



Diplomarbeit

# Untersuchungen zur Erweiterung des Betriebsbereichs von pneumatischen Dreilochsonden

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter  
der Leitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Reinhard Willinger

E302

Institut für Energietechnik und Thermodynamik  
Forschungsbereich Strömungsmaschinen

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

Dževad Smajić

0327448

Mohsgasse 35/17

1030 Wien

Wien, Juli 2011

---

*”I napravi sada korak  
u nebeska prostranstva,  
ali ne zatvaraj za sobom vrata  
onima koji te vole.*

*I odagni čežnje nečije  
jer znaš da vrtovi rajski dostižni jesu,  
ali spasi i lađe koje tonu,  
a životom jos zaplovile nisu.”*

## Vorwort

*Zuerst danke ich Gott,  
der mir während des Studiums und des Schreibens dieser Diplomarbeit, welche mir ein neues  
Kapitel in meinem Leben eröffnet, immer wieder Kraft geschenkt hat.*

*An dieser Stelle bedanke ich mich besonders bei meinem Betreuer  
**Herrn Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Reinhard Willinger,**  
der mir jederzeit zur Verfügung gestanden ist, und im Hinblick auf die Literatur, Betreuung  
und Ratschläge meine Diplomarbeit schnell zum Ende zu bringen, sehr viel geholfen hat.*

*Des Weiteren bedanke ich mich insbesondere  
**bei meiner lieben Belma,**  
die viel Verständnis und Geduld trotz der großen Entfernung zwischen einander hatte, und  
während der ganzen Zeit, die ich in meine Ausbildung und in das Schreiben meiner Arbeit  
investierte habe, unterstützt hat.*

*Ich möchte mich auch  
**bei meinen Eltern Kasim und Dula**  
ganz besonders bedanken, die mein Studium erst ermöglicht haben, nie an mir gezweifelt haben  
und sich über jeden meiner Erfolge gefreut haben.*

*Und einen recht herzlichen Dank möchte ich  
**meiner Schwester Azra, meinem Schwager Mustafa und meinem Bruder Nedžad**  
widmen, die mich in jedem Aspekt sowohl moralisch als auch finanziell unterstützt haben, und  
mich immer vorangetrieben und motiviert haben, mein Ziel zu erreichen.*

## Kurzfassung

Diese Diplomarbeit behandelt die drei am Institut für Energietechnik und Thermodynamik der TU Wien vorhandenen pneumatischen Dreilochsonden, die zur Messung in 2D-Strömungen eingesetzt werden.

Ihr Einsatz bei der Messung der Geschwindigkeitsrichtung und des Geschwindigkeitsbetrags sowie bei dem Totaldruck und statischem Druck, ist von großem Interesse in Turbomaschinen. Da dort infolge von Wandeinflüssen und Geschwindigkeitgradienten systematische Messfehler entstehen, ist die Tendenz zur Erweiterung des Betriebsbereichs von pneumatischen Dreilochsonden nachvollziehbar.

Aus diesem Grund wurden die vorerwähnten Sonden bei größeren Anströmwinkeln untersucht. Die experimentelle Kalibrierung wurde im Freistrahldwindkanal bei dem Anströmwinkel von  $\Delta\beta=\pm 60^\circ$  durchgeführt.

Da traditionelle Kalibrierung nach Treaster und Yocum außerhalb des Bereichs von  $\Delta\beta\approx\pm 30^\circ$  (abhängig von der Art der Sonde) bei den Kalibrierkoeffizienten eine unstetige Funktion mit Unendlichkeitsstellen liefert, was sie unbrauchbar macht, wurden die zonenbasierte Methoden eingeführt, um den Betriebsbereich der Sonden zu erweitern.

Mit Hilfe der zonenbasierten Methode erzielte Ergebnisse wurden mit den traditionellen Messdaten verglichen und durch die graphische Darstellung interpretiert.

Es wurde auch eine einfache theoretische Methode (Stromlinienprojektion) zur Schätzung der experimentellen Ergebnisse angewendet. Die experimentellen Ergebnisse der Zylinder-Sonde wurden zusätzlich mit der Methode der Potentialströmung verglichen.

Die Untersuchung, die auf pneumatischen Sonden durchgeführt wurde, sollte eine Richtlinie zur Auswahl der entsprechenden Sonde bei dem Einsatz in Turbomaschinen geben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Allgemeines . . . . .	1
1.2. Aufgabenstellung . . . . .	1
<b>2. Pneumatische Strömungssonden</b>	<b>3</b>
2.1. Vor- und Nachteile der pneumatischen Strömungssonden . . . . .	4
2.2. Übersicht über die Kalibriermethoden . . . . .	4
2.3. Übersicht über die Messverfahren . . . . .	5
2.3.1. Abgleichverfahren . . . . .	5
2.3.2. Ausschlagverfahren . . . . .	6
<b>3. Pneumatische Dreilochsonden</b>	<b>7</b>
3.1. Geometrie von Dreilochsonden . . . . .	7
3.2. SVUSS/3 Kobra-Sonde . . . . .	9
3.3. AVA Trapez-Sonde Nummer 110 . . . . .	10
3.4. AVA Zylinder-Sonde Nummer 43 . . . . .	11
<b>4. Kalibrierung</b>	<b>12</b>
4.1. Experimentelle Kalibrierung . . . . .	12
4.2. Strömungsgrößen und dimensionslose Kennzahlen . . . . .	13
4.2.1. Spezifische Gaskonstante . . . . .	13
4.2.2. Dichte von Luft . . . . .	14
4.2.3. Kinematische Viskosität . . . . .	14
4.2.4. Sondenreynoldszahl . . . . .	14
4.2.5. Mach-Zahl . . . . .	15
4.3. Definition der Kalibrierkoeffizienten nach Treaster und Yocum . . . . .	15
4.4. Methode der Stromlinienprojektion . . . . .	17
4.4.1. Sonden mit der trapezförmigen Kopfgeometrie . . . . .	18
4.4.2. Sonden mit der zylinderförmigen Kopfgeometrie . . . . .	20
4.4.3. Richtungskoeffizient bei den kleineren Anströmwinkeln . . . . .	21
4.5. Methode der Potentialströmung . . . . .	22
<b>5. Erweiterung des Betriebsbereichs von Dreilochsonden</b>	<b>24</b>
5.1. Definition der Kalibrierkoeffizienten . . . . .	24

5.2. Methode zur Erweiterung des Betriebsbereichs . . . . .	25
<b>6. Testanlage</b>	<b>27</b>
6.1. Beschreibung des Windkanals . . . . .	27
6.2. Messdatenerfassung . . . . .	28
<b>7. Messdatenauswertung durch die traditionelle Methode nach Treaster und Yocum</b>	<b>32</b>
7.1. Experimentelle und theoretische Koeffizienten . . . . .	32
7.1.1. SVUSS/3 Kobra-Sonde . . . . .	33
7.1.2. AVA Trapez-Sonde Nr.110 . . . . .	37
7.1.3. AVA Zylinder-Sonde Nr.43 . . . . .	41
7.2. Vergleich der traditionellen Koeffizienten . . . . .	45
<b>8. Messdatenauswertung durch die Methoden zur Erweiterung des Betriebsbereichs</b>	<b>49</b>
8.1. Experimentelle Koeffizienten . . . . .	49
8.1.1. SVUSS/3 Kobra-Sonde . . . . .	49
8.1.2. AVA Trapez-Sonde Nr.110 . . . . .	51
8.1.3. AVA Zylinder-Sonde Nr.43 . . . . .	53
8.2. Vergleich der erweiterten Koeffizienten . . . . .	55
<b>9. Zusammenfassung</b>	<b>58</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>59</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>60</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>ii</b>

# Nomenklatur

## Variablen mit lateinischer Notation

$a$	Abstand zwischen den zwei seitlichen Sondenbohrungen	[m]
$C_\beta$	Richtungskoeffizient nach [2]	[-]
$C_s$	statischer Druckkoeffizient nach [2]	[-]
$C_t$	Totaldruckkoeffizient nach [2]	[-]
$d$	charakteristische Abmessung des Sondenkopfes	[m]
$d_a$	Austrittsdurchmesser der Düse	[m]
$\bar{k}$	mittlerer Bohrungskoeffizient	[-]
$k_\beta$	Richtungskoeffizient [8]	[-]
$k_i$	Bohrungskoeffizient der Bohrung $i$	[-]
$k_s$	statischer Druckkoeffizient [8]	[-]
$k_t$	Totaldruckkoeffizient nach [8]	[-]
$Ma$	Mach-Zahl	[-]
$n$	Drehzahl	[ $min^{-1}$ ]
$p$	statischer Druck	[Pa]
$\bar{p}$	mittlerer Druck	[Pa]
$\bar{p}_A$	mittlerer Druck in der Zone A	[Pa]
$\bar{p}_B$	mittlerer Druck in der Zone B	[Pa]
$\bar{p}_C$	mittlerer Druck in der Zone C	[Pa]
$p_i$	Druck der Bohrung $i$	[Pa]
$p_t$	Totaldruck	[Pa]
$p_u$	Umgebungsdruck	[Pa]
$\Delta p$	Druckdifferenz	[Pa]
$R$	universelle Gaskonstante	[ $\frac{J}{molK}$ ]
$Re_d$	Sondenreynoldszahl	[-]
$R_s$	spezifische Gaskonstante	[ $\frac{J}{kgK}$ ]
$t$	Temperatur im Windkanal	[°C]
$U$	elektrische Spannung	[V]
$v$	spezifisches Volumen	[ $\frac{m^3}{kg}$ ]
$w$	Zuströmgeschwindigkeit	[ $\frac{m}{s}$ ]
$w_i$	Projektion der Zuströmgeschwindigkeit auf die Bohrung $i$	[ $\frac{m}{s}$ ]
$w_0$	Schallgeschwindigkeit	[ $\frac{m}{s}$ ]
$x$	Abstand der Sonde stromab der Düse	[m]

## Variablen mit griechischer Notation

$\Delta\alpha$	Nickwinkel	[ $^{\circ}$ ]
$\Delta\beta$	Gierwinkel (Anströmwinkel)	[ $^{\circ}$ ]
$\Delta\beta_{AB}$	Grenzwinkel zwischen der Zone A und der Zone B	[ $^{\circ}$ ]
$\Delta\beta_{CA}$	Grenzwinkel zwischen der Zone C und der Zone A	[ $^{\circ}$ ]
$\delta$	charakteristischer Flankenwinkel des Sondenkopfes	[ $^{\circ}$ ]
$\varphi$	Winkelcoordinate bei der zylinderförmigen Sonde	[ $^{\circ}$ ]
$\mu$	dynamische Viskosität	[ $\frac{kg}{m \cdot s}$ ]
$\nu$	kinematische Viskosität	[ $\frac{m^2}{s}$ ]
$\rho$	Dichte	[ $\frac{kg}{m^3}$ ]

## Vektoren

$\vec{w}$	Geschwindigkeitsvektor
-----------	------------------------

## Indizes

$i = 1, 2, 3$	zentrale, linke bzw. rechte Bohrung der Sonde
$x, y$	x- bzw. y-Komponente des Vektors

## Abkürzungen

2D	zweidimensional
DC	direct current

# 1. Einleitung

## 1.1. Allgemeines

Um eine stationäre Strömung detailliert zu beschreiben, muss man die Geschwindigkeitsrichtung und den Geschwindigkeitsbetrag der Strömung sowie den Druck für jeden Ort des zu beschreibenden Feldes kennen. Die Erfassung dieser Größen erfolgt durch pneumatische Dreilochsonden für ebene bzw. Vier-, Fünf- und Siebenlochsonden für räumliche Strömung.

Bevor die Sonden zur Messung eingesetzt werden können, ist eine Geschwindigkeits- und Richtungskalibrierung notwendig. Die Kalibrierung erfolgt in einem Windkanal bei einer Reihe von definierten Winkeleinstellungen. Dabei wird die Sonde einem schwachturbulenten Freistrahls mit bekannter Geschwindigkeit ausgesetzt und die Bohrungsdrücke erfasst. Anschließend werden aus diesen Drücken dimensionslose Koeffizienten, die sogenannten Kalibrierkoeffizienten, die im Kapitel 4 beschrieben sind, berechnet.

Wie es oben erwähnt wurde, werden die Dreilochsonden zur Messung in der 2D-Strömung eingesetzt. Bisher wurden sie nur bei dem Anströmwinkel von ungefähr  $\pm 30^\circ$  benutzt, was nachteilig wirkte. Um in der Zukunft den Betriebsbereich der Sonden zu erweitern, nahmen die Untersuchungen auf diesem Gebiet immer mehr zu.

So sind z.B. in der Literatur [2] und [1] Vorschläge und Methoden zur Erweiterung des Betriebsbereiches von pneumatischen Dreilochsonden zu finden.

Im Kapitel 5 wurden diese Methoden ausführlich beschrieben und durch sie erzielte Ergebnisse mit den Ergebnissen von traditioneller Kalibrierung im Kapitel 8 verglichen.

## 1.2. Aufgabenstellung

Zur Messung von Strömungsgrößen wie die Geschwindigkeit (indirekt über eine Druckmessung), der Totaldruck, Strömungswinkel, Mach-Zahl usw. wurden die pneumatischen Dreilochsonden bisher nur bei kleineren Anströmwinkeln ca.  $\pm 30^\circ$  verwendet. Da diese Sonden eine sehr große Bedeutung im Bereich der Turbomaschinen haben, wurden sie in der letzten Zeit immer mehr bei den größeren Anströmwinkeln untersucht.

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist das Verhalten der drei am Institut vorhandenen pneumatischen Dreilochsonden (SVUSS/3 Kobra-Sonde, AVA Trapez-Sonde Nummer 110 und AVA Zylinder-Sonde Nummer 43, siehe Kapitel 3) bei den größeren Anströmwinkeln durch den experimentellen Versuch im Labor zu untersuchen.

Darunter versteht man die Kalibrierung der oben erwähnten Sonden im Freistrahwindkanal.

Letztendlich sind die im Labor erfassten Messdaten durch die im Kapitel 5 angeführten Methoden zur Erweiterung des Betriebsbereichs von Dreilochsonden zu bearbeiten und danach graphisch darzustellen und analysieren.

## 2. Pneumatische Strömungs sonden

Die pneumatischen Sonden werden zur Ermittlung von Strömungsgrößen, wie die Geschwindigkeit und der Druck in komplexen Strömungsgebieten, die in der Praxis häufig vorkommen, verwendet. Große Bedeutung, die die Sonden im Bereich der Turbomaschinen haben, besteht in ihrem zuverlässigen und flexiblen Einsatz.

Die pneumatischen Sonden unterscheidet man bezüglich der Anzahl der Sondenkopfbohrungen zwischen den Dreilochsonden für die Messung zweidimensionaler Strömungen oder Vier-, Fünf- bzw. Siebenlochsonden für dreidimensionale Strömungen. Es gibt kugelförmige, kegelförmige, zylinderförmige Köpfe usw.

In der Abb.2.1 ist eine Skizze mit einer Drei- und einer Fünflochsonde gezeigt.

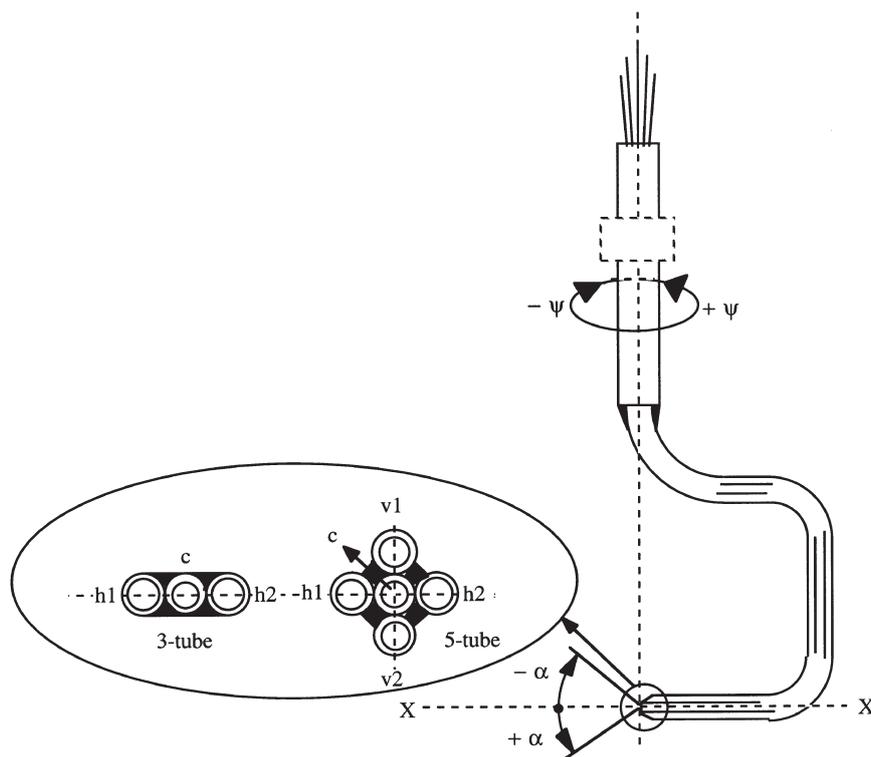


Abbildung 2.1.: Drei- und Fünflochsonde [6]

Über die pneumatischen Dreilochsonden wird im nächsten Kapitel mehr gesprochen während die Mehrlochsonden nicht das Thema dieser Diplomarbeit sind.

### 2.1. Vor- und Nachteile der pneumatischen Strömungs sonden

Pneumatische Sonden gehören zur Standardausrüstung für aerodynamische Messungen. Sie haben sich über Jahrzehnte bewährt und sind in der Strömungsgeschwindigkeitsmesstechnik weit verbreitet und gut bekannt.

Vorteile:

- einfacher Aufbau, robuste Handhabung und nahezu wartungsfrei
- universelle Anwendbarkeit bezüglich der Strömungsgeschwindigkeit (bis in den Überschallbereich)
- hohe Zuverlässigkeit und Messgenauigkeit bis zu 0,1 % vom Messwert

Nachteile:

- arbeiten nicht eingriffsfrei (Feldstörungen)
- liefern nur einen geringen dynamischen Druck, der genau gemessen werden muss
- geben einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Druck und Geschwindigkeit
- haben bei engen Anschlussleitungen und kleinen Druckdifferenzen hohe Zeitkonstanten (schränkt die Anwendung auf pulsierende Strömungen ein)
- Dichteschwankungen erhöhen den Messfehler. [4]

### 2.2. Übersicht über die Kalibriermethoden

Bevor die pneumatischen Strömungs sonden auf eine Messaufgabe angewendet werden können, ist grundsätzlich eine Geschwindigkeits- und Richtungskalibrierung erforderlich.

Neben der experimentelle Kalibrierung, die im Vordergrund steht, können auch analytische, CFD oder theoretische Methode die gesuchten Kalibrierkoeffizienten schätzen. Die analytische, CFD oder theoretische Methode können nur zusätzlich zur experimentellen Methode verwendet werden.

In dieser Diplomarbeit sind neben der experimentellen Kalibrierung zusätzlich zwei Methoden zur Abschätzung der Kalibrierkoeffizienten angewendet. In Abschnitten 4.4 und 4.5 werden diese zwei Methoden ausführlich beschrieben. Diese Methoden sind:

- Methode der Stromlinienprojektion<sup>1</sup>
- Methode der Potentialströmung<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>engl. Streamline Projection Method

<sup>2</sup>engl. Potential Flow Solution

Die Methode der Stromlinienprojektion wird an allen Sonden (kobraförmige, trapezförmige und zylinderförmige Art des Sondenkopfes) angewendet und die Methode der Potentialströmung jedoch nur an zylinderförmiger Sonde.

Es wird gezeigt, dass Methode der Stromlinienprojektion leicht und qualitativ die Kalibrierkoeffizienten von den Dreilochsonden vorhersagen kann.

Für Sonden mit einfacher Konturgeometrie (z.B. zylindrische Kopfgeometrie) ist die Methode der Stromlinienprojektion gültig, aber die Methode der Potentialströmung kann ebenfalls die Druckverteilung und die entsprechenden Kalibrierdatencharakteristiken mit einer angemessenen Genauigkeit ebenfalls vorhersagen.

Während der Messung in einer unbekanntem Strömung, können die Sonden durch zwei verschiedene Verfahren betrieben werden.

### 2.3. Übersicht über die Messverfahren

Während das erste Verfahren Abgleichverfahren<sup>3</sup> heißt, wird das zweite Verfahren als Ausschlagverfahren<sup>4</sup> bezeichnet. Die Unterschiede und Funktionsweise von diesen zwei Verfahren sind in Abschnitten 2.3.1 bzw. 2.3.2 erläutert.

#### 2.3.1. Abgleichverfahren

Dieses Verfahren liefert sehr präzise Ergebnisse, aber die Anwendung ist aufgrund der ständigen Positionierung der Sonde ziemlich kompliziert.

Die Sonde wird in eine Positioniervorrichtung eingespannt, die drei Freiheitsgradbewegungen ermöglicht. Die Sonde muss so ausgerichtet sein, dass die x-Achse parallel zur Strömungsrichtung ist. D.h. der Anströmwinkel  $\Delta\beta$  und der Nickwinkel  $\Delta\alpha$  müssen beide Null sein. Um diese Voraussetzung zu erzielen, muss man die Sondenposition ständig ändern, was sehr anspruchsvoll ist, und eine sehr lange Datenerfassungszeit benötigt.

Als Ergebnis liefert diese Methode den Staudruck  $p_1$ , der durch die zentrale Bohrung des Sondenkopfes erfasst wird und die Drücke in den seitlichen Bohrungen  $p_2$  und  $p_3$ , die gleich sind ( $p_2 = p_3$ ). Anschließend gibt die Sondenposition den Anströmwinkel an.

---

<sup>3</sup>engl. Nulling Technique

<sup>4</sup>engl. Stationary Method or Non-Nulling Technique

### 2.3.2. Ausschlagverfahren

Dieses Verfahren ist besonders geeignet, wenn z.B. Raumbeschränkungen oder andere Umstände das Abgleichverfahren unpraktisch machen.

Einerseits ist dieses Verfahren sehr einfach, was in Turbomaschinen eine große Rolle spielt, andererseits ist es nicht besonders präzise.

Bei dem Ausschlagverfahren wird die Sonde in einer festen Einstellung positioniert und die drei Bohrungsdrücke gemessen. Mit Hilfe dieser Drücke wird der Richtungskoeffizient berechnet und anschließend aus der Richtungskoeffizientkurve der Anströmwinkel  $\Delta\beta$  abgelesen.

### 3. Pneumatische Dreilochsonden

Mit den pneumatischen Dreilochsonden<sup>5</sup> können Strömungswinkel, Totaldruck und statischer Druck einer ebenen Strömung gemessen werden. Die Zuordnung dieser drei Größen zum Anströmwinkel  $\Delta\beta$  erfolgt durch die Kalibrierkoeffizienten. [10]

In der Abb. 3.1 ist eine Skizze von einer zylindrischen, einer trapezförmigen und einer kobraförmigen Art der Sonde gezeigt sowie ihre Ausrichtung im Bezug auf die Strömungsrichtung und Messebene.

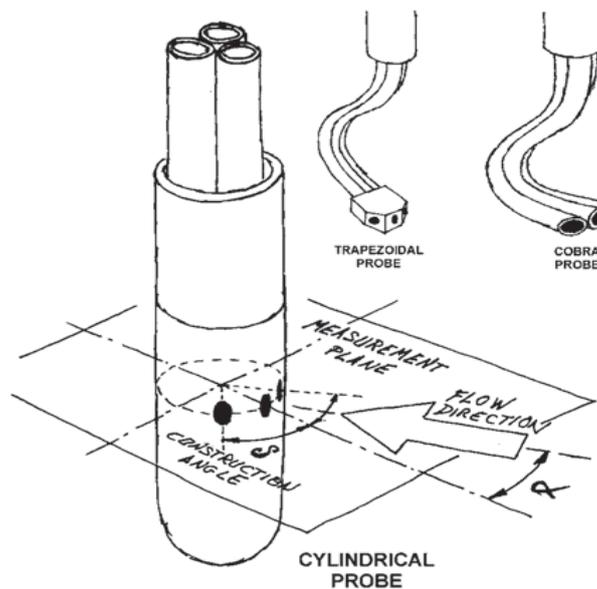


Abbildung 3.1.: Sondausrichtung nach der Strömung [2]

#### 3.1. Geometrie von Dreilochsonden

Haupteigenschaften und Kopfgeometrie von pneumatischen Dreilochsonden, die in dieser Diplomarbeit zur Untersuchung der Betriebsbereicherweiterung verwendet werden, sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

---

<sup>5</sup>engl. Three-Hole Pressure Probes

### 3.1. GEOMETRIE VON DREILOCHSONDEN

Name der Sonde	Herstellungsjahr	d[mm]	$\delta$ [°]	a[mm]	Thermoelement
SVUSS/3 Kobra-Sonde	1994	2,4	30	1,6	Nein
AVA Trapez-Sonde Nr.110	1968	3,3	30	2,0	Ja
AVA Zylinder-Sonde Nr.43	unbekannt	3,0	2,3	Nein	

Tabelle 3.1.: Haupteigenschaften von verwendeten pneumatischen Dreilochsonden

In der Abb. 3.2 ist die trapezförmige Kopfgeometrie einer Sonde skizziert, wo charakteristischer Flankenwinkel  $\delta$  und charakteristische Abmessungen  $d$  und  $a$  dargestellt sind.

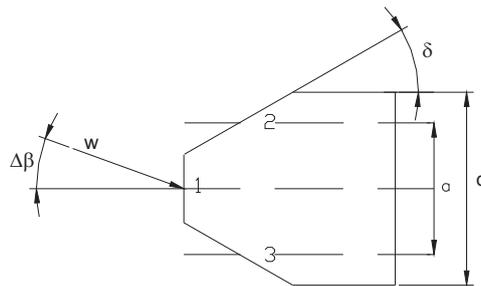


Abbildung 3.2.: Charakteristische Kopfgeometrie einer trapezförmigen Sonde [7]

Die häufig verwendete Bohrungsnummerierung von den pneumatischen Dreilochsonden ist in der Abb.3.3 dargestellt.

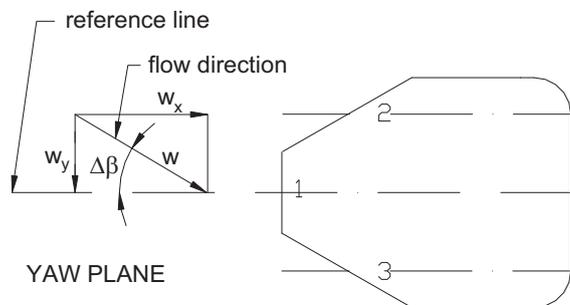


Abbildung 3.3.: Definition der Bohrungen und der Anströmwinkelzählrichtung [7]

Es ist ersichtlich, dass die zentrale Bohrung mit der Nummer 1 während die rechte und die linke Bohrung mit der Nummer 2 bzw. 3 bezeichnet wird. Hier bezeichnet  $\Delta\beta$  den Anströmwinkel (Gierwinkel), der zwischen dem Geschwindigkeitsvektor  $\vec{w}$  und der Sondenachse, die vertikal auf die zentrale Bohrung ist, liegt.  $w_x$  und  $w_y$  stellen die Geschwindigkeitskomponenten dar. Im Gegensatz zur Vier-, Fünf- und Siebenlochsonden werden die Dreilochsonden zur Messung in zweidimensionalen Strömungen verwendet. Dies bedeutet, dass  $\Delta\alpha=0$  ist (Nickwinkel).

### 3.2. SVUSS/3 Kobra-Sonde

Abb. 3.4 sowie 3.5 zeigen die in dieser Arbeit untersuchte SVUSS / 3 Kobra-Sonde, die in der Tschechischen Republik (Prag) im Jahr 1994 von der Firma namens SVUSS hergestellt wurde. Der Name stammt von ihrem kobraförmigen Kopf.



Abbildung 3.4.: SVUSS/3 Kobra-Sonde [7]



Abbildung 3.5.: Vergrößerte Ansicht der SVUSS/3 Kobra-Sonde [7]

Die charakteristischen Abmessungen der Sonde und ihrer Kopfgeometrie sind:

- die Breite des Sondenkopfes  $d=2,4$  [mm] und seine Höhe  $0,8$  [mm]
- die Gesamtlänge der Sonde  $650,0$  [mm]
- der Durchmesser der Bohrungen  $0,5$  [mm] (alle Bohrungen in einer Ebene, die normal zur Längsachse der Sonde ist)
- der Sondenschaftdurchmesser  $6,0$  [mm]
- der Abstand zwischen den zwei seitlichen Bohrungen  $a=1,6$  [mm]
- der charakteristische Flankenwinkel  $\delta=30$  [°]

Eine Werkstattzeichnung dieser Sonde ist im Anhang Abb. A.1 zu sehen.

### 3.3. AVA Trapez-Sonde Nummer 110

Abb. 3.6 und 3.7 zeigen eine AVA Trapez-Sonde Nr.110, die von der Aerodynamischen Versuchsanstalt Göttingen e.V. entworfen ist.

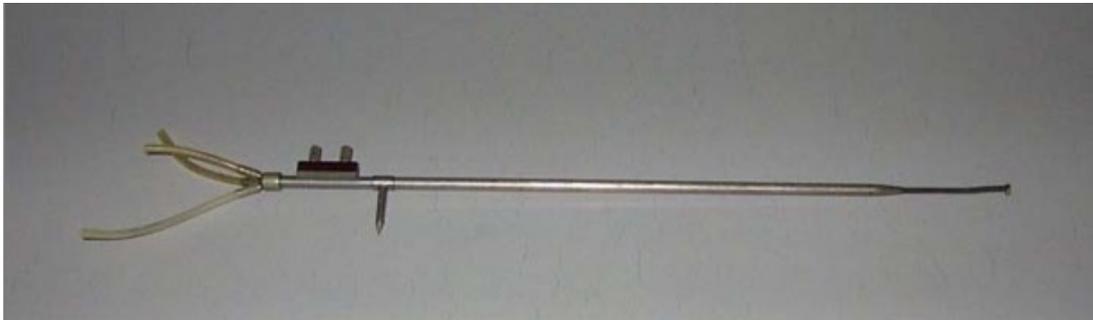


Abbildung 3.6.: AVA Trapez-Sonde Nr.110 [7]

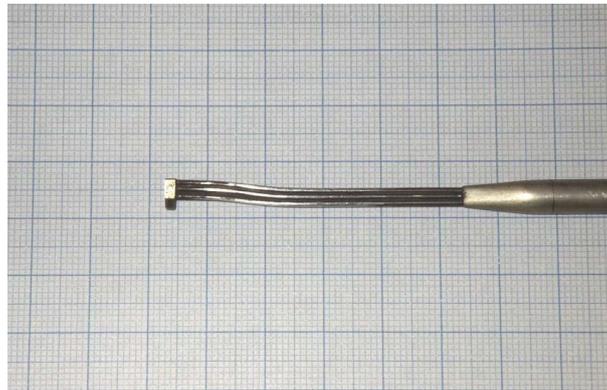


Abbildung 3.7.: Vergrößerte Ansicht der AVA Trapez-Sonde Nr.110 [7]

Die charakteristischen Abmessungen der Sonde und ihrer Kopfgeometrie sind:

- die Breite des Sondenkopfes  $d=3,3$  [mm] und seine Höhe 1,3 [mm]
- die Gesamtlänge der Sonde 366,0 [mm]
- der Sondenschaftdurchmesser 6,0 [mm]
- der Flankenwinkel  $\delta = 30$  [°]
- der Durchmesser der drei Bohrungen, die nach vorne gerichtet sind, 0,6 [mm]
- der Abstand zwischen den zwei seitlichen Bohrungen  $a=2,0$  [mm]

Diese Sonde ist im Gegensatz zur SVUSS/3 Kobra-Sonde mit einem Thermoelementsensor zur Temperaturmessung ausgestattet.

Eine Werkstattzeichnung dieser Sonde ist im Anhang Abb. A.2 zu sehen.

### 3.4. AVA Zylinder-Sonde Nummer 43

Abb. 3.8 und 3.9 zeigen eine AVA Zylinder-Sonde Nr. 43, die ebenfalls wie AVA Trapez-Sonde Nr. 110 von der Aerodynamischen Versuchsanstalt Göttingen e.V. hergestellt ist. Das Herstellungsjahr ist nicht bekannt. Der Name stammt von ihrem zylinderförmigen Kopf.



Abbildung 3.8.: AVA Zylinder-Sonde Nr.43 [7]

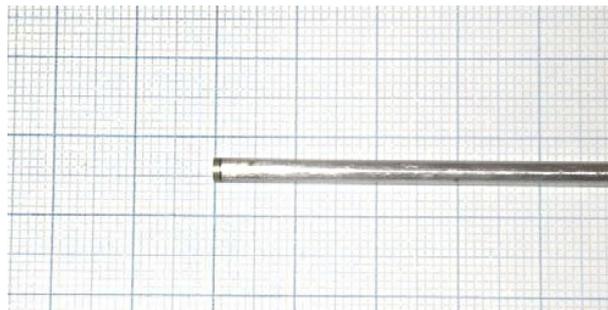


Abbildung 3.9.: Vergrößerte Ansicht der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 [7]

Die charakteristische Abmessungen der Sonde und ihrer Kopfgeometrie sind:

- der Kopfdurchmesser der Sonde  $d=3,0$  [mm]
- der Flankenwinkel  $\delta = 50$  [°] und definiert den Winkel zwischen den äußeren Bohrungen bezüglich der Längsachse der Sonde
- die Gesamtlänge der Sonde 335,0 [mm]
- der Sondenschaftdurchmesser 6,0 [mm]
- der Durchmesser der zentralen Bohrung 0,3 [mm] und von den beiden äußeren Bohrungen 0,6 [mm]
- der Abstand zwischen den zwei seitlichen Bohrungen  $a=2,3$  [mm]

AVA Zylinder-Sonde Nr. 43 hat keinen Thermoelementsensoren zur Temperaturmessung.

Eine Werkstattzeichnung dieser Sonde ist im Anhang Abb. A.3 zu sehen.

## 4. Kalibrierung

In diesem Kapitel wurden die experimentelle Kalibrierung, die Methode der Stromlinienprojektion und die Methode der Potentialströmung erläutert.

### 4.1. Experimentelle Kalibrierung

Die experimentelle Kalibrierung von pneumatischen Sonden erfolgt in der Regel im Windkanal. Da wird die Sonde fixiert und mit vordefinierter konstanter Geschwindigkeit angeströmt. Während des Kalibrierverfahrens (siehe den Abschnitt 2.3), wird ihre Winkelposition  $\Delta\beta$  schrittweise über den gewünschten Bereich (manuell oder automatisch) verändert. Durch die Bohrungen auf dem Sondenkopf werden Bohrungsdrücke für jeden eingestellten Winkel gespeichert. Ebenfalls wird der statische Druck gemessen. Mit Hilfe dieser Messdaten werden die in den Gl. (4.11) bis (4.13) definierten Kalibrierkoeffizienten  $k_\beta$ ,  $k_t$  und  $k_s$  berechnet und anschließend ihre Kalibrierkurven, wie in der Abb. 4.1 dargestellt wurde, aufgezeichnet.

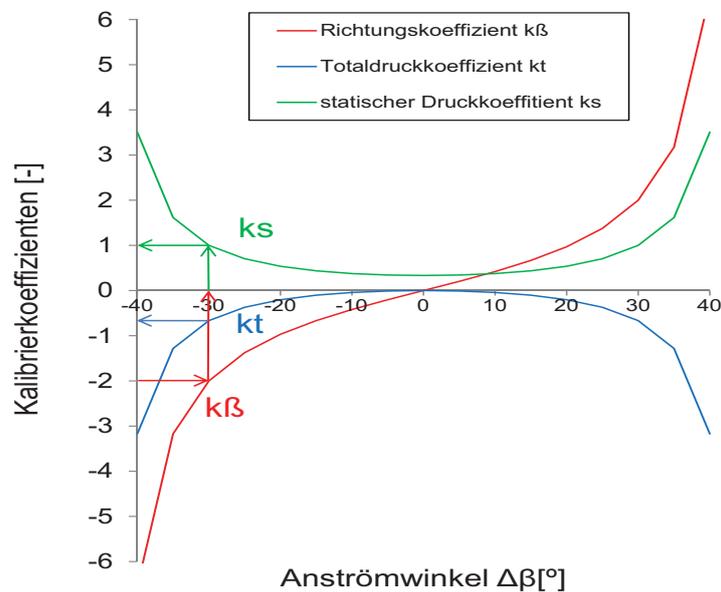


Abbildung 4.1.: Typische Verteilung der Kalibrierkoeffizienten

In der Abb. 4.1 wurden typische Kalibrierkoeffizientenkurven, die von dem Anströmwinkel  $\Delta\beta$  abhängen, dargestellt. Es ist auch ersichtlich, wie aus diesen Kalibrierkurven nach der Messung in einer unbekanntem Strömung  $\Delta\beta$ ,  $k_t$ , und  $k_s$  abgelesen werden.

Zuerst werden die Drücke durch die drei Bohrungen erfasst. Dann wird der Richtungskoeffizient  $k_\beta$  berechnet und aus der  $k_\beta$ -Kalibrierkurve der Anströmwinkel  $\Delta\beta$  bestimmt. Sobald  $\Delta\beta$  bekannt ist, wird der  $k_t$ - bzw.  $k_s$ -Koeffizient für diesen Winkel (aus ihren eigenen Kalibrierkurven) erhalten. Durch das Einsetzen dieser Koeffizienten in der Gl. (4.12) bzw. (4.13) erhält man den Totaldruck  $p_t$  und den statischen Druck  $p$ . Anschließend wird der Geschwindigkeitsbetrag der Strömung mit Hilfe der Gl. (4.9) und dieser Drücke berechnet.

### 4.2. Strömungsgrößen und dimensionslose Kennzahlen

Um die Bohrungskoeffizienten aus den im Labor erfassten Messdaten zu berechnen benötigt man folgende Größen:

- spezifische Gaskonstante  $R_s$  (für trockene Luft)
- Luftdichte  $\rho$
- Geschwindigkeit  $w$
- kinematische Zähigkeit  $\nu$

Mit Hilfe dieser Größen kann man folgende dimensionslose Kennzahlen berechnen:

- Sondenreynoldszahl  $Re_d$
- Mach-Zahl  $Ma$

#### 4.2.1. Spezifische Gaskonstante

Die universelle Gaskonstante  $R$  geteilt durch die molare Masse  $M$  eines bestimmten Gases ergibt die spezifische oder auch individuelle Gaskonstante.

$$R_s = \frac{R}{M} \quad (4.1)$$

universelle Gaskonstante . . .  $R=8,314472 \left[\frac{J}{molK}\right]$

Für die Berechnung der Bohrungskoeffizienten wird die spezifische Gaskonstante für trockene Luft genommen, welche  $R_s=287 \left[\frac{J}{kgK}\right]$  beträgt.

### 4.2.2. Dichte von Luft

Die Dichte  $\rho$  eines Körpers ist das Verhältnis seiner Masse zu seinem Volumen.

Da aus der experimentellen Kalibrierung die Temperatur im Windkanal sowie der statische Druck ( $p=p_u$ , da Freistrah) bekannt ist, wird die ideale Gasgleichung (4.2) zur Berechnung von Luftdichte verwendet.

$$pv = RT \quad \text{mit} \quad v = \frac{1}{\rho} \quad (4.2)$$

Durch die Umformung von Gl. (4.2) bekommt man die folgende Beziehung für die Luftdichte:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (4.3)$$

### 4.2.3. Kinematische Viskosität

Zur Berechnung der kinematischen Viskosität  $\nu$  wird die folgende Näherungsformel aus [3] genommen:

$$\nu = (0,09401t + 13,24129)10^{-6} \quad \text{in} \quad \left[ \frac{m^2}{s} \right] \quad (4.4)$$

wobei  $t[^\circ\text{C}]$  gemessene Temperatur im Windkanal ist.

Diese Gleichung ist gültig im Bereich 0-60  $[^\circ\text{C}]$  und 1,0132 [bar].

### 4.2.4. Sondenreynoldszahl

Die Sondenreynoldszahl  $Re_d$  stellt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften dar. Das Turbulenzverhalten geometrisch ähnlicher Körper ist bei gleicher Reynoldszahl identisch. Diese Eigenschaft erlaubt z.B. realitätsnahe Modellversuche im Windkanal oder Wasserkanal.

$$Re_d = \frac{wd}{\nu} \quad (4.5)$$

#### 4.2.5. Mach-Zahl

Die Mach-Zahl  $Ma$  ist eine dimensionslose Kennzahl der Geschwindigkeit. Sie gibt das Verhältnis von Trägheitskräften zu Kompressionskräften an und reduziert sich auf das Verhältnis des Betrages einer Geschwindigkeit  $w$  (z.B. eines Fluids) zur Schallgeschwindigkeit  $w_0$  im umgebenden Fluid.

$$Ma = \frac{w}{w_0} \quad (4.6)$$

Für die Luft bei einer Temperatur von 20 [°C] beträgt die Schallgeschwindigkeit  $w_0 = 343 \left[\frac{m}{s}\right]$ . Bei  $Ma < 0,3$  kann die Strömung als näherungsweise inkompressibel betrachtet werden und die Dichte der Luft kann als konstant angenommen werden.

### 4.3. Definition der Kalibrierkoeffizienten nach Treaster und Yocum

Die Navier-Stokes-Gleichungen sind die allgemeinste Form der Bewegungsgleichungen für ein zähes Fluid. Bei der Herleitung dieser Gleichungen betrachtet man ein Fluidelement, an dem in allen drei Raumrichtungen Massenkräfte, Druckspannungen und Schubspannungen angreifen.

Unter der Annahme der inkompressiblen Strömung (die Dichte ändert sich nicht entlang Teilchenbahnen d.h.  $\rho = \text{const.}$ ) und konstanter kinematischer Viskosität  $\nu$  erhält man die Navier-Stokes-Gleichung in vektorieller Form:

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + w \nabla w \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 w + f . \quad (4.7)$$

Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen geben das Geschwindigkeitsfeld und den Druck einer strömenden Flüssigkeit in Abhängigkeit von Ort und Zeit an.

Unter der Annahme der eindimensionalen Strömung folgt aus der Gl. (4.7) die Bernoullische Gleichung,

$$p + \frac{1}{2} \rho w^2 = \text{const.} \quad (4.8)$$

wo  $p$  statischer Druck und  $\frac{1}{2} \rho w^2$  dynamischer Druck interpretiert. Ihre Summe liefert den Totaldruck  $p_t$ .

Die Geschwindigkeit  $w$  in der Gl. (4.8) kann nicht mit Hilfe der Sonde ermittelt werden aber durch den Totaldruck und statischen Druck kann man sie leicht nach der Gl. (4.9) berechnen

$$w = \sqrt{\frac{p_t - p}{\rho/2}} . \quad (4.9)$$

## Treaster und Yocum - Koeffizienten

Bei der experimentellen Kalibrierung, die in dieser Arbeit durchgeführt wird, werden drei Bohrungsdrücke  $p_i$  durch die Dreilochsonden gemessen. Der Index  $i$  bezeichnet die entsprechende Bohrung.

Danach muss man diese Drücke ins Verhältnis zu den gesuchten Strömungsgrößen, also Anströmwinkel  $\Delta\beta$ , Totaldruck  $p_t$  und statischer Druck  $p$  bringen. Anschließend bekommt man die dimensionslosen Koeffizienten.

Die Bohrungskoeffizientenformel, die von der Geschwindigkeit abhängt, ist

$$k_i = \frac{p_i - p}{\frac{\rho}{2}w^2} . \quad (4.10)$$

Der Richtungskoeffizient  $k_\beta$ , der Totaldruckkoeffizient  $k_t$  und der statische Druckkoeffizient  $k_s$  werden durch Gl. (4.11) bis (4.13) definiert. Diese Beziehungen sind aus der Literatur [8] übernommen und auf Dreilochsonden reduziert.

- Richtungskoeffizient<sup>6</sup>

$$k_\beta = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_2 - k_3}{k_1 - \bar{k}} \quad (4.11)$$

- Totaldruckkoeffizient<sup>7</sup>

$$k_t = \frac{p_1 - p_t}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_1 - 1}{k_1 - \bar{k}} \quad (4.12)$$

- statischer Druckkoeffizient<sup>8</sup>

$$k_s = \frac{\bar{p} - p}{p_1 - \bar{p}} = \frac{\bar{k}}{k_1 - \bar{k}} . \quad (4.13)$$

Der Normierungsparameter, der den Nenner von diesen Gleichungen charakterisiert, ist ein dynamischer Druck, der sich aus der Differenz von  $p_1$  und einem Mittelwert der Drücke von den

---

<sup>6</sup>engl. Direction Coefficient

<sup>7</sup>engl. Total Pressure Coefficient

<sup>8</sup>engl. Static Pressure Coefficient

seitlichen Bohrungen  $p_2$  bzw.  $p_3$  ergibt. Die Streuung der Kalibrierdaten wird durch diesen Parameter ( $p_1 - \bar{p}$  bzw.  $k_1 - \bar{k}$ ) reduziert im Vergleich zum tatsächlichen dynamischen Druck  $\frac{\rho}{2}w^2$  als Normierungsparameter.

Wobei die gemittelten Werte ( $\bar{p}$  und  $\bar{k}$ ) durch die Gl. (4.14) bzw. (4.15) berechnet werden können.

$$\bar{p} = \frac{p_2 + p_3}{2} \quad (4.14)$$

$$\bar{k} = \frac{k_2 + k_3}{2} . \quad (4.15)$$

Die Gleichungen (4.11) bis (4.13), die den Zusammenhang zwischen den Bohrungsdrücken  $p_i$  bzw. Bohrungskoeffizienten  $k_i$  und Kalibrierkoeffizienten  $k_\beta$ ,  $k_t$  und  $k_s$  beschreiben, sind nur gültig bei entsprechend kleinen Anströmwinkeln (ca.  $\Delta\beta = \pm 30^\circ$ ).

Bei größeren Anströmwinkeln weichen die Drücke  $p_1$  und  $\bar{p}$  zunehmend vom tatsächlichen Totdruck und dem statischen Druck ab. Dies hat als Folge, dass der Normierungsparameter  $p_1 - \bar{p}$  nicht mehr den tatsächlichen dynamischen Druck beschreibt. Geht  $p_1 - \bar{p}$  gegen Null, entsteht in den Gleichungen von  $k_\beta$ ,  $k_t$  und  $k_s$  die Singularität. D.h. die Koeffizienten werden undefiniert (gehen gegen Unendlich) und der Betriebsbereich der Sonde dadurch begrenzt.

Genau aus diesem Grund ist in der Literatur nicht viel über größere Anströmwinkel für die pneumatischen Dreilochsonden zu finden. In der letzten Zeit wurde mehr mit größeren Anströmwinkeln experimentiert.

Diese Diplomarbeit befasst sich mit den größeren Anströmwinkeln.

Im Kapitel 5 werden die Vorschläge und Methoden zur Erweiterung des Betriebsbereichs von pneumatischen Dreilochsonden präsentiert.

## 4.4. Methode der Stromlinienprojektion

Stromlinien sind die Kurven im Geschwindigkeitsfeld einer Strömung, deren Tangentenrichtung mit den Richtungen der Geschwindigkeitsvektoren übereinstimmen, d.h. an jedem Punkt wird die Stromlinie durch einen Geschwindigkeitsvektor tangiert.

Die Methode der Stromlinienprojektion ist eine sehr einfache theoretische Methode, die auf der Projektion des Geschwindigkeitsvektors beruht. D.h. der Anströmgeschwindigkeitsvektor wird normal auf die Bohrungsoberfläche der Sonde projiziert. Die projizierten Komponenten liefern einen entsprechenden Anteil des dynamischen Drucks. Durch die Addition des dynamischen Drucks zum statischen Druck erhält man die folgende Beziehung zur Berechnung der Bohrungsdrücke  $p_i$ :

$$p_i = p + \frac{1}{2} \rho w_i^2 . \quad (4.16)$$

Wenn man die Gl.(4.10) umformt, folgt für die Bohrungsdrücke:

$$p_i = p + \frac{k_i}{2} \rho w^2 . \quad (4.17)$$

Durch den Vergleich von Gl. (4.16) und Gl. (4.17) erhält man die folgende Beziehung

$$k_i = \left( \frac{w_i}{w} \right)^2 \quad (4.18)$$

wo die Bohrungskoeffizienten  $k_i$  als Quadrat des Quotienten von der Geschwindigkeit  $w_i$  (wo  $i=1, 2, 3$ ) und der Anströmgeschwindigkeit  $w$  berechnet werden können. Die Gl. (4.18) zeigt, dass die Methode der Stromlinienprojektion eine reine geometrisch basierte Methode ist. D.h. die Bohrungskoeffizienten hängen nur von dem Anströmwinkel  $\Delta\beta$  und dem Flankenwinkel  $\delta$  ab.

#### 4.4.1. Sonden mit der trapezförmigen Kopfgeometrie

Wie schon erwähnt wurde, werden in dieser Diplomarbeit die Kalibrierungen an drei pneumatischen Dreilochsonden, die im Kapitel 3 detailliert beschrieben sind, durchgeführt.

Die SVUSS/3 Kobra-Sonde und AVA Trapez-Sonde Nr.110 haben dieselbe Kopfgeometrie (trapezförmig) mit dem Flankenwinkel  $\delta=30^\circ$ . D.h. die Gleichungen zur Berechnung der Bohrungskoeffizienten sind identisch.

In der Abb. 4.2 ist ein trapezförmiger Kopf mit projizierten Geschwindigkeitsvektoren normal auf die Bohrungsflächen dargestellt.

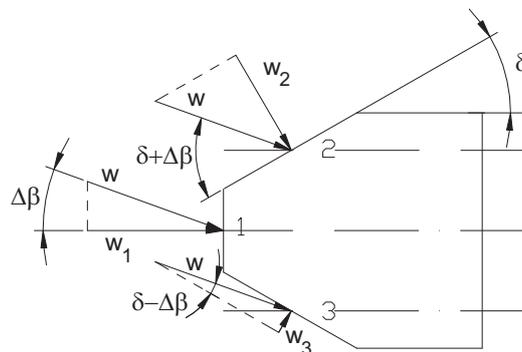


Abbildung 4.2.: Projektion des Geschwindigkeitsvektors auf einen trapezförmigen Kopf [7]

Mit Hilfe dieser Abbildung werden die Geschwindigkeitsgleichungen für jede einzelne Bohrung wie folgt angeschrieben:

$$w_1 = w \cos \Delta\beta \quad (4.19)$$

$$w_2 = w \sin(\delta + \Delta\beta) \quad (4.20)$$

$$w_3 = w \sin(\delta - \Delta\beta) . \quad (4.21)$$

Aus diesen Gleichungen ist leicht zu sehen, dass die Geschwindigkeiten nur von dem Anström-  
winkel  $\Delta\beta$  bzw. Flankenwinkel  $\delta$  abhängen. Durch das Einsetzen dieser Gleichungen in Gl.(4.16)  
erhält man die Bohrungsdrücke in folgender Form

$$p_1 = p + \frac{1}{2}\rho(w \cos \Delta\beta)^2 \quad (4.22)$$

$$p_2 = p + \frac{1}{2}\rho[w \sin(\delta + \Delta\beta)]^2 \quad (4.23)$$

$$p_3 = p + \frac{1}{2}\rho[w \sin(\delta - \Delta\beta)]^2 \quad (4.24)$$

bzw. durch das Einsetzen in (4.18) erhält man die folgenden Bohrungskoeffizienten:

$$k_1 = \cos^2 \Delta\beta \quad (4.25)$$

$$k_2 = \sin^2(\delta + \Delta\beta) \quad (4.26)$$

$$k_3 = \sin^2(\delta - \Delta\beta) . \quad (4.27)$$

Um den Richtungskoeffizienten, Totaldruckkoeffizienten und den statischen Druckkoeffizienten  
zu berechnen, setzt man diese Gleichungen in Gl. (4.11), (4.12) und (4.13) und erhält daraus

Richtungskoeffizient:

$$k_\beta = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_2 - k_3}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\sin^2(\delta + \Delta\beta) - \sin^2(\delta - \Delta\beta)}{\cos^2 \Delta\beta - \frac{1}{2}[\sin^2(\delta + \Delta\beta) + \sin^2(\delta - \Delta\beta)]} \quad (4.28)$$

Totaldruckkoeffizient:

$$k_t = \frac{p_1 - p_t}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_1 - 1}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\cos^2 \Delta\beta - 1}{\cos^2 \Delta\beta - \frac{1}{2}[\sin^2(\delta + \Delta\beta) + \sin^2(\delta - \Delta\beta)]} \quad (4.29)$$

statischer Druckkoeffizient:

$$k_s = \frac{\bar{p} - p}{p_1 - \bar{p}} = \frac{\bar{k}}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\frac{1}{2}[\sin^2(\delta + \Delta\beta) + \sin^2(\delta - \Delta\beta)]}{\cos^2 \Delta\beta - \frac{1}{2}[\sin^2(\delta + \Delta\beta) + \sin^2(\delta - \Delta\beta)]} . \quad (4.30)$$

### 4.4.2. Sonden mit der zylinderförmigen Kopfgeometrie

Die AVA-Zylinder-Sonde Nr. 43 hat eine zylindrische Kopfgeometrie. Sie hat zwischen der zentralen Bohrung und den seitlichen Bohrungen einen Winkel  $\delta=50^\circ$ . In der Abb. 4.3 ist eine Projektion des Geschwindigkeitsvektors auf einen zylinderförmigen Kopf dargestellt.

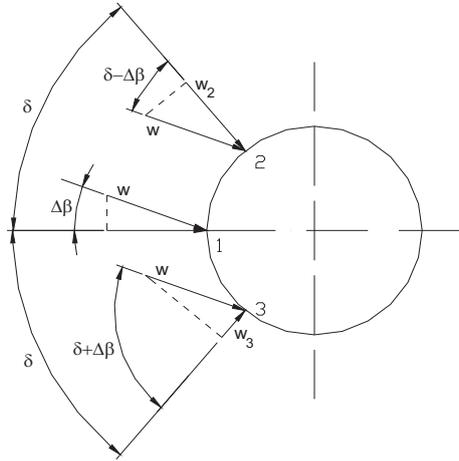


Abbildung 4.3.: Projektion des Geschwindigkeitsvektors auf einen zylinderförmigen Kopf [7]

Wie aus der Abb. 4.3 ersichtlich ist, stehen die Geschwindigkeitskomponenten  $w_1$ ,  $w_2$  und  $w_3$  radial zur Zylinderoberfläche bzw. normal auf die Bohrungsflächen. Jetzt kann man diese Geschwindigkeitskomponenten in folgender Form anschreiben

$$w_1 = w \cos \Delta\beta \quad (4.31)$$

$$w_2 = w \cos(\delta - \Delta\beta) \quad (4.32)$$

$$w_3 = w \cos(\delta + \Delta\beta) . \quad (4.33)$$

Durch das Einsetzen dieser Gleichungen in Gl.(4.16) erhält man die Bohrungsdrücke in folgender Form :

$$p_1 = p + \frac{1}{2}\rho(w \cos \Delta\beta)^2 \quad (4.34)$$

$$p_2 = p + \frac{1}{2}\rho[w \cos(\delta - \Delta\beta)]^2 \quad (4.35)$$

$$p_3 = p + \frac{1}{2}\rho[w \cos(\delta + \Delta\beta)]^2 \quad (4.36)$$

bzw. durch das Einsetzen in (4.18) erhält man die folgenden Bohrungskoeffizienten:

$$k_1 = \cos^2 \Delta\beta \quad (4.37)$$

$$k_2 = \cos^2(\delta - \Delta\beta) \quad (4.38)$$

$$k_3 = \cos^2(\delta + \Delta\beta) . \quad (4.39)$$

Schließlich kann man die Kalibrierkoeffizienten  $k_\beta$ ,  $k_t$  und  $k_s$  nach folgenden Beziehungen berechnen.

Richtungskoeffizient:

$$k_\beta = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_2 - k_3}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\cos^2(\delta - \Delta\beta) - \cos^2(\delta + \Delta\beta)}{\cos^2 \Delta\beta - \frac{1}{2}[\cos^2(\delta - \Delta\beta) + \cos^2(\delta + \Delta\beta)]} \quad (4.40)$$

Totaldruckkoeffizient:

$$k_t = \frac{p_1 - p_t}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_1 - 1}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\cos^2 \Delta\beta - 1}{\cos^2 \Delta\beta - \frac{1}{2}[\cos^2(\delta - \Delta\beta) + \cos^2(\delta + \Delta\beta)]} \quad (4.41)$$

statischer Druckkoeffizient:

$$k_s = \frac{\bar{p} - p}{p_1 - \bar{p}} = \frac{\bar{k}}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\frac{1}{2}[\cos^2(\delta - \Delta\beta) + \cos^2(\delta + \Delta\beta)]}{\cos^2 \Delta\beta - \frac{1}{2}[\cos^2(\delta - \Delta\beta) + \cos^2(\delta + \Delta\beta)]} . \quad (4.42)$$

#### 4.4.3. Richtungskoeffizient bei den kleineren Anströmwinkeln

Bei kleineren Anströmwinkel liefert die Methode der Stromlinienprojektion eine lineare Beziehung zwischen dem Richtungskoeffizienten  $k_\beta$  und dem Anströmwinkel  $\Delta\beta$ . Diese Beziehung unterscheidet sich bei den trapezförmigen und zylinderförmigen Köpfen.

Durch die Taylorreiheentwicklung nimmt die Gl. (4.28) des Richtungskoeffizienten  $k_\beta$  (trapezförmiger Kopf) folgende Form an.

$$k_\beta = \Delta\beta \frac{\pi}{45^\circ} \tan \delta \quad (4.43)$$

Für einen zylinderförmigen Kopf nimmt die Gl. (4.40) durch die Taylorreiheentwicklung die folgende Form an

$$k_\beta = \Delta\beta \frac{\pi}{45^\circ} \frac{1}{\tan \delta} . \quad (4.44)$$

Diese Beziehungen stellen die Empfindlichkeit der Sonden im Bezug auf Anströmwinkel  $\Delta\beta$ .



Anschließend durch das Einsetzen dieser Gleichungen in die Gl. (4.11), (4.12) und (4.13) werden der Richtungskoeffizient, der Totaldruckkoeffizient und der statische Druckkoeffizient nach folgenden Beziehungen berechnet.

Richtungskoeffizient:

$$k_\beta = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_2 - k_3}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\sin^2(\delta + \Delta\beta) - \sin^2(\delta - \Delta\beta)}{\frac{1}{2}[\sin^2(\delta - \Delta\beta) + \sin^2(\delta + \Delta\beta)] - \sin^2 \Delta\beta} \quad (4.49)$$

Totaldruckkoeffizient:

$$k_t = \frac{p_1 - p_t}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_1 - 1}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\sin^2 \Delta\beta}{\sin^2 \Delta\beta - \frac{1}{2}[\sin^2(\delta + \Delta\beta) + \sin^2(\delta - \Delta\beta)]} \quad (4.50)$$

statischer Druckkoeffizient:

$$k_s = \frac{\bar{p} - p}{p_1 - \bar{p}} = \frac{\bar{k}}{k_1 - \bar{k}} = \frac{1 - [\sin^2(\delta + \Delta\beta) + \sin^2(\delta - \Delta\beta)]}{\sin^2(\delta + \Delta\beta) + \sin^2(\delta - \Delta\beta) - 2 \sin^2 \Delta\beta} \cdot \quad (4.51)$$

## 5. Erweiterung des Betriebsbereichs von Dreilochsonden

Das Ziel dieser Diplomarbeit, wie es schon gesagt wurde, ist die Untersuchung der drei pneumatischen Dreilochsonden bei größeren Anströmwindeln. D.h. der typische Winkelbereich von  $\pm 30^\circ$ , der in der Literatur zu finden ist, sollte überschritten und auf  $\pm 60^\circ$  erweitert werden. In [2] sind Methoden zur Erweiterung des Betriebsbereichs analysiert.

### 5.1. Definition der Kalibrierkoeffizienten

Die Kalibrierkoeffizienten  $C_\beta$ ,  $C_t$  und  $C_s$ , die in der Literatur [2] vorgeschlagen werden, sind wie folgt definiert:

$$C_\beta = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - 0,5(p_2 + p_3)} \quad (5.1)$$

$$C_t = \frac{p_t - p_1}{p_1 - 0,5(p_2 + p_3)} \quad (5.2)$$

$$C_s = \frac{p_t - p}{p_1 - 0,5(p_2 + p_3)} . \quad (5.3)$$

Der Richtungskoeffizient  $C_\beta$  ist vollständig identisch mit dem Richtungskoeffizienten  $k_\beta$  nach Treaster und Yocum.

Der Totaldruckkoeffizient  $C_t$  unterscheidet sich von dem Totaldruckkoeffizienten  $k_t$  nur im Vorzeichen. D.h. bei  $C_t$  steht im Zähler  $(p_t - p_1)$  und bei  $k_t$  umgekehrt  $(p_1 - p_t)$ .

Die statischen Druckkoeffizienten unterscheiden sich am meisten, da der Zähler des statischen Druckkoeffizienten  $C_s$  als die Differenz zwischen dem Totaldruck und dem statischen Druck  $(p_t - p)$  definiert wurde, während der Zähler des statischen Druckkoeffizienten  $k_s$  durch die Differenz zwischen dem gemittelten Druck (siehe Gl. (4.14)) und dem statischen Druck  $(\bar{p} - p)$  gebildet wurde.

Diese in der Literatur [2] benutzten Beziehungen zur Erweiterung des Betriebsbereichs wurden umgeformt, so dass sie mit den traditionellen Kalibrierkoeffizienten nach Treaster und Yocum übereinstimmen und im Abschnitt 5.2 zusammengefasst sind.

## 5.2. Methode zur Erweiterung des Betriebsbereichs

Bei der traditionellen Kalibrierung ist der Betriebsbereich von pneumatischen Dreilochsonden durch die Entstehung von Singularitäten (Nenner wird Null) auf ungefähr  $\pm 35^\circ$  bis  $\pm 45^\circ$  (abhängig von der Sondengeometrie) beschränkt.

Durch die Aufteilung des Betriebsbereichs in drei verschiedene Zonen kann man diese Singularitäten vermeiden. Da der Anströmwinkel unbekannt ist und vorerst berechnet werden sollte, kann er nicht zur Aufteilung verwendet werden. Aus diesem Grund werden die Zonen durch die gemessenen Drücke unterschieden.

In der Abb. 5.1 sind die durch den experimentellen Versuch erhaltenen Bohrkoeffizienten  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 dargestellt.

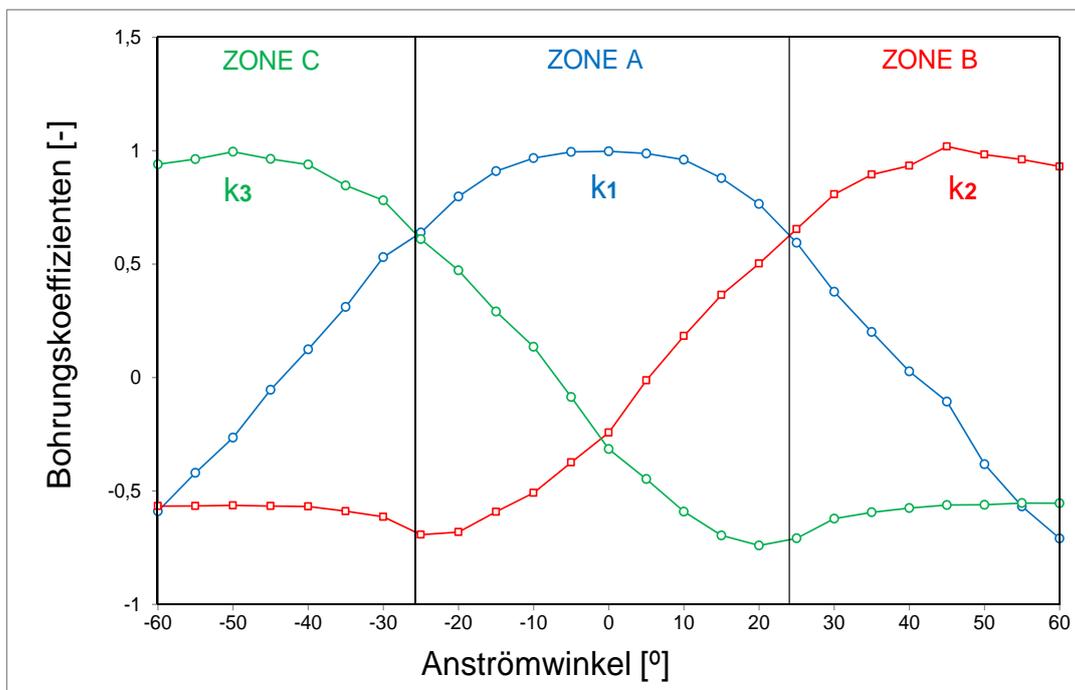


Abbildung 5.1.: Aufteilung des Betriebsbereichs in einzelne Zonen

Wie es aus der Abb. 5.1 ersichtlich ist, wurde der zu untersuchende Betriebsbereich von  $\Delta\beta = \pm 60^\circ$  in die Zone A im Bereich, wo  $p_1$  der höchste Druck ist, die Zonen B und C, wo  $p_2$  bzw.  $p_3$  die höchsten Drücke sind, aufgeteilt. In jeder dieser Zonen wurden die Kalibrierkoeffizienten anders definiert. (Vgl. [2])

Bei der Auswertung der Messdaten wurde die Erweiterung des Betriebsbereichs durch folgende Beziehungen erzielt:

- **Richtungskoeffizient**

$$C_{\beta} = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - \bar{p}_A} \quad \text{Zone A} \quad (5.4)$$

$$C_{\beta} = \frac{p_3 - p_2}{p_2 - \bar{p}_B} + 4 \quad \text{Zone B} \quad (5.5)$$

$$C_{\beta} = \frac{p_3 - p_2}{p_3 - \bar{p}_C} - 4 \quad \text{Zone C} \quad (5.6)$$

- **Totaldruckkoeffizient**

$$C_t = \frac{p_1 - p_t}{p_1 - \bar{p}_A} \quad \text{Zone A} \quad (5.7)$$

$$C_t = \frac{p_1 - p_t}{p_2 - \bar{p}_B} \quad \text{Zone B} \quad (5.8)$$

$$C_t = \frac{p_1 - p_t}{p_3 - \bar{p}_C} \quad \text{Zone C} \quad (5.9)$$

- **statischer Druckkoeffizient**

$$C_s = \frac{\bar{p}_A - p}{p_1 - \bar{p}_A} \quad \text{Zone A} \quad (5.10)$$

$$C_s = \frac{\bar{p}_B - p}{p_2 - \bar{p}_B} \quad \text{Zone B} \quad (5.11)$$

$$C_s = \frac{\bar{p}_C - p}{p_3 - \bar{p}_C} \quad \text{Zone C} \quad (5.12)$$

Die Richtungskoeffizienten lt. Gleichungen (5.4) bis (5.6) ermöglichen die Erweiterung des Betriebsbereichs der Dreilochsonden. Die Werte +4 und -4 bei den Richtungskoeffizienten in der Zone B bzw. Zone C sind speziell hinzugefügt worden, um eine monoton steigende Funktion des Richtungskoeffizienten überall in den drei Zonen zu erhalten. Die Druckmittelwerte  $\bar{p}_A$ ,  $\bar{p}_B$  und  $\bar{p}_C$  sind wie folgt definiert:

$$\bar{p}_A = \frac{p_2 + p_3}{2} \quad , \quad \bar{p}_B = \frac{p_1 + p_3}{2} \quad \text{und} \quad \bar{p}_C = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad . \quad (5.13)$$

## 6. Testanlage

In den vorigen Kapiteln wurden die pneumatischen Dreilochsonden, die Kalibrierkoeffizienten, die Methode zur Erweiterung des Betriebsbereichs von pneumatischen Dreilochsonden beschrieben. In diesem Kapitel wird der Windkanal, seine Eigenschaften sowie das Datenerfassungssystem beschrieben. Der experimentelle Versuch wurde auf der TU Wien im Labor des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik durchgeführt.

### 6.1. Beschreibung des Windkanals

In der Abb. 6.1 ist der Freistrah-Windkanal<sup>9</sup>, der zur Kalibrierung verwendet wird, dargestellt.

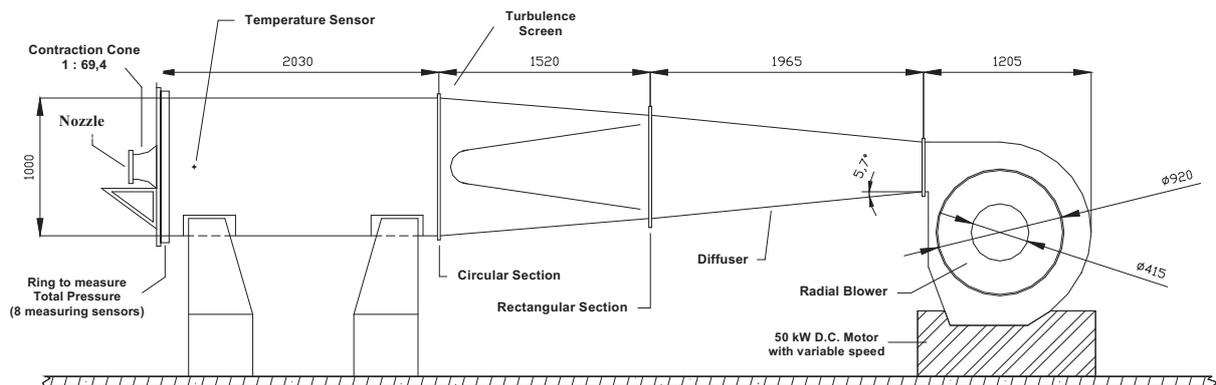


Abbildung 6.1.: Freistrah-Windkanal des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik an der TU Wien [7]

Die Strömung im Windkanal wird durch ein Radialgebläse erzeugt. Das Radialgebläse hat einen Laufraddurchmesser von 920 [mm]. Es kann durch die Leistung eines DC-Motors von 50 [kW] einen Volumenstrom von 1 [ $m^3/s$ ] bzw. auf die Stunde bezogen 3600 [ $m^3/h$ ] zur Verfügung stellen. Der Motor ist gemeinsam mit dem Gebläse auf einem Fundamentrahmen fixiert und ist in der Lage, die Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe der Drehzahlregelung zu kontrollieren.

Die Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit bzw. die Erhöhung des statischen Drucks passiert in dem Diffusor, der einen Öffnungswinkel von ca.  $5,7 [^\circ]$  hat. Der Diffusor endet mit einem rechteckigen Querschnitt und danach nimmt der Windkanal ein kreisförmiges Profil.

<sup>9</sup>engl. Free Jet Wind Tunnel

Um die Turbulenz niedrig zu halten bzw. ein homogenes Strömungsfeld mit der niedrigen Turbulenzintensität zu gewährleisten (ungefähr 1%), wurde der Windkanal am Anfang des kreisförmigen Querschnitts mit dem Turbulenzsieb versehen.

Der Windkanal endet mit einer konvergenten Düse. Ihr Eintrittsdurchmesser beträgt 1000 [mm] während der Austrittsdurchmesser  $d_a=120$  [mm], was einem Kontraktionsverhältnis 1 : 69.4 entspricht.

Bei dem Düseneintritt um den ganzen Windkanal ist eine rohrförmige Leitung zur Totaldruckmessung angeordnet. Diese Leitung ist an acht Stellen durch kleine Röhren (symmetrisch verteilt um die Druckverteilung überall gleich zu haben) mit der Innenseite des Windkanals verbunden. Dieser Prüfstand ist auch mit einem Pt-100 Widerstand zur Temperaturmessung ausgestattet.

In der Tabelle 6.1 sind alle technische Daten des Windkanals aufgelistet.

Name	Wert	Einheit
Leistung des DC-Motors	50	[kW]
Luftdurchsatz	3600	[ $m^3/h$ ]
Öffnungswinkel des Diffusors	5.7	[°]
Eintrittsdurchmesser der Düse	1000	[mm]
Austrittsdurchmesser der Düse	120	[mm]
Kontraktionsverhältnis der Düse	1 : 69.4	[-]
Machzahl	0.05 - 0.3	[-]
Reynoldszahl	variabel	[-]
Turbulenzintensität	$\approx 1$	[%]

Tabelle 6.1.: Technische Daten des Windkanals

## 6.2. Messdatenerfassung

Die Dreilochsonde wird in einer Vorrichtung mit dem Abstand  $x=130$  [mm] stromab der Düse angeordnet, wie in der Abb. 6.2 zu sehen ist. Die Sonde soll im Bereich

$$0 \leq x \leq 2.5d_a$$

platziert werden, da in diesem Bereich ein homogenes Strömungsfeld existiert.

Diese Vorrichtung ermöglicht eine sehr präzise Drehung der Sonde um ihre Längsachse. In Schritten von  $5^\circ$  wird die Sonde manuell im Bereich von  $-60^\circ$  bis  $+60^\circ$  gedreht. Durch die Motordrehzahlregelung wird die Strömungsgeschwindigkeit bei einem konstanten Wert gehalten.

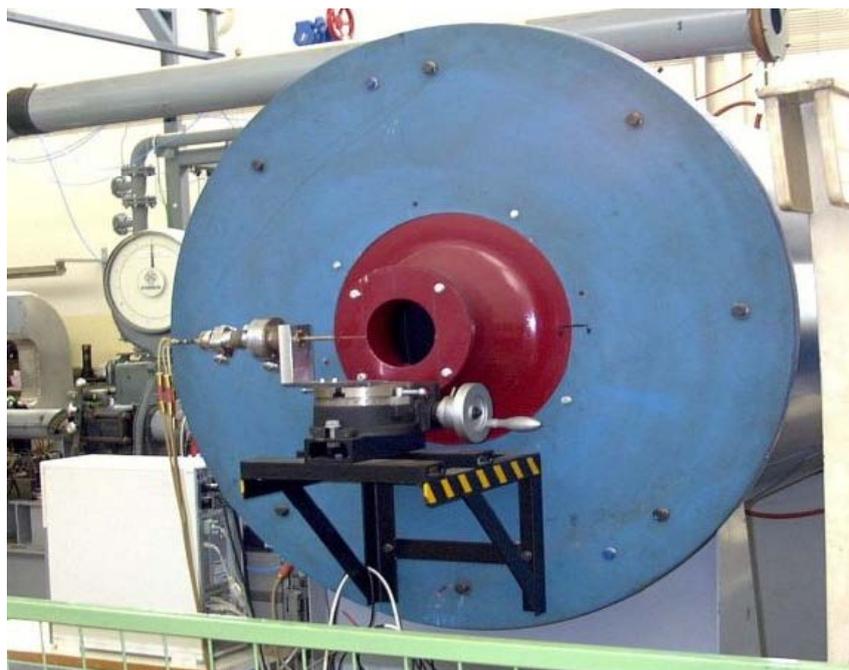


Abbildung 6.2.: Düse des Windkanals und die Vorrichtung zur Befestigung der Sonde [5]

Die Kalibrierung der Sonde wird bei einer repräsentativen Sondenreynoldszahl  $Re_d = 7.500$ , die mit der Strömungsgeschwindigkeit  $w$  und der Breite des Sondenkopfes  $d$  (siehe Abb.3.2) gebildet wird, durchgeführt.

In der Tabelle 6.2 ist zu sehen wie hoch die Drehzahl eingestellt werden soll, um bei allen drei Sonden  $Re_d = 7.500$  zu gewährleisten.

Art der Sonde	$d$ [mm]	$n$ [ $min^{-1}$ ]	$w$ [m/s]
SVUSS/3 Kobra-Sonde	2.4	1000	48.9
AVA Trapez-Sonde Nr. 110	3.3	727	35.3
AVA Zylinder-Sonde Nr. 43	3.0	800	38.8

Tabelle 6.2.: Werte bei  $Re_d = 7.500$

In der Abb. 6.3 ist ein Blockschaltbild des bei der Kalibrierung verwendeten Messdatenerfassungssystems dargestellt.

Nachdem die Sonde dem Freistrahle ausgesetzt ist, werden der um den Umgebungsdruck verminderte Totaldruck  $p_t - p_u$  und Bohrungsdrücke  $p_1 - p_u$ ,  $p_2 - p_u$  und  $p_3 - p_u$  durch den Druckmessstellenumschaltger (FCO 91 Mk II) erfasst. FCO 91 Mk II ermöglicht den Anschluss von mehreren Druck-Eingängen an einen einzigen piezoresistiven Druckaufnehmer (Honeywell 186PC03D).

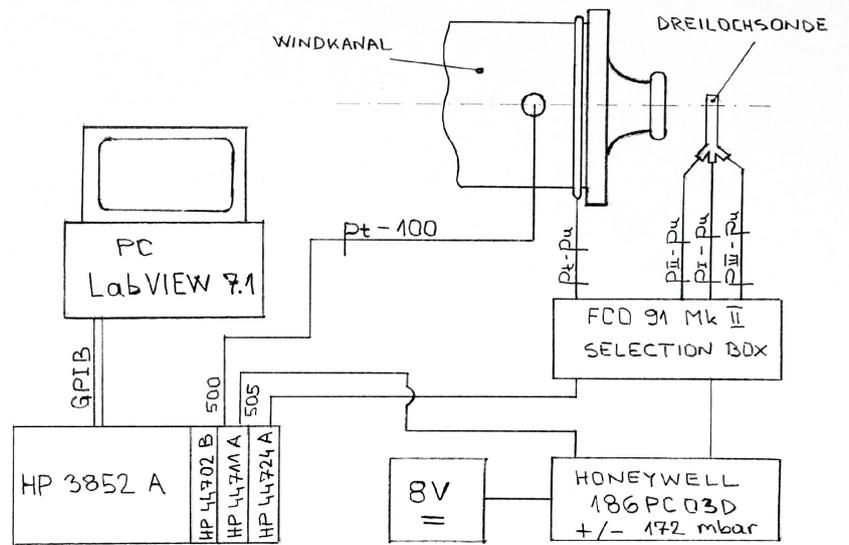


Abbildung 6.3.: Blockschaltbild des Systems zur Messdatenerfassung

FCO 91 Mk II leitet die erfassten Drucksignale an den Honeywell, wo diese Drucksignale in elektrische umgewandelt werden. Honeywell wird mit der DC Spannung von 8V versorgt. Alle Signale werden von dem Datenerfassungs- und Steuerungssystem (HP 3852 A) erfasst. HP 3852 A hat einen Multiplexer (HP 44711 A) und ein 13-Bit-High-Speed-Voltmeter (HP 44702 B), die zum Erfassen der von den Honeywell und dem Pt100 Widerstandsthermometer gelieferten Spannungen dienen und einen Digitalausgang (HP 44724A), der das FCO 91 Mk II steuert. Die erfassten Signale werden durch einen GPIB-Bus an den PC geleitet. Durch die installierte Software LabVIEW 7.1 werden die Daten bearbeitet und gespeichert.

Abb.6.4 zeigt die Kennlinie des verwendeten piezoresistiven Druckaufnehmer.

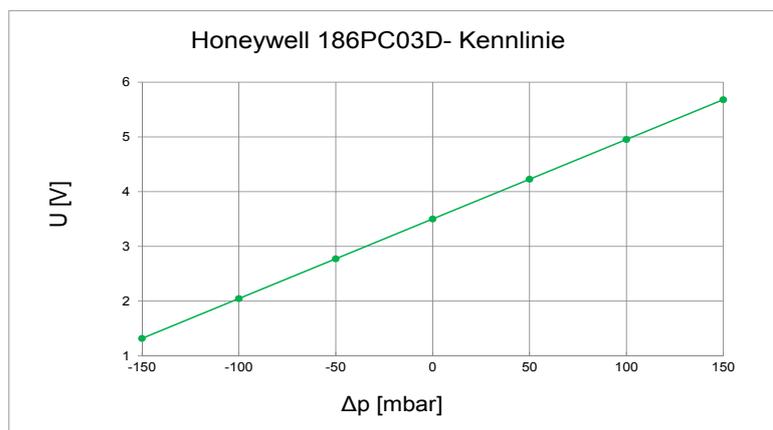


Abbildung 6.4.: Kennlinie des Honeywell 186PC03D

Die Druckumwandler-Kennlinie weist einen linearen Verlauf auf, der durch die Beziehung (6.1) ausgedrückt werden kann.

$$U = \frac{7}{500} \Delta p [\text{mbar}] + 3.5 . \quad (6.1)$$

Durch sie ist die Umwandlung der Drücke in der Spannung über den bestimmten Bereich (Honeywell 186PC03D hat einen Betriebsbereich  $\pm 172$  mbar) festgelegt.

In der Tabelle 6.3 sind die technischen Daten des Honeywell 186PC03D zusammengefasst.

Name	Honeywell 186PC03D
Aufgabe	Umwandlung des Drucks in Spannung
Betriebsbereich	$\pm 172$ mbar
Spannweite	344 mbar
Verhalten	linear
Typ der Messung	piezoresistiv

Tabelle 6.3.: Technische Daten des Honeywell 186PC03D

## 7. Messdatenauswertung durch die traditionelle Methode nach Treaster und Yocum

Durch das im Labor durchgeführte Kalibrierverfahren wurden für alle drei Dreilochsonden für jede Winkelposition folgende Messdaten erhalten:

- Temperatur im Windkanal  $t$
- Totaldruck im Windkanal  $p_t$
- Bohrungsdrücke, die durch die Sonden erfasst wurden  $p_i$

Außerdem wurden auch Umgebungstemperatur  $t_u$  und Umgebungsdruck  $p_u$  gemessen.

Alle diese Daten wurden in Microsoft-Excel hinzugefügt und durch die entsprechenden mathematischen Beziehungen folgende Größen berechnet:

- Geschwindigkeit  $w$
- Mach-Zahl  $Ma$
- Sondenreynoldszahl  $Re_d$
- Bohrungskoeffizienten  $k_i$
- Richtungskoeffizient  $k_\beta$ , Totaldruckkoeffizient  $k_t$  und statischer Druckkoeffizient  $k_s$

Anschließend wurden Bohrungskoeffizienten  $k_i$  und Kalibrierkoeffizienten  $k_\beta$ ,  $k_t$  und  $k_s$  von allen drei Sonden graphisch dargestellt.

### 7.1. Experimentelle und theoretische Koeffizienten

In diesem Abschnitt sind die Bohrung- und Kalibrierkoeffizienten bei der repräsentativen Sondenreynoldszahl  $Re_d=7.500$  für jede einzelne Sonde graphisch dargestellt.

Diese Diagramme vergleichen die im Labor gemessenen Werte durch traditionelle Kalibrierung nach Treaster und Yocum mit den Werten der Methode der Stromlinienprojektion, die eine rein geometrische Methode ist.

Die AVA Zylinder-Sonde Nr.43 wurde zusätzlich durch die Methode der Potentialströmung (steckt Strömungsmechanik dahinter) ausgewertet.

### 7.1.1. SVUSS/3 Kobra-Sonde

In den Abb. 7.1, Abb. 7.2 und Abb. 7.3 sind die Bohrungskoeffizienten  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  der SVUSS/3 Kobra-Sonde in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $\Delta\beta$  dargestellt.

In der Abb. 7.1 kann man sehen, dass beide Kurven ähnlichen Verlauf aufweisen. Die Methode der Stromlinienprojektion ist eine rein geometrische Methode und kann die Strömungsablösung an dem Sondenkopf nicht berücksichtigen. Bei ansteigendem Anströmwinkel löst sich die Strömung teilweise von der Sondenkopfkontur ab. Diese Ablösung ist mit der Druckänderung verbunden und ist ein Grund, der die Differenz zwischen diesen zwei Kurven außerhalb des Bereichs von ca.  $\Delta\beta \approx -30^\circ$  bis  $\Delta\beta \approx 15^\circ$  verursacht.

Es ist noch zu bemerken, dass die traditionelle Kurve eine Asymmetrie zwischen negativen und positiven Anströmwinkeln zeigt. Die Ursache kann eine kleine Abweichung der linken bzw. rechten Sondenkopfsseite im Bezug auf die Sondenlängsachse sein. Wie es erwartet wurde, maximaler Wert des Bohrungskoeffizienten  $k_1 \approx 1$  liegt bei  $\Delta\beta = 0^\circ$  und ist mit dem Wert der Stromlinienprojektionskurve übereinstimmend.

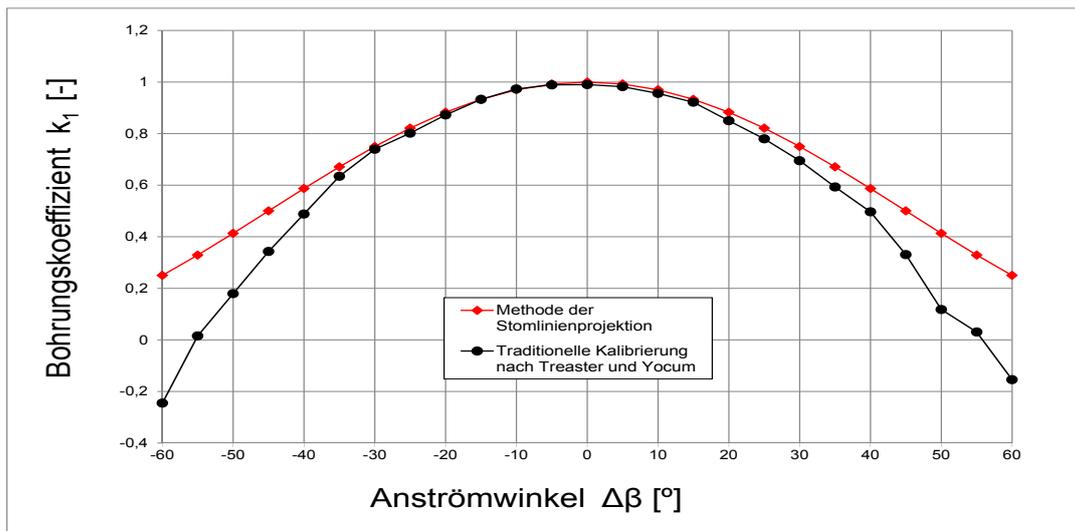


Abbildung 7.1.: Bohrungskoeffizient  $k_1$  der SVUSS/3 Kobra-Sonde

Bei den zwei anderen Bohrungskoeffizienten  $k_2$  und  $k_3$ , wie man aus der Abb. 7.2 bzw. Abb. 7.3 sehen kann, ist der Einfluss der Strömungsablösung ebenfalls zu beobachten. Auf der Luvseite der Sonde bei  $k_2$  für  $\Delta\beta > 0^\circ$  und bei  $k_3$  für  $\Delta\beta < 0^\circ$  gibt es keine Ablösung und aus diesem Grund weichen die beiden Kurven in diesen Bereichen nur wenig voneinander ab ( $k_2$  etwas mehr als  $k_3$ ). Dies ist nicht der Fall auf der Leeseite bei  $k_2$  für  $\Delta\beta < 0^\circ$  und bei  $k_3$  für  $\Delta\beta > 0^\circ$ , wo die Differenz zwischen gemessenen und theoretischen Werten unakzeptabel hoch ist. D.h. die Methode der Stromlinienprojektion kann nicht in diesem Bereich die tatsächlichen

## 7.1. EXPERIMENTELLE UND THEORETISCHE KOEFFIZIENTEN

Werte vorhersagen. Prinzipiell ist die theoretische Methode bei der Schätzung der  $k_2$ - und  $k_3$ -Koeffizienten (trapezförmige Sonden) außerhalb des Bereiches  $[-\delta, (90^\circ-\delta)]$  für  $k_2$  und  $[(\delta-90^\circ), \delta]$  für  $k_3$  nicht relevant.

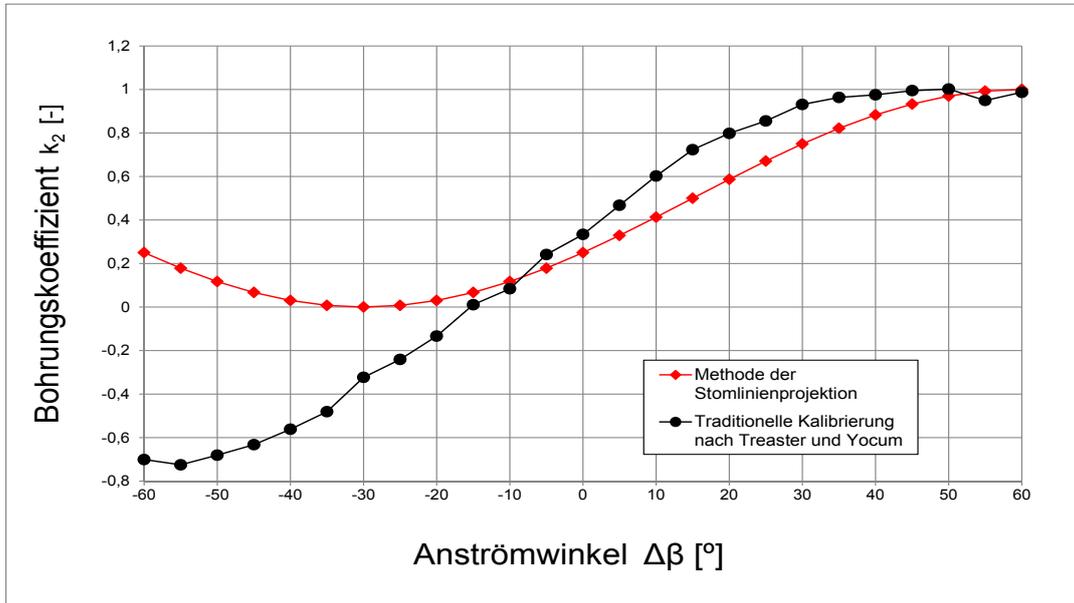


Abbildung 7.2.: Bohrungskoeffizient  $k_2$  der SVUSS/3 Kobra-Sonde

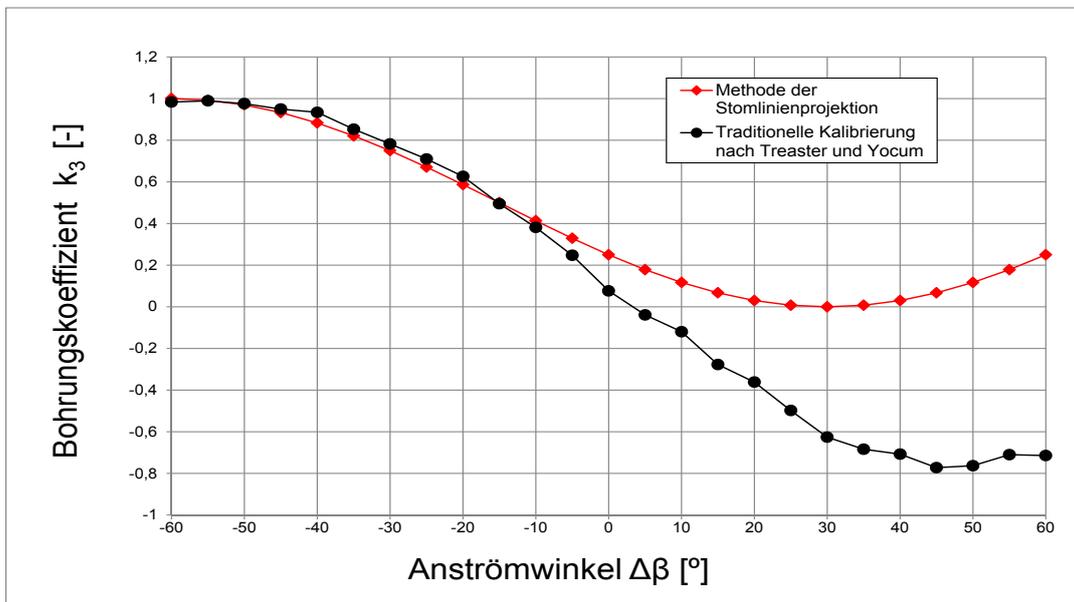


Abbildung 7.3.: Bohrungskoeffizient  $k_3$  der SVUSS/3 Kobra-Sonde

In den Abb. 7.4, Abb. 7.5 und Abb. 7.6 sind der Richtungskoeffizient  $k_\beta$ , der Totaldruckkoeffizient  $k_t$  und der statische Druckkoeffizient  $k_s$  der SVUSS/3 Kobra-Sonde in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $\Delta\beta$  dargestellt.

Wie man in der Abb. 7.4 sehen kann, liefern beide Methoden sowohl experimentelle als auch theoretische sehr ähnliche Ergebnisse. Außerhalb des Bereichs von  $\Delta\beta \approx \pm 40^\circ$  erfährt die Stromlinienprojektionskurve stärkere Krümmung als die Kurve der traditionellen Kalibrierung nach Treaster und Yocum. Ab dem Winkelbereich  $\Delta\beta \approx \pm 40^\circ$  für die Methode der Stromlinienprojektion und  $\Delta\beta \approx \pm 45^\circ$  für die traditionelle Methode nach Treaster und Yocum wurde der Betriebsbereich der SVUSS/3 Kobra-Sonde durch die Entstehung der Singularitäten begrenzt. Durch die Anwendung der Methoden zur Erweiterung des Betriebsbereiches sind diese Singularitäten aufgehoben und im Kap. 8 dargestellt.

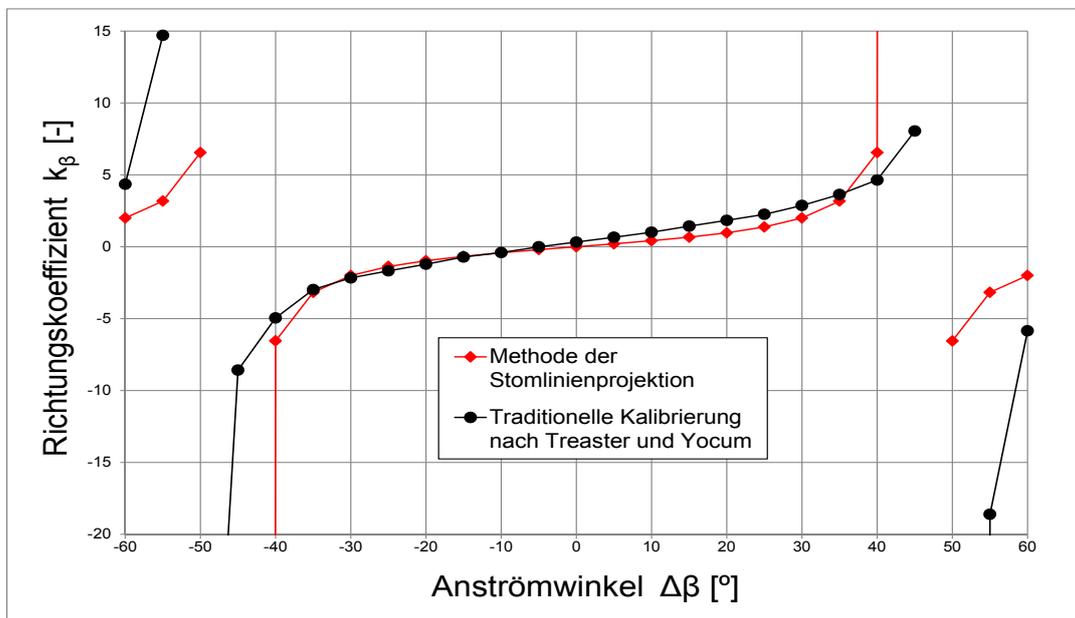


Abbildung 7.4.: Richtungskoeffizient  $k_\beta$  der SVUSS/3 Kobra-Sonde

Wichtig ist es zu erwähnen, dass die experimentelle Kurve stärkere Steigung aufweist, als die theoretische. Diese Steigung charakterisiert die Empfindlichkeit der Sonde in Abhängigkeit des Anströmwinkels (siehe Abschnitt 4.4.3).

Bei dem Totaldruckkoeffizienten (Abb. 7.5) passiert dasselbe. Im Winkelbereich ca.  $\Delta\beta = \pm 30^\circ$  sind die Koeffizientenkurven nahezu identisch und danach lösen sich die Kurven voneinander ab. Die Bereiche mit der singulären Stelle sind dieselben wie bei  $k_\beta$ .

Den größten Unterschied zeigen die Kurven des statischen Druckkoeffizienten (Abb. 7.6). Es sieht so aus, als ob der Anströmwinkel im Bereich  $\Delta\beta \approx \pm 45^\circ$  keinen Einfluss auf den Verlauf

## 7.1. EXPERIMENTELLE UND THEORETISCHE KOEFFIZIENTEN

des statischen Druckkoeffizienten nach der traditionellen Kalibrierung im Gegensatz zur theoretischen Methode hat. Für diesen Verlauf der experimentellen Kurve sind  $k_2$  und  $k_3$  (leeseitige Koeffizienten) verantwortlich.

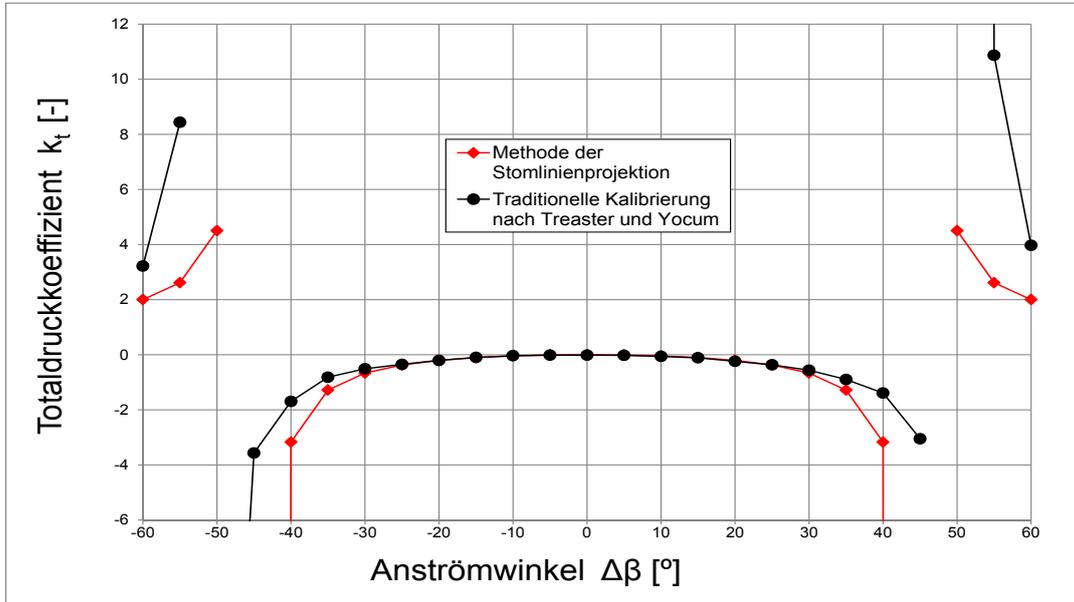


Abbildung 7.5.: Totaldruckkoeffizient  $k_t$  der SVUSS/3 Kobra-Sonde

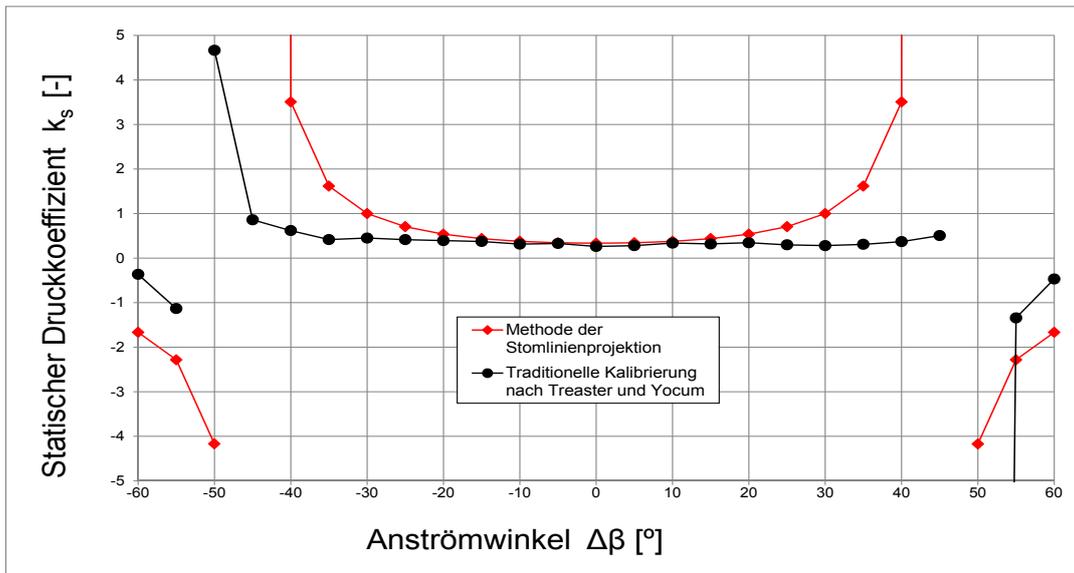


Abbildung 7.6.: Statischer Druckkoeffizient  $k_s$  der SVUSS/3 Kobra-Sonde

### 7.1.2. AVA Trapez-Sonde Nr.110

Wie schon im Kapitel 3 erklärt wurde, hat die AVA Trapez-Sonde Nr.110 hat einen identischen Flankenwinkel  $\delta=30^\circ$  wie SVUSS/3 Kobra-Sonde. Aus diesem Grund sind die Stromlinienprojektionskurven vollständig identisch für beide Sonden. Auch sollte man ähnliche Ergebnisse für die experimentellen Kalibrierkurven nach Treaster und Yocum erwarten.

In den Abb. 7.7, Abb. 7.8 und Abb.7.9 sind die Bohrungskoeffizienten  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  der AVA Trapez Sonde Nr.110 in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $\Delta\beta$  dargestellt.

Der Bohrungskoeffizient  $k_1$  (siehe Abb. 7.7), der durch die Messung erfasst wurde, zeigt einen ähnlichen Verlauf wie der theoretische  $k_1$ -Koeffizient. Im Vergleich zur Kobra-Sonde, die einen kleineren Sondenkopf besitzt (siehe Tab. 3.1), nimmt die Differenz zwischen experimentellen und theoretischen Ergebnissen zu. Wie auch bei der Kobra-Sonde weisen die gemessenen  $k_1$ -Koeffizienten die Asymmetrie, die durch Abweichungen des Sondenkopfes aufgrund der Fertigungstoleranz verursacht wurden, auf.

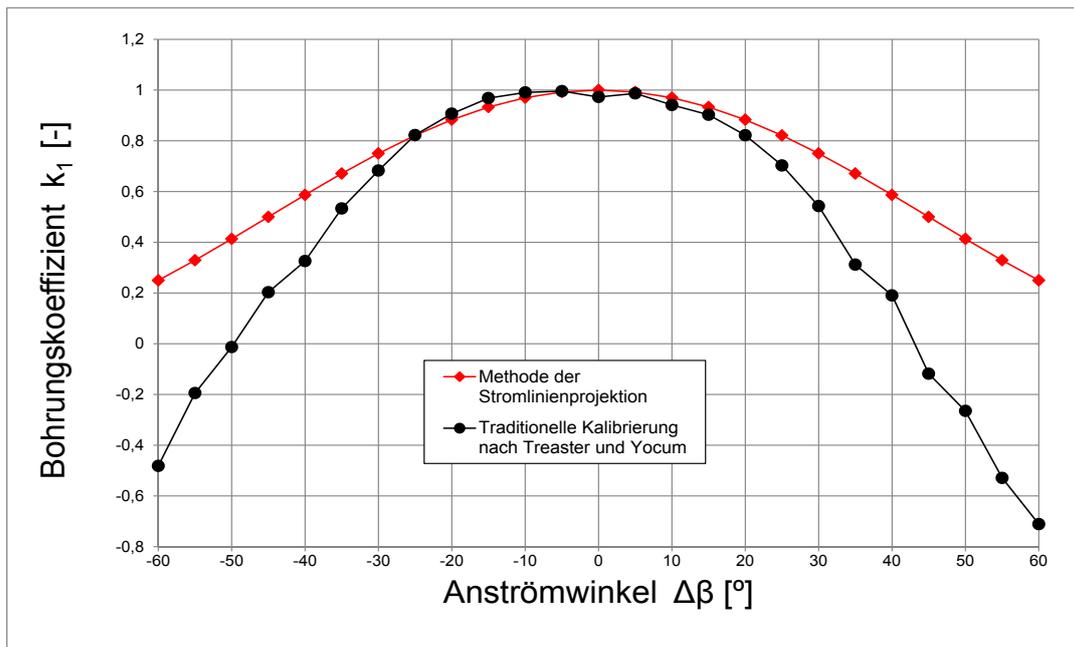


Abbildung 7.7.: Bohrungskoeffizient  $k_1$  der AVA Trapez-Sonde Nr.110

Bei den Bohrungskoeffizienten  $k_2$  und  $k_3$  (Abb. 7.8 bzw. Abb.7.9) sind ebenfalls erhebliche Unterschiede auf der SLeeseite (für  $k_2$  bei  $\Delta\beta < 0^\circ$  und für  $k_3$  bei  $\Delta\beta > 0^\circ$ ) zwischen diesen zwei Methoden zu sehen. Mit steigendem Anströmwinkel vergrößert sich diese Differenz, da die Methode der Stromlinienprojektion nur positive Werte von  $k_2$  und  $k_3$  liefert, was der Wirklichkeit (auf der Leeseite) nicht entspricht.

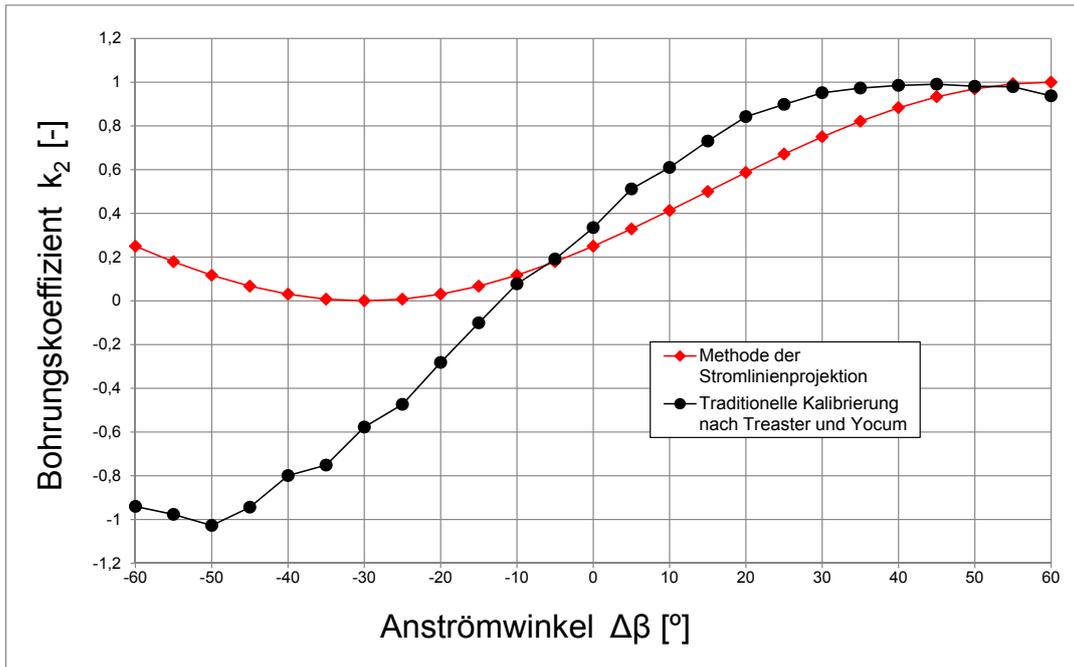


Abbildung 7.8.: Bohrungskoeffizient  $k_2$  der AVA Trapez-Sonde Nr.110

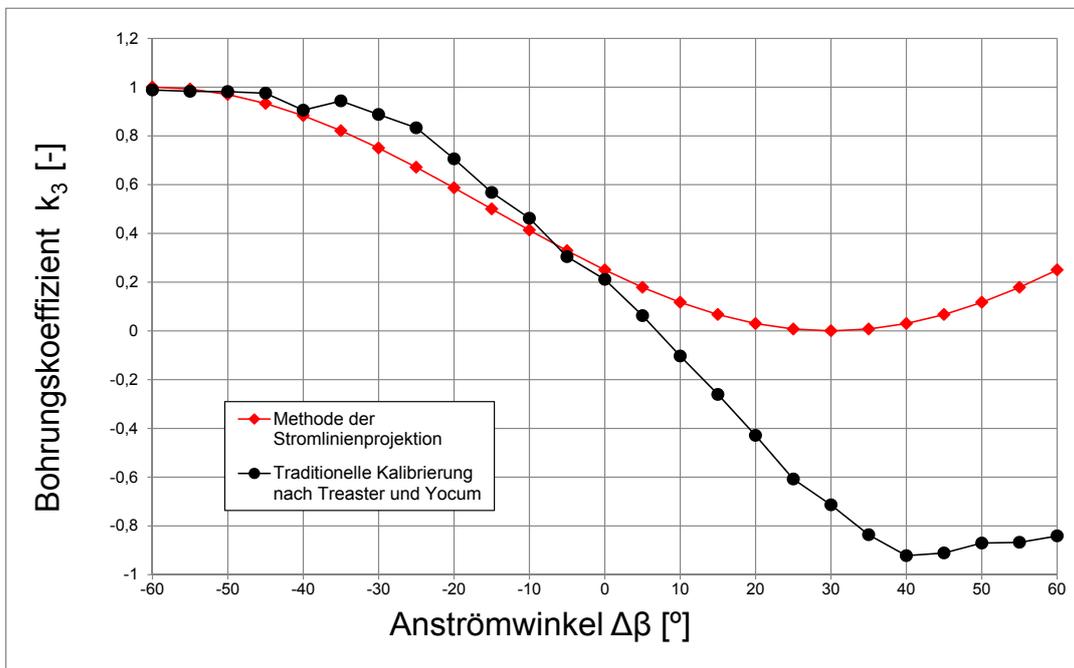


Abbildung 7.9.: Bohrungskoeffizient  $k_3$  der AVA Trapez-Sonde Nr.110

In den Abb. 7.10, Abb. 7.11 und Abb. 7.12 sind der Richtungskoeffizient  $k_\beta$ , der Totaldruckkoeffizient  $k_t$  und der statische Druckkoeffizient  $k_s$  der AVA Trapez-Sonde Nr.110 in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $\Delta\beta$  dargestellt.

Diese drei Koeffizienten sind enorm wichtig für die praktische Anwendung der Sonde. Wie man in den Abb. 7.10 und 7.11 sehen kann, liegt eine relativ gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und theoretischen Ergebnissen beim Richtungskoeffizienten  $k_\beta$  und beim Totaldruckkoeffizienten  $k_t$  vor.

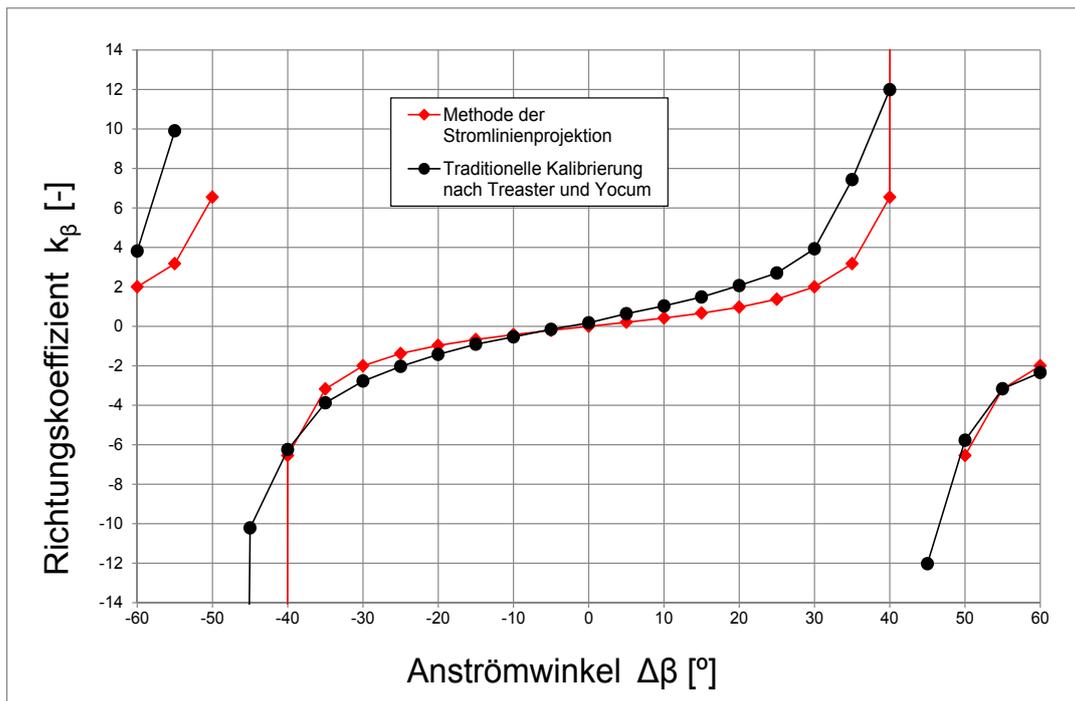


Abbildung 7.10.: Richtungskoeffizient  $k_\beta$  der AVA Trapez-Sonde Nr.110

Der schon erwähnte Unterschied bei den Bohrungskoeffizienten  $k_2$  und  $k_3$  spielt eine große Rolle bei statischem Druckkoeffizienten  $k_s$  (Abb. 7.12). Der Zähler in der Gl. (4.13) enthält ihre Summe und der statische Druckkoeffizient wird dadurch sehr stark beeinflusst. In der Abb. 7.12 ist dieser Einfluss visualisiert, wo eine regelmäßige Datenstreuung im Bereich  $\Delta\beta \approx \pm 40^\circ$  um  $k_s \approx 0,3$  zu sehen ist. Außerhalb dieses Bereichs ist es sehr schwierig mit den erfassten Messdaten den Verlauf der  $k_s$ -Kurve in der Nähe der singulären Stellen abzuschätzen.

Beide Sonden, sowohl kobraförmige als auch trapezförmige, weisen innerhalb der Zone, wo keine Singularität existiert, einen nahezu identischen Verlauf des experimentellen  $k_s$ -Koeffizienten auf.

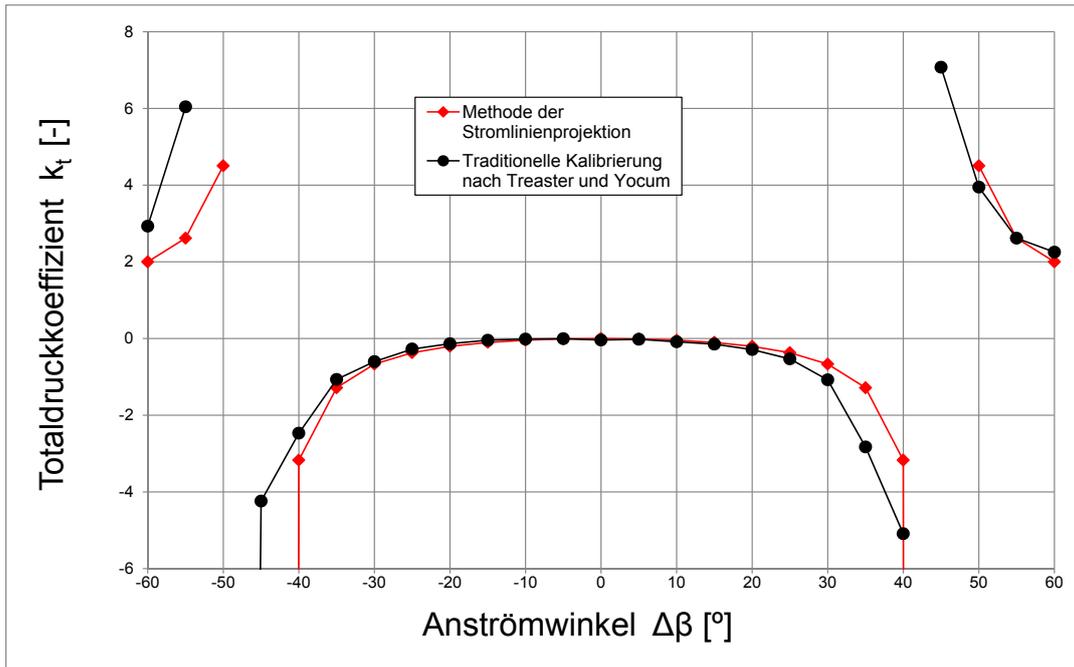


Abbildung 7.11.: Totaldruckkoeffizient  $k_t$  der AVA Trapez-Sonde Nr.110

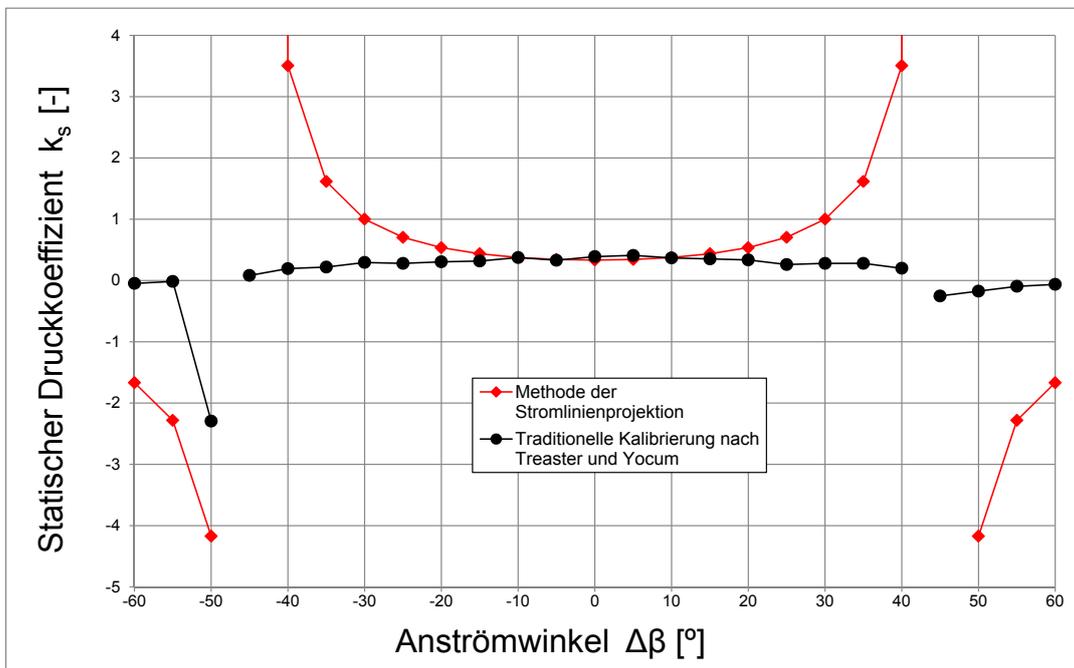


Abbildung 7.12.: Statischer Druckkoeffizient  $k_s$  der AVA Trapez-Sonde Nr.110

### 7.1.3. AVA Zylinder-Sonde Nr.43

In den Abb. 7.13, Abb. 7.14 und Abb. 7.15 sind die Bohrungskoeffizienten  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $\Delta\beta$  dargestellt. Im Gegensatz zu den zwei anderen Sonden ist auf diese Sonde zusätzlich die Methode der Potentialströmung angewendet.

In der Abb. 7.13 ist zu sehen, dass der traditionelle  $k_1$ -Koeffizient einen maximalen Wert bei  $\Delta\beta=0^\circ$  hat und sehr symmetrische Verteilung aufweist. D.h. die Sonde ist perfekt nach der Strömung ausgerichtet. Dies beweist auch die Schnittstelle der Koeffizienten  $k_2$  und  $k_3$  bei einem Wert  $\approx -0,25$  für  $\Delta\beta=0^\circ$ . Aufgrund dieser Beobachtungen kann man sagen, dass die AVA Zylinder-Sonde Nr.43 sehr präzise hergestellt wurde. Im Bereich  $\Delta\beta < -30^\circ$  für  $k_2 \approx -0,56$  und  $\Delta\beta > 30^\circ$  bei  $k_3 \approx -0,56$  nehmen die beiden Kurven einen konstanten Verlauf an, was bei der Kobra- und Trapez-Sonde nicht vorkommt. Zwei andere Methoden schätzen in einer angemessenen Genauigkeit den Bohrungskoeffizienten  $k_1$  ab. Nur bei größeren Anströmwinkeln weichen die Werte der theoretischen Methoden von den traditionellen Werten ab.

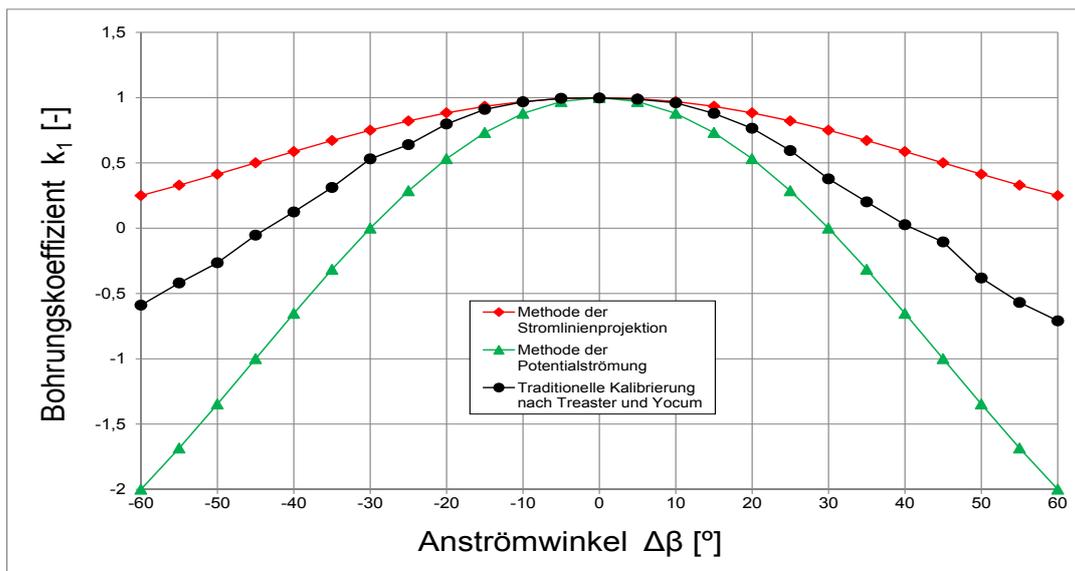


Abbildung 7.13.: Bohrungskoeffizient  $k_1$  der AVA Zylinder-Sonde Nr.43

Wenn man die Bohrungskoeffizienten  $k_2$  und  $k_3$  (Abb. 7.14 und 7.15) betrachtet, ist es ersichtlich, dass die Methode der Potentialströmung im Vergleich zur Stromlinienprojektion auch negative Werte für  $k_2$  und  $k_3$  liefert. Wie bei der  $k_1$ -Kurve, weichen die leeseitigen Koeffizienten von den experimentellen Ergebnissen ab. Bei der Potentialströmung ist diese Abweichung in einem größeren Maß. Der Grund sind wahrscheinlich große seitliche Kopfbohrungen, die diese Methode nicht berücksichtigt. Diese Methode geht von einer glatten Oberfläche des Zylinders aus. Wie die Methode der Strömlinienprojektion, hat auch die Methode der Potentialströmung einen

## 7.1. EXPERIMENTELLE UND THEORETISCHE KOEFFIZIENTEN

bestimmten Bereich in dem sie mit der akzeptablen Genauigkeit der  $k_2$ - und  $k_3$ -Koeffizienten vorhersagen kann. Dieser Bereich ist  $[(\delta-90^\circ), \delta]$  für  $k_2$  und  $[-\delta, 90^\circ-\delta]$  für  $k_3$ .

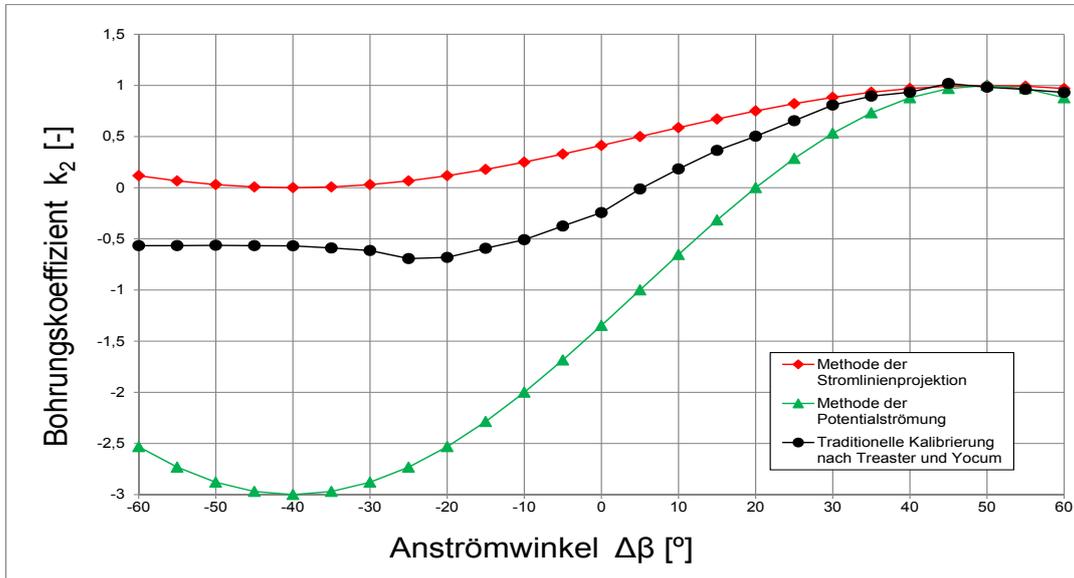


Abbildung 7.14.: Bohrungskoeffizient  $k_2$  der AVA Zylinder-Sonde Nr.43

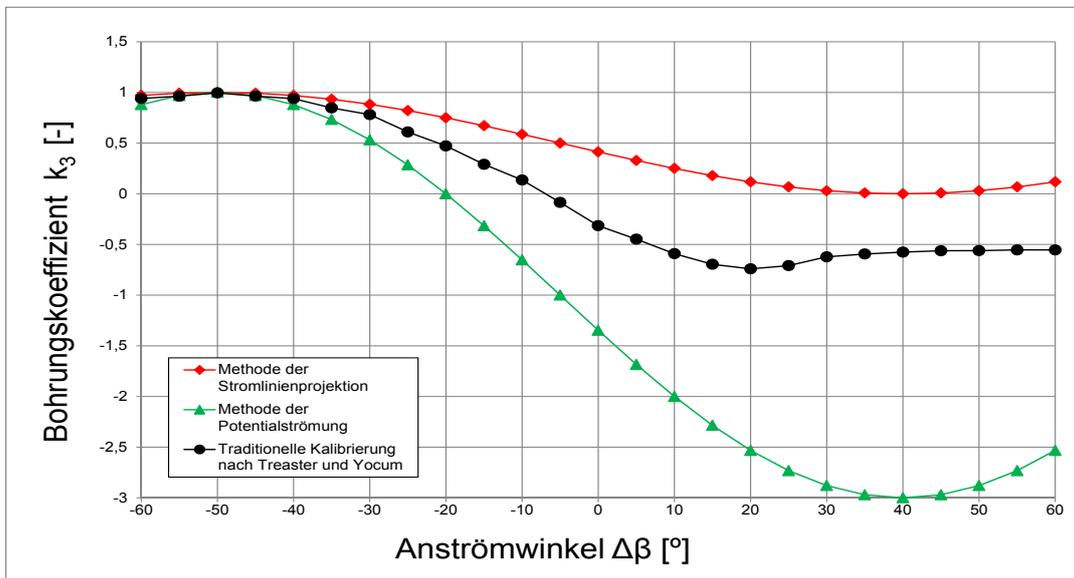


Abbildung 7.15.: Bohrungskoeffizient  $k_3$  der AVA Zylinder-Sonde Nr.43

In den Abb. 7.16, Abb. 7.17 und Abb. 7.18 sind der Richtungskoeffizient  $k_\beta$ , der Totaldruckkoeffizient  $k_t$  und der statische Druckkoeffizient  $k_s$  der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $\Delta\beta$  dargestellt.

Aus dem Grund, dass die Methode der Strömlinienprojektion und die Methode der Potentialströmung vollständig identische Ergebnisse für den Richtungskoeffizienten  $k_\beta$  und den Totaldruckkoeffizienten  $k_t$  liefern, sind in der Abb. 7.16 und 7.17 nur zwei Kurven zu sehen. Der Richtungskoeffizient  $k_\beta$  (Abb. 7.16), der durch die Messung erfasst wurde, zeigt eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit den beiden Methoden im Bereich zwischen  $\Delta\beta \approx -30^\circ$  und  $\Delta\beta \approx 25^\circ$ . Es ist noch zu sehen, dass die theoretische Methode einen Betriebsbereich der Sonde von  $\Delta\beta \approx \pm 40^\circ$  abschätzt, was durch die experimentelle Kalibrierung ohne der Erweiterung des Betriebsbereichs nicht erreicht werden könnte.

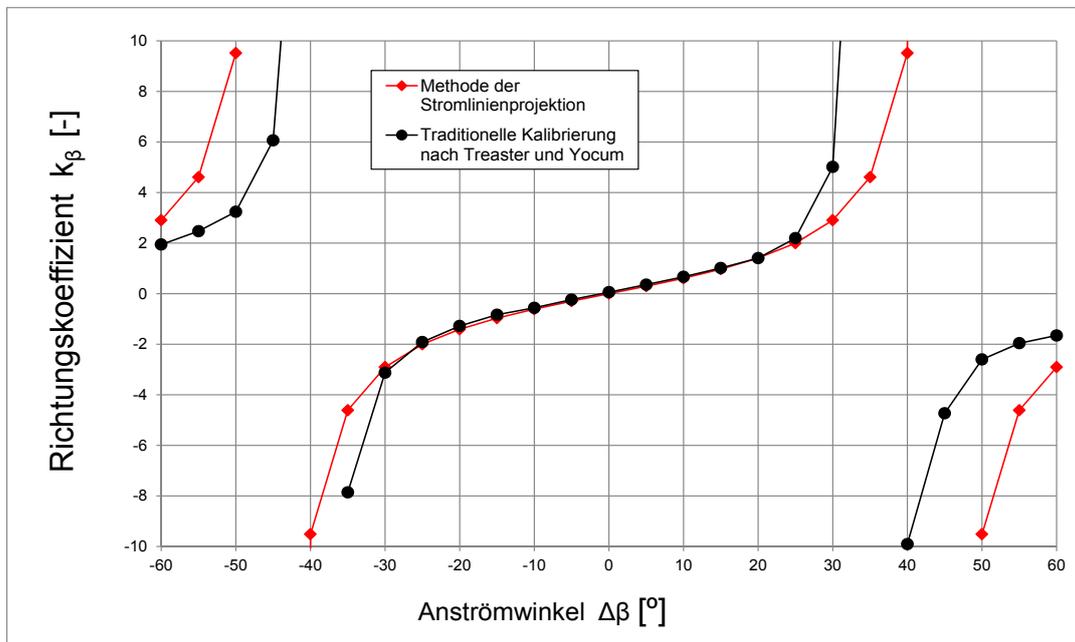


Abbildung 7.16.: Richtungskoeffizient  $k_\beta$  der AVA Zylinder-Sonde Nr.43

Ähnliches wurde bei dem Totaldruckkoeffizienten  $k_t$  (Abb. 7.17) festgestellt, wo beide Kurven ähnlichen Verlauf im Bereich zwischen  $\Delta\beta \approx -30^\circ$  und  $\Delta\beta \approx 25^\circ$  aufweisen. Kleinere Abweichungen sind außerhalb dieses Bereichs in der Nähe der Zonen mit der Singularität beobachtet.

Wie bei den zwei anderen Sonden auch, ist bei der Zylinder-Sonde die theoretische Methode nicht in der Lage den tatsächlichen statischen Druckkoeffizienten  $k_s$  (Abb. 7.18), der durch die experimentelle Kalibrierung ermittelt wurde, mit der sinnvollen Genauigkeit zu schätzen.

## 7.1. EXPERIMENTELLE UND THEORETISCHE KOEFFIZIENTEN

Obwohl die Stromlinienprojektionskurve im Gegensatz zur Potentialströmungskurve ähnlichen Verlauf wie die experimentelle Kurve hat, ist sie zu weit von ihr entfernt, um den statischen Druckkoeffizient richtig abzuschätzen.

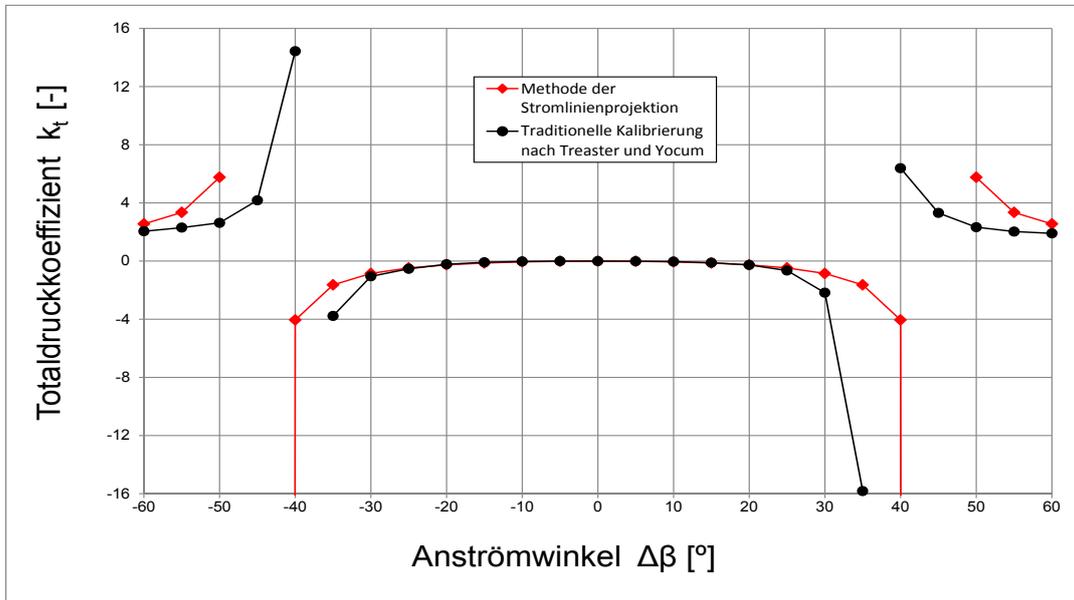


Abbildung 7.17.: Totaldruckkoeffizient  $k_t$  der AVA Zylinder-Sonde Nr.43

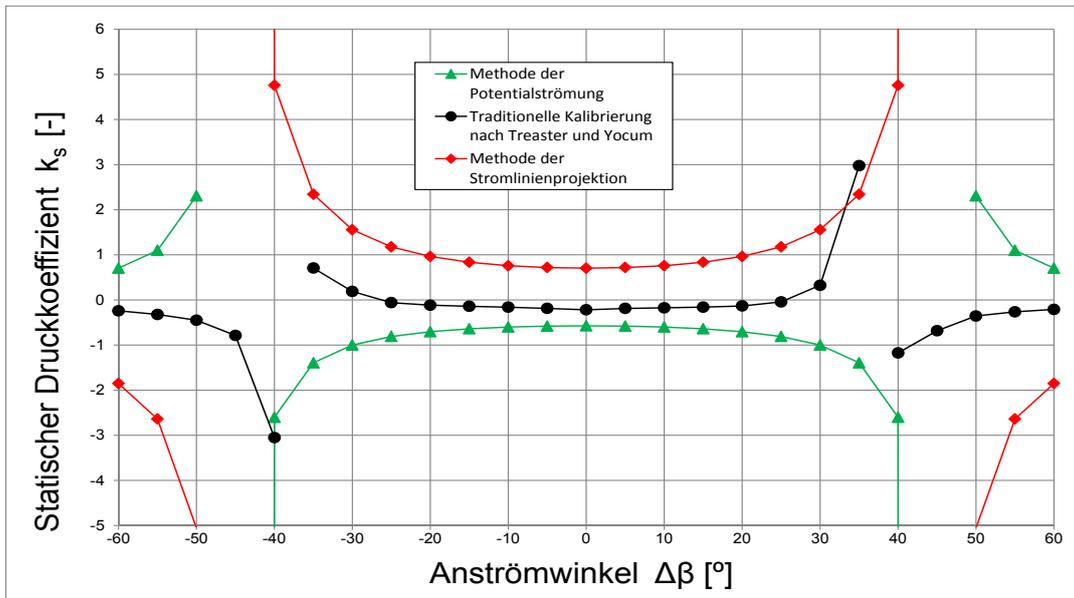


Abbildung 7.18.: Statischer Druckkoeffizient  $k_s$  der AVA Zylinder-Sonde Nr.43

## 7.2. Vergleich der traditionellen Koeffizienten

Die folgenden Diagramme vergleichen die im Labor gemessenen Koeffizienten von allen drei Dreilochsonden.

Obwohl die Bohrungskoeffizienten  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  nicht direkt für die Geschwindigkeits- und die Anströmwinkelberechnung verwendet werden, sondern durch sie die Kalibrierkoeffizienten  $k_\beta$ ,  $k_t$  und  $k_s$  berechnet werden, wurden sie in den Abb. 7.19, Abb. 7.20 und Abb. 7.21 verglichen.

In der Abb. 7.19 sieht man deutlich, dass alle Koeffizienten bei dem Anströmwinkel  $\Delta\beta=0^\circ$  maximalen Wert aufweisen. D.h. die Strömung trifft theoretisch senkrecht auf die zentrale Bohrung auf (Staupunkt), sodass die Geschwindigkeit in diesem Punkt verschwindet. Die kinetische Energie des strömenden Fluids wird in Druck umgewandelt und im Vergleich mit anderen Stellen auf der Sondenkopfoberfläche hat der Druck hier den größten Wert. Danach weichen die  $k_1$ -Koeffizienten in einem akzeptablen Maß voneinander ab.

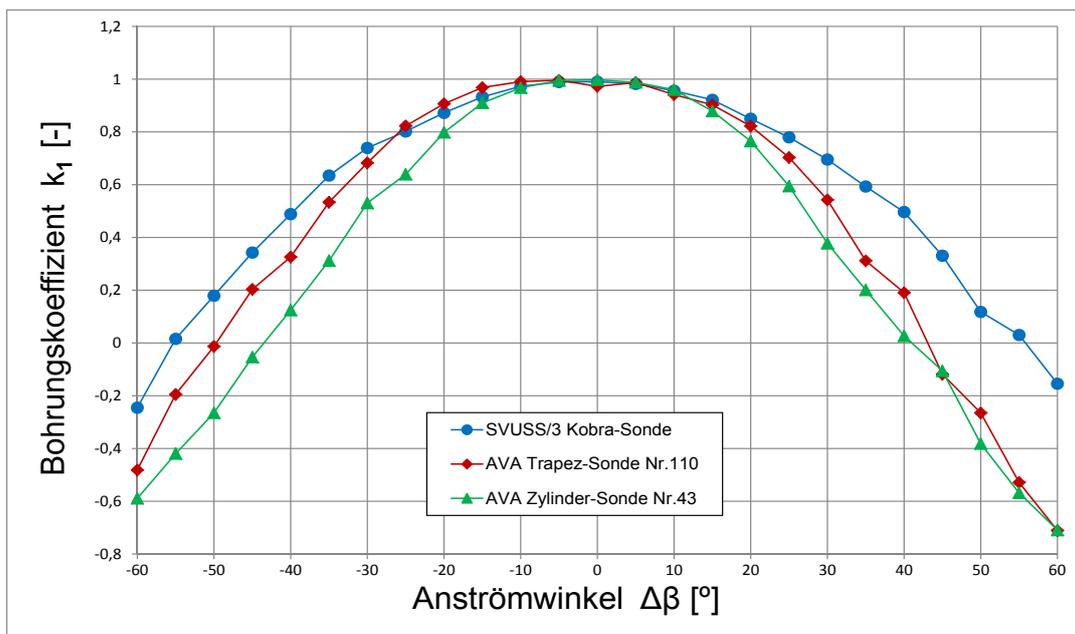


Abbildung 7.19.: Vergleich der Bohrungskoeffizienten  $k_1$

Wie aus der Abb. 7.20 ersichtlich ist, zeigen die  $k_2$ -Koeffizienten der Kobra und der Trapez-Sonde eine gute Übereinstimmung im Bereich  $\Delta\beta > -10^\circ$ . Für  $\Delta\beta < -10^\circ$  tritt eine Differenz auf. Im Vergleich zu ihr erfasst die Zylinder-Sonde viel kleinere Werte.

Bei den  $k_3$ -Koeffizienten (Abb. 7.21) ist ebenfalls gute Übereinstimmung zwischen den Koeffizienten zu erkennen. Auch hier wurde, wie bei den  $k_2$ -Koeffizienten, ein starker Unterschied bei

## 7.2. VERGLEICH DER TRADITIONELLEN KOEFFIZIENTEN

der Zylinder-Sonde im Gegensatz zu den zwei anderen Sonden (aufgrund ihrer verschiedenen Kopfgeometrie) festgestellt.

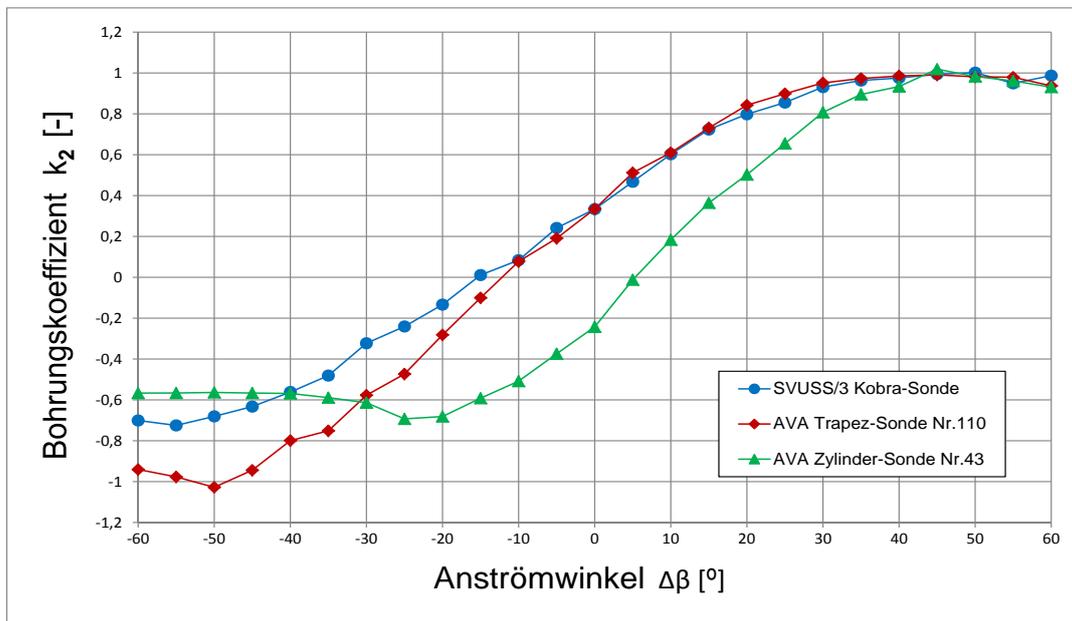


Abbildung 7.20.: Vergleich der Bohrungskoeffizienten  $k_2$

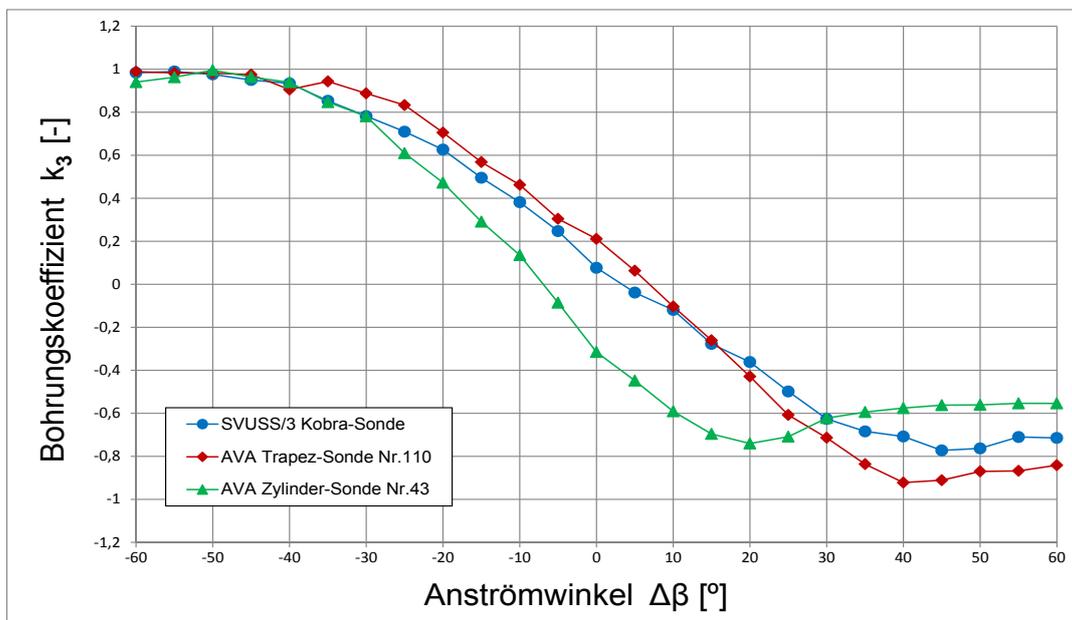


Abbildung 7.21.: Vergleich der Bohrungskoeffizienten  $k_3$

## 7.2. VERGLEICH DER TRADITIONELLEN KOEFFIZIENTEN

In den Abb. 7.22, 7.23 und 7.24 wurden die Kalibrierkoeffizienten  $k_\beta$ ,  $k_t$  und  $k_s$ , welche für den praktischen Sondeneinsatz bei der Geschwindigkeits- und der Anströmwindmessung von großem Interesse sind, dargestellt.

In der Abb. 7.22 wurden die Kalibrierkurven der Richtungskoeffizienten verglichen. Mit Hilfe dieser Kurven ist es möglich, den tatsächlichen Anströmwinkel der Strömung festzulegen. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, zeigen alle drei Kurven im Bereich  $\Delta\beta \approx \pm 25^\circ$  sehr ähnlichen Verlauf. Außerhalb dieses Bereichs ist die Sondenempfindlichkeit (siehe Abschnitt 4.4.3) gegen die kleinen Änderungen des Anströmwinkels sehr hoch und für jede Sonde unterschiedlich (abhängig von Sondenkopfeigenschaften). In der Abb. 7.22 ist noch zu sehen, dass der Betriebsbereich der Zylinder-Sonde im Vergleich zu den zwei anderen Sonden etwas kleiner ist.

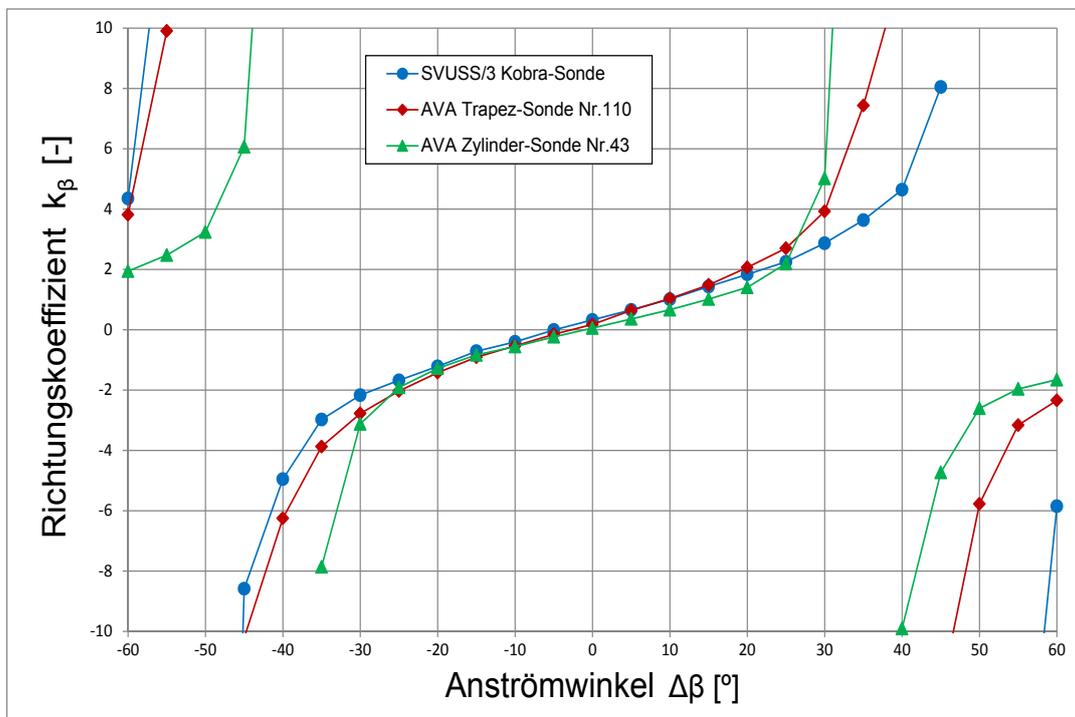


Abbildung 7.22.: Vergleich der Richtungskoeffizienten  $k_\beta$

Aus der Abb. 7.23 ist zu erkennen, dass alle drei  $k_t$ -Kurven im Bereich  $\Delta\beta \approx \pm 25^\circ$  sehr ähnlichen Verlauf aufweisen. Außerhalb dieses Bereichs erfahren sie unterschiedlich starke Krümmungen und entfernen sich voneinander.

Bei den statischen Druckkoeffizienten (Abb. 7.24) sieht es anders aus. Während die Kobra- und Trapez-Sonde akzeptable Ähnlichkeit im Bereich zwischen  $\Delta\beta \approx -25^\circ$  und  $\Delta\beta \approx 35^\circ$  zeigen, weicht die Kurve der Zylinder-Sonde sehr stark von ihnen ab.

## 7.2. VERGLEICH DER TRADITIONELLEN KOEFFIZIENTEN

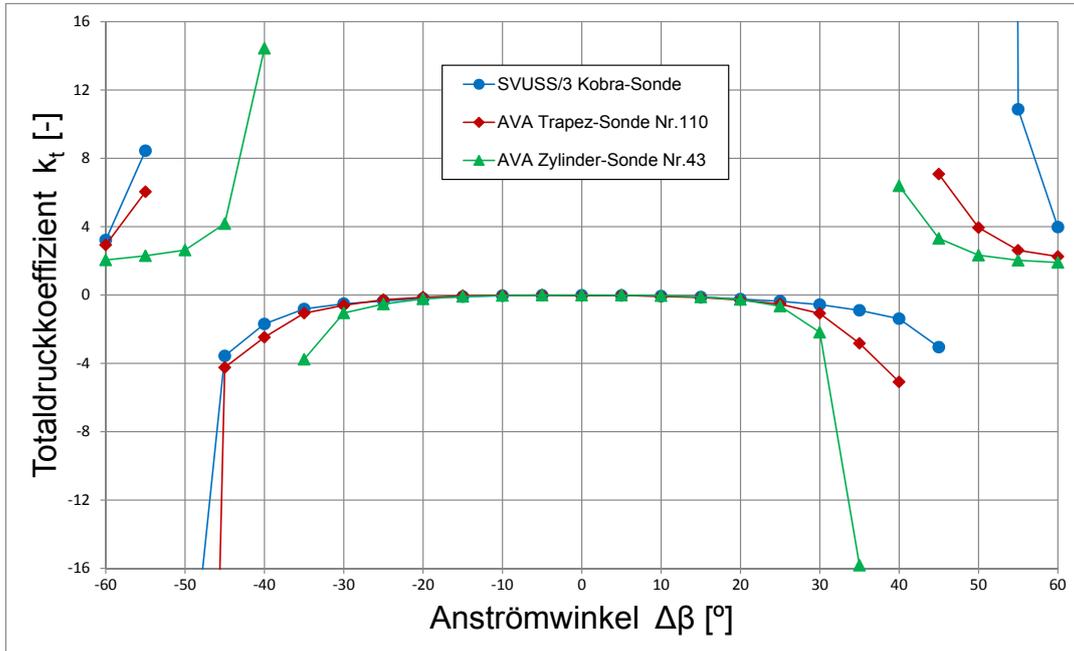


Abbildung 7.23.: Vergleich der Totaldruckkoeffizienten  $k_t$

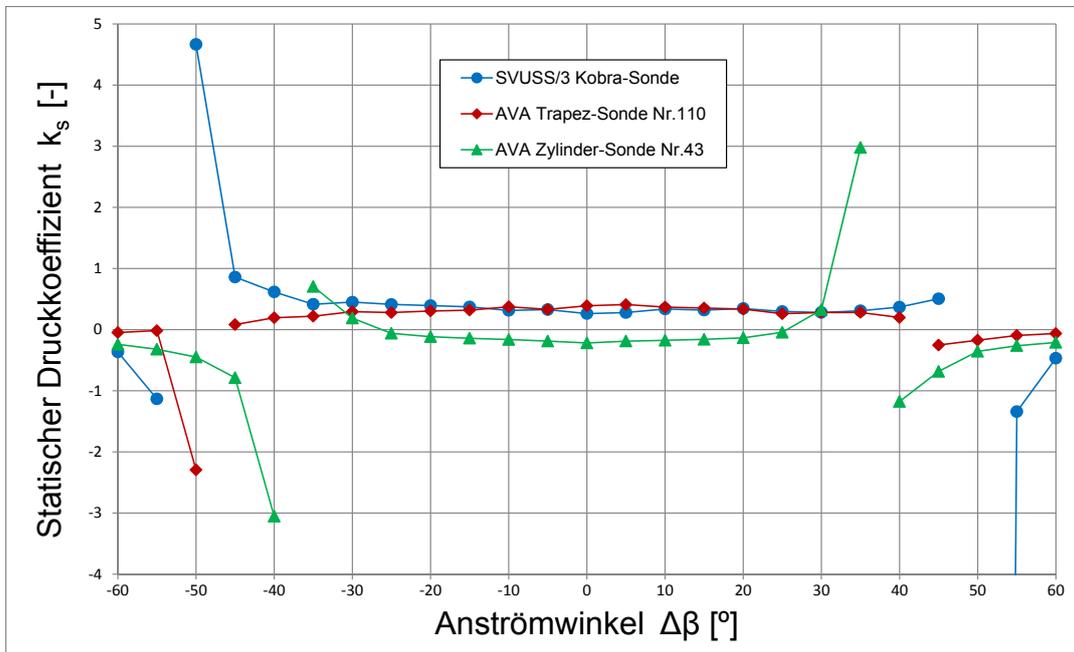


Abbildung 7.24.: Vergleich der statischen Druckkoeffizienten  $k_s$

## 8. Messdatenauswertung durch die Methoden zur Erweiterung des Betriebsbereichs

In diesem Kapitel werden die im Labor erfassten Messdaten mit den Ergebnissen, die durch die Methode zur Erweiterung des Betriebsbereichs ermittelt wurden, verglichen.

Die Erweiterung des Betriebsbereichs ist von größtem Interesse insbesondere bei den Turbomaschinen, wo die Schwankungen der Geschwindigkeitsrichtung sehr groß sind, und der typische Winkelbereich von  $\Delta\beta=\pm 30^\circ$  nicht ausreichend ist.

### 8.1. Experimentelle Koeffizienten

Wie es im Kapitel 7 gesehen werden konnte, hat die SVUSS/3 Kobra-Sonde einen Betriebsbereich von  $\Delta\beta\approx\pm 45^\circ$ , die AVA Trapez-Sonde Nr.110 von  $\Delta\beta\approx\pm 40^\circ$  und die AVA Zylinder-Sonde Nr.43 von  $\Delta\beta\approx\pm 30^\circ$ . Diese Beschränkungen (im untersuchten Bereich von  $\Delta\beta=\pm 60^\circ$ ) wurden durch die Singularitäten ( $k_1-\bar{k}=0$ ) bestimmt. Um ihre Winkelbereiche zu erweitern, wurde die im Kapitel 5 beschriebene Methode auf alle Sonden angewendet.

#### 8.1.1. SVUSS/3 Kobra-Sonde

In den Abb. 8.1, 8.2 und 8.3 sind die Kalibrierkoeffizienten  $k_\beta$ ,  $k_t$  und  $k_s$  vor und  $C_\beta$ ,  $C_t$  und  $C_s$  nach der Erweiterung des Betriebsbereichs zu sehen.

In der Abb. 8.1 wurden die Richtungskoeffizienten verglichen. Es ist ersichtlich, dass beide Kalibrierkurven im Bereich zwischen  $\Delta\beta\approx 30^\circ$  und  $\Delta\beta\approx 25^\circ$  vollständig identischen Verlauf aufweisen. Außerhalb dieses Bereichs bis  $\Delta\beta\approx\pm 45^\circ$  zeigt die traditionelle Kurve große Empfindlichkeit bei kleinen Winkeländerungen und schließlich gehen die  $k_\beta$ -Werte gegen Unendlich (Singularität). Im Gegensatz zu ihr schließt die zonenbasierte Methode die aufgetauchte Singularität aus und die  $C_\beta$ -Kurve erweitert den Betriebsbereich der Sonde über den ganzen im Labor untersuchten Bereich ( $\Delta\beta=\pm 60^\circ$ ).

In der Literatur [2] ist zu finden, dass bei der Kobra-Sonde (mit dem Flankenwinkel  $\delta=35^\circ$ ) durch die zonenbasierte Methode eine Vergrößerung des Winkelbereichs von  $\Delta\beta=\pm 105^\circ$  erreicht werden könnte.

## 8.1. EXPERIMENTELLE KOEFFIZIENTEN

Identischer Verlauf der Kurven wurde auch bei den Totaldruckkoeffizienten (Abb. 8.2) und statischen Druckkoeffizienten (Abb. 8.3) im Bereich zwischen  $\Delta\beta \approx -30^\circ$  und  $\Delta\beta \approx 25^\circ$  beobachtet. Außerhalb dieses Bereichs wurden durch die zonenbasierte Methode ebenfalls hervorragende Ergebnisse erzielt.

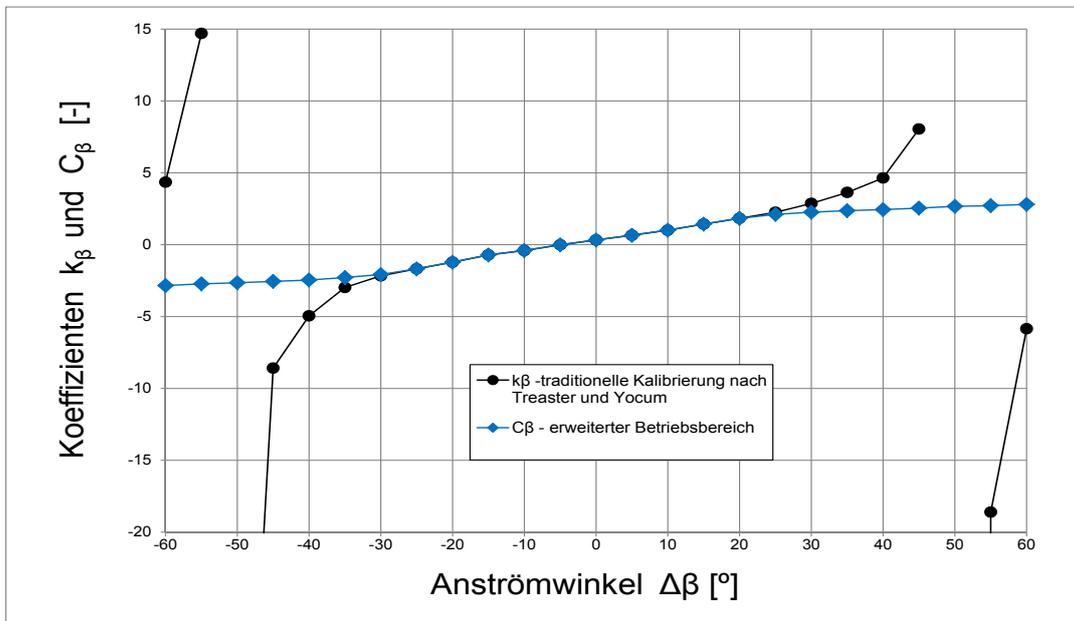


Abbildung 8.1.: Richtungskoeffizienten  $k_\beta$  und  $C_\beta$  der SVUSS/3 Kobra-Sonde

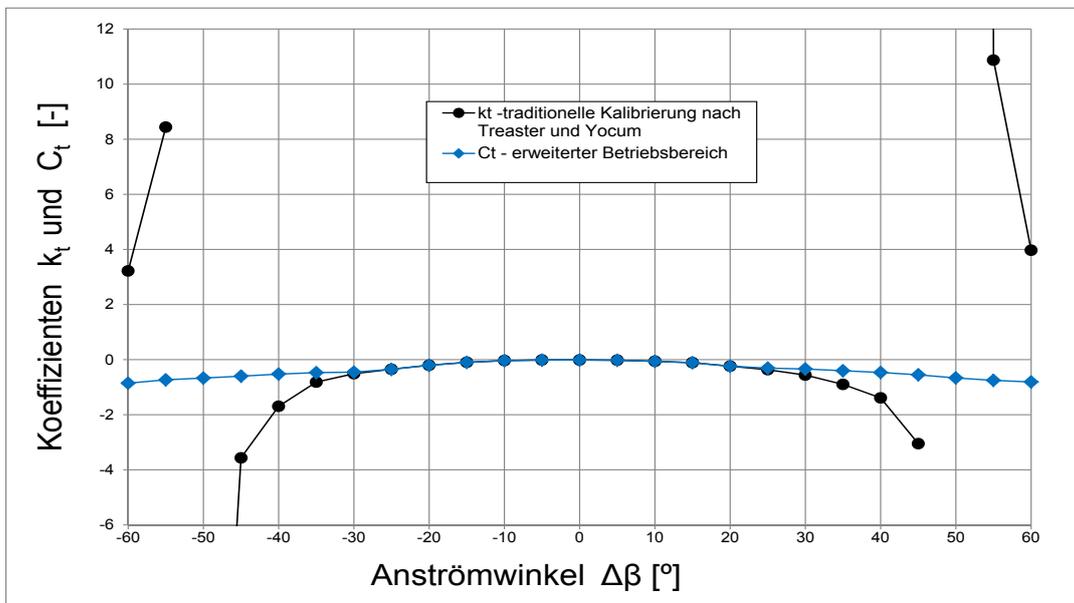
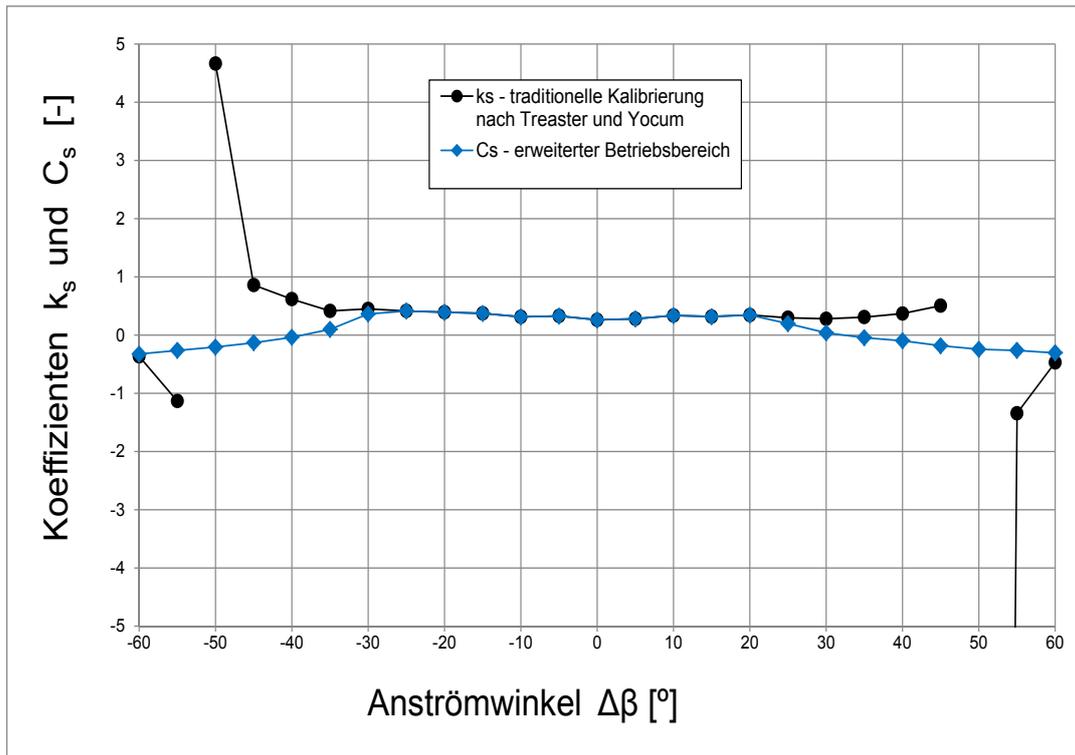


Abbildung 8.2.: Totaldruckkoeffizienten  $k_t$  und  $C_t$  der SVUSS/3 Kobra-Sonde

Abbildung 8.3.: Statische Druckkoeffizienten  $k_s$  und  $C_s$  der SVUSS/3 Kobra-Sonde

### 8.1.2. AVA Trapez-Sonde Nr.110

In den Abb. 8.4, 8.5 und 8.6 sind die Kalibrierkoeffizienten  $k_\beta$ ,  $k_t$  und  $k_s$  vor und  $C_\beta$ ,  $C_t$  und  $C_s$  nach der Erweiterung des Betriebsbereichs zu sehen.

Aus den Abb. 8.4 und 8.5 ist ersichtlich, dass kein größerer Unterschied zwischen der Kobra- und Trapez-Sonde vorkommt. Im Gegensatz zur Kobra-Sonde ist hier die Zone A schmaler ( $\approx \Delta\beta$  zwischen  $-25^\circ$  und  $20^\circ$ ).

Obwohl beide Sonden trapezförmige Kopfgeometrie haben, ist die AVA Trapez-Sonde größer (siehe Tab. 3.1). Dies beeinflusst die Empfindlichkeit der Sonde, was ihren Betriebsbereich verkleinert und somit auch die Zone A.

Größere Schwankungen der statischen Druckkoeffizienten (Abb. 8.6) sind außerhalb der Zone A im Gegensatz zur Kobra-Sonde zu sehen.

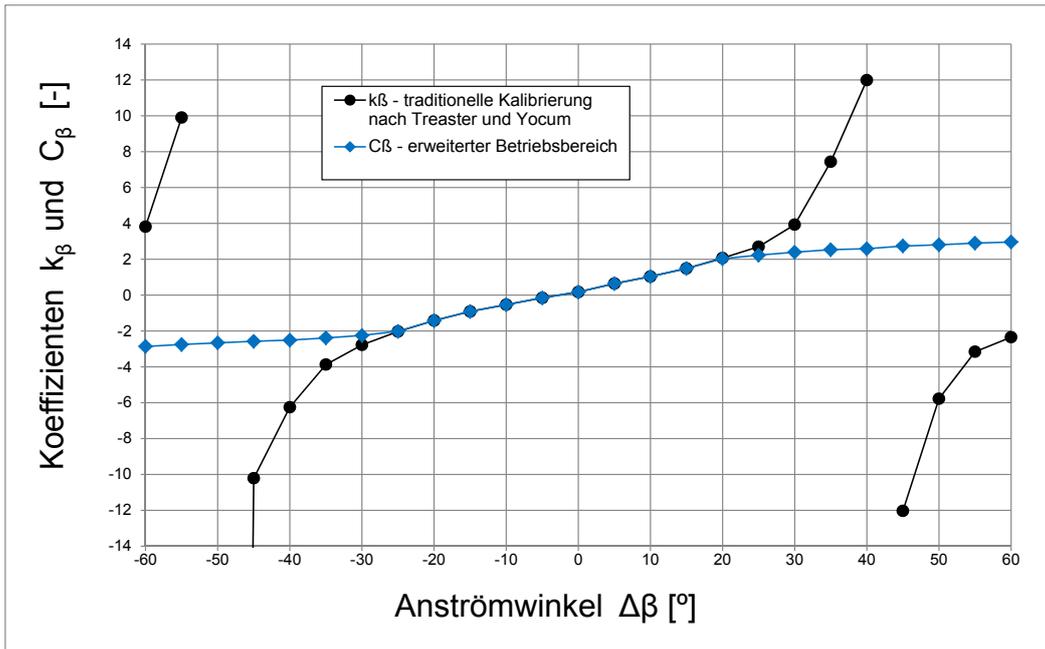


Abbildung 8.4.: Richtungskoeffizienten  $k_\beta$  und  $C_\beta$  der AVA Trapez-Sonde Nr.110

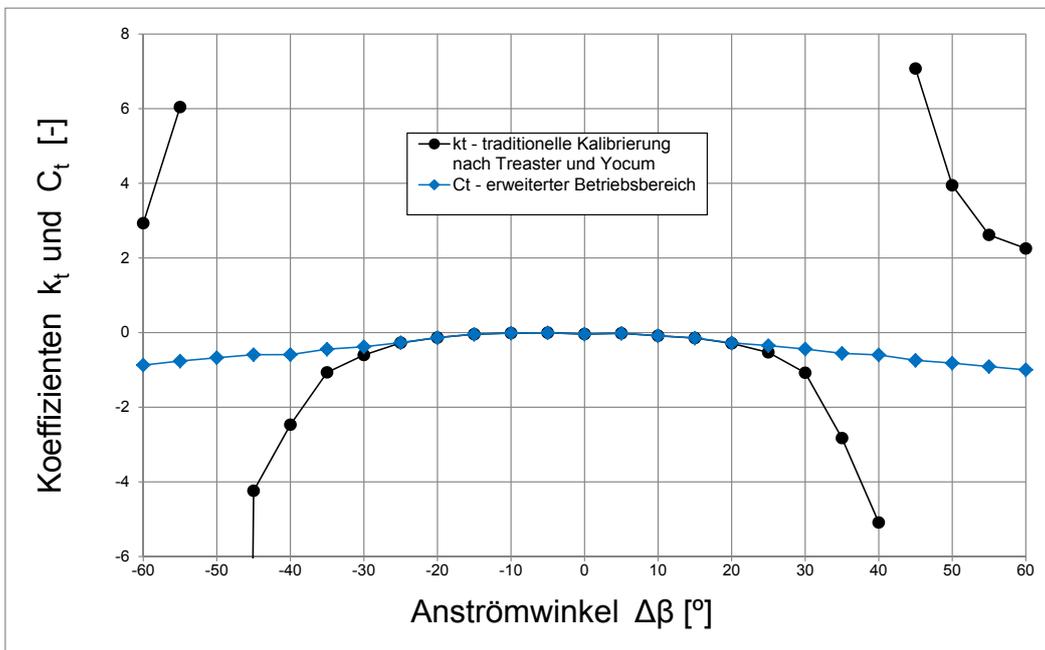


Abbildung 8.5.: Totaldruckkoeffizienten  $k_t$  und  $C_t$  der AVA Trapez-Sonde Nr.110

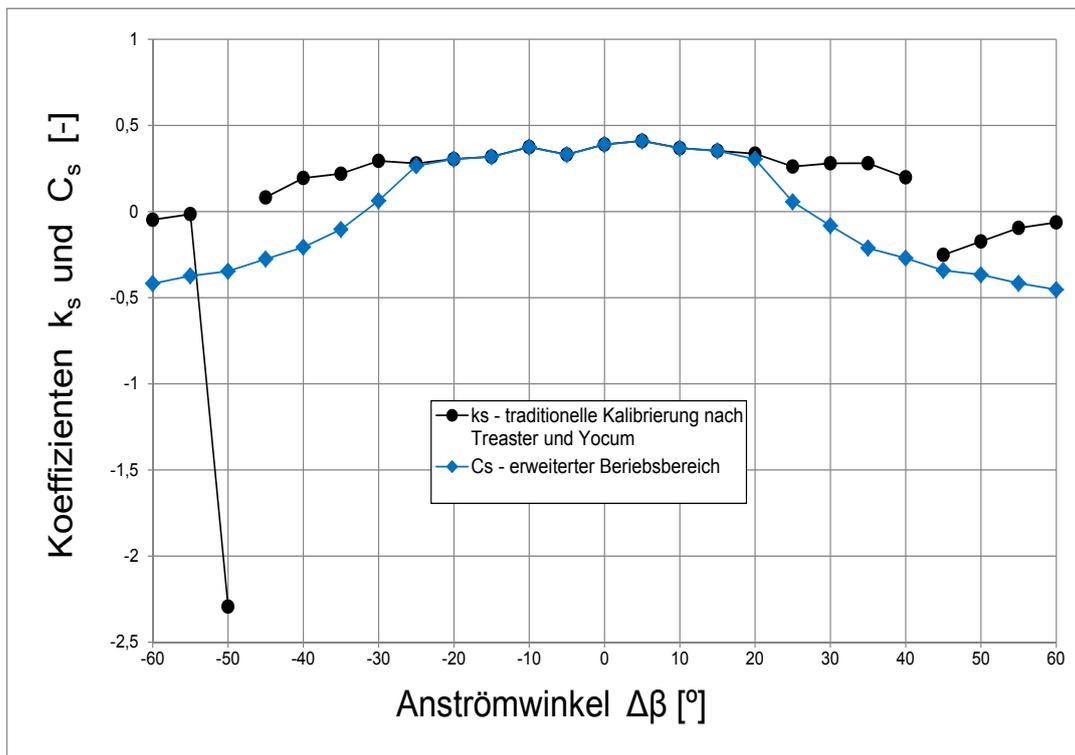


Abbildung 8.6.: Statische Druckkoeffizienten  $k_s$  und  $C_s$  der AVA Trapez-Sonde Nr.110

### 8.1.3. AVA Zylinder-Sonde Nr.43

In den Abb. 8.7, 8.8 und 8.9 sind die Kalibrierkoeffizienten  $k_\beta$ ,  $k_t$  und  $k_s$  vor und  $C_\beta$ ,  $C_t$  und  $C_s$  nach der Erweiterung des Betriebsbereiches zu sehen.

Bei allen Kalibrierkoeffizienten ist ersichtlich, dass die Methode zur Erweiterung des Betriebsbereiches wie bei den beiden anderen Sonden sehr gute Ergebnisse liefert.

Obwohl die AVA Zylinder-Sonde nur einen Betriebsbereich von  $\Delta\beta \approx \pm 30^\circ$  hat, könnte auch sie durch die Methode zur Erweiterung des Betriebsbereiches im Bereich von  $\Delta\beta = \pm 60^\circ$  eingesetzt werden.

In der Literatur [1] ist zu finden, dass eine Zylinder-Sonde mit einem Konstruktionswinkel (siehe Abb. 4.3) zwischen  $\delta = 10^\circ$  und  $\delta = 70^\circ$  durch die zonenbasierte Methode ein Betriebsbereich von  $\Delta\beta = \pm 70^\circ$  erreichen könnte.

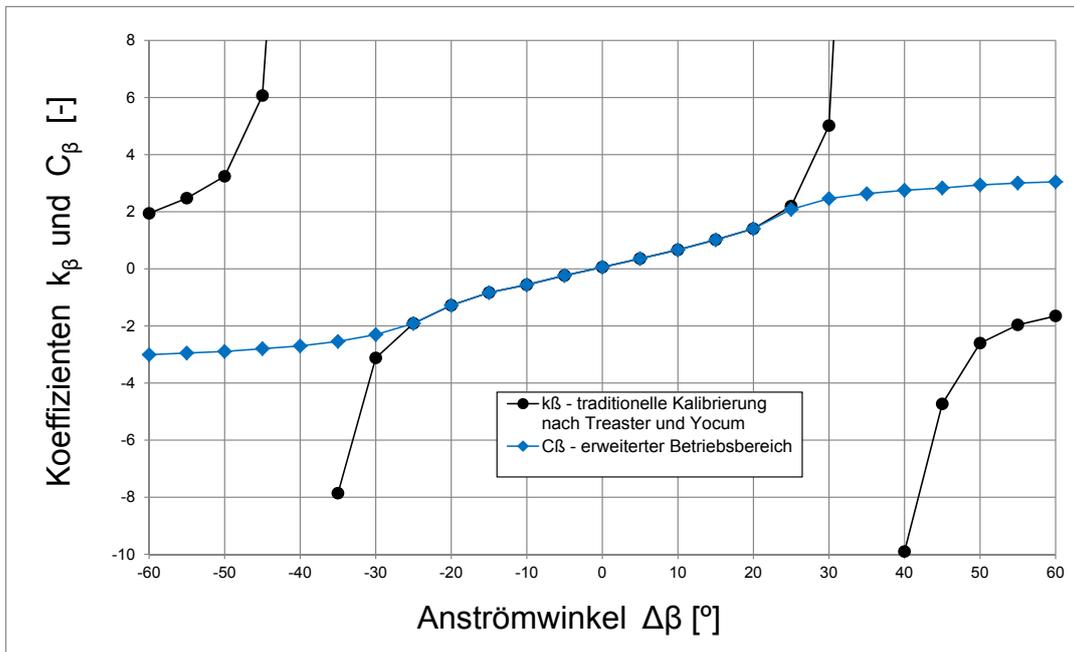


Abbildung 8.7.: Richtungskoeffizienten  $k_\beta$  und  $C_\beta$  der AVA Zylinder-Sonde Nr.43

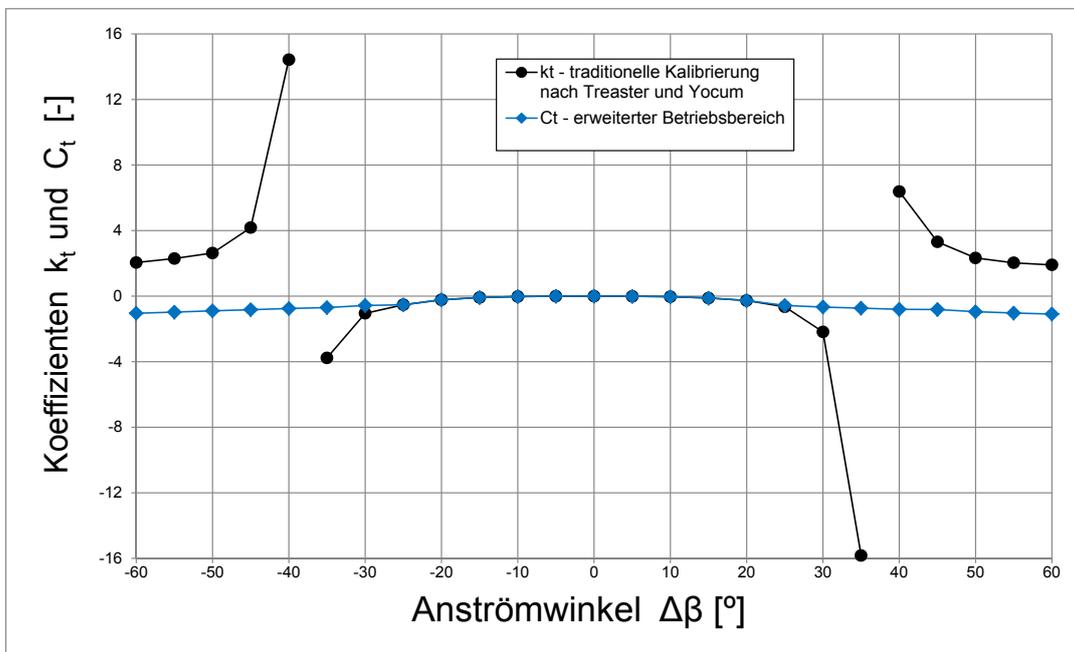
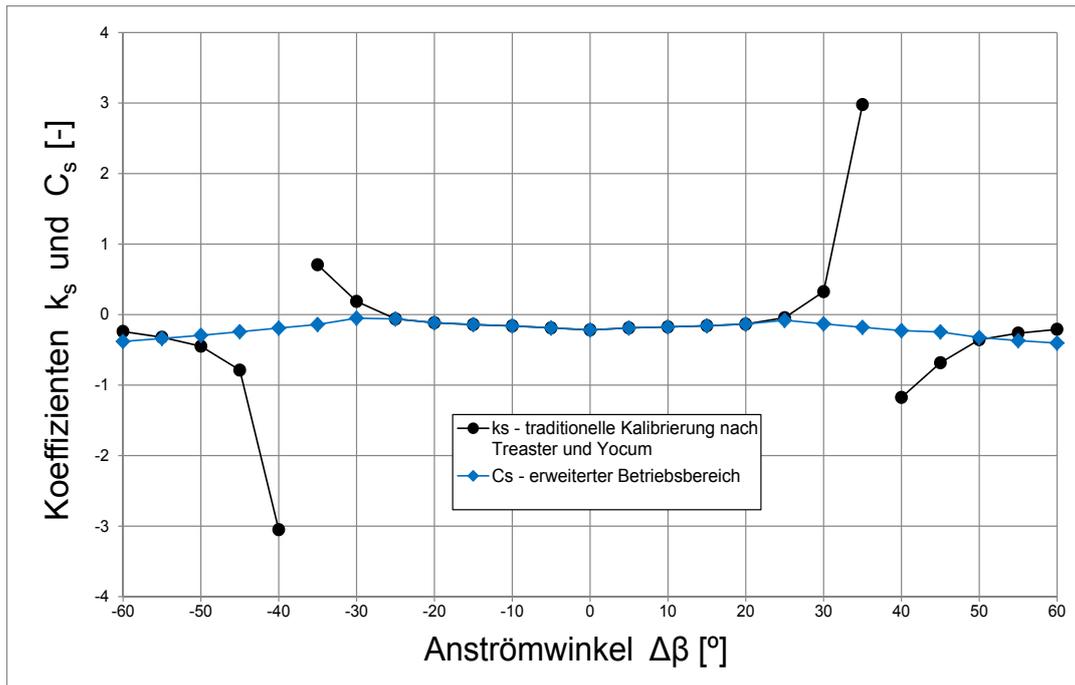


Abbildung 8.8.: Totaldruckkoeffizienten  $k_t$  und  $C_t$  der AVA Zylinder-Sonde Nr.43

Abbildung 8.9.: Statische Druckkoeffizienten  $k_s$  und  $C_s$  der AVA Zylinder-Sonde Nr.43

## 8.2. Vergleich der erweiterten Koeffizienten

Um einen besseren Überblick über die durch zonenbasierte Methoden erreichte Erweiterung des Betriebsbereichs zwischen allen drei Sonden zu bekommen, wurden in den Abb. 8.10, 8.11 und 8.12 die Vergleiche der erweiterten Richtungskoeffizienten  $C_\beta$ , Totaldruckkoeffizienten  $C_t$  und statischen Druckkoeffizienten  $C_s$  veranschaulicht.

Die  $C_\beta$ -Kurven (Abb. 8.10) zeigen überragende Übereinstimmung für alle drei Sonden. Bei den  $C_t$ -Kurven (Abb. 8.11) weicht die Kurve der Zylinder-Sonde im Vergleich zu den zwei anderen außerhalb des Bereichs  $\Delta\beta = \pm 20^\circ$  ab. Trotz dieser kleinen Differenz weisen alle Kurven einen ähnlichen Verlauf auf.

Aufgrund der Ergebnisse der experimentellen  $k_s$ -Koeffizienten, die in (Abb. 7.24) dargestellt wurden, waren auch bei den erweiterten  $C_s$ -Koeffizienten (Abb. 8.12) große Unterschiede zu erwarten.

Wie aus der Abb. 8.12 ersichtlich ist, zeigt die  $C_s$ -Kurve der zylinderförmigen Sonde einen umgekehrten Verlauf (innerhalb  $\Delta\beta = -30^\circ$  und  $\Delta\beta = 25^\circ$ ) im Vergleich zu trapezförmigen Sonden. Außerhalb dieses Bereichs weisen alle drei Sonden ähnlichen Verlauf auf.

## 8.2. VERGLEICH DER ERWEITERTEN KOEFFIZIENTEN

Obwohl trapezförmige Sonden eine große Differenz zwischen einander zeigen, ist ihr Verlauf sehr ähnlich.

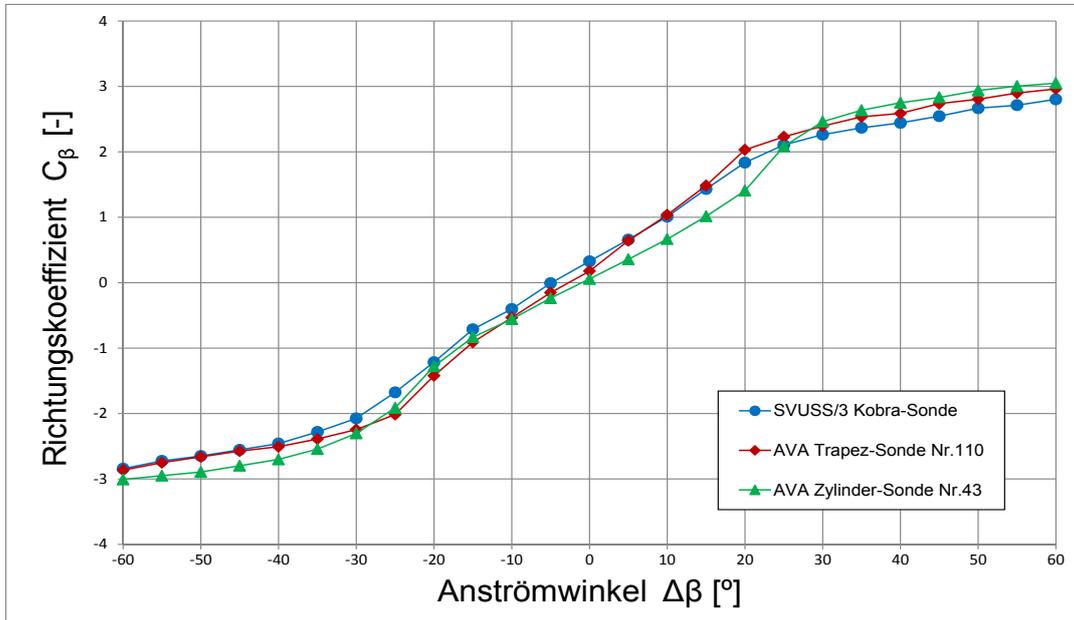


Abbildung 8.10.: Vergleich der Richtungskoeffizienten  $C_\beta$

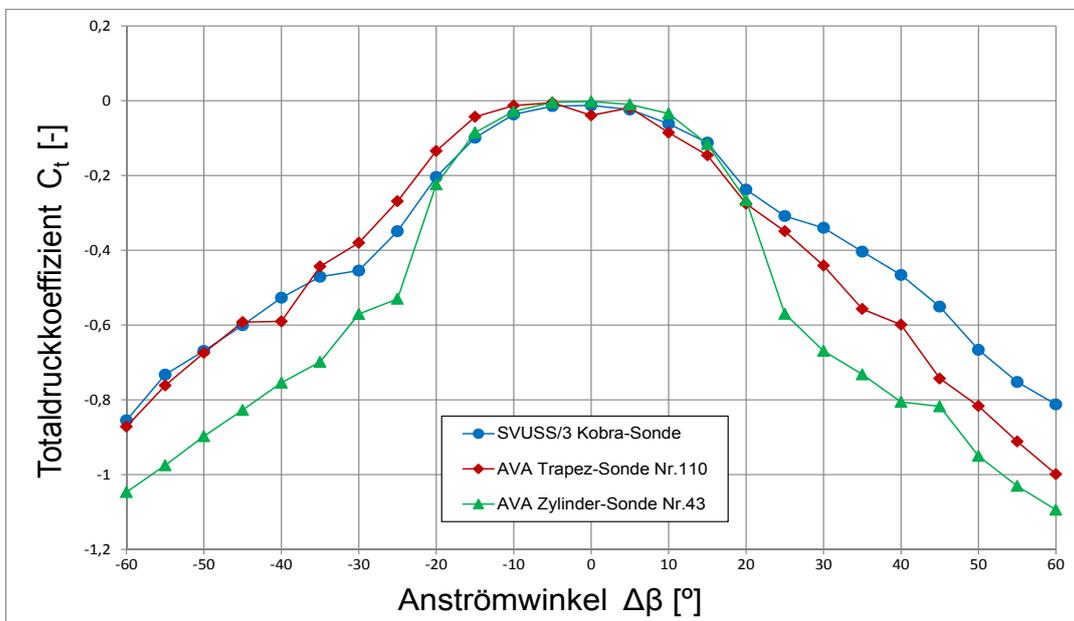


Abbildung 8.11.: Vergleich der Totaldruckkoeffizienten  $C_t$

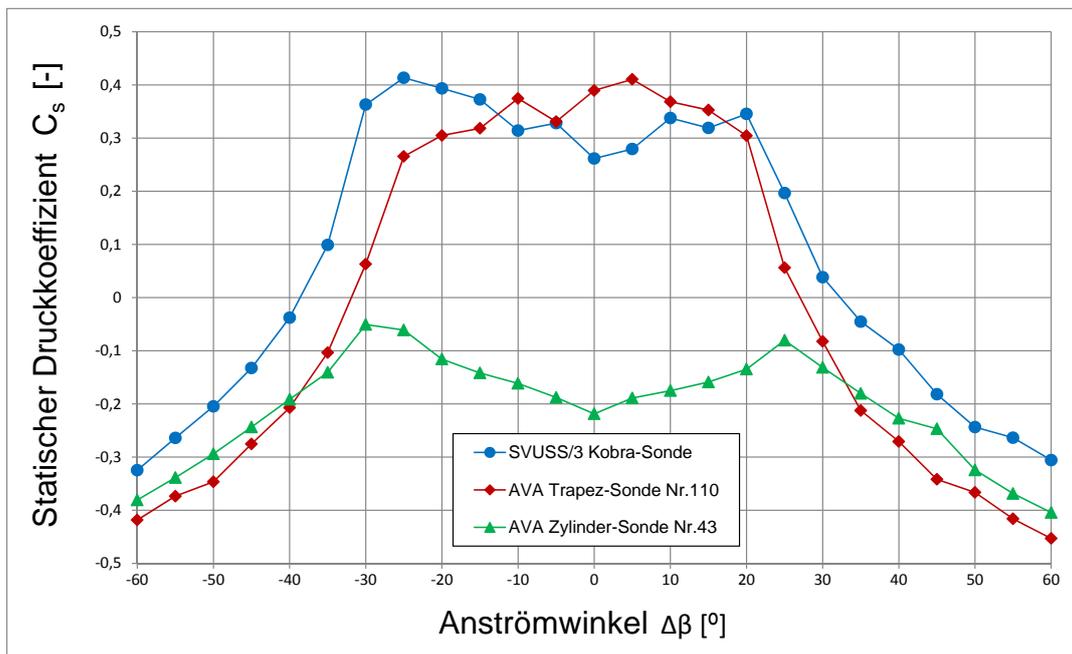


Abbildung 8.12.: Vergleich der statischen Druckkoeffizienten  $C_s$

Um einen besseren Überblick zu bekommen, wo die Zonengrenze liegen, sind in der Tab. 8.1 für alle drei Sonden die Zonengrenzwinkel zusammengefasst.

Name der Sonde	$\Delta\beta_{CA}$ [°]	$\Delta\beta_{AB}$ [°]
SVUSS/3 Kobra-Sonde	-25	20
AVA Trapez-Sonde Nr.110	-25	20
AVA Zylinder-Sonde Nr.43	-26	23

Tabelle 8.1.: Zonengrenzwinkel

## 9. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit konnte eindeutig gezeigt werden, dass der Betriebsbereich von pneumatischen Dreilochsonden durch die Aufteilung des untersuchten Bereichs in kleineren Zonen von typischen  $\Delta\beta=\pm 30^\circ$  auf  $\Delta\beta=\pm 60^\circ$  erweitert werden kann. Diese Erweiterung wurde erst durch die Einführung der sehr einfachen zonenbasierten Methode erreicht. Es wurde gezeigt, dass beide Methoden identische Ergebnisse im traditionellen Bereich liefern, aber mit dem Vorteil eines längeren Betriebsbereichs durch die neue Methode.

Die Untersuchung wurde auf zwei Sonden (SVUSS/3 Kobra-Sonde und AVA Trapez-Sonde Nr.110) mit den trapezförmigen Kopfgeometrien aber verschiedenen Kopfgrößen und eine Sonde mit der zylinderförmigen Kopfgeometrie (AVA Zylinder-Sonde Nr.43) durchgeführt.

Die Sonden wurde auf TU Wien in dem Freistrah-Windkanal des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik kalibriert. Sie wurden manuell in Schritten von  $5^\circ$  gedreht und die Bohrungsdrücke für jede Position erfasst. Aus den Bohrungsdrücken wurden die Bohrunskoeffizienten berechnet und anschließend aus ihnen die gesuchten Kalibrierkoeffizienten.

Es wurde mit Hilfe einer ausführlichen graphischen Darstellung sowohl der experimentell erfassten Ergebnisse nach traditioneller Kalibrierung als auch der durch die zonenbasierte Methode ausgewerteten Messdaten gezeigt, dass beide Eigenschaften des Sondenkopfes den Kalibrierkoeffizientenverlauf beeinflussen. Der Unterschied durch die Sondenkopfgröße wirkte sich nicht so stark auf die Ergebnisse wie durch seine geometrische Form aus.

Der Vergleich zwischen den durch die theoretischen Methoden berechneten Koeffizienten und den experimentell erfassten Ergebnissen wurde ebenfalls durchgeführt. Es konnte beobachtet werden, dass die theoretischen Methoden nicht in der Lage sind, die Strömungsablösung auf der Leeseite des Sondenkopfes zu berücksichtigen. Dementsprechend stimmen die durch diese Methoden berechneten leeseitigen Koeffizienten nicht mit den experimentellen Koeffizienten überein.

Da durch die vorliegenden Untersuchungen an den pneumatischen Dreilochsonden gezeigt wurde, dass ihr Betriebsbereich erweitert werden kann, könnte in der Zukunft diese Arbeit als ein Ausgangspunkt zur Erweiterung des Betriebsbereichs von Mehrlochsonden (z.B. Vier- oder Fünflochsonden zum Einsatz in räumlichen Strömungen) dienen.

## Literaturverzeichnis

- [1] **Argüelles Díaz K. M., Fernández Oro J. M., Marigorta E. B.:** Direct calibration framework of triple-hole pressure probes for incompressible flow. (Meas. Sci. Technol. 19 (2008))
- [2] **Argüelles Díaz K. M., Fernández Oro J. M., Marigorta E. B.:** Extended Angular Range of a Three-Hole Cobra Pressure Probe for Incompressible Flow. (October 2008, Vol. 130, Journal of Fluids Engineering)
- [3] **Chondrokostas C.:** *Calibration of Pneumatic Five-Hole Probes in the Free-Jet Wind Tunnel.* (Diplomarbeit: Wien, Dezember 2005, Seite 57)
- [4] **Deiss O. und Lackmann F.:** *Eine Untersuchung im Windkanal zum Einfluss der Turbulenz bei Halbschalen- und Ultraschallanemometern für den Einsatz an Windkraftanlagen.* (Diplomarbeit: Düsseldorf, Juli 2001, Seite 6)
- [5] **Giralt R.:** *Investigation on the Effect of Reynolds Number on Pneumatic Three-Hole Pressure Probe Calibration.* (Diplomarbeit: Wien, Februar 2008)
- [6] **Gündogdü M. Y., Çarpinlioglu M. Ö.:** A multi-tube pressure probe calibration method for measurements of mean flow parameters in swirling flows. (Flow Measurement and Instrumentation 9 (1998))
- [7] **Lerena Diaz D.:** *Experimental Calibration of Three-Hole Pressure Probes with Different Head Geometries.* (Diplomarbeit: Wien, September 2003)
- [8] **Treaster A.L, Yocum A.M:** The Calibration and Application of Five-Hole Probes. (ISA Transactions Vol. 18, No.3, 1979)
- [9] **Truckenbrodt E.:** Lehrbuch der angewandten Fluidmechanik. (2.Auflage, Springer (1988))
- [10] **Willinger R.:** *Einfluss der Reynoldszahl auf die Kalibrierkurven von pneumatischen Strömungssonden, URL: [http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-mb\\_6271.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-mb_6271.pdf)*

## Abbildungsverzeichnis

2.1. Drei- und Fünflochsonde [6] . . . . .	3
3.1. Sondenausrichtung nach der Strömung [2] . . . . .	7
3.2. Charakteristische Kopfgeometrie einer trapezförmigen Sonde [7] . . . . .	8
3.3. Definition der Bohrungen und der Anströmwinkelzählrichtung [7] . . . . .	8
3.4. SVUSS/3 Kobra-Sonde [7] . . . . .	9
3.5. Vergrößerte Ansicht der SVUSS/3 Kobra-Sonde [7] . . . . .	9
3.6. AVA Trapez-Sonde Nr.110 [7] . . . . .	10
3.7. Vergrößerte Ansicht der AVA Trapez-Sonde Nr.110 [7] . . . . .	10
3.8. AVA Zylinder-Sonde Nr.43 [7] . . . . .	11
3.9. Vergrößerte Ansicht der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 [7] . . . . .	11
4.1. Typische Verteilung der Kalibrierkoeffizienten . . . . .	12
4.2. Projektion des Geschwindigkeitsvektors auf einen trapezförmigen Kopf [7] . . . . .	18
4.3. Projektion des Geschwindigkeitsvektors auf einen zylinderförmigen Kopf [7] . . . . .	20
4.4. Geometrie eines zylinderförmigen Sondenkopfes [7] . . . . .	22
5.1. Aufteilung des Betriebsbereichs in einzelne Zonen . . . . .	25
6.1. Freistrah-Windkanal des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik an der TU Wien [7] . . . . .	27
6.2. Düse des Windkanals und die Vorrichtung zur Befestigung der Sonde [5] . . . . .	29
6.3. Blockschaltbild des Systems zur Messdatenerfassung . . . . .	30
6.4. Kennlinie des Honeywell 186PC03D . . . . .	30
7.1. Bohrungskoeffizient $k_1$ der SVUSS/3 Kobra-Sonde . . . . .	33
7.2. Bohrungskoeffizient $k_2$ der SVUSS/3 Kobra-Sonde . . . . .	34
7.3. Bohrungskoeffizient $k_3$ der SVUSS/3 Kobra-Sonde . . . . .	34
7.4. Richtungskoeffizient $k_\beta$ der SVUSS/3 Kobra-Sonde . . . . .	35
7.5. Totaldruckkoeffizient $k_t$ der SVUSS/3 Kobra-Sonde . . . . .	36
7.6. Statischer Druckkoeffizient $k_s$ der SVUSS/3 Kobra-Sonde . . . . .	36
7.7. Bohrungskoeffizient $k_1$ der AVA Trapez-Sonde Nr.110 . . . . .	37
7.8. Bohrungskoeffizient $k_2$ der AVA Trapez-Sonde Nr.110 . . . . .	38
7.9. Bohrungskoeffizient $k_3$ der AVA Trapez-Sonde Nr.110 . . . . .	38
7.10. Richtungskoeffizient $k_\beta$ der AVA Trapez-Sonde Nr.110 . . . . .	39

7.11. Totaldruckkoeffizient $k_t$ der AVA Trapez-Sonde Nr.110 . . . . .	40
7.12. Statischer Druckkoeffizient $k_s$ der AVA Trapez-Sonde Nr.110 . . . . .	40
7.13. Bohrungskoeffizient $k_1$ der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 . . . . .	41
7.14. Bohrungskoeffizient $k_2$ der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 . . . . .	42
7.15. Bohrungskoeffizient $k_3$ der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 . . . . .	42
7.16. Richtungskoeffizient $k_\beta$ der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 . . . . .	43
7.17. Totaldruckkoeffizient $k_t$ der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 . . . . .	44
7.18. Statischer Druckkoeffizient $k_s$ der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 . . . . .	44
7.19. Vergleich der Bohrungskoeffizienten $k_1$ . . . . .	45
7.20. Vergleich der Bohrungskoeffizienten $k_2$ . . . . .	46
7.21. Vergleich der Bohrungskoeffizienten $k_3$ . . . . .	46
7.22. Vergleich der Richtungskoeffizienten $k_\beta$ . . . . .	47
7.23. Vergleich der Totaldruckkoeffizienten $k_t$ . . . . .	48
7.24. Vergleich der statischen Druckkoeffizienten $k_s$ . . . . .	48
8.1. Richtungskoeffizienten $k_\beta$ und $C_\beta$ der SVUSS/3 Kobra-Sonde . . . . .	50
8.2. Totaldruckkoeffizienten $k_t$ und $C_t$ der SVUSS/3 Kobra-Sonde . . . . .	50
8.3. Statische Druckkoeffizienten $k_s$ und $C_s$ der SVUSS/3 Kobra-Sonde . . . . .	51
8.4. Richtungskoeffizienten $k_\beta$ und $C_\beta$ der AVA Trapez-Sonde Nr.110 . . . . .	52
8.5. Totaldruckkoeffizienten $k_t$ und $C_t$ der AVA Trapez-Sonde Nr.110 . . . . .	52
8.6. Statische Druckkoeffizienten $k_s$ und $C_s$ der AVA Trapez-Sonde Nr.110 . . . . .	53
8.7. Richtungskoeffizienten $k_\beta$ und $C_\beta$ der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 . . . . .	54
8.8. Totaldruckkoeffizienten $k_t$ und $C_t$ der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 . . . . .	54
8.9. Statische Druckkoeffizienten $k_s$ und $C_s$ der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 . . . . .	55
8.10. Vergleich der Richtungskoeffizienten $C_\beta$ . . . . .	56
8.11. Vergleich der Totaldruckkoeffizienten $C_t$ . . . . .	56
8.12. Vergleich der statischen Druckkoeffizienten $C_s$ . . . . .	57
A.1. Werkstattzeichnung der SVUSS/3 Kobra-Sonde [7] . . . . .	ii
A.2. Werkstattzeichnung der AVA Trapez-Sonde Nr.110 [7] . . . . .	iii
A.3. Werkstattzeichnung der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 [7] . . . . .	iv

## Tabellenverzeichnis

3.1. Haupteigenschaften von verwendeten pneumatischen Dreilochsonden . . . . .	8
6.1. Technische Daten des Windkanals . . . . .	28
6.2. Werte bei $Re_d = 7.500$ . . . . .	29
6.3. Technische Daten des Honeywell 186PC03D . . . . .	31
8.1. Zonengrenzwinkel . . . . .	57



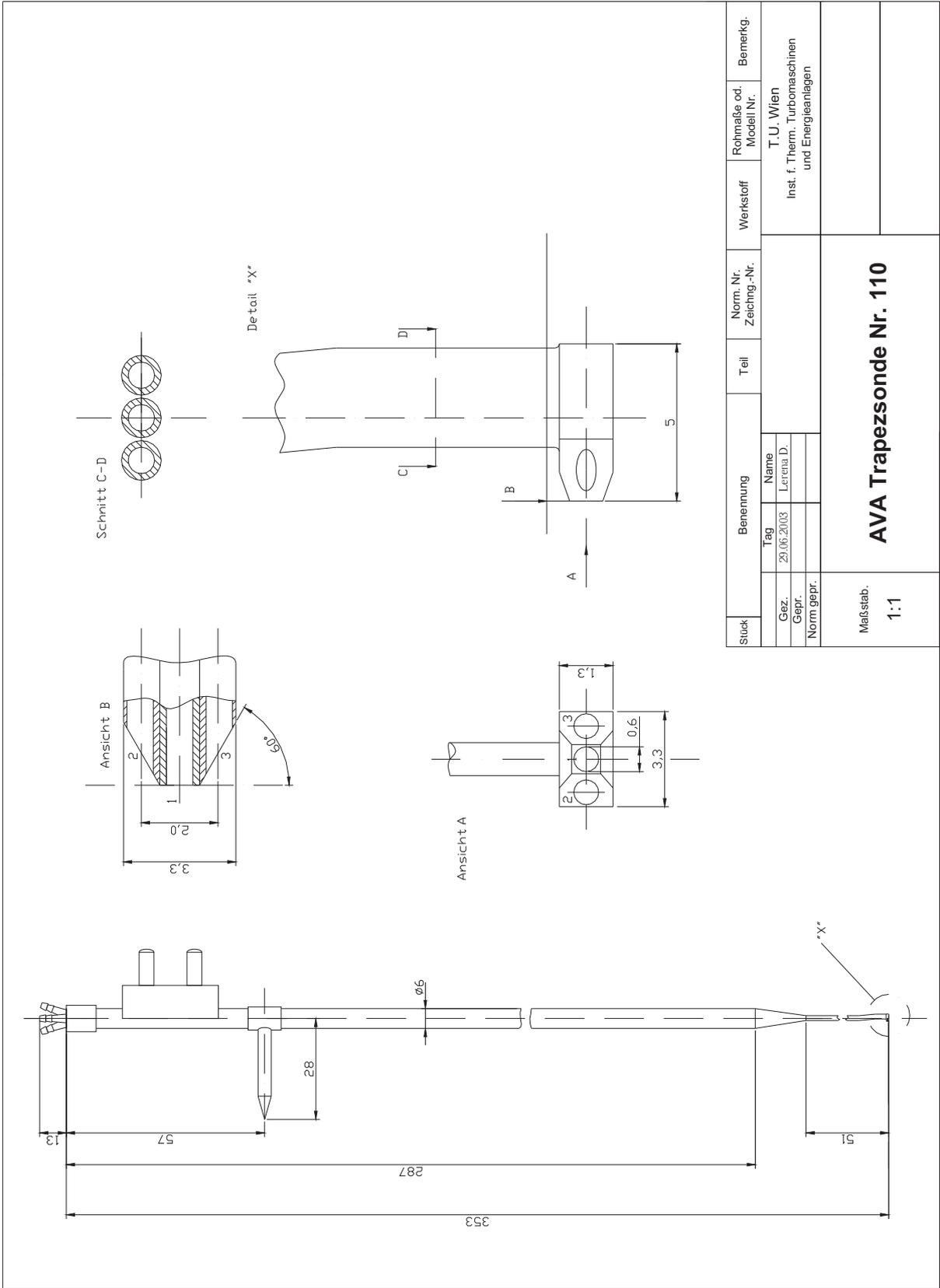


Abbildung A.2.: Werkstattzeichnung der AVA Trapez-Sonde Nr.110 [7]

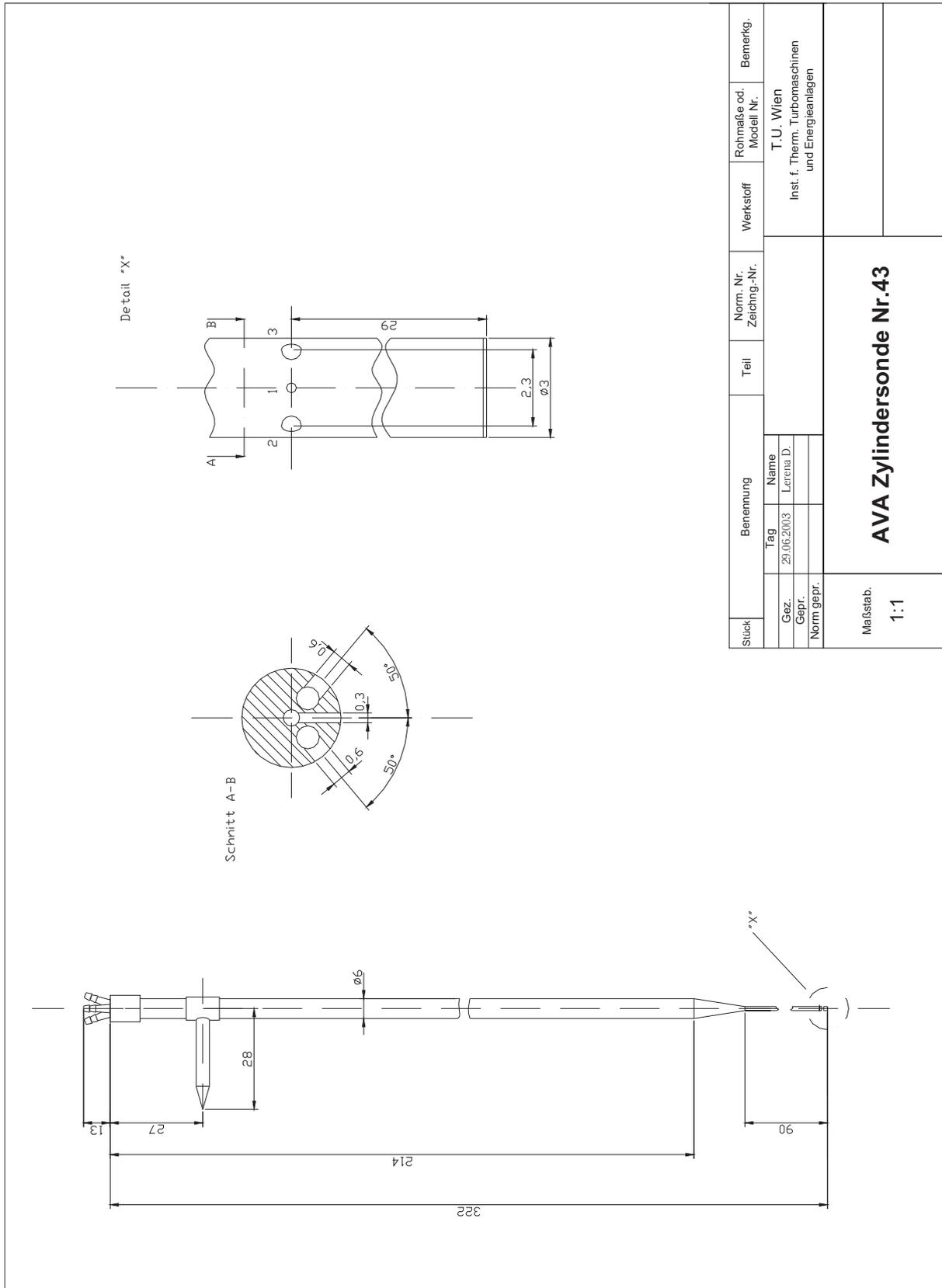


Abbildung A.3.: Werkstattzeichnung der AVA Zylinder-Sonde Nr.43 [7]

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, dass alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht sind und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Wien, den 26. Juli 2011

Dževad Smajić