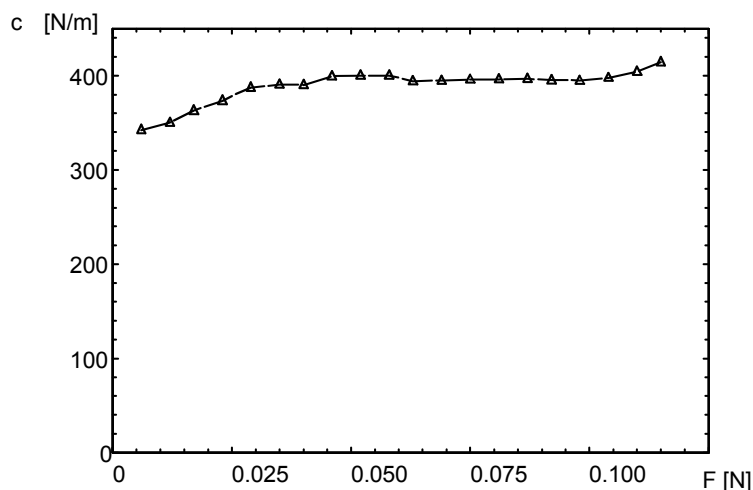


Abbildung 67: Messergebnisse Kalibrierung Platte 1.2 mit verändertem Deckel

Diesen Messwerten kann man nun noch die berechneten Ergebnisse gegenüberstellen. Nimmt man für die Berechnung die Lagerung aus Abbildung 68 an, ergibt sich mit Ma-

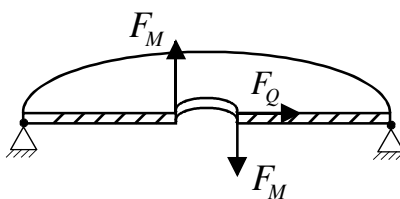


Abbildung 68: Angenommener Lagerungsfall

thematica berechnet die Biegelinie in Abbildung 69.

Eine Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Werte zeigt die Tabelle 7.

Für die Platten 1 und 2 entsprechen nun die berechneten Werte den gemessenen Werten. Lediglich für den Plattentyp 3 weichen die Werte erheblich ab. Die Platten vom Typ 3 zeigen aufgrund ihrer Dicke kein stabiles Verhalten. Je nach Messposition beulte das Blech und veränderte seine Eigenschaften.

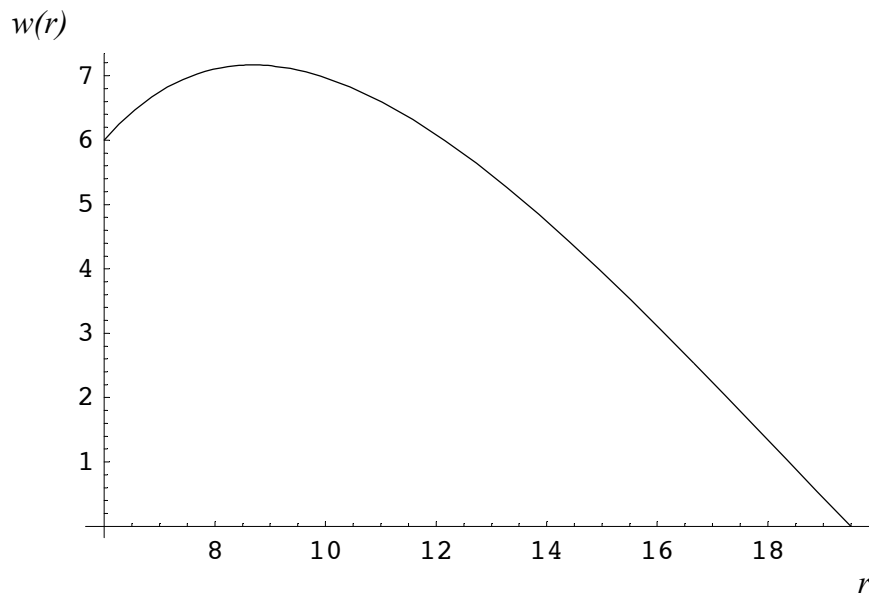


Abbildung 69: Plot der Biegelinie für diesen Fall

Tabelle 7: Gemessene Werte für c bei korrigiertem Deckel

Platte	c gemessen in N/m	c berechnet
1.2	396	407,7
2.2	55	50,9
3.2	33	6,4

Die Berechnung der Ersatzfederkonstante mit der FE-Methode mit geänderten Randbedingungen für den Lagerungsfall nach Abbildung 68 liefert die Abbildung 70. Man kann die Randbedingungen in diesem Schnitt gut erkennen. Die äußere Lagerung der Platte kann kein Moment mehr aufnehmen, und am inneren Ring ist die Biegelinie senkrecht zur Einspannung.

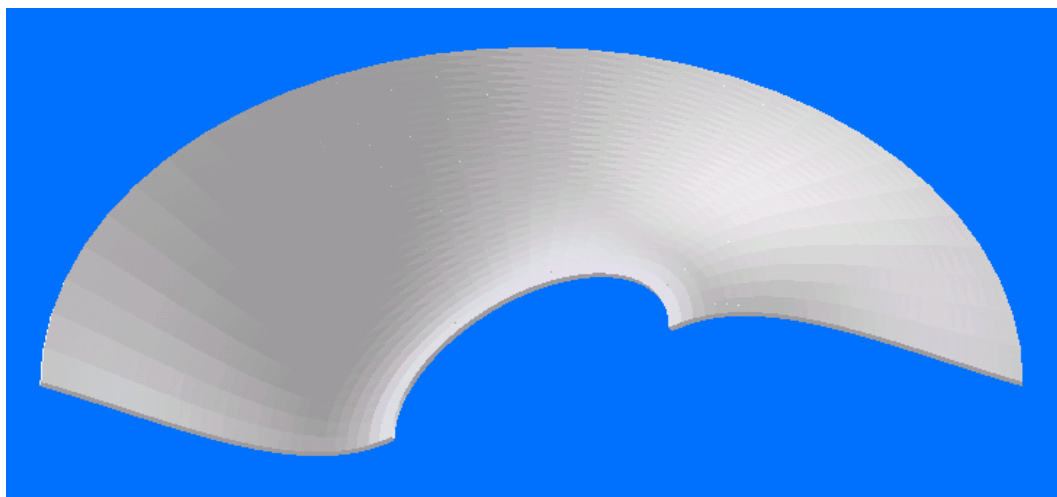


Abbildung 70: Gelenkig eingespannte Platte Lagerungsfall b)

8.3.4 Fazit

Mit dieser Ausführung der Einspannung der Platten lässt sich keine reproduzierbare Federkonstante erreichen. Da es sich aber um einen Prototyp handelt, ist das hinnehmbar. Einen Einfluss auf die Funktion hat das nicht. Der Messwert für die gemessene Federkonstante geht direkt in die Messung mit der Messsoftware ein. Allerdings ist dann nach jedem Umbau der Platten eine Kalibrierung notwendig. Das Anzugsmoment der Schrauben darf nach einer Kalibrierung dann nicht mehr verändert werden.

Eine Möglichkeit für die Behebung dieses Problems ist eine Umgestaltung der Plattenaufnahme. Die Platten müssen bei einem Seriengerät nicht mehr austauschbar sein, wie das hier im Prototypenstadium noch notwendig war. Weiterhin könnten auch mehr Schrauben am Umfang vorgesehen werden, um eine gleichmäßigere Einspannung zu erreichen. Bei Verwendung eines Klemmdeckels, wie in diesem Fall, ist eine Umkonstruktion des Deckels nötig, damit sich dieser bei der Verschraubung nicht mehr verbiegt und die Lagerung der Platte dabei verändert.

8.4 Variation von Kugelgröße und Plattendicke

Für die Messung sind verschiedene Platten-/Kugel-Kombinationen untersucht worden. Es standen die drei oben erwähnten Plattendicken von 0,05mm, 0,1mm und 0,2mm zur Verfügung. Die Kugeln waren in den Durchmessern 5mm, 10mm, 15mm und 20mm vorhanden. Weiterhin stand ein zylinderförmiger Sondenkörper zur Verfügung. Von den Platten waren jeweils vier Exemplare vorhanden. Diese wurden zur Unterscheidung durchnummeriert. Die Kennziffer bestand aus zwei Ziffern. Die erste Ziffer kodiert die Plattendicke, die zweite Ziffer ist eine laufende Nummer.

8.4.1 Bewertung der Plattendicken

Die Auswahl der Plattendicke bestimmt im Wesentlichen den Messbereich, da die Plattendicke h mit h^3 in die Federsteifigkeit der Platte eingeht. Das bedeutet, dass je nach gewähltem Medium und interessierendem Messbereich die Platte entsprechend ausgewählt wird, sodass man die maximale, abtastbare Auslenkung am Ende des Messbereichs erreicht.

Die Platte 3, also mit einer Dicke von 0,05mm, erwies sich als zu dünn. Die Platte beulte und zeigte instabiles Verhalten. Das wird auch aus den Messergebnissen zur Bestimmung der Federkonstanten ersichtlich. Während sich die Platten 1 und 2 wie nach der Plattentheorie erwartet verhielten, wichen die Messergebnisse von Platte 3 doch erheblich ab. Mit einer anderen Materialwahl der Stange und der Kugel könnte eine Gewichtsverminderung erreicht werden, und die Ergebnisse könnten sich auch hier verbessern.

Die Platte 1 mit einer Plattendicke von 0,2mm zeigte das stabilste Verhalten und den größten Messbereich. Messungen von langsamen Strömungen, also im unteren Teil des Messbereichs, sind mit dieser Platte nicht mehr mit so hoher Genauigkeit möglich, da die Auflösung des Abtastsystems sich auf den gesamten Messbereich bezieht.

Die Platte 2 eignet sich gut für die Messung von langsamen Strömungen bei gasförmigen Medien.

Berechnet man mit der Plattentheorie und dem in der Abbildung 71 dargestellten Lagerungsfall für die einzelnen Plattendicken die Ersatzfederkonstante c , so erhält man den in der Abbildung 71 dargestellten Verlauf. Anhand der mit Mathematica berechneten Stützstellen, lässt sich ein Polynom 3. Grades finden, das die berechneten Punkte schneidet.

$$\frac{c}{N/m} = 5,09 \cdot 10^4 \left(\frac{h}{mm} \right)^3$$

Man kann nun die gewünschte Plattendicke ermitteln, indem man für die gewünschte Federsteifigkeit die entsprechende Plattendicke h abliest.

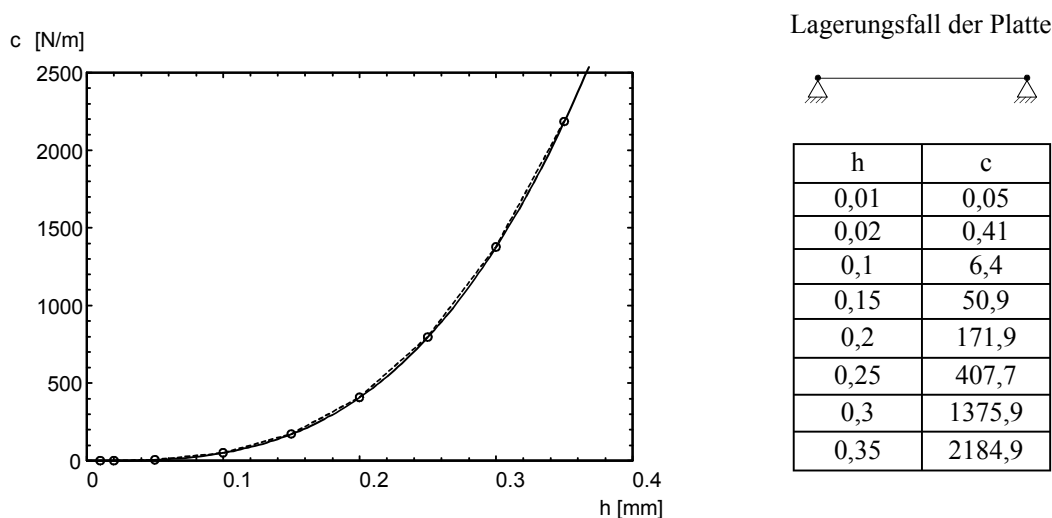


Abbildung 71: Verlauf der Ersatzfedersteifigkeit c über der Plattendicke h

8.4.2 Bewertung der Kugelgrößen

Die kleinste Kugel mit einem Durchmesser von 5mm ist im Verhältnis zur Stange mit einem Durchmesser von 3mm zu klein.

Die Kugel mit einem Durchmesser von 10mm zeigt das beste Massenverhältnis von dem oberen Teil der Stange, an dem die Sonde befestigt ist, zu dem unteren Teil, der die Messfahnen trägt. Bei dieser Konstruktion sind der obere und der untere Abschnitt nahezu gleich schwer, was der Unempfindlichkeit des Sensors gegenüber Stößen zugute kommt.

Die Kugel mit dem Durchmesser von 15mm zeigte das günstigste Messverhalten im Strömungskanal. Durch die etwas höhere Masse der Kugel bietet dieser Aufbau einen stabilen Nullpunkt bei hängender Anordnung. Auch ist bei dieser Sonde der Messbereich für die Verwendung im Strömungskanal günstig.

Die 20mm -Kugel ist zu schwer und für den Strömungskanal zu groß, was zu Pendeleffekten der Kugel führt.

8.4.3 Messbereiche der Platten/Kugel Kombinationen

Für die Messung mit diesem Sensorprototypen sind also die Plattentypen 1 und 2 geeignet. Berechnet man die maximale Kraft, die bei diesem Sensor noch am Ende des Messbereiches von $0,3\text{mm}$ gemessen werden kann, ergibt sich der Kraftbereich für die Platten. Mit

$$F_{Kugel} = c \cdot x \cdot \frac{l_2}{l_1}$$

ergibt sich die Tabelle 8.

Tabelle 8: Kraftbereich des Sensors mit Plattentyp 1 und 2

Plattentyp	1	2
c	400	51
$F_{Kugel\ max}$	$0,185\text{N}$	$0,0236\text{N}$

Berechnet man für die Kugeln mit dem Durchmesser 10mm und 15mm die Strömungsgeschwindigkeiten für Luft und Wasser für die beiden Plattentypen mit der in Tabelle 8 bestimmten Maximalkraft, lässt sich die Matrix nach Tabelle 9 aufstellen. Hier lässt sich nun für den jeweiligen Anwendungsfall die günstigste Kombination wählen.

Tabelle 9: Messbereiche für einige Platten / Kugel Kombinationen

Kugeldurchmesser		10mm	15mm
Platte 1	Luft	$98,9\text{m/s}$	$65,9\text{m/s}$
	Wasser	$3,4\text{m/s}$	$2,3\text{m/s}$
Platte 2	Luft	$35,3\text{m/s}$	$23,5\text{m/s}$
	Wasser	$1,23\text{m/s}$	$0,82\text{m/s}$

8.5 Messreihen mit der Sprungfunktion

Der Sensor wurde wie in Abbildung 72 in der Messstrecke montiert. Die Sonde tauchte in das Fluid ein, wobei der Sondenkörper vollständig umspült wurde und mittig in der Strömung lag.

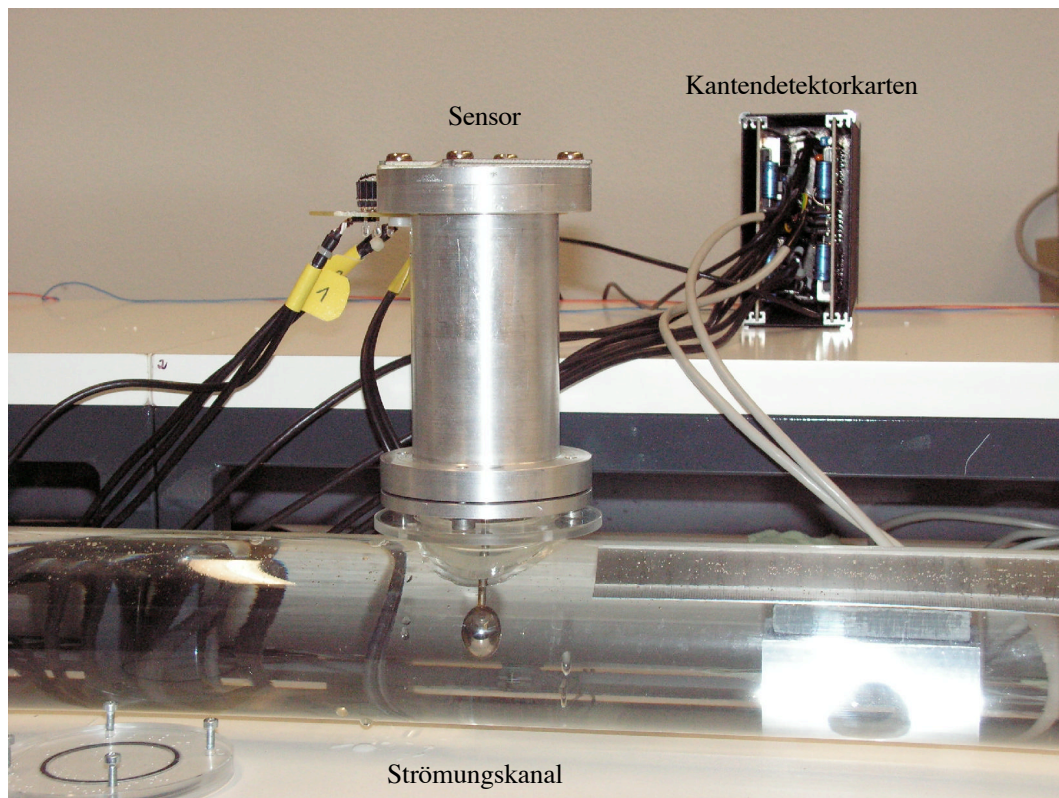


Abbildung 72: **Sensor in Messposition**

Es wurden nun mit jeder möglichen Kombination von Sondenkörper zu Federplatte Messungen durchgeführt. Für die Messungen wurde die Sprungfunktion verwendet. Die Messungen zeigen, wie bei ruhender Strömung die Antriebsspannung aufgeschaltet wird und nach einer gewissen Zeit wieder abgeschaltet wird. Die Antriebsspannung erscheint dann in den Messungen als Rechteck, also als Sprungfunktion. Die Spannung wird in die Vergleichsströmung umgerechnet und in den Messplot eingetragen.

Die Abbildung 73 zeigt einen typischen Plot aus den Messreihen. Der Plot zeigt zwei Kurven. Die eine Kurve ist die Sprungfunktion der Vergleichsströmung, die aus der anliegenden Antriebsspannung berechnet wird, und die andere Kurve ergibt sich aus den Messwerten des Sensors. Wie in dem Kapitel über die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten

dargestellt, handelt es sich hier um die aus diesen Ergebnissen berechnete Strömungsgeschwindigkeit. Man beachte jedoch, dass die Strömungsgeschwindigkeit erst nach der Beschleunigungsphase erreicht wird. Zuerst müssen alle Massen innerhalb des Strömungskanals beschleunigt werden, da nur im eingeschwungenen Zustand die Messgröße, die aus der Antriebsspannung berechnet wird, als Strömungsgröße betrachtet werden kann. Man kann an der Kurve ebenfalls erkennen, dass der Sensor einen reproduzierbaren Wert liefert. Am Rande sei hier bemerkt, dass der gezeigte Offset dieses Bildes und der folgenden Bilder auf einer nicht korrigierten Nulllage des Sensors beruhte (siehe dazu auch Kapitel 5.1.1). Messungen im Windkanal der Ruhruniversität Bochum zeigten zudem ein sehr ruhiges Verhalten der Messwerte. Siehe dazu auch Kapitel „Messungen im Windkanal“ weiter unten.

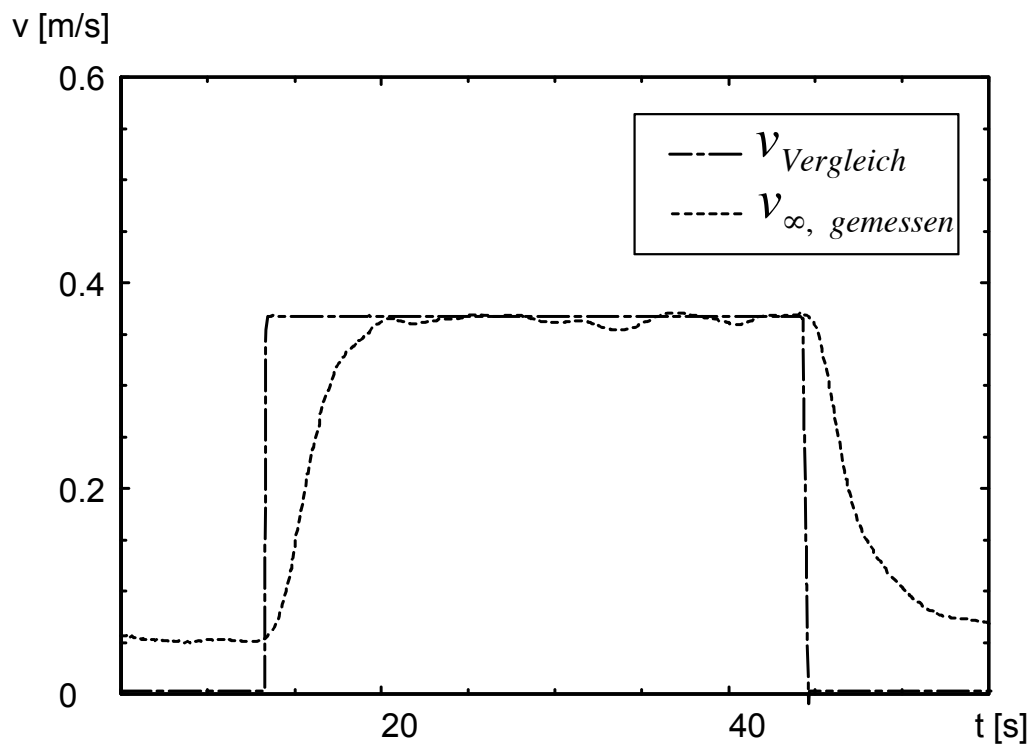


Abbildung 73: Sprungantwort des Sensors bei 0,37 m/s; Platte 1.2; Plattendicke 0,2mm; Sonde 15mm

Abbildung 74 zeigt eine Messreihe des Sensors mit der Platte 1.2 und einer Kugel mit 15mm Durchmesser bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. Die Rechteckfunktion beschreibt wieder die Vergleichsströmung, die aus der Betriebsspannung des Antriebsmotors berechnet wurde. Man kann das ruhige Verhalten des Sensors und die reprodu-

zierbare Genauigkeit sehen.

Die zugrundeliegenden Gleichungen gelten für den laminaren Strömungsfall. Die Geschwindigkeit v_∞ ist definiert als laminare Anströmung aus dem Unendlichen. Die Messung bei turbulenter Rohrströmung liefert ebenfalls brauchbare Messwerte. Messungen bei laminarer Anströmung zeigen ein ruhiges, gleichmäßiges Signal, siehe dazu Messungen im Windkanal.

Die Abbildung 75 zeigt eine Messreihe mit einer Platte vom Typ 2, also einer Plattendicke von $0,1\text{mm}$ und einem Sondendurchmesser von 15mm . Es wird wiederum die Sprungfunktion für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten verwendet.

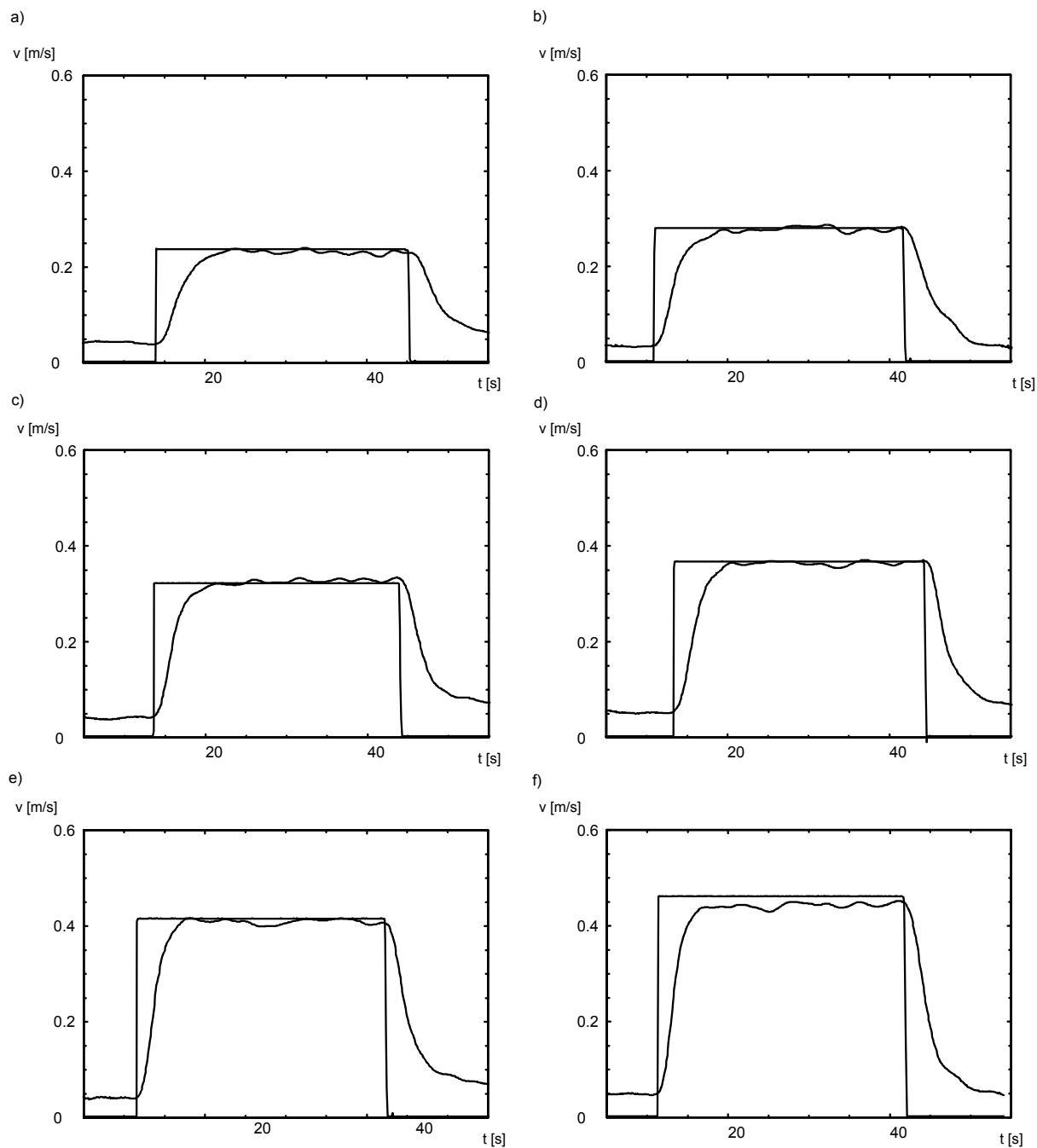


Abbildung 74: Sprungantwort bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten; Platte 1.2; Sonde 15mm

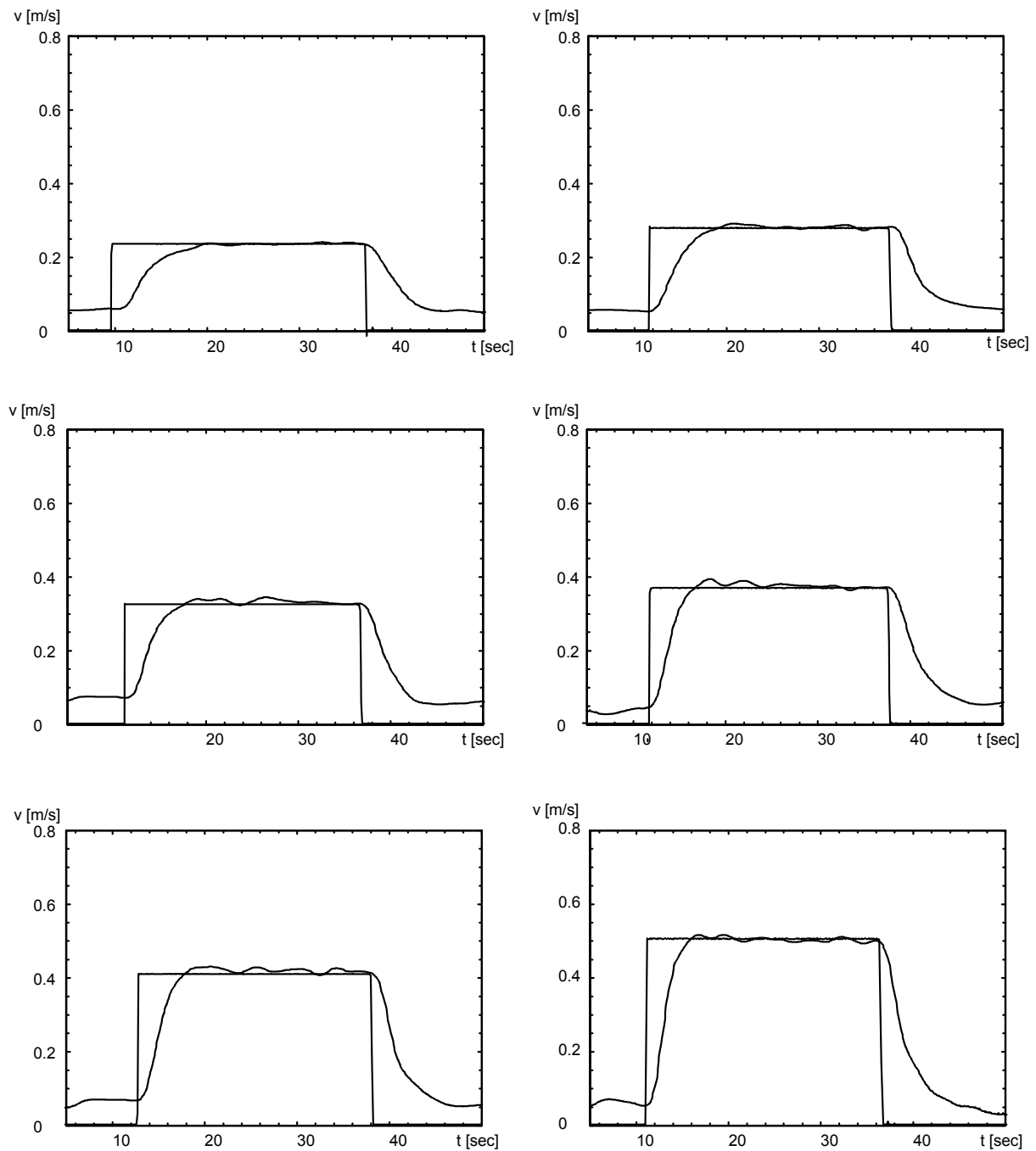


Abbildung 75: Sprungantwort bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten; Platte 2.3; Sonde 15mm

8.6 Winkelmessung und Nachweis für die 2D-Messung

Um zu zeigen, dass der Sensor zuverlässig in der Lage ist, die Richtung der Strömung zu bestimmen, wurde der Sensor mit einem Gestell befestigt, das es ermöglichte, den Sensor senkrecht zur Messebene zu drehen. Es wurden in 10-Grad-Schritten Messungen bei einer konstanten Anströmung von etwa 0.41 m/s durchgeführt. Abbildung 76 zeigt das Ergebnis einer Messung. Aufgetragen ist hier die gemessene Strömungsgeschwindigkeit über dem eingestellten Winkel. Der Winkelbereich ist hier von 0 bis 180 Grad aufgetragen. Es wurde mit der 15mm Kugelsonde gemessen. Als Federplatte wurde bei dieser Messung Platte 2.4 verwendet.

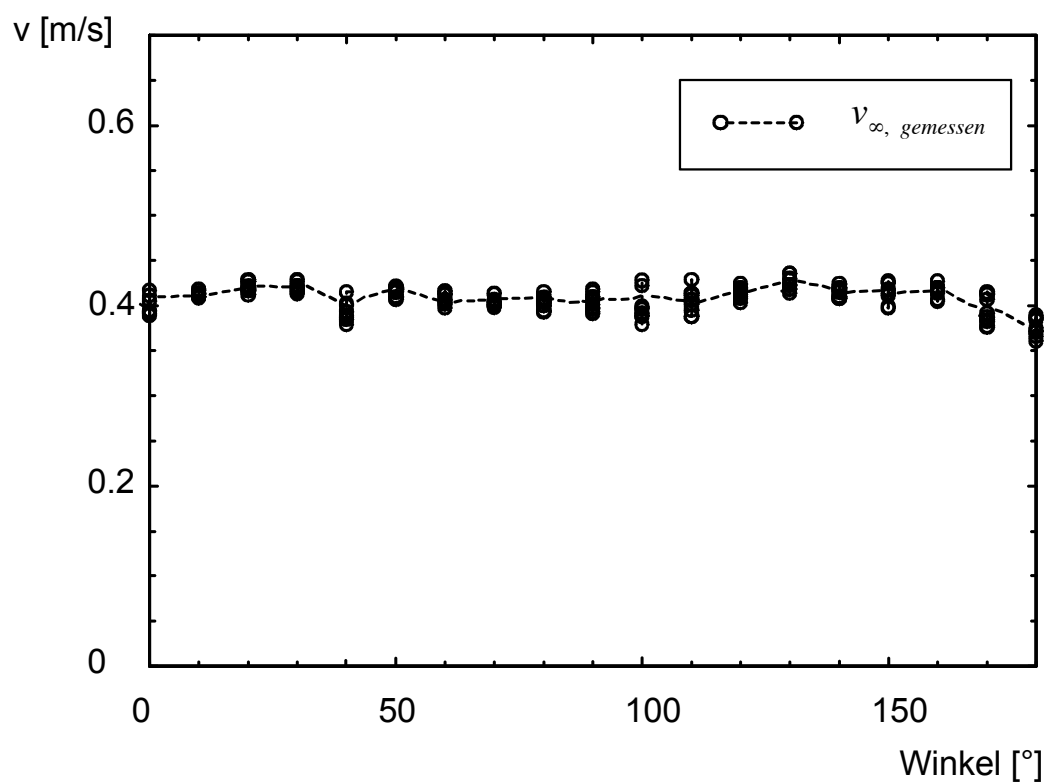


Abbildung 76: Winkelmessung bei etwa 0,41m/s Strömungsgeschwindigkeit; Platte 2.4; Plattendicke 0,1mm; Sonde 15mm

Es wurden 20 Messwerte für den jeweiligen Winkel aufgenommen. Das Messprogramm wurde hierfür entsprechend angepasst. Man erkennt ein gutes Messergebnis für den dargestellten Winkelbereich im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit.

Bei dieser Messung wird lediglich der Betrag des Kraftvektors berechnet und aufgezeichnet. Es fallen jedoch bei der Messung auch die Winkeldaten der Anströmung mit an, da

ja der Betrag aus der x- und y-Komponente berechnet wird.

8.7 Fehlerbetrachtung

Der zu erwartende, relative Fehler lässt sich wie folgt abschätzen.

$$f_{rel} = \frac{v_{Vergl} - v_{ist}}{v_{Vergl}}$$

In Abbildung 74 d) ergibt sich somit ein relativer Fehler von

$$f_{rel} = \frac{v_{Vergl} - v_{ist}}{v_{Vergl}} = \frac{0,37m/s - 0,36m/s}{0,37m/s} = 0,027 \approx 3\%$$

Der verwendete Sensoraufbau gestattet eine Strömungsgeschwindigkeit bis etwa $2,5m/s$ bei Wasser. Nimmt man diesen Wert als Endwert, würde sich ein Messfehler bezogen auf den Endwert von

$$f_{VE} = \frac{v_{End} - (v_{ist} - v_{mess})}{v_{End}} = \frac{2,5m/s - (0,37m/s - 0,36m/s)}{2,5m/s} = 0,996 \approx 0,4\%$$

ergeben.

Bei der Fehlerbetrachtung handelt es sich um ca.-Werte. Eine genaue Betrachtung ist nur bei einer Kalibrierung möglich. Das heißt, es ist ebenfalls ein kalibriertes weiteres Messgerät notwendig. Es lässt sich jedoch sagen, dass der Sensor in weiten Bereichen reproduzierbare Messwerte liefern wird.

9 Messungen im Windkanal

Um sowohl zu zeigen, dass der Sensor zuverlässig in unterschiedlichen Medien arbeitet, als auch zur weiteren Verifikation der Theorie, wurde der Sensor im Windkanal des Lehrstuhls für Strömungsmechanik im Fachbereich Maschinenbau von Herrn Prof. Dr.-Ing. Rogg an der Universität Bochum einigen Messungen unterzogen. Abbildung 77 zeigt den Windkanal schematisch.

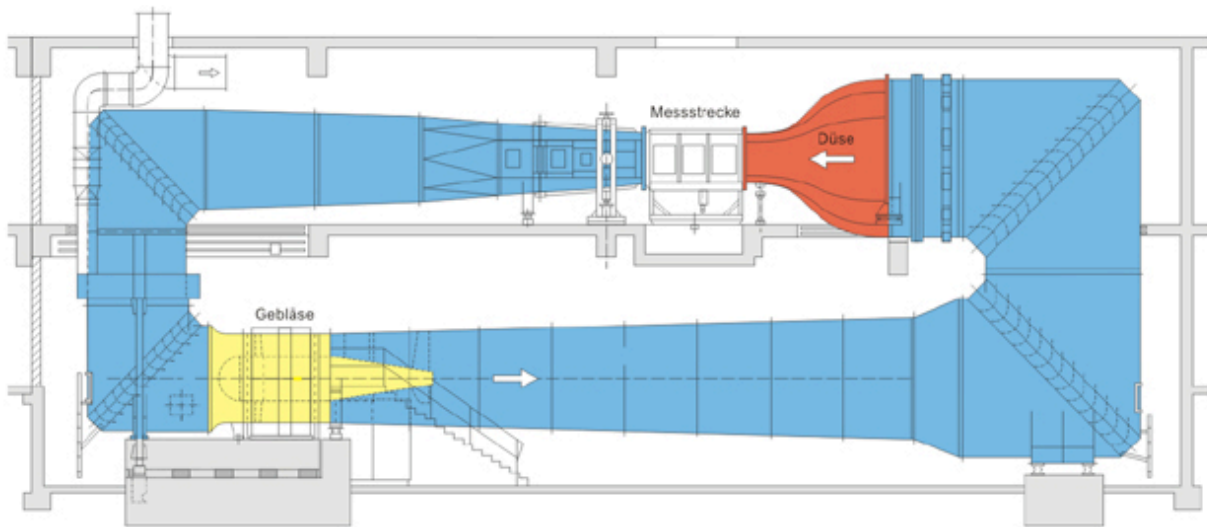


Abbildung 77: Windkanal Uni-Bochum

Einige Daten des Windkanals sind:

Strahlquerschnitt (Breite x Höhe)	(1,5 m x 1,2 m)
Länge der Messstrecke	2,5 m
Anlagenhöhe	9,5 m
Breite	4 m
Länge	27,3 m
Länge der Kanalachse	59 m
maximale Windgeschwindigkeit	65 m/s (234 km/h)
Antriebsleistung	150 kW

In Abbildung 78 ist der Blick in die Düse dargestellt. Mittig des Austritts ist der Sensor montiert. Weiter links ist ein Strömungssensor zum Vergleich montiert.

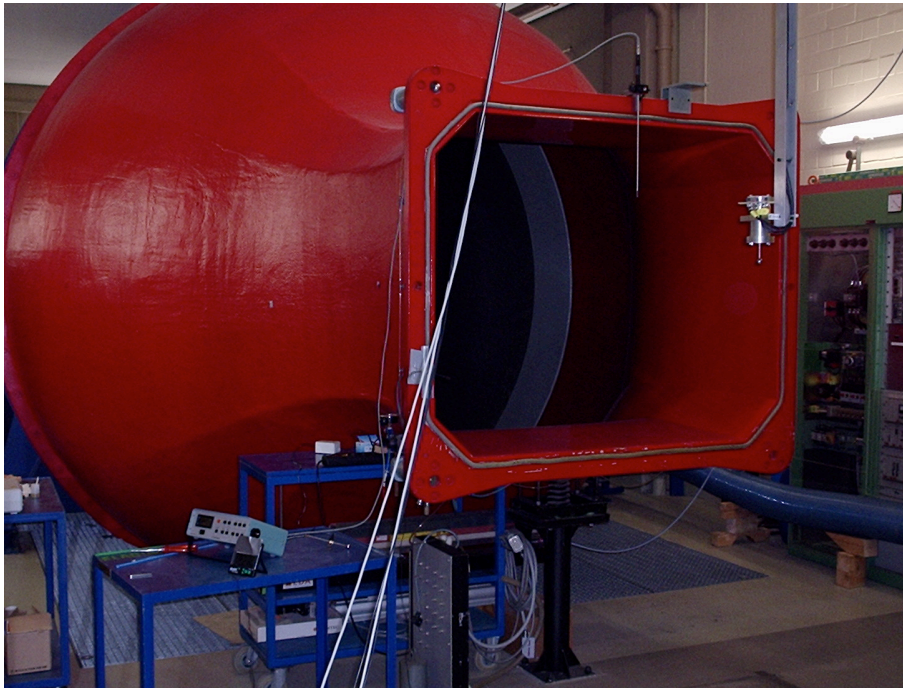


Abbildung 78: **Blick in die Düse des Windkanals**

9.1 Messergebnisse Windkanal

Das Diagramm in Abbildung 79 zeigt eine Messung bei etwa 4,5 m/s Strömungsgeschwindigkeit. Aufgetragen sind hier die gemessene Strömungsgeschwindigkeit und die Zeit in Sekunden. Verglichen wurde die Geschwindigkeit, indem die Messung gestartet wurde, nachdem die Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal den stationären, voreingestellten Wert erreichte. Im Messprotokoll wurden die Werte festgehalten. Am Ausschnitt im Diagramm 79 kann man sehr gut den ruhigen Verlauf der Messungen erkennen. Weiterhin zeigt der Sensor bei laminarer Anströmung ein vollständig ruhiges Verhalten.

Das Diagramm in Abbildung 80 stellt eine Messung dar, bei der der Windkanal zunächst ausgeschaltet ist. Der Windkanal war so eingestellt, dass er bei Einschalten der Antriebsmaschine die Luftströmung sofort auf ca. 8m/s beschleunigen sollte. Der Windkanal wurde, nachdem er auf 8 m/s Strömungsgeschwindigkeit beschleunigte, anschließend wieder nach einer Zeit von 35s ausgeschaltet. Man kann hier gut den Verlauf dieses Vorgangs anhand der Messwerte verfolgen. Der Sensor ist ebenso für dynamische Messungen geeignet.

In Abbildung 81 ist eine Messung dargestellt, bei der die Windkanalströmung auf 30m/s beschleunigt wurde. Anschließend wurde der Windkanalantrieb ausgeschaltet, und die

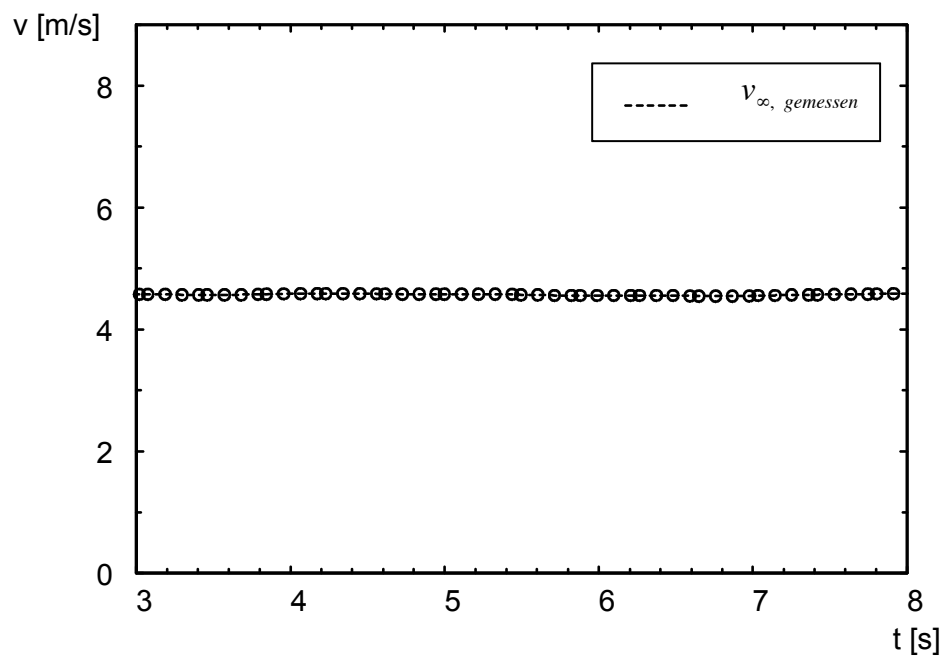


Abbildung 79: Messung bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $4,5\text{m/s}$; Platte 2.3; Plattendicke $0,1\text{mm}$; Sonde 15mm

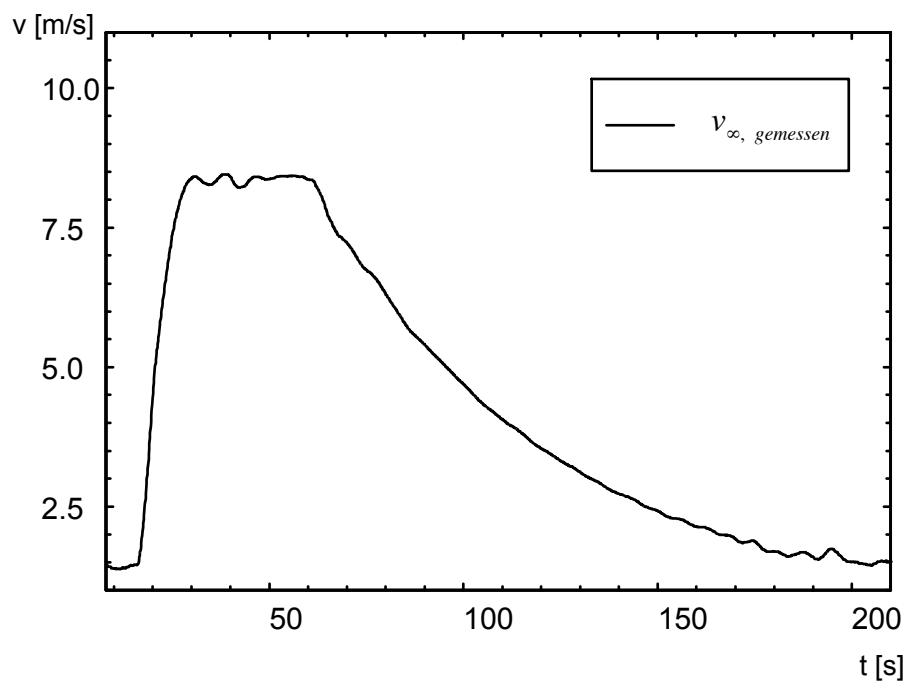


Abbildung 80: Dynamische Messung; Platte 2.3; Plattendicke $0,1\text{mm}$; Sonde 15mm

Anlage lief entsprechend dem Diagramm nach. Es ist zu erkennen, dass der Sensor selbst bei diesen hohen Strömungsgeschwindigkeiten noch zuverlässige Werte anzeigt.

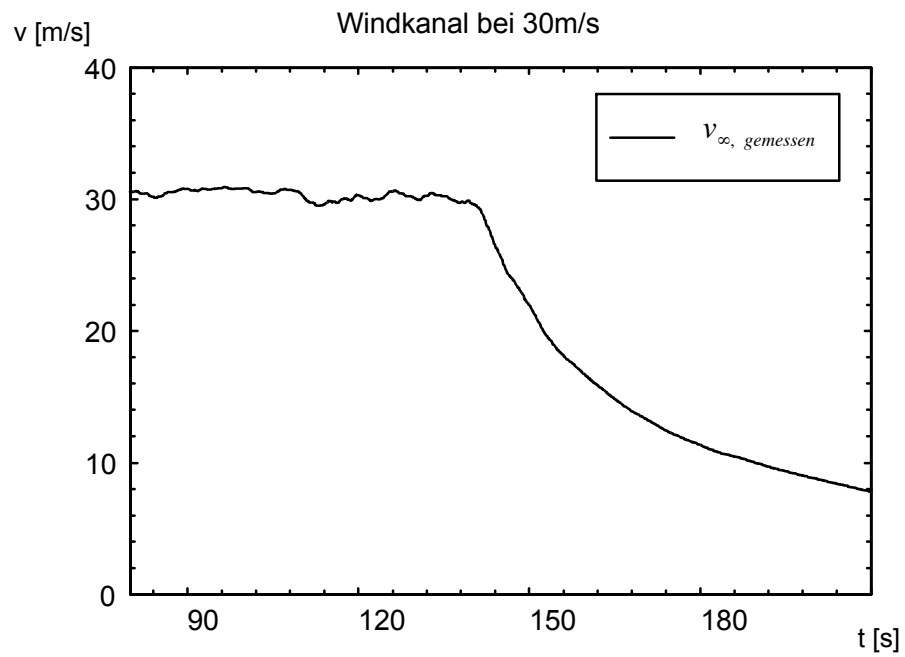


Abbildung 81: Messung bei 30m/s ; Platte 1.2; Plattendicke 0,2mm; Sonde 15mm

10 Ausblick

Nachdem die grundsätzliche Funktion des Sensors nachgewiesen wurde, sind verschiedene Weiterentwicklungen denkbar.

Die Logik des Sensors kann in einer Mikroprozessorschaltung umgesetzt werden. Der Rechenaufwand zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit ist für die Rechenleistung heutiger Mikroprozessoren kein Problem mehr. Auch können die Kantendetektorkarten noch deutlich kleiner ausgeführt werden. Bei Herstellung in einer Serie kann die gesamte Elektronik sicher inklusive Mikroprozessor in wenigen Chips realisiert werden.

Für die Serienherstellung muss die Befestigung der Platte überdacht werden. Eine feste Einspannung der Platte, wie sie das mechanische Modell vorsieht, muss besser umgesetzt werden. Eine Verspannung der Platte bei der Montage kann die Lagerungsverhältnisse verbessern und die Unsicherheit bei der Nullpunktstellung verbessern. Weiterhin lässt sich die Mechanik weiter verkleinern. Bei gleichen technischen Daten wäre eine kompaktere Ausführung wie in Abbildung 82 denkbar, die dieselben mechanischen Eigenschaften besitzt wie der Prototyp. Die Elektronik könnte im Sensor integriert werden.

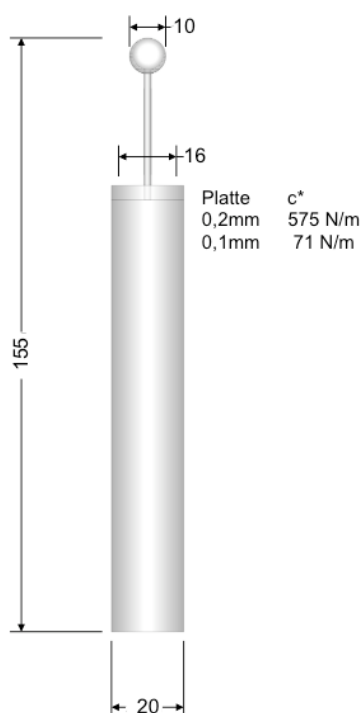


Abbildung 82: **Optimierter Sensor**

11 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein neuartiger Sensor für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit und der Strömungsrichtung in Newtonschen Fluiden vorgestellt. Der Sensor zeichnet sich durch seine einfache Bauweise und das einfache, direkte Messprinzip aus.

Es wurden zunächst die theoretischen Grundlagen der Plattenbiegung auf Momentbeanspruchung erarbeitet. Hierfür wurde die Plattentheorie angewendet und die Ergebnisse mit einem FEM-Modell verglichen. Die anschließende Messung zeigte, dass die theoretischen Ergebnisse auch in der Praxis erreichbar sind.

Anschließend wurden die physikalischen Zusammenhänge erläutert, die für diesen neuartigen Sensor notwendig sind. Für die Durchführung der Messungen wurde ein Strömungskanal für Wasserströmungen bis 1m/s Strömungsgeschwindigkeit entworfen und gebaut. Es wurde ein Prototyp dieses Sensors entwickelt und hergestellt.

Die Messungen zeigten die grundsätzliche Funktion des Sensors. Versuche im Windkanal bestätigten die Funktion mit dem Medium Luft.

Der Sensor hat die Eigenschaft, dass er eine völlige Symmetrie zu seiner Rotationsachse bietet. Dies ermöglicht eine Kraftmessung in zwei Dimensionen, und daraus ergibt sich, bei der Messung der Kraft, die Richtung als Information ohne zusätzlichen Aufwand. Die Feder zeigt ebenfalls ein beinahe symmetrisches Verhalten.

Es konnte gezeigt werden, dass das neue Messverfahren zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Die großen Vorteile der neuen Entwicklung sind zum einen der wartungsfreie, einfache Aufbau und zum anderen der vielseitige Einsatzbereich. Der Sensor kann in verschiedensten Medien eingesetzt werden und ist für unterschiedlichste Einsatzbereiche konfigurierbar. Weiterhin lässt sich die Strömungsrichtung ohne weiteren Aufwand bestimmen.

Persönliche Gespräche

KT Univ. Prof. Dr.-Ing. K. Thermann, mehrere persönliche Gespräche, 2006

SK Univ. Prof. Dr. rer. nat. S. Kessel, mehrere persönliche Gespräche, 2004

MU Univ. Prof. Dr.-Ing. M. Uhle, mehrere persönliche Gespräche, 2003 - 2006

Literatur

- [1] **Ackermann, L.** Simulation der Schalltransmission durch Wände
Braunschweiger Schriften zur Mechanik Nr. 43-2002
Dissertation Braunschweig 2002
- [2] **Ahrens, R. / Dittmann, D. / Rummler, Z. / Schlote-Holubek, K.**
Flow-Sensor form Polymer Fabricated with the AMANDA-Process
Int. Conf. on Micro-Electro-Systems and Components
München 2003, Seite 312-319
- [3] **Ammonit GmbH**
Messtechnik für Klimaforschung und Windenergieprognose
Produktkatalog
2005
- [4] **anonym**
Pt-Dünnschichttechnik erobert neue Applikationen
Sensor-Report
Vol. 18, Nr. 3, 2003, Seite 4-5
- [5] **anonym**
Ruhe am Rohr - Neuer Coriolis-Massemesser eliminiert Einbauprobleme
Pharma + Food International
Vol. 5, Nr. 6, 2002, Seite 36-37
- [6] **anonym**
Kühler Kopf und warme Füße
Krafthand
Vol. 74, Nr. 21, 2001, Seite 24-27

- [7] **Arnolds, F.**
Elektronische Meßtechnik
Verlag Berliner Union
1. Auflage
Stuttgart 1976
- [8] **Auge, J. / Dierks, K. / Prange, S. / Henning, B.**
Monitoring of droplet growth nano-litre resolution for liquid flow rate, level or surface tension measurement
Eurosensors, London 2002, Seite 1-4
- [9] **Babinsky, H. / Kuschel, U. / Hodson, H. P.**
Geometries for five-hole-type probes with planar sensor arrays
AIAA journal
Vol. 39, Nr. 12, 2001, Seite 2414-2416
- [10] **Barth, S.**
Laser-Cantilever-Anemometer: Hochauflösender Geschwindigkeitssensor für Gas und Flüssigkeitsströmungen
Sensor-Magazin
Heft 3, 2003, Seite 9-10
- [11] **Bauer, K. / Kroetz, G. / Schalk, J. / Mueller, G.**
Aerospace applications of mass market MEMS products
Proc. of the SPIE - The int. soc. for optical engineering
Band 4698, 2002, Seite 497-508
- [12] **Behrends, A.**
The micro-flow-sensor for small volumetric flow rates
Sensor 2003, 11th Int. Conf.
Seite 199-202
- [13] **Beitz, W. / Küttner, K.-H.**
Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau
17. Auflage
Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York 1990
- [14] **Bodenstein, F. / Tochtermann, W.**
Konstruktionselemente des Maschinenbaus

Teil 2
9. Auflage
Springer-Verlag
Berlin 1979

- [15] **Borchardt, H. / Rössler, J.**
Erfahrungen und Überlegungen mit LIDAR am Meteorologischen Observatorium Aachen
Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 125
Offenbach 1971
- [16] **Braun, M.**
Stationäres und instationäres Verhalten verschiedener Typen von Strömungsmesssonden in instationärer Strömung
DFG-Bericht 375/13-1
Abschlussbericht 2003
- [17] **Breuckmann, B.**
Bildverarbeitung und optische Messtechnik in der industriellen Praxis
Franzsis-Verlag
München 1993
- [18] **Coombs, S.**
Smart skins; Information Processing by Lateral Line Flow Sensors
Autonomous robots
Vol. 11, Nr. 3, 2001, Seite 255-261
- [19] **Crescini, D. / Marioli, D. / Taroni, A.**
Thick-film flow sensors for liquid application an approach based on thermal time-of-flight principle
Sensor 2001, 10th. Conf.
Band 2, 2001, Seite 245-250
- [20] **Deiss, O. / Lackmann, F.**
Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluss der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen
Diplomarbeit, Fachhochschule Düsseldorf 2001
- [21] **Dutschke, W.**
Fertigungsmeßtechnik

Teubner Verlag
Stuttgart 1990

- [22] **Eck, B.**
Technische Strömungslehre, Band 1
9. Auflage
Springer-Verlag
Berlin Heidelberg 1988
- [23] **Federspiel, C.**
Using the Torque Characteristics of Dampers to Measure Airflow, Part II: Analysis and Testing
HVAC&R Research
Vol. 10, Nr. 1, 2004, Seite 65-72
- [24] **Fischer, K.**
Ultrasonic Anemometer 2D
Produktdatenblatt Nr. 451301
2005
- [25] **Föppl, A. / Föppl, L.**
Drang und Zwang, Eine höhere Festigkeitslehre für Ingenieure
Band 1, 3. Auflage
Johnson Reprint Corporation
New York, London 1969 (Original von 1941)
- [26] **Frühauf, C.**
Verdunstungsbestimmungen von Wäldern am Beispiel eines Fichtenbestandes im Tharandter Wald
Tharandter Klimaprotokolle
Technische Universität Dresden 1998
- [27] **Furuberg, L. / Wang, D. / Vogl, A.**
New Pressure sensor, optical mirrors and a flow rate sensor manufactured by Bulk Micromachining
Sensor 2003, 11th Int. Conf.
Seite 85-90
- [28] **Geissler, T.**
Mobile Dosierstation setzt auf moderne Coriolis-Durchflussmesser

Wägen, dosieren und mischen
Vol. 0, Nr. 4, 2003, Seite 26

[29] **Hansen, M.**

A walk through the necessary skills and technologies do develop electronic flow meters
The Baltic Sea Workshop
Proc. of the 2. European Workshop on Education in Mechatronics
2002, Seite 233-239

[30] **Hauptmann, R.**

Strukturangepaßte geometrisch nichtlineare Finite Elemente für Flächentragwerke
Dissertation, Bericht-Nr. M97/3 aus dem Institut für Mechanik
Universität Karlsruhe 1997

[31] **Heinemann, Elmar**

Ein Beitrag zur berührungslosen Erfassung und Überwachung der kinematischen
Größen eines bewegten Objektes
Dissertation Bochum 1985

[32] **Hering, E. / Martin, R. / Stohrer, M.**

Physik für Ingenieure
5. Auflage
VDI-Verlag
Düsseldorf 1995

[33] **Hiejima, T. / Azuma, H. / Sawasaki, M. / Hashima, H.**

Numerical analysis and measurement of glass flow in a small melting furnace
Glass science and technology
Vol. 76, Nr. 4, 2003, Seite 155-165

[34] **Hilscher, G.**

Druckluftverbrauch eines ganzen Werkes unter Kontrolle
Drucklufttechnik
Heft 7-8, 2003, Seite 55-58

[35] **Hirata, K.**

Stainless Steel-Based Integrated Mass-Flow Controller for Reactive and Corrosive
Gases
11th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators
München 2001, Seite 962-965

- [36] **Horn, M. / Umar, L.**
Sensorsystem zur Messung der Luftgeschwindigkeit mit automatischer Selbstüberwachung und Selbstkalibrierung
ITG/GMA-Fachtagung Ludwigsburg 2002
VDE-Verlag, 2002
- [37] **Hubel, T. / Tropea, C.**
Untersuchung zur instationären Aerodynamik an einem flügel-schlagenden Modell
Technische Biologie und Bionik 6, 2003
Band 16, 2002, Seite 184-187
- [38] **Iguschi, M. / Hanazaki, K. / Terauchi, Y.**
Development of Non-contact Electromagnetic Sensor for the Meniscus Velocity Measurement of Molten Metal Flow
Tetsu-to-hagane, Nihon-Tekko-Kyokai, Tokio
Vol. 88, Nr. 10, 2002, Seite 629-634
- [39] **Irisawa, G. / Sato, Y. / Ishizuka, M. / Hishida, K. / Maeda, M.**
Visualization of convective mixing in microchannel by fluorescence imaging
DLR-Mitteilungen 2001
Seite 1-8
- [40] **Juckenack, D.**
Handbuch der Sensortechnik: Messen mechanischer Größen
Verlag Moderne Industrie
Landsberg/Lech 1989
- [41] **Kauder, K.**
Fluidenergiemaschinen I, Strömungsmaschinen
Skript zur Vorlesung
Universität Dortmund 1994
- [42] **Kearney, S.**
A combined PLIF/PIV system for simultaneous gas-phase temperature / velocity imaging
ASME/FED 2002
Band 258, 2002, Seite 17-22
- [43] **Kessel, S. / Fröhling, D.**
Technische Mechanik

1. Auflage
Teubner Verlag
Stuttgart, Leipzig 1998
- [44] **Kim, S.**
A circular-type thermal flow direction sensor free from temperature compensation
Sensors and actuators
Vol. 108, Nr. 1-3, 2003, Seite 64-68
- [45] **Knothe, K. / Wessels, H.**
Finite Elemente
2. Auflage
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1999
- [46] **Koenemann, D.**
Fünf Messmethoden
Sonne, Wind & Wärme, Heft 3, 2005
Seite 88 - 92
- [47] **Köpp, F.**
Ein monostatisches Sodar-System zur indirekten Sondierung der bodennahen Luftschicht
Forschungsbericht aus der Wehrtechnik
Oberpfaffenhofen 1977
- [48] **Lavante, von, E. / Nath, B. / Färber, J.**
Effects of manufacturing tolerances on the accuracy of vortex-shedding flow meters
Metrology in the 3rd millennium
2003, Seite 1373-1377
- [49] **Lotters, J.**
New Generation of liquid flow sensors for the nanolitre through milliliter per minute range with extremely small internal volume
Sensor 2003, 11th Int. Conf.
Seite 21-25
- [50] **Lutum, E.**
Experimentelle Filmkühlungsuntersuchungen zylindrischer und konturierter Bohrungsgeometrien an gekrümmten Oberflächen
Dissertation, Universität Stuttgart 2001

- [51] **Magnor, O.**
Ein flugtaugliches CW-Ultraschall-Anemometersystem zur Messung von Temperatur und Strömungsvektor
AHMT, 14. Messtechnisches Symposium
2000, Seite 49-57
- [52] **Makinwa, K. / Huijsing, J.H.**
A Smart Wind Sensor using Time-Multiplexed Thermal $\Sigma\Delta$ Modulators
Proc. of ESSCIRC 2001
Villach, Austria 2001
- [53] **March, J.-F.**
Messabweichung von Wärmehzahlen für Energieertragsmessungen in solarthermischen Anlagen
13. Symposium Thermische Solarenergie
2003, Seite 301-306
- [54] **Marguerre, K. / Woernle, H.-T.**
Elastic Plates
Blaisdell Publishing Company
Waltham, Massachusetts, Toronto, London, 1969
- [55] **Marxer, M.**
Universell einsetzbarer Strömungssensor
Sensor-Magazin
Heft 1, 2003, Seite 11-12
- [56] **Nguyen, N. / Huang, X. / Toh, K.**
Thermal flow sensor for ultra-low velocities based on printed circuit board technology
Measurement Science and Technology
Nr. 12, 2001, Seite 2131-2136
- [57] **Obermeier, E. / Papen, T.**
A MEMS surface fence sensor for wall shear stress measurement in turbulent flow areas
Transducers 2001 eurosensors XV
Seite 1476-1479
- [58] **Panicke, M.**
Schallübertragung eines Ultraschall-Clamp-on-Durchflußmessers

ITG/GMA-Fachtagung Ludwigsburg 2002
VDE-Verlag, 2002

[59] **Pfeifer, T.**

Optoelektronische Verfahren zur Messung geometrischer Größen in der Fertigung
Grundlagen, Verfahren, Anwendungsbeispiele
Kontakt & Studium Band 405
Expert Verlag
Ehningen 1993

[60] **Prato, J. Lakshminarayana, B.**

Development and assessment of hot-film sensor technique for the Multistage Turbo-
machinery Environment
Int. journal of rotating machinery
Vol. 8, Nr. 5, 2002, Seite 361-374

[61] **Reinmöller, U.**

3D-Hitzdrahtmessungen zur Strömungsanalyse in einem mehrstufigen
Niederdruckturbinen-Rig
Abschlussbericht Turbo Tech-Vorhaben 1.424
RWTH Aachen 2000

[62] **Rieg, F.**

Finite-Elemente-Analyse für Ingenieure
1. Auflage
Hanser Verlag
München 2000

[63] **Sabate, N.**

A flow sensor for home appliances
Sensor 2003, 11th Int. Conf.
Seite 27-31

[64] **Schlichthärle, D.**

Digital Filters, Basics and Design
Springer-Verlag
Berlin Heidelberg 2000

[65] **Schlichting, H.**

Grenzschicht-Theorie

9. Auflage
Springer-Verlag
Berlin Heidelberg 1997
- [66] **Schmid, U.**
A Thermal Flow Sensor For Common Rail Injection Systems
11th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators
München 2001, Seite 1452-1455
- [67] **Schmid, U.**
Determination of Fuel Quantities with a Micromachined Injection Rate Sensor
Advanced Microsystems for Automotive Applications 2003
Springer-Verlag 2003
- [68] **Schulte-Werning, B.**
Numerische Simulation und topologische Analyse der abgelösten Strömung an einer Kugel
Forschungsbericht DLR-FB 90-43
Köln 1990
- [69] **Schwarz, H.R.**
Methode der finiten Elemente
3. Auflage
Teubner Verlag
Stuttgart 1991
- [70] **Scoones, D. J.**
Measurement of steel velocities in the mould
Revue de meallurgia
Band 100, Heft 6, Paris 2003, Seite 633-635
- [71] **Siepmann, S.**
Zum Wärme- und Stofftransport in Quenchapparaturen
Dissertation TU Cottbus 2001
- [72] **Steihilper, W. / Röper, R.**
Maschinen- und Konstruktionselemente
Band 2
Springer-Verlag
Berlin 1986

- [73] **testo AG**
Klimamessung für Praktiker
2003
- [74] **testo AG**
Industrie-Messtechnik 2005
Produktkatalog
2005
- [75] **Totten, G. E. / Webster, G. M. / Tensi, H. M.**
Fluid flow sensors for industrial quench baths: literature review
Heat treatment of metals
Birmingham , Vol. 29, Nr. 1, 2002, S. 6
- [76] **Warkentin, D. / Ashauer, M. / Briegel, R. / Eberhardt, W. / Kück, H.**
Miniature flow sensor systems and accelerometers based on MID
Molded interconnect devices
Bamberg, Meisenbach 2002
Seite 51-57
- [77] **Werner, C. / Streicher, J.**
Aerosol-Lidar für Umweltschutz und Meteorologie
DFVLR-FB 87-43
Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrttechnik Oberpfaffenhofen 1987
- [78] **Werner, C. / Schwiesow, R. / Benesch, W.**
Mission profiles for the proposed Doppler lidar WIND
DLR-FB 93-36
Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrttechnik Oberpfaffenhofen 1993
- [79] **Wetzel, W.**
Übertragbarkeit aerodynamischer Beiwerte von Windkanalversuchen im Modellmaßstab auf reale Fahrzeuggeometrien
Dissertation Universität Karlsruhe 2001
- [80] **Wiesemann, W.**
Abstand / Position berührungslos messen auch unter sehr rauen Bedingungen
Sensor Magazin, Heft 2, 1996
Seite 5-8

- [81] **Wikipedia**
Artikel Beaufortskala. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie
Bearbeitungsstand: 10. Juni 2006, 20:13 UTC.
(Abgerufen: 29. Juni 2006, 13:30 UTC)
- [82] **Willinger, R.**
Sekundär- und Spaltströmungen im axialen Turbinengitter unter Teil-, Nenn- und Überlastbedingungen
VDI-Bericht Nr. 433
VDI-Verlag, 2002
- [83] **Yamashita, A.**
An air flow sensor of high durability and high reliability for automobile application
Sensor 2003, 11th Int. Conf.
Seite 15-20
- [84] **Yan, Y.**
Guide to the flow measurement of particulate solid
Power handling & processing
Vol. 13, Nr. 4, 2001, Seite 343-352
- [85] **Zeuner, G. / Adiga, B.**
On the Operating Experience of the Doppler Sodar System at the Forschungszentrum Juelich
Forschungszentrum Jülich
Jülich 1990
- [86] **Zienkiewics, O.**
Methode der finiten Elemente
2. Auflage
Hanser Verlag
München 1984

Lebenslauf

Zu meiner Person:

Name	Oliver Martens
Anschrift	Am Wetterschacht 25 45770 Marl
Geburtsdatum	19. Februar 1968
Geburtsort	Düsseldorf
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	verheiratet, zwei Kinder

Schule, Wehrdienst, Studium:

08/1978 - 05/1987	Geschwister-Scholl-Gymnasium Marl Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
10/1987 - 12/1988	Wehrdienst
10/1989 - 11/1999	Studium des Maschinenbaus an der Universität Dortmund Abschluss: Diplom-Ingenieur

Tätigkeiten während des Studiums:

02/1989 - 03/1989	Betriebselektrikerhelfer Fa. Thal, Dortmund
05/1989 - 08/1989	Grundpraktikum Hüls AG, Marl
03/1990 - 03/1990	Betriebselektrikerhelfer Fa. Thal, Dortmund
09/1990 - 09/1990	Aushilfe Produktion Ruhrglas AG, Essen
05/1991 - 05/1995	Studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Maschinenelemente im Fachbereich Maschinenbau der Universität Dortmund
06/1995 - 09/1996	Aushilfe im Bereich Technik und Verkauf in der Filiale Recklinghausen der Escom Computer AG
04/1997 - 06/1997	Aushilfe im Bereich Technik und Verkauf in der Filiale Dortmund der Escom 2001 Computer GmbH

Beruflicher Werdegang:

01/2000 - 09/2001	Wissenschaftliche Hilfskraft am Fachgebiet Messtechnik im Fachbereich Maschinenbau der Universität Dortmund
10/2001 – 09/2006	Wissenschaftlicher Angestellter am Fachgebiet Messtechnik im Fachbereich Maschinenbau der Universität Dortmund