



Diplomarbeit

Kalibrierung von pneumatischen Dreilochsonden unter Nickwinkeleinfluss

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

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Reinhard Willinger
Institut für Energietechnik und Thermodynamik
Forschungsbereich Strömungsmaschinen

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Manuel Schrempf
0825614 (066 445)
Attemsgasse 23/1/13
1220 Wien

Wien, im Mai 2016

.....
Manuel Schrempf

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit behandelt die Kalibrierung der drei am Institut vorhandenen Dreilochsonden. Dreilochsonden dienen zur Ermittlung von stationären Geschwindigkeiten und deren Richtung bei ebenen Strömungen. Bei diesen Strömungssonden erfolgt die Erfassung der Geschwindigkeit und Richtung indirekt über eine Druckmessung. Bevor die Sonde in der Praxis angewendet werden kann, ist eine Kalibrierung notwendig. Dazu wird die Sonde bei einer Reihe von definierten Winkeleinstellungen einem turbulenzarmen Freistrahls mit bekannter konstanter Geschwindigkeit ausgesetzt. Aus den gemessenen Bohrungsdrücken werden anschließend dimensionslose Kalibrierkoeffizienten berechnet.

Dreilochsonden sind generell nur für den Einsatz in ebenen Strömungen geeignet, was bedeutet, dass der Nickwinkel gleich null ist. In einer Turbomaschinenbeschaufelung ist das Strömungsfeld allerdings nicht konstant. Es entstehen Messfehler infolge der Geschwindigkeitskomponenten normal auf die Gierebene. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss des Nickwinkels auf die Messergebnisse bei der Kalibrierung der Dreilochsonden. Diese experimentellen Ergebnisse werden anschließend durch die Anwendung des Stromlinienprojektionsverfahrens verglichen und interpretiert.

Zusätzlich wird noch die SVUSS/3 Kobrasonde unter einem festen Gierwinkel kalibriert und mit den von der Firma SVUSS zu Verfügung gestellten Daten verglichen.

Abstract

This diploma thesis examines the calibration of the three different three-hole pressure probes, which are currently available on the institute. Three-hole pressure probes serve to measure the stationary velocities and their directions in two-dimensional flow field. With this particular type of pressure probes, measurements of velocity and direction are performed indirectly via the data about pressure. Before a probe can be used in practice, a calibration is required. For this purpose, the probe is put into a low-turbulence jet with a known constant velocity in a series of predefined angles. The various pressures measured at the holes serve as basis for the calculation of dimensionless calibration coefficients.

Three-hole probes are used solely for operations in two-dimensional flow fields, which signifies that the pitch angle is equal to zero. In the blading of a turbomachine, though, the flow field is not constant. This leads to measurement errors caused by components of the velocity perpendicular to the yaw plane. This diploma thesis aims to analyse the effects of the pitch angle on the measurements resulting from the calibration of three-hole pressure probes. The data of the experiments that were carried out will be compared and interpreted according to the streamline projection method.

Additionally, the SVUSS/3 „Cobra-probe“ will be calibrated with a constant yaw angle and subsequently compared to the data which has been provided by the SVUSS company.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	KALIBRIERUNG	2
2.1	TYPISCHE MESSVERFAHREN IM STRÖMUNGSKANAL	2
2.2	PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN	3
2.2.1	<i>Stromfadentheorie</i>	3
2.2.2	<i>Bernoulli-Gleichung</i>	4
2.3	STRÖMUNGSGRÖßEN UND DIMENSIONSLOSE KENNZAHLEN	5
2.3.1	<i>Spezifische Gaskonstante</i>	5
2.3.2	<i>Dichte von Luft</i>	5
2.3.3	<i>Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal</i>	6
2.3.4	<i>Kinematische Viskosität</i>	6
2.3.5	<i>Sondenreynoldszahl</i>	6
2.3.6	<i>Mach-Zahl</i>	7
2.4	DEFINITION DER KALIBRIERKOEFFIZIENTEN	7
2.4.1	<i>Bohrungskoeffizienten</i>	8
2.4.2	<i>Kalibrierkoeffizienten</i>	9
3	SONDEN-GEOMETRIE	12
3.1	SVUSS/3 KOBRA SONDE	13
3.2	AVA TRAPEZSONDE NUMMER 110	14
3.3	AVA ZYLINDERSONDE NUMMER 43	15
4	STROMLINIENPROJEKTIONSVERFAHREN	16
4.1	PROJEKTION DES GESCHWINDIGKEITSVEKTORS	16
4.2	SONDEN MIT TRAPEZFÖRMIGER KOPFGEOMETRIE	17
4.3	SONDEN MIT ZYLINDERFÖRMIGER KOPFGEOMETRIE	20
5	MESSAUFBAU UND TESTANLAGE	24
5.1	BESCHREIBUNG DES FREISTRÄHLWINDKANALS	24
5.2	MESSAUFBAU	25
5.3	MESSDURCHFÜHRUNG	28
5.3.1	<i>Durchführung der Kalibrierung</i>	29
5.3.2	<i>Durchführung der Kalibrierung der Kobrasonde und Vergleich mit den SVUSS Daten</i>	30
6	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	31
6.1	ERGEBNISSE DER SVUSS/3 KOBRA SONDE	32
6.1.1	<i>Experimentelle Ergebnisse des Nickwinkelinflusses</i>	32
6.1.2	<i>Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit dem Stromlinienprojektionsverfahren</i>	42
6.1.3	<i>Experimentelle Ergebnisse der Kobrasonde und Vergleich mit den SVUSS-Daten</i>	47
6.2	ERGEBNISSE DER AVA TRAPEZSONDE NR. 110	50
6.2.1	<i>Experimentelle Ergebnisse des Nickwinkelinflusses</i>	50
6.2.2	<i>Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit dem Stromlinienprojektionsverfahren</i>	60
6.3	ERGEBNISSE DER AVA ZYLINDERSONDE NR. 43	66
6.3.1	<i>Experimentelle Ergebnisse des Nickwinkelinflusses</i>	66
6.3.2	<i>Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit dem Stromlinienprojektionsverfahren</i>	76
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	81
8	LITERATURVERZEICHNIS	V

Nomenklatur

Lateinische Notation

a	Abstand zwischen den zwei seitlichen Sondenbohrungen	[m]
d	charakteristische Abmessung des Sondenkopfes	[m]
d_n	Austrittsdurchmesser der Düse	[m]
g	Fallbeschleunigung	[m/s ²]
\bar{k}	mittlerer Bohrunskoeffizient	[-]
k_β	Richtungskoeffizient	[-]
k_i	Bohrunskoeffizient der Bohrung i	[-]
k_s	statischer Druckkoeffizient	[-]
k_t	Totaldruckkoeffizient nach	[-]
Ma	Mach-Zahl	[-]
n	Drehzahl	[min ⁻¹]
p	statischer Druck	[Pa]
p_{dyn}	dynamischer Druck	[Pa]
p_i	Druck der Bohrung i	[Pa]
p_t	Totaldruck	[Pa]
p_U	Umgebungsdruck	[Pa]
Δp	Druckdifferenz	[Pa]
R	universelle Gaskonstante	[J/molK]
Re_d	Sondenreynoldszahl	[-]
R_s	spezifische Gaskonstante	[J/kgK]
t	Temperatur im Windkanal	[°C]
T	Umgebungstemperatur	[K]
t_U	Umgebungstemperatur	[°C]
U	elektrische Spannung	[V]
v	spezifisches Volumen	[m ³ /kg]
w	Zuströmgeschwindigkeit	[m/s]
w_y	Zuströmgeschwindigkeit projiziert auf die Gierebene	[m/s]
w_i	Projektion der Zuströmgeschwindigkeit auf die Bohrung i	[m/s]
w_0	Schallgeschwindigkeit	[m/s]
x	Abstand der Sonde stromab der Düse	[m]

Griechische Buchstaben

$\Delta\gamma$	Nickwinkel	[°]
$\Delta\beta$	Gierwinkel	[°]
δ	charakteristischer Flankenwinkel des Sondenkopfes	[°]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]
ρ	Dichte	[kg/m ³]

Indizes

i Nummerierung der zentralen, linken und rechten Bohrung

Abkürzungen

AVA Aerodynamische Versuchsanstalt Göttingen

CFD Computational Fluid Dynamics

SLP Stromlinienprojektionsverfahren

1 Einleitung

Experimentelle Messungen von Strömungen haben trotz der fortschreitenden Entwicklung von CFD-Programmen (Computational Fluid Dynamics) nach wie vor ihren festen Platz in der Untersuchung von Strömungsfeldern. Der Vorteil liegt darin, dass reale physikalische Vorgänge gemessen und ausgewertet werden. Oftmals bietet sich auch der direkte Vergleich von CFD Berechnungen mit Messungen an.

Die meisten Messungen erfolgen indirekt, d.h. die gefragte Größe muss erst durch die gemessene Größe berechnet werden. Dadurch ist es von wesentlicher Bedeutung die physikalischen Grundlagen zu verstehen, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Pneumatische Strömungsvektorsonden unterliegen der indirekten Messung. Die Strömungsgeschwindigkeit und Richtung werden daher indirekt über die Messung des statischen sowie des Totaldrucks ermittelt. Deshalb ist eine Kalibrierung der Sonden notwendig, um anhand der Kalibrierkurven auf die Geschwindigkeit und Richtung der Strömung rückschließen zu können [6].

Vorteile von Strömungsvektorsonden sind neben den geringen Kosten, die robuste Handhabung und die einfache Bauform, die es zulässt Strömungen auch bei rauen Bedingungen zu untersuchen, z.B. bei thermischen Turbomaschinen.

Der Einsatz von Strömungsvektorsonden ist begrenzt auf stationäre Strömungen, weil die Änderungen der Drücke bei pulsierenden Strömungen wegen der hohen Zeitkonstanten nicht so schnell gemessen werden können. Ein weiterer Nachteil ist, dass es sich bei der Sonden-Messtechnik um ein störendes Verfahren handelt, da der Sondenschaft die Strömung beeinflusst und dadurch verfälscht. Deshalb werden die Durchmesser der Sonden möglichst klein gehalten. Nach Dominy und Hodson [1] haben die Kopfgeometrie, die Reynoldszahl, die Machzahl und der Turbulenzgrad der Strömung den größten Einfluss auf die Eigenschaften der Sonde.

Üblicherweise sind Drei-, Vier-, Fünf- und Siebenlochsonden im Einsatz. Für die Messung von ebenen Strömungen werden Dreilochsonden verwendet. Dreilochsonden unterscheiden sich bezüglich ihrer Kopfgeometrie in Trapez- und Zylindersonden.

Bei räumlichen Strömungen werden die übrigen Sonden eingesetzt, es gilt dabei je mehr Bohrungen, desto größer ist der mögliche Anströmwinkel. Die Kopfgeometrie unterscheidet zwischen Kegel-, Pyramiden-, Kugel- und Zylindersonden. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich ausschließlich mit Dreilochsonden.

2 Kalibrierung

2.1 Typische Messverfahren im Strömungskanal

Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten die Richtung einer Strömung zu bestimmen. Beim Abgleichverfahren (engl. nulling-technique) wird die Sonde so in der Strömung positioniert, dass die Seitenbohrungen gleich große Drücke aufnehmen ($p_2 = p_3$). Die Verdrehung der Sonde, die notwendig ist um $p_2 = p_3$ zu erhalten entspricht dem Anströmwinkel (Gierwinkel $\Delta\beta$). Diese Methode liefert sehr genau Ergebnisse, ist aber auch aufwendig, weil man bei jeder Messung die Sonde neu ausrichten muss. Dadurch benötigt man eine lange Datenerfassungszeit.

Beim Ausschlagverfahren (engl. non nulling-technique) wird die Sonde beliebig in der Strömung ausgerichtet, wodurch es ein einfaches und schnelles Verfahren ist. Es ergeben sich unterschiedliche Bohrungsdrücke p_1, p_2 und p_3 . Anhand dieser Drücke wird der Richtungskoeffizient k_β ausgerechnet und mit Hilfe der dazugehörigen Kalibrierkurve anschließend der Anströmwinkel $\Delta\beta$ herausgelesen.

Im Vergleich zum Abgleichverfahren benötigt das Ausschlagverfahren deutlich mehr Informationen in Form von vorhandenen Kalibrierkurven. Nachteilig ist, dass die Bedingungen bei der aktuellen Messung und bei der Kalibrierung nicht identisch sind, weil sich Machzahl, Reynoldszahl und Turbulenzgrad unterscheiden. Deshalb ist das Ausschlagverfahren etwas ungenauer.

Abbildung 2.1 zeigt den Kopf einer zylindrischen Dreilochsonde mit dem dazugehörigen Anströmwinkel $\Delta\beta$.

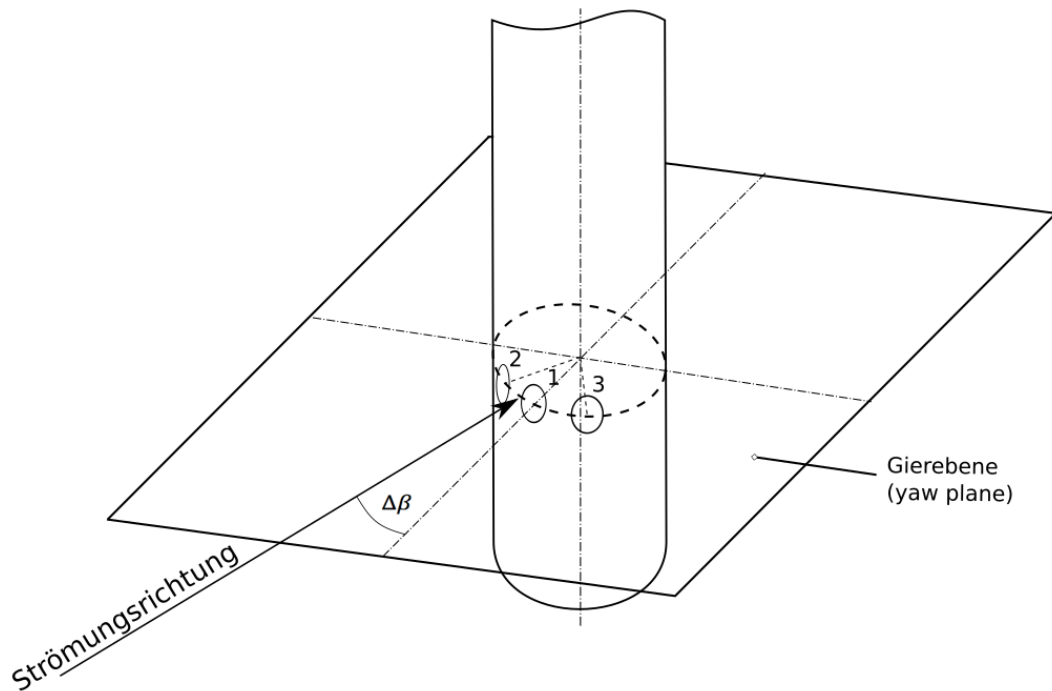


Abbildung 2.1: zylindrische Dreilochsonde mit Anströmwinkel $\Delta\beta$

2.2 Physikalische Grundlagen

2.2.1 Stromfadentheorie

Die Stromröhre (Abb. 2.2) besteht aus dem Fluid innerhalb eines Mantels aus Streichlinien. Der Massenstrom ist konstant, da kein Fluid den Mantel durchdringen kann.

Der Stromfaden ist eine verkleinerte Stromröhre, sodass Geschwindigkeit, Druck, Temperatur, Dichte und Viskosität als konstant angenommen werden können.

Stromlinien zeichnen sich dadurch aus, dass ihrer Tangenten an jedem Punkt mit der Richtung des Geschwindigkeitsvektors übereinstimmen.

Ein Stromfaden besteht aus einem Bündel von Stromlinien. Bei stationären Strömungen fallen Streich- und Stromlinie zusammen.

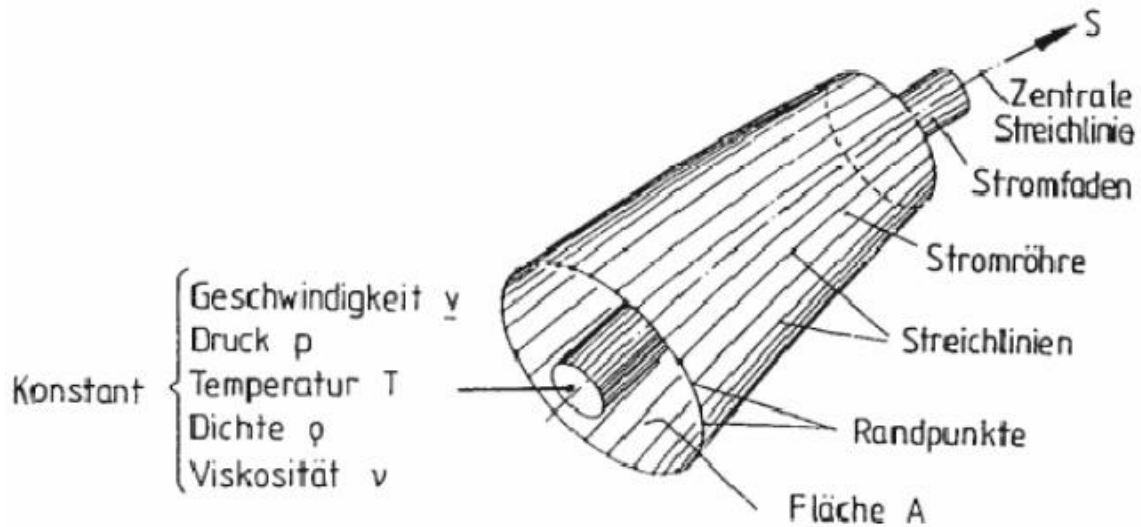


Abbildung 2.2: Stromröhre und Stromfaden [2]

2.2.2 Bernoulli-Gleichung

Die Euler-Bewegungsgleichung für das Kräftegleichgewicht in Strömungsrichtung (Strömungskordinate s , siehe Abb. 2.2) lautet

$$\frac{\partial w}{\partial t} + w \cdot \frac{\partial w}{\partial s} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial s} - g \cdot \frac{\partial z}{\partial s} \quad (2.1)$$

Da es sich bei der Anwendung mit Dreilochsonden um eine stationäre und inkompressible ($\rho = \text{konst.}$) Strömung handelt, fällt der erste Term weg und es kann nach der Strömungskordinate s integriert werden. Somit erhält man die so genannte Bernoulli-Gleichung für den Stromfaden

$$p + \rho \cdot \frac{w^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z = \text{konst.} \quad (2.2)$$

Hierbei ist p der statische Druck. Der Term $\rho \cdot \frac{w^2}{2}$ repräsentiert den dynamischen Druck und spiegelt die kinetische Energie wider. Der dritte Term beinhaltet den Anteil der geodätischen Höhe z , die bei der Kalibrierung allerdings konstant ist. Dadurch ergibt sich der Totaldruck

$$p_t = p + \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (2.3)$$

Der Totaldruck ist also die Summe aus statischem und dynamischem Druck. Die Geschwindigkeit w kann im Gegensatz zu p_t und p nicht mit Hilfe der Sonden ermittelt werden, doch durch Umformung der Gl. (2.3) leicht berechnet werden

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_t - p)}{\rho}}. \quad (2.4)$$

2.3 Strömungsgrößen und dimensionslose Kennzahlen

Um die Bohrungs- und Kalibrierkoeffizienten aus den im Labor erfassten Messdaten berechnen zu können benötigt man folgende Größen:

- spezifische Gaskonstante R_s (für trockene Luft)
- Luftdichte ρ
- Geschwindigkeit w
- kinematische Zähigkeit ν

Mit Hilfe dieser Größen kann man folgende dimensionslose Kennzahlen berechnen:

- Sondenreynoldszahl Re_d
- Mach-Zahl Ma

2.3.1 Spezifische Gaskonstante

Die spezifische Gaskonstante errechnet sich, indem man die allgemeine Gaskonstante R durch die molare Masse M des jeweiligen Gases dividiert

$$R_s = \frac{R}{M}. \quad (2.5)$$

allgemeine Gaskonstante... $R = 8,31446 \left[\frac{J}{molK} \right]$

Für trockene Luft ergibt sich für die spezifische Gaskonstant $R_s = 287 \left[\frac{J}{kgK} \right]$.

2.3.2 Dichte von Luft

Die Dichte ρ errechnet sich mit Hilfe der thermischen Zustandsgleichung für ideale Gase

$$p \cdot v = R_s \cdot T \quad \text{mit} \quad v = \frac{1}{\rho}. \quad (2.6)$$

Der statische Druck p entspricht bei Messungen im Windkanal (Freistrah) dem Umgebungsdruck p_u und die Temperatur T der Umgebungstemperatur. Durch Umformen der Gl. (2.6) erhält man die Dichte

$$\rho = \frac{p}{R_s \cdot T}. \quad (2.7)$$

2.3.3 Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal

Wie bereits in Abschn. 2.2.2 hergeleitet kann man nun auch mit Hilfe der Dichte ρ die Strömungsgeschwindigkeit w aus Gl. (2.4) berechnen

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_t - p)}{\rho}}. \quad (2.8)$$

2.3.4 Kinematische Viskosität

Zur Berechnung der kinematischen Viskosität ν wird folgende Näherungsformel verwendet

$$\nu = (0,092 \cdot t + 13,52) \cdot 10^{-6} \quad \text{in} \quad \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (2.9)$$

wobei t die gemessene Temperatur im Strömungskanal ist.

Diese Gleichung ist gültig im Bereich von $0 - 25^\circ\text{C}$ sowie bei einem Druck von 1 bar . Man erhält sie durch Interpolation der Werte für die kinematische Viskosität ν zwischen 0°C und 25°C aus dem VDI Wärmeatlas.

2.3.5 Sondenreynoldszahl

Die Sondenreynoldszahl Re_d ist eine dimensionslose Kennzahl und kann als Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften interpretiert werden. Bei geometrisch ähnlichen Körpern ist das Turbulenzverhalten bei gleicher Reynoldszahl identisch.

$$Re_d = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (2.10)$$

Die charakteristische Länge d ist in diesem Fall der Sondenkopfdurchmesser.

2.3.6 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.

$$Ma = \frac{w}{w_0} \quad (2.11)$$

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

2.4 Definition der Kalibrierkoeffizienten

Um einen Zusammenhang zwischen den gemessenen Drücken und der Anströmrichtung zu erhalten, werden Kalibrierkoeffizienten berechnet.

Es gibt unterschiedliche Definitionen zu Berechnung dieser Koeffizienten, in dieser Diplomarbeit wird jedoch auf die Methode von Treaster und Yocum [5] zurückgegriffen. Treaster und Yocum haben in ihrer Arbeit die Kalibrierkoeffizienten für Fünflochsonden definiert. In dieser Diplomarbeit werden die Kalibrierkoeffizienten jedoch adaptiert und auf Dreilochsonden reduziert.

Zuerst werden die Bohrungsnummern und die Zählrichtung der Winkel definiert. Die in dieser Diplomarbeit gewählte Nummerierung und Nomenklatur sind in Abb. 2.3 dargestellt.

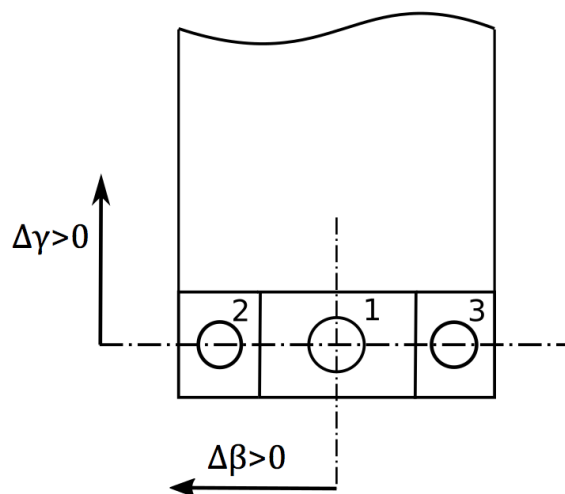


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Nummerierung der Messbohrungen und der Zählrichtung der Winkel

In Abb. 2.4 sind die zwei Anströmwinkel $\Delta\beta$ und $\Delta\gamma$ definiert. Der Gierwinkel $\Delta\beta$ (engl. yaw angle) befindet sich genauso wie die Seitenbohrungen 2 und 3 in der Gierebene (engl. yaw plane). Aus Abb. 2.3 und 2.4 erkennt man, dass der Gierwinkel $\Delta\beta$ maßgeblich für die Bestimmung der Druckdifferenz von Messbohrung 2 und 3 ist.

Der Nickwinkel $\Delta\gamma$ (engl. pitch angle) befindet sich in der Nickebene (engl. pitch plane), die normal auf die Gierebene steht.

Üblicherweise sind Dreilochsonden nur für Messungen in der Gierebene geeignet, da sie nur drei Bohrungen besitzen und daher in der Nickebene keine Druckdifferenz messen können. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich allerdings mit dem Nickwinkeleinfluss bei Dreilochsonden, weshalb dieser hier eingeführt wird.

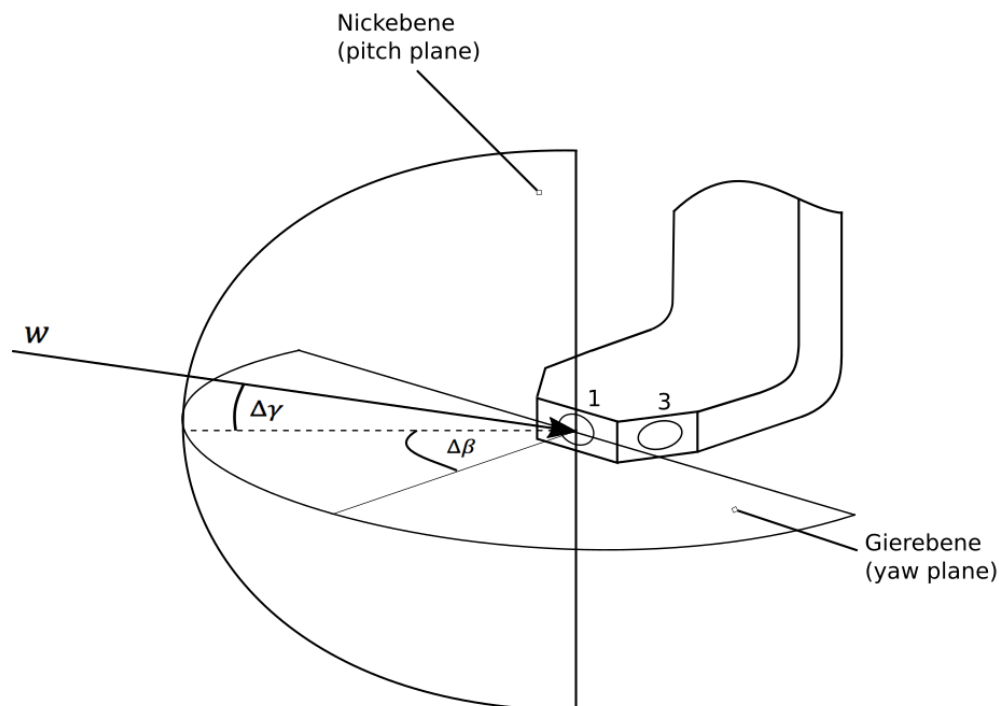


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Anströmwinkel $\Delta\beta$ und $\Delta\gamma$ und den dazugehörigen Gier- und Nickebenen

2.4.1 Bohrungskoeffizienten

Der an der Bohrung i anliegende Druck ($p_i - p$) unterscheidet sich um einen bestimmten Anteil vom dynamischen Druck $p_{dyn} = \rho \cdot \frac{w^2}{2}$ der Strömung. Für inkompressible Strömungen ($Ma < 0,3$) können daher Bohrungskoeffizienten

$$k_i = \frac{p_i - p}{\rho \cdot \frac{w^2}{2}} \quad (2.12)$$

definiert werden, welche dimensionslose Drücke darstellen. Der Index i führt bei Dreilochsonden also zu drei unterschiedliche Bohrungskoeffizienten k_1, k_2 und k_3 .

Abbildung 2.5 zeigt eine typische Verteilung der drei Bohrungskoeffizienten in Abhängigkeit vom Gierwinkel $\Delta\beta$ für Dreilochsonden.

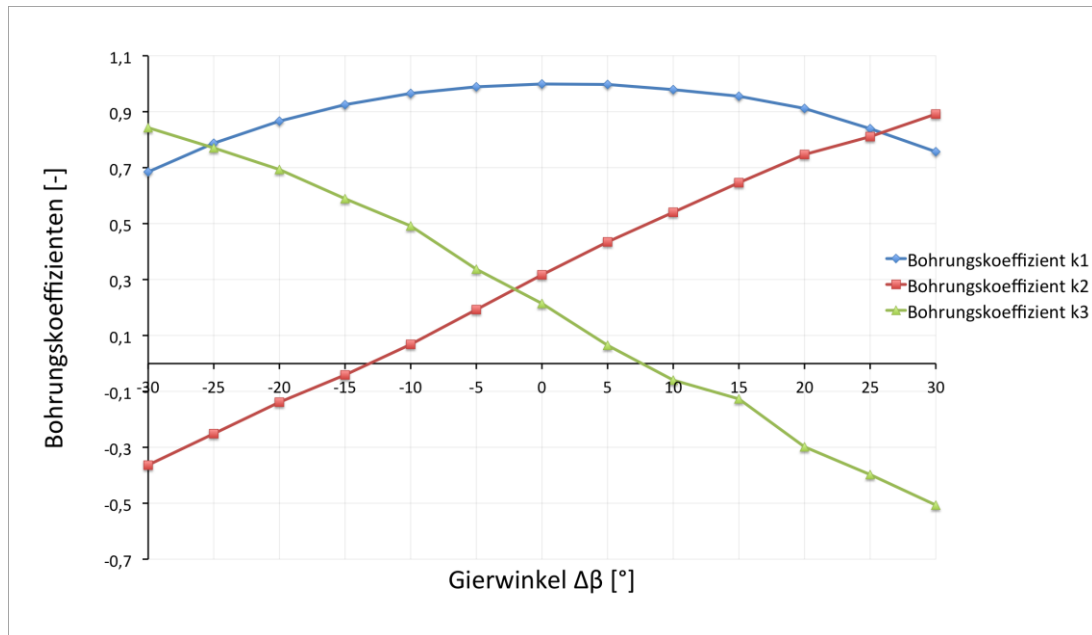


Abbildung 2.5: Typische Verteilung der dimensionslosen Bohrungskoeffizienten k_1 , k_2 und k_3

2.4.2 Kalibrierkoeffizienten

-Richtungskoeffizient k_β (engl. Direction Coefficient)

$$k_\beta = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_2 - k_3}{k_1 - \bar{k}} \quad (2.13)$$

-Totaldruckkoeffizient k_t (engl. Total Pressure Coefficient)

$$k_t = \frac{p_1 - p_t}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_1 - 1}{k_1 - \bar{k}} \quad (2.14)$$

-statischer Druckkoeffizient k_s (engl. static Pressure Coefficient)

$$k_s = \frac{\bar{p} - p}{p_1 - \bar{p}} = \frac{\bar{k}}{k_1 - \bar{k}} \quad (2.15)$$

mit

$$\bar{p} = \frac{p_2 + p_3}{2} \quad (2.16)$$

als Mittelwert der gemessenen Seitenbohrungsdrücke und

$$\bar{k} = \frac{k_2 + k_3}{2} \quad (2.17)$$

als Mittelwert der Bohrungskoeffizienten k_2 und k_3 .

Mit Hilfe der drei gemessenen Bohrungsdrücke p_1, p_2 und p_3 , sowie dem Totaldruck p_t und dem statischen Druck p kann man die Kalibrierkoeffizienten k_β, k_t und k_s mit den Gl. (2.13) bis Gl. (2.17) ermitteln.

Der Nenner ($p_1 - \bar{p}$) ist als dynamischer Druck zu interpretieren und bewirkt die Normierung der Kalibrierkoeffizienten. Der gültige Bereich für diese Berechnungen beschränkt sich auf einen Gierwinkel $\Delta\beta \approx \pm 30^\circ$. Der Grund dafür liegt darin, dass bei größeren Anströmwinkeln die Druckdifferenz ($p_1 - \bar{p}$) zu sehr vom realen dynamischen Druck abweicht, so dass der Nenner negativ oder null wird. Das bedeutet, dass die Gleichungen singular werden und die Kalibrierkoeffizienten unendlich groß werden.

Die Arbeit von Smajic [4] befasst sich mit der Erweiterung des Betriebsbereichs von Dreilochsonden auf $\Delta\beta \approx \pm 60^\circ$.

In Abb. 2.6 sind typische Verläufe der Kalibrierkoeffizienten in Abhängigkeit vom Gierwinkel $\Delta\beta$ für Dreilochsonden dargestellt.

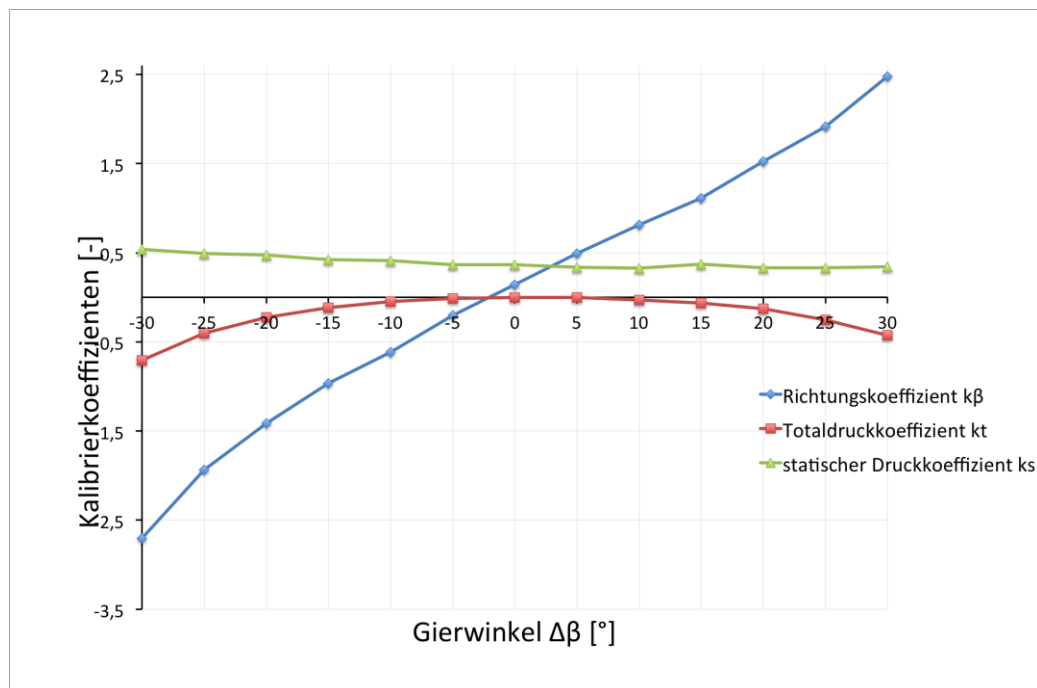


Abbildung 2.6: Typische Verläufe der dimensionslosen Kalibrierkoeffizienten k_β, k_t und k_s

Wie Sonden, die bereits vorhandene Kalibrierkurven haben angewendet werden, soll folgendes Beispiel erklären.

Die Sonde wird in einer in Geschwindigkeit und Richtung unbekanntem Strömung ausgerichtet und fest eingespannt. Üblicherweise arbeitet man mit dem Ausschlagverfahren (siehe Abschn. 2.1), da dieses eine schnellere Anwendung erlaubt. Über die Sonde erhält man nun die drei Bohrungsdrücke p_1, p_2 und p_3 . Anhand dieser Drücke wird der Richtungskoeffizient k_β mit Gl. (2.13) ausgerechnet. Setzt man diesen Wert jetzt in die Kalibrierkurve von k_β ein, so kann man den dazugehörigen Gierwinkel $\Delta\beta$ herauslesen (siehe Abb. 2.6) und erhält somit Informationen über die Anströmungsrichtung. Mit dem Wissen über $\Delta\beta$ kann man nun den Totaldruckkoeffizienten k_t und den statischen Druckkoeffizienten k_s herauslesen. Über k_t wird mit Gl. (2.14) der Totaldruck p_t ausgerechnet, mit dem wiederum mit Gl. (2.8) die Strömungsgeschwindigkeit w berechnet werden kann. Über k_s wird mit Gl. (2.15) der statische Druck p berechnet.

3 Sonden-Geometrie

Dreilochsonden, sind wie der Name schon sagt immer mit drei Bohrungen ausgestattet, an denen drei unterschiedliche Drücke gemessen werden. Da es sich bei dem Messverfahren um ein störendes Verfahren handelt, wird angestrebt die Geometrie möglichst schlank und rund zu wählen und die Durchmesser klein im Verhältnis zu der Schaftlänge zu gestalten.

Die Sonden müssen stets mit Sorgfalt aufbewahrt und behandelt werden, da durch Verbiegen starke Ungenauigkeiten bei der Messung entstehen können.

In Tab. 3.1 ist ein Überblick der in dieser Diplomarbeit untersuchten Dreilochsonden angegeben, wobei der Name immer auf die Kopfgeometrie rückschließen lässt.

Name der Sonde	Herstellungsjahr	d Kopf [mm]	δ [°]	a [mm]	Thermoelement
SVUSS/3 Kobrasonde	1994	2,4	30	1,6	nein
AVA Trapezsonde Nr. 110	1968	3,3	30	2,0	ja, defekt
AVA Zylindersonde Nr. 43	unbekannt	3,0	50	2,3	nein

Tabelle 3.1: Überblick der untersuchten Dreilochsonden

In Abb. 3.1 ist die trapezförmige Kopfgeometrie einer Dreilochsonde skizziert. Die mittlere Bohrung ist mit 1 nummeriert, die linke und rechte mit jeweils 2 und 3. Weiters sind noch die Strömungsgeschwindigkeit w mit dem Gierwinkel $\Delta\beta$ (positive Zählrichtung in der Darstellung), der Flankenwinkel δ , sowie der Sondenkopfdurchmesser d gegeben. Der Abstand der Seitenbohrungen 2 und 3 zueinander wird mit a bezeichnet.

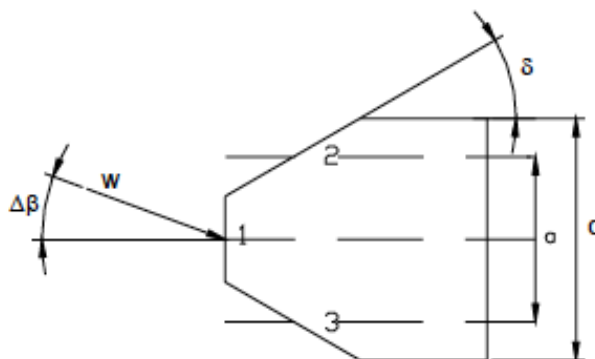


Abbildung 3.1: Trapezförmige Kopfgeometrie mit der üblichen Bohrungsnummerierung [3]

3.1 SVUSS/3 Kobrasonde

Die Abb. 3.2 und 3.3 zeigen die SVUSS/3 Kobrasonde, die im Jahr 1994 in Prag (Tschechische Republik) von der Firma SVUSS hergestellt wurde. Der Schaft ist rund ausgeführt und am oberen Ende befinden sich drei Anschlüsse an die drei Schläuche zur Druckmessung angebracht werden.

Die Sonde verdankt ihren Namen ihrem kobraförmigen Kopf (entspricht einer Trapezform).

Die Vorteile dieser Sonde liegen darin, dass man Strömungen bis an den nahen Wandbereich untersuchen kann und dass der Schaft nahe der Bohrungen aufgrund seiner gebogenen Form weniger in die Strömung eingreift.



Abbildung 3.2: SVUSS/3 Kobrasonde [3]



Abbildung 3.3: Vergrößerte Kopfansicht der SVUSS/3 Kobrasonde [3]

Die charakteristischen Abmessungen der Sonde sind:

- die Breite des Sondenkopfes $d = 2,4mm$ und seine Höhe $0,8mm$
- die Gesamtlänge der Sonde $l = 650mm$
- der Durchmesser der drei Bohrungen $0,5mm$
- der Sondenchaftdurchmesser $6mm$
- der Abstand zwischen den zwei symmetrischen Seitenbohrungen $a = 1,6mm$
- der Flankenwinkel $\delta = 30^\circ$

3.2 AVA Trapezsonde Nummer 110

Die Abb. 3.4 und 3.5 zeigen die AVA Trapezsonde Nr. 110, die von der Aerodynamischen Versuchsanstalt Göttingen e.V. entworfen wurde [4]. Der Schaft ist zylinderförmig ausgeführt und am oberen Ende sind die drei Schlauchanschlüsse zur Druckmessung gut erkennbar (Abb.3.4). Der Kopf ist gleich wie bei der SVUSS/3 Kobrasonde trapezförmig, der Schaft beim Kopf ist bei der AVA Trapezsonde Nr. 110 jedoch gerade. Es ist auch ein Thermoelement zur Temperaturmessung integriert, das allerdings defekt ist.

Der Vorteil dieser Sonde liegt wieder darin, dass man aufgrund der Kopfgeometrie bis in den wandnahen Bereich messen kann.



Abbildung 3.4: AVA Trapezsonde Nr. 110 [3]



Abbildung 3.5: vergrößerte Kopfansicht der AVA Trapezsonde Nr. 110 [3]

Die charakteristischen Abmessungen der Sonde sind:

- die Breite des Sondenkopfes $d = 3,3\text{mm}$ und seine Höhe $1,3\text{mm}$
- die Gesamtlänge der Sonde $l = 366\text{mm}$
- der Durchmesser der drei Bohrungen $0,6\text{mm}$
- der Sondenschaftdurchmesser 6mm
- der Abstand zwischen den zwei symmetrischen Seitenbohrungen $a = 2,0\text{mm}$
- der Flankenwinkel $\delta = 30^\circ$

3.3 AVA Zylindersonde Nummer 43

Die Abb. 3.6 und 3.7 zeigen die AVA Trapezsonde Nr. 43, die von der Aerodynamischen Versuchsanstalt Göttingen e.V. entworfen wurde [4]. Der Schaft ist zylinderförmig ausgeführt und am oberen Ende sind die drei Schlauchanschlüsse zur Druckmessung gut erkennbar (Abb.3.6). Der Kopf ist ebenso zylinderförmig und gerade gefertigt.

Ein weiterer maßgeblicher Unterschied zu den beiden anderen Sonden ist, dass sich die drei Bohrungen in einem Abstand von 29mm vom unteren Ende der Sonde befinden. Dadurch ist es nicht möglich Strömungen in Wandnähe zu messen. Allerdings bringt es den Vorteil, dass keine Strömungsablösung in der Nähe der Bohrungen stattfindet.



Abbildung 3.6: AVA Zylindersonde Nr. 43 [3]



Abbildung 3.7: Vergrößerte Kopfansicht der AVA Zylindersonde Nr. 43 [3]

Die charakteristischen Abmessungen der Sonde sind:

- Der Durchmesser des Sondenkopfes $d = 3,0\text{mm}$
- die Gesamtlänge der Sonde $l = 335\text{mm}$
- der Durchmesser der mittleren Bohrungen $0,3\text{mm}$
- der Durchmesser der zwei Seitenbohrungen $0,6\text{mm}$
- der Sondenschaftdurchmesser 6mm
- der Abstand zwischen den zwei symmetrischen Seitenbohrungen $a = 2,3\text{mm}$
- der Flankenwinkel $\delta = 50^\circ$ (Winkel zwischen Seitenbohrung und Längsachse)

4 Stromlinienprojektionsverfahren

4.1 Projektion des Geschwindigkeitsvektors

Um eine erste Abschätzung der Kalibrierkoeffizienten zu erhalten, bzw. um die Messergebnisse zu vergleichen und eventuelle Messfehler aufzudecken, wird das Stromlinienprojektionsverfahren angewandt.

Stromlinien zeichnen sich dadurch aus, dass ihrer Tangenten an jedem Punkt mit der Richtung des Geschwindigkeitsvektors übereinstimmen (siehe Abschn. 2.2.1).

Das Verfahren beruht auf der Tatsache, dass die normal auf die Sondenoberfläche liegende Komponente des Geschwindigkeitsvektors einen entsprechenden Teil des dynamischen Druckes liefert, welcher zum statischen Druck addiert wird und als Bohrungsdruck wirkt. Der Geschwindigkeitsvektor w , dessen Betrag konstant ist, wird also auf jede der 3 Messbohrungen projiziert und es ergibt sich somit für den an der Bohrung i ermittelten Gesamtdruck

$$p_i = p + \rho \cdot \frac{w_i^2}{2} \quad (4.1)$$

wobei p der statische Druck und w_i die Normalprojektion des Geschwindigkeitsvektor auf die Bohrung i ist.

Formt man Gl. (2.12) auf p_i um, so erhält man

$$p_i = p + \rho \cdot \frac{k_i \cdot w^2}{2}. \quad (4.2)$$

Setzt man nun Gl. (4.1) und (4.2) gleich so ergibt sich folgende Beziehung für die Berechnung der Bohrungskoeffizienten

$$k_i = \left(\frac{w_i}{w}\right)^2. \quad (4.3)$$

Um die Strömungsgeschwindigkeit w_y in der Gierebene (yaw plane) zu erhalten muss der Geschwindigkeitsvektor w zerlegt und auf die Gierebene projiziert werden. Da bei Dreilochsonden keine Bohrungen in der Nickebene existieren, ist es hinfällig den Geschwindigkeitsvektor w in die Nickebene zu projizieren.

In Abb. 4.1 ist die Projektion des Geschwindigkeitsvektors auf die Gierebene dargestellt.

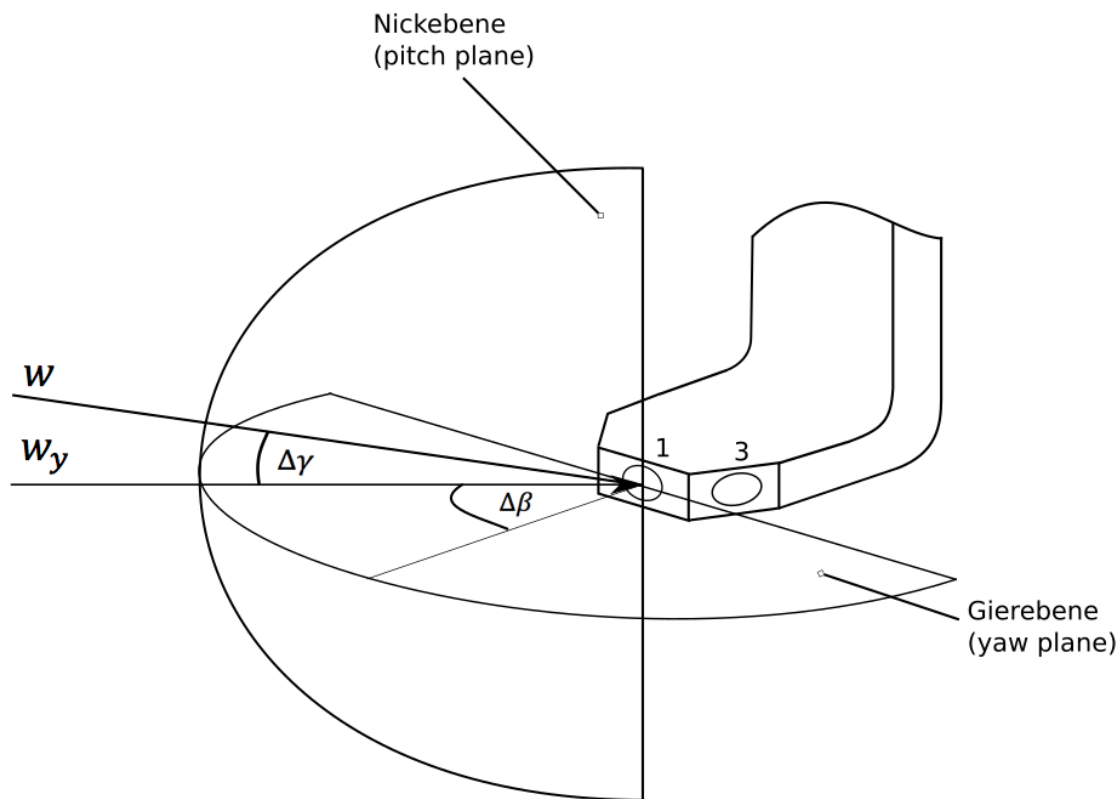


Abbildung 4.1: Projektion des Geschwindigkeitsvektors w auf die Gierebene

Aus Abb. 4.1 ist ersichtlich, dass für die Geschwindigkeit in der Gierebene folgender Zusammenhang gilt:

$$w_y = w \cdot \cos(\Delta\gamma). \quad (4.4)$$

4.2 Sonden mit trapezförmiger Kopfgeometrie

Die SVUSS/3 Kobrasonde und die AVA Trapezsonde Nr. 110 haben beide trapezförmige Köpfe und den selben Flankenwinkel von $\delta = 30^\circ$. Deshalb sind die Gleichungen für das Stromlinienprojektionsverfahren identisch.

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

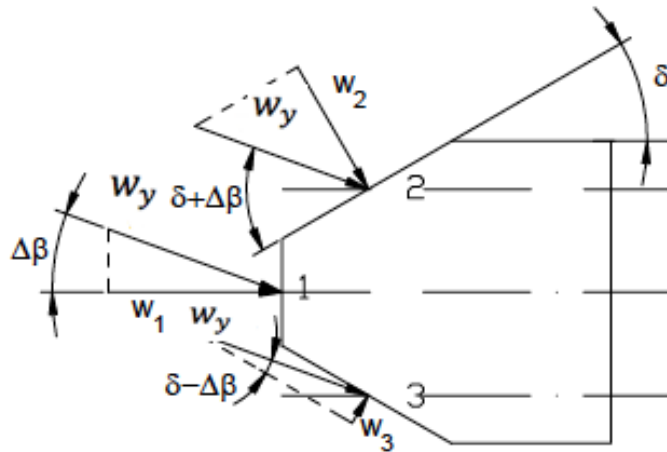


Abbildung 4.2: Projektion des Geschwindigkeitsvektors w_y auf die Bohrungen einer trapezförmigen Dreilochsonde. Modifiziert nach [3]

Nachdem zuvor die Strömungsgeschwindigkeit auf die Gierebene projiziert wird, erfolgt weiters die Projektion auf die drei Bohrungen. Man kann sich nun die Geschwindigkeiten für die einzelnen Bohrungen ermitteln:

$$w_1 = w_y \cdot \cos(\Delta\beta) = w \cdot \cos(\Delta\gamma) \cdot \cos(\Delta\beta) \quad (4.5)$$

$$w_2 = w_y \cdot \sin(\delta + \Delta\beta) = w \cdot \cos(\Delta\gamma) \cdot \sin(\delta + \Delta\beta) \quad (4.6)$$

$$w_3 = w_y \cdot \sin(\delta - \Delta\beta) = w \cdot \cos(\Delta\gamma) \cdot \sin(\delta - \Delta\beta) \quad (4.7)$$

Setzt man nun die Geschwindigkeiten in Gl. (4.1) ein, so erhält man die einzelnen Bohrungsdrücke:

$$p_1 = p + \rho \cdot \frac{[w \cdot \cos(\Delta\gamma) \cdot \cos(\Delta\beta)]^2}{2} \quad (4.8)$$

$$p_2 = p + \rho \cdot \frac{[w \cdot \cos(\Delta\gamma) \cdot \sin(\delta + \Delta\beta)]^2}{2} \quad (4.9)$$

$$p_3 = p + \rho \cdot \frac{[w \cdot \cos(\Delta\gamma) \cdot \sin(\delta - \Delta\beta)]^2}{2} \quad (4.10)$$

Mit Hilfe von Gl. (4.3) lassen sich nun die Bohrungskoeffizienten k_i ausrechnen:

$$k_1 = [\cos(\Delta\gamma) \cdot \cos(\Delta\beta)]^2 \quad (4.11)$$

$$k_2 = [\cos(\Delta\gamma) \cdot \sin(\delta + \Delta\beta)]^2 \quad (4.12)$$

$$k_3 = [\cos(\Delta\gamma) \cdot \sin(\delta - \Delta\beta)]^2 \quad (4.13)$$

Man erkennt, dass das Stromlinienprojektionsverfahren ein rein geometrisches Verfahren ist, das nur vom Nickwinkel $\Delta\gamma$, vom Gierwinkel $\Delta\beta$ und vom Flankenwinkel δ abhängig ist. Die realen Strömungseinflüsse werden jedoch nicht berücksichtigt, weshalb dieses Verfahren nur als Vergleich zu den tatsächlichen Messungen sinnvoll ist.

Für die Kalibrierkoeffizienten verwendet man nun wieder die Gl. (2.13), (2.14) und (2.15). Es ist nun um einiges übersichtlicher, wenn man anstatt der Drücke gleich die ermittelten Bohrungskoeffizienten einsetzt.

-Richtungskoeffizient k_β

$$k_\beta = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_2 - k_3}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\cos^2(\Delta\gamma) \cdot [\sin^2(\delta + \Delta\beta) - \sin^2(\delta - \Delta\beta)]}{\cos^2(\Delta\gamma) \cdot \cos^2(\Delta\beta) - \bar{k}} \quad (4.14)$$

Setzt man nun Gl. (4.19) für \bar{k} ein und kürzt den Term $\cos^2(\Delta\gamma)$ heraus, so erhält man

$$k_\beta = \frac{[\sin^2(\delta + \Delta\beta) - \sin^2(\delta - \Delta\beta)]}{\cos^2(\Delta\beta) - \frac{\sin^2(\delta + \Delta\beta) + \sin^2(\delta - \Delta\beta)}{2}} \quad (4.15)$$

Es ist also zu erkennen, dass bei der Methode der Stromlinienprojektion der Nickwinkel $\Delta\gamma$ keinen Einfluss auf den Richtungskoeffizienten k_β hat.

-Totaldruckkoeffizient k_t

$$k_t = \frac{p_1 - p_t}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_1 - 1}{k_1 - \bar{k}} \quad (4.16)$$

$$k_t = \frac{\cos^2(\Delta\gamma) \cdot \cos^2(\Delta\beta) - 1}{\cos^2(\Delta\gamma) \cdot \left[\cos^2(\Delta\beta) - \frac{\sin^2(\delta + \Delta\beta) + \sin^2(\delta - \Delta\beta)}{2} \right]} \quad (4.17)$$

Aus Gl. (4.17) ist zu erkennen, dass der Nickwinkel $\Delta\gamma$ beim Totaldruckkoeffizienten k_t sehr wohl Einfluss hat.

-statischer Druckkoeffizient k_s

$$k_s = \frac{\bar{p} - p}{p_1 - \bar{p}} = \frac{\bar{k}}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\frac{\sin^2(\delta + \Delta\beta) + \sin^2(\delta - \Delta\beta)}{2}}{\cos^2(\Delta\beta) - \frac{\sin^2(\delta + \Delta\beta) + \sin^2(\delta - \Delta\beta)}{2}} \quad (4.18)$$

Auch beim statischen Druckkoeffizient k_s kürzt sich der Term $\cos^2(\Delta\gamma)$ heraus und somit hat der Nickwinkel $\Delta\gamma$ bei dieser Betrachtung keinen Einfluss mehr.

Der für die Gl. (4.14) bis (4.18) verwendete Mittelwert der Bohrungskoeffizienten k_2 und k_3 errechnet sich wie folgt:

$$\bar{k} = \frac{k_2 + k_3}{2} = \cos^2(\Delta\gamma) \cdot \left[\frac{\sin^2(\delta + \Delta\beta) + \sin^2(\delta - \Delta\beta)}{2} \right] \quad (4.19)$$

4.3 Sonden mit zylinderförmiger Kopfgeometrie

Die AVA Zylindersonde Nr. 110 hat einen zylinderförmigen Kopf mit einem Flankenwinkel von $\delta = 50^\circ$. Die Betrachtung der projizierten Geschwindigkeiten auf die drei Bohrungen erfolgt deshalb anders als bei den Sonden mit trapezförmiger Kopfgeometrie. In Abb. 4.3 ist zu sehen wie diese Geschwindigkeitsprojektion zu verstehen ist.

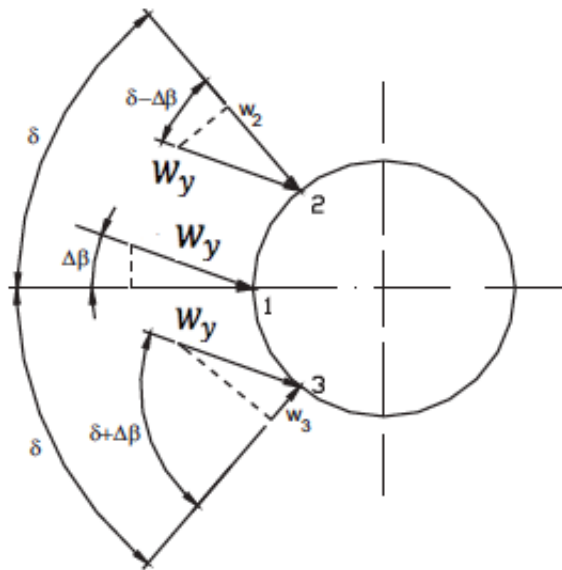


Abbildung 4.3: Projektion des Geschwindigkeitsvektors w_y auf die Bohrungen einer zylinderförmigen Dreilochsonde. Modifiziert nach [3]

Nachdem zuvor die Strömungsgeschwindigkeit auf die Gierebene projiziert wird, erfolgt weiters die Projektion auf die drei Bohrungen. Die Geschwindigkeiten für die einzelnen Bohrungen stehen radial auf den Zylinder und normal auf die Bohrungen. Sie werden wie folgt ermittelt:

$$w_1 = w_y \cdot \cos(\Delta\beta) = w \cdot \cos(\Delta\gamma) \cdot \cos(\Delta\beta) \quad (4.20)$$

$$w_2 = w_y \cdot \cos(\delta - \Delta\beta) = w \cdot \cos(\Delta\gamma) \cdot \cos(\delta - \Delta\beta) \quad (4.21)$$

$$w_3 = w_y \cdot \cos(\delta + \Delta\beta) = w \cdot \cos(\Delta\gamma) \cdot \cos(\delta + \Delta\beta) \quad (4.22)$$

Setzt man nun die Geschwindigkeiten in Gl. (4.1) ein, so erhält man die einzelnen Bohrungsdrücke:

$$p_1 = p + \rho \cdot \frac{[w \cdot \cos(\Delta\gamma) \cdot \cos(\Delta\beta)]^2}{2} \quad (4.23)$$

$$p_2 = p + \rho \cdot \frac{[w \cdot \cos(\Delta\gamma) \cdot \cos(\delta - \Delta\beta)]^2}{2} \quad (4.24)$$

$$p_3 = p + \rho \cdot \frac{[w \cdot \cos(\Delta\gamma) \cdot \cos(\delta + \Delta\beta)]^2}{2} \quad (4.25)$$

Mit Hilfe von Gl. (4.3) lassen sich nun die Bohrungskoeffizienten k_i ausrechnen:

$$k_1 = [\cos(\Delta\gamma) \cdot \cos(\Delta\beta)]^2 \quad (4.26)$$

$$k_2 = [\cos(\Delta\gamma) \cdot \cos(\delta - \Delta\beta)]^2 \quad (4.27)$$

$$k_3 = [\cos(\Delta\gamma) \cdot \cos(\delta + \Delta\beta)]^2 \quad (4.28)$$

Für die Kalibrierkoeffizienten verwendet man nun wieder die Gl. (2.13), (2.14) und (2.15).

-Richtungskoeffizient k_β

$$k_\beta = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_2 - k_3}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\cos^2(\Delta\gamma) \cdot [\cos^2(\delta - \Delta\beta) - \cos^2(\delta + \Delta\beta)]}{\cos^2(\Delta\gamma) \cdot \cos^2(\Delta\beta) - \bar{k}} \quad (4.29)$$

Setzt man nun Gl. (4.29) für \bar{k} ein und kürzt den Term $\cos^2(\Delta\gamma)$ heraus, so erhält man

$$k_\beta = \frac{[\cos^2(\delta - \Delta\beta) - \cos^2(\delta + \Delta\beta)]}{\cos^2(\Delta\beta) - \left[\frac{\cos^2(\delta - \Delta\beta) + \cos^2(\delta + \Delta\beta)}{2} \right]} \quad (4.30)$$

Es ist also zu erkennen, dass bei der Methode der Stromlinienprojektion der Nickwinkel $\Delta\gamma$ keinen Einfluss auf den Richtungskoeffizienten k_β hat.

-Totaldruckkoeffizient k_t

$$k_t = \frac{p_1 - p_t}{p_1 - \bar{p}} = \frac{k_1 - 1}{k_1 - \bar{k}} \quad (4.31)$$

$$k_t = \frac{\cos^2(\Delta\gamma) \cdot \cos^2(\Delta\beta) - 1}{\cos^2(\Delta\gamma) \cdot \left[\cos^2(\Delta\beta) - \frac{\cos^2(\delta - \Delta\beta) + \cos^2(\delta + \Delta\beta)}{2} \right]} \quad (4.32)$$

Aus Gl. (4.17) ist zu erkennen, dass der Nickwinkel $\Delta\gamma$ beim Totaldruckkoeffizienten k_t sehr wohl Einfluss hat.

-statischer Druckkoeffizient k_s

$$k_s = \frac{\bar{p} - p}{p_1 - \bar{p}} = \frac{\bar{k}}{k_1 - \bar{k}} = \frac{\frac{\cos^2(\delta - \Delta\beta) + \cos^2(\delta + \Delta\beta)}{2}}{\cos^2(\Delta\beta) - \frac{\cos^2(\delta - \Delta\beta) + \cos^2(\delta + \Delta\beta)}{2}} \quad (4.33)$$

Auch beim statischen Druckkoeffizient k_s kürzt sich der Term $\cos^2(\Delta\gamma)$ heraus und somit hat der Nickwinkel $\Delta\gamma$ bei dieser Betrachtung keinen Einfluss mehr.

Der für die Gl. (4.29) bis (4.33) verwendete Mittelwert der Bohrungskoeffizienten k_2 und k_3 errechnet sich wie folgt:

$$\bar{k} = \frac{k_2 + k_3}{2} = \cos^2(\Delta\gamma) \cdot \left[\frac{\cos^2(\delta - \Delta\beta) + \cos^2(\delta + \Delta\beta)}{2} \right] \quad (4.34)$$

5 Messaufbau und Testanlage

Die Kalibrierung der drei am Institut vorhandenen Dreilochsonden wurde unter kontrollierten Bedingungen im Labor des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik durchgeführt. Dazu wurde der Freistrahwindkanal des Instituts verwendet. In diesem Kapitel wird der Freistrahwindkanal, der Messaufbau und die Messdurchführung erklärt. Anhand der daraus erhaltenen Daten kann die Berechnung der Bohrungs- und Kalibrierkoeffizienten wie in Abschn. 2.4 und Kap. 4 beschrieben durchgeführt werden.

5.1 Beschreibung des Freistrahwindkanals

Der Windkanal hat als Hauptkomponenten wie aus Abb. 5.1 ersichtlich einen Gleichstrommotor, einen Radialventilator mit einem anschließenden Diffusor, ein Turbulenzsieb mit einer darauffolgenden Beruhigungsstrecke, die von der Düse abgeschlossen wird.

Der drehzahlregelbare Gleichstrommotor mit 50 kW treibt den SIROCCO Z 10 HD 86 Radialventilator mit einem Laufraddurchmesser von 884mm und einem Volumenstrom von $10800 \text{ m}^3/\text{h}$ an [2].

Direkt auf den Ventilator folgt der Diffusor mit einem Öffnungswinkel von $5,7^\circ$, der die Strömung verzögert. Anfangs hat der Diffusor einen rechteckigen Querschnitt, der aber in einen kreisförmigen Querschnitt übergeht. Am Ende des Diffusors befindet sich das Turbulenzsieb, das im gesamten Querschnitt für annähernd gleiche Turbulenzen sorgen soll.

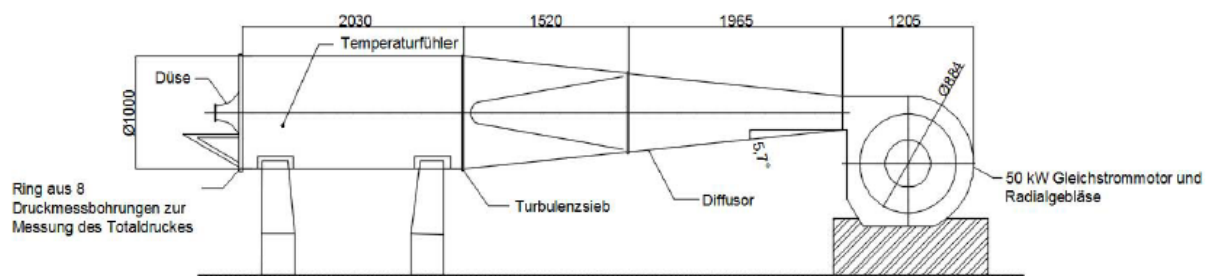


Abbildung 5.1: Skizze des Freistrahwindkanals [2]

Der letzte Abschnitt besteht aus der ca. 2m langen Beruhigungsstrecke mit einem Durchmesser von 1000mm an deren Ende sich die Düse (engl. nozzle) mit einem Durchmesser von $d_n = 120\text{mm}$ befindet. Davor befindet sich noch ein Ring mit acht Druckmessbohrungen, die den Totaldruck p_t abnehmen und ein Pt-100 Widerstandsthermometer, das die Temperatur der Strömung misst.

Der Freistrahler wird durch eine Witoszynski-Düse mit 120mm Austrittsdurchmesser gebildet. Da die Beruhigungsstrecke einen Durchmesser von 1000 mm aufweist, ergibt sich ein Querschnittsverhältnis von 1:69,4. Das bedeutet, dass bei maximaler Drehzahl des Gebläses, der Freistrahler eine Machzahl von 0,3 erreichen kann. Der Turbulenzgrad liegt bei ca. 1%.

Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht der wesentlichen Daten des Freistrahlerwindkanals.

Gleichstrommotor	50kW
Volumenstrom des Radialventilator	$10800\text{ m}^3/\text{h}$
Öffnungswinkel des Diffusors	$5,7^\circ$
Durchmesser der Beruhigungsstrecke	1000mm
Durchmesser der Düse	120mm
Querschnittsverhältnis von Düse und Beruhigungsstrecke	1:69,4
Machzahlbereich	0,05 bis 0,3
Turbulenzgrad	ca. 1%

Tabelle 5.1: Überblick der Daten des Freistrahlerwindkanals

5.2 Messaufbau

Die Sonde wird stromabwärts in einer im Gierwinkel $\Delta\beta$ und Nickwinkel $\Delta\gamma$ verstellbaren Haltevorrichtung eingespannt (siehe Abb.5.2 und 5.3). Die Einspannung erfolgt so, dass der Gierwinkel $\Delta\beta$ und der Nickwinkel $\Delta\gamma$ bei der Haltevorrichtung beide auf null gestellt werden und die Sonde anschließend mit einer Wasserwaage ausgerichtet und arretiert wird. Die Sonde ist um 90° verdreht eingespannt, was sich aber nicht auf die festgelegten Winkel und Bohrungsbezeichnungen auswirkt.



Abbildung 5.2: Einspannung der Sonde vor der Düse [3]



Abbildung 5.3: Einspannung der Sonde vor der Düse [2]

Die Sonde sollte in einem Abstand zur Düse in einem Bereich

$$0 \leq x \leq 2 \cdot d_n$$

montiert werden, damit ein homogenes Strömungsfeld vorliegt. Außerhalb dieses Bereichs vermindert sich der Totaldruck auf unter 75% seines ursprünglichen Wertes, was bedeutet, dass die Strömungsgeschwindigkeit abnimmt und nicht mehr konstant ist [7].

Bei der Kalibrierung der in dieser Diplomarbeit untersuchten Sonden wurde ein Abstand von $x = 190\text{mm}$ gewählt, was eine ausreichend gute Freistrahqualität sicherstellt.

Im folgenden wird der Aufbau der Messkette erklärt, welche in Abb. 5.4 anschaulich dargestellt ist. Die Temperaturmessung erfolgt direkt im Windkanal über ein Pt-100 Widerstandsthermometer.

Die Sonde misst in allen Kalibrierpunkten die Bohrungsdrücke p_1 , p_2 und p_3 . Der Totaldruck p_t wird direkt am Ende des Windkanals abgenommen. Die Drücke werden mittels piezoresistiven Differenzdrucksensors gemessen und in elektrische Spannungen umgewandelt. Als Referenzdruck gilt immer der Umgebungsdruck, welcher gleich dem statischen Druck ist ($p_U = p$). Es werden also alle Drücke als Differenzdrücke gemessen, mit

$$\Delta p_i = p_i - p_U$$

wobei der Index i den drei Bohrungsdrücken und dem Totaldruck entspricht.

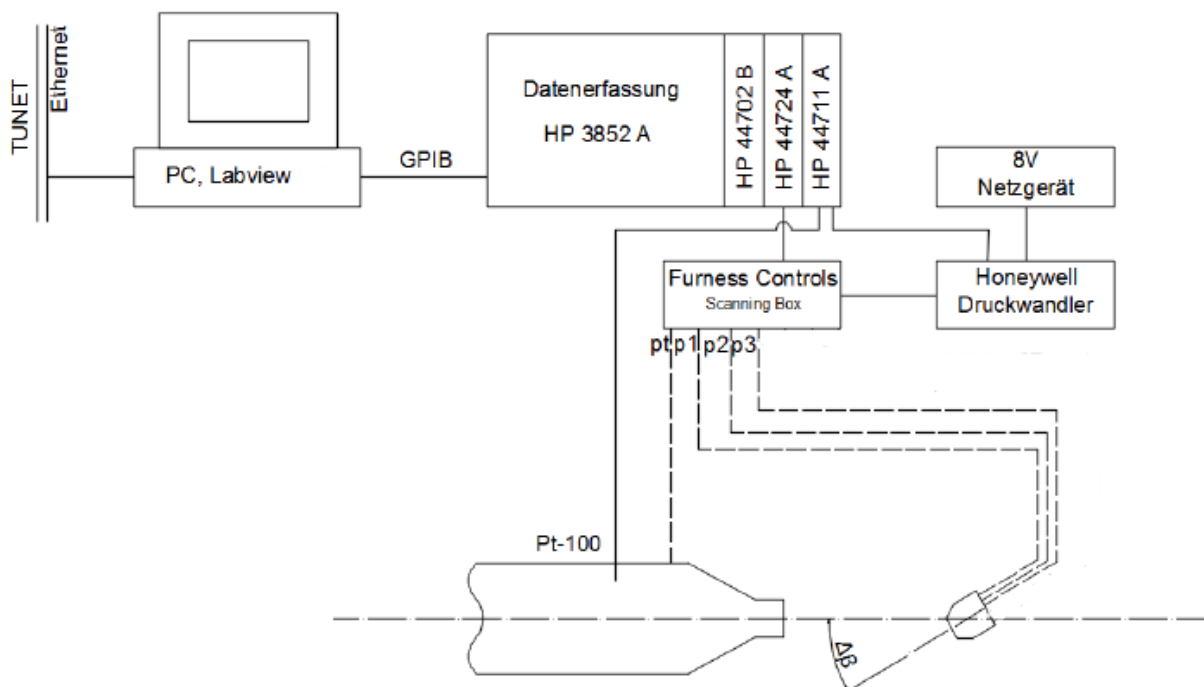


Abbildung 5.4: Messaufbau [2]

Die anliegenden Drücke werden über Luftschläuche in die Scanning-Box und von dort nacheinander zum Drucksensor geleitet. Die vier Drücke werden einzeln mit nur einem Drucksensor gemessen, um mögliche Fehler zu minimieren.

Beim Drucksensor handelt es sich um einen piezoresistiven Differenzdrucksensor der Firma Honeywell mit der Bezeichnung 143PC01D. Diese funktionieren nach dem Prinzip, dass die eingebauten Piezokristalle unter mechanischer Belastung eine elektrische Spannung abgeben. Diese Spannung ist proportional zum anliegenden Druck. Die Kristalle weisen eine hohe Empfindlichkeit auf.

Der Drucksensor wird mit 8 Volt Gleichspannung versorgt und arbeitet in einem Bereich von $\pm 69 \text{ mbar}$. Die Spannung wird über das HP 44702B 13-bit Voltmeter gemessen.

Die Abb. 5.5 zeigt die lineare Kennlinie des verwendeten Honeywell 143PC01D Drucksensors.

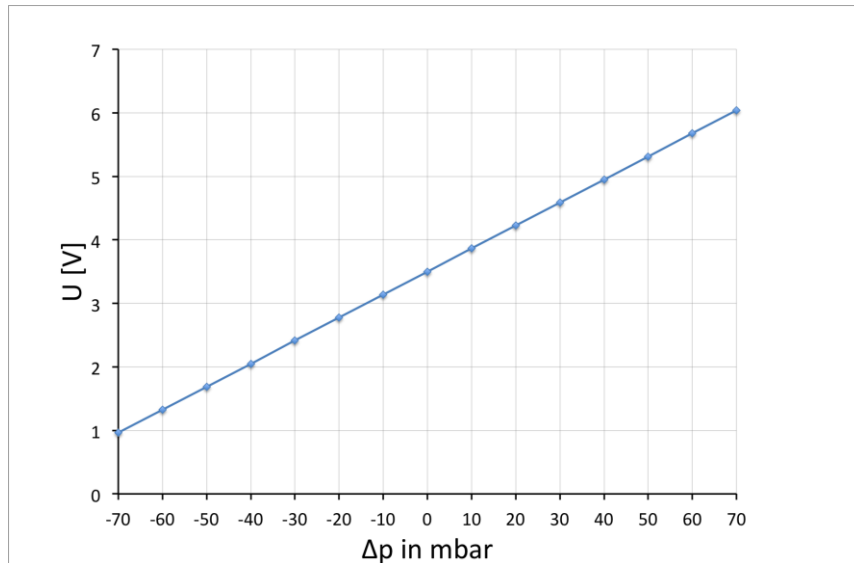


Abbildung 5.5: Kennlinie des Honeywell 143PC01D Drucksensors

Die Kennlinie hat einen linearen Verlauf und einen Arbeitsbereich von $\pm 69 \text{ mbar}$. Dieser ist ausreichend, da die maximal auftretenden Differenzdrücke nicht größer als 17 mbar sind. Der Verlauf der Kennlinie kann wie folgt beschrieben werden

$$U[V] = \frac{1}{27,6} \cdot \Delta p_i[\text{mbar}] + 3,5. \quad (5.1)$$

Die Signale des Honeywell Drucksensors und des Pt-100 Widerstandsthermometer werden dem HP 3852A Datenerfassungssystem zugeführt und anschließend mittels PC und der Software LabView ausgewertet und in Textfiles abgespeichert.

Weitere Komponenten des Datenerfassungssystems sind ein 16-Kanal Digitalausgang (HP44724A) und ein 24-Kanal FET Multiplexer (HP44711A).

5.3 Messdurchführung

Die Aufgabe dieser Arbeit beruht auf der Kalibrierung der drei am Institut vorhandenen Dreilochsonden mit besonderem Augenmerk auf die Auswirkung des Nickwinkels auf die Sonden.

Zusätzlich wurde noch die SVUSS/3 Kobrasonde unter einem festen Gierwinkel kalibriert und mit den von der Firma SVUSS zu Verfügung gestellten Daten verglichen.

Im Folgenden werden diese zwei Kalibriervorgänge erklärt.

5.3.1 Durchführung der Kalibrierung

Zuerst wird die Sonde in der Schwenkvorrichtung montiert (siehe Abschn. 5.2) und die Luftschläuche werden an die Sonde und die Messeinheit angeschlossen. Danach fährt der Gleichstrommotor mit einer konstanten Drehzahl von $n = 1100 \text{ min}^{-1}$ hoch. Das liefert, abhängig von der Temperatur und damit der Dichte eine Strömungsgeschwindigkeit von $w \approx 53,5 \text{ m/s}$ im Freistrah. Die Machzahl ergibt daraus zu $Ma \approx 0,156$, wodurch sichergestellt ist, dass es sich um eine inkompressible Strömung handelt. Die auf den Sondenkopf bezogene Reynoldszahl Re_d variiert auf Grund der unterschiedlichen Kopfdurchmesser d und ist in Tab. 5.2 aufgelistet. Die voneinander leicht abweichenden Werte für ρ, w, v und Ma ergeben sich daraus, dass die Temperatur im Labor Schwankungen von wenigen $^{\circ}\text{C}$ ausgesetzt ist.

Name der Sonde	$d[\text{mm}]$	$n[\text{min}^{-1}]$	$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$w \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	$v \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$	$Re_d[-]$	$Ma[-]$
SVUSS/3 Kobra	2,4	1100	1,167	53,5	$1,555 \cdot 10^{-5}$	8250	0,156
AVA Trapez Nr.110	3,3	1100	1,175	53,9	$1,57 \cdot 10^{-5}$	11300	0,157
AVA Zylinder Nr.43	3,0	1100	1,191	53,9	$1,54 \cdot 10^{-5}$	10550	0,157

Tabelle 5.2: Überblick der Strömungsgrößen bei der Messdurchführung

Die Kalibrierung wird in einem Bereich von $\Delta\beta = \pm 30^{\circ}$ durchgeführt. Die Verstellung der Winkel erfolgt in 5° Schritten und wird per Hand durchgeführt. Für den Nickwinkel wird ebenfalls ein Bereich von $\Delta\gamma = \pm 30^{\circ}$ gewählt. Allerdings erfolgt hier die Verstellung in 10° Schritten. Das ergibt in der Gierenebene 13 Messpunkte und in der Nickebene 7 Messpunkte. Dadurch hat man in Summe 91 Messpunkte pro Sonde.

An jedem Punkt werden die Temperatur der Strömung, der Totaldruck p_t und die drei Bohrungsdrücke p_1, p_2 und p_3 gemessen und über LabView in eine Textdatei abgespeichert. Vor jeder Änderung des Nickwinkels $\Delta\gamma$ werden per Handmessgerät die Umgebungstemperatur und der Umgebungsdruck p (entspricht dem statischen Druck) gemessen.

Mit diesen Daten können anschließend die Bohrungs- und Kalibrierkoeffizienten nach den Gl. (2.12) bis (2.17) berechnet werden.

5.3.2 Durchführung der Kalibrierung der Kobrasonde und Vergleich mit den SVUSS Daten

Die Kobrasonde wird so in der Strömung ausgerichtet, dass $p_2 = p_3$ gilt. Das bedeutet, dass die Gierebene normal auf die Strömungsrichtung steht und beide Seitenbohrungen gleich angeströmt werden. Unter der Voraussetzung, dass die Schwenkeinheit exakt auf die Strömung eingestellt wird, müsste der Gierwinkel hier den Wert null aufweisen. Da das aber nicht gegeben ist stellt ein Gierwinkel von $\Delta\beta = -2,5^\circ$ ein.

Mit diesem fixen Gierwinkel wird nun der Nickwinkel $\Delta\gamma$ in 5° Schritten durchlaufen. Das ergibt 13 Messpunkte.

Die Firma SVUSS hat die Kalibrierung bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $w = 48,5 \text{ m/s}$ durchgeführt. Da bei dieser Arbeit die Motordrehzahl von $n = 1100 \text{ min}^{-1}$ beibehalten wurde, ergibt sich für die Strömungsgeschwindigkeit $w = 53,8 \text{ m/s}$. Da der Unterschied der Geschwindigkeit verhältnismäßig gering ist, ist ein qualitativer Vergleich der beiden Kalibrierungen durchaus sinnvoll.

In Tab. 5.3 sind die Strömungsgrößen der Kobrasonde gelistet.

Name der Sonde	$d[\text{mm}]$	$n[\text{min}^{-1}]$	$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$w \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	$\nu \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$	$Re_d[-]$	$Ma[-]$
SVUSS/3 Kobra	2,4	1100	1,176	53,8	$1,57 \cdot 10^{-5}$	8230	0,157

Tabelle 5.3: Strömungsgrößen für die SVUSS/3 Kobrasonde

Die Firma SVUSS bezieht sich auf folgende zwei Druckverhältnisse:

$$\overline{p_{12}} = \frac{p_1 - p_2}{(p_1 - p_2)_{\text{bei } \Delta\gamma=0^\circ}} = \frac{k_1 - k_2}{(k_1 - k_2)_{\text{bei } \Delta\gamma=0^\circ}} \quad (5.2)$$

und

$$\overline{p_{2b}} = \frac{p_2 - p_b}{(p_2 - p_b)_{\text{bei } \Delta\gamma=0^\circ}} = \frac{k_2}{(k_2)_{\text{bei } \Delta\gamma=0^\circ}} \quad (5.3)$$

Dabei sind p_1 und p_2 wieder die Bohrungsdrücke, wobei gilt dass $p_2 = p_3$. Der Nenner bezieht sich jeweils auf die Druckdifferenz beim Nickwinkel $\Delta\gamma = 0^\circ$ und ist ein fester Wert. Im Zähler wird die Druckdifferenz für die jeweiligen Nickwinkel durchlaufen. Der barometrische Druck p_b entspricht dem statischen Druck und wird wieder mit dem Handmessgerät ermittelt.

6 Ergebnisse und Diskussion

Die Verarbeitung der Daten und Berechnung der Koeffizienten erfolgt im Programm Microsoft Excel. Die grafische Darstellung der Bohrungs- und Kalibrierkurven wird ebenfalls in Excel vorgenommen.

Zuerst werden folgende Daten im Labor gemessen:

mittels Handmessgerät:

- Umgebungsdruck (statischer Druck) p
- Umgebungstemperatur t_U

im Windkanal:

- Temperatur der Strömung t
- Totaldruckdifferenz am Ende des Windkanals $p_t - p$

sowie mittels der Dreilochsonden:

- Bohrungsdruckdifferenz $p_1 - p$
- Bohrungsdruckdifferenz $p_2 - p$
- Bohrungsdruckdifferenz $p_3 - p$

Diese Daten werden in Excel eingefügt und für die weiteren Berechnungen verwendet:

- spezifische Gaskonstante R_s
- Dichte der Luft ρ
- kinematische Viskosität ν
- Strömungsgeschwindigkeit w
- Sondenkopfreynoldszahl Re_d
- Machzahl Ma
- Bohrungskoeffizienten k_1, k_2 und k_3
- Kalibrierkoeffizienten k_β, k_t und k_s
- Bohrungskoeffizienten k_1, k_2 und k_3 für das Stromlinienprojektionsverfahren
- Kalibrierkoeffizienten k_β, k_t und k_s für das Stromlinienprojektionsverfahren

Anhand der Werte für die Bohrungs- und Kalibrierkoeffizienten werden nun die dazugehörigen Kurven für alle drei Sonden grafisch dargestellt.

6.1 Ergebnisse der SVUSS/3 Kobrasonde

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der SVUSS/3 Kobrasonde diskutiert. Die Betrachtungen liegen auf den Bohrungskoeffizienten k_1, k_2 und k_3 , sowie den Kalibrierkoeffizienten k_β, k_t und k_s . Diese sechs Koeffizienten werden über den Gierwinkelbereich $\Delta\beta = -30^\circ$ bis $+30^\circ$ graphisch dargestellt, wobei in jedem Diagramm die unterschiedlichen Ergebnisse für den Einfluss des Nickwinkels $\Delta\gamma$ im negativen bzw. positiven Bereich betrachtet werden. Um die Kurvenverläufe übersichtlicher darzustellen, werden die Koeffizienten-Kurven für negative ($\Delta\gamma < 0^\circ$) und die positive ($\Delta\gamma > 0^\circ$) Nickwinkel getrennt voneinander aufgezeichnet. So erhält man in jedem Diagramm vier Kurven, da die Nickwinkelausschläge jeweils mit dem Kurvenverlauf ohne Nickwinkeleinfluss ($\Delta\gamma = 0^\circ$) verglichen werden.

Weiters werden noch alle sechs Koeffizienten beim Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ mit den Koeffizienten des Stromlinienprojektionsverfahrens (SLP) verglichen. Diese Darstellung erfolgt ebenfalls über einem Gierwinkelbereich von $\Delta\beta = -30^\circ$ bis $+30^\circ$.

Zusätzlich wird das Ergebnis der Kobrasonde mit den Daten der Firma SVUSS verglichen. Das geschieht bei einem festen Gierwinkel $\Delta\beta = -2,5^\circ$, bei dem die Sonde abgeglichen ist ($p_2 = p_3$). Der Kurvenverlauf ist bei diesem Verfahren über dem Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis $+30^\circ$ dargestellt.

6.1.1 Experimentelle Ergebnisse des Nickwinkeleinflusses

Die Abb. 6.1 bis Abb. 6.6 zeigen die drei Bohrungskoeffizienten k_1, k_2 und k_3 über dem Gierwinkelbereich $\Delta\beta = -30^\circ$ bis $+30^\circ$. In jedem Diagramm sind vier Kurven dargestellt, die den Einfluss des Nickwinkels im negativen Bereich ($\Delta\gamma < 0^\circ$) bzw. im positiven Bereich ($\Delta\gamma > 0^\circ$) mit der Kurve ohne Nickwinkeleinfluss ($\Delta\gamma = 0^\circ$) vergleichen. Die Kurve ohne Nickwinkeleinfluss ist jeweils in violett dargestellt. Sie entspricht dem eigentlichen Verlauf der Bohrungs- und Kalibrierkurven für Dreilochsonden, da diese üblicherweise nicht für räumliche Strömungsuntersuchungen eingesetzt werden.

In Abb. 6.1 ist der Bohrungskoeffizient k_1 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_1 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Es ist ersichtlich, dass der Nickwinkel im Bereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis -20° kaum Einfluss hat, wobei er bei $\Delta\gamma = -30^\circ$ nicht mehr zu vernachlässigen ist. Eine mögliche Erklärung ist das Ablösen der Strömung bei größeren Nickwinkeln, wodurch sich der Bohrungsdruck und damit der Bohrungskoeffizient verringert.

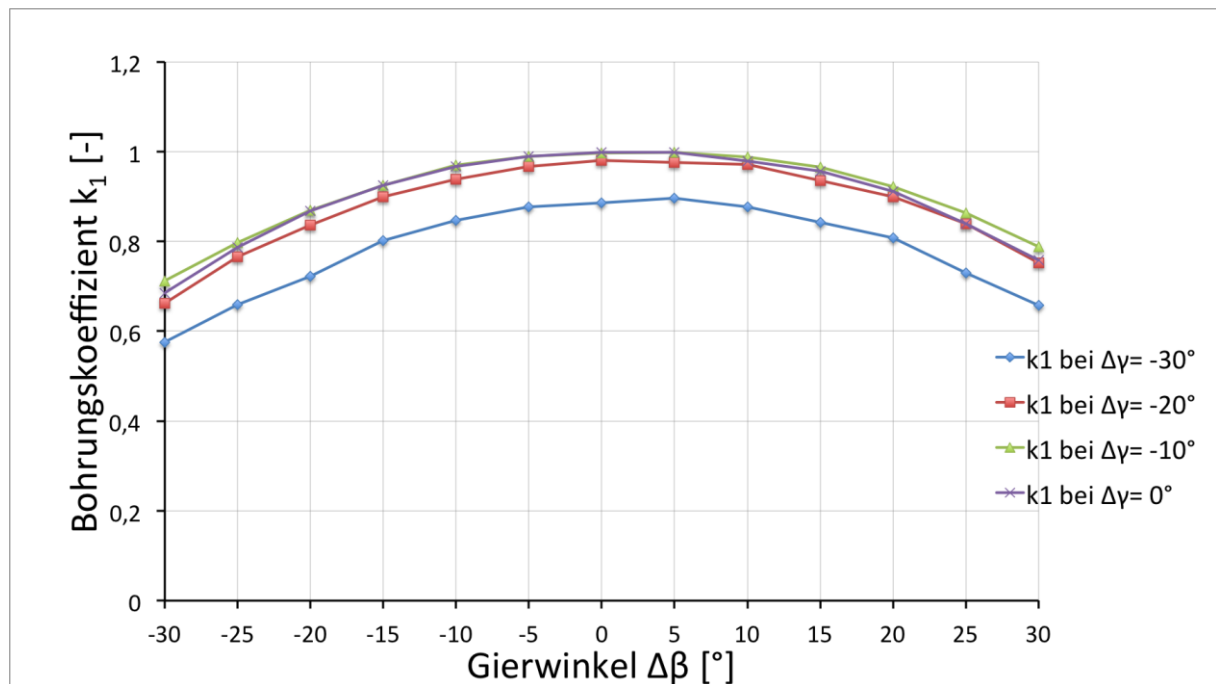


Abbildung 6.1: Bohrungskoeffizient k_1 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der SVUSS/3 Kobrasonde

In Abb. 6.2 ist der Bohrungskoeffizient k_1 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_1 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Hier kann man feststellen, dass der Nickwinkel nur im Bereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+10^\circ$ kaum Einfluss hat. Es ist bemerkenswert, dass sich die Nickwinkeleinflüsse bei $\pm\Delta\gamma$ nicht symmetrisch verhalten (Abb. 6.1 und Abb. 6.2). Der Grund dafür kann darin liegen, dass bei positiven Nickwinkeln ($\Delta\gamma > 0^\circ$) der Schaft der Sonde die Strömung beeinflusst. Die Strömung staut sich am Schaft mit dem Totaldruck p_t auf und die Stromlinien weichen von den Staupunkten in die Richtung aus, in die der Schaft nicht mehr eingreift. Die Strömung wird also von den Bohrungen weggedrückt, wodurch sich der Bohrungsdruck p_1 verringert, was auch die kleineren Werte für k_1 erklärt. In der Gierebene verhält sich die Sonde ebenfalls nicht symmetrisch. Die Ursache dafür kann eine nicht exakte Symmetrie der linken und rechten Sondenkopfseite sein.

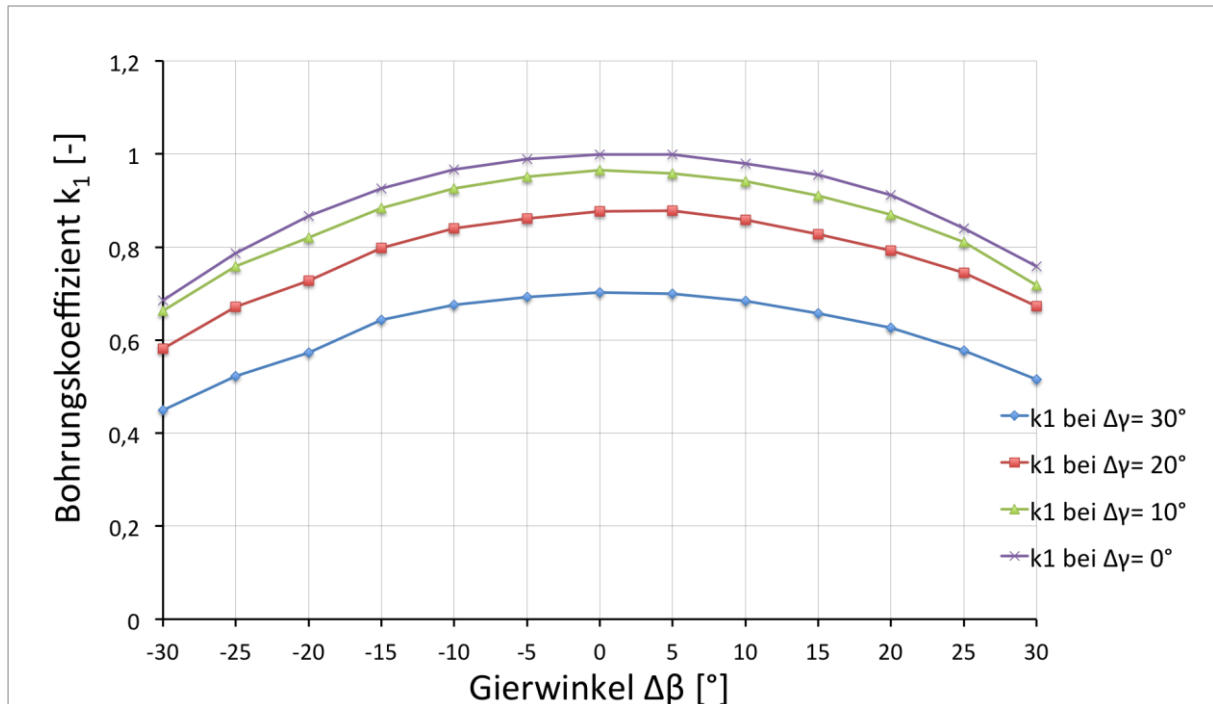


Abbildung 6.2: Bohrungskoeffizient k_1 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der SVUSS/3 Kobrasonde

In Abb. 6.3 ist der Bohrungskoeffizient k_2 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_2 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Bei negativen Gierwinkeln $\Delta\beta < 0$ ist keine Übereinstimmung bei unterschiedlichen Nickwinkeln zu erkennen. Anders verhält es sich bei positiven Gierwinkeln $\Delta\beta > 0$, wo für den Nickwinkelbereich $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis -20° nur geringe Abweichungen der Kurven gegeben sind. Grund dafür ist, dass die Bohrung 2 im positiven Gierwinkelbereich auf der strömungszugewandten Seite ist, wodurch weniger Strömungsablösungen stattfinden. Erst beim Nickwinkel $\Delta\gamma = -30^\circ$ wirkt sich die Ablösung aus, sodass die Kurve wesentlich abweicht.

Die Abb. 6.4 zeigt den Bohrungskoeffizient k_2 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_2 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$.

Hier verhält sich die Kobrasonde im positiven Nickwinkelbereich sehr ähnlich wie im oberhalb beschriebenen negativen Bereich. Allerdings sind die Abweichungen zur nickwinkelfreien Kurve etwas größer, was wiederum auf den Einfluss des Sondenschaftes zurückzuführen ist.

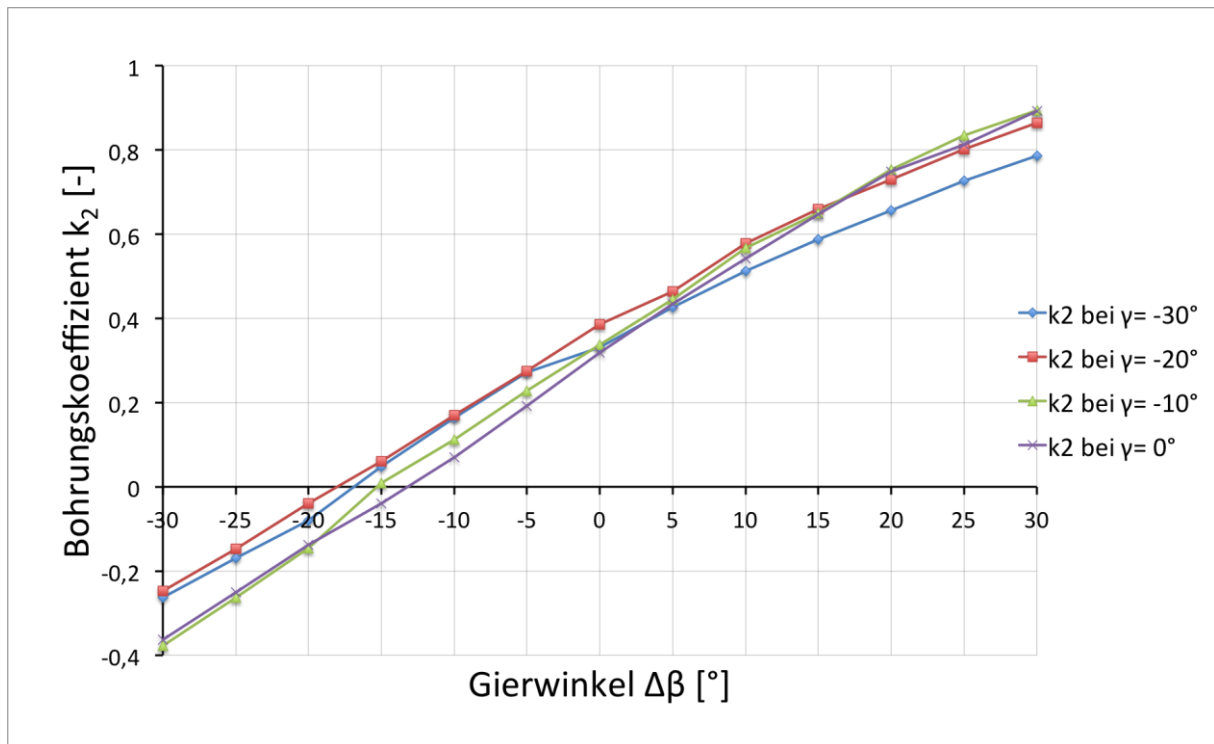


Abbildung 6.3: Bohrungskoeffizient k_2 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der SVUSS/3 Kobrasonde

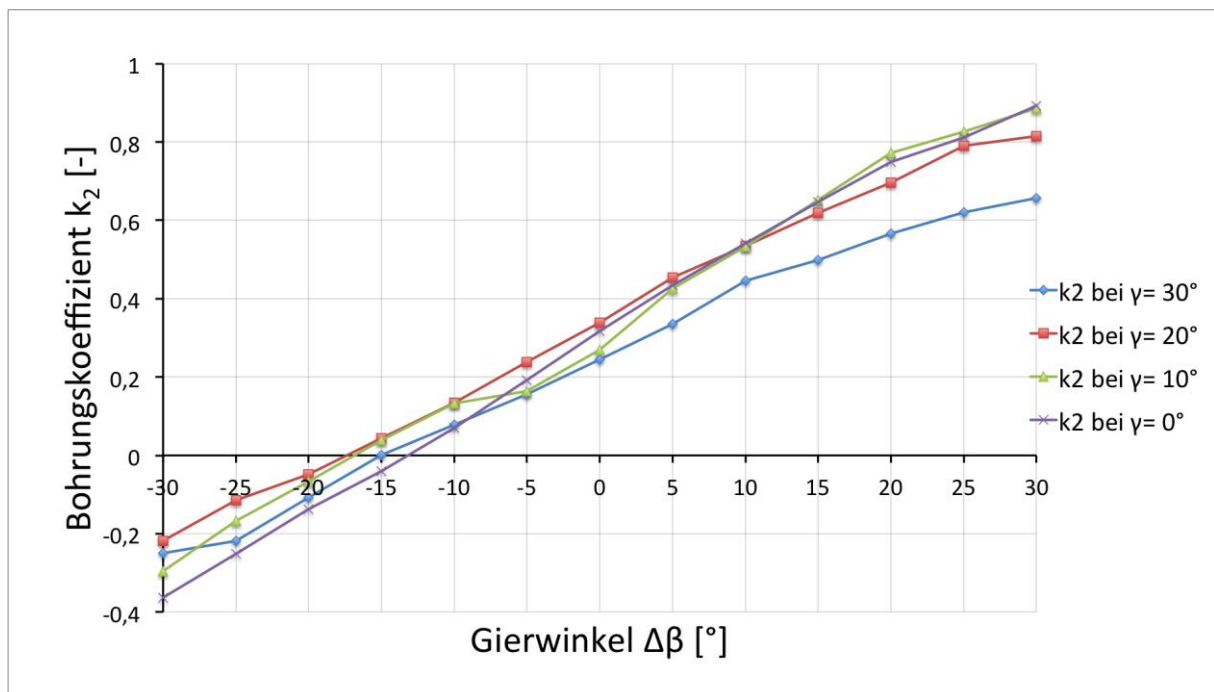


Abbildung 6.4: Bohrungskoeffizient k_2 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der SVUSS/3 Kobrasonde

In Abb. 6.5 ist der Bohrungskoeffizient k_3 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_3 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Hierbei ist die Bohrung 3 zu betrachten, die sich nun im negativen Gierwinkelbereich $\Delta\beta < 0$ auf der strömungszugewandten Seite befindet. Demnach ist die Abweichung für $\Delta\beta < 0$ im Nickwinkelbereich $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis -20° gering und kommt erst bei $\Delta\gamma = -30^\circ$ zum Tragen, da sich hier die Ablösungen wieder zu stark auswirken. Bei positiven Gierwinkeln ist die Bohrung 3 auf der strömungsabgewandten Seite. Die dadurch größeren Ablösungen verursachen die Abweichungen der Kurven.

Die Abb. 6.6 zeigt den Bohrungskoeffizient k_3 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_3 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$.

Hier verhält sich die Kobrasonde im positiven Nickwinkelbereich sehr ähnlich wie im oberhalb beschriebenen negativen Nickwinkelbereich. Allerdings sind die Abweichungen zur nickwinkelfreien Kurve etwas größer, was wiederum auf den Einfluss des Sondenschaftes auf die Strömung schließen lässt.

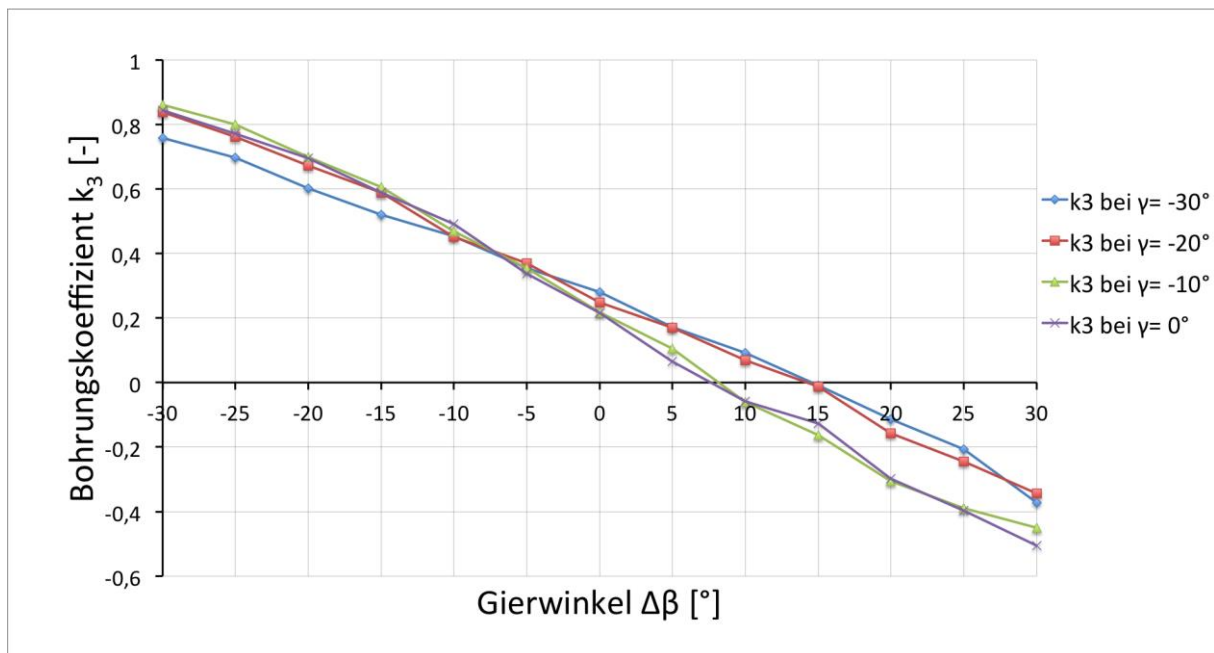


Abbildung 6.5: Bohrungskoeffizient k_3 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der SVUSS/3 Kobrasonde

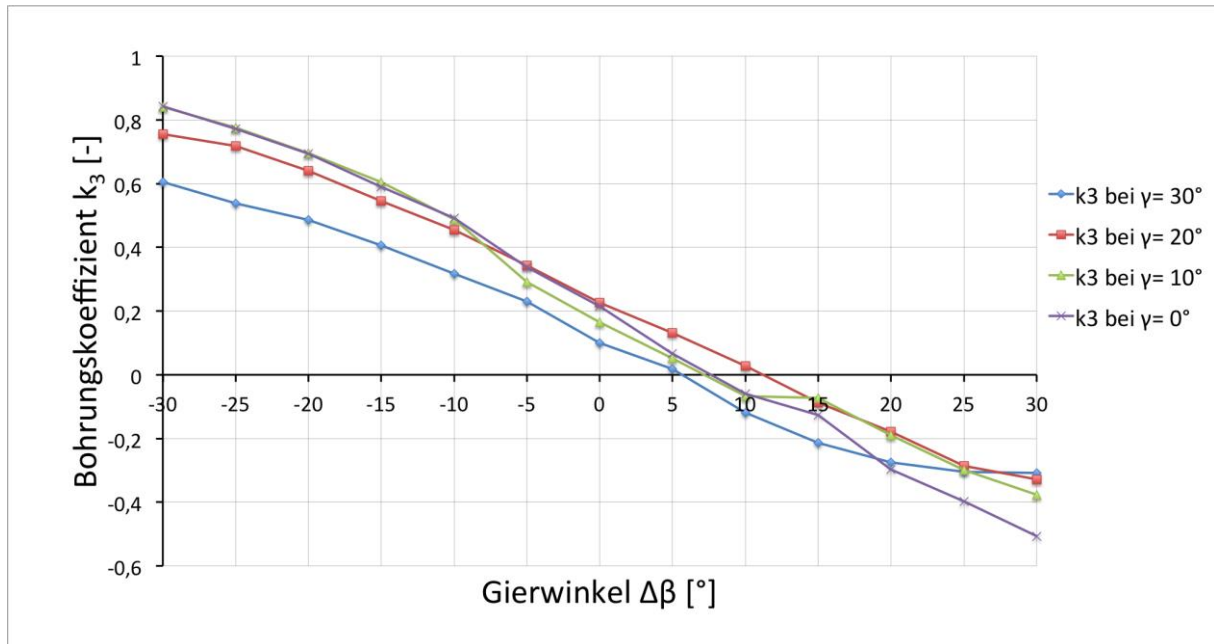


Abbildung 6.6: Bohrungskoeffizient k_3 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der SVUSS/3 Kobrasonde

Die Abb. 6.7 bis Abb. 6.12 zeigen die drei Kalibrierkoeffizienten k_β , k_t und k_s über dem Gierwinkelbereich $\Delta\beta = -30^\circ$ bis $+30^\circ$. In jedem Diagramm sind wieder vier Kurven dargestellt, die den Einfluss des Nickwinkels im negativen Bereich ($\Delta\gamma < 0^\circ$) bzw. im positiven Bereich ($\Delta\gamma > 0^\circ$) mit der Kurve ohne Nickwinkelinfluss ($\Delta\gamma = 0^\circ$) vergleichen.

In Abb. 6.7 ist der Richtungskoeffizient k_β über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_β bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Es ist deutlich, dass hier der Nickwinkel nur sehr wenig Einfluss hat. Das resultiert aus dem Verhalten der Bohrungskoeffizienten k_2 und k_3 , die schon eine geringe Abweichung vorweisen können. Da der Richtungskoeffizient im Wesentlichen von k_2 und k_3 beeinflusst wird, ergibt sich dieser Verlauf. Lediglich im Gierwinkelbereich von $\Delta\beta = -20^\circ$ bis -30° ist eine Abweichung bei den Nickwinkeln $\Delta\gamma = -20^\circ$ bis -30°

Die Abb. 6.8 zeigt den Richtungskoeffizient k_β über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_β bei $\Delta\gamma = 0^\circ$.

Auch bei positiven Nickwinkeln ist der Verlauf von k_β speziell im Gierwinkelbereich von $\Delta\beta = \pm 15^\circ$ sehr nahe am Kurvenverlauf ohne Nickwinkelinfluss. Außerhalb dieses Bereiches wird die Abweichung etwas größer, bleibt aber verhältnismäßig gering. Das unterschiedliche Verhalten bei negativem und positivem Nickwinkel ist wiederum auf den Einfluss des Sondenschafes bei positiven Nickwinkeln zurückzuführen.

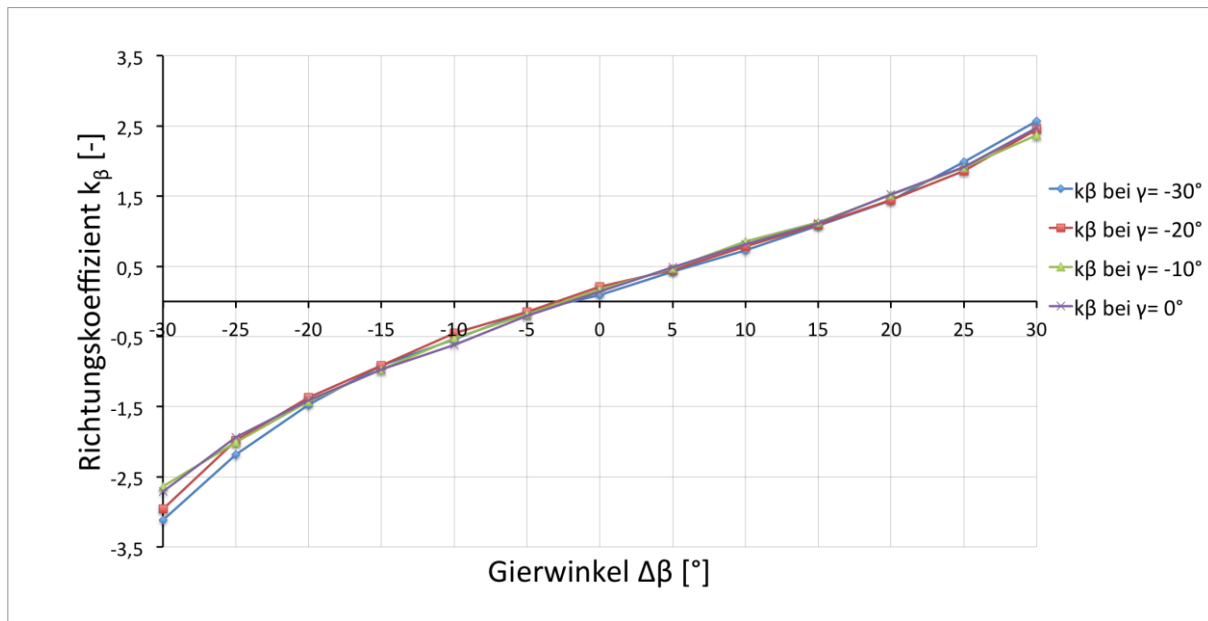


Abbildung 6.7: Richtungskoeffizient k_β für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der SVUSS/3 Kobrasonde

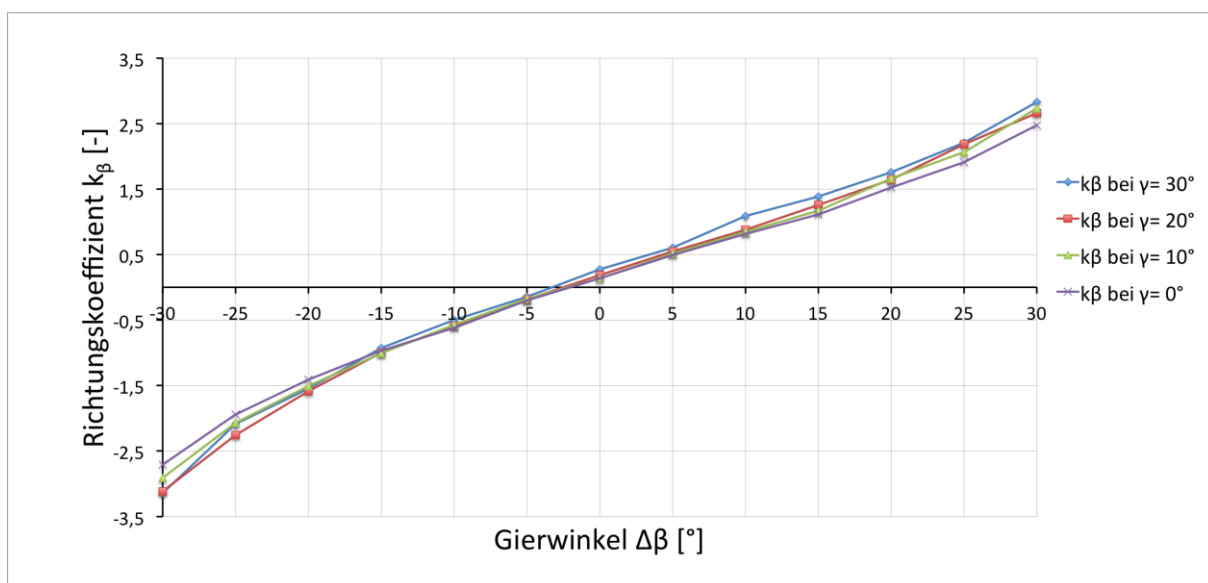


Abbildung 6.8: Richtungskoeffizient k_β für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der SVUSS/3 Kobrasonde

In Abb. 6.9 ist der Totaldruckkoeffizient k_t über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_t bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Der Totaldruckkoeffizient k_t hängt im Wesentlichen vom Bohrungskoeffizienten k_1 ab. Demnach ist auch der qualitative Kurvenverlauf ähnlich zu dem von k_1 . Allerdings scheint hier der Nickwinkel einen merklich größeren Einfluss auf den Totaldruckkoeffizienten k_t zu haben, wobei die Abweichung bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis -10° gering ausfällt.

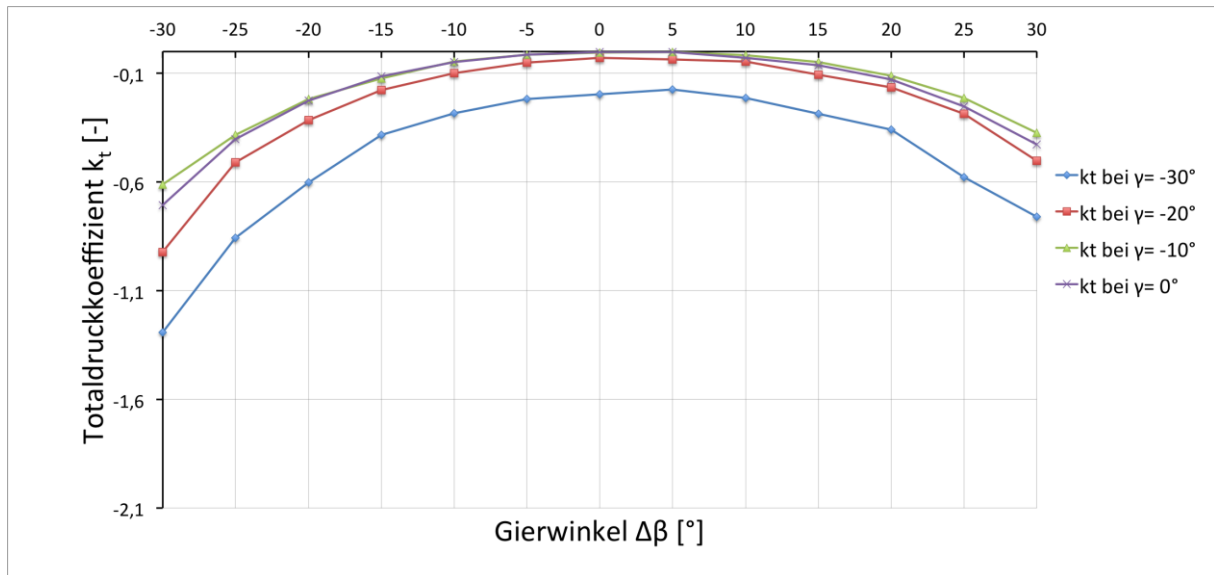


Abbildung 6.9: Totaldruckkoeffizient k_t für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der SVUSS/3 Kobrasonde

In Abb. 6.10 ist der Totaldruckkoeffizient k_t über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_t bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Es ist ersichtlich, dass hier die positiven Nickwinkel in allen Bereichen größere Abweichungen als die negativen Nickwinkel verursachen. Der qualitative Verlauf der Kurven bleibt jedoch gleich.

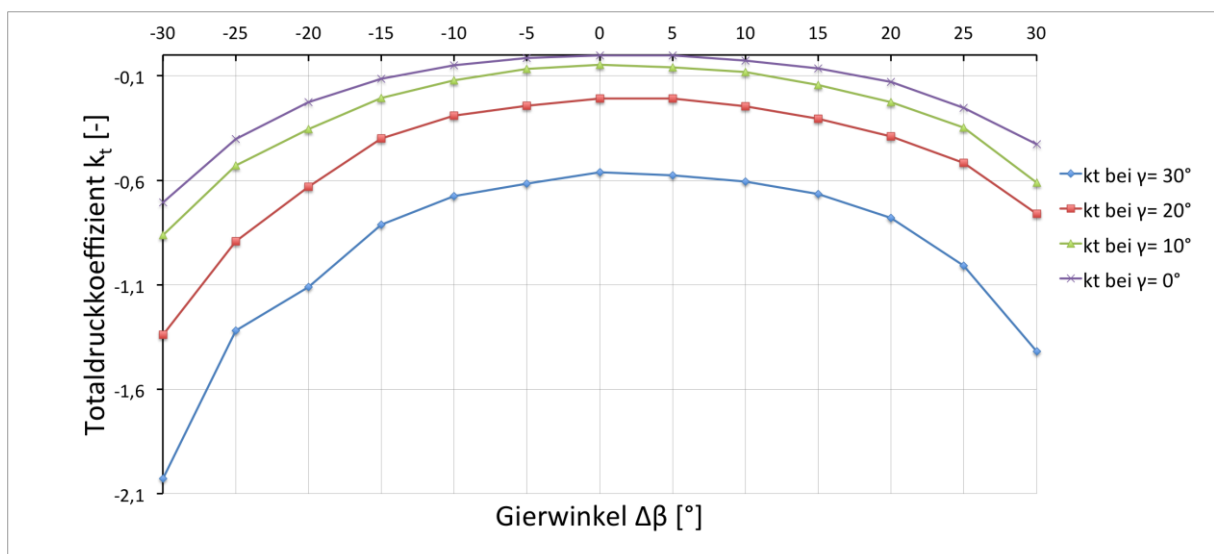


Abbildung 6.10: Totaldruckkoeffizient k_t für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der SVUSS/3 Kobrasonde

In Abb. 6.11 ist der statische Druckkoeffizient k_s über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_s bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Beim statischen Druckkoeffizient k_s ist bei Nickwinkeln $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis -10° eine geringe Abweichung erkennbar. Bei Nickwinkeln $\Delta\gamma = -10^\circ$ bis -30° werden die Abweichungen deutlich größer, da sich hier offenbar die Ablöseerscheinungen auswirken.

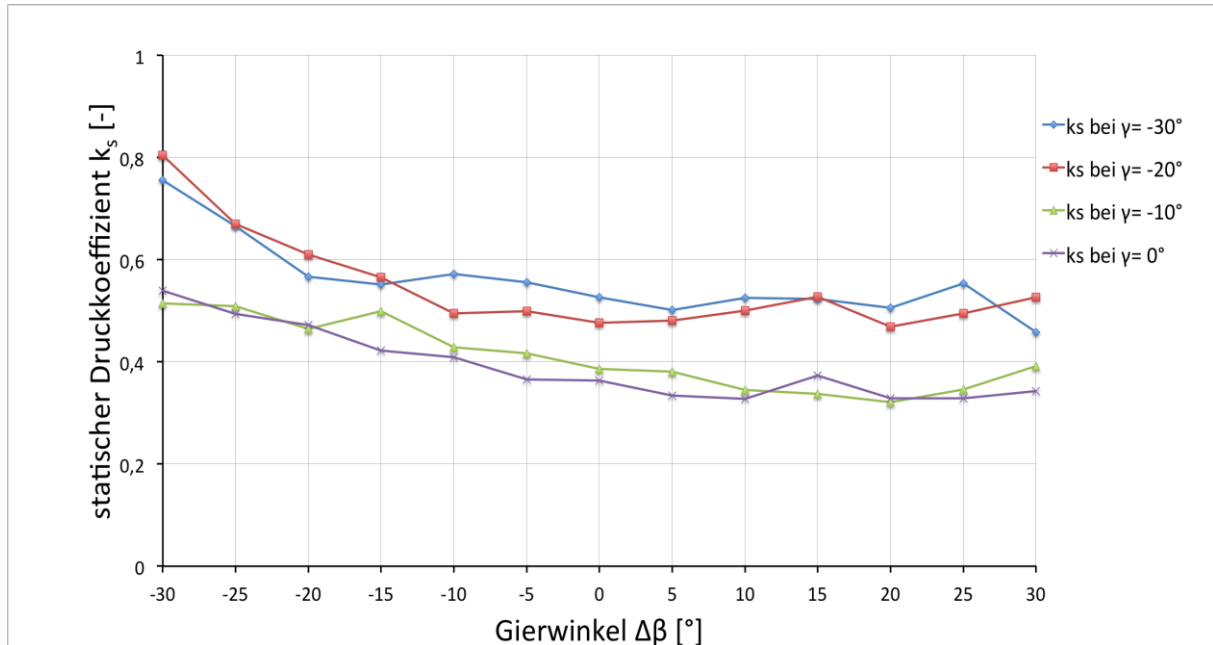


Abbildung 6.11: statischer Druckkoeffizient k_s für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der SVUSS/3 Kobrasonde

In Abb. 6.12 ist der statische Druckkoeffizient k_s über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_s bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Positive Nickwinkel führen schon bei kleinen Nickwinkeln zu Abweichungen. Es ist ersichtlich, dass bei $\Delta\gamma = 30^\circ$ die Abweichung am geringsten ausfällt. Hier wirkt der Schaft einfluss möglicherweise so entgegen, dass sich die Ablöseeffekte wieder aufheben.

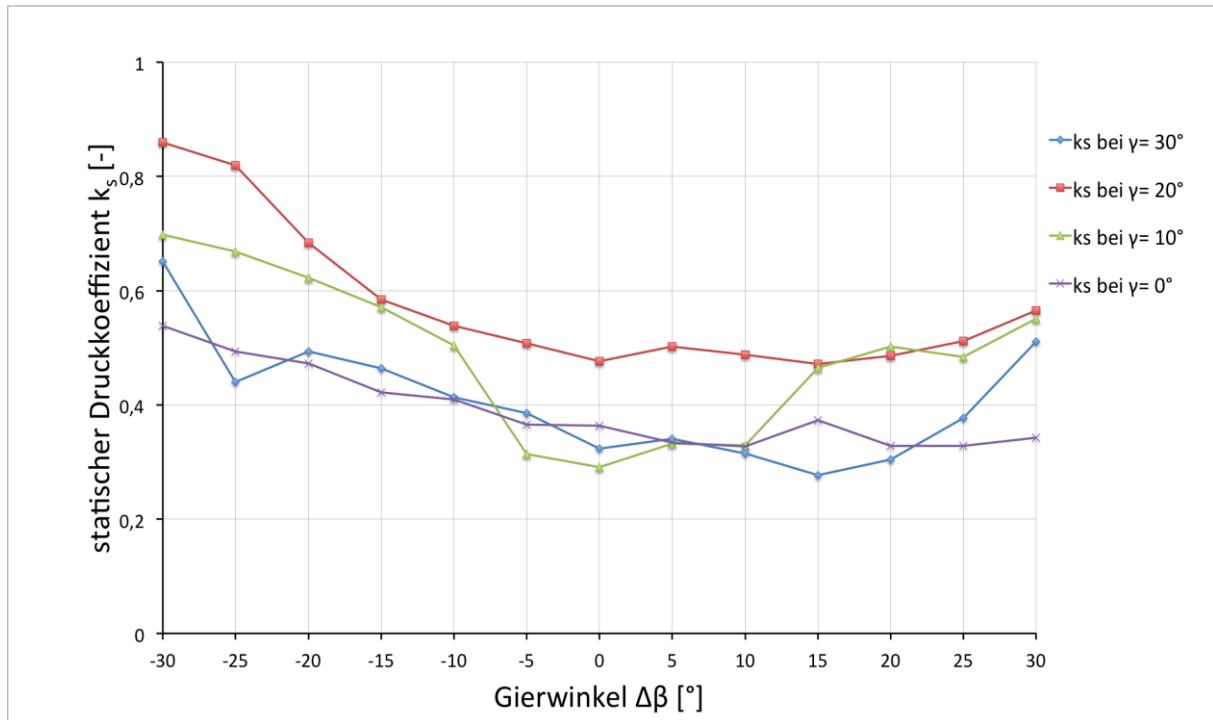


Abbildung 6.12: statische Druckkoeffizient k_s für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der SVUSS/3 Kobrasonde

Allgemein kann man anhand der Kurvenverläufe für k_1 , k_2 und k_3 sowie für k_β , k_t und k_s einige Schlüsse ziehen. Grundsätzlich ist zu sagen, dass sich für den Nickwinkelbereich $\Delta\gamma = \pm 10^\circ$ über den gesamten Gierwinkelbereich von $\Delta\beta = \pm 30^\circ$ eher geringe Abweichungen abzeichnen. Ausnahme bildet hier der statische Druckkoeffizient k_s (Abb. 6.12), bei dem der Nickwinkel unvorhersehbare Ergebnisse hervorruft. Generell sind die Abweichungen bei negativen Nickwinkeln kleiner als bei positiven. Der Grund liegt darin, dass bei positiven Nickwinkeln der Sondenschaft in die Strömung ragt, bevor diese auf die Bohrungen der Sonde trifft. Dadurch wird die Strömung von den Bohrungen weggedrückt, was eine Minderung des gemessenen Druckes an den Bohrungen zur Folge hat.

Im Gierwinkelbereich von $\Delta\beta = \pm 20^\circ$ ist tendenziell auch eine geringere Abweichung zu erkennen. Eine mögliche Erklärung ist, dass bei kleineren Gierwinkeln kombiniert mit kleineren Nickwinkeln in Summe die Wirkung auf die Strömung in Richtung Ablösung geringer ausfällt.

6.1.2 Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit dem Stromlinienprojektionsverfahren

In diesem Abschnitt werden die Kurvenverläufe der Bohrungskoeffizienten k_1 , k_2 und k_3 sowie für die Kalibrierkoeffizienten k_β , k_t und k_s mit den Verläufen der Stromlinienprojektion (SLP) verglichen. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich beim Stromlinienprojektionsverfahren um eine rein geometrische Betrachtung hält. Demzufolge wird dabei keine Rücksicht auf das reale Verhalten der Strömung genommen. Da diese Vergleiche ohne Nickwinkleinfluss ($\Delta\gamma = 0^\circ$) bereits in den Arbeiten von Diaz [3] und Smajic [4] durchgeführt wurden, beschränkt sich hier der Vergleich der Kurvenverläufe auf einen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$.

In Abb. 6.13 ist der Bohrungskoeffizient k_1 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_1 beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt.

Man erkennt, dass der qualitative Verlauf der experimentellen Kurve und der Kurve des Stromlinienprojektionsverfahrens ähnlich ist. Die großen Abweichungen, sind der Ablösung geschuldet, die bei realen Strömungen am Sondenkopf stattfindet. Die Ablösung ist bei einem Nickwinkel $\Delta\gamma = -30^\circ$ und den daraus resultierenden Ablösungen bei unterschiedlichen Werten der Gierwinkel $\Delta\beta$ entsprechend groß. Da das Stromlinienprojektionsverfahren auf diese Ablösungen keine Rücksicht nimmt, kommt es zu den großen Abweichungen der Kurven. Der Verlauf der Kurve des Stromlinienprojektionsverfahrens ist symmetrisch, da von einer perfekten Geometrie des Sondenkopfes ausgegangen wird, was bei realen Ausführungen nicht der Fall ist.

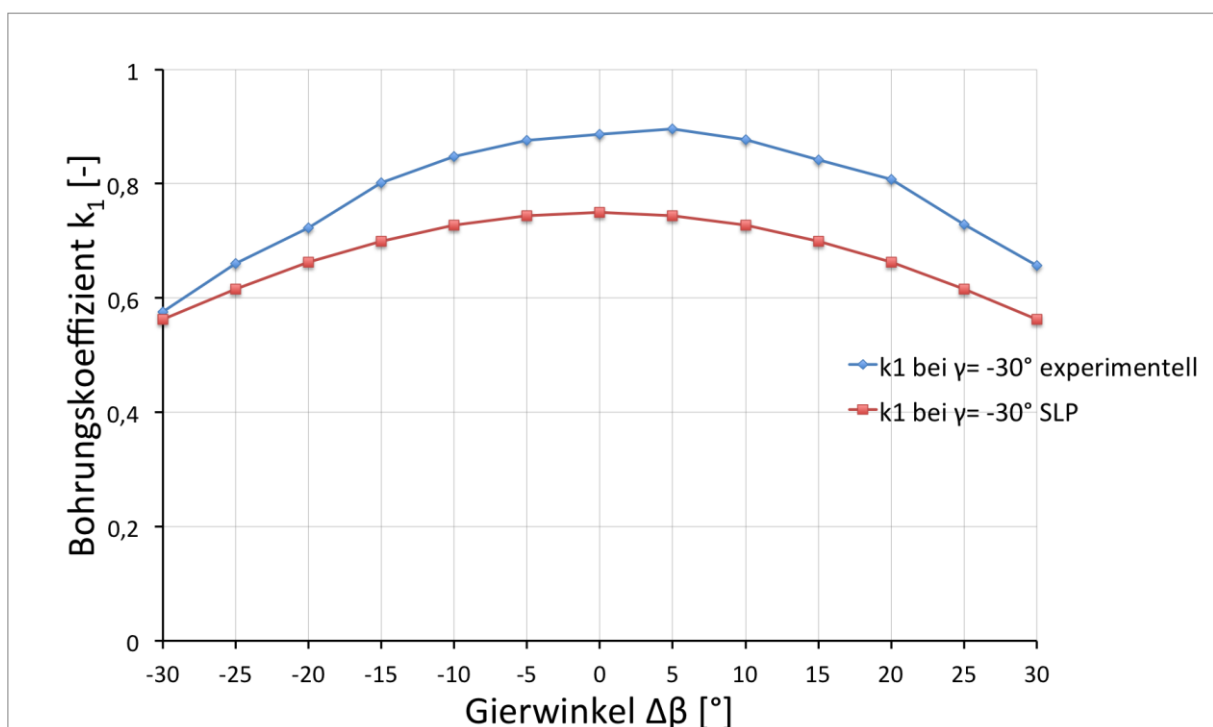


Abbildung 6.13: Bohrungskoeffizient k_1 für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der SVUSS/3 Kobrasonde

In Abb. 6.14 ist der Bohrungskoeffizient k_2 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_2 beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt.

Auf der strömungszugewandten Seite der Bohrung 2 ($\Delta\beta > 0^\circ$) kann man einen qualitativ ähnlichen Verlauf erkennen. Grund dafür ist, dass hier bzgl. des Gierwinkels $\Delta\beta$ aufgrund der direkteren Anströmung weniger Ablösungen sind. Durch den großen Nickwinkel, findet allerdings erhebliche Ablösung statt, was sich in der Abweichung der Kurven ausdrückt.

Auf der strömungsabgewandten Seite der Bohrung 2 ($\Delta\beta < 0^\circ$) ergeben sich bei der experimentellen Betrachtung erhöhte Ablösungen, weshalb hier der Vergleich zur Stromlinienprojektion keine Aussagekraft hat.

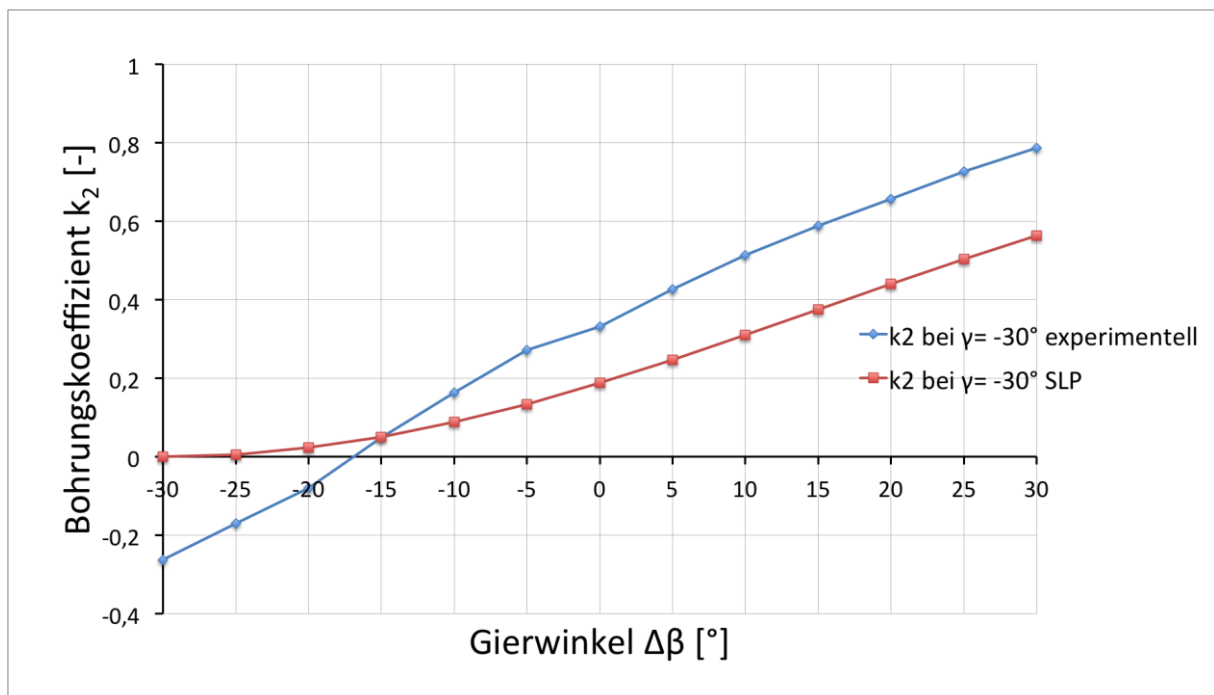


Abbildung 6.14: Bohrungskoeffizient k_2 für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der SVUSS/3 Kobrasonde

In Abb. 6.15 ist der Bohrungskoeffizient k_3 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_3 beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt.

Für die Betrachtung von k_3 gilt im Wesentlichen dasselbe wie für k_2 . Allerdings befindet sich die strömungszugewandte Seite der Bohrung 3 im Bereich von $\Delta\beta < 0^\circ$, wodurch sich hier ein qualitativ ähnlicher Verlauf ergibt.

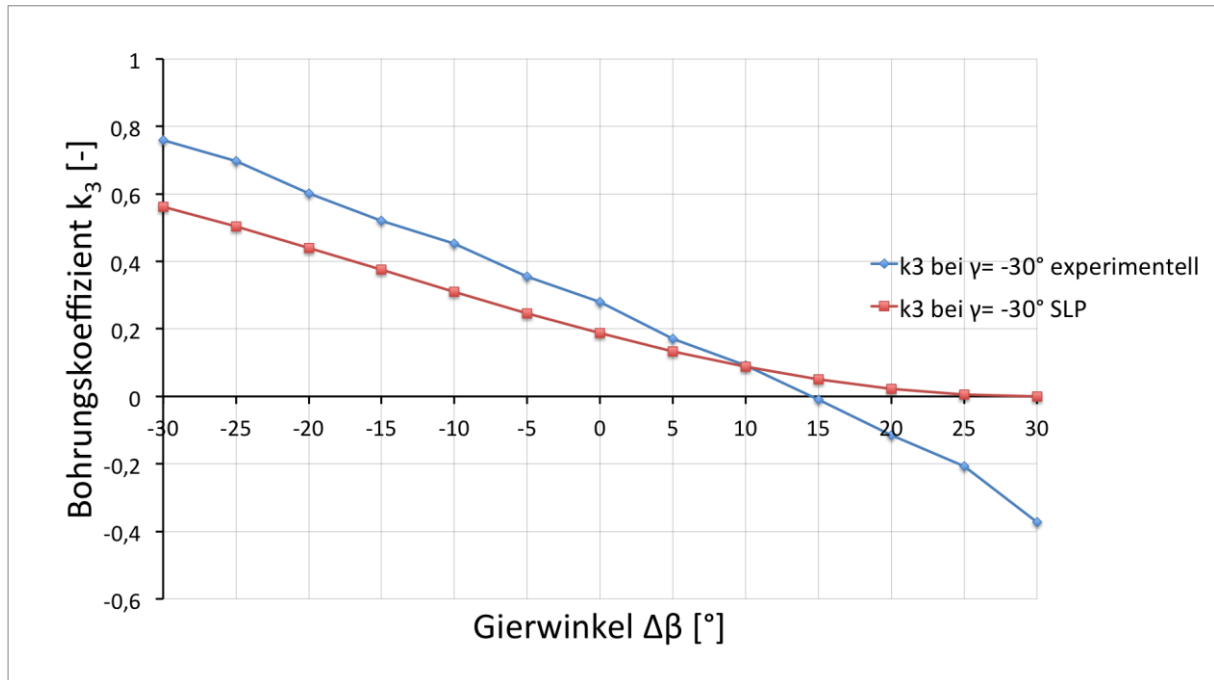


Abbildung 6.15: Bohrungskoeffizient k_3 für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der SVUSS/3 Kobrasonde

In Abb. 6.16 ist der Richtungskoeffizient k_β über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_β beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt.

Auch hier ist der qualitative Verlauf zwischen der experimentellen Kurve und der Kurve des Stromlinienprojektionsverfahrens wieder ähnlich. Die Abweichungen sind allerdings zu groß als dass man die Kurve des Stromlinienprojektionsverfahrens als repräsentativ ansehen kann. Man erkennt wieder den symmetrischen Verlauf bei der Stromlinienprojektion, der bei der realen Strömungsbetrachtung nicht gegeben ist.

Es sei wieder daran erinnert, dass für k_β der Nickwinkel $\Delta\gamma$ bei der Stromlinienprojektion keinen Einfluss hat wie aus Gl. (4.15) ersichtlich wird.

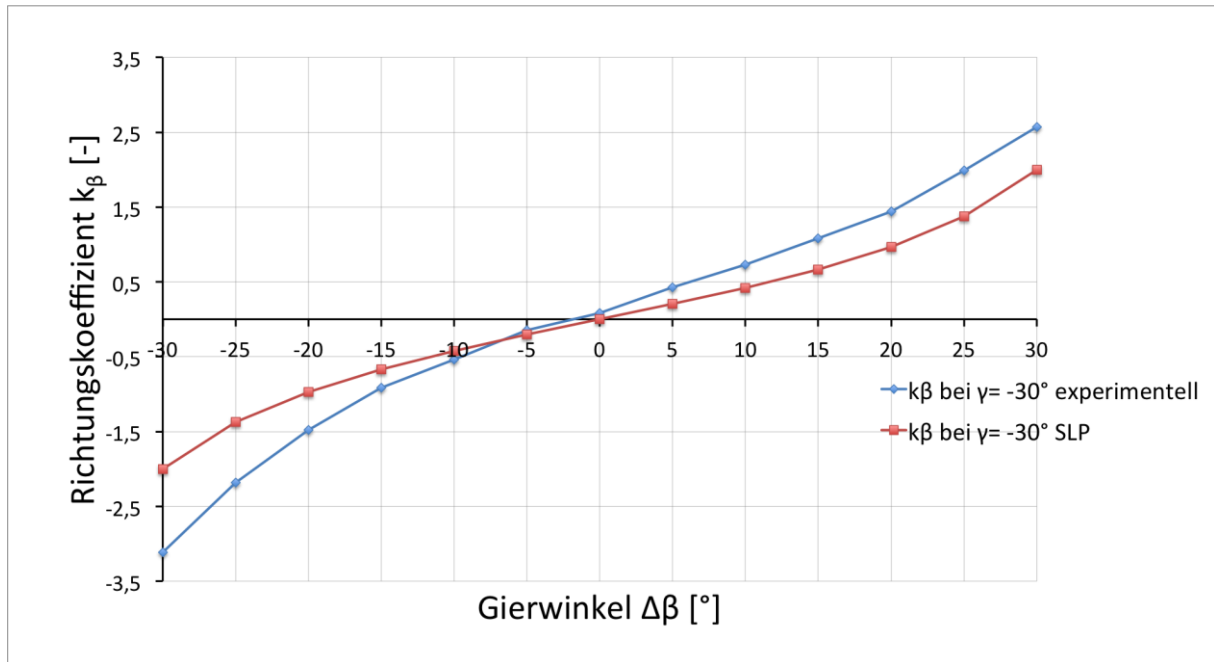


Abbildung 6.16: Richtungskoeffizient k_β für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der SVUSS/3 Kobrasonde

In Abb. 6.17 ist der Totaldruckkoeffizient k_t über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_t beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt. Qualitativ entsprechen sich beide Verläufe, wie schon bei der Betrachtung des Bohrungskoeffizienten k_1 . Allerdings ist auch bei k_t die Abweichung sehr groß, was wieder auf Ablösungserscheinungen der realen Strömung zurückzuführen ist. Man erkennt wieder den symmetrischen Verlauf bei der Stromlinienprojektion, der bei der realen Strömungsbetrachtung nicht gegeben ist.

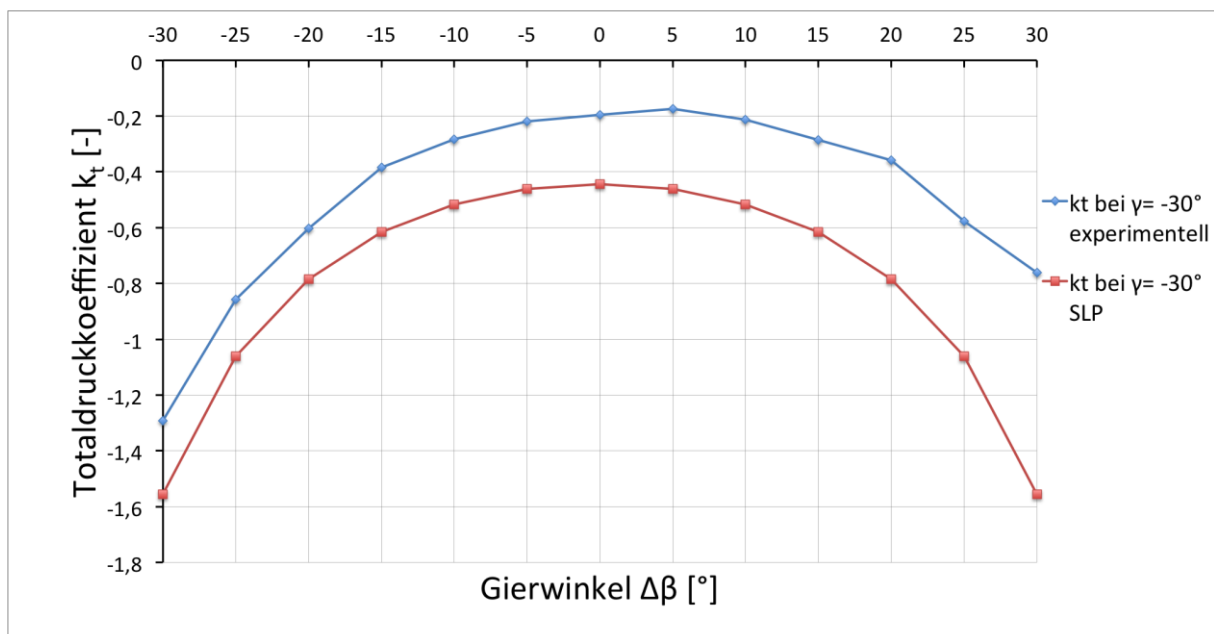


Abbildung 6.17: Totaldruckkoeffizient k_t für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der SVUSS/3 Kobrasonde

In Abb. 6.18 ist der statische Druckkoeffizient k_s über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_s beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt. Die experimentelle Kurve und die Kurve der Stromlinienprojektion weisen völlig unterschiedliche Verläufe auf, wodurch das Stromlinienprojektionsverfahren keine Aussagekraft hat. Auch bei k_s hat der Nickwinkel $\Delta\gamma$ bei der Stromlinienprojektion keinen Einfluss wie aus Gl. (4.17) ersichtlich wird.

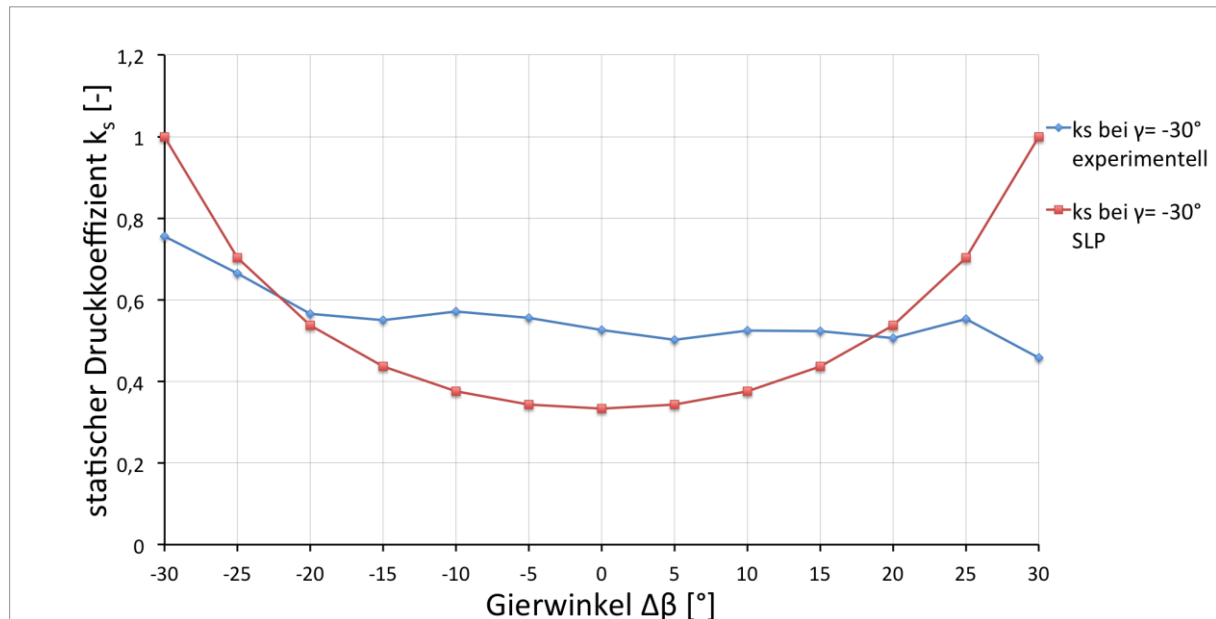


Abbildung 6.18: statischer Druckkoeffizient k_s für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der SVUSS/3 Kobrasonde

Abschließend kann man zum Vergleich zwischen experimenteller Betrachtung und dem Stromlinienprojektionsverfahren sagen, dass die qualitativen Verläufe gut übereinstimmen. Allerdings sind die Abweichungen überall zu groß als dass das Stromlinienprojektionsverfahren aussagekräftig wird. Problematisch verhält es sich wieder beim statischen Druckkoeffizient, bei dem ein Vergleich keine sinnvolle Aussage zulässt.

Das Stromlinienprojektionsverfahren ist eine rein geometrische Betrachtung und kann deshalb nur zu Vergleichszwecken herangenommen werden, um eventuelle Messfehler aufzudecken.

6.1.3 Experimentelle Ergebnisse der Kobrasonde und Vergleich mit den SVUSS-Daten

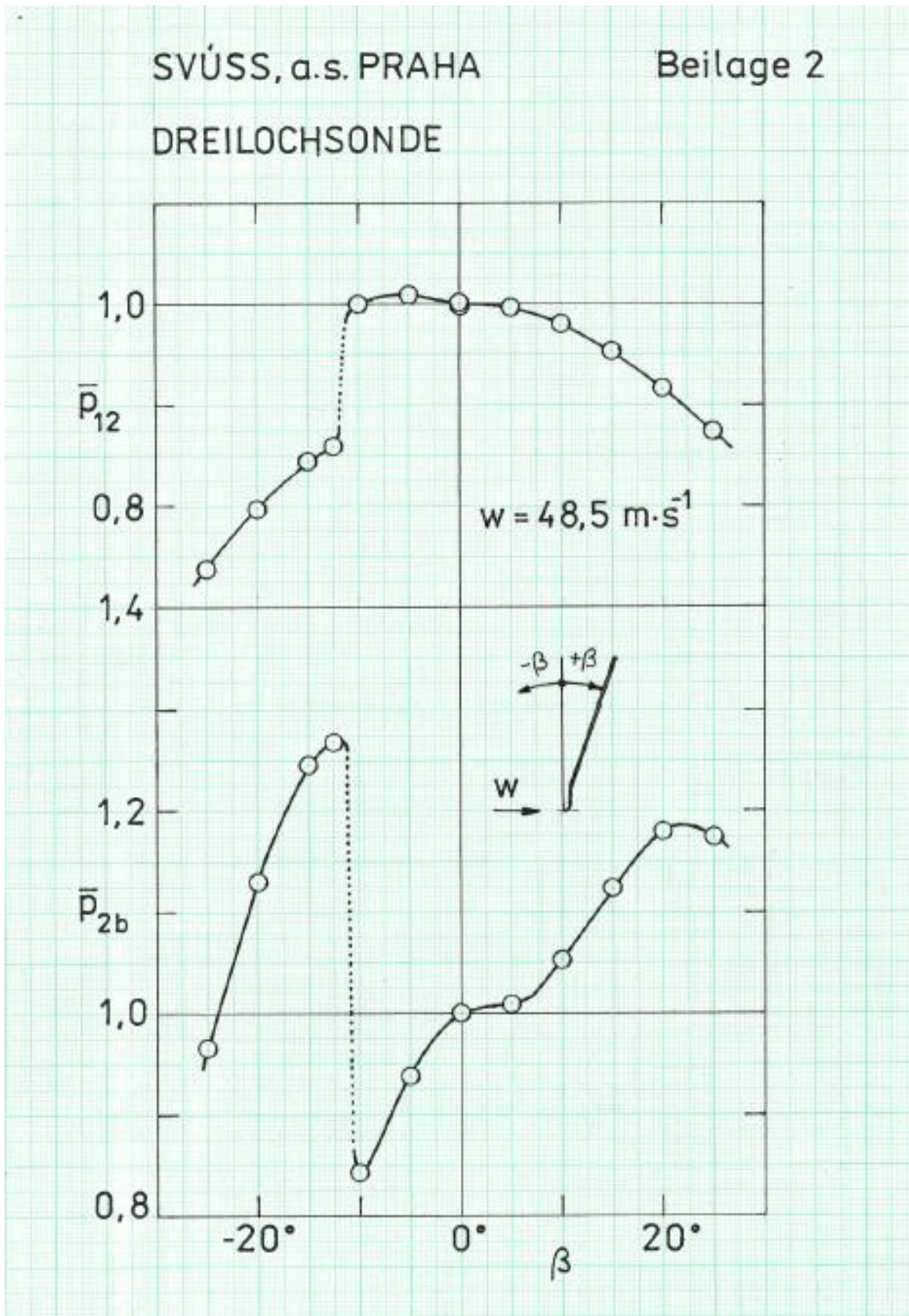


Abbildung 6.19: Kalibrierkurven in Abhängigkeit vom Nickwinkel der Firma SVUSS für die Kobrasonde

Schaut man sich die Kurven der Firma SVUSS an (Abb.6.19), sieht man, dass der Nickwinkel hier mit β bezeichnet wird. Noch dazu ist die Zählrichtung für den Nickwinkel umgekehrt zu der Notation, die in dieser Diplomarbeit gewählt wurde.

In Abb. 6.20 und Abb. 6.21 wird aber auf die in dieser Arbeit gewählte Notation zurückgegriffen, weshalb die Kurvenverläufe spiegelverkehrt erscheinen, wenn man sie mit Abb. 6.19 vergleicht. Grund dafür ist die umgekehrte Zählrichtung des Nickwinkels. Auch wurde die übliche Bezeichnung für den Nickwinkel $\Delta\gamma$ auf der Abszisse aufgetragen, um Verwechslungen mit dem Gierwinkel $\Delta\beta$ zu vermeiden.

Für den abgeglichenen Zustand ($p_2 = p_3$) ergibt sich ein fester Wert für den Gierwinkel von $\Delta\beta = -2,5^\circ$. Es wird nun der Einfluss des Nickwinkels in einem Bereich von $\Delta\gamma = \pm 30^\circ$ auf die abgeglichene Sonde untersucht und mit den Kurven der Firma SVUSS verglichen.

Die Verläufe vom Druckverhältnis $\overline{p_{12}}$ in Abb. 6.20 sind qualitativ ähnlich zu denen der Firma SVUSS wobei geringe Schwankungen der Werte auftreten. Die nicht senkrecht abfallende Unstetigkeit (strichlierte Linie) liegt daran, dass hier weniger Messpunkte in der Nähe des Unstetigkeitssprunges vorhanden waren. Die strichlierte Linie ist also eine lineare Interpolation zwischen den zwei Messpunkten, die der Unstetigkeit am nächsten sind. Diese Unstetigkeit kann interpretiert werden, als der Nickwinkel bei der die Strömung spontan ablöst was hier bei $\Delta\gamma \approx +12,5^\circ$ der Fall ist. Es ist auffallend, dass diese Ablösung nicht symmetrisch passiert. Das lässt wiederum den Einfluss des Sondenschafes in der Strömung bei positiven Nickwinkeln vermuten.

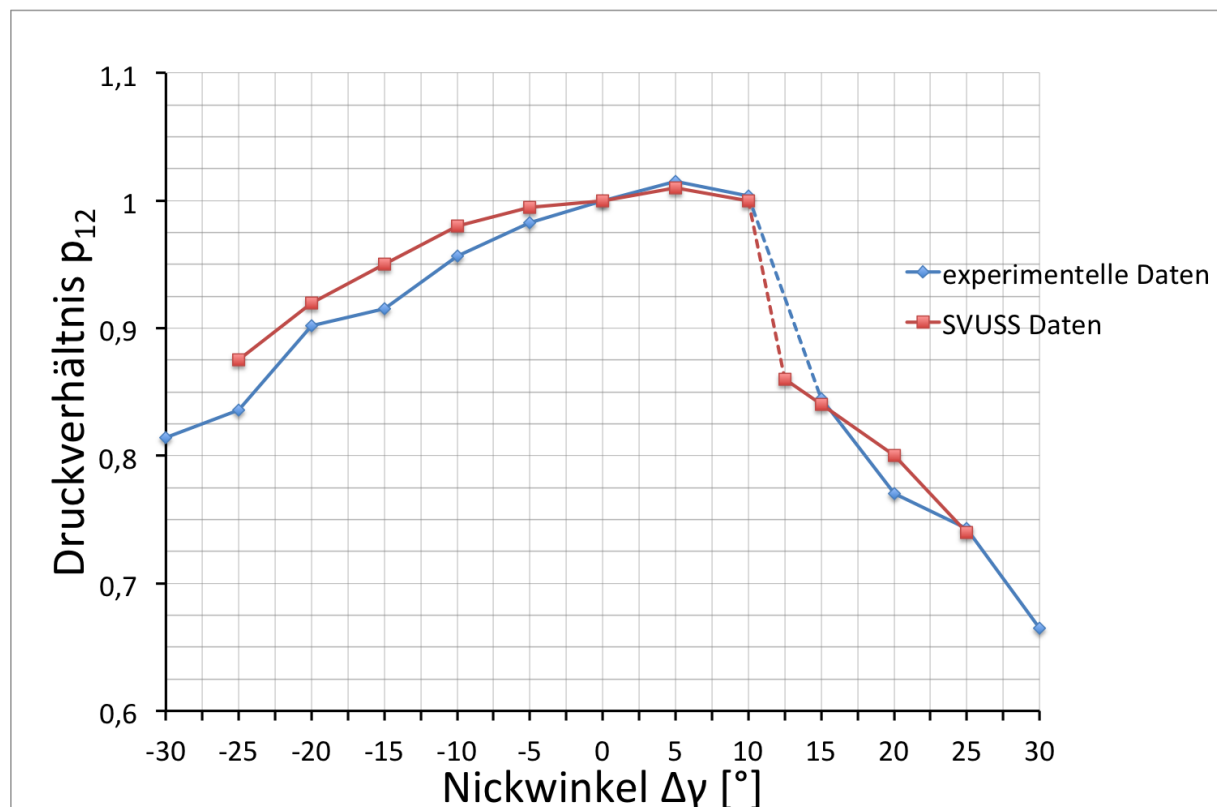


Abbildung 6.20: Vergleich des Druckverhältnisses $\overline{p_{12}}$ bei der Kobrasonde mit den SVUSS- Daten

Die Abb. 6.21 zeigt den Verlauf vom Druckverhältnis $\overline{p_{2b}}$ über dem Nickwinkel $\Delta\gamma$. Der Vergleich mit der Kurve von SVUSS lässt qualitativ gleiche Verläufe erkennen. Es zeigt sich wieder, dass die Ablösung bei $\Delta\gamma \approx +12,5^\circ$ liegt. Bemerkenswert ist, dass hier offensichtlich bei negativen Nickwinkeln der Druck an der Bohrung 2 höher ist als bei $\Delta\gamma = 0^\circ$. Genau so verhält es sich bei den positiven Nickwinkeln im Bereich von $\Delta\gamma = +15^\circ$ bis 25° . Im Moment der Ablösung entsteht ein spontaner Druckabfall von p_2 .

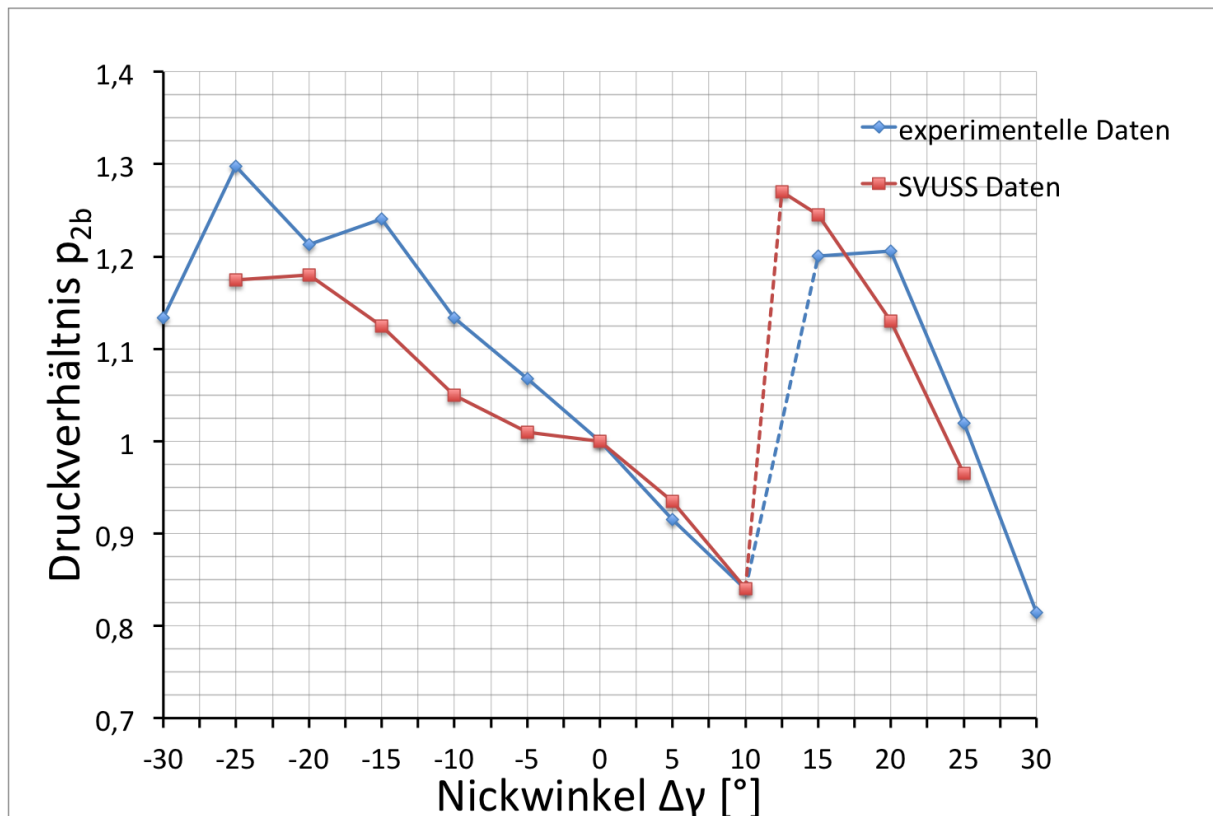


Abbildung 6.21: Vergleich des Druckverhältnisses $\overline{p_{2b}}$ bei der Kobrasonde mit den SVUSS- Daten

6.2 Ergebnisse der AVA Trapezsonde Nr. 110

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der AVA Trapezsonde Nr. 110 diskutiert. Die Vorgehensweise ist gleich wie bei der Kobrasonde. Da beide Sonden einen trapezförmigen Kopf mit dem selben Flankenwinkel von $\delta = 30^\circ$ haben, sind auch ähnliche Ergebnisse zu erwarten.

Die Betrachtungen liegen wieder auf den Bohrungskoeffizienten k_1, k_2 und k_3 , sowie den Kalibrierkoeffizienten k_β, k_t und k_s . Diese sechs Koeffizienten werden über den Gierwinkelbereich $\Delta\beta = -30^\circ$ bis $+30^\circ$ graphisch dargestellt.

Weiters werden noch alle sechs Koeffizienten beim Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ mit den Koeffizienten des Stromlinienprojektionsverfahrens (SLP) verglichen. Diese Darstellung erfolgt ebenfalls über einem Gierwinkelbereich von $\Delta\beta = -30^\circ$ bis $+30^\circ$.

6.2.1 Experimentelle Ergebnisse des Nickwinkelleinflusses

Die Abb. 6.22 bis Abb. 6.27 zeigen die drei Bohrungskoeffizienten k_1, k_2 und k_3 über dem Gierwinkelbereich $\Delta\beta = -30^\circ$ bis $+30^\circ$. In jedem Diagramm sind vier Kurven dargestellt, die den Einfluss des Nickwinkels im negativen Bereich ($\Delta\gamma < 0^\circ$) bzw. im positiven Bereich ($\Delta\gamma > 0^\circ$) mit der Kurve ohne Nickwinkelleinfluss ($\Delta\gamma = 0^\circ$) vergleichen. Die Kurve ohne Nickwinkelleinfluss ist jeweils in violett dargestellt. Sie entspricht dem eigentlichen Verlauf der Bohrungs- und Kalibrierkurven für Dreilochsonden, da diese üblicherweise nicht bei räumlichen Strömungsuntersuchungen eingesetzt werden.

In Abb. 6.22 ist der Bohrungskoeffizient k_1 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma (-30^\circ; -20^\circ; -10^\circ)$ im Vergleich zu k_1 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Es ist ersichtlich, dass der Nickwinkel im Bereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis -10° kaum Einfluss hat, wobei er bei $\Delta\gamma = -20^\circ$ bis -30° nicht mehr zu vernachlässigen ist. Eine mögliche Erklärung ist das Ablösen der Strömung bei größeren Nickwinkeln, wodurch sich der Bohrungsdruck und damit der Bohrungskoeffizient verringert.

In Abb. 6.23 ist der Bohrungskoeffizient k_1 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma (+30^\circ; +20^\circ; +10^\circ)$ im Vergleich zu k_1 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Hier kann man feststellen, dass der Nickwinkel bereits bei kleinen Ausschlägen zu Abweichungen führt. Auch bei der Trapezsonde verhalten sich die Nickwinkelleinflüsse bei $\pm\Delta\gamma$ nicht symmetrisch (Abb. 6.22 und Abb. 6.23). Der Grund dafür kann darin liegen, dass bei positiven Nickwinkeln ($\Delta\gamma > 0^\circ$) der Schaft der Sonde die Strömung so beeinflusst, dass diese den Staupunkten ausweicht und so von den Bohrungen weggedrückt wird. Dadurch verringert sich der Bohrungsdruck p_1 , was auch die kleineren Werte für k_1 erklärt. In der Gierebene verhält sich die Sonde ebenfalls nicht symmetrisch. Die Ursache dafür kann eine nicht exakte Symmetrie der linken und rechten Sondenkopfseite sein, wie es auch bei der Kobrasonde der Fall ist.

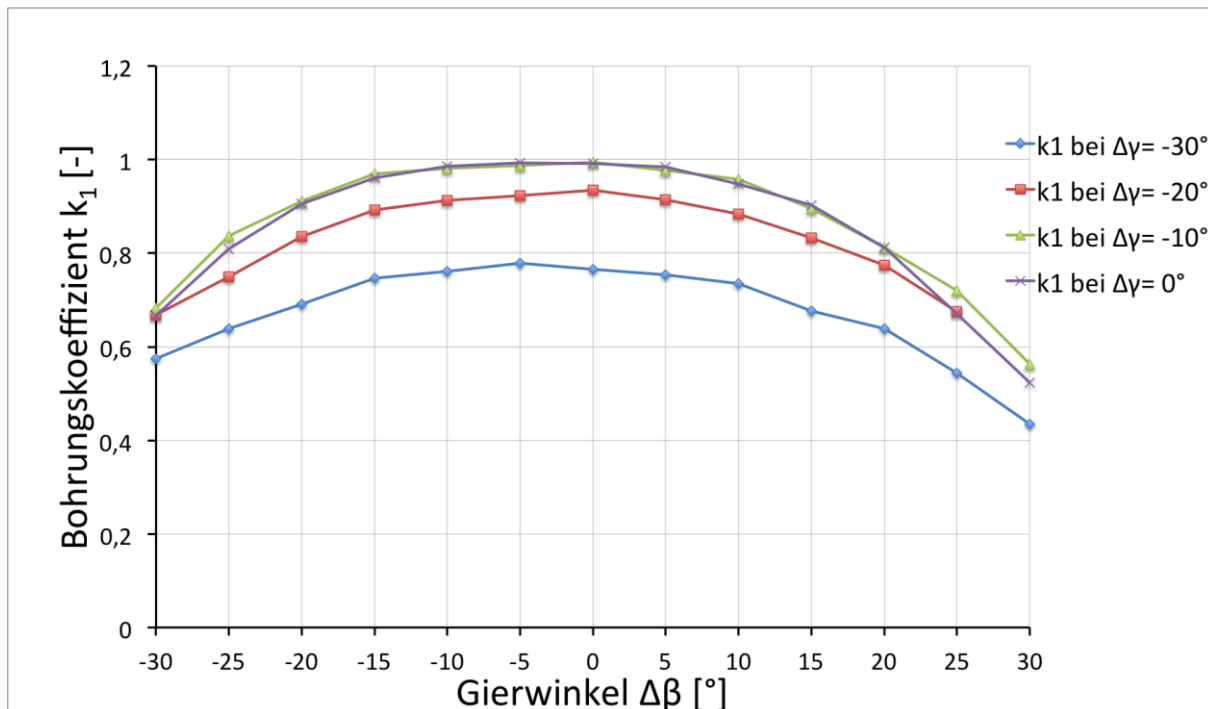


Abbildung 6.22: Bohrungskoeffizient k_1 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

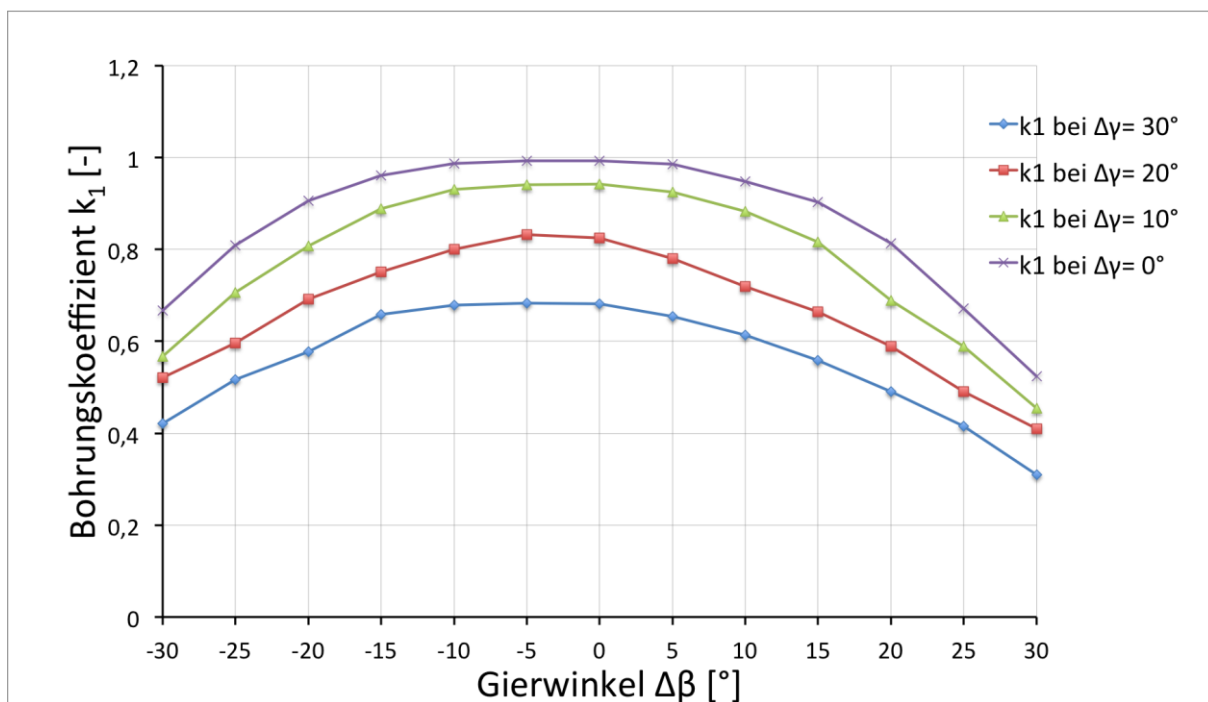


Abbildung 6.23: Bohrungskoeffizient k_1 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

In Abb. 6.24 ist der Bohrungskoeffizient k_2 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_2 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Bei $\Delta\gamma = -10^\circ$ herrscht eine gute Übereinstimmung über den gesamten Gierwinkelbereich, wobei bei $\Delta\gamma = -20^\circ$ nur über einen Gierwinkelbereich von $\Delta\beta = \pm 15^\circ$ geringe Abweichungen der Kurven eintreten. Außerhalb dieser Bereiche ist die Abweichung deutlich größer.

Es ist bemerkenswert, dass hier der positive Gierwinkelbereich auf der strömungszugewandten Seite für die Bohrung 2 offensichtlich eine geringere Rolle als bei der Kobrasonde spielt.

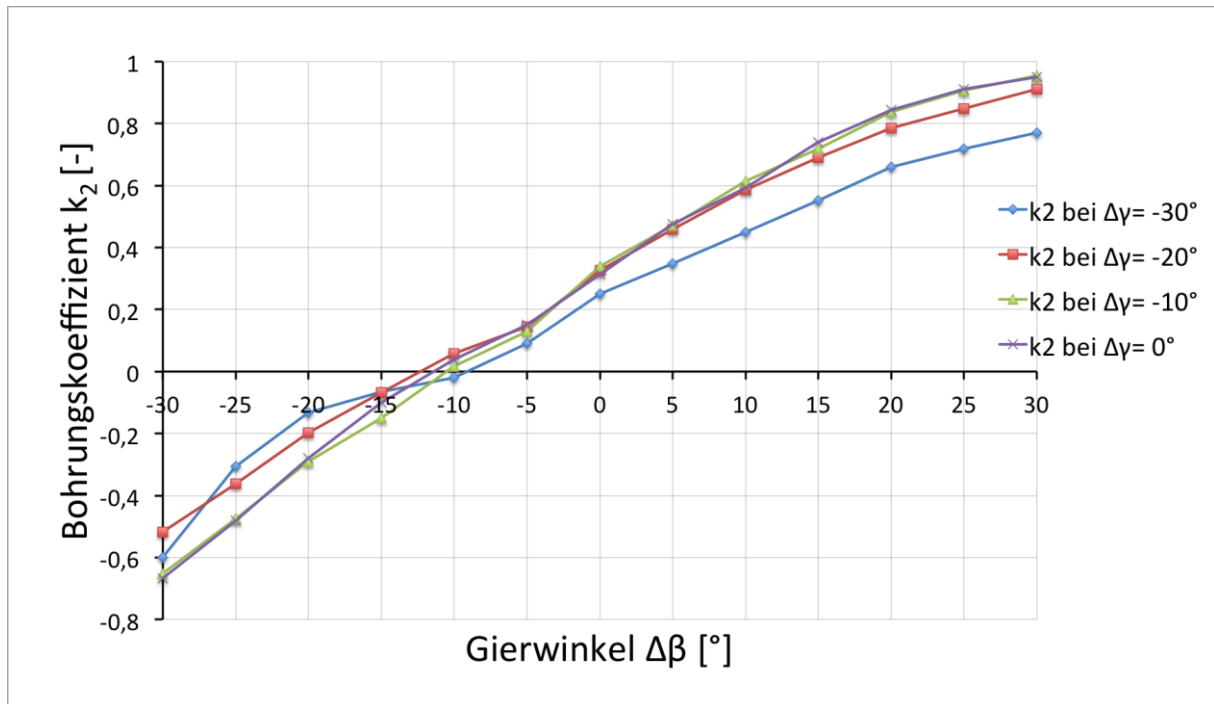


Abbildung 6.24: Bohrungskoeffizient k_2 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

Die Abb. 6.25 zeigt den Bohrungskoeffizient k_2 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_2 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$.

Es ist ersichtlich, dass mit größer werdendem Nickwinkel auch die Abweichungen größer werden. Der positive Gierwinkelbereich auf der strömungszugewandten Seite für die Bohrung 2 spielt auch hier eine geringe Rolle.

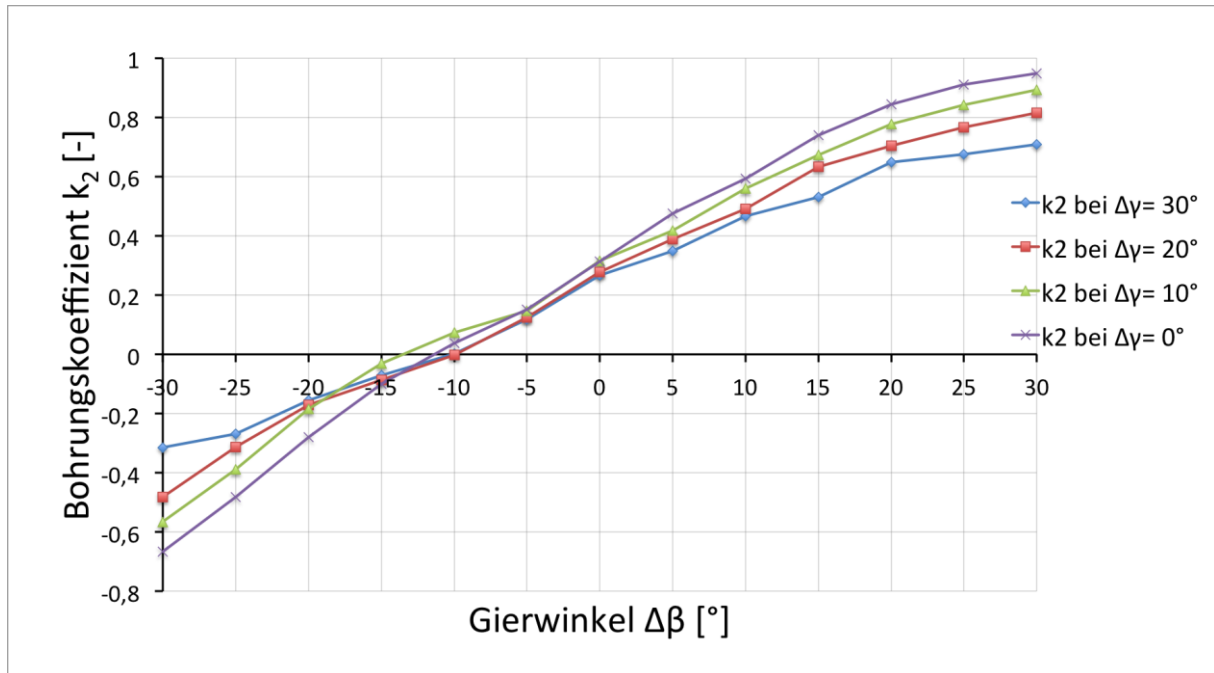


Abbildung 6.25: Bohrungskoeffizient k_2 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

In Abb. 6.26 ist der Bohrungskoeffizient k_3 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_3 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Bei $\Delta\gamma = -10^\circ$ herrscht wie schon bei der Betrachtung von k_2 eine gute Übereinstimmung über den gesamten Gierwinkelbereich. Der Nickwinkel $\Delta\gamma = -20^\circ$ hat im negativen Gierwinkelbereich $\Delta\beta < 0$ geringe Abweichungen. Das ist dadurch zu erklären, dass sich in diesem Bereich die Bohrung 3 auf der strömungszugewandten Seite befindet. Der Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ führt über den gesamten Gierwinkelbereich zu Ablösungen und damit zu Abweichungen der Kurve.

Die Abb. 6.27 zeigt den Bohrungskoeffizient k_3 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_3 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$.

Man sieht, dass mit größer werdendem Nickwinkel auch die Abweichungen größer werden. Der negative Gierwinkelbereich auf der strömungszugewandten Seite für die Bohrung 3 hat hier wieder eine untergeordnete Rolle, da die Abweichungen trotzdem relativ groß sind.

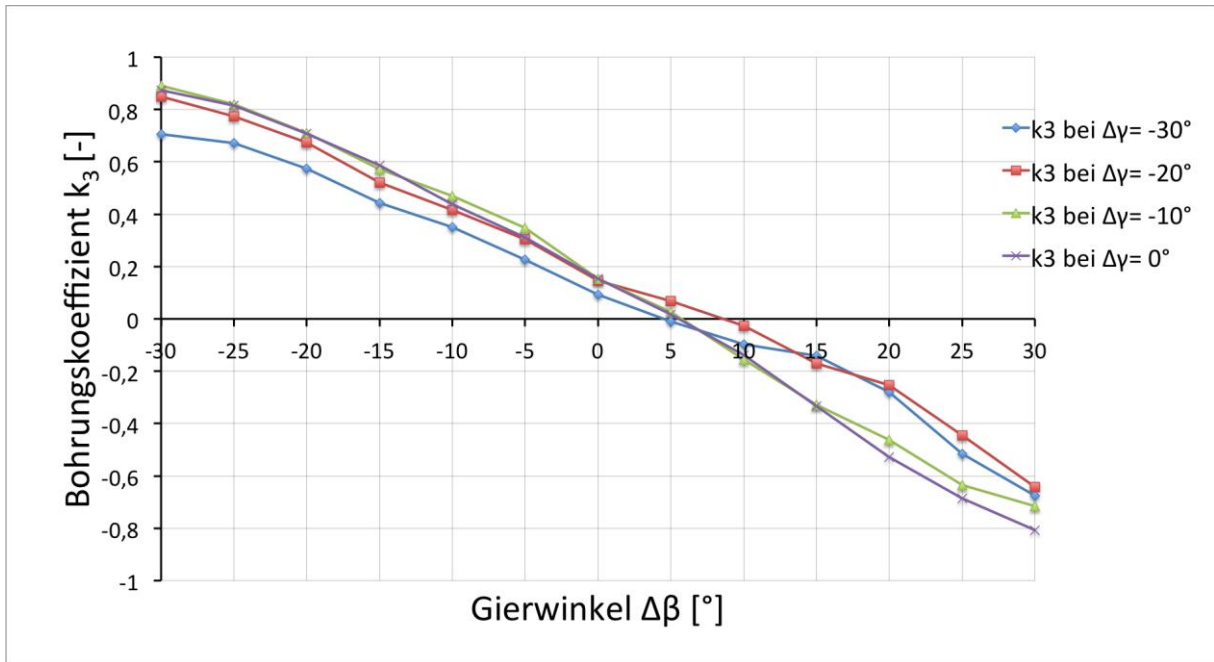


Abbildung 6.26: Bohrungskoeffizient k_3 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

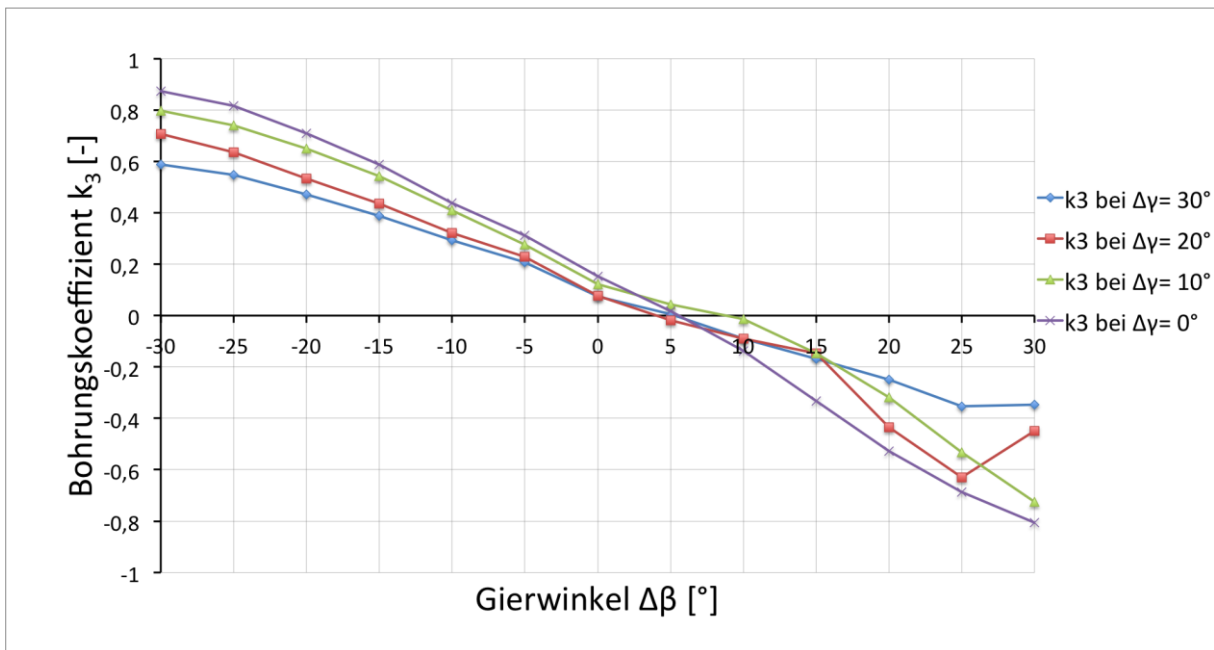


Abbildung 6.27: Bohrungskoeffizient k_3 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

Die Abb. 6.28 bis Abb. 6.33 zeigen die drei Kalibrierkoeffizienten k_β , k_t und k_s über dem Gierwinkelbereich $\Delta\beta = -30^\circ$ bis $+30^\circ$. In jedem Diagramm sind wieder vier Kurven dargestellt, die den Einfluss des Nickwinkels im negativen Bereich ($\Delta\gamma < 0^\circ$) bzw. im positiven Bereich ($\Delta\gamma > 0^\circ$) mit der Kurve ohne Nickwinkleinfluss ($\Delta\gamma = 0^\circ$) vergleichen.

In Abb. 6.28 ist der Richtungskoeffizient k_β über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_β bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Es ist deutlich, dass hier der Nickwinkel nahezu keinen Einfluss hat. Das resultiert aus dem Verhalten der Bohrungskoeffizienten k_2 und k_3 , die schon eine geringe Abweichung vorweisen können. Da der Richtungskoeffizient im Wesentlichen von k_2 und k_3 beeinflusst wird, ergibt sich dieser Verlauf.

Die Abb. 6.29 zeigt den Richtungskoeffizient k_β über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_β bei $\Delta\gamma = 0^\circ$.

Auch bei positiven Nickwinkeln ist der Verlauf von k_β speziell im Gierwinkelbereich von $\Delta\beta = -20^\circ$ bis $+5^\circ$ nahe an der Kurve ohne Nickwinkleinfluss. Außerhalb dieses Bereiches wird die Abweichung erheblich. Die beginnende starke Abweichung ab $\Delta\beta > 5^\circ$ ist speziell auf den Verlauf von k_3 in diesem Bereich zurückzuführen. Das unterschiedliche Verhalten bei negativem und positivem Nickwinkel lässt wiederum auf den Einfluss des Sondenschafte bei positiven Nickwinkeln schließen.

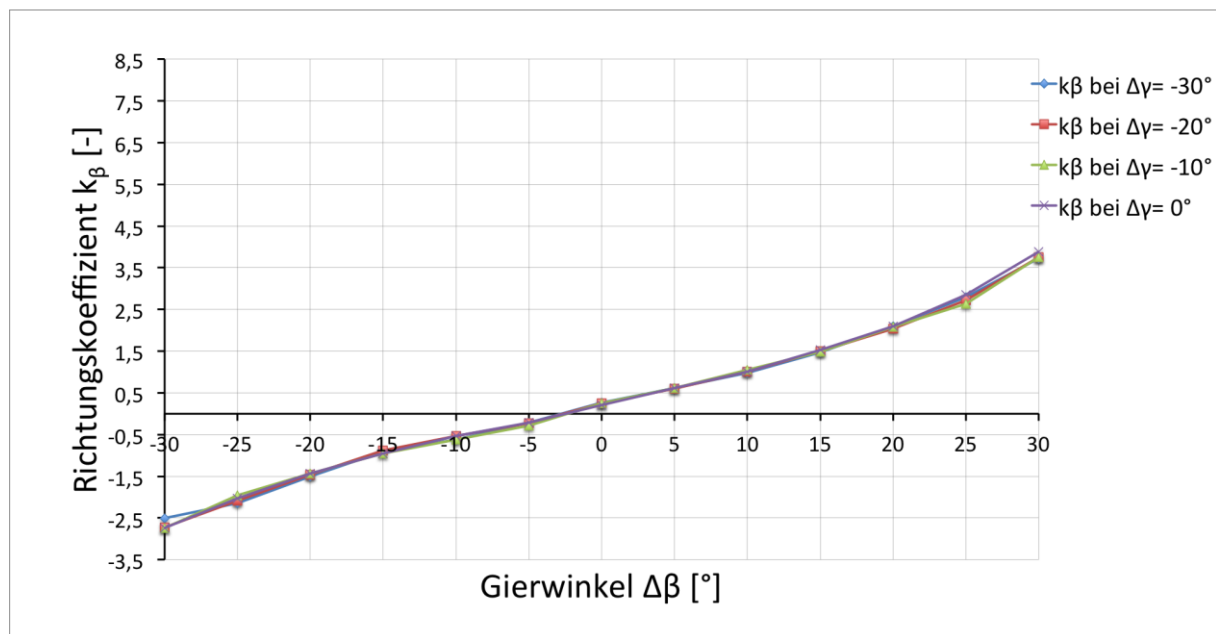


Abbildung 6.28: Richtungskoeffizient k_β für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

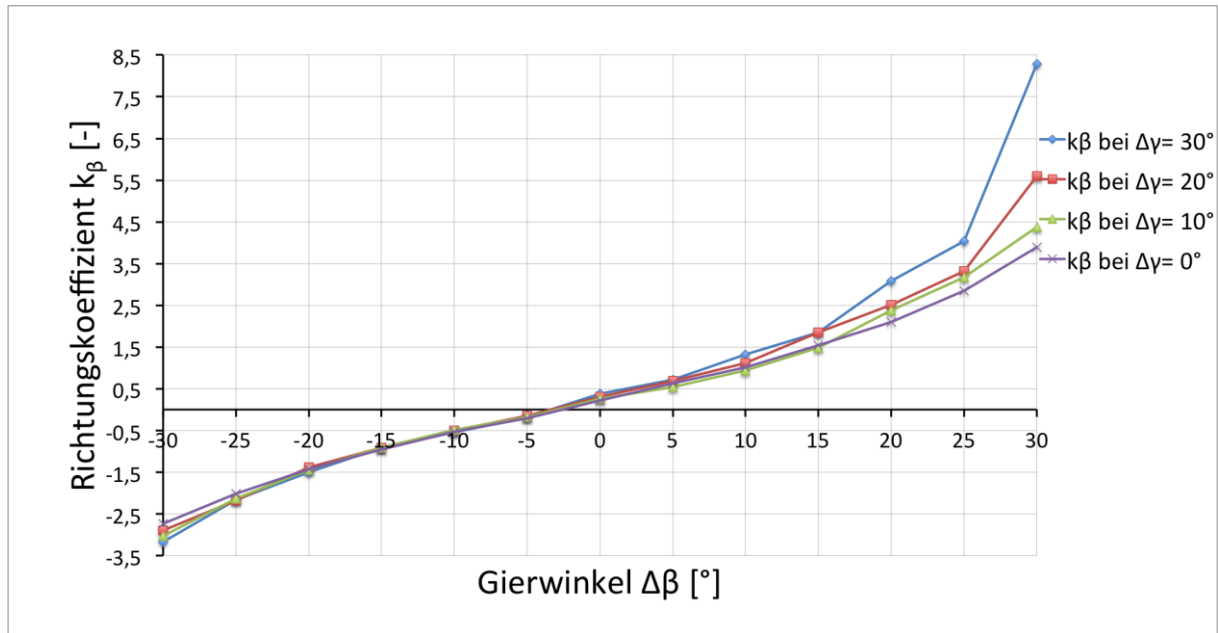


Abbildung 6.29: Richtungskoeffizient k_β für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

In Abb. 6.30 ist der Totaldruckkoeffizient k_t über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_t bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Der Totaldruckkoeffizient k_t hängt im Wesentlichen vom Bohrkoeffizienten k_1 ab. Demnach ist auch der qualitative Kurvenverlauf ähnlich zu dem von k_1 . Allerdings scheint hier der Nickwinkel einen merklich größeren Einfluss auf den Totaldruckkoeffizienten k_t zu haben, wobei die Abweichung bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis -10° gering ausfällt.

In Abb. 6.31 ist der Totaldruckkoeffizient k_t über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_t bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Es ist ersichtlich, dass hier die positiven Nickwinkel in allen Bereichen größere Abweichungen als die negativen Nickwinkel verursachen. Der qualitative Verlauf der Kurven bleibt jedoch gleich.

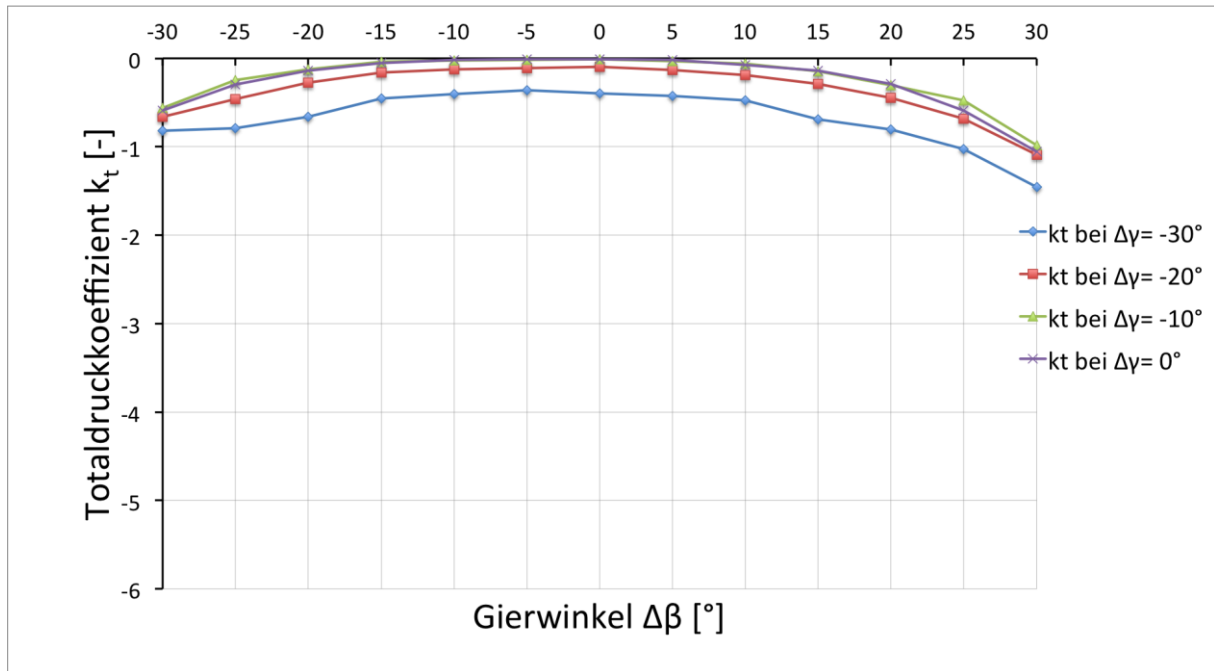


Abbildung 6.30: Totaldruckkoeffizient k_t für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

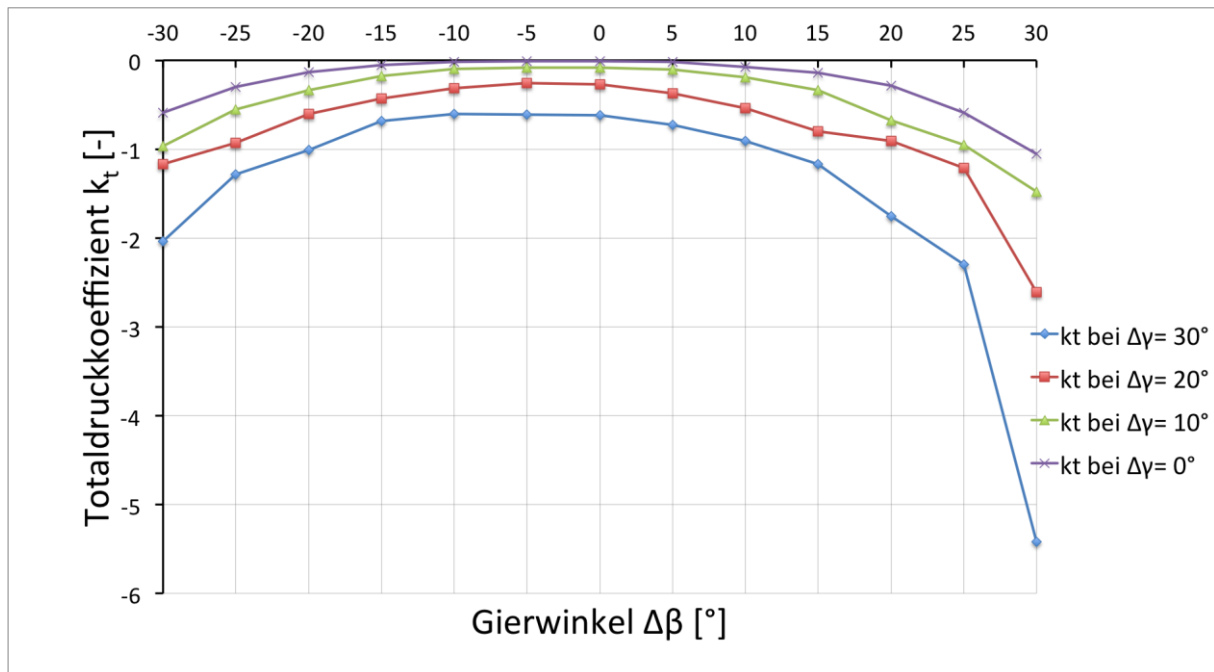


Abbildung 6.31: Totaldruckkoeffizient k_t für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

In Abb. 6.32 ist der statische Druckkoeffizient k_s über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_s bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Beim statischen Druckkoeffizient k_s ist bei Nickwinkeln $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis -10° eine geringe Abweichung erkennbar. Bei Nickwinkeln $\Delta\gamma = -10^\circ$ bis -30° werden die Abweichungen größer, da sich hier offenbar die Ablöseerscheinungen auswirken. Die Trapezsonde verhält sich ähnlich wie die Kobrasonde (Abb. 6.11).

In Abb. 6.33 ist der statische Druckkoeffizient k_s über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_s bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Positive Nickwinkel führen schon bei kleinen Nickwinkeln zu Abweichungen. Vergleicht man hier die Trapezsonde mit der Kobrasonde (Abb.6.12), so sieht man, dass der Schafteinfluss bei $\Delta\gamma = 30^\circ$ den Ablösungen nicht entgegenwirkt. Im Gierwinkelbereich von $\Delta\beta = 10^\circ$ bis 30° kommt es zu großen Abweichungen und Sprüngen.

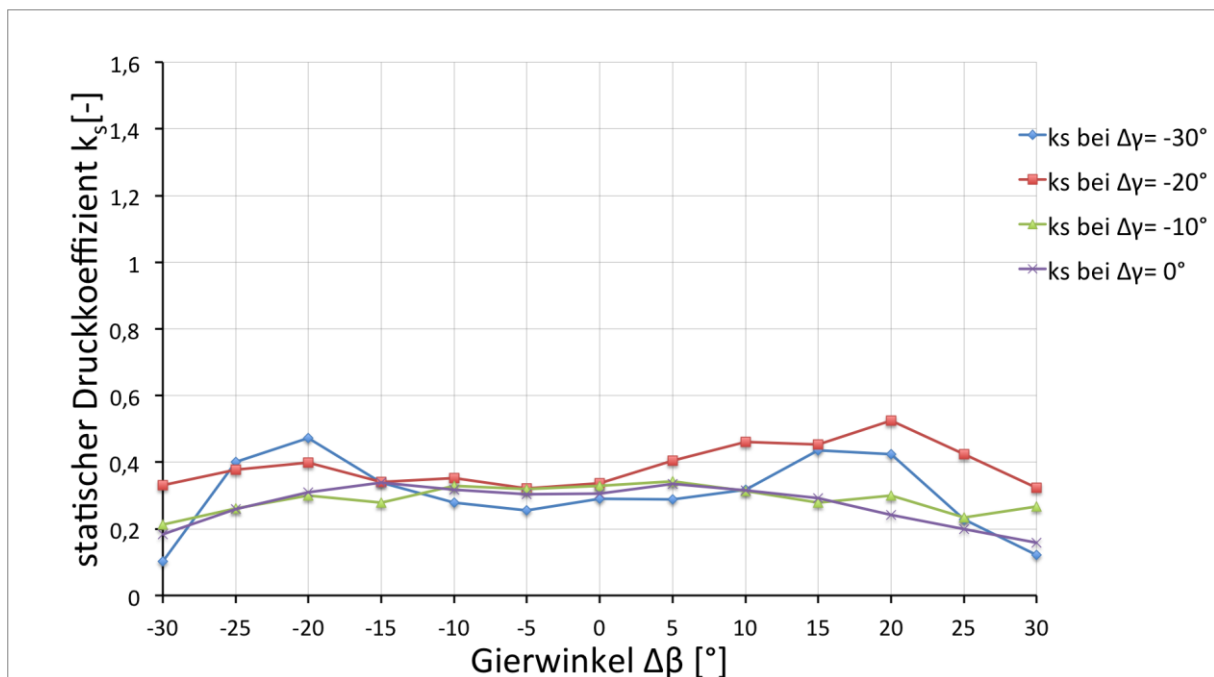


Abbildung 6.32: statischer Druckkoeffizient k_s für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

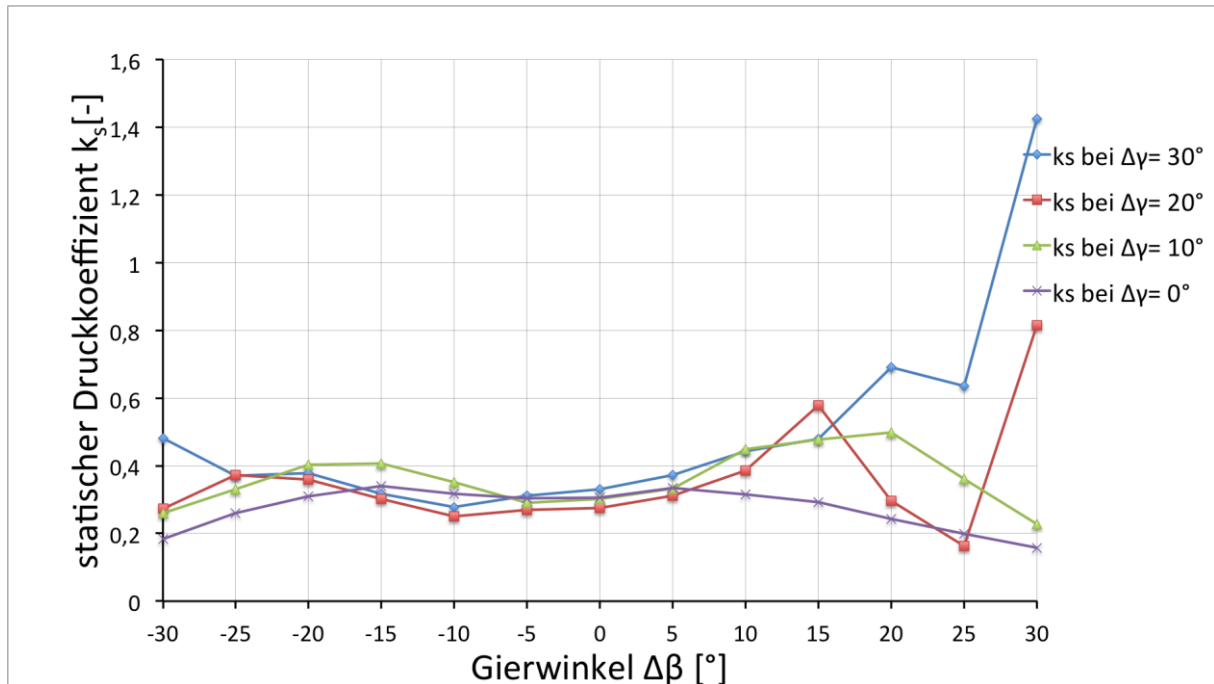


Abbildung 6.33: statische Druckkoeffizient k_s für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

Anhand der Kurvenverläufe für k_1, k_2 und k_3 sowie für k_β, k_t und k_s kann man nun einige Schlüsse ziehen. Grundsätzlich verhält sich die Trapezsonde qualitativ tatsächlich ähnlich zu der Kobrasonde. Allerdings sind die Abweichungen, die vom Nickwinkel hervorgerufen werden bei der Trapezsonde tendenziell etwas größer als bei der Kobrasonde. Grund dafür kann sein, dass die Kopfabmessungen der Kobrasonde ($d = 2,4\text{mm}$) kleiner sind als bei der Trapezsonde ($d = 3,3\text{mm}$). Diese größere Abmessungen verursachen größere Sondenkopfreynoldszahlen Re_d , was einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten von Strömungssonden hat [1],[8]. Die Geometrie des Schaftes in Kopfnähe kann ebenfalls Einfluss haben. Hier ist bei der Kobrasonde der Schaft von der Strömung weggebogen, während er bei der Trapezsonde gerade ist und demnach größeren Einfluss auf die Strömung nimmt.

Für den Nickwinkelbereich $\Delta\gamma = \pm 10^\circ$ zeichnen sich über den gesamten Gierwinkelbereich von $\Delta\beta = \pm 30^\circ$ eher geringe Abweichungen ab. Ausnahme bildet hier der statische Druckkoeffizient k_s (Abb. 6.33), bei dem der Nickwinkel große Abweichungen hervorruft. Generell sind bei negativen Nickwinkeln die Abweichungen geringer als bei positiven. Der Grund liegt darin, dass bei positiven Nickwinkeln der Sondenchaft in die Strömung ragt, bevor diese auf die Bohrungen der Sonde trifft. Dadurch weicht die Strömung den Staupunkten am Schaft aus und sie wird von den Bohrungen weggedrückt, was eine Minderung des gemessenen Druckes zur Folge hat.

6.2.2 Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit dem Stromlinienprojektionsverfahren

In diesem Abschnitt werden die Kurvenverläufe der Bohrungskoeffizienten k_1 , k_2 und k_3 sowie für die Kalibrierkoeffizienten k_β , k_t und k_s mit den Verläufen der Stromlinienprojektion (SLP) verglichen. Da die Trapezsonde und die Kobrasonde die gleiche Kopfgeometrie haben, erhält man bei gleichem Nickwinkel den identischen Verlauf der Koeffizienten-Kurven. Der Vergleich der Kurvenverläufe beschränkt sich hier auf einen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$.

In Abb. 6.34 ist der Bohrungskoeffizient k_1 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_1 beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt.

Die Verläufe stimmen überraschend gut miteinander überein. Anhand dieser Kurven könnte man interpretieren, dass bei der realen Strömung trotz des Nickwinkels von $\Delta\gamma = -30^\circ$ keine Ablösung am Sondenkopf stattfindet, was bei der Kobrasonde sehr wohl der Fall war (siehe Abb. 6.13). Allerdings liegt die Vermutung Nahe, dass es sich hier um Zufall handelt.

Der Verlauf der Kurve des Stromlinienprojektionsverfahrens ist symmetrisch, da von einer perfekten Geometrie des Sondenkopfes ausgegangen wird, was bei realen Ausführungen nicht der Fall ist.

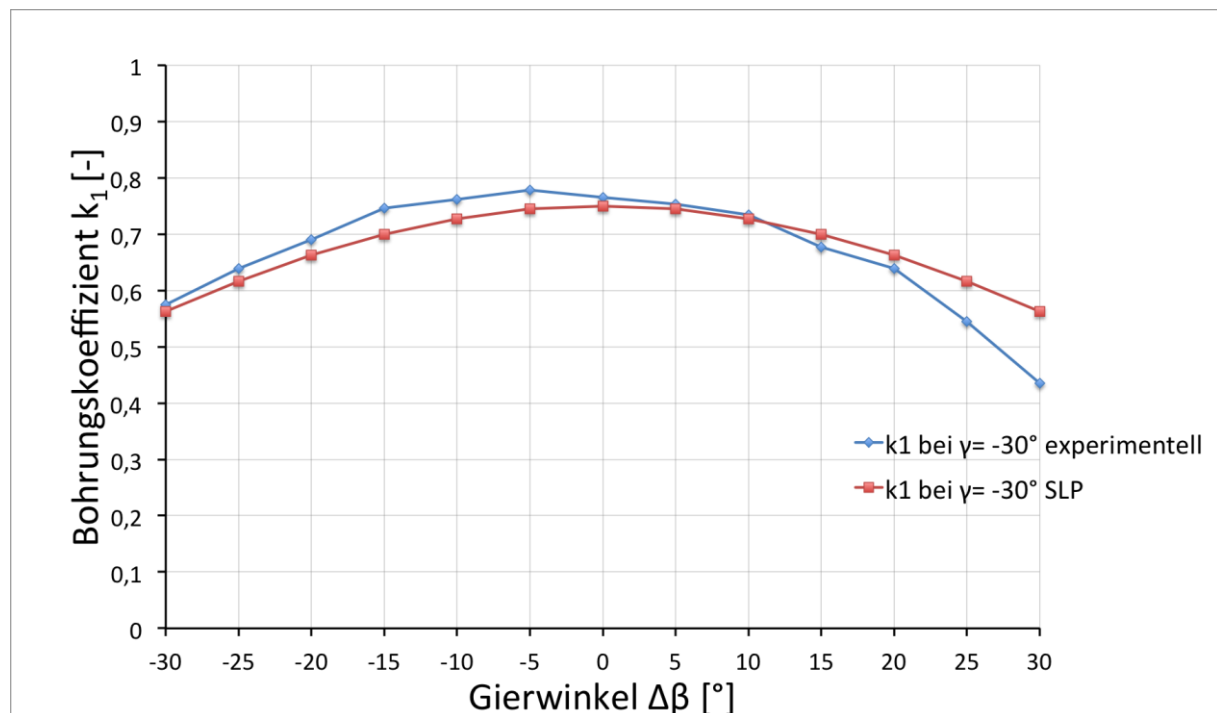


Abbildung 6.34: Bohrungskoeffizient k_1 für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

In Abb. 6.35 ist der Bohrungskoeffizient k_2 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_2 beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt.

Auf der strömungszugewandten Seite der Bohrung 2 ($\Delta\beta > 0^\circ$) kann man einen qualitativ ähnlichen Verlauf erkennen. Grund dafür ist, dass hier bzgl. des Gierwinkels $\Delta\beta$ aufgrund der direkteren Anströmung weniger Ablösungen sind. Durch den großen Nickwinkel, findet allerdings erhebliche Ablösung statt, was sich in der Abweichung der Kurven ausdrückt.

Auf der strömungsabgewandten Seite der Bohrung 2 ($\Delta\beta < 0^\circ$) ergeben sich erhöhte Ablösungen bei der experimentellen Betrachtung, weshalb hier der Vergleich zur Stromlinienprojektion keine Aussagekraft hat.

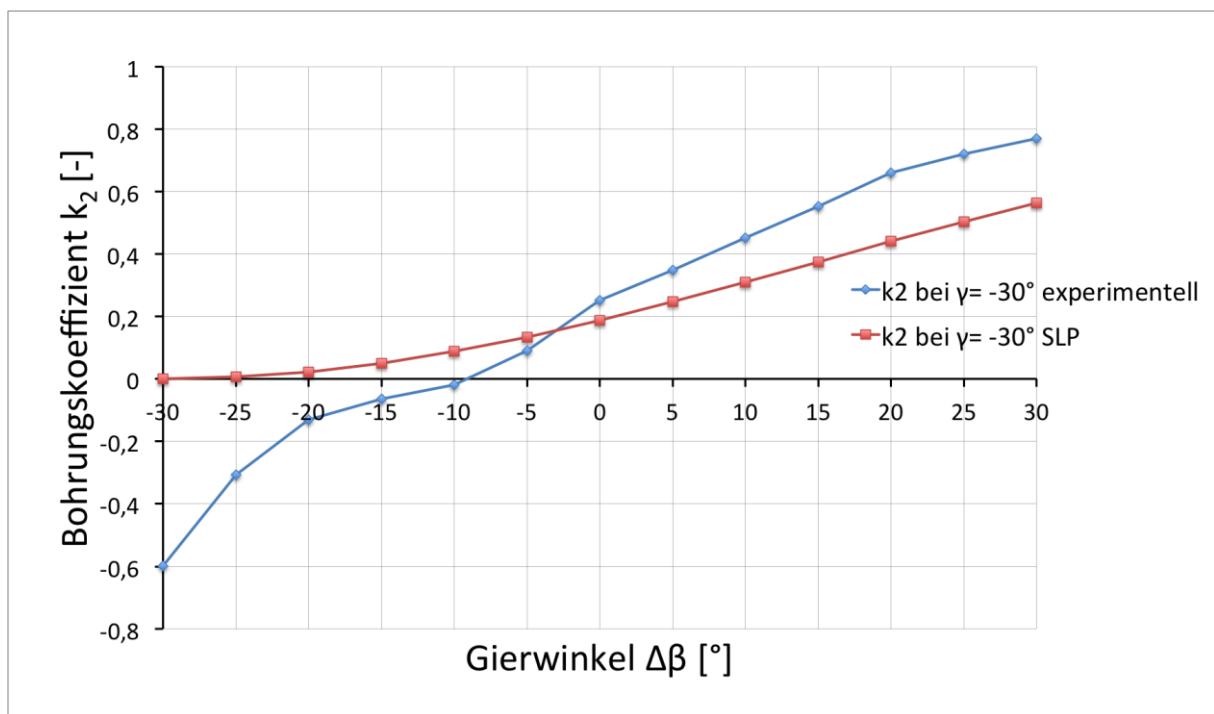


Abbildung 6.35: Bohrungskoeffizient k_2 für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

In Abb. 6.36 ist der Bohrungskoeffizient k_3 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_3 beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt.

Für die Betrachtung von k_3 gilt im Wesentlichen dasselbe wie für k_2 . Allerdings befindet sich die strömungszugewandte Seite der Bohrung 3 im Bereich von $\Delta\beta < 0^\circ$, wodurch sich hier ein qualitativ ähnlicher Verlauf ergibt.

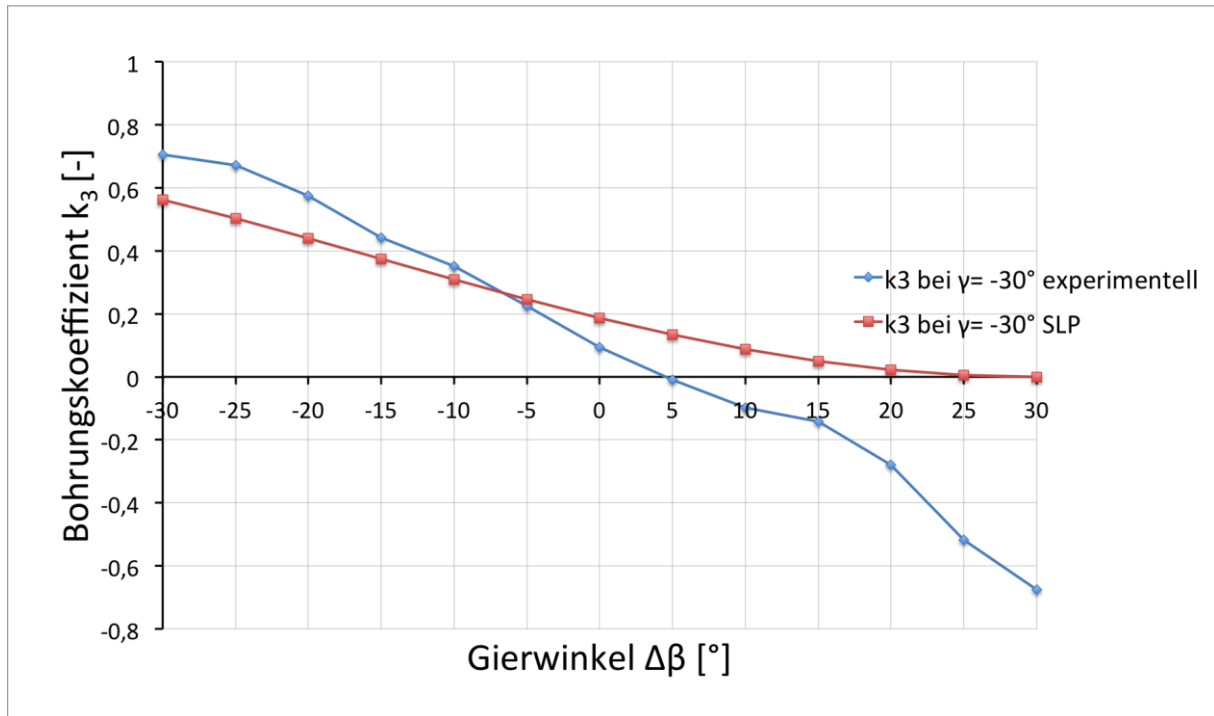


Abbildung 6.36: Bohrungskoeffizient k_3 für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

In Abb. 6.37 ist der Richtungskoeffizient k_β über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_β beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt. Auch hier ist der qualitative Verlauf zwischen der experimentellen Kurve und der Kurve des Stromlinienprojektionsverfahrens wieder ähnlich. Die Abweichungen sind allerdings zu groß als dass man die Kurve des Stromlinienprojektionsverfahrens als repräsentativ ansehen kann. Man erkennt wieder den symmetrischen Verlauf bei der Stromlinienprojektion, der bei der realen Strömungsbetrachtung nicht gegeben ist.

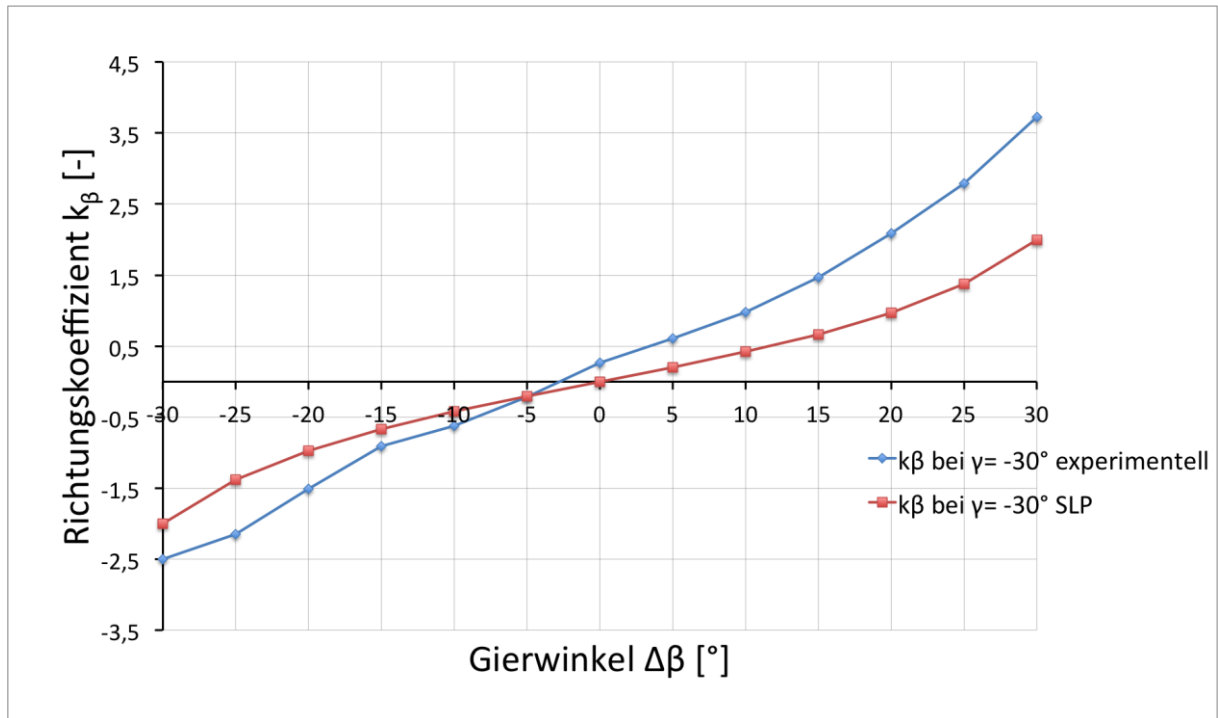


Abbildung 6.37: Richtungskoeffizient k_β für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

In Abb. 6.38 ist der Totaldruckkoeffizient k_t über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_t beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt. Es ergibt sich wieder ein ähnliches Bild, wie schon bei der Betrachtung des Bohrkoeffizienten k_1 . Allerdings ist bei k_t die gute Übereinstimmung nur im Falle von positiven Gierwinkeln ($\Delta\beta > 0$) gegeben. Man erkennt wieder den symmetrischen Verlauf bei der Stromlinienprojektion, der bei der realen Strömungsbetrachtung nicht gegeben ist.

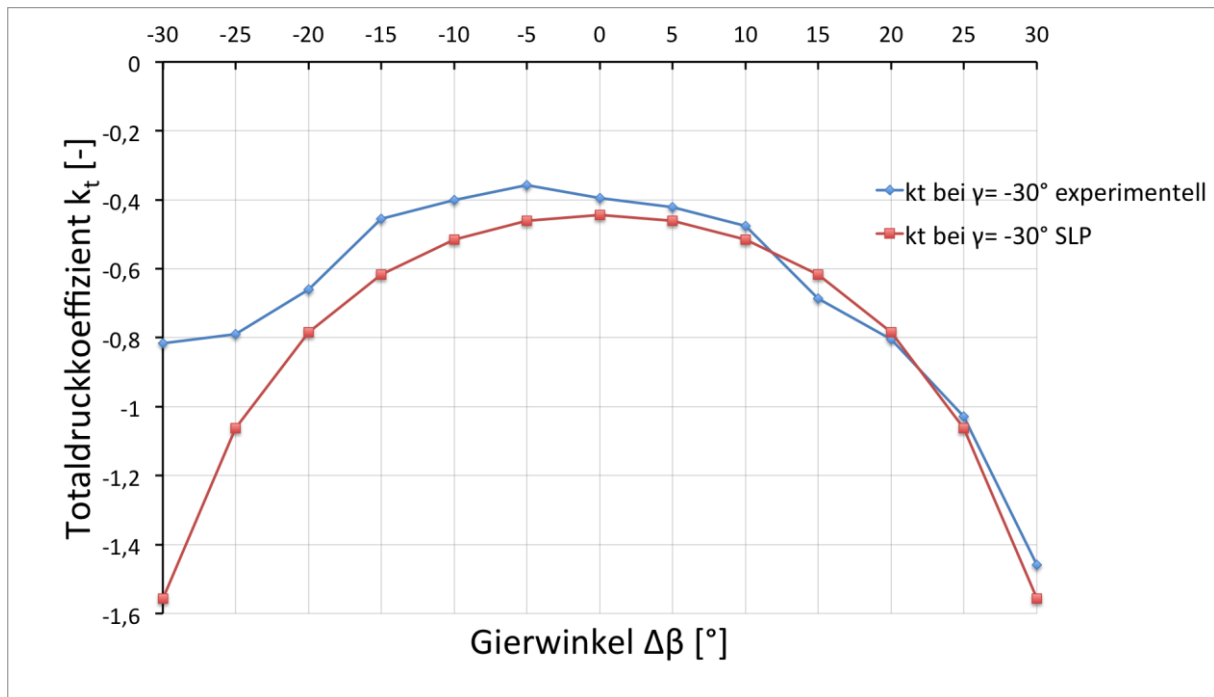


Abbildung 6.38: Totaldruckkoeffizient k_t für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

In Abb. 6.39 ist der statische Druckkoeffizient k_s über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_s beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt. Hier ergibt sich im Gierwinkelbereich von $\Delta\beta = -20^\circ$ bis $+15^\circ$ ein qualitativ guter Verlauf. Außerhalb von diesem Bereich werden die Ablösungen bei der empirischen Kurve so groß, dass sich völlig unterschiedliche Verläufe zeigen.

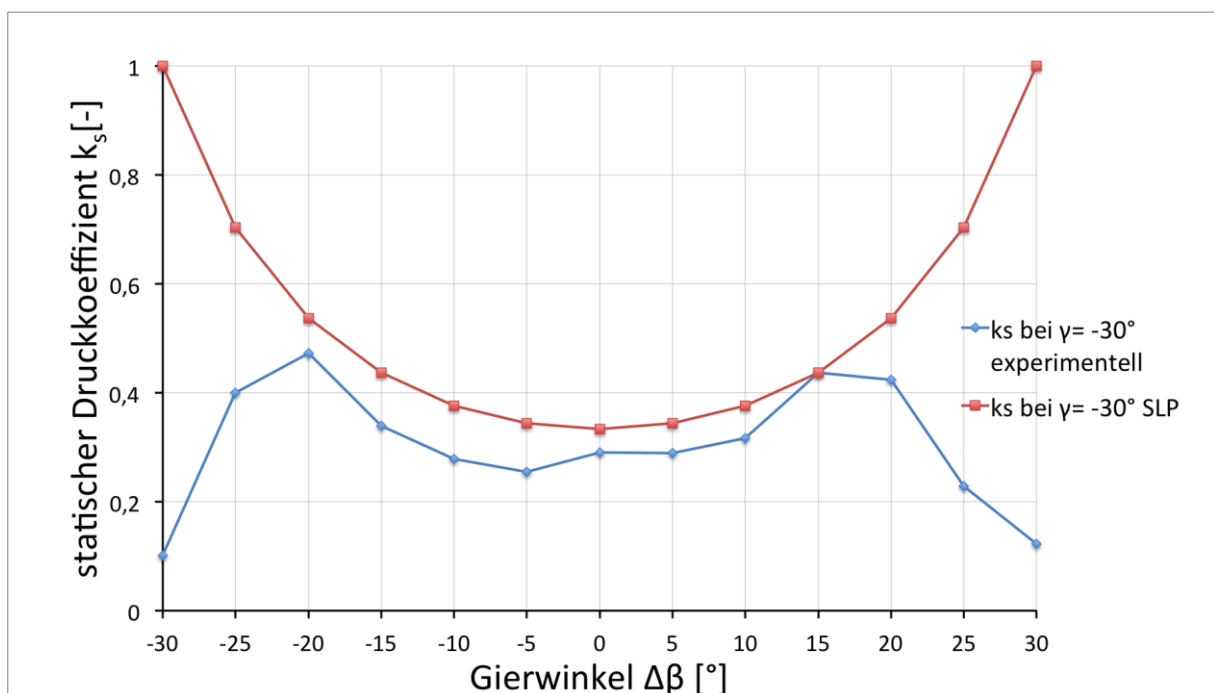


Abbildung 6.39: statischer Druckkoeffizient k_s für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der Trapezsonde AVA Nr. 110

Abschließend kann man zum Vergleich zwischen experimenteller Betrachtung und dem Stromlinienprojektionsverfahren sagen, dass die qualitativen Verläufe gut übereinstimmen.

Das Stromlinienprojektionsverfahren ist eine rein geometrische Betrachtung und kann deshalb nur zu Vergleichszwecken herangenommen werden, um eventuelle Messfehler aufzudecken. Der Nickwinkel $\Delta\gamma$ hat bei der Stromlinienprojektion für k_β und k_s wie bereits erwähnt keinen Einfluss.

Grundsätzlich scheint die Übereinstimmung zwischen experimenteller Betrachtung und dem Stromlinienprojektionsverfahren bei der Trapezsonde besser zu sein als bei der Kobrasonde. Das zeigt sich vor allem bei k_1 und k_t , die ja beide hauptsächlich vom Bohrungsdruck p_1 abhängen und deshalb ähnliches Verhalten zeigen. Aber auch k_s hat bei der Trapezsonde geringere Abweichungen als bei der Kobrasonde.

Allerdings hat sich zuvor bei der rein experimentellen Betrachtung die Kobrasonde unempfindlicher gegenüber Nickwinkeleinflüssen gezeigt.

6.3 Ergebnisse der AVA Zylindersonde Nr. 43

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der AVA Zylindersonde Nr. 43 diskutiert. Die Vorgehensweise ist gleich wie bei den vorangegangenen Sonden. Die Zylindersonde hat einen zylinderförmigen Kopf mit einem Flankenwinkel von $\delta = 50^\circ$, wodurch etwas andere Ergebnisse als bei den zwei bisherigen Sonden zu erwarten sind.

Die Betrachtungen liegen wieder auf den Bohrungskoeffizienten k_1, k_2 und k_3 , sowie den Kalibrierkoeffizienten k_β, k_t und k_s . Diese sechs Koeffizienten werden über den Gierwinkelbereich $\Delta\beta = -30^\circ$ bis $+30^\circ$ graphisch dargestellt.

Weiters werden noch alle sechs Koeffizienten beim Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ mit den Koeffizienten des Stromlinienprojektionsverfahrens (SLP) verglichen. Diese Darstellung erfolgt ebenfalls über einem Gierwinkelbereich von $\Delta\beta = -30^\circ$ bis $+30^\circ$.

6.3.1 Experimentelle Ergebnisse des Nickwinkleinflusses

Die Abb. 6.40 bis Abb. 6.45 zeigen die drei Bohrungskoeffizienten k_1, k_2 und k_3 über dem Gierwinkelbereich $\Delta\beta = -30^\circ$ bis $+30^\circ$. In jedem Diagramm sind vier Kurven dargestellt, die den Einfluss des Nickwinkels im negativen Bereich ($\Delta\gamma < 0^\circ$) bzw. im positiven Bereich ($\Delta\gamma > 0^\circ$) mit der Kurve ohne Nickwinkleinfluss ($\Delta\gamma = 0^\circ$) vergleichen. Die Kurve ohne Nickwinkleinfluss ist jeweils in violett dargestellt. Sie entspricht dem eigentlichen Verlauf der Bohrungs- und Kalibrierkurven für Dreilochsonden, da diese üblicherweise nicht bei räumlichen Strömungsuntersuchungen eingesetzt werden.

In Abb. 6.40 ist der Bohrungskoeffizient k_1 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_1 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Der Verlauf von k_1 zeigt ein ähnliches Bild wie das der anderen Sonden. Es ist ersichtlich, dass der Nickwinkel im Bereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis -10° geringen Einfluss hat, wobei er bei $\Delta\gamma = -20^\circ$ bis -30° größer wird. Eine mögliche Erklärung ist das Ablösen der Strömung bei größeren Nickwinkeln, wodurch sich der Bohrungsdruck und damit der Bohrungskoeffizient verringert.

In Abb. 6.41 ist der Bohrungskoeffizient k_1 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_1 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Der Einfluss des positiven Nickwinkels hat einen sehr ähnlichen Verlauf wie bei negativen Nickwinkeln (Abb. 6.40). Man kann sagen, dass sich die Verläufe in der Nickebene beinahe symmetrisch verhalten. Die Bohrungen bei der Zylindersonde sind nicht wie bei den anderen beiden Sonden am untersten Ende des Schaftes, sondern befinden sich in einem Abstand von 29mm zum untern Ende. Dadurch greift der Schaft bei negativen und positiven Nickwinkeln gleichermaßen in die Strömung ein, so dass sie in beiden Winkelrichtungen von den Staupunkten weggedrückt wird.

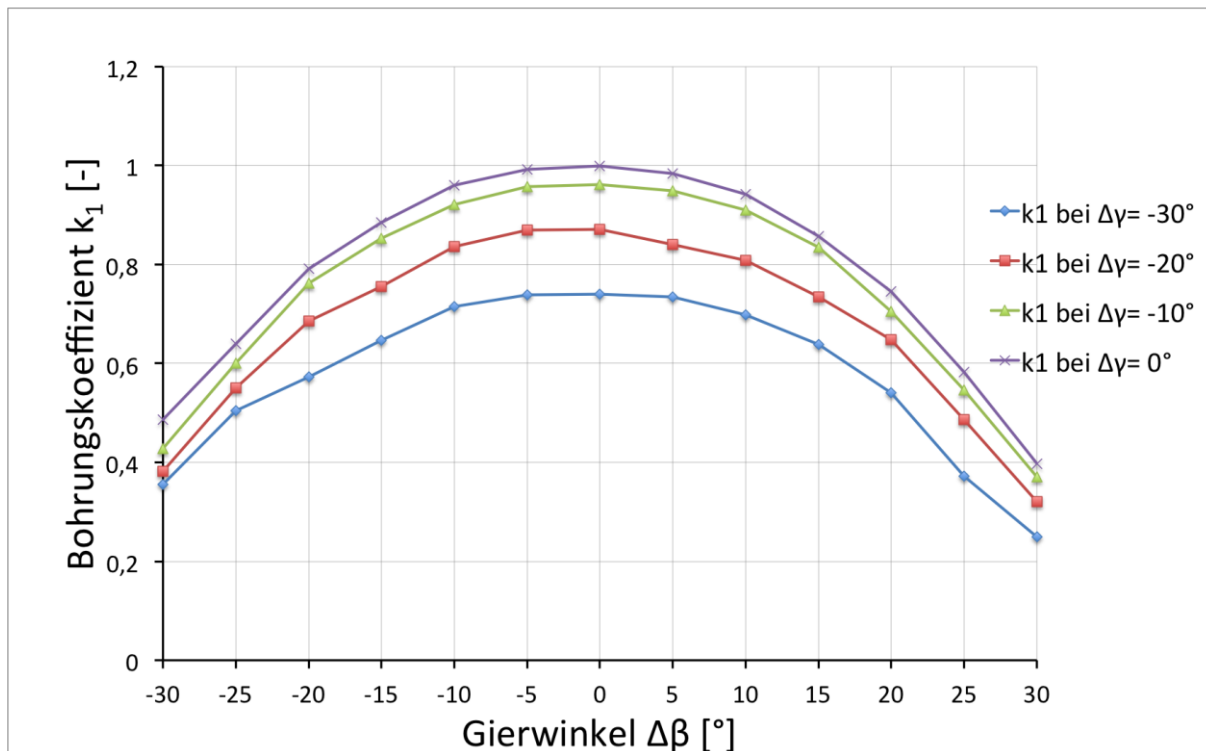


Abbildung 6.40: Bohrungskoeffizient k_1 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

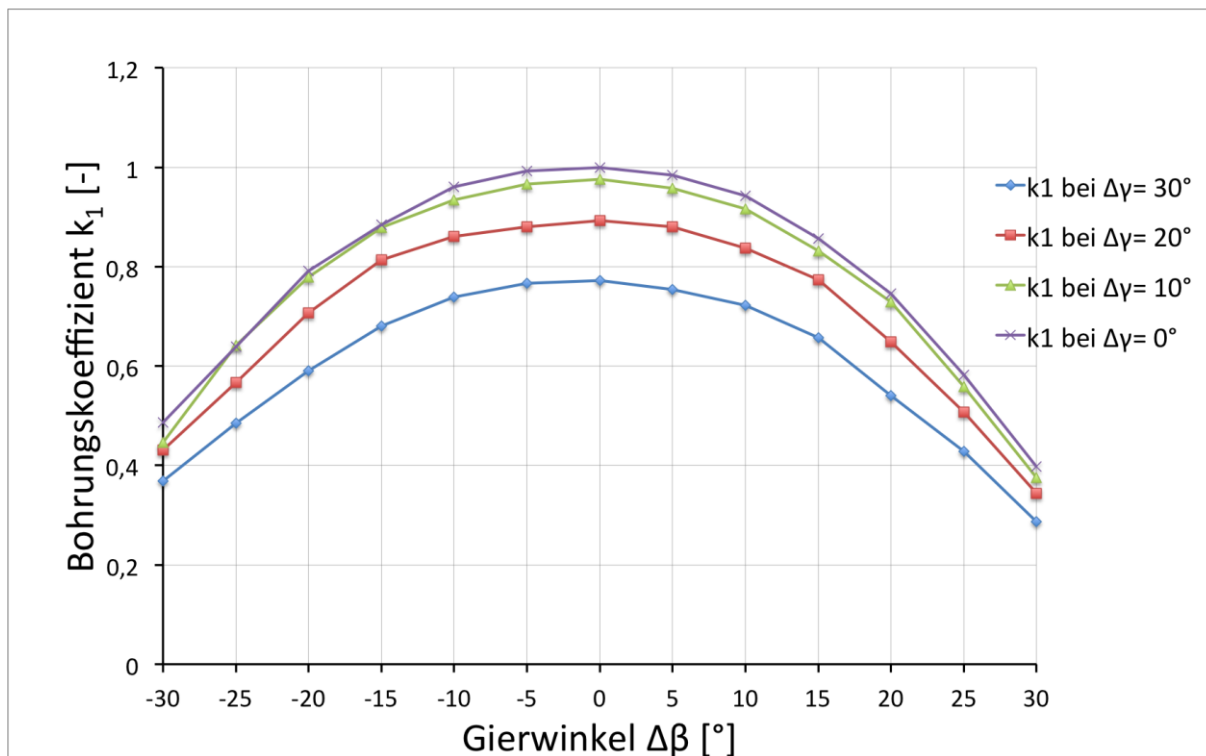


Abbildung 6.41: Bohrungskoeffizient k_1 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

In Abb. 6.42 ist der Bohrungskoeffizient k_2 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_2 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis -20° herrscht eine relativ gute Übereinstimmung über den gesamten Gierwinkelbereich. Bei $\Delta\gamma = -30^\circ$ kommt es dann zu etwas größeren Abweichungen aufgrund von Ablösung. Die Bohrung 2 unterscheidet hier nicht zwischen strömungszu- und abgewandter Seite, da sich die Kurven über den gesamten Gierwinkelbereich gleichmäßig verhalten. Das liegt wahrscheinlich am runden Körper des Zylinders, bei dem es bei seitlicher Anströmung zu weniger Ablösungen kommt als bei kantigen Körpern.

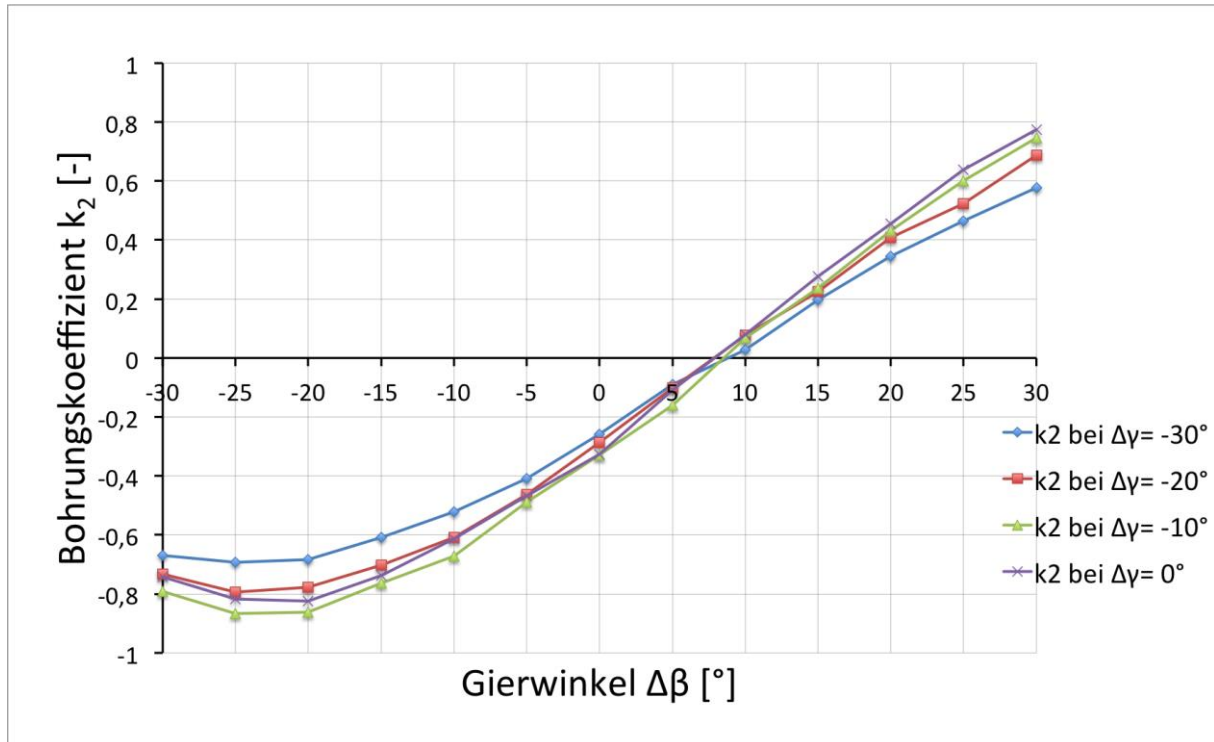


Abbildung 6.42: Bohrungskoeffizient k_2 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

Die Abb. 6.43 zeigt den Bohrungskoeffizient k_2 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_2 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$.

Auch hier verhält sich die Zylindersonde in der Nickebene wieder annähernd symmetrisch. Daher gilt dasselbe wie für den negativen Nickwinkelbereich.

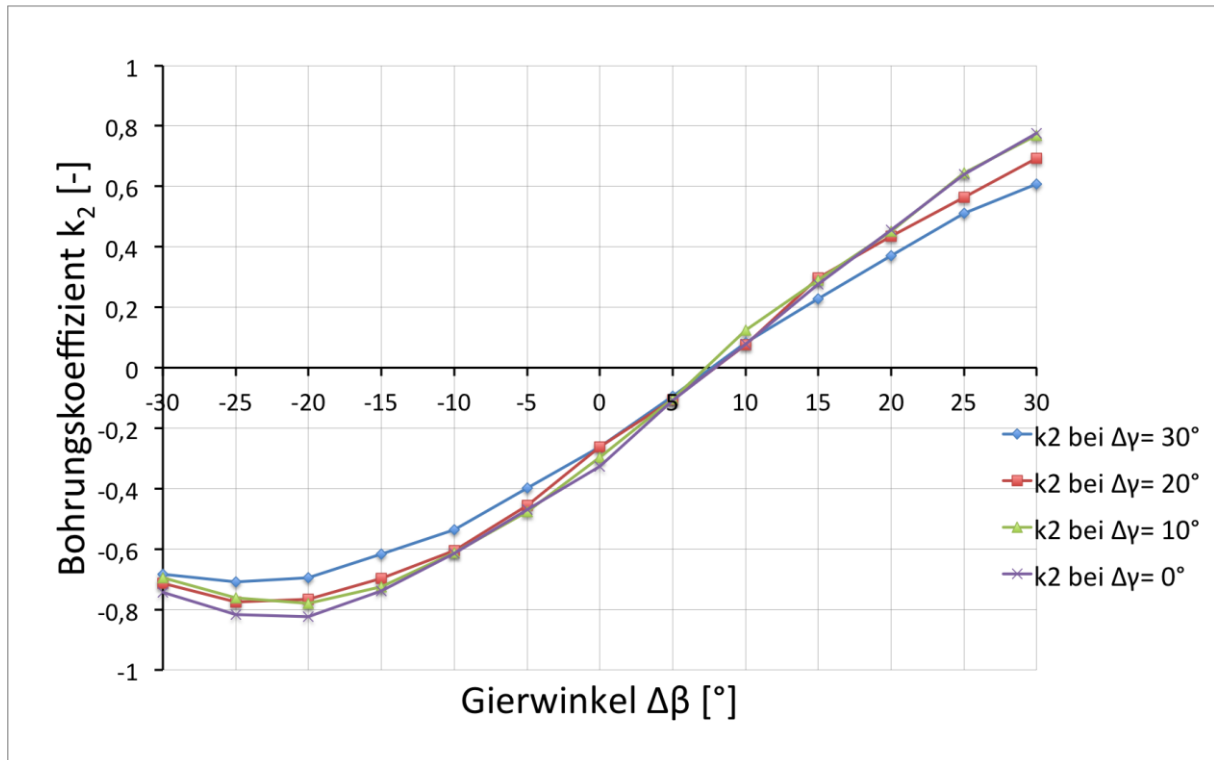


Abbildung 6.43: Bohrungskoeffizient k_2 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

In Abb. 6.44 ist der Bohrungskoeffizient k_3 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_3 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Wie schon bei k_2 ist die Abweichung bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis -20° relativ klein und macht sich erst bei $\Delta\gamma = -30^\circ$ deutlicher bemerkbar. Für die Bohrung 3 hat die strömungszu- und abgewandte Seite ebenfalls keinen Einfluss auf die Ablösung.

Die Abb. 6.45 zeigt den Bohrungskoeffizient k_3 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_3 bei $\Delta\gamma = 0^\circ$.

Der Einfluss von positiven Nickwinkeln verhält sich analog zum Einfluss von negativen Nickwinkeln.

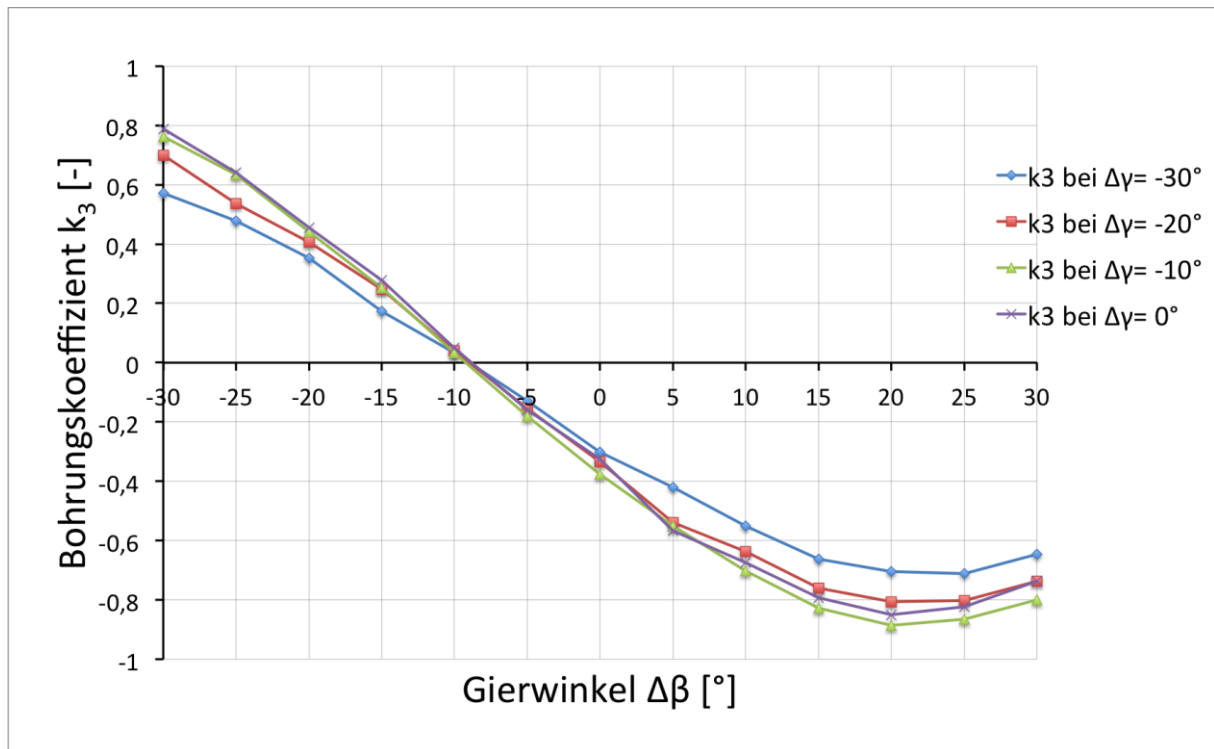


Abbildung 6.44: Bohrungskoeffizient k_3 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

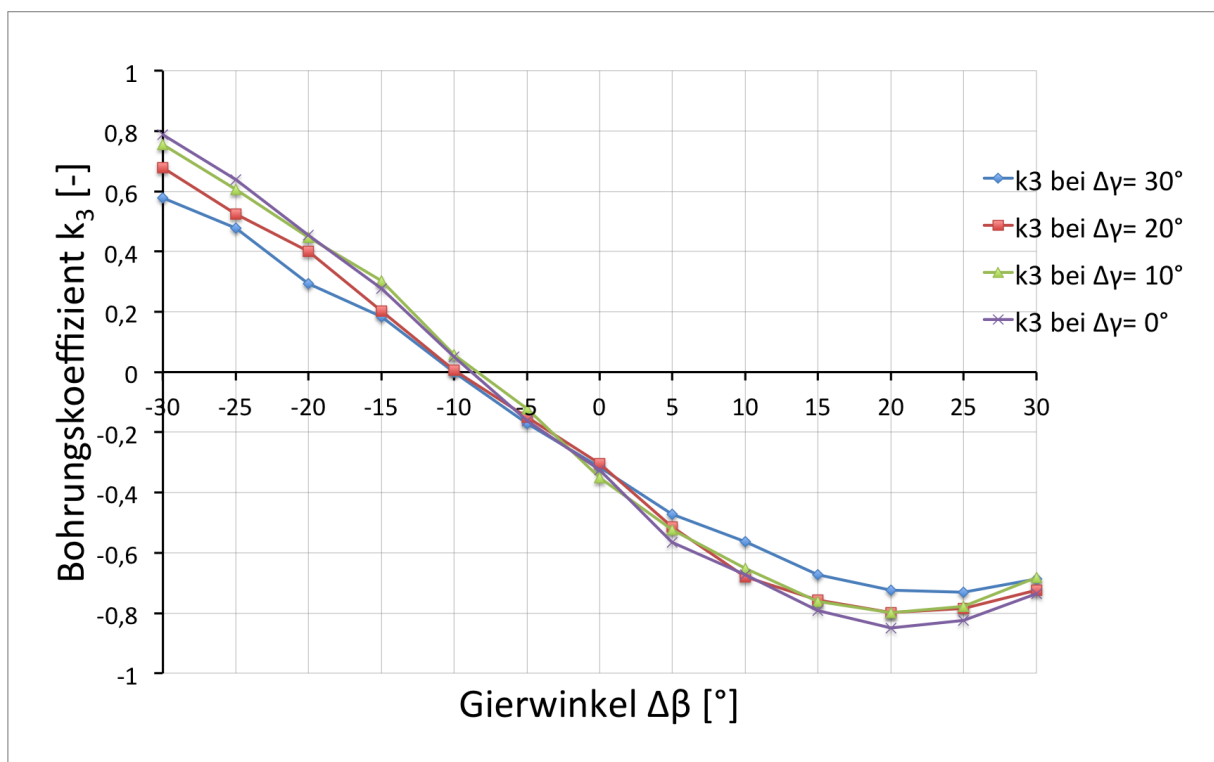


Abbildung 6.45: Bohrungskoeffizient k_3 für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

Die Abb. 6.46 bis Abb. 6.51 zeigen die drei Kalibrierkoeffizienten k_β , k_t und k_s über dem Gierwinkelbereich $\Delta\beta = -30^\circ$ bis $+30^\circ$. In jedem Diagramm sind wieder vier Kurven dargestellt, die den Einfluss des Nickwinkels im negativen Bereich ($\Delta\gamma < 0^\circ$) bzw. im positiven Bereich ($\Delta\gamma > 0^\circ$) mit der Kurve ohne Nickwinkeleinfluss ($\Delta\gamma = 0^\circ$) vergleichen.

In Abb. 6.46 ist der Richtungskoeffizient k_β über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_β bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Es ist deutlich, dass hier der Nickwinkel nahezu keinen Einfluss hat. Das resultiert aus dem Verhalten der Bohrungskoeffizienten k_2 und k_3 , die schon geringe Abweichungen vorweisen können. Da der Richtungskoeffizient im Wesentlichen von k_2 und k_3 beeinflusst wird, ergibt sich dieser Verlauf.

Die Abb. 6.47 zeigt den Richtungskoeffizient k_β über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_β bei $\Delta\gamma = 0^\circ$.

Auch bei positiven Nickwinkeln ist der Verlauf von k_β kaum abweichend von der nickwinkelfreien Kurve. Die Kurven verhalten sich bei negativem, sowie positivem Nickwinkel gleich.

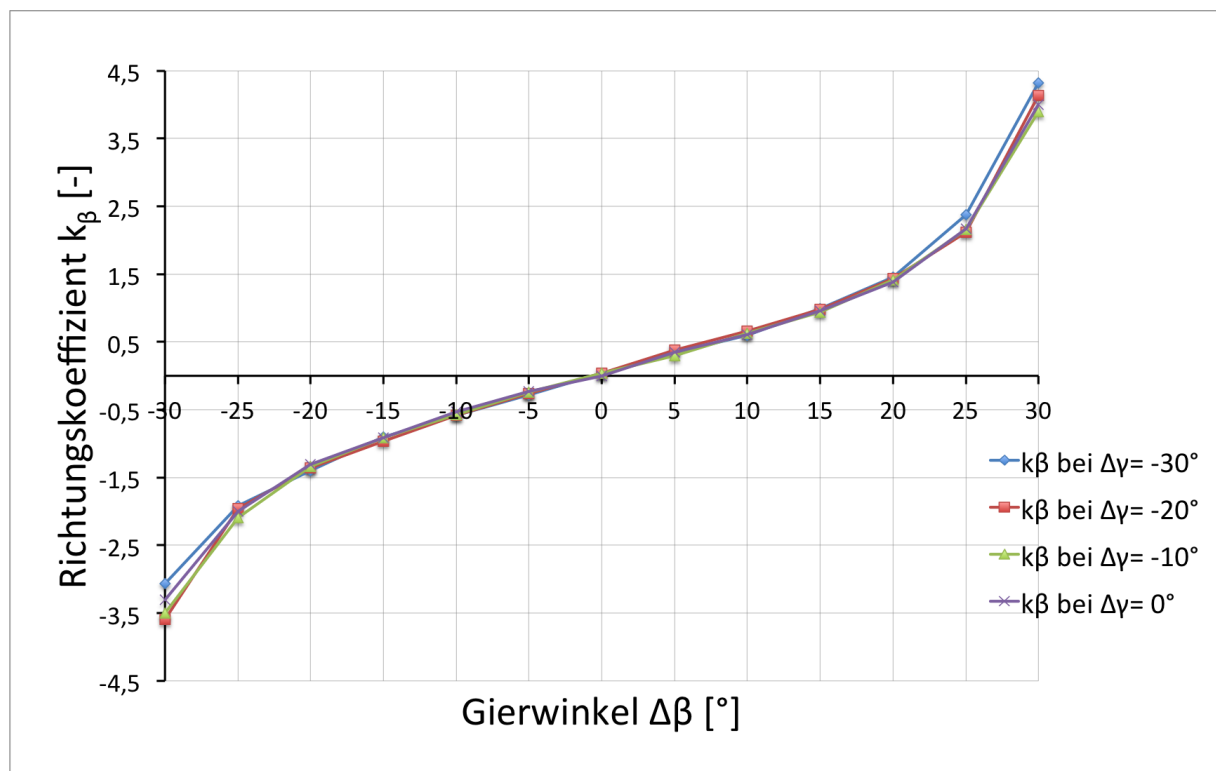


Abbildung 6.46: Richtungskoeffizient k_β für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

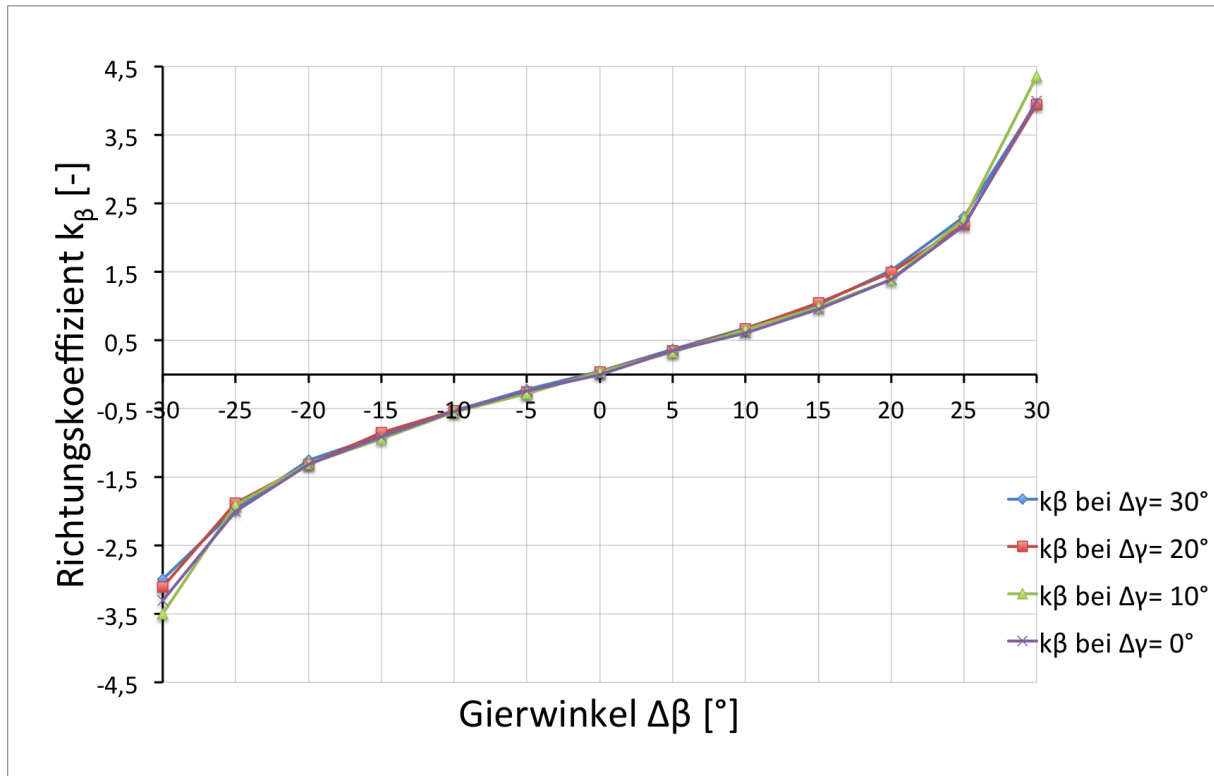


Abbildung 6.47: Richtungskoeffizient k_β für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

In Abb. 6.48 ist der Totaldruckkoeffizient k_t über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_t bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Der Totaldruckkoeffizient k_t hängt im Wesentlichen vom Bohrungskoeffizienten k_1 ab. Demnach ist auch der qualitative Kurvenverlauf ähnlich zu dem von k_1 . Die Abweichung ist bis $\Delta\gamma = -10^\circ$ gering und wird dann etwas größer.

In Abb. 6.49 ist der Totaldruckkoeffizient k_t über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_t bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen.

Auch hier verhalten sich die Nickwinkel in negativer und positiver Betrachtung wieder ziemlich ähnlich.

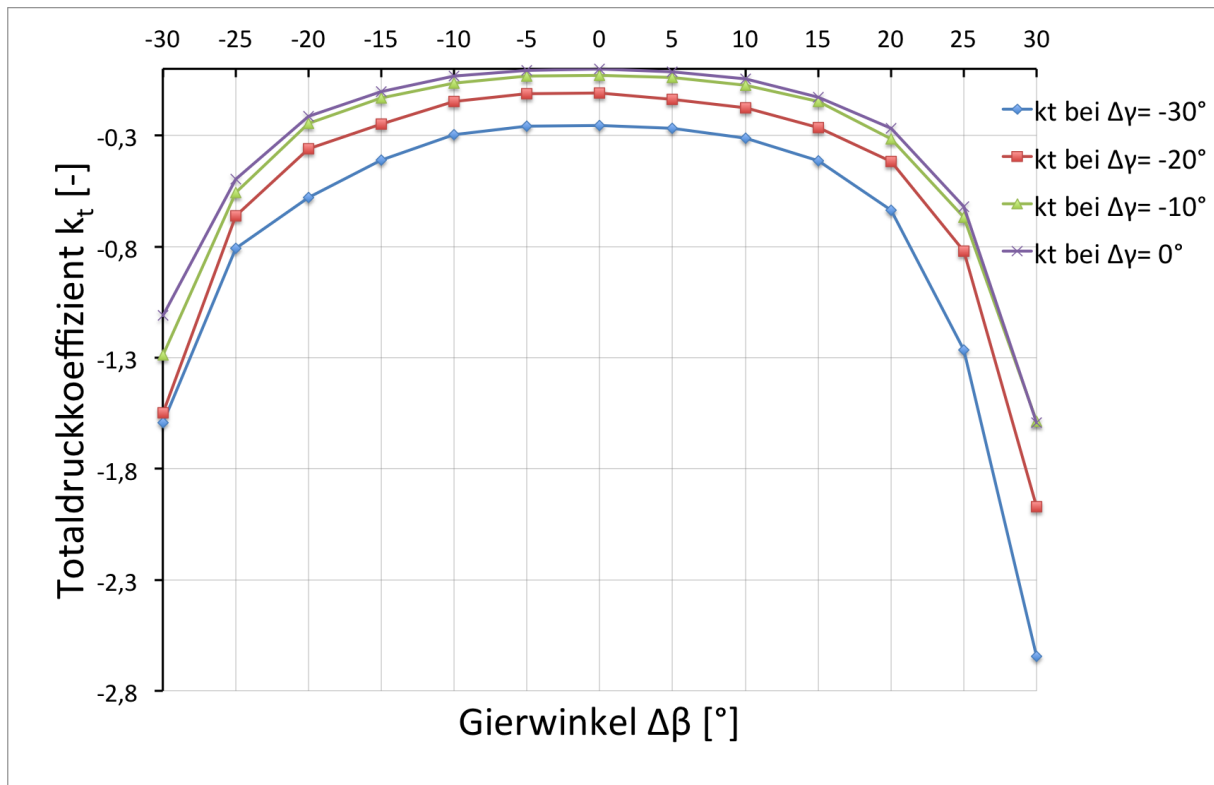


Abbildung 6.48: Totaldruckkoeffizient k_t für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

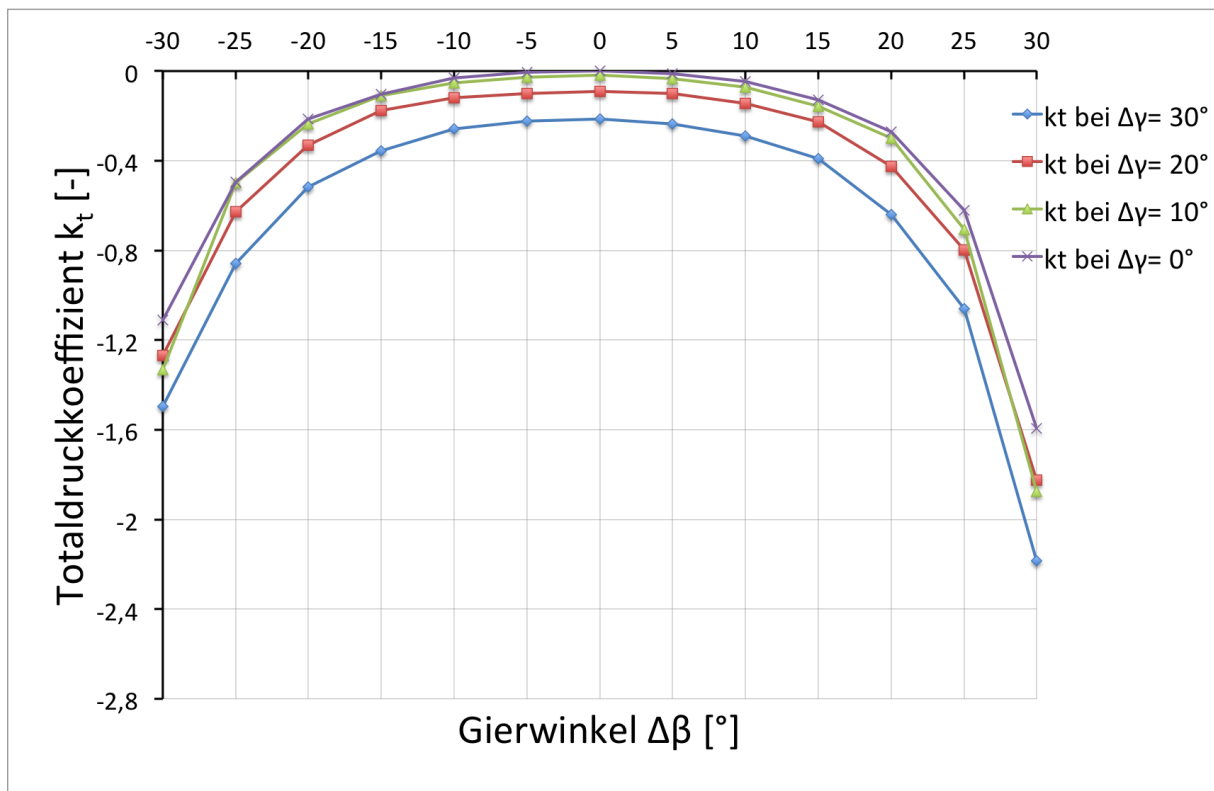


Abbildung 6.49: Totaldruckkoeffizient k_t für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

In Abb. 6.50 ist der statische Druckkoeffizient k_s über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei negativen Nickwinkeln $\Delta\gamma$ (-30° ; -20° ; -10°) im Vergleich zu k_s bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen. Im Vergleich zu den beiden anderen Sonden ist die Abweichung der Kurven äußerst gering. Der qualitative Verlauf stimmt gut überein, aber dennoch sind die Unterschiede maßgeblich.

In Abb. 6.51 ist der statische Druckkoeffizient k_s über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei positiven Nickwinkeln $\Delta\gamma$ ($+30^\circ$; $+20^\circ$; $+10^\circ$) im Vergleich zu k_s bei $\Delta\gamma = 0^\circ$ zu sehen. Auch hier stimmt der qualitative Verlauf der Kurven gut überein, wobei der Nickwinkel $\Delta\gamma = +10^\circ$ sehr geringen Einfluss nimmt.

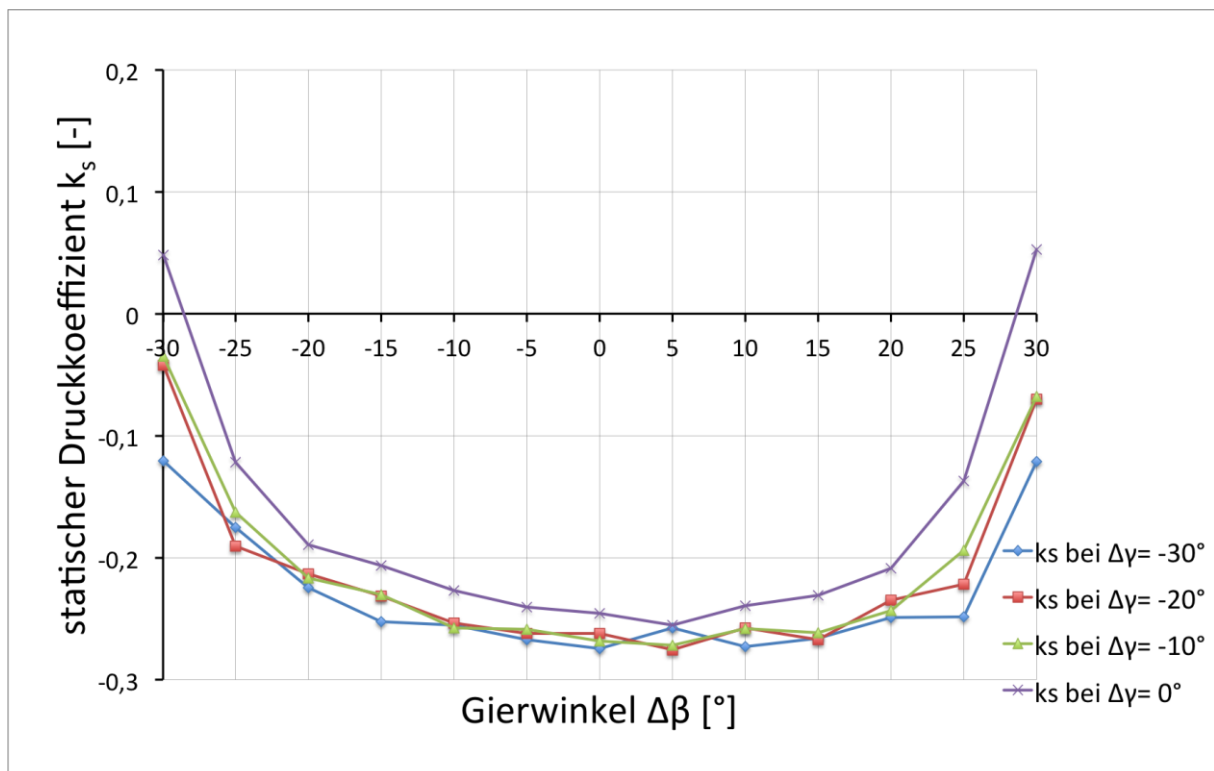


Abbildung 6.50: statischer Druckkoeffizient k_s für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bis 0° bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

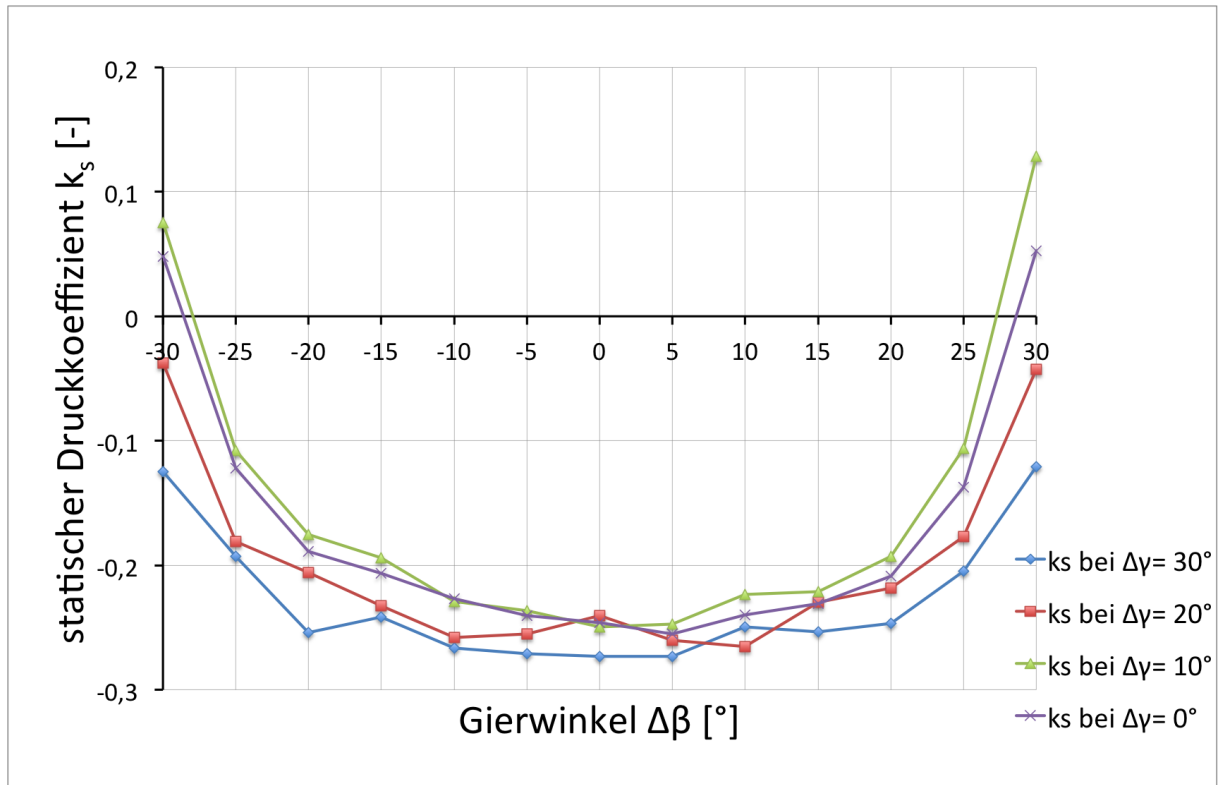


Abbildung 6.51: statische Druckkoeffizient k_s für den Nickwinkelbereich von $\Delta\gamma = 0^\circ$ bis $+30^\circ$ bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

Anhand der Kurvenverläufe für k_1, k_2 und k_3 sowie für k_β, k_t und k_s kann man nun einige Schlüsse ziehen. Die Zylindersonde zeigt sich von allen drei Sonden am unempfindlichsten gegenüber dem Nickwinkleinfluss. Die Koeffizienten k_1 und k_t haben bei $\Delta\gamma = \pm 10^\circ$ geringe Abweichungen. Bei k_2 und k_3 sind die Abweichungen im Nickwinkelbereich bis $\Delta\gamma = \pm 20^\circ$ gering und k_β scheint vom Nickwinkel gänzlich unbeeinflusst zu sein. Auch k_s hat geringe Abweichungen bei unterschiedlichen Nickwinkeln. Grund für dieses Verhalten ist möglicherweise die runde Geometrie der Sonde, sowie der symmetrische Schafteinfluss bei negativen und positiven Nickwinkeln.

6.3.2 Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit dem Stromlinienprojektionsverfahren

In diesem Abschnitt werden die Kurvenverläufe der Bohrungskoeffizienten k_1 , k_2 und k_3 sowie für die Kalibrierkoeffizienten k_β , k_t und k_s mit den Verläufen der Stromlinienprojektion (SLP) verglichen. Für die Zylindersonde errechnen sich andere Werte beim Stromlinienprojektionsverfahren als bei den trapezförmigen Sonden. Der Vergleich der Kurvenverläufe beschränkt sich hier auf einen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$.

In Abb. 6.52 ist der Bohrungskoeffizient k_1 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_1 beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt. Die Verläufe stimmen im Gierwinkelbereich $\Delta\beta = -10^\circ$ bis $+5^\circ$ gut miteinander überein. Die Zylindersonde hat sich als weniger empfindlich gegenüber Ablösungen gezeigt, demnach ist es bei kleinen Gierwinkeln durchaus realistisch, dass die beiden Verfahren übereinstimmen. Der Verlauf der Kurve des Stromlinienprojektionsverfahrens ist symmetrisch, da von einer perfekten Geometrie des Sondenkopfes ausgegangen wird, was bei realen Ausführungen nicht der Fall ist.

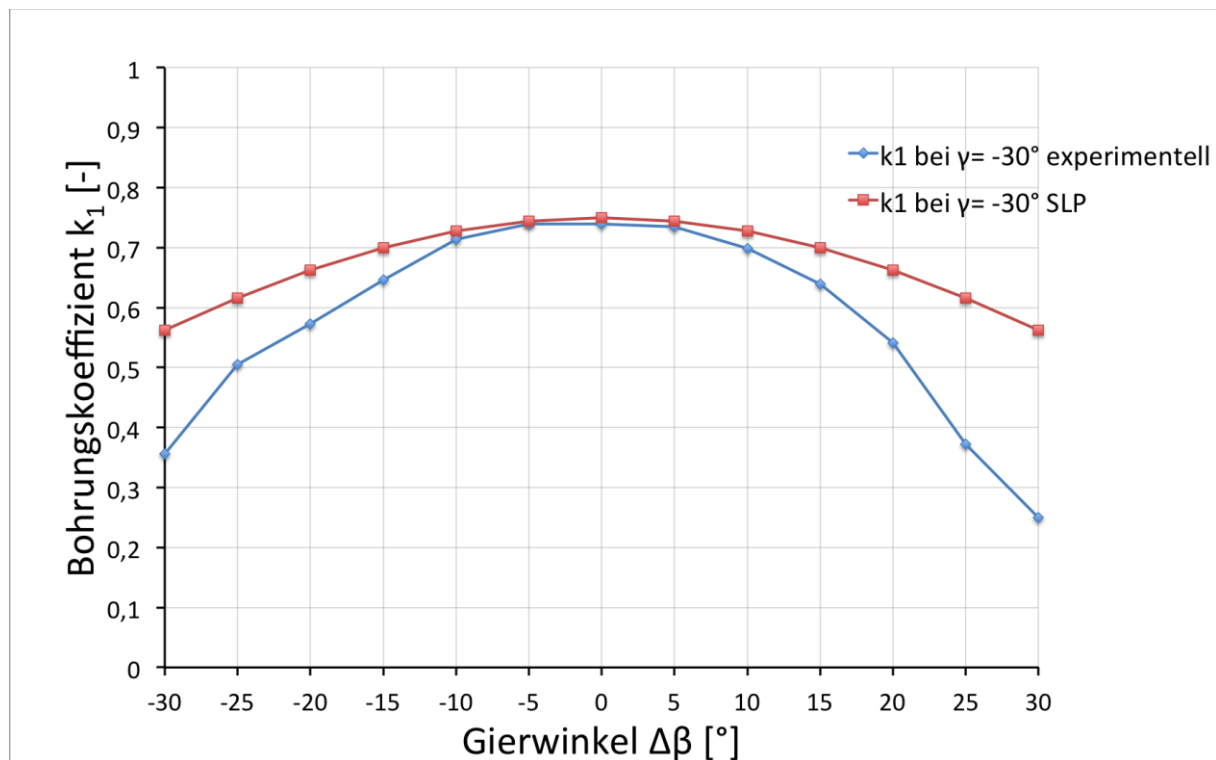


Abbildung 6.52: Bohrungskoeffizient k_1 für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

In Abb. 6.53 ist der Bohrungskoeffizient k_2 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_2 beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt. Die zwei Kurven zeigen eine starke Abweichung voneinander. Demnach macht das Stromlinienprojektionsverfahren keinen Sinn um Vergleiche oder Vorhersagen zu treffen. Man sieht wieder, dass die Abweichungen von strömungszugewandter Seite in Richtung abgewandter Seite größer werden.

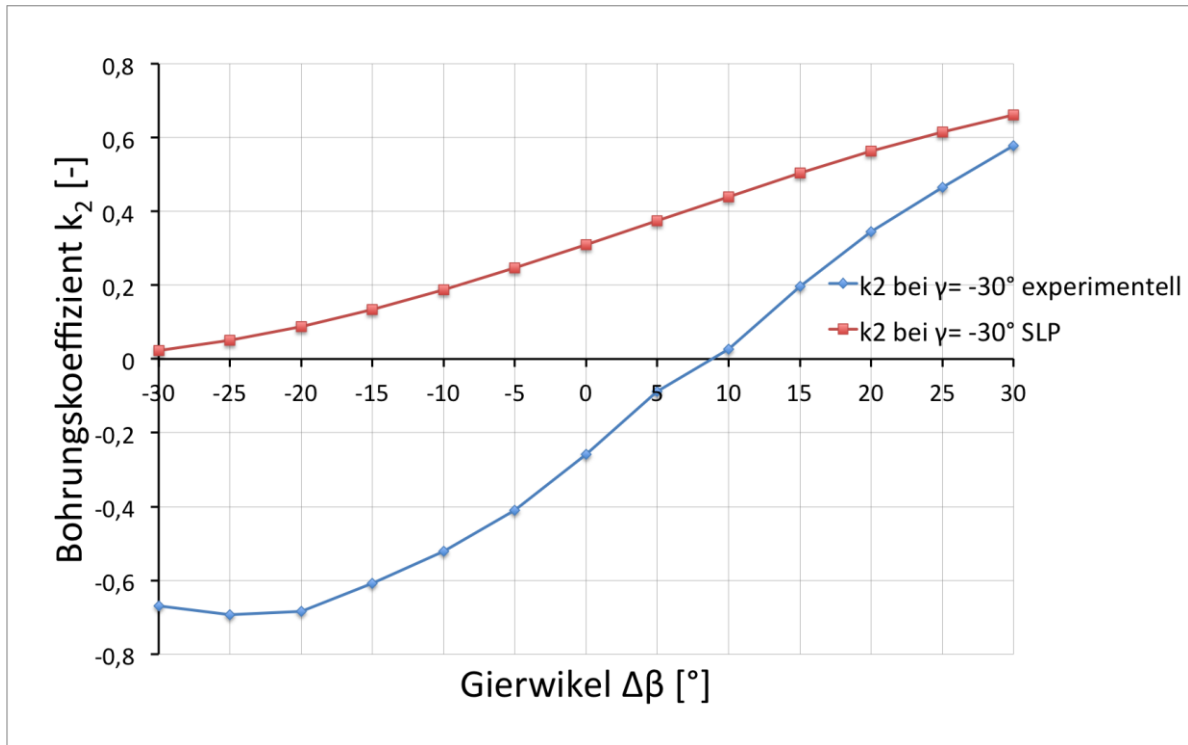


Abbildung 6.53: Bohrungskoeffizient k_2 für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

In Abb. 6.54 ist der Bohrungskoeffizient k_3 über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_3 beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt. Auch hier kann das Stromlinienprojektionsverfahren geometrisch bedingt keine negativen Bohrungskoeffizienten darstellen. Deshalb werden die Abweichungen von strömungszugewandter Seite in Richtung abgewandter Seite größer.

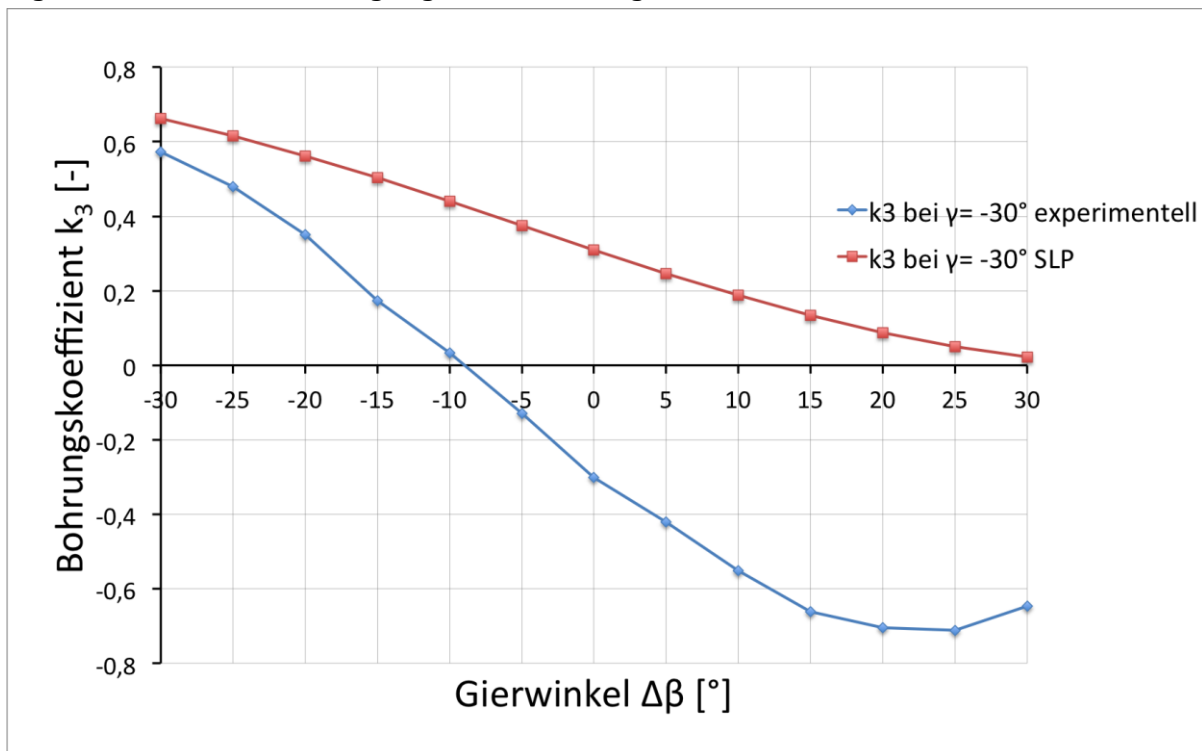


Abbildung 6.54: Bohrungskoeffizient k_3 für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

In Abb. 6.55 ist der Richtungskoeffizient k_β über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_β beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt. Die Kurven sind im Gierwinkelbereich von $\Delta\beta = -30^\circ$ bis $+20^\circ$ nahezu ident. Erst außerhalb dieses Bereichs machen sich Ablösungen bemerkbar, die aber nur durch den Gierwinkel $\Delta\beta$ hervorgerufen werden. Das erkennt man daran, dass der Nickwinkel bei k_β fast gar keinen Einfluss hat (Abb. 6.46 und Abb. 6.47) und sich auch bei der Stromlinienprojektion nicht auswirkt. Man erkennt wieder den symmetrischen Verlauf bei der Stromlinienprojektion, der bei der realen Strömungsbetrachtung nicht gegeben ist.

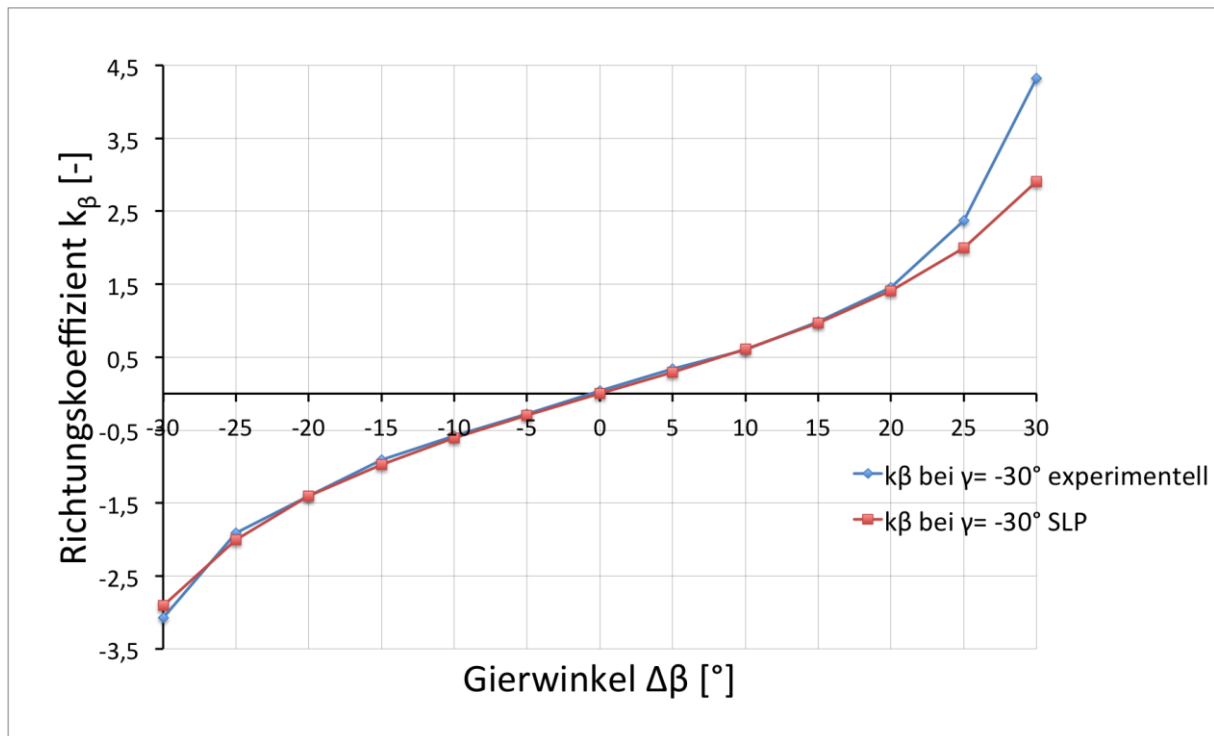


Abbildung 6.55: Richtungskoeffizient k_β für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

In Abb. 6.56 ist der Totaldruckkoeffizient k_t über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_t beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt. Qualitativ stimmen die beiden Verläufe der Kurven überein, jedoch sind deutliche Abweichungen zu sehen. Man erkennt wieder den symmetrischen Verlauf bei der Stromlinienprojektion, der bei der realen Strömungsbetrachtung nicht gegeben ist.

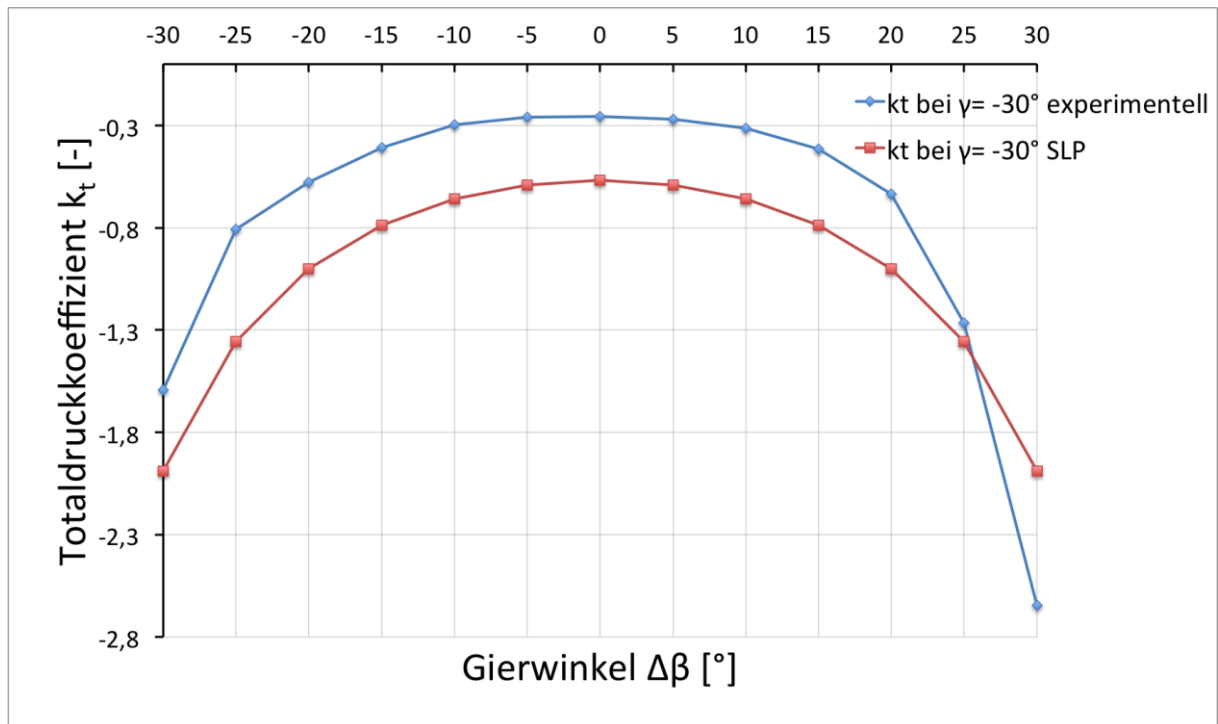


Abbildung 6.56: Totaldruckkoeffizient k_t für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

In Abb. 6.57 ist der statische Druckkoeffizient k_s über dem Gierwinkel $\Delta\beta$ bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ im Vergleich zu k_s beim Stromlinienprojektionsverfahren dargestellt. Die beiden Kurven haben sehr große Abweichungen, wodurch keine sinnvolle Aussage gefällt werden kann. Das Stromlinienprojektionsverfahren stößt hier ganz klar an seine Grenzen.

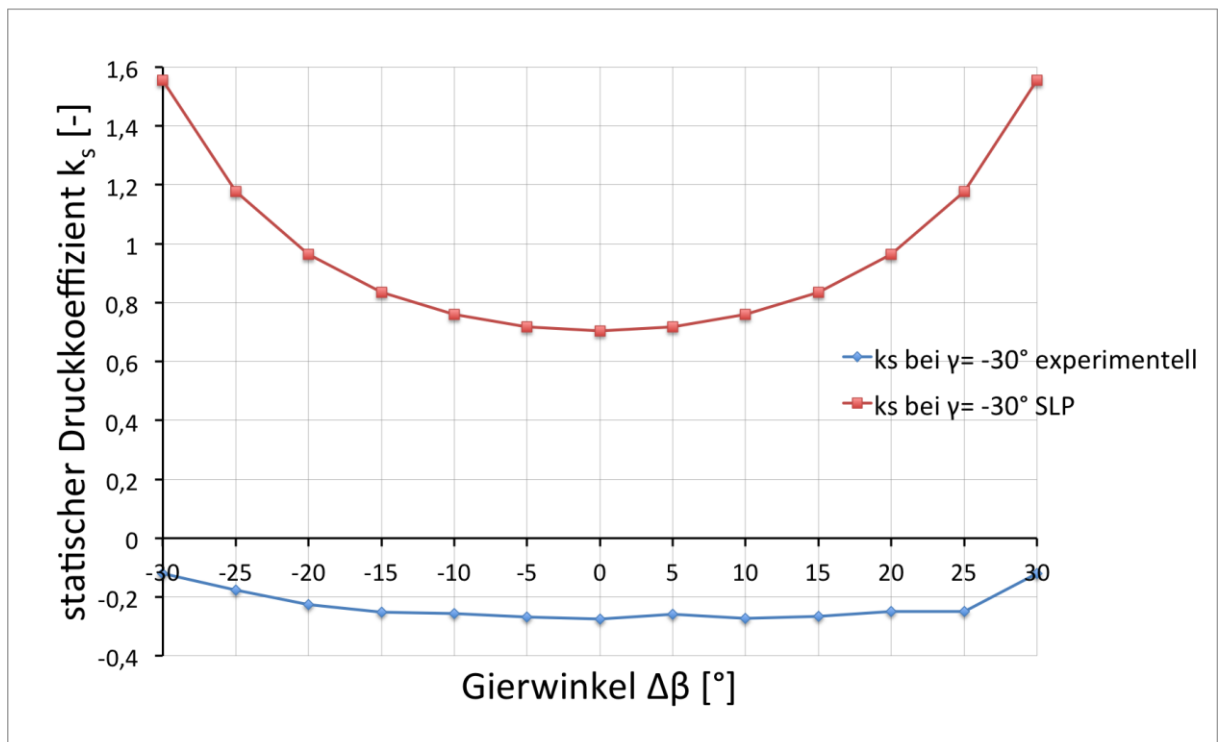


Abbildung 6.57: statischer Druckkoeffizient k_s für den Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ bei der AVA Zylindersonde Nr. 43

Abschließend kann man zum Vergleich zwischen experimenteller Betrachtung und dem Stromlinienprojektionsverfahren sagen, dass die qualitativen Verläufe teilweise gut übereinstimmen.

Das zeigt sich vor allem bei k_1 , k_t und k_β . Für die anderen Koeffizienten sind die Abweichungen sehr groß, sodass das Stromlinienprojektionsverfahren an seine Grenzen stößt.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden die drei am Institut vorhandenen Dreilochsonden im Freistrahwindkanal unter Einfluss des Nickwinkels $\Delta\gamma$ kalibriert. Anschließend wurden die Bohrungs- und Kalibrierkoeffizienten nach Treaster und Yocum berechnet und grafisch in Form von Bohrungs- und Kalibrierkurven dargestellt.

Diese experimentell ermittelten Kurven wurden noch zusätzlich bei einem festen Nickwinkel von $\Delta\gamma = -30^\circ$ mit dem analytischen und rein geometrischen Stromlinienprojektionsverfahren verglichen.

Es hat sich herausgestellt, dass die AVA Zylindersonde Nr. 43 das robusteste Verhalten bzgl. des Nickwinkels zeigt. Grund dafür ist die runde Geometrie, die zu weniger Ablösungen führt. Für das symmetrische Verhalten des Nickwinkelinflusses ist vor allem die Anordnung der Bohrungen auszumachen, die einen Abstand von 29mm zum unteren Ende des Schaftes haben. Dadurch greift der Sondenschaft bei allen Nickwinkelausschlägen gleichermaßen in die Strömung ein, wodurch sich die Zylindersonde in der Nickebene annähernd symmetrisch verhält.

Die SVUSS/3 Kobrasonde und die AVA Trapezsonde Nr. 110 haben beide einen trapezförmigen Kopf mit dem selben Flankenwinkel. Dadurch ergibt sich auch ein ähnliches Verhalten bei Nickwinkelinflüssen. Die Kobrasonde hat sich gegenüber der Trapezsonde als etwas unempfindlicher erwiesen.

Generell hat sich gezeigt, dass ein negativer Nickwinkel weniger Auswirkungen hat als ein positiver Nickwinkel. Das liegt daran, dass der Schaft bei positivem Nickwinkel in die Strömung eingreift. Die Strömung staut sich am Schaft mit dem Totaldruck p_t auf und die Stromlinien weichen von den Staupunkten in die Richtung aus, in die der Schaft nicht mehr eingreift. Die Strömung wird also von den Bohrungen weggedrückt. Bei geringen Nickwinkeln von $\Delta\gamma = \pm 10^\circ$ sind die Einflüsse allgemein als gering zu sehen. Da sich die Ablösungserscheinungen von Gier- und Nickwinkeln summieren, gilt, dass im Gierwinkelbereich von $\Delta\beta = \pm 20^\circ$ die Einflüsse ebenfalls geringer ausfallen.

Die unsymmetrischen Kurvenverläufe in der Gierebene bei $\pm\Delta\beta$ ergeben sich dadurch, dass die Kopfgeometrie nicht perfekt symmetrisch ist und sich kleine Kerben und Abrundungen an den Bohrungen auf die gemessenen Drücke auswirken.

Der Richtungskoeffizient k_β hat sich von allen Koeffizienten als unempfindlichsten erwiesen. Für die Bestimmung der Strömungsrichtung $\Delta\beta$ sind die Dreilochsonden demnach auch bei räumlicher Strömung geeignet. Der Totaldruckkoeffizient k_t ist bei mittleren Nick- und Gierwinkeln ebenfalls zur Bestimmung des Totaldrucks p_t geeignet. Anders verhält es sich mit

dem statischen Druckkoeffizient k_s . Hier ist es nicht möglich unter Nickwinkeleinfluss verlässliche Ergebnisse zu bekommen, da die Schwankungen zu groß sind.

Das Stromlinienprojektionsverfahren besagt, dass der Nickwinkel bei k_β und k_s keinen Einfluss hat. Schaut man sich die experimentellen Ergebnisse an, so sieht man, dass der Richtungskoeffizient k_β gegenüber dem Nickwinkel tatsächlich unempfindlich ist. Allerdings ergeben die experimentellen Ergebnisse eine sehr hohe Empfindlichkeit beim statischen Druckkoeffizient k_s bzgl. des Nickwinkeleinflusses.

Das Stromlinienprojektionsverfahren liefert teilweise gute qualitative Verläufe im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen. Es stellt sich aber eindeutig heraus, dass es nur als Vergleichsverfahren tauglich ist, da die Abweichungen allgemein zu hoch sind. In einigen Fällen kommen sogar völlig unterschiedliche Ergebnisse heraus.

Potential zur weiteren Forschung in diesem Bereich bietet sich bei der Untersuchung des Nickwinkeleinflusses bei Dreilochsonden für unterschiedliche Reynoldszahlen. Es bietet sich auch an, den Nickwinkeleinfluss mittels CFD-Berechnung zu analysieren und auszuwerten.

Eine weitere Möglichkeit liegt auch in der Betrachtung der systematischen Fehler und deren Auswirkung auf $\Delta\beta$, p_t und p , wenn man mit Dreilochsonden Strömungen untersucht, bei denen eine Abweichung des Nickwinkels $\Delta\gamma \neq 0^\circ$ gegeben ist. Weiters bietet es sich an, die Anwendung der Kalibrierkurven bei Nickwinkeln $\Delta\gamma \neq 0^\circ$ und die daraus ermittelten Werte für $\Delta\beta$, p_t und p zu untersuchen.

Es stellt sich auch die Frage, ob bei der Messung Hystereseeffekte bzgl. des Schafteinflusses auftreten. Das ist so zu verstehen, dass es möglich ist, dass sich unterschiedliche Werte für die Kalibrierkoeffizienten ergeben, wenn der Nickwinkel vom negativen in den positiven Bereich verändert wird, oder es umgekehrt der Fall ist.

Eine Erweiterungsmöglichkeit im Labor wäre eine elektrische Verstelleinrichtung für die Sondenhalterung, um die Sonden während der Kalibrierung automatisch verdrehen zu können.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Dominy, R.G., Hodson, H.P.: An Investigation of Factors Influencing the Calibration of Five-Hole Probes for Three-Dimensional Flow Measurements. *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 115 (July 1993).
- [2] Hilgert, M.: *Kalibrierung von pneumatischen Strömungsvektorsonden im Freistrahwindkanal*. (Diplomarbeit: Wien, 2015).
- [3] Lerena Diaz, D.: *Experimental Calibration of Three-Hole Pressure Probes with Different Head Geometries*. (Diplomarbeit: Wien, September 2003).
- [4] Smajic, D.: *Untersuchung zur Erweiterung des Betriebsbereiches von pneumatischen Dreilochsonden*. (Diplomarbeit: Wien, Juli 2011).
- [5] Treaster, A.L. Yocum, A.M.: (1979). The Calibration and Application of Five-Hole Probes. *ISA Transactions Vol. 18, No. 3*.
- [6] Willinger, R.: A three-hole pressure probe exposed to wall proximity effects: experimental, numerical and analytical investigation. *Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'06), Budapest, Hungary, September 6 - 9, 2006*.
- [7] Gieß P. A., Rehder H.J., Kost F.: *A New Test Facility for Probe Calibration - Offering Independent Variation of Mach and Reynolds Number. Proceedings of the 15th Bi-Annual Symposium on Measuring Techniques in Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines*. Firenze, September, 2000
- [8] Lee S. W., Jun S.B.: *Reynolds Number Effects on the Non-Nulling Calibration of a Cone-Type Five-Hole Probe for Turbomachinery Applications, Journal of Mechanical Science and Technology (KSME Int. J.)*, Vol. 19, No. 8, pp. 1632-1648, 2005