



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Hamburg University of Applied Sciences

Labor Strömungslehre 1

Laborskript

Jens Brodersen

Elena Nitze

Franz Vinnemeier

Zentrum für Energietechnik



Windkraft



Solarenergie



Fossile Energie



Wasserkraft



Geothermie

Copyright © 2015

Dieses Skript ist nur für den Vorlesungsgebrauch bestimmt. Die Weitergabe des Skriptes unter den Hörern der Vorlesung ist gestattet. Das Kopieren für oder durch andere Personen ist nicht erlaubt. Das Einstellen des Skriptes ins Internet ist verboten.

Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion
Prof. Dr.-Ing. Franz Vinnemeier
Berliner Tor 21
20099 Hamburg
Raum 240, Haus D
Tel.: 040 / 428 75 - 8633
Fax: 040 / 428 75 - 8779
E-Mail: Franz.Vinnemeier@haw-hamburg.de
WWW: <http://www.mp.haw-hamburg.de/pers/Vinnemeier>

privat:
Tel.: 040 / 600 43 71
E-Mail: franz@vinnemeier.de

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Organisatorisches	2
2.1 Laboreinführung	2
2.2 Versuchsvorbereitung	3
2.3 Versuchsdurchführung	4
2.4 Versuchsnachbereitung	4
2.5 Kriterien für das Bestehen des Labors	6
2.6 Allgemeine Sicherheitshinweise für den Laborbetrieb	6
3 Prüfstandsbeschreibungen	8
3.1 Gebläseprüfstand	8
3.1.1 Meßstellen und Meßtechnik	9
3.1.2 Mögliche Versuche	13
3.2 Kolbenverdichterprüfstand	15
3.2.1 Arbeitsweise des Kolbenverdichters	18
3.2.2 Meßstellen und Meßtechnik	20
3.2.3 Mögliche Versuche	21
4 Versuchsdurchführung und -auswertung	22
4.1 Geschwindigkeitsverteilung in einer Rohrströmung	22
4.1.1 Ablauf des Versuches	22
4.1.2 Auswertung des Versuches	24
4.1.3 Versuchsbericht	27
4.2 Ermitteln von p, V -Diagrammen am Kolbenverdichter	28
4.2.1 Ablauf des Versuches	28
4.2.2 Auswertung des Versuches	29
4.2.3 Versuchsbericht	30
Literatur	31

A Ermitteln des Barometerstandes	33
A.1 Ablesen des Barometers	33
A.2 Korrektur des Barometerstandes	33
A.3 Stoffwerte von Quecksilber (Hg)	35
A.4 Aufbau der Meßdatendatei	36
B Auswerteprogramme	38
B.1 Auswerten der Geschwindigkeitsverteilung	38
B.1.1 Erstellen der Meßwertdatei	38
B.1.2 Programmaufruf	38
B.1.3 Variablenbezeichnungen und Symbole	43
B.2 Auswertung der p, V -Diagramme am Kolbenverdichter	45
B.2.1 Erstellen der Meßwertdatei	45
B.2.2 Programmaufruf	45
B.2.3 Variablenbezeichnungen und Symbole	48
C Vorgehensweise bei der Versuchsauswertung	49
C.1 Eintippen der Meßwertdatei	49
C.2 Benutzen des Auswerteprogrammes	49
D Massenstrom- und Volumenstrommessung	52
D.1 Durchflußmessung mit Drosselgeräten	52
D.1.1 Blende	55
D.1.2 ISA 1932-Düsen	57
D.1.3 Langradius-Düsen	58
D.1.4 Klassische Venturirohre	59
D.1.5 Venturidüsen	60
D.1.6 Ablauf der Durchflußberechnung	61
D.1.7 Zusammenstellung der Gleichungen und ihre Optimierung	62
E Kommandozeile in Linux: bash	65
E.1 Datei-Befehle	65
E.2 Verzeichnis-Befehle	68
E.3 Aufruf von Programmen	69
F Installation und Konfiguration von FireFTP	70

Abbildungsverzeichnis

2.1	Prüfstände in der Halle des ZET für das Labor für Strömungstechnik	3
2.2	Prüfstände im Keller des ZET für das Labor für Strömungstechnik	3
3.1	Blick auf den Gebläseprüfstand	8
3.2	Vorder- und Rückseite des Gebläses	9
3.3	Schematischer Aufbau des Gebläseprüfstandes	10
3.4	Zeichnung des PIV-Getriebes	11
3.5	Kegelräder und Gliederkette des PIV-Getriebes	11
3.6	Zeichnung einer Prandtl-Sonde	12
3.7	Schrägrohrmanometer	13
3.8	Betz-Manometer	14
3.9	Meßtechnikschränke	14
3.10	Ansicht 1 des Kolbenkompressor-Prüfstandes	15
3.11	Ansicht 2 des Kolbenkompressor-Prüfstandes	15
3.12	Längsschnitt durch den Kolbenverdichter Hatlapa L23e	16
3.13	Querschnitt durch den Kolbenverdichter Hatlapa L23e	17
3.14	Qualitative Darstellung des Verdichtungsprozesses im p, V -Diagramm	19
3.15	Schematische Darstellung des Verdichtungsprozesses	19
3.16	Meßstellen am Kolbenverdichter	20
3.17	Speicheroszilloskop Yokogawa DL 7100	21
4.1	Die Prandtl-Sonde in eingebautem Zustand mit dem „Lineal“	23
4.2	Schwankung der Anzeige des dynamischen Druckes	23
A.1	Ansicht des Quecksilberpräzisionsbarometers nach Lambrecht	34
A.2	Schematischen Darstellung zum Ablesen des Barometerstandes	34
B.1	Meßblatt 1 des Versuches gvert13102	39
B.2	Meßblatt 2 des Versuches gvert13102	40
B.3	Meßblatt 3 des Versuches gvert13102	41

B.4	Anfang der Meßwertdatei des Versuches gvert13102	42
B.5	Meßblatt für Versuch kvd-pv13213	46
B.6	Meßwertdatei kvd-pv13213.d für Versuch kvd-pv13213	47
C.1	Ausgabe des Befehls ls	50
D.1	Schematische Darstellung einer Blende als Drosselstelle	53
D.2	Schematischer Aufbau einer Blendenmeßstrecke	55
D.3	Schematischer Aufbau einer Meßstrecke mit ISA 1932- oder Langradius-Düse	57
D.4	Schematischer Aufbau einer Meßstrecke mit klassischem Venturirohr	59
D.5	Schematischer Aufbau einer Meßstrecke mit Venturidüse	60
F.1	Starten des Plugins FireFTP	71
F.2	Übliches Benutzerfenster von FireFTP	71
F.3	fireFTP	72
F.4	Erfolgreiche Verbindung zum Laborserver	72
F.5	Arbeiten mit FireFTP	73

Tabellenverzeichnis

2.1	Zum Bestehen des Labors erforderliche Tätigkeiten und Punkte	6
3.1	Meßstellenliste für den Gebläseprüfstand	12
3.2	Meßstellenliste für den Kolbenverdichterprüfstand	20
4.1	Sondenpositionen vor y_v und hinter y_h dem Gebläse	27
A.1	Korrekturwerte K_K für Hg-Barometer mit einem Rohrdurchmesser von 8 mm zur Korrektur der Kapillareffekte	35
A.2	Dichte von Quecksilber als Funktion der Temperatur	36
D.1	Anwendungsbereich für Normblenden	56
D.2	Anwendungsbereich für ISA 1932-Düsen	58
D.3	Anwendungsbereich für Langradius-Düsen	58
D.4	Anwendungsbereich und Durchflußkoeffizienten für klassische Venturirohre	59
D.5	Anwendungsbereich für Venturidüsen	60

1 Einleitung

In diesem Skript werden alle Versuche für das Labor „Strömungslehre 1“ dargestellt und beschrieben. Die Prüfstandsbeschreibungen sind sehr ausführlich, weil sie die Prüfstände für alle möglichen Versuche erläutern. Daher erscheinen die Prüfstandsbeschreibungen in verschiedenen Laborskripten und im Internet.

Das erste Kapitel befaßt sich mit organisatorischen Fragen, so daß jede/r Studierende genau weiß, was auf sie oder ihn zukommt.

Für Verbesserungsvorschläge bin ich sehr dankbar.

2 Organisatorisches

Das Labor zu Strömungslehre 1 wird von allen Studierenden des Studiengangs Maschinenbau und des Studienganges Produktionstechnik und -management durchlaufen. Daher besuchen sehr viele Studierende das Labor im Zentrum für Energietechnik (ZET). Eine eindeutige, nachvollziehbare Organisation des Laborbetriebes ist deshalb von ausschlaggebender Bedeutung. Den Studierenden soll ermöglicht werden, das Labor in der dafür notwendigen Zeit erfolgreich zu absolvieren. Alle Studierenden haben mit den Angaben in diesem Kapitel die Möglichkeit:

1. sich auf die Versuche vorzubereiten,
2. die Versuche weitgehend selbstständig durchzuführen,
3. die Versuchsberichte zu erstellen und die Anerkennung der Versuchsberichte zu verfolgen.

Alle Studierenden führen folgende Versuche im Labor Strömungslehre 1 durch:

- Geschwindigkeitsverteilung in einer Rohrströmung
Gebläseprüfstand (Halle des ZET)
- Indizieren eines Kolbenverdichters
Kolbenverdichter-Prüfstand (Halle des ZET)

Die Prüfstände sind in den Bildern 2.1 und 2.2 bezeichnet.

Das Modul Thermodynamik 1 keine Möglichkeit einer Laborveranstaltung bietet, sind einige Versuche mit thermodynamischem Inhalt im Labor Strömungslehre 1 enthalten.

In der Laboreinführung werden die organisatorischen Details abgesprochen.

2.1 Laboreinführung

In der Laboreinführung wird die Teilnehmerliste vervollständigt. Die Semestergruppen 3a, 3b, 3c mit den Untergruppen A – D werden in Gruppen zu je vier Studierenden weiter aufgeteilt und fortlaufend durchnummieriert.

Die Gruppeneinteilung bleibt für alle Laborversuche bestehen. Es liegt in der Verantwortung der Studierenden sicherzustellen, daß sie an allen Versuchen teilnehmen können.

Weitere Punkte in der Laboreinführung sind:

- Vorstellen der Versuche
- Versuchsdurchführung

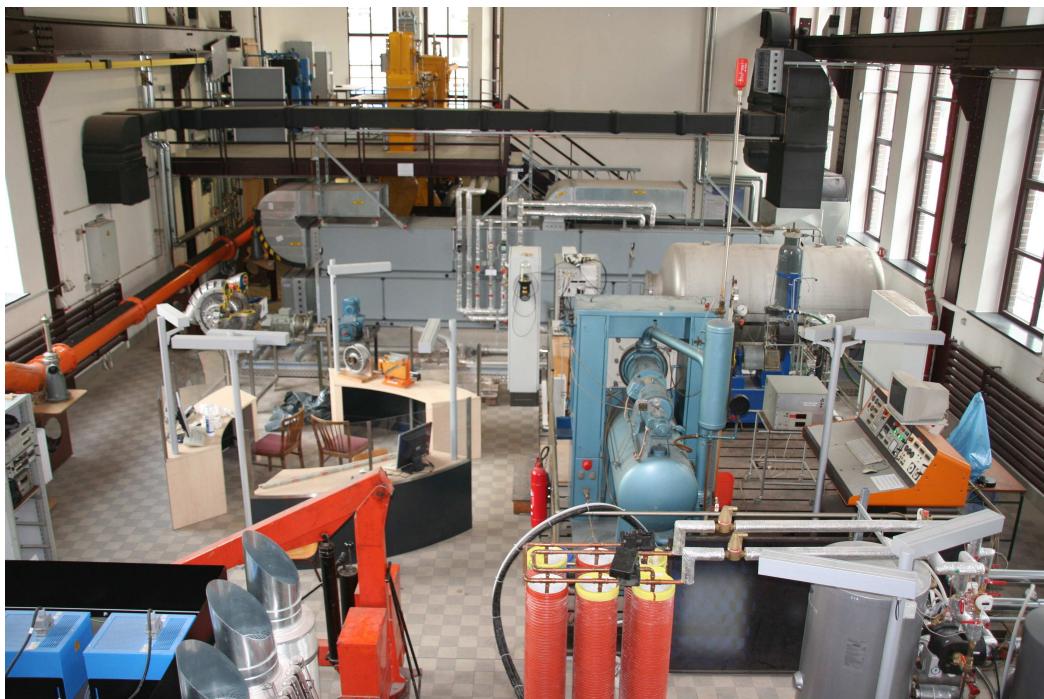


Abbildung 2.1: Prüfstände in der Halle des ZET für das Labor für Strömungstechnik

Bild APU-Prüfstand

Abbildung 2.2: Prüfstände im Keller des ZET für das Labor für Strömungstechnik

- Ablauf von
 - Versuchsvorbereitung
 - Versuchsauswertung
 - Erstellen von Versuchsberichten
 - Abgabe und ggf. Korrektur von Versuchsberichten
- Kriterien für das Bestehen des Labors

Auf diese Punkte wird im Folgenden näher eingegangen.

Dieses Laborskript muß bis zum zweiten Laboreinführungstermin heruntergeladen sein!

2.2 Versuchsvorbereitung

Jedes Gruppenmitglied bereitet sich auf den anstehenden Versuch vor. Dazu werden die entsprechenden Kapitel durchgearbeitet:

- Prüfstandsbeschreibung aus dem Kapitel 3
- Versuchsprogramm aus dem Kapitel 4
- Meßtechnik aus beiden vorgenannten Kapiteln, bei größerem Interesse siehe auch [3]

Die Studierenden tragen daraus in einem max. 5 minütigen Vortrag ihren Kollegen am Prüfstand vor. Die Vortragenden werden von den Labormitarbeitern zu Versuchsbeginn willkürlich ausgewählt. Siehe dazu auch Absatz 2.5.

Zwei Teilnehmerinnen oder zwei Teilnehmer erklären sich bereit, die Ausarbeitung des Laborberichtes zu verantworten. Jede/r kommt hier einmal zum Zuge.

Das Mitbringen dieses Skriptes zum Versuch ist unnötig!

Das Versuchsprogramm ist für einen 90 minütigen Termin ausgelegt. Es bleibt daher nicht viel Zeit für Erklärungen, die auch in diesem Skript stehen.

2.3 Versuchsdurchführung

Am Prüfstand liegen die Tabellen für das Aufschreiben der Meßwerte (Meßblätter) bereit. Die/der für den Laborbericht Verantwortliche füllt den Kopf der Meßblätter aus. Die Labormitarbeiter/innen geben dazu die Versuchsnummer aus. Beim Ausfüllen der Meßblätter ist auf eine saubere Schrift zu achten, da die Meßwerte von anderen Personen gelesen werden können müssen!

Der Prüfstand wird ggf. zu Beginn der Laborveranstaltung oder schon vorher hochgefahren. Die Studierenden werden in die notwendige Bedienung eingewiesen. Dann wird durch eine Teilnehmerin oder einen Teilnehmer der erste Versuchspunkt eingestellt. Der Versuchspunkt ist dann eingestellt, wenn sich Temperaturen oder Drücke etc. nicht mehr wesentlich ändern.

Dann beginnt das Versuchsprogramm, das aus dem Einstellen der Versuchspunkte und der Meßwertaufnahme besteht. Beim Ablesen der Meßwerte ist darauf zu achten, daß ggf. Mittelwerte gebildet werden. Die Genauigkeit der Meßwertablesung hat einen deutlichen Einfluß auf die Qualität der bei der Auswertung entstehenden Kurven in den Diagrammen!

Nach Ablauf des Versuches wird annähernd der erste Betriebspunkt wieder eingestellt. Der Prüfstand wird nur durch die Labormitarbeiter/innen abgestellt.

Die Meßblätter werden am Schluß des Versuches vollständig ausgefüllt den Labormitarbeiter/innen zum Einscannen übergeben.

2.4 Versuchsnachbereitung

Der erste Schritt der Nachbereitung liegt bei den Labormitarbeiter/innen. Sie scannen die Meßblätter ein und stellen sie den Teilehmer/innen als Bilddatei (ein Blatt pro Bild als png oder jpg Datei und alle zusammen als pdf-Datei) zur Verfügung. Das Einscannen erfolgt bis spätestens Ende des nachfolgenden Arbeitstages.

Die Teilehmer/innen übertragen nach dem Versuch die Meßdaten in eine Datei deren Namen immer dem selben Schema folgt:

<versuchsnummer.d>

Die Zeichen < und > zeigen an, daß es sich hier um einen allgemeinen Platzhalter handelt. Die Versuchsnummer ist diejenige, die auf den Meßblättern aufgeführt ist.

Mit Hilfe des Auswerteprogramms werden alle Versuchspunkte ausgewertet. Das Auswerteprogramm erzeugt eine Ausgabedatei und verschiedene Diagramme.

Ein Versuchspunkt wird „per Hand“ vorgerechnet.

Die Erstellung des Versuchsberichtes ist der vorletzte Schritt. Im letzten Absatz einer Versuchsbeschreibung in diesem Skript (Kapitel 4) sind die Anforderungen an den jeweiligen Versuchsbericht aufgeführt. In der Regel sind das folgende Punkte:

1. Ein paar Sätze zur Beschreibung des Prüfstandes im Hinblick auf den durchgeführten Versuch.
2. Erläuterung des Versuchsprogrammes und des -ablaufes. Hier werden auch die eingestellten Versuchspunkte angegeben.
3. Für jeden Versuch gibt es ein Auswerteprogramm, für das die Meßwerte von den Meßblättern in eine Datei übertragen. Wie die Datei aussehen muß, ist im Anhang dieses Skriptes (Kapitel B) beschrieben. Das zugehörige Auswerteprogramm wird ebenfalls dort aufgeführt. Die Benutzung dieser Auswerteprogramme ist Pflicht. Damit wird sichergestellt, daß die Ergebnisse richtig berechnet wurden.

Die Auswerteprogramme liefern Tabellen mit der Versuchswertung (pdf-Datei) und Diagramme (Bilddateien png- und epsf-Dateien). Die png-Dateien sind für Word oder LibreOffice gedacht, während die epsf-Dateien für L^AT_EX geeignet sind.

Die Diagramme enthalten nur die Meßpunkte, aber keine Kurven. Die Kurven werden von den Studierenden selbst eingetragen, da sie eine Interpretation der Meßwerte beinhalten, die das Auswerteprogramm nicht vornehmen sollte.

4. Die Auswertung eines Meßpunktes wird „von Hand“ durchgeführt. Die „von Hand“ ermittelten Ergebnisse werden mit den Ergebnissen des Auswerteprogramms verglichen. **Die Übereinstimmung der Ergebnisse ist am Ende der Berechnung „von Hand“ anzugeben!**
5. Der Versuchsbericht ist im Allgemeinen — wie folgt — aufgebaut:

- 5.1. Deckblatt mit dem Titel des Versuches, den Namen aller Teilnehmer/innen einschließlich Matrikel-Nummer und der Versuchsnummer
Der Verantwortliche oder die Verantwortlichen für den Versuchsbericht werden besonders gekennzeichnet.
- 5.2. Beschreibung des Prüfstandes
- 5.3. Erläuterung des Versuchsprogrammes und des -ablaufes
- 5.4. Berechnung „von Hand“
- 5.5. Tabelle mit den Ergebnissen des Auswerteprogrammes
- 5.6. Diagramme
- 5.7. Meßblätter
- 5.8. Teilnehmerliste

Zu jeder Tabelle oder zu jedem Bild gehört eine Tabellen- bzw. Bildunterschrift, die im Text mit den entsprechenden Nummern erwähnt werden. Diese Sätze schreibt man hinter die Berechnung „von Hand“ mit einer entsprechenden Überschrift.

6. Der Versuchsbericht wird mit einem Textverarbeitungsprogramm erstellt. Nach Anerkennung des Versuchsberichtes wird eine pdf-Datei erzeugt, die noch mit ftp durch den Verantwortlichen in das Versuchsverzeichnis abgelegt wird, damit die Berichte den anderen Teilnehmer/innen zur Verfügung stehen.

Eingescannte oder teilweise eingescannte Berichte werden nicht akzeptiert!

Der Versuchsbereich hat den Namen:

<versuchsnummer>-bericht.pdf

Die Namenkonvention muß eingehalten werden, da sonst der Bericht nicht gefunden wird.

7. Der Versuchsbericht wird fristgerecht abgegeben (siehe oben). Die Labormitarbeiter/innen sehen die Berichte durch und vermerken ggf. für die Anerkennung des Versuchsberichtes notwendige Korrekturen. Ein Versuchsbericht kann nur einmal korrigiert werden.
8. Die Versuchsberichte werden von den Studierenden wieder abgeholt.
9. Am Ende des jeweiligen Semesters (28.02. bzw. 31.08.) sind alle Aufgaben erledigt. Alle Aktivitäten nach dem Semester werden nicht mehr berücksichtigt bzw. anerkannt.

2.5 Kriterien für das Bestehen des Labors

Für das Bestehen des Labors gelten die in der Prüfungs- und Studienordnung angegebenen allgemeinen Kriterien.

Für die Laborveranstaltungen und Versuchsberichte werden Punkte vergeben. In Tabelle 2.1 sind beispielhaft die erforderlichen Tätigkeiten und Punkte dargestellt.

Ifd.-Nr.	Bezeichnung	Soll-punkte
1	Teilnahme Einführungsveranstaltung, Termin 1	10
2	Teilnahme Einführungsveranstaltung, Termin 2	10
3	Teilnahme Versuch 1	20
4	Teilnahme Versuch 2	20
7	Verantwortlich für Versuchsbericht	0
8	Versuchsbericht	0
9	Abgabe Versuchsbericht als pdf	40
	Summe	100

Tabelle 2.1: Zum Bestehen des Labors erforderliche Tätigkeiten und Punkte

Für das Bestehen des Labors sind 80% erforderlich.

2.6 Allgemeine Sicherheitshinweise für den Laborbetrieb

1. Das **Rauchen** ist in der gesamten Halle nicht erlaubt, da mit brennbaren Gasen und leicht entzündbaren Flüssigkeiten umgegangen wird. Rauchen ist erlaubt vor dem Treppenhauseingang. Bitte benutzen Sie den vorhandenen Aschenbecher.
2. Bei **Feueralarm**, sowie bei Ausbruch von Feuer ohne Alarm oder bei starker Rauchentwicklung folgen Sie bitte den Anweisungen des Laborpersonals. Die Halle ist durch die gekennzeichneten Fluchtwege zu verlassen (weißes Rechteck auf grünem Grund). Sammelpunkt ist vor der U-Bahn-Station „Lohmühlenstraße“.
3. **Feuerlöscher** sind in der Halle verteilt. Ihr Standort ist dem Flucht- und Rettungsplan zu entnehmen. Dieser befindet sich neben dem Ausgang an der Wand.

4. Das **Verzehren von Speisen und Getränken** ist nur in den vorgesehenen Sozialräumen gestattet, damit es nicht versehentlich zu Vertauschungen mit gesundheitsschädigenden Substanzen kommt.
5. Keine **unbekannten Substanzen** anfassen, essen, trinken oder daran riechen. Es besteht Verätzungs- bzw. Vergiftungsgefahr. Gesundheitsgefährdende Stoffe sind entsprechend gekennzeichnet. Den aushängenden **Betriebsanweisungen** können alle erforderlichen Informationen entnommen werden.
6. Tragen Sie **feste und geschlossene Schuhe** während der Veranstaltungen.
7. Um Verletzungen bei Kontakt mit **heissen Teilen** zu vermeiden tragen Sie bitte langärmlige Oberbekleidung und lange Hosen.
8. Da es zu Beschädigungen und/oder **Verschmutzungen** Ihrer Bekleidung kommen kann, tragen Sie bitte „alte“ Sachen oder Arbeitsbekleidung.
9. **Arbeiten in der Werkstatt und Fahren von Versuchen** an Prüfständen dürfen niemals alleine durchgeführt werden. Es muß sich immer eine weitere Person in unmittelbarer Nähe aufhalten, so daß die Unfallgefahr verringert wird.
10. Bei Versuchen mit **großer Lärmentwicklung** (z.B. Gasturbine oder Motor) ist während des Maschinenbetriebs Gehörschutz zu tragen. Hierauf wird durch den verantwortlichen Labormitarbeiter hingewiesen. Es sind sogenannte „Micky Mäuse“, das sind Kopfhörer, oder Ohrstöpsel vorhanden. Die „Micky Mäuse“ sind nach der Veranstaltung zurückzugeben, die Ohrstöpsel werden über die vorhandene Müllgefäß entsorgt.
11. **Während der Versuche bitte am Prüfstand verbleiben.** Keine Prüfstände oder Maschinen aufsuchen oder betätigen, die nicht zum Versuch gehören.
12. Die **WC-Anlagen** befinden sich im Keller und im 2. OG. Möchten Sie diese während eines Versuches aufsuchen, informieren Sie bitte vorher den verantwortlichen Labormitarbeiter.
13. Keine **spannungsführenden Teile** berühren.
14. Vorsicht bei **rotierenden Teilen!** Lange Haare und lockere Kleidung können mitgerissen werden.
15. Achten Sie auf **herumliegende Kabel und Schläuche**, sowie auf Flüssigkeiten (Öl!) auf dem Boden. Stolper und Rutschgefahr!
16. Das **Notruftelefon** befindet sich im Laborbüro. Notruf: 112 oder 110
17. **Erste Hilfe:** Ersthelfer sind

Frau Nitze, Tel.: 040 / 428 75 - 8630, Mail: elena.nitze@haw-hamburg.de
Herr Brodersen, Tel.: 040 / 428 75 - 8634, Mail: Jens.Brodersen@haw-hamburg.de

3 Prüfstandsbeschreibungen

3.1 Gebläseprüfstand

Der Gebläseprüfstand besteht aus einem langeren Rohr mit einem Durchmesser von 300 mm . In der Mitte befindet sich das Gebläse. Zur Zeit ist das Kühlluftgebläse eines Klöckner Humboldt Deutz LKW-Motors eingebaut. Damit die Antriebswelle des Gebläses nach außen geführt werden kann, befindet sich unmittelbar vor dem Gebläse ein Knick von ca. 25° in der Rohrleitung.

Bild 3.1 zeigt den Gebläseprüfstand. Von links oben nach rechts hinten verläuft die Rohrleitung. Hinter dem doppelten Knick befindet sich das Gebläse. Im Vordergrund ist das PIV-Getriebe als viereckiger orangefarbiger Kasten zu erkennen. An seiner linken Seite ist der Elektromotor zu sehen. An der rechten Seite endet die Rohrleitung nach einer normgerechten Blendenmeßstrecke in einem selbst hergestellten Drosselventil.



Abbildung 3.1: Blick auf den Gebläseprüfstand

Das Gebläse verfügt — anders als üblich — über eine umgekehrte Reihenfolge von Lauf- und Leitrad. Bei diesem Gebläse ist das Leitrad in Strömungsrichtung vorne gefolgt vom Laufrad. In Bild 3.2 sind links die Ein- und rechts die Austrittsseite zu sehen. Da das Gebläse als Kühlgebläse für einen luftgekühlten Dieselmotor ausgelegt wurde, ist diese Anordnung aus Sicherheitsgründen sinnvoll.

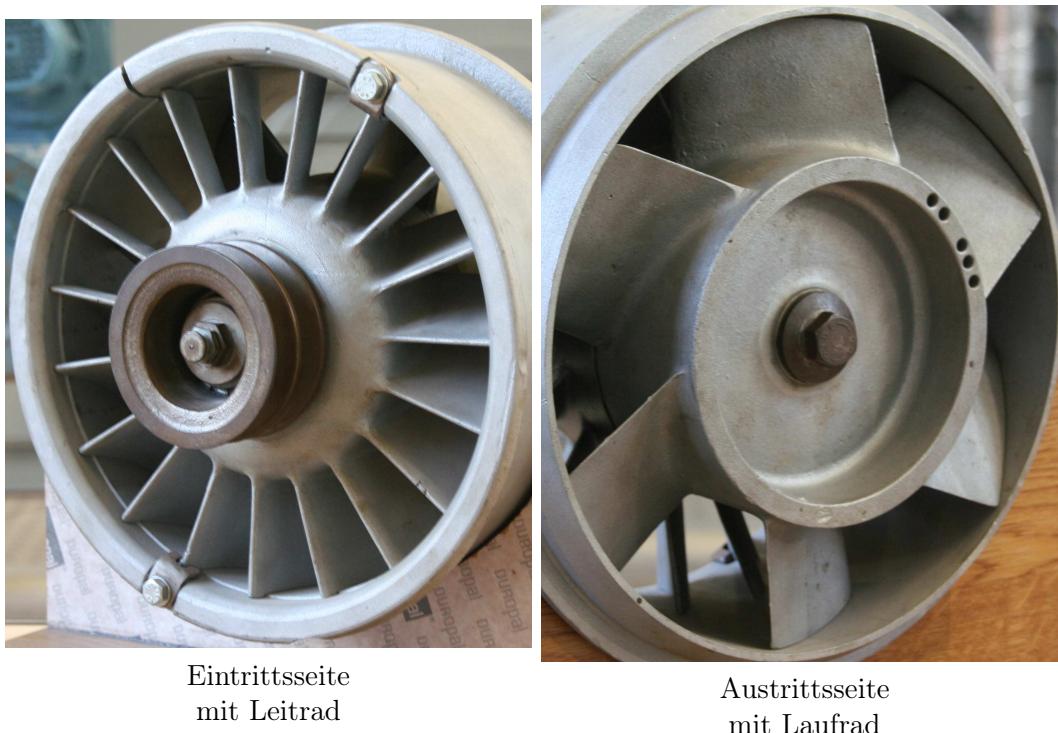


Abbildung 3.2: Vorder- und Rückseite des Gebläses

Der Antrieb des Gebläses wird durch einen Elektromotor mit konstanter Drehzahl und einem PIV-Getriebe mit stufenloser Übersetzung bewerkstelligt. Bild 3.3 zeigt das Schema des Versuchsaufbaues.

Die Bilder 3.4 und 3.5 geben einen Einblick in das Funktionieren des Getriebes. In Bild 3.4 ist eine technische Zeichnung mit den beiden Wellen und den Kegelrädern zu sehen, zwischen denen eine Gliederkette läuft. Durch den Abstand der Kegelräder wird der Durchmesser eingestellt, auf dem die Kette läuft. Damit das Getriebe funktioniert, muß die Kette immer stramm zwischen beiden Kegelrädern gespannt sein. Deshalb müssen beide Kegelräder gleichzeitig in Gegenrichtung über das Handrad an der oben dargestellten Welle verstellt werden. Bild 3.5 zeigt beide Kegelräder und die Gliederkette. Damit kann die Drehzahl in einem Bereich von $1800 \leq n \leq 7000 \text{ U/min}$ variiert werden. Beide Bilder stammen aus der Reparaturanleitung des Getriebes.

3.1.1 Meßstellen und Meßtechnik

Vor dem Gebläse befinden sich am Eintrittsflansch die Meßstellen für den Eintrittsdruck p_e als statische Druckmeßstelle und die Eintrittstemperatur T_e sowie eine Prandtl-Sonde zur Vermessung des Geschwindigkeitsprofiles. Bild 3.6 zeigt die Prandtl-Sonde. Über die Druckmeßstelle für den Totaldruck p_{te} und den statischen Druck p_e kann die Geschwindigkeit der Luft an der Sonde berechnet werden.

Hinter dem Gebläse befinden sich am Austrittsflansch entsprechende Meßstellen für den Austrittsdruck p_a und die Austrittstemperatur T_a sowie eine weitere Prandtl-Sonde zur Vermessung der Nachlaufströmung hinter dem Gebläse.

Hinter dem Gebläse schließt sich eine normgerechte Blendenmeßstrecke nach DIN ISO EN 5167 ff. an. Der Prüfstand endet dann am Drosselventil. Mit dem Drosselventil wird der Massenstrom durch das Gebläse eingestellt.

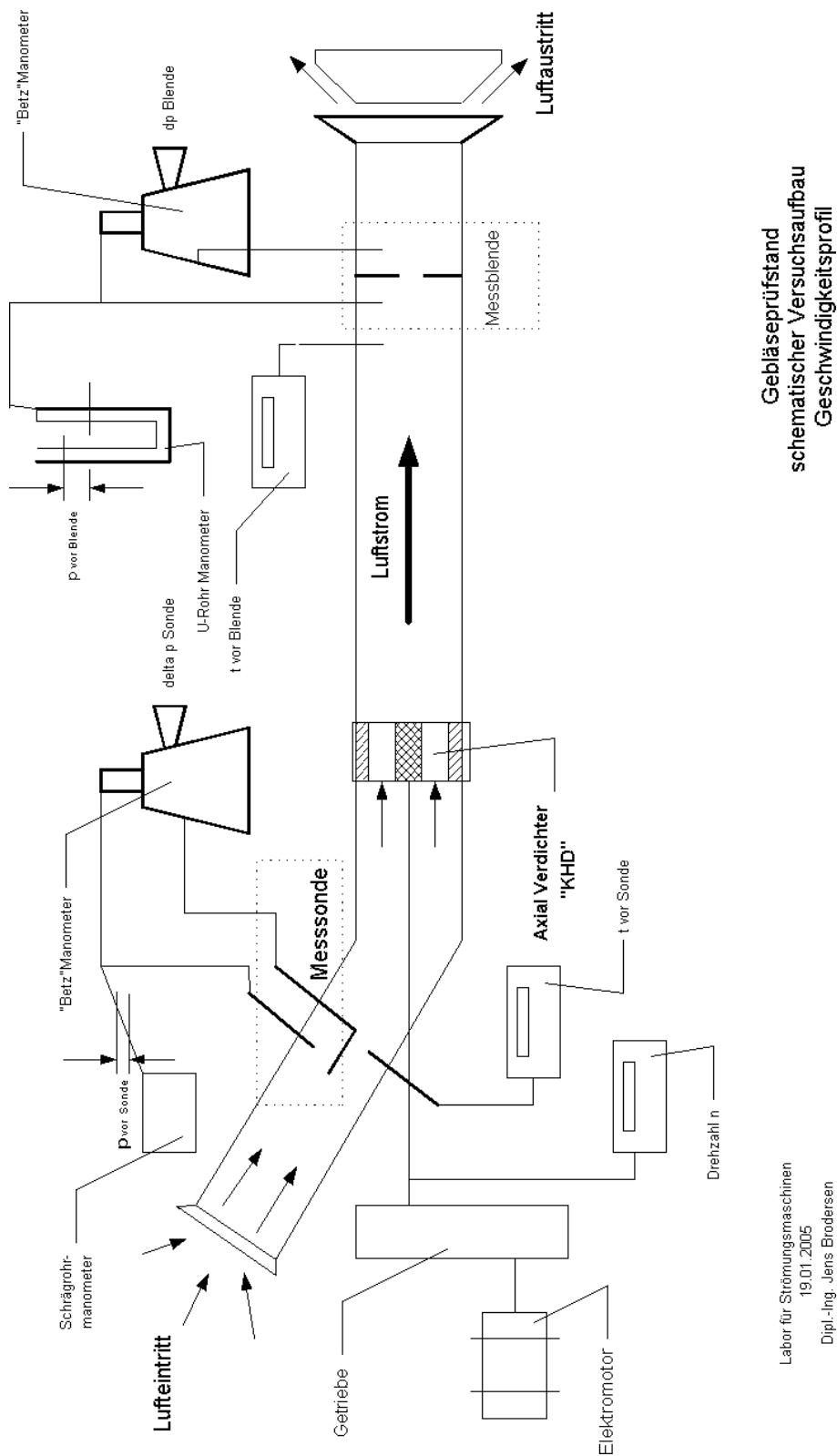


Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau des Gebläseprüfstandes

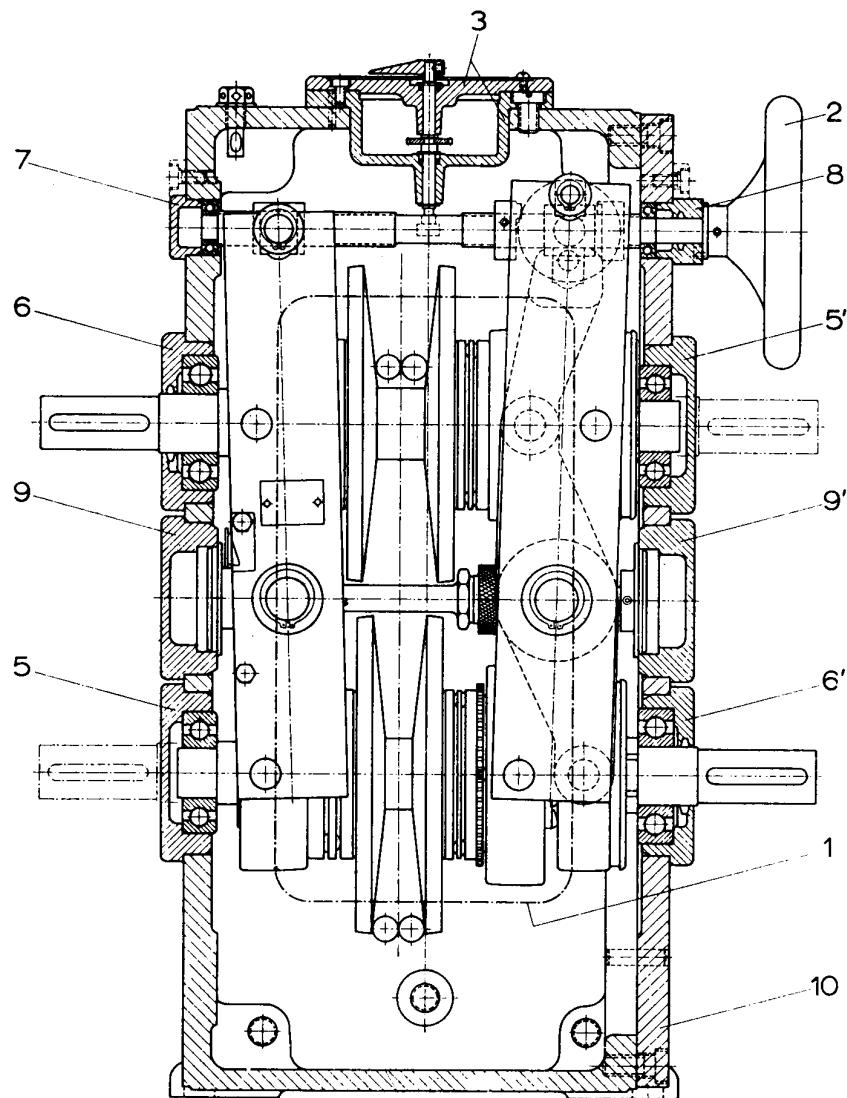


Abbildung 3.4: Zeichnung des PIV-Getriebes

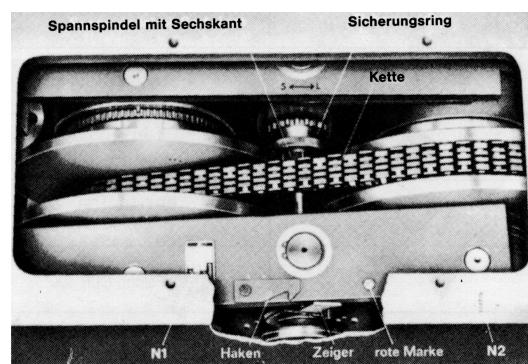


Abbildung 3.5: Kegelräder und Gliederkette des PIV-Getriebes

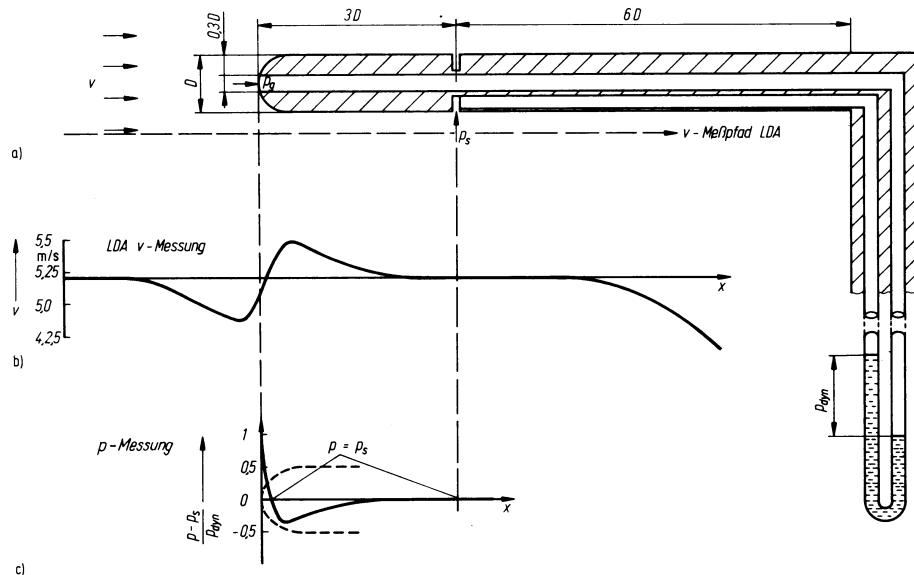


Abbildung 3.6: Zeichnung einer Prandtl-Sonde

Die Meßstellenliste ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

Meßstelle	Einheit	Beschreibung
Δh_{Bo}	mmHg	Barometerstand, Kuppenoberkante
Δh_{Bu}	mmHg	Barometerstand, Kuppenunterkante
T_B	$^{\circ}C$	Barometerstand, Temperatur am Barometer
n	1/min	Drehzahl des Gebläses
M_d	Nm	Drehmoment an der Antriebswelle des Gebläses
Δh_{ea}	mmWS	Höhenunterschied am Betz-Manometer für die Messung der Druckerhöhung durch das Gebläse Druckdifferenz zwischen Aus- und Eintritt ($p_a - p_e$)
Δh_e	mmWS	Höhenunterschied an der U-Säule am Gebläseeintritt für die Messung des statischen Druckes am Gebläse- eintritt
T_e	$^{\circ}C, K$	Temperatur am Eintritt in das Gebläse
T_a	$^{\circ}C, K$	Temperatur am Austritt aus dem Gebläse
T_{Bl}	$^{\circ}C, K$	Temperatur an der Blende
$h_{v,BL,l}$	mmWS	Druck vor der Blende, linker Schenkel der U-Säule
$h_{v,BL,r}$	mmWS	Druck vor der Blende, rechter Schenkel der U-Säule
Δh_{BL}	mmWS	Höhendifferenz am Betzmanometer für den Wirkdruck
$\Delta p_{dyn,v}$	hPa	Druckdifferenz an der Prandtl-Sonde am Gebläseein- tritt
$\Delta p_{dyn,v,offset}$	hPa	Offset am elektr. Differenzdruckaufnehmer
$\Delta p_{dyn,h}$	hPa	Druckdifferenz an der Prandtl-Sonde am Gebläse- austritt
$\Delta p_{dyn,h,offset}$	hPa	Offset am elektr. Differenzdruckaufnehmer Gebläse- austritt

Tabelle 3.1: Meßstellenliste für den Gebläseprüfstand

Die Liste der Symbole ist für den jeweiligen Versuch im Anhang aufgeführt. Die Einheiten sind die jeweiligen Standardeinheiten.

Die Temperaturen werden mit PT-100 gemessen. PT-100 sind temperaturempfindliche Platinwiderstände mit einem Widerstand von 100Ω bei $0^\circ C$. Die Drücke sind im Verhältnis zum Umgebungsdruck klein. Deshalb wird der Eintrittsdruck in das Gebläse mit einem Schrägrohrmanometer (Bild 3.7), der Differenzdruck über das Gebläse und die dynamischen Drücke an den Prandtl-Sonden mit Betz-Manometern (Bild 3.8) oder mit elektronischen Druckaufnehmern (Bild 3.9 oben) gemessen. Der Druck vor der Blende wird mit einer einfachen U-Säule erfaßt. Der Wirkdruck an der Blende wird mittels Betz-Manometer gemessen.



Abbildung 3.7: Schrägrohrmanometer

3.1.2 Mögliche Versuche

Der Prüfstand erlaubt die folgende Versuche:

- Geschwindigkeitsverteilungen vor und hinter dem Gebläse (Hindernis)
- Kennfeldmessung am Gebläse

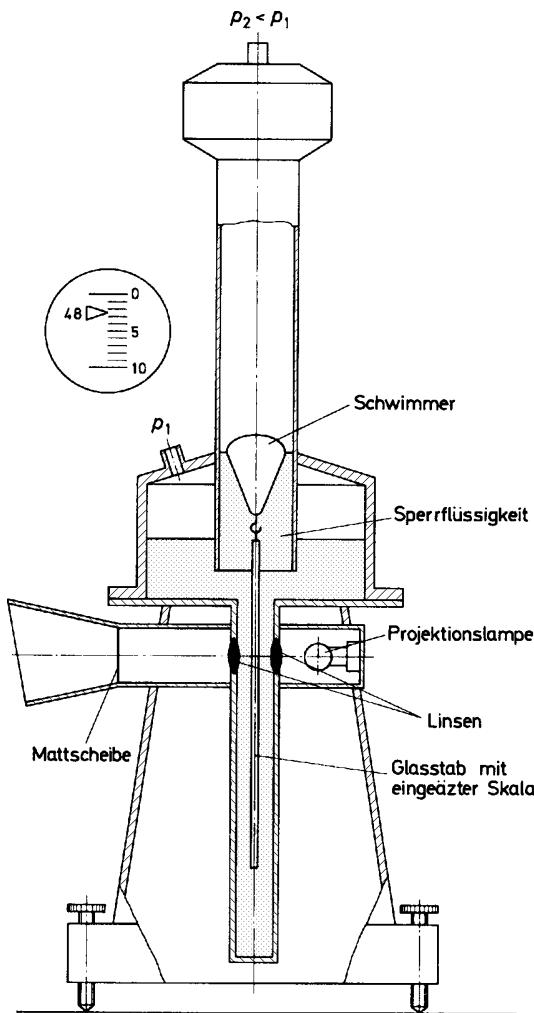


Abbildung 3.9: Meßtechnikschränke

Abbildung 3.8: Betz-Manometer

3.2 Kolbenverdichterprüfstand

Auf dem Kompressorprüfstand ist zur Zeit der zweistufiger Einzylinderkompressor L28e der Firma Hatlapa aufgebaut. Die Bilder 3.10 und 3.11 zeigen den Prüfstandaufbau.



Abbildung 3.10: Ansicht 1 des Kolbenkompressor-Prüfstandes



Abbildung 3.11: Ansicht 2 des Kolbenkompressor-Prüfstandes

Es handelt sich um einen luftgekühlten Kompressor, der in Schiffen zur Aufladung von Druckluftflaschen eingesetzt werden. Mit Hilfe der Druckluft wird die Hauptantriebsmaschine des Schiffes gestartet. Der Enddruck beträgt 30 bar. Zum Einen wird das Zylindergehäuse mit Luft gekühlt, was man an den Kühlrippen erkennen kann. Zum Anderen wird die Druckluft in der mit Kühlrippen versehenen Kupferleitung zwischen den beiden Stufen mit Luft gekühlt. Die Drehzahlen des Kompressors richten sich nach der Bauweise der Elektromotoren und erreichen maximal ca. 1800 U/min. Der in den beiden Bildern zu erkennende, gelb gestrichene Antriebsmotor ist ein Gleichstrommotor mit variabler Drehzahl.

In Bild 3.11 erkennt man die Prüfstandsausrüstung mit Rohrleitungen und Ventilen.

Die Bilder 3.12 und 3.13 zeigen Schnittbilder durch den Kompressor.

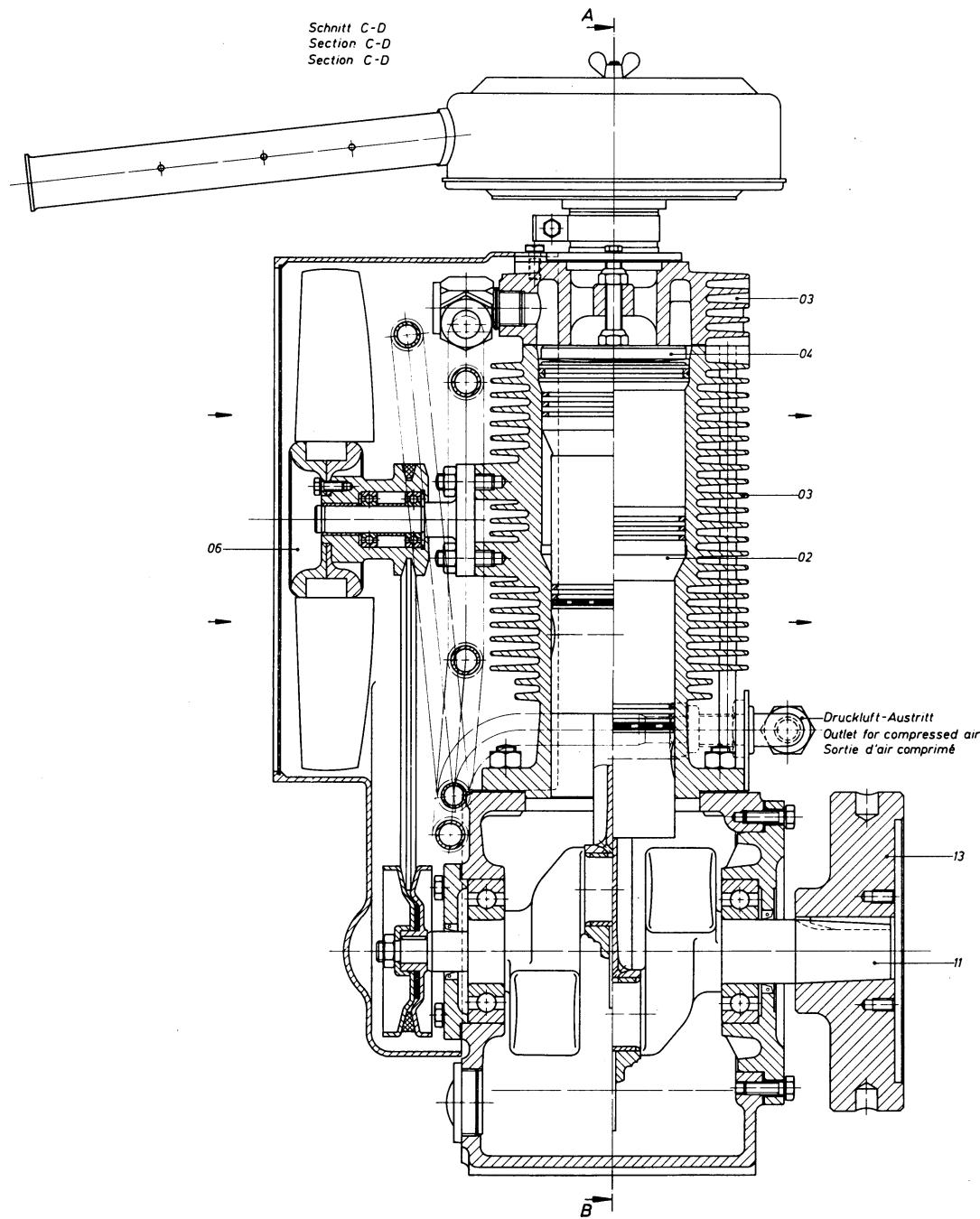


Abbildung 3.12: Längsschnitt durch den Kolbenverdichter Hatlapa L23e

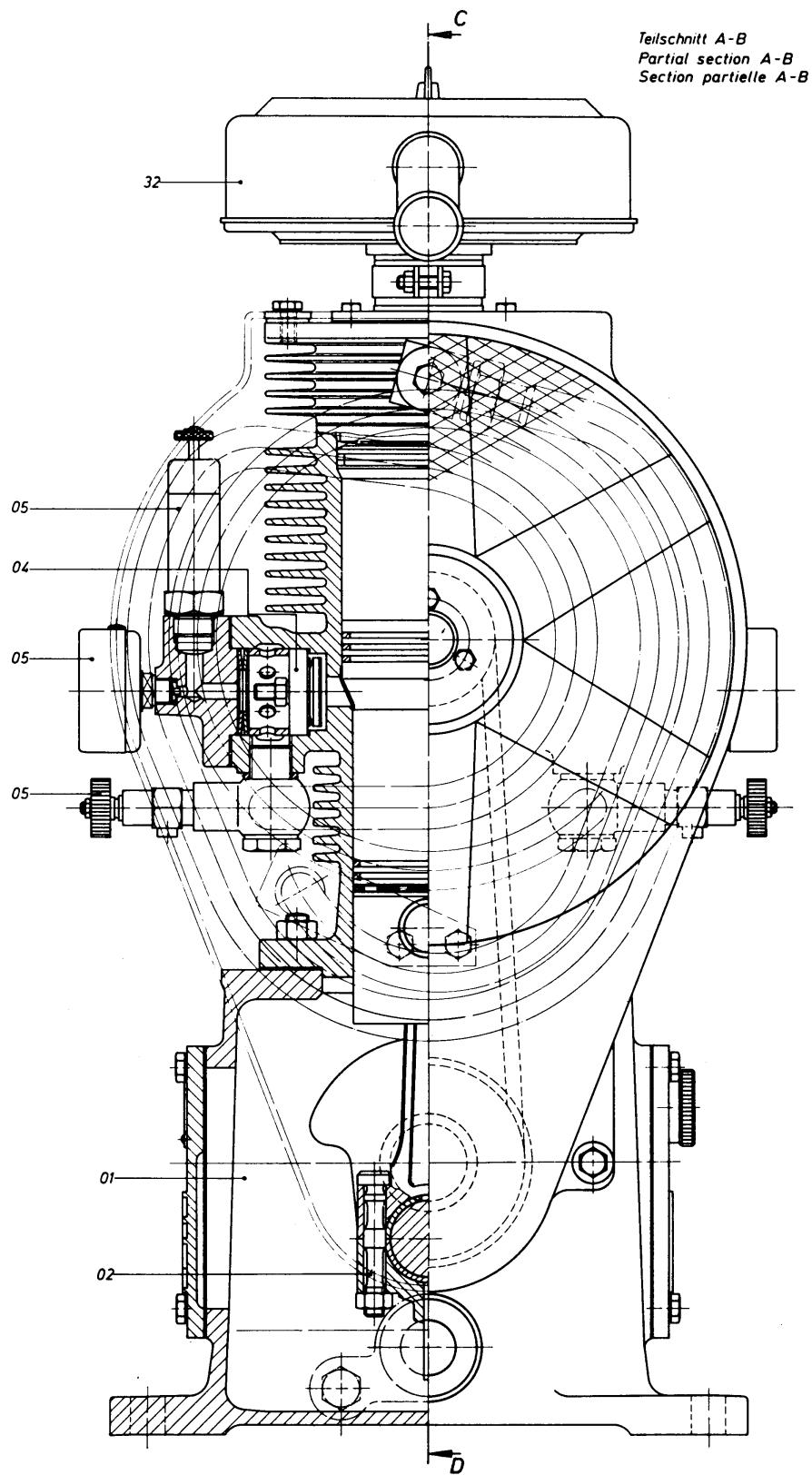


Abbildung 3.13: Querschnitt durch den Kolbenverdichter Hatlapa L23e

3.2.1 Arbeitsweise des Kolbenverdichters

Für die Beschreibung der Funktionsweise ist Bild 3.12 von besonderem Interesse. Unten im Bild erkennt man die Kurbelwelle (Pos. 11) mit einem Teil der Kupplung (Pos. 13) für den Elektromotor. Links ist der Kühlventilator mit der Position 06 bezeichnet. In der Mitte befindet sich der Zylinder mit dem Kolben (Pos. 02). Die Schnittdarstellung ist entlang der senkrecht verlaufenden Mittellinie geteilt. In der linken Darstellung befindet sich der Kolben am oberen Totpunkt (OT) in der rechten im unteren Totpunkt (UT). Der Zylinderraum wird nach oben hin abgeschlossen durch den Zylinderkopf (Pos. 03). Auf der Unterseite des Zylinderkopfes befinden sich die Ventilplatte (Pos. 04) mit dem Ein- und Auslaßventil. Bei allen Ventilen handelt es sich um selbstdämmende Ventile, die über die Druckdifferenz auf den beiden Seiten der Federbleche gesteuert werden.

Die erste Stufe wird durch den Zylinderraum oberhalb des Kolbens gebildet. Die zweite Stufe befindet sich seitlich um den Kolben herum. Die waagrecht angeordneten Ringe auf dem Kolben sind die Kolbenringe. Die zweite Stufe erkennt man an dem in der linken Hälfte des Bildes zu sehenden schlanken Raum unter den oberen Kolbenringen.

Die Luft wird oben durch den auf dem Zylinderkopf angebrachten Ansaugfilter angesaugt, wenn der Kolben sich nach unten bewegt. Der Druck im Zylinder ist dann niedriger als der Druck im Ansaugfilter. Daher öffnet das Einlaßventil. Hat der Kolben den unteren Totpunkt durchfahren und bewegt sich wieder nach oben, schließt das Einlaßventil. Die Verdichtung beginnt. Unmittelbar vor dem oberen Totpunkt ist der Druck im Zylinder größer als der Druck hinter dem Auslaßventil, das sich dann öffnet. Die verdichtete Luft hat jetzt einen Druck von ca. 6 bar und strömt in die Verbindungsleitung zur zweiten Stufe, die im Bild links zwischen Kühlpropeller und Zylindergehäuse zu erkennen ist.

Da die Kolbenoberfläche den Zylinderkopf nicht berührt, bleibt ein kleines mit Luft gefülltes Volumen übrig, das man als Schadraum bezeichnet. Diese Restgase expandieren bei der Bewegung des Kolbens nach unten.

Bewegt der Kolben sich in Richtung des oberen Totpunktes, wird in der zweiten Stufe Luft aus der Verbindungsleitung angesaugt. Bei der anschließenden Kolbenbewegung nach unten wird diese Luft dann weiter auf über 30 bar verdichtet. Die Temperatur der Luft erreicht dann Werte von über 200°C. Kurz vor dem Erreichen des unteren Totpunktes öffnet das Auslaßventil der zweiten Stufe, und die Druckluft strömt in die Kühlleitung (wieder zu sehen zwischen Kühlpropeller und Zylindergehäuse). Der Austritt der Druckluft aus dem Kompressor befindet sich ganz rechts und ist entsprechend bezeichnet.

Betrachtet man den Aufbau des Kompressors unter dem Gesichtspunkt der Thermodynamik und Strömungslehre ergibt sich das in Bild 3.14 gezeigte p, V -Diagramm und der in Bild 3.15 dargestellte schematische Aufbau.

Das p, V -Diagramm in Bild 3.14 zeigt qualitativ den idealisierten Verdichtungsprozeß für eine Stufe. Die eingetragenen Zustandspunkte 1 … 4 stimmen im realen Prozeß mit den Kolbenstellungen am unteren und oberen Totpunkt nicht überein.

Im Punkt 1 befindet sich der Kolben vom unteren Totpunkt aus auf dem Weg nach oben. Die Verdichtung der angesaugten Luft ist so weit fortgeschritten, daß der Druck im Zylinder den Ansaugdruck vor dem Zylinder erreicht hat, und die Einlaßventile schließen.

Zustandspunkt 2 befindet sich unmittelbar vor dem oberen Totpunkt. Der Druck im Zylinder ist so weit gestiegen, daß die Auslaßventile öffnen. Das Ausschieben der verdichteten Luft erfolgt bei annähernd konstanten Druck bis zum Punkt 3, der am oberen

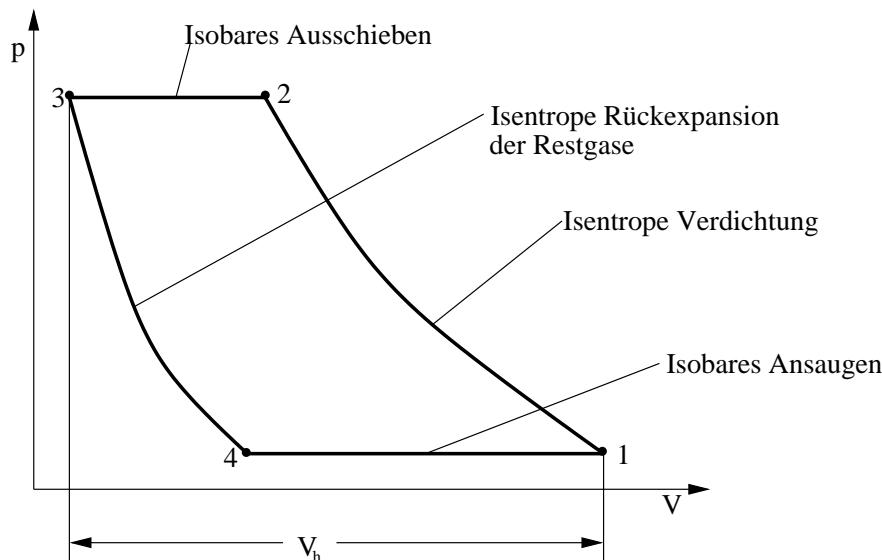
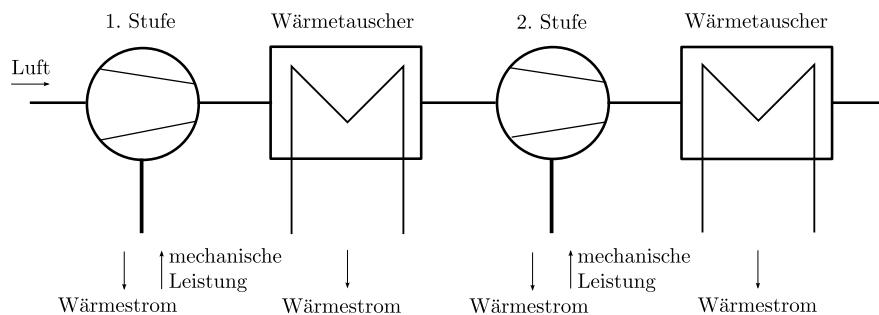
Abbildung 3.14: Qualitative Darstellung des Verdichtungsprozesses im p, V -Diagramm

Abbildung 3.15: Schematische Darstellung des Verdichtungsprozesses

Totpunkt liegt.

Die von den vier Zustandsänderungen umschlossene Fläche ist die der Luft zugeführte Volumenänderungsarbeit. Das in Bild 3.14 an der V -Achse eingetragene Volumen V_h ist das Hubvolumen.

Die Expansion der nach dem Ausschieben der Luft im Zylinder verbliebenen Luft erfolgt bis zum Punkt 4, an dem der Druck im Zyliner wegen des größer werdenden Volumens unter den Ansaugdruck fällt, so daß sich die Einlaßventile öffnen und Luft angesaugt werden kann.

Der schematische Aufbau des Kompressors in Bild 3.15 zeigt die beiden Stufen des Kompressors und die als Wärmetauscher dargestellten Rippenrohre für die Abfuhr der erzeugten Wärme. Da das Zylindergehäuse ebenfalls luftgekühlt ausgeführt ist, wird auch die Luft im Zylinder beim Verdichten und die Restluft bei der Expansion gekühlt. Die Reibungswärme bei den Kolbenbewegungen wird ebenfalls teilweise über das Zylindergehäuse abgeführt.

Anhand der hier gezeigten Bilder kann man schnell erkennen, daß die Aufteilung der zugeführten Leistung auf die beiden Stufen anhand von thermodynamischen Berechnungen am realen Verdichter nicht gut gelingen kann. Daher wird der Druck im Zyliner während der Kolbenbewegung gemessen, um daraus die Leistung zu bestimmen, die an die verdichtete Luft übertragen wird. Diese Druckmessung nennt man Indizieren.

3.2.2 Meßstellen und Meßtechnik

An diesem Prüfstand muß zwischen der Meßtechnik für stationäre und instationäre Meßstellen unterscheiden werden. In Tabelle 3.2 sind im oberen Teil die Meßstellen für die stationären und im unteren Teil für die instationären Messungen eingetragen. Bild 3.16 zeigt die Anordnung der Meßstellen im und um den Kolbenverdichter. Die Drehzahl des Verdichters und die Spannungen U_A, U_F sowie die Ströme I_A, I_F werden am Antriebsmotor gemessen.

Meßstelle	Einheit	Beschreibung
Δh_{Bo}	mmHg	Barometerstand, Kuppenoberkante
Δh_{Bu}	mmHg	Barometerstand, Kuppenunterkante
T_B	°C	Barometerstand, Temperatur am Barometer
n	1/min	Drehzahl des Gebläses
U_A	V	Ankerspannung am Antriebsmotor
I_A	A	Ankerstrom am Antriebsmotor
U_F	V	Feldspannung am Antriebsmotor
I_F	A	Feldstrom am Antriebsmotor
Δh_{Bl}	mmWS	Höhendifferenz am Betzmanometer für den Wirkdruck
T_{Bl}	°C, K	Temperatur an der Blende
T_1	°C, K	Temperatur am Eintritt in die 1. Stufe
T_2	°C, K	Temperatur am Austritt aus der 1. Stufe
p_{23}	bar	Druck zwischen 1. und 2. Stufe
T_3	°C, K	Temperatur am Eintritt in die 2. Stufe
T_4	°C, K	Temperatur am Austritt aus der 2. Stufe
p_4	bar	Druck am Austritt aus der 2. Stufe
s_{DV}	%	Stellung des Drosselventils
i_{OT}	—	Trigger für den oberen Totpunkt
i_W	—	Trigger für die Winkelposition
p_{z1}	bar	Druck in der 1. Stufe
p_{z2}	bar	Druck in der 2. Stufe

Tabelle 3.2: Meßstellenliste für den Kolbenverdichterprüfstand

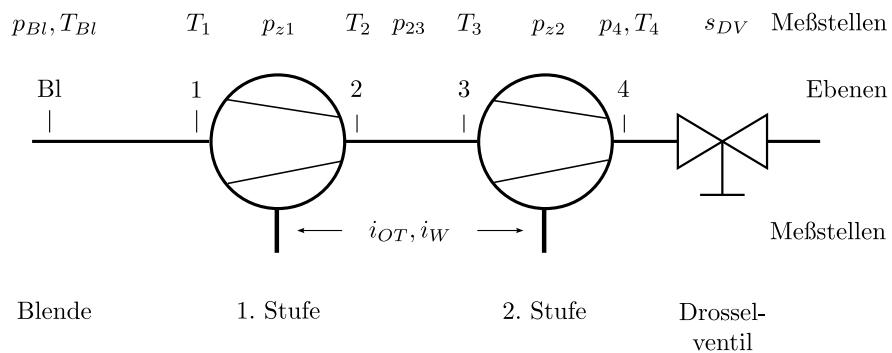


Abbildung 3.16: Meßstellen am Kolbenverdichter

Die Liste der Symbole ist für den jeweiligen Versuch im Anhang aufgeführt. Die Einheiten sind die jeweiligen Standardeinheiten.

Die Temperaturen werden mit PT-100 gemessen. PT-100 sind temperaturempfindliche

Platinwiderstände mit einem Widerstand von 100Ω bei $0^\circ C$. Die Drücke werden zur Zeit mit dem Betz-Manometer und einfachen Manometern gemessen.

Für das Indizieren werden elektronische Druckaufnehmer der Firma Culite eingesetzt, die Drücke mit einer zeitlichen Auflösung von $t < 10\mu s$ messen können. Für die Markierung des oberen Totpunktes wird ein einzelner Trigger und für die Winkel Trigger alle 1 bzw. 0.5 Grad über eine Lichtschranke bereitgestellt, deren Markierungsscheibe sich zwischen der Kupplung und dem Verdichtergehäuse auf der Welle befindet. Beide Signale werden mit denen der Druckaufnehmer auf ein digitales Speicheroszilloskop (Bild 3.17) gegeben, dort gemessen und anschließend auf dem Server des Labors für die weitere Verarbeitung speichert.

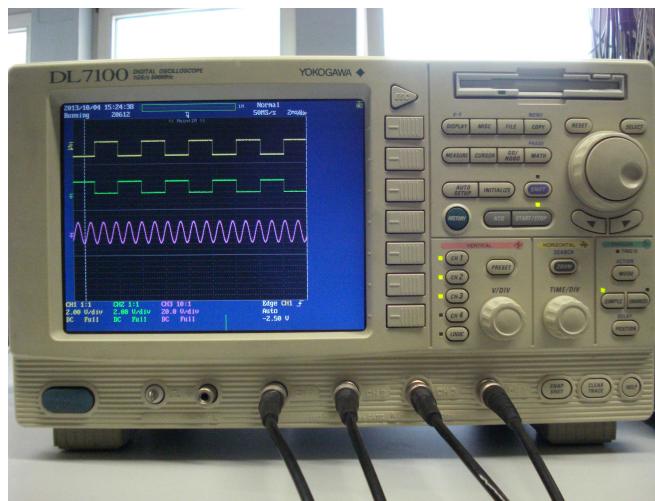


Abbildung 3.17: Speicheroszilloskop Yokogawa DL 7100

Das Speicheroszilloskop arbeitet mit einer Abtastrate von $5 \cdot 10^6\text{ Samples/s}$. Daher kommen bei einer Umdrehung der Kurbelwelle z.B. bei einer höheren Drehzahl von 1800 U/min insgesamt 13889 Meßwerte/Grad zusammen. Der Vorteil dieser Meßmethode liegt auch darin, daß über die hohe Abtastrate des Speicheroszilloskopes die Ungleichförmigkeit der Drehbewegung der Kurbelwelle über die Winkelgeschwindigkeit ermittelt werden kann.

3.2.3 Mögliche Versuche

Zur Zeit sind folgende Versuche vorbereitet:

- Erfassung von p, V -Diagrammen
- Betriebsverhalten eines Kolbenverdichters

4 Versuchsdurchführung und -auswertung

4.1 Geschwindigkeitsverteilung in einer Rohrströmung

In einer Rohrströmung werden Geschwindigkeitsverteilungen vor und hinter einem Hindernis, das hier durch ein Gebläse gegeben ist, über dem Rohrquerschnitt gemessen. Aus der Geschwindigkeitsverteilung vor dem Gebläse wird mit einer vereinfachten Rechnung der Massenstrom bestimmt und mit den Ergebnissen einer Blendenmessung verglichen.

Die Geschwindigkeitsverteilungen vor dem Gebläse zeigen die Entwicklung der Grenzschicht durch die Einlaufstrecke, die ca. 3 m Länge beträgt. Die am Eintritt in das Gebläse vorhandene KÜmmung in der Rohrleitung macht sich stromauf bemerkbar.

An der Geschwindigkeitsverteilung hinter dem Gebläse kann der Einfluß eines Totwassergebietes kennengelernt werden.

4.1.1 Ablauf des Versuches

Bei konstanten Drehzahlen des Gebläses und definiert geöffnetem Drosselventilstellung werden je eine Verteilung des dynamischen Druckes p_{dyn} vor und hinter dem Gebläse gemessen. Die Anzahl der Messpunkte vor und hinter dem Gebläse ist unterschiedlich.

Vor dem Anfahren des Gebläses müssen die Offsetdrücke $p_{dyn,v,offs}$ und $p_{dyn,h,offs}$ für die Differenzdruckmessung an den Prandtl-Sonden in den Meßblättern für die Geschwindigkeitsverteilungen notiert werden.

Durch den Mitarbeiter des Labors wird das Gebläse angefahren und die erste Drehzahl eingestellt. Danach stellen die Laborteilnehmer den Versuchspunkt über den Drosselschieber ein. Dazu wird eine Druckdifferenz für den Wirkdruck vorgegeben.

Die Prandtl-Sonden werden in die erste Position von oben mit Hilfe des „Lineals“ gebracht. Bild 4.1 zeigt die eingegebauten Prandtl-Sonde und das „Lineal“ zur Einstellung der Sondenpositionen. Nach Einstellung der Sondenposition muß kurz ($\sim 30\text{ s}$) gewartet werden, damit sich der Druck in den Meßleitungen zwischen Sonde und Druckaufnehmer ausgleichen kann.

Nach der Wartezeit beginnt die Ablesung des dynamischen Druckes. Das Ablesen der Druckdifferenz an der Anzeige vom Druckaufnehmer wird über einen kurzen Zeitraum durchgeführt. Da die Anzeige bei den letzten Stellen schwankt, werden einzelne Werte über einen kurzen Zeitraum (max. 30 s) abgelesen und in das Meßblatt eingetragen. Bild 4.2 zeigt beispielhaft die Schwankungen der Anzeige des dynamischen Druckes. Die blaue Kurve stellt den Verlauf $p_{dyn,v,m}(t)$ an einer Sondenposition dar, die rote Linie ist der Mittelwert $p_{dyn,v}$. Am Verlauf der Kurve kann man sehen, daß möglichst viele Meßwerte aufgeschrieben werden sollten, um sinnvolle Mittelwerte daraus ableiten zu können.



Abbildung 4.1: Die Prandtl-Sonde in eingebautem Zustand mit dem „Lineal“

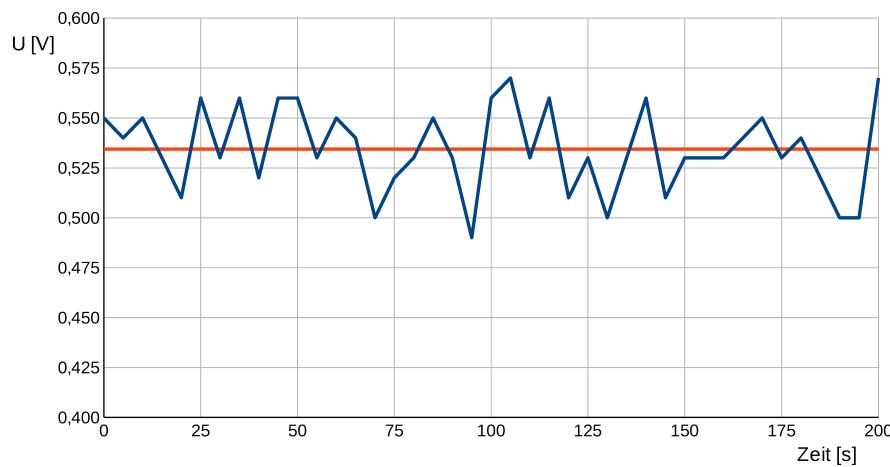


Abbildung 4.2: Schwankung der Anzeige des dynamischen Druckes

Nach der Messung des dynamischen Druckes wird die nächste Sondenposition eingestellt. Eine Messung der Geschwindigkeitsverteilung ist fertig, wenn alle Sondenpositionen durchgemessen wurden.

Während des Messens der Geschwindigkeitsverteilung nimmt ein anderer Versuchsteilnehmer die Messwerte auf, die für die Auswertung der Geschwindigkeitsverteilungen notwendig sind (Gesamt-Meßwerte). Das sind Drücke und Temperaturen zur Berechnung von Dichten, mittleren Geschwindigkeiten und Reynolds-Zahlen. Außerdem werden die Meßwerte an der Blende benötigt, um zum Vergleich der Massenstromberechnung aus der Geschwindigkeitsverteilung die Messung des Massenstromes über die Blende heranziehen zu können. Diese Meßwerte werden nur ein Mal während der Messung einer Geschwindigkeitsverteilung aufgenommen und in das erste Meßblatt eingetragen. Zu den einzutragenden Werten gehören auch noch die Seitenzahlen der Meßblätter der Geschwindigkeitsverteilungen vor und hinter dem Gebläse, um die Zuordnung der Meßwerte sicherzustellen.

Die Drehzahl des Gebläses muß während der Messung einer Geschwindigkeitsverteilung konstant gehalten werden. Eine Nachregulierung der Drehzahl darf nur dann erfolgen,

wenn keine Meßwerte aufgenommen werden.

Die/der vierte Versuchsteilnehmer/in unterstützt die Teilnehmerin bzw. den Teilnehmer, der die Geschwindigkeitsverteilung hinter dem Gebläse vermisst.

Sind die beiden Geschwindigkeitsverteilungen vor und hinter dem Gebläse vermessen, wird über den Drosselschieber der nächste Versuchspunkt eingestellt. Die Drehzahl muß nachgestellt werden. Das Messen der Geschwindigkeitsverteilungen sollte nicht länger als 15 min dauern.

Am Schluß des Versuches wird der Drosselschieber ganz geöffnet, und die Drehzahl auf den niedrigsten Wert heruntergefahren. Das Abstellen des Gebläsemotors erledigt ein Labormitarbeiter.

4.1.2 Auswertung des Versuches

Um den Arbeitsaufwand der Versuchsauswertung gering zu halten, werden alle Meßpunkte von einem Versuchsauswerteprogramm ausgewertet. Das Programm liefert sowohl eine tabellarische Auflistung der Meßwerte als auch Diagramme mit den Verteilungen des dynamischen Druckes und der Geschwindigkeit über dem Rohrdurchmesser.

Ein Versuchspunkt mit einer Geschwindigkeitsverteilung wird „von Hand“ ausgewertet. Die „von Hand“ berechneten Werte werden mit der Ausgabe des Auswerteprogramms überprüft. Die Übereinstimmung der „von Hand“ und vom Programm berechneten Werte wird am Ende der Handrechnung vermerkt! Der zugehörige Versuchspunkt muß angegeben werden.

Folgende Stoffwerte und Konstanten werden benötigt:

- Außendurchmesser des Gebläses: $d_B = 0.3 \text{ m}$
- Rohrdurchmesser an Gebläseein- und -austritt: $d_{Rohr} = 0.3 \text{ m}$
- Blendendurchmesser: $d_{Bl} = 0.212132 \text{ m}$
- Isentropenexponent von Luft: $\kappa = 1.4$
- Gaskonstante von Luft: $R = 287.053 \text{ J/(kg K)}$
- Viskosität von Luft: $\eta_L = 18.24 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(m s)}$
- Dichte von Wasser: $\varrho_{H_2O} = 998.21 \text{ kg/m}^3$
- Erdbeschleunigung (Hamburg): $g_{HH} = 9.8136 \text{ m/s}^2$
- Erdbeschleunigung (allgemein): $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$

Für die Auswertung des Versuches werden die nachfolgenden Berechnungsschritte durchgeführt (Tabelle 3.1 beachten). Zur Nomenklatur siehe Tabelle B.1.3 im Anhang, in der auch die vom Auswerteprogramm verwendeten Variablenbezeichnungen dargestellt sind.

Für diese Berechnungen steht das Auswerteprogramm für die Geschwindigkeitsverteilung **gvert**, das Programm zur Korrektur des Barometerstandes **baro** oder eine Internetseite zur Verfügung. Die Handhabung der Programme ist im Anhang B.1.2 beschrieben.

Gesamt-Meßwerte

Die Gesamt-Meßwerte befinden sich auf dem ersten Meßblatt. Es handelt sich um die Werte, die für die Geschwindigkeitsverteilungen benötigt werden, aber nicht in Abhängigkeit der Position der Prandtl-Sonde gemessen werden.

Die Temperaturen werden für die Berechnungen in Kelvin umgerechnet:

1. Temperatur am Gebläseeintritt T_e :

$$T_e = T_e + 273.15 \text{ K} \quad (4.1)$$

2. Temperatur am Gebläseaustritt T_a :

$$T_a = T_a + 273.15 \text{ K} \quad (4.2)$$

3. Temperatur an der Blende T_{Bl} :

$$T_{Bl} = T_{Bl} + 273.15 \text{ K} \quad (4.3)$$

Der Barometerstand wird ermittelt entsprechend Anhang A:

$$p_u = f(p_{Bo}, p_{Bu}, T_B) \quad (4.4)$$

Die Drücke werden entsprechend ihrer Meßmethode in einer U-Säule in Standardeinheiten umgerechnet:

1. Statischer Druck am Gebläseeintritt p_e :

$$p_e = \Delta h_e \varrho_{H_2O} g_{HH} + p_u \quad (4.5)$$

Δh_e muß einen negativen Wert haben, da wegen des Ansaugens ein Unterdruck in der Rohrleitung am Eintritt in das Gebläse herrscht. Ist der Wert nicht negativ, handelt es sich um einen Fehler beim Aufschreiben der Meßwerte.

2. Statischer Druck am Gebläseaustritt p_a :

$$p_a = p_e + \Delta h_{ea} \varrho_{H_2O} g_{HH} \quad (4.6)$$

3. Druck vor der Blende:

$$p_{v,Bl} = (h_{v,Bl,r} - h_{v,Bl,l}) \varrho_{H_2O} g_{HH} + p_u \quad (4.7)$$

4. Wirkdruck an der Blende Δp_{Bl} :

$$\Delta p_{Bl} = \Delta h_{Bl} \varrho_{H_2O} g_{HH} \quad (4.8)$$

Die Dichte der Luft ϱ_e wird aus statischem Druck p_e und Temperatur T_e in der Meßebene vor dem Gebläse mit der idealen Zustandsgleichung idealer Gase bestimmt:

$$\varrho_e = \frac{p_e}{RT_e} \quad (4.9)$$

Der Massenstrom aus der Blendemessung wird bestimmt über das Auswerteverfahren für Massenstrommessungen mit Drosselgeräten nach DIN EN ISO 5167 ff, siehe [1] oder [3]. Der Massenstrom lässt sich ganz allgemein ausdrücken durch:

$$\dot{m}_{Bl} = \dot{m}(p_{v,Bl}, \Delta p_{Bl}, T_{Bl}) \quad (4.10)$$

Die Gleichungen für die Berechnung sind im Anhang D zu finden.

Die Reynolds-Zahl an der Blende Re_{Bl} ergibt sich bei der Bestimmung des Massenstromes \dot{m}_{Bl} .

Mit dem Massenstrom \dot{m}_{Bl} und dem Rohrquerschnitt A_e sowie der Dichte ϱ_e wird die mittlere Geschwindigkeit c_e im Eintrittsquerschnitt berechnet:

$$c_e = \frac{\dot{m}_{Bl}}{\varrho_e A_{Rohr}} \quad (4.11)$$

Als letzten Wert für die Eintrittsebene wird die Reynolds-Zahl Re_e berechnet:

$$Re_e = \frac{\varrho_e c_e d_{Rohr}}{\eta_L} \quad (4.12)$$

Analog zu den Gleichungen (4.9), (4.11) und (4.12) werden die entsprechenden Werte für die Austrittsebene ϱ_a , c_a und Re_a berechnet.

Geschwindigkeitsverteilungen mit der Prandtl-Sonde

Für die Geschwindigkeitsverteilung mit der Prandtl-Sonde werden die folgenden Auswertungen für jeden Meßpunkt (Index i) der Sonde (Sondenposition) durchgeführt. Das nachstehend aufgeführte Verfahren gilt für beide Ebenen vor und hinter dem Gebläse.

Aus den Meßwerten lässt sich der dynamische Druck $p_{dyn,i}$ mit Hilfe der Mittelwertbildung über alle n Einzelmeßwerte an einer Sondenposition (z.B. vor dem Gebläse: 2 ... 8) berechnen:

$$p_{dyn,i} = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n p_{dynam,i,k} \right) - p_{dynam,offs} \quad (4.13)$$

Der dynamische Druck p_{dyn} ist definiert als:

$$p_{dyn} = p_t - p = \frac{\varrho}{2} c^2 \quad (4.14)$$

Daraus lässt sich durch Umstellung nach c die Geschwindigkeit bestimmen:

$$c_i = \sqrt{\frac{2 p_{dyn,i}}{\varrho}} \quad (4.15)$$

Für jeden Meßpunkt über dem Durchmesser kann mit diesen Gleichungen die Strömungsgeschwindigkeit c_i bestimmt werden.

Um die mittlere Geschwindigkeit aus der Geschwindigkeitsverteilung (z.B. vor dem Gebläse c_v) zu berechnen, werden die örtlichen Geschwindigkeiten über dem Durchmesser integriert. Dabei muß noch berücksichtigt werden, daß die Strömungsgeschwindigkeit unmittelbar an der Wand wegen der Newtonschen Haftbedingung Null sein muß (z.B. Eintrittsebene: $c_1 = c_9 = 0 \text{ m/s}$). Die Sehnentrapezregel lautet für die Ebene vor dem Gebläse:

$$\bar{c}_v = \frac{1}{2(y_9 - y_1)} \sum_{i=1}^8 (c_{v,i+1} + c_{v,i})(y_{v,i+1} - y_{v,i}) \quad (4.16)$$

und für die Ebene hinter dem Gebläse:

$$\bar{c}_h = \frac{1}{2(y_{12} - y_1)} \sum_{i=1}^{12} (c_{h,i+1} + c_{h,i})(y_{h,i+1} - y_{h,i}) \quad (4.17)$$

Die Sondenpositionen vor y_v und hinter y_h dem Gebläse sind in Tabelle 4.1 angegeben. Mit den mittleren Geschwindigkeiten \bar{c}_v und \bar{c}_h lässt sich ebenfalls ein Massenstrom vor

y_v	mm	300	288	250	200	150	100	50	12	0		
y_h	mm	300	289	276	262	226	201	150	100	74	40	25
										12	0	

Tabelle 4.1: Sondenpositionen vor y_v und hinter y_h dem Gebläse

und hinter dem Gebläse bestimmen:

$$\dot{m}_v = \rho_e \bar{c}_v A_{Rohr} \quad \text{bzw.} \quad \dot{m}_h = \rho_a \bar{c}_h A_{Rohr} \quad (4.18)$$

Es ist an dieser Stelle interessant, den Unterschied im Massenstrom aus der Blendenmessung und der Messung der Geschwindigkeitsverteilung zu untersuchen:

$$\frac{\dot{m}_{Bl} - \dot{m}_v}{\dot{m}_{Bl}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\dot{m}_{Bl} - \dot{m}_h}{\dot{m}_{Bl}} \quad (4.19)$$

Zuletzt wird die Reynolds-Zahl berechnet:

$$Re_v = \frac{\rho_v \bar{c}_v d_{Rohr}}{\eta_L} \quad \text{bzw.} \quad Re_h = \frac{\rho_h \bar{c}_h d_{Rohr}}{\eta_L} \quad (4.20)$$

Die Reynolds-Zahl liefert dann eine Aussage darüber, ob die Strömung turbulent oder laminar ist.

Entsprechend der Gleichungen (4.13) bis (4.20) kann eine Geschwindigkeitsverteilung und eine mittlere Geschwindigkeit sowie die Reynolds-Zahl vor und hinter dem Gebläse bestimmt werden.

4.1.3 Versuchsbericht

Der Versuchsbericht soll folgende Punkte beinhalten:

1. Ein Deckblatt mit:
 - Versuchsbezeichnung
 - Datum
 - Semester
 - Gruppe
 - Versuchsnummer
 - Namen der Versuchsteilnehmer einschließlich Matr.-Nr.
2. Inhaltsverzeichnis
3. Kurze Beschreibung des Versuchsaufbaus
4. Beschreibung der durchgeführten Versuche
5. Auswertung der Versuchsergebnisse entsprechend Absatz 4.1.2

Ein kompletter Versuchspunkt vor und hinter dem Gebläse einschließlich Korrektur des Barometerstandes und Blendenmessung wird zusätzlich von Hand vorge rechnet. Die Gleichungen werden hingeschrieben, die Zahlen eingesetzt und das Ergebnis aufgeführt.

Da alle Versuchspunkte mit dem Auswerteprogramm ausgewertet werden, fällt die Überprüfung der von Hand gerechneten Werte leicht. Die Rechnung von Hand muß mit den Ergebnissen des Auswerteprogramms kontrolliert werden!

Die Übereinstimmung der beiden Rechnungen wird im Protokoll vermerkt! Falls die Übereinstimmung bestätigt wird aber nicht stimmt, wird der Versuchsbericht ohne weitere Korrektur als endgültig nicht anerkannt gewertet.

6. Diagramme:

- Verteilung des dynamischen Druckes vor dem Gebläse $p_{dyn,v} = f(y_v)$
- Geschwindigkeitsverteilung vor dem Gebläse $c_v = f(y_v)$
- Verteilung des dynamischen Druckes hinter dem Gebläse $p_{dyn,h} = f(y_h)$
- Geschwindigkeitsverteilung hinter dem Gebläse $c_h = f(y_h)$

In einem Diagramm sollen die Geschwindigkeitsverteilungen bzw. Verteilungen des dynamischen Druckes vor und hinter dem Gebläse dargestellt werden in der Form Durchmesser auf y -Achse und Geschwindigkeit c bzw. dynamischer Druck p_{dyn} auf der x -Achse.

Zu beachten ist die Newtonsche Haftbedingung. D.h. an den Rohrwänden sind $p_{dyn} = 0$ und $c = 0$. Durch die Meßpunkte werden Kurven von Hand gelegt.

7. Ausdruck der Ergebnisse des Auswerteprogrammes

8. Meßblätter

9. Teilnehmerliste

Der Versuchsbericht ist dazu gedacht, den Versuchsaufbau, den Ablauf des Versuches und seine Auswertung in Erinnerung zu behalten. Deshalb reicht eine kurze aber aussagekräftige Beschreibung. Das Abschreiben der Prüfstandsbeschreibung in eigenen Wörtern ist überflüssig.

4.2 Ermitteln von p, V -Diagrammen am Kolbenverdichter

Im Versuch „Ermitteln von p, V -Diagrammen am Kolbenverdichter“ kommt es im Wesentlichen auf die Messung der p, V -Diagramme an.

Folgende Versuche sind hier möglich:

- Aufnehmen von mehreren p, V -Diagrammen bei konstanter Drehzahl aber unterschiedlicher Drosselstellung
- Aufnehmen von mehreren p, V -Diagrammen bei konstanter Drosselstellung aber unterschiedlicher Drehzahl

4.2.1 Ablauf des Versuches

Nach dem Starten des Kolbenverdichters wird je nach Versuchsprogramm die erste Drehzahl und der erste Drosselzustand eingestellt.

Alle Meßwerte für den stationären Betriebspunkt werden notiert und ein p, V -Diagramm aufgenommen. Nach Abschluß dieser Messung wird der nächste Betriebspunkt eingestellt und einige Minuten zum Erreichen eines stationären Betriebspunktes abgewartet.

Danach wird der nächste Betriebspunkt eingestellt.

In der Wartezeit kann das p, V -Diagramm ausgewertet und angesehen werden.

Nach Messung aller Betriebspunkte wird der Prüfstand von einem Labormitarbeiter abgestellt.

4.2.2 Auswertung des Versuches

Für diesen Versuch gibt es das Auswerteprogramm **kvd-pv**, dessen Aufruf im Anhang B.2.2 beschrieben ist. Der Aufbau der Meßwertdatei ist in Kapitel B.2.1 dargestellt. Die Liste der Symbole, Formelzeichen und Programm-Variablen sind in Kapitel B.2.3 aufgelistet.

Folgende Stoffwerte und Konstanten werden benötigt:

- Rohrdurchmesser am Lufteintritt: $d_{Rohr} = 0.0563 \text{ m}$
- Blendendurchmesser: $d_{Bl} = 0.02498 \text{ m}$
- Isentropenexponent von Luft: $\kappa = 1.4$
- Gaskonstante von Luft: $R = 287.053 \text{ J/(kg K)}$
- Viskosität von Luft: $\eta_L = 18.24 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(m s)}$
- Dichte von Wasser: $\varrho_{H_2O} = 998.21 \text{ kg/m}^3$
- Erdbeschleunigung (Hamburg): $g_{HH} = 9.8136 \text{ m/s}^2$
- Erdbeschleunigung (allgemein): $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$

Zuerst wird der Barometerstand korrigiert (Absatz A).

$$p_u = f(p_{Bo}, p_{Bu}, T_B) \quad (4.21)$$

Der Wirkdruck an der Blende wird berechnet mit:

$$\Delta p_{Bl} = \Delta h_{Bl} \varrho_{H_2O} g_{HH} \quad (4.22)$$

Aufgrund der Meßgenauigkeit der zur Zeit verwendeten Meßtechnik ist:

$$p_{v,Bl} = p_u = p_1 \quad (4.23)$$

Die Temperatur an der Blende wird in Kelvin umgerechnet:

$$T_{Bl} = T_{Bl} + 273.15 \text{ K} \quad (4.24)$$

Der Massenstrom aus der Blendenmessung wird bestimmt über das Auswerteverfahren für Massenstrommessungen mit Drosselgeräten nach DIN EN ISO 5167 ff, siehe [1] oder [3]. Der Massenstrom lässt sich ganz allgemein ausdrücken durch:

$$\dot{m}_{Bl} = \dot{m}(p_{v,Bl}, \Delta p_{Bl}, T_{Bl}) \quad (4.25)$$

Die erforderlichen Gleichungen findet man im Anhang D.

4.2.3 Versuchsbericht

Der Versuchsbericht soll folgende Punkte beinhalten:

1. Ein Deckblatt mit:
 - Versuchsbezeichnung
 - Datum
 - Semester
 - Gruppe
 - Versuchsnummer
 - Namen der Versuchsteilnehmer einschließlich Matr.-Nr.
2. Inhaltsverzeichnis
3. Kurze Beschreibung des Versuchsaufbaus
4. Beschreibung der durchgeführten Versuche
5. Auswertung der Versuchsergebnisse entsprechend Absatz 4.2.2

Ein kompletter Versuchspunkt vor und hinter dem Gebläse einschließlich Korrektur des Barometerstandes und Blendenmessung wird zusätzlich von Hand vorge-rechnet. Die Gleichungen werden hingeschrieben, die Zahlen eingesetzt und das Ergebnis aufgeführt.

Da alle Versuchspunkte mit dem Auswerteprogramm ausgewertet werden, fällt die Überprüfung der von Hand gerechneten Werte leicht. Die Rechnung von Hand muß mit den Ergebnissen des Auswerteprogramms kontrolliert werden!

Die Übereinstimmung der beiden Rechnungen wird im Protokoll vermerkt! Falls die Übereinstimmung bestätigt wird aber nicht stimmt, wird der Versuchsbericht ohne weitere Korrektur als endgültig nicht anerkannt gewertet.

6. Diagramme:
 - $\dot{m} = f(p_4)$ bzw. $\dot{m} = f(n)$
 - p, V -Diagramme (für die Abgabe auf Papier: ein Versuchspunkt exemplarisch, als pdf-Datei: beliebig viele Diagramme)
7. Ausdruck der Ergebnisse des Auswerteprogrammes
8. Meßblätter
9. Teilnehmerliste

Der Versuchsbericht ist dazu gedacht, den Versuchsaufbau, den Ablauf des Versuches und seine Auswertung in Erinnerung zu behalten. Deshalb reicht eine kurze aber aussagekräftige Beschreibung. Das Abschreiben der Prüfstandsbeschreibung in eigenen Worten ist überflüssig.

Literaturverzeichnis

- [1] Vinnemeier, F.: Strömungslehre 1. Skript zur Vorlesung, HAW Hamburg, Fakultät TI, Dept. M+P, letzte Fassung.
- [2] Schröder, H.; Vinnemeier, F.: Thermodynamik. Skript zur Vorlesung, HAW Hamburg, Fakultät TI, Dept. M+P, letzte Fassung.
- [3] Vinnemeier, F.: Meßtechnik. Skript, HAW Hamburg, Fakultät TI, Dept. M+P, letzte Fassung.
- [4] Wilhl. Lambrecht KG: Betriebsanleitung Quecksilberbarometer nach Lambrecht. Ba No.: 604, Göttingen 12.85
- [5] DIN 1952: Durchflußmessung mit Blenden, Düsen und Venturirohren in voll durchströmten Rohren mit Kreisquerschnitt. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 1992.
- [6] DIN 19201: Durchflußmeßtechnik (Begriffe, Formelzeichen). Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 1989.
- [7] DIN 19214 Teil 1: Drosselgeräte mit Flansch-Druckentnahme, Nennweite 50 bis 500, Nenndruck 10 bis 100, Dichtungsart glatt. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 1985.
- [8] DIN 19214 Teil 2: Drosselgeräte mit Flansch-Druckentnahme, Nennweite 10 bis 400, Nenndruck 10 bis 100, Dichtungsart Vor- und Rücksprung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 1985.
- [9] DIN 19214 Teil 3: Drosselgeräte mit Flansch-Druckentnahme, Nennweite 10 bis 400, Nenndruck 64 bis 400, Dichtungsart Linse. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 1985.
- [10] DIN 19214 Teil 4: Drosselgeräte mit Flansch-Druckentnahme, Meßstrecken, Nennweite 10 bis 200. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 1985.
- [11] DIN 19214 Teil 5: Drosselgerät mit Meßflanschen, Länge der Entnahmestutzen und Einbaumaße zur Ermittlung des Platzbedarfs. Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 1983.
- [12] VDI/VDE Richtlinie 2040 Blatt 1: Berechnungsgrundlagen für die Durchflußmessung mit Blenden, Düsen und Venturirohren, Abweichungen und Ergänzungen zu DIN 1952. Verein Deutscher Ingenieure und Verein Deutscher Elektrotechniker, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 1991.
- [13] VDI/VDE Richtlinie 2040 Blatt 2: Berechnungsgrundlagen für die Durchflußmessung mit Blenden, Düsen und Venturirohren, Gleichungen und Gebrauchsformeln. Verein Deutscher Ingenieure und Verein Deutscher Elektrotechniker, Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 1987.

- [14] VDI/VDE Richtlinie 2040 Blatt 3: Berechnungsgrundlagen für die Durchflußmessung mit Blenden, Düsen und Venturirohren, Berechnungsbeispiele. Verein Deutscher Ingenieure und Verein Deutscher Elektrotechniker, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 1990.
- [15] VDI/VDE Richtlinie 2040 Blatt 4 (Entwurf): Berechnungsgrundlagen für die Durchflußmessung mit Drosselgeräten, Stoffwerte. Verein Deutscher Ingenieure und Verein Deutscher Elektrotechniker, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 1970.
- [16] VDI/VDE Richtlinie 2040 Blatt 5: Berechnungsgrundlagen für die Durchflußmessung mit Blenden, Düsen und Venturirohren, Meßunsicherheiten. Verein Deutscher Ingenieure und Verein Deutscher Elektrotechniker, Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 1989.
- [17] VDI/VDE Richtlinie 2041: Durchflußmessung mit Drosselgeräten, Blenden und Düsen für besondere Anwendungen. Verein Deutscher Ingenieure und Verein Deutscher Elektrotechniker, Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 1991.
- [18] Jordan-Engeln, Giesela; Reutter, Fritz: Formelsammlung zur numerischen Mathematik. 2. Auflage, Bibliographisches Institut, Mannheim 1976, ISBN 3-411-05106-X.

A Ermitteln des Barometerstandes

Der Barometerstand spielt bei der Auswertung von Versuchen eine große Rolle. Üblicherweise werden Drücke bei Versuchen als Differenzdrücke zum Umgebungsdruck gemessen. Um den in der Strömungslehre bzw. Thermodynamik verwendeten Drücken Rechnung zu tragen, muß auf die Differenzdrücke noch der Barometerstand addiert werden.

Damit werden zwei Meßwerte einschließlich ihrer Ungenauigkeiten addiert. Um den Einfluß der Ungenauigkeit der Barometerstandsablesung klein zu halten, gibt man sich viel Mühe, den Barometerstand so genau wie möglich zu messen. Dazu dient im ZET ein Quecksilbermanometer nach Lambrecht (Göttingen).

Im folgenden wird das Ablesen des Barometers und die notwendigen Korrekturrechnungen beschrieben.

A.1 Ablesen des Barometers

Bei der Ablesung eines Quecksilberpräzisionsbarometers werden folgende Werte notiert [4]:

- Druck Oberkante der Hg-Säule p_{Bo} in [$mmHg$],
- Druck Unterkante der Hg-Säule oder Kuppenhöhe p_{Bu} in [$mmHg$],
- Temperatur am Barometer T_B in $^{\circ}C$.

Mit diesen Meßwerten können der Temperatureinfluß und die Kapillareffekte korrigiert werden.

Bild A.1 zeigt das Hg-Barometer nach Lambrecht. Die schematische Darstellung in Bild A.2 dient zur Verdeutlichung der Ablesung. Die Ablesung der Werte von Kuppenoberkante p_{Bo} und Kuppenunterkante p_{Bu} ist im Bild beschrieben.

Die Temperatur am Barometer T_B wird an dem kleinen Quecksilberthermometer links in der Mitte des Barometers abgelesen.

A.2 Korrektur des Barometerstandes

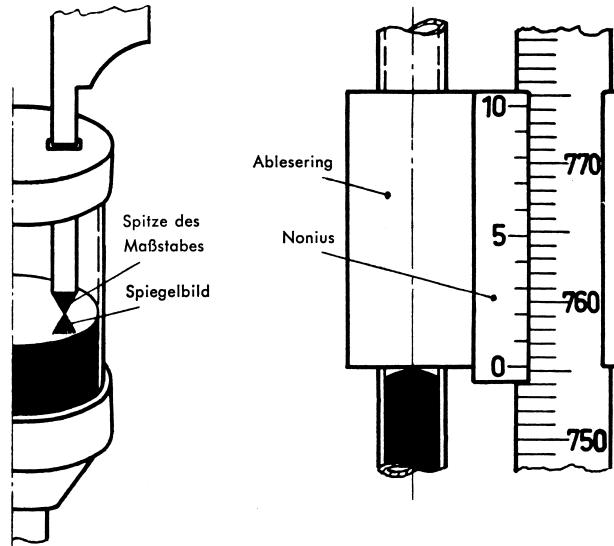
Im folgenden werden die Korrekturen beschrieben, die angewendet werden müssen, um einen korrekten Barometerstand zu erhalten:

1. Temperaturkorrektur

Die Länge der Quecksilbersäule ist abhängig von der Temperatur des Quecksilbers bei der Messung. Ebenso wird die Länge des Maßstabes von der Temperatur beeinflußt. Beide Einflüsse werden durch die Temperaturkorrektur auf $0^{\circ}C$ behoben.



Abbildung A.1: Ansicht des Quecksilberpräzisionsbarometers nach Lambrecht



Kuppenoberkante p_{Bo} :

Zuerst wird die Spitze auf die Quecksilberoberfläche aufgesetzt ohne einzutauchen. Danach wird die Unterkante des Ableserings mit Hilfe der Rändelschraube auf die Kuppenoberkante „aufgesetzt“. Danach wird an der Hauptskala der Wert in mm abgelesen. Im Bild sind das $p_{Bo} = 755 mm$. Die Nachkommastelle wird über den am Ablesering angebrachten Nonius abgelesen: Diejenige Linie des Nonius, die am besten mit einem Teilstrich der Hauptskala zusammenfällt, gibt die Nachkommastelle ($1/10 mmHg$) an. Im Bild sind $0.3 mmHg$, so daß sich eine Ablesung von $p_{Bo} = 755.3 mm$ ergibt.

Kuppenunterkante p_{Bu} :

Für den zweiten Wert wird über die Rändelschraube die Unterkante des Ableserings auf die Linie ausgerichtet, die durch die Berührung des Quecksilbers an der Innenseite des Glasrohres entsteht. Nach dem gleichen Verfahren wie oben wird der Wert p_{Bu} abgelesen.

Abbildung A.2: Schematische Darstellung zum Ablesen des Barometerstandes

Folgende Gleichung wird verwendet (p_{Bo} in $mmHg$, T_B in $^{\circ}C$):

$$K_{T_0} = -p_{Bo} \frac{182 \cdot 10^{-6} \cdot T_B - 11 \cdot 10^{-6} \cdot (T_B - 20)}{1 + [182 \cdot 10^{-6} \cdot T_B - 11 \cdot 10^{-6} \cdot (T_B - 20)]} \quad (\text{A.1})$$

Damit ergibt sich der temperaturkorrigierte Barometerstand:

$$p_{BT_0} = p_{Bo} + K_{T_0} \quad (\text{A.2})$$

2. Korrektur der Erdbeschleunigung

Der Normwert der Erdbeschleunigung beträgt $g = 9.80665 m/s^2$. Der lokale Wert von g ist abhängig von der geographischen Breite φ und der Lage des Meßortes H über dem Meeresspiegel. Aus diesen Daten wird der Korrekturfaktor K_g^* für die Erdbeschleunigung am Meßort berechnet.

Weiterrechnen mit Glg. (A.8).

Erläuterung zum Korrekturfaktor K_g^* :

Das ZET liegt auf einer geographischen Breite von $\varphi_{HH} = N 53^\circ 38' 53''$ und auf einer Höhe über dem Meeresspiegel von $H_{HH} = 21\text{ m}$.

Der erforderliche Korrekturwert $K_{g\varphi}$ in mmHg für den Breitengrad φ_{HH} berechnet sich mit dem temperaturkorrigierten Barometerstand p_{BT_0} nach:

$$K_{g\varphi}^* = \frac{9.80616}{9.80665} (1 - 0.002637 \cos(2\varphi)) - 1 \quad (\text{A.3})$$

Mit den oben angegebenen Werten für Hamburg ergibt sich der Korrekturfaktor zu:

$$K_{g\varphi}^* = 0.00073400 \quad (\text{A.4})$$

Die Höhe des Meßortes wird mit dem Korrekturfaktor K_{gH} berücksichtigt:

$$K_{gH}^* = -0.195 \cdot 10^{-6} \cdot H \quad (\text{A.5})$$

Mit den oben angegebenen Werten für Hamburg ergibt sich der Korrekturfaktor zu:

$$K_{gH}^* = -4.095 \cdot 10^{-6} = -0.000004095 \quad (\text{A.6})$$

und damit der gesamte Korrekturwert K_g^* zu:

$$K_g^* = K_{g\varphi}^* + K_{gH}^* = 7.2990638 \cdot 10^{-4} \quad (\text{A.7})$$

3. Korrektur der Kuppenhöhe

Der Korrekturfaktor für die Kuppenkorrektur aufgrund der Kapillardrepression ist K_K in mmHg und wird mit der Differenz Δp_{BK} in mmHg Tabelle A.1 entnommen.

$$\Delta p_{BK} = p_{Bo} - p_{Bu} \quad (\text{A.8})$$

Δp_{BK}	[mmHg]	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
K_K	[mmHg]	0.24	0.29	0.35	0.41	0.46	0.51	0.56	0.60
Δp_{BK}	[mmHg]	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	
K_K	[mmHg]	0.64	0.68	0.71	0.74	0.77	0.80	0.82	

Tabelle A.1: Korrekturwerte K_K für Hg-Barometer mit einem Rohrdurchmesser von 8 mm zur Korrektur der Kapillareffekte

Danach kann der korrigierte Barometerstand p_{BHg} in mmHg berechnet werden:

$$p_{BHg} = p_{BT_0} (1 + K_g^*) + K_K \quad (\text{A.9})$$

und mit der Dichte von Quecksilber ϱ_{Hg} bei $0^\circ C$ aus Tabelle A.2 und dem Normwert der Erdbeschleunigung ($g = 9.80665\text{ m/s}^2$) in Standardeinheiten umgerechnet werden:

$$p_B = p_{BHg} \varrho_{Hg}(0^\circ C) g \quad (\text{A.10})$$

Eine Beispielrechnung findet man in der Fußnote¹.

A.3 Stoffwerte von Quecksilber (Hg)

Tabelle A.2 zeigt die Dichte von Quecksilber (Hg) als Funktion der Temperatur.

¹Beispielrechnung zum Programmieren: $p_{Bo} = 760\text{ mmHg}$, $p_{Bu} = 758.9\text{ mmHg}$, $T_B = 18^\circ C$
Ergebnisse: $K_{T_0} = -2.498240802$, $p_{BT_0} = 757.5017592\text{ mmHg}$, $p_{BHg} = 758.654665\text{ mmHg}$,
 $p_B = 101145.5023\text{ N/m}^2$

T [°C]	ϱ_{Hg} [kg/m³]	T [°C]	ϱ_{Hg} [kg/m³]	T [°C]	ϱ_{Hg} [kg/m³]	T [°C]	ϱ_{Hg} [kg/m³]
-20.	13644.59	20.	13545.87	60.	13448.23	140.	13255.4
-15.	13632.18	25.	13533.61	70.	13423.96	160.	13207.6
-10.	13619.80	30.	13521.36	80.	13399.75	180.	13159.8
-5.	13607.43	35.	13509.13	90.	13375.59	200.	13112.1
0.	13595.08	40.	13496.92	100.	13351.5	220.	13064.5
5.	13582.75	45.	13484.73	110.	13327.4	240.	13016.9
10.	13570.44	50.	13472.55	120.	13303.4	260.	12969.2
15.	13558.14	55.	13460.38	130.	13279.4	280.	12921.5

Tabelle A.2: Dichte von Quecksilber als Funktion der Temperatur

A.4 Aufbau der Meßdatendatei

Die auf den Meßblättern aufgeschriebenen Meßwerte müssen nach dem Versuch — am besten auf einem der Rechner im Labor — unter dem Betriebssystem Linux mit Hilfe eines sogenannten Editors in eine Datei übertragen werden. Ein Textverarbeitungs- oder Tabellenkalkulationsprogramm führt bei dieser Aktion zu nicht brauchbaren Ergebnissen aber sehr viel Arbeit! Am besten benutzt man zur Eingabe der Meßwerte den Editor „`kate`“ oder „`gedit`“. „`kate`“ ist auf jedem Labor-Rechner in der Startleiste installiert.

Der Aufbau der Meßwert-Datei ist so einfach wie möglich gehalten und ist dem Aufbau der Meßblätter angepaßt.

Der Name der Meßwertdatei ist die Versuchsnummer:

`<versuchsnummer.d>`

Die Extension ist immer `.d`. Im weiteren Verlauf des Anhangs wird der Platzhalter `<messwertdatei.d>` benutzt, um nicht an einer bestimmten Datei festzuhalten.

Die 1. Zeile der Meßwertdatei enthält immer die Versuchsnummer, das Versuchsdatum und die Uhrzeit. Die Uhrzeit ist der Beginn des Viertels, in dem das Labor abläuft. Die 3 Werte sind getrennt durch ein Tabulator-Zeichen (im Weiteren mit `<tab>` bezeichnet). Tabulatorzeichen sind als Zeichen unsichtbar, füllen aber den Abstand zwischen 2 Werten mit Leerzeichen entsprechend der Festlegung des Tabulator-Zeichen aus. Wenn das Tabulator-Zeichen auf 10 Zeichen eingestellt ist, sieht die 1. Zeile so aus:

`gvert13102 25.07.2013 08:15`

Da die ersten beiden Einträge 10 oder mehr Zeichen enthalten, fangen der zweite und dritte Eintrag erst bei Position 20 bzw. 40 an.

Der weitere Aufbau der Meßwertdatei ist bei den jeweiligen Auswerteprogrammen beschrieben. Folgende Anmerkungen gelten für alle Meßwertdateien:

- Zwischen die einzelnen Einträge (Zahlen) wird immer ein `<tab>` eingefügt.
- Als Dezimalzeichen kann ein Komma `,` oder ein Punkt `.` verwendet werden. Das erlaubt, die Zahlentastatur rechts auf der Tastatur zu benutzen.
- Es gibt niemals Leerzeilen.
- Dem jeweils beschriebenen Aufbau muß unbedingt gefolgt werden.

- Die Meßwertdatei wird in einem Ordner, der den Namen der Versuchsnummer hat, abgelegt. Man findet den Ordner als Unterordner vom Ordner **versuche** im Home-Verzeichnis des Benutzers **stlabstud** auf den Rechnern des Labors unter dem Betriebssystem Linux.

Beispiel: Die Versuchsnummer ist: **gvert13102**. Dann speichert man die Meßwertdatei als Benutzer **stlabstud** unter dem Pfad:

versuche/gvert/gvert13102/gvert13102.d

Das Slash „/“ ist bei Linux das Trennzeichen zwischen einzelnen Verzeichnissen in Pfad-Namen. Einige Linux-Befehle findet man im Kapitel E.

Man gelangt über den Befehl:

```
cd ~/versuche/gvert/gvert13102
```

in das Versuchsverzeichnis.

Der Editor „**kate**“ sollte noch für die Meßwertdateien konfiguriert werden, falls das noch nicht geschehen ist.

Nach dem Starten von „**kate**“ geht man ins Menü „Einstellungen“ und dann weiter zu „Kate einrichten“. In dem dann erscheinenden Fenster findet man auf der linken Seite „Editorkomponente“ und darin „Bearbeiten“.

Im Karteikartenreiter „Allgemein“: Den Zeilenumbruch sollte man auf 160 einstellen.

Im Karteikartenreiter „Einrückung“: Einrücken mit Tabulatoren einstellen. Die Tabulatorweite auf 10 Zeichen setzen.

Dann O.K. drücken.

B Auswerteprogramme

B.1 Auswerten der Geschwindigkeitsverteilung

B.1.1 Erstellen der Meßwertdatei

Zuerst wird die erste Seite in die Meßwertdatei übertragen. Die erste Zeile enthält die Versuchsnummer, das Versuchsdatum und die Uhrzeit entsprechend der Erläuterungen in Absatz A.4.

In der zweiten Zeile folgt der Barometerstand, bestehend aus p_{Bo} , p_{Bu} und T_B .

In der dritten Zeile wird die Anzahl der Meßpunkte (Anzahl der Zeilen auf Seite 1) eingegeben.

Danach folgen die Zeilen, so wie sie auf dem Meßblatt stehen einschließlich der Seitenzahlen für die Geschwindigkeitsverteilungen.

Entsprechend der Seitenzahlen für die Geschwindigkeitsverteilungen folgen die Meßwerte für die Geschwindigkeitsverteilungen. Die erste Zeile enthält die Seitenzahl des Meßblattes der Geschwindigkeitsverteilung, die Anzahl der Meßpositionen und der Offset der Anzeige des dynamischen Druckes. Danach folgen Zeilenweise die Meßwerte, wie sie auf dem Meßblatt stehen.

Auf diese Art werden nacheinander alle Meßblätter in die Datei übertragen.

Als Beispiel sind aus Platzgründen die ersten drei Meßblätter vom Versuch `gvert13102` hier abgebildet. Die Bilder B.1 bis B.3 zeigen die Meßblätter und Bild B.4 zeigt den Teil der entsprechenden Meßwertdatei.

Das Programm `gvert` liefert die Auswertung für die am Gebläse gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen.

B.1.2 Programmaufruf

Normalerweise wird `gvert` aufgerufen mit:

```
gvert -vp <messwertdatei.d>
```

oder gleichwertig:

```
gvert -v -p <messwertdatei.d>
```

Die Option `-v` liefert etwas zum Zuschauen. Die Option `-p` erzeugt Diagramme, die am Bildschirm angesehen werden können.

Sind die Meßwerte einwandfrei bzw. von Tippfehlern bereinigt, können Diagramme auch als Bilddateien erzeugt werden mit dem zusätzlichen Befehl:

```
gvert-ausdruck <messwertdatei.d>
```

Versuch Geschwindigkeitsverteilung vor und hinter dem Gebläse

Versuch Geschwindigkeitsverteilung vor und hinter dem Gebläse

Versuchsnummer: gvert /3/02		Datum: 17.07.2013		Uhrzeit: 10:05		Seite: 22, 5		1 von: 9	
$p_{Bo} = 766,0 \text{ mmHg}$		$p_{Bu} = 765,0 \text{ mmHg}$		$[mmHg]$		$T_B = 22,5^\circ C$			
n	Δh_e	Δh_{ea}	T_e	T_a	$\Delta h_{v,Bi,l}$	$\Delta h_{v,Bi,r}$	Δh_{Bi}	T_{Bi}	Meßblatt, Seite
[U/min]	[$mmWS$]	[$mmWS$]	[$^\circ C$]	[$^\circ C$]	[$mmWS$]	[$mmWS$]	[$mmWS$]	[$^\circ C$]	vor Gebl. hinter Gebl.
3998	-17	67,7	22,3	23,3	172,5	231,0	95,3	23,0	2 3
4001	-735	74,1	22,4	23,5	166,0	243,5	74,9	23,2	4 5
4000	-709	78,5	22,4	23,6	162,0	243,0	57,3	23,3	6 7
4002	-8,5	81,8	22,5	23,7	157,0	252,5	43,2	23,3	8 9

Bemerkungen:

Hinweise:

DE: Diphthong; C: Consonant; V: Vowel; S: Syllable.

Die Eintragung für Versuchsnr., Datum und Uhrzeit werden auf alle weiteren Meßblätter für diesen Versuch übertragen. Die Versuchsnr. wird von einem Labormitarbeiter ausgegeben. Datum und Uhrzeit entsprechen dem Beginn der Laborveranstaltung (Viertel).

In die letzten beiden Spalten dieses Blattes wird die Seitenzahl des Formblattes für die zugehörige Geschwindigkeitsverteilung eingetragen.

Abbildung B.1: Meßblatt 1 des Versuches **gvert13102**

Versuch Geschwindigkeitsverteilung vor dem Gebläse							
Versuchsnummer: gvert13102		Datum: 17.07.2013		Uhrzeit: 10:05		Seite: 2 von: 9	
$\Delta p_{dyn,e,offset} = +0,030 \text{ hPa}$							
Position	$\Delta p_{dyn,e}$	Bemerkungen					
[–]	[hPa]						
1.	1,223	1,200	1,206	1,337	1,255	1,263	1,006
2.	1,258	1,418	1,252	1,270	1,051	1,289	1,313 Sonde Schief position
3.	1,482	1,281	1,310	1,302	1,341	1,323	1,290
4.	1,411	1,468	1,416	1,251	1,368	1,506	1,492 1,396
5.	1,510	1,378	1,333	1,442	1,524	1,536	1,526
6.	1,473	1,506	1,499	1,378	1,201	1,346	1,436
7.	1,006	1,001	0,921	0,890	0,989	0,924	1,028

Bemerkungen:
starker 10:30 Uhr beständig 10:38 Uhr

Hinweise:

Die Einträge für Versuchsnummer, Datum und Uhrzeit entsprechen denen von Messblatt 1.

Die Position 1 der Prandtl-Sonde ist immer unten! Pro Messblatt wird nur eine Geschwindigkeitsverteilung eingetragen.

Auf diesem Messblatt können für jede Position der Sonde bis zu 8 Werte eingetragen werden. Die Anzahl der Messwerte pro Position kann unterschiedlich sein.

Die Seitenzahl dieses Blattes wird in die entsprechende Zeile des Messblattes 1 eingetragen.

Die erste und letzte Spalte dieses Messblattes wird nicht in die Auswertedatei übertragen.

Abbildung B.2: Messblatt 2 des Versuches gvert13102

Versuch Geschwindigkeitsverteilung hinter dem Gebläse							
Versuchnummer: gvert13102		Datum: 17.07.2013		Uhrzeit: 10:05		Seite:	3 von: 9
$\Delta p_{dyn,a,offset} = -0,13 \text{ hPa}$							
Position	$\Delta p_{dyn,a}$						
[m]	[hPa]						
1.	1,06	0,98	0,95	0,99	0,98	0,97	0,99
2.	1,17	1,22	1,17	1,17	1,16	1,14	1,16
3.	1,28	1,28	1,24	1,23	1,29	1,27	1,24
4.	1,27	1,26	1,25	1,27	1,27	1,25	1,24
5.	1,20	1,17	1,14	1,20	1,18	1,20	1,18
6.	1,23	1,25	1,21	1,24	1,21	1,19	1,24
7.	1,19	1,20	1,20	1,19	1,17	1,22	1,20
8.	1,17	1,19	1,22	1,16	1,20	1,16	1,18
9.	1,14	1,15	1,10	1,13	1,14	1,14	1,16
10.	1,04	1,00	1,01	0,99	1,03	0,97	1,02
11.	0,20	0,21	0,20	0,22	0,23	0,26	0,23

Bemerkungen:

Hinweise:
Die Einträge für Versuchsnummer, Datum und Uhrzeit entsprechen denen von Messblatt 1.
Die Position 1 der Prandtl-Sonde ist immer unten! Pro Messblatt wird nur eine Geschwindigkeitsverteilung eingetragen.
Auf diesem Messblatt können für jede Position der Sonde bis zu 8 Werte eingetragen werden. Die Anzahl der Messwerte pro Position kann unterschiedlich sein.
Die Seitenzahl dieses Blattes wird in die entsprechende Zeile des Messblattes 1 eingetragen.
Die erste und letzte Spalte dieses Messblattes wird nicht in die Auswertedatei übertragen.

Abbildung B.3: Messblatt 3 des Versuches gvert13102

gvert13102		17.07.2013		10:05							
766	765	22,5									
4											
3998	-17	67,7	22,3	23,3	172,5	231	95,3	23	2	3	
4001	-13,5	74,1	22,4	23,5	166	243,5	74,9	23,2	4	5	
4000	-10,9	78,5	22,4	23,6	162	243	57,3	23,3	6	7	
4002	-8,5	81,8	22,5	23,7	157	252,5	43,2	23,3	8	9	
2	7	0,03									
1,223	1,2	1,206	1,337	1,255	1,263	1,267	1,006				
1,258	1,418	1,252	1,27	1,051	1,289	1,311	1,313				
1,482	1,281	1,31	1,302	1,341	1,323	1,241	1,29				
1,411	1,468	1,416	1,251	1,368	1,506	1,492	1,396				
1,51	1,378	1,333	1,442	1,524	1,536	1,528	1,526				
1,473	1,506	1,499	1,378	1,201	1,346	1,506	1,436				
1,006	1,001	0,921	,89	,989	,924	1,067	1,028				
3	11	-,13									
1,06	,98	,95	,99	,98	,97	1	,99				
1,17	1,22	1,17	1,17	1,16	1,14	1,2	1,16				
1,28	1,28	1,24	1,23	1,29	1,27	1,21	1,24				
1,27	1,26	1,25	1,27	1,27	1,25	1,23	1,24				
1,2	1,17	1,14	1,2	1,18	1,2	1,21	1,18				
1,23	1,25	1,21	1,24	1,21	1,19	1,24	1,16				
1,19	1,2	1,2	1,19	1,17	1,22	1,2	1,16				
1,17	1,19	1,22	1,16	1,2	1,16	1,18	1,14				
1,14	1,15	1,1	1,13	1,14	1,14	1,18	1,16				
1,04	1	1,01	,99	1,03	,97	1,02	1,03				
,8	,81	,8	,82	,83	,86	,83	,77				
...											
...											

Abbildung B.4: Anfang der Meßwertdatei des Versuches gvert13102

Der Befehl liefert die Ausgabedatei als .ps- und als .pdf-Datei. Die Diagramme werden als .jpg-, .epsf und .pnm-Dateien erzeugt.

Wird das Programm ohne Parameter aufgerufen, gibt es eine kurze Hilfe zum Aufruf aus:

```
Usage: gvert [ Optionen ] <datei.d>
```

Optionen:

- [-l <datei>] Dateiname fuer Ausgabe. Default: <datei.lpr>
Diese Datei ist fuer das Drucken gedacht.
- [-p] Diagramme mit Ergebnissen erzeugen
In diesem Fall gelten alle Optionen von fmvplot
- [-v | --verbose] gibt Meldungen aus -vv gibt mehr Meldungen aus
- [--version] Programm gibt Versionsnummer aus und endet, ohne weitere Aktionen

B.1.3 Variablenbezeichnungen und Symbole

Folgende Formelzeichen, Symbole und Variablenbezeichnungen werden für diesen Versuch benutzt:

Δh_{Bo}	pbo	mmHg	Barometerstand Kuppenoberkante
Δh_{Bu}	pbu	mmHg	Barometerstand Kuppenunterkante
T_B	Tb	°C	Temperatur am Barometer
p_u, p_B	pu, pb	N/m ² , bar	korrigierter Barometerstand, Umgebungsdruck
n	n	U/min	Drehzahl des Gebläses
Δh_{ea}	dhea	mmWS	Höhenunterschied am Betz-Manometer für die Messung der Druckerhöhung durch das Gebläse Druckdifferenz zwischen Aus- und Eintritt ($p_a - p_e$)
Δh_e	dhe	mmWS	Höhenunterschied an der U-Säule am Gebläseeintritt für die Messung des statischen Druckes am Gebläseeintritt p_e
T_e	Te	°C, K	Temperatur am Eintritt in das Gebläse
T_a	Ta	°C, K	Temperatur am Austritt aus dem Gebläse
T_{Bl}	TBl	°C, K	Temperatur an der Blende
$h_{v,BL,l}$	hvBll	mmWS	Druck vor der Blende, linker Schenkel der U-Säule
$h_{v,BL,r}$	hvBlr	mmWS	Druck vor der Blende, rechter Schenkel der U-Säule
Δh_{Bl}	dhBl	mmWS	Höhendifferenz am Betzmanometer für den Wirkdruck
p_e	pe	N/m ²	Druck am Eintritt in das Gebläse
c_e	ce	m/s	Geschwindigkeit am Eintritt in das Gebläse
ϱ_e	rhoe	kg/m ³	Dichte am Eintritt in das Gebläse
Re_e	ree	—	Reynolds-Zahl am Eintritt in das Gebläse
Δp_{ea}	dpea	N/m ²	Druckdifferenz über das Gebläse
p_a	pa	N/m ²	Druck am Austritt aus dem Gebläse
c_a	ca	m/s	Geschwindigkeit am Austritt aus dem Gebläse
ϱ_a	rhoa	kg/m ³	Dichte am Austritt aus dem Gebläse
Re_a	rea	—	Reynolds-Zahl am Austritt aus dem Gebläse
$p_{v,Bl}$	pvBl	N/m ²	Druck vor der Blende
Δp_{Bl}	dpBl	N/m ²	Wirkdruck
\dot{m}_{Bl}	mpktBl	kg/s	Massenstrom durch die Blende
\dot{V}_{Bl}	vpktBl	m ³ /s	Volumenstrom durch die Blende
Re_{Bl}	reBl	—	Reynolds-Zahl an der Blende
\bar{c}_v	cvm	m/s	mittlere Geschwindigkeit vor dem Gebläse
Re_v	rev	—	Reynolds-Zahl am Eintritt in das Gebläse gebildet mit \bar{c}_v
\dot{m}_v	mpktv	kg/s	Massenstrom am Eintritt in das Gebläse gebildet mit \bar{c}_v
$\frac{\dot{m}_{Bl} - \dot{m}_v}{\dot{m}_{Bl}}$	mpvrel	—	Abweichung des Massenstromes vor dem Gebläse zum Massenstrom an der Blende
\bar{c}_h	chm	m/s	mittlere Geschwindigkeit hinter dem Gebläse

Re_h	reh	—	Reynolds-Zahl am Austritt aus dem Gebläse gebildet mit \bar{c}_v
\dot{m}_h	mpkth	kg/s	Massenstrom am Austritt aus dem Gebläse gebildet mit \bar{c}_h
$\frac{\dot{m}_{Bl} - \dot{m}_h}{\dot{m}_{Bl}}$	mphrel	—	Abweichung des Massenstromes hinter dem Gebläse zum Massenstrom an der Blende
$\Delta p_{dyn,v,offs}$	pdynvoffs	hPa	Offset am elektr. Differenzdruckaufnehmer vor dem Gebläse
y_v	yv	mm	Position der Prandtl-Sonde vor dem Gebläse von unten gemessen
$p_{dyn,v,m}$	pdynvm	hPa	dynamischer Druck vor dem Gebläse an jedem Meßpunkt y_v (mehrere Werte für Mittelwertbildung)
$p_{dyn,v}$	pdynv	hPa	dynamischer Druck vor dem Gebläse an jedem Meßpunkt y_v aus der Mittelwertbildung
c_v	cv	m/s	Geschwindigkeit vor dem Gebläse an jeder Sondenposition aus dem dynamischen Druck $p_{dyn,v}$
$\Delta p_{dyn,h,offs}$	pdynhoff	hPa	Offset am elektr. Differenzdruckaufnehmer hinter dem Gebläse
y_h	yh	mm	Position der Prandtl-Sonde hinter dem Gebläse von unten gemessen
$p_{dyn,h,m}$	pdynhm	hPa	dynamischer Druck hinter dem Gebläse an jedem Meßpunkt y_h (mehrere Werte für Mittelwertbildung)
$p_{dyn,h}$	pdynh	hPa	dynamischer Druck hinter dem Gebläse an jedem Meßpunkt y_h aus der Mittelwertbildung
c_h	ch	m/s	Geschwindigkeit hinter dem Gebläse an jeder Sondenposition aus dem dynamischen Druck $p_{dyn,h}$

B.2 Auswertung der p , V -Diagramme am Kolbenverdichter

B.2.1 Erstellen der Meßwertdatei

Der Name der Meßwertdatei lautet: <versuchsnummer>.d, z.B. kvd-pv14208.d. Die Versuchsnummer steht auf dem Meßblatt.

Die Meßwertdatei <versuchsnummer>.d wird im Verzeichnis

```
versuche/kvd-pv/<versuchsnummer>
```

aus der sicht des HOME-Verzeichnisses abgespeichert. Existiert das Verzeichnis noch nicht, wird es mit dem Befehl:

```
mkdir -p versuche/kvd-pv/<versuchsnummer>
```

erzeugt. In dieses Verzeichnis gelangt man später für die Anwendung des Auswerteprogramms kvd-pv mit dem Befehl:

```
cd ~/versuche/kvd-pv/<versuchsnummer>
```

Zum Aufbau der Meßwertdatei:

In der ersten Zeile stehen die Versuchsnummer, das Datum des Versuches und die Uhrzeit (Anfangszeit des Viertels) entsprechend Kapitel A.4.

In die zweite Zeile wird der Barometerstand eingetragen, bestehend aus Δh_{Bo} , Δh_{Bu} und T_B .

In die dritte Zeile wird nur ein Steuerungswert für das Auswerteprogramm eingetragen:

n wenn die Drehzahl bei konstanter Stellung des Drosselventils verändert wurde

dv wenn das Drosselventil bei konstanter Drehzahl verstellt wurde

Die vierte Zeile enthält nur die Zahl der Versuchspunkte (gleich Anzahl der Zeilen auf dem Meßblatt).

Alle weiteren Zeilen enthalten die Zeilen mit Meßwerten, die auf den Meßblättern aufgeschrieben worden sind. Die Reihenfolge entspricht der Reihenfolge auf den Meßblättern. Die Nummern der Dateien mit den dynamischen Drücken werden mit Komma getrennt ohne Leerstellen hinteinander geschrieben. Pro Versuchspunkt wird eine Zeile geschrieben.

Die Meßwerte sind wie üblich durch ein Tabulator-Zeichen <tab> getrennt.

Bild B.5 zeigt das Meßblatt, das beim Versuch ausgefüllt wird. Bild B.6 zeigt die eingetippte Meßwertdatei kvd-pv13213.d.

B.2.2 Programmaufruf

Normalerweise wird das Auswerteprogramm kvd-pv aufgerufen mit:

```
kvd-pv -vp <messwertdatei.d>
```

Versuch p , V-Diagramm am Kolbenverdichter

Versuch p, V-Diagramm am Kolbenverdichter						
Versuchsnr: kvd-pv 132 13		Datum: 21.11.2013		Uhrzeit: 15:45		Seite: 1 von: 1
$p_{Bo} = 757,0$	[mmHg]	$p_{Bu} = 756,1$	[mmHg]	$T_B = 19,2$	[°C]	
n	T_{Bu}	T_1	T_2	T_3	T_4	
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	
1300	13,2	20,2	100,1	55,8	30,7	31,0
1312	13,2	20,1	104,8	57,1	101,8	28,5
1302	13,4	20,1	103,3	57,4	111,6	31,3
1300	13,4	20,0	112,8	57,9	118,0	31,7
1307	13,4	20,1	118,6	58,2	127,7	41,8
1312	13,3	20,2	120,8	59,5	134,9	45,6
1301	13,2	20,3	128,4	59,8	139,4	41,7

Bemerkungen:

Hinweise:

Die Einträge für Versuchsnummer, Datum und Uhrzeit werden auf alle weiteren Meßblätter für diesen Versuch übertragen.
Hinweis:

Die Versuchsnr. wird von einem Labormitarbeiter ausgegeben. Datum und Uhrzeit entsprechen dem Beginn der Laborveranstaltung (Viertel).

Die Versuchsnummer wird von einem Labormitarbeiter ausgegeben. Datum und Uhrzeit entsprechen dem Beginn der Laborveranstaltung

Die Versuchsnummer wird von einem Labormitarbeiter ausgegeben. Datum und Uhrzeit entsprechen dem Beginn der Laborveranstaltung

Abbildung B.5: Meßblatt für Versuch kvd-pv13213

kvd-pv13213		21.11.2013		15:45							
757	756,1	19,2									
dv											
7											
1300	19,2	20,2	100,1	55,8	90,7	2,9	8,7	31	58		
1312	19,2	20,1	104,8	57,1	101,8	3,27	12,3	28,5	59,60		
1302	19,4	20,1	109,3	57,4	111,6	3,63	16,4	27,2	61,62		
1300	19,4	20	112,9	57,9	118	3,76	18,7	25,8	63,64,65		
1307	19,4	20,1	118,6	58,2	127,7	4,28	23,2	23,8	66,67		
1312	19,3	20,2	124,8	59,5	134,9	4,56	26,1	22,6	68,69		
1301	19,2	20,3	128,4	59,8	139,4	4,74	28,8	21,2	70,71		

Abbildung B.6: Meßwertdatei kvd-pv13213.d für Versuch kvd-pv13213

oder gleichwertig:

```
kvd-pv -v -p <messwertdatei.d>
```

Die Option **-v** liefert etwas zum Zuschauen. Die Option **-p** erzeugt Diagramme, die am Bildschirm angesehen werden können, wenn die Zahl der Meßpunkte 3 oder höher ist.

Sind die Meßwerte einwandfrei bzw. von Tippfehlern bereinigt, können Diagramme auch als Bilddateien erzeugt werden mit dem zusätzlichen Befehl:

```
kvd-pv-ausdruck <messwertdatei.d>
```

<messwertdatei.d> ist ein Platzhalter für den Dateinamen, der hier mit der Versuchsnummer gebildet wird (z.B. **kvd-pv13204.d**). Der Befehl liefert die Ausgabedatei als **<messwertdatei>.ps** und als **<messwertdatei>.pdf** Datei. Die Diagramme werden als **<messwertdatei>.png**, **<messwertdatei>.epsf** und **<messwertdatei>.pnm** Dateien erzeugt.

Wird das Programm ohne Parameter aufgerufen, gibt es eine kurze Hilfe zum Aufruf aus:

```
Usage: kvd-pv [ Optionen ] <messwertdatei.d>
```

Optionen:

[-l <datei>]	Dateiname fuer Ausgabe. Default: <datei.lpr> Diese Datei ist fuer das Drucken gedacht.
[-p]	Diagramme mit Ergebnissen erzeugen In diesem Fall gelten alle Optionen von fmplot
[-v --verbose]	gibt Meldungen aus -vv gibt mehr Meldungen aus
[--version]	Programm gibt Versionsnummer aus und endet, ohne weitere Aktionen

B.2.3 Variablenbezeichnungen und Symbole

Folgende Formelzeichen, Symbole und Variablenbezeichnungen werden für diesen Versuch benutzt:

Δh_{Bo}	pbo	$mmHg$	Barometerstand Kuppenoberkante
Δh_{Bu}	pbu	$mmHg$	Barometerstand Kuppenunterkante
T_B	Tb	$^{\circ}C$	Temperatur am Barometer
p_u, p_B	pu, pb	$N/m^2, bar$	korrigierter Barometerstand, Umgebungsdruck
n	n	U/min	Drehzahl des Verdichters
Δh_{Bl}	dhBl	$mmWS$	Höhendifferenz am Betzmanometer für den Wirkdruck
T_{Bl}	TBl	$^{\circ}C, K$	Temperatur an der Blende
$p_{v,Bl}$	pvBl	N/m^2	Druck vor der Blende = p_u
Δp_{Bl}	dpBl	N/m^2	Wirkdruck
\dot{m}_{Bl}	mpktBl	kg/s	Massenstrom durch die Blende
V_{Bl}	vpktBl	m^3/s	Volumenstrom durch die Blende
p_1	p1	N/m^2	Druck vor der 1. Stufe des Kompressors
T_1	t1	$^{\circ}, K$	Temperatur vor der 1. Stufe des Kompressors
T_2	t2	$^{\circ}, K$	Temperatur am Austritt der 1. Stufe des Kompressors
p_{23}	p23	N/m^2	Druck zwischen der 1. und 1. Stufe des Kompressors
T_3	t3	$^{\circ}, K$	Temperatur vor der 2. Stufe des Kompressors
p_4	p4	N/m^2	Druck am Austritt der 2. Stufe des Kompressors
T_4	t4	$^{\circ}, K$	Temperatur am Austritt der 2. Stufe des Kompressors
s_{DV}	sdv	%	Stellung des Drosselventils hinter dem Kompressor

C Vorgehensweise bei der Versuchsauswertung

In diesem Kapitel werden alle Befehle aufgeführt die in der Kommandozeile (shell) eingegeben werden müssen, damit die Versuchsauswertung im richtigen Verzeichnis durchgeführt werden kann.

Als Beispiel wird hier die Versuchsauswertung für die Geschwindigkeitsverteilung mit der Versuchsnummer `gvert1401` benutzt.

C.1 Eintippen der Meßwertdatei

Der erste Schritt ist die Erstellung der Meßwertdatei.

Wie im Absatz B.1 beschrieben, müssen die Meßwerte eingetippt werden. Dazu wird der Editor „Kate“ benutzt, der in der Startleiste am unteren Bildschirmrand zu finden ist. Das Symbol ist ein Blatt Papier mit einem Bleistift.

Ist die Datei eingetippt worden, muß sie im richtigen Verzeichnis gespeichert werden. Im Beispiel ist das:

```
Persönlicher Ordner → versuche → gvert → gvert14101
```

Ist das Verzeichnis `gvert14101` nicht vorhanden, kann man es über die rechte Maustaste wie bei Windows erzeugen. Das Verzeichnis sollte vorhanden sein, da sich in diesem Verzeichnis auch die eingescannten Meßblätter befinden.

Der Dateiname für die Meßwertdatei lautet hier:

```
gvert14101.d
```

Im Editor „Kate“ nutzt man dazu den Menüpunkt „Speichern unter“.

C.2 Benutzen des Auswerteprogrammes

Für das Starten des Auswerteprogrammes wird ein Terminalfenster, das Konsole genannt wird, benötigt. Ist kein Terminalfenster geöffnet, findet man das Symbol — Bildschirm — dazu auf der Startleiste.

In dem Terminalfenster läuft die Kommandozeile (bei Linux oder Unix heißt sie shell). Die wichtigsten Befehle kann man in Kapitel E beschrieben.

Zuerst wird in das Versuchsverzeichnis `gvert14101` gewechselt:

```
cd ~/versuche/gvert/gvert14101
```

Dieser Befehl führt direkt in das Versuchsverzeichnis, egal wo man sich vorher aufgehalten hat. Man erkennt es am „Prompt“. Ganz links in der Kommandozeile steht:

```
stlabstud@stli02 gvert14101>
```

Das dritte Wort — hier im Beispiel `gvert14101` — gibt das Verzeichnis an, in dem man sich gerade befindet. Wenn man diesen Prompt sieht, ist man an der richtigen Stelle!

Möchte man sehen, welche Dateien sich in diesem Verzeichnis befinden, kann man das mit dem Befehl `ls` in der Kurzform, die nur die Dateinamen liefert, und mit dem Befehl `ll` in der Langform, die alle Informationen über die Dateien liefert, tun.

Damit das Skript nicht so lang wird, wird hier nur das Beispiel für die Kurzform angegeben (Bild C.1). In diesem Beispiel ist die Auswertung schon komplett fertig. Die Teilnehmerliste fehlt aber.

```
stlabstud@stli02 gvert14101> ls
gvert14101-auswertung-001.epsf      gvert14101-diagramm-004.epsf
gvert14101-auswertung-001.pbm.gz    gvert14101-diagramm-004.png
gvert14101-auswertung-001.png       gvert14101-diagramm-004.ppm.gz
gvert14101-auswertung-002.epsf      gvert14101-messblaetter.pdf
gvert14101-auswertung-002.pbm.gz    gvert14101-messblatt-01.epsf
gvert14101-auswertung-002.png       gvert14101-messblatt-01.pbm.gz
gvert14101-auswertung-003.epsf      gvert14101-messblatt-01.png
gvert14101-auswertung-003.pbm.gz    gvert14101-messblatt-02.epsf
gvert14101-auswertung-003.png       gvert14101-messblatt-02.pbm.gz
gvert14101-auswertung-004.epsf      gvert14101-messblatt-02.png
gvert14101-auswertung-004.pbm.gz    gvert14101-messblatt-03.epsf
gvert14101-auswertung-004.png       gvert14101-messblatt-03.pbm.gz
gvert14101-auswertung.lpr          gvert14101-messblatt-03.png
gvert14101-auswertung.pdf          gvert14101-messblatt-04.epsf
gvert14101-auswertung.ps           gvert14101-messblatt-04.pbm.gz
gvert14101.d                         gvert14101-messblatt-04.png
gvert14101-diagramm-001.epsf      gvert14101-messblatt-05.epsf
gvert14101-diagramm-001.png       gvert14101-messblatt-05.pbm.gz
gvert14101-diagramm-001.ppm.gz    gvert14101-messblatt-05.png
gvert14101-diagramm-002.epsf      gvert14101-messblatt-06.epsf
gvert14101-diagramm-002.png       gvert14101-messblatt-06.pbm.gz
gvert14101-diagramm-002.ppm.gz    gvert14101-messblatt-06.png
gvert14101-diagramm-003.epsf      gvert14101-messblatt-07.epsf
gvert14101-diagramm-003.png       gvert14101-messblatt-07.pbm.gz
gvert14101-diagramm-003.ppm.gz    gvert14101-messblatt-07.png
stlabstud@stli02 gvert14101>
```

Abbildung C.1: Ausgabe des Befehls `ls`

Nach dem Speichern der Meßwertdatei und dem Wechsel in das Versuchsverzeichnis kann das Auswerteprogramm gestartet werden:

```
gvert -vp gvert14101.d
```

Das Programm erzeugt einige Diagramme in einzelnen Fenstern. Faßt man die Fenster an der oberen dicken Begrenzung an, kann man sie verschieben. Klicken in das Diagramm beendet die Anzeige, und das Diagramm verschwindet.

Jetzt werden an Hand der Diagramme die Meßwerte überprüft. Grobe Tippfehler oder Meßfehler findet man so am schnellsten. An den vielleicht vorhandenen Ausreißern können die eingetippten Meßwerte überprüft und gegebenenfalls — in dem noch laufenden Editor — korrigiert werden. Nach dem Speichern der Datei kann das Auswerteprogramm erneut aufgerufen werden (z.B. mit der Pfeiltaste ↑).

Ist man mit der Auswertung zufrieden, müssen noch die Dateien produziert werden, die für die weiteren Arbeiten, wie z.B. Versuchsbericht benötigt werden. Das geschieht mit dem Befehl:

```
gvert-ausdruck gvert14101.d
```

Dieser Befehl benötigt einige Zeit. Es laufen auch jede Menge Informationen über das Fenster. Am Schluß findet man Diagramme und die Tabellen des Auswerteprogramms als Bilder für jedes Blatt bzw. Diagramm in verschiedenen Formaten vor.

Diese Dateien können dann mit ftp (File Transfer Protocol) von zu Hause aus auf den eigenen Rechner kopiert werden.

Die hier in diesem Kapitel angegebenen Befehle gelten auch für die anderen Versuche, deren Auswertung in Anhang B aufgeführt sind. Mehr zu Linux-Befehlen findet man in Anhang E.

D Massenstrom- und Volumenstrommessung

Die meßtechnische Ermittlung des momentanen, durch einen bestimmten Querschnitt strömenden Massen- oder Volumenstromes wird als Durchflußmessung bezeichnet. Dabei wird nicht unterschieden, ob das Medium durch eine Rohrleitung oder durch ein offenes Gerinne fließt. Im Wesentlichen werden die Verfahren in zwei Teilbereiche unterteilt, Volumenzähler zur Vermessung von Volumenströmen und Massendurchflußmeßgeräte zur Massenstrommessung. Alle Verfahren arbeiten kontinuierlich über der Zeit.

Es gibt eine Vielzahl von Verfahren zur Durchflußmessung, die auf den unterschiedlichsten physikalischen Prinzipien beruhen:

- Ausnutzen der Strömungskräfte auf angeströmte Körper,
- Markierungsverfahren,
- thermische Verfahren,
- Verfahren basierend auf Wirbelablösung,
- Anwendung des Impulssatzes oder des Energiesatzes auf das zu vermessende strömende Medium.

Viele der Verfahren benötigen zu messende Hilfsgrößen wie z.B. die Dichte. Daher nennt man diese Durchflußmeßmethoden auch mittelbare Verfahren.

D.1 Durchflußmessung mit Drosselgeräten

In technischen Anwendungen ist die Durchflußmessung mit Drosselgeräten am weitesten verbreitet. Sowohl in den DIN- und ISO-Normen als auch in den VDI/VDE-Richtlinien gibt es umfangreiche Schriften zu diesem Thema [5] – [17].

Bei Drosselgeräten strömt das Fluid durch eine definierte Strömungsquerschnittverengung. Dabei erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit und gleichzeitig sinkt der statische Druck. Die Druckdifferenz zwischen dem Druck im normalen Querschnitt und dem engsten Querschnitt der Verengung wird als Wirkdruck bezeichnet. Er steht in direktem Zusammenhang mit der Strömungsgeschwindigkeit und ist damit ein Maß für den durchgeflossenen Volumen- bzw. Massenstrom. Abbildung D.1 gibt einen Überblick über den prinzipiellen Aufbau einer Drosselstelle in Form einer Blende. Die Kontrollflächen und Größen für die Durchflußberechnung sind ebenfalls eingezeichnet.

Zur Ableitung der Gleichung für den Durchfluß wird die Kontrollebene 1 in den unbeeinflußten Strömungsbereich vor die Drosselstelle gelegt. Die Ebene 2 wird im kleinsten

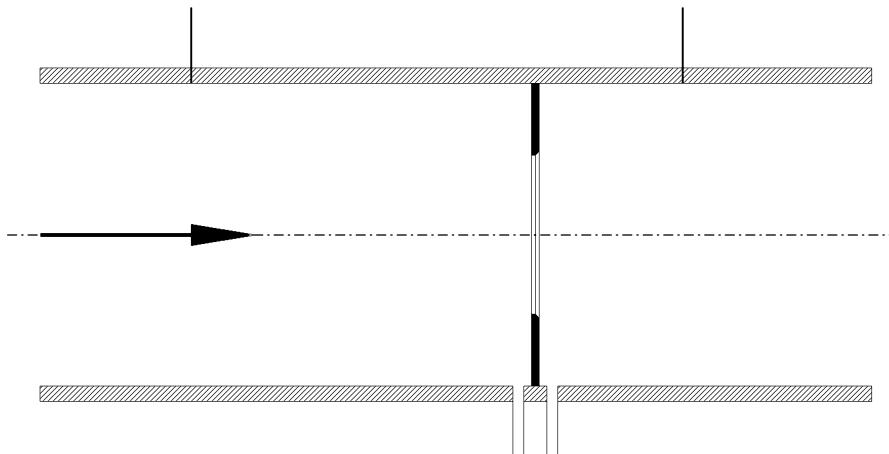


Abbildung D.1: Schematische Darstellung einer Blende als Drosselstelle

Strahlquerschnitt plaziert. Zwischen beiden Ebenen kann die Bernoulligleichung angesetzt werden:

$$p_1 + \frac{\rho}{2} c_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} c_2^2 \quad (\text{D.1})$$

Dabei wird erst einmal vorausgesetzt, daß das Fluid inkompressibel ($\rho_1 = \rho_2$) ist. Ferner gilt die Kontinuitätsgleichung:

$$\rho c_1 A_1 = \rho c_2 A_2 = \text{const} \quad (\text{D.2})$$

Der engste Strahlquerschnitt A_2 ist von der Geometrie des Drosselgerätes abhängig. Daher wird die Einschnürungszahl μ definiert:

$$\mu = \frac{A_2}{A_d} \quad (\text{D.3})$$

Mit dem Öffnungsverhältnis m :

$$m = \frac{A_d}{A_1} \quad (\text{D.4})$$

steht auch das in den Normblättern verwendete Durchmesserverhältnis β in Zusammenhang:

$$\beta = \frac{d}{D} = \sqrt{\frac{A_d}{A_1}} = \sqrt{m} \quad (\text{D.5})$$

Damit wird aus der Kontinuitätsgleichung (D.2):

$$c_1 = \mu m c_2 \quad (\text{D.6})$$

und eingesetzt in die Bernoulligleichung (D.1):

$$c_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (\text{D.7})$$

Bisher wurde die Ableitung der Gleichungen unter der Annahme idealer Bedingungen durchgeführt. Bei einer voll ausgebildeten Rohrströmung ist das Geschwindigkeitsprofil wegen der Reibungseinflüsse und der damit verbundenen Grenzschichtentwicklung

nicht rechteckig — d.h. konstant über dem Durchmesser — sondern parabelförmig. Die Drücke p_1 und p_2 werden auch nicht an den in der schematischen Darstellung eingezeichneten Orten gemessen sondern unmittelbar vor und hinter der Drosselstelle ($p_1 \rightarrow p_{v,Bl}$ und $p_2 \rightarrow p_{n,Bl}$). Aus diesen Gründen ergeben sich Abweichungen, die in dem Beiwert ξ zusammengefaßt werden. Damit wird die Geschwindigkeit c_2 im engsten Strahlquerschnitt:

$$c_2 = \frac{\xi}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\varrho} (p_{v,Bl} - p_{n,Bl})} \quad (\text{D.8})$$

Mit der Definition des Wirkdruckes:

$$\Delta p_{Bl} = p_{v,Bl} - p_{n,Bl} \quad (\text{D.9})$$

ergibt sich:

$$c_2 = \frac{\xi}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\varrho} \Delta p_{Bl}} \quad (\text{D.10})$$

Der Volumenstrom ist definiert als:

$$\dot{V} = A_2 c_2 \quad (\text{D.11})$$

und nach Einsetzen von Gl. (D.10) folgt:

$$\dot{V} = \frac{\mu \xi}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} A_d \sqrt{\frac{2}{\varrho} \Delta p_{Bl}} \quad (\text{D.12})$$

Im ersten Term auf der rechten Seite der Gleichung stehen die verschiedenen, einzeln nicht erfaßbaren Einflußfaktoren, die zu der Durchflußzahl α zusammengefaßt werden:

$$\alpha = \frac{\mu \xi}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \quad (\text{D.13})$$

Die Kompressibilität des zu messenden Fluids wird durch die sogenannte Expansionszahl ε , die auch die Expansion der Strömung vom Druck p_1 auf p_2 beschreibt, in die im Sinne der Herleitung endgültige Gleichung für den Volumenstrom eingeführt:

$$\dot{V} = \alpha \varepsilon A_d \sqrt{\frac{2}{\varrho} \Delta p_{Bl}} \quad (\text{D.14})$$

Entsprechend wird für den Massenstrom geschrieben:

$$\dot{m} = \alpha \varepsilon A_d \sqrt{2 \varrho \Delta p_{Bl}} \quad (\text{D.15})$$

Eine eingehendere Betrachtung der Durchflußzahl α zeigt, daß

$$\alpha = f(\beta, Re, k/D) \quad (\text{D.16})$$

ist, mit k als der relativen Rohrrauhigkeit oder Rauhtiefe. Das bedeutet, daß die Durchflußzahl α in verschiedenen Meßanordnungen gleiche Werte annehmen kann, wenn die Versuchsaufbauten geometrisch ähnlich sind, und die Strömungen die gleichen Reynoldszahlen aufweisen.

Ebenso kann festgestellt werden, daß die Expansionzahl ε eine Funktion von

$$\varepsilon = f(\beta, \kappa, p_1/p_2) \quad (\text{D.17})$$

ist, mit dem Isentropenexponenten κ als Einflußgröße für die Gasart. Für Flüssigkeiten gilt immer $\varepsilon = 1$.

In der Norm wird die Durchflußzahl α aufgeteilt in einen Vorgeschwindigkeitsfaktor E und in einen Durchflußkoeffizienten C entsprechend:

$$\alpha = EC \quad (\text{D.18})$$

Der Vorgeschwindigkeitsfaktor E ist eine Funktion des Durchmesserverhältnisses β :

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} = \frac{D^2}{\sqrt{D^4 - d^4}} \quad (\text{D.19})$$

Um reproduzierbare Ergebnisse bei der Durchflußmessung zu erhalten, müssen die Durchflußzahlen α , die Durchflußkoeffizienten C und die Expansionszahlen ε experimentell bestimmt und zu empirischen Gleichungen verarbeitet werden. Sie unterscheiden sich daher für jedes Drosselgerät.

In den folgenden Absätzen werden die Gleichungen für die Durchflußkoeffizienten C und die Expansionzahlen ε für Blenden, Düsen, Kurz-Venturidüsen und klassische Venturidüsen entsprechend [5] und [14] angegeben, bevor auf den gesamten Berechnungsablauf eingegangen wird. Daher wird hier vorausgesetzt, daß das verwendete Drosselgerät, die notwendigen Rohrleitungsteile und die Meßanordnung normgerecht hergestellt und zusammengebaut sind.

D.1.1 Blende

Die geometrische Konfiguration für eine Blende und ihr meßtechnischer Aufbau sind in Abbildung D.2 dargestellt. Die Blende besteht aus einer Scheibe mit einer zentralen Bohrung in der Mitte. Diese Bohrung kann auf der stromab liegenden Seite mit einer Phase versehen sein. Es sind drei unterschiedliche Orte für die Druckmessung erlaubt:

- D- und D/2-Druckentnahme
Die Druckmeßstelle $p_{v,Bl}$ liegt einen Rohrdurchmesser vor der Blende; $p_{n,Bl}$ liegt einen halben Durchmesser hinter der Blende.
- Flansch-Druckentnahme
Die Bohrungen für $p_{v,Bl}$ und $p_{n,Bl}$ liegen in den Flanschen, die die Blende halten, mit etwas Abstand zu den Blendenseiten.
- Eck-Druckentnahme
Die Druckmeßstellen für $p_{v,Bl}$ und $p_{n,Bl}$ liegen unmittelbar vor und hinter der Blende. Sie können auch als Ringspalt ausgebildet sein.

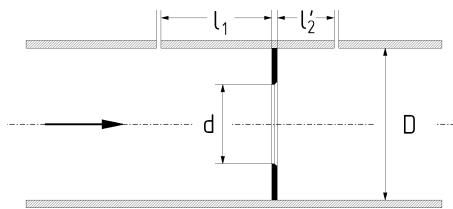


Abbildung D.2: Schematischer Aufbau einer Blendenmeßstrecke

Der Anwendungsbereich für die Durchflußmessung beschränkt sich auf die in Tabelle D.1 angegebenen Bereiche. Für Gase wird der Anwendungsbereich noch weiter eingeschränkt durch den Geltungsbereich der Gleichung zur Berechnung des Expansionskoeffizienten (D.21).

Eck-Druckentnahme						
d [mm]	D_{\min} [mm]	D_{\max} [mm]	β_{\min} [-]	β_{\max} [-]	$Re_{D,\min}$ [-]	$Re_{D,\max}$ [-]
≥ 12.5	50	1000	0.23	0.45	5000	10^8
			0.45	0.77	10000	
			0.77	0.8	20000	
Flansch- bzw. D und D/2-Druckentnahme						
d [mm]	D_{\min} [mm]	D_{\max} [mm]	β_{\min} [-]	β_{\max} [-]	$Re_{D,\min}$ [-]	$Re_{D,\max}$ [-]
≥ 12.5	50	760	0.2	0.75	$1260\beta^2 D$	10^8

Tabelle D.1: Anwendungsbereich für Normblenden

D.1.1.1 Durchflußkoeffizienten von Blenden

Die Stoltz-Gleichung liefert den Durchflußkoeffizienten C :

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.75} + 0.0900L_1 \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.00337L'_2 \beta^3 \quad (\text{D.20})$$

Wenn $L_1 \geq 0.4333$ ist, wird der Ausdruck $0.0900L_1$ durch 0.0390 ersetzt. In der Gleichung ist:

L_1 das Verhältnis des Abstandes l_1 der Druckentnahme im Einlauf von der Blendenstirnseite zum Rohrdurchmesser D und

L'_2 das Verhältnis des Abstandes l'_2 der Druckentnahme im Auslauf von der Blendenrückseite zum Rohrdurchmesser D .

Folgende Werte sind für L_1 und L'_2 einzusetzen:

- Für Blenden mit Eck-Druckentnahme:

$$L_1 = L'_2 = 0$$

- Für Blenden mit D- und D/2-Druckentnahme:

$$\begin{aligned} L_1 &= 1 \\ L'_2 &= 0.47 \end{aligned}$$

- Für Blenden mit Flansch-Druckentnahme:

$$L_1 = L'_2 = \frac{25.4}{D \text{ [mm]}}$$

In dieser Gleichung muß D in Millimetern eingesetzt werden.

D.1.1.2 Expansionskoeffizienten von Blenden

Unabhängig von der Art der Druckentnahme lautet die Gleichung für den Expansionskoeffizienten:

$$\varepsilon = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta p_{Bl}}{\kappa p_{v,Bl}} \quad (\text{D.21})$$

Die Gleichung ist nur gültig für:

$$\frac{p_{n,Bl}}{p_{v,Bl}} \geq 0.75$$

Strömt eine Flüssigkeit durch die Blende, ist $\varepsilon = 1$.

D.1.1.3 Druckverluste von Blenden

Der von Blenden verursachte Druckverlust kann mit folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$\Delta p_{V,Bl} = \frac{1 - \alpha\beta^2}{1 + \alpha\beta^2} \Delta p_{Bl} \quad (\text{D.22})$$

Dieser Druckverlust ist die Differenz der statischen Drücke zwischen der Einlaufseite der Blende an einer Stelle, an der der Staudruck (Totaldruck) vernachlässigt werden kann (etwa 1D vor der Blende), und der Auslaufseite, an der der Druckrückgewinn des statischen Druckes durch die Strahlausdehnung abgeschlossen ist (ca. 6D hinter der Blende).

D.1.2 ISA 1932-Düsen

Ein Schnitt durch eine ISA 1932-Düse ist in Abbildung D.3 dargestellt. Die Düse besteht aus einem konvergenten Düsenteil, der aus zwei verschiedenen Radien gebildet wird, und einem zylindrischen Hals. Im Gegensatz zur Blende gibt es nur eine Konfiguration für die Druckentnahme, die der Eck-Druckentnahme bei den Blenden entspricht. Der Gültigungsbereich der Gleichungen für den Durchflußkoeffizienten C und die Expansionszahl ε ist in Tabelle D.2 angegeben. Ferner wird der Gültigkeitsbereich bei der Verwendung von Gasen weiter eingeschränkt durch die Gültigkeit der Gleichung zur Berechnung des Expansionskoeffizienten (D.24).

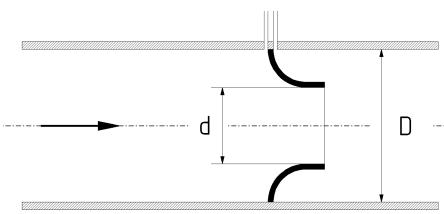


Abbildung D.3: Schematischer Aufbau einer Meßstrecke mit ISA 1932- oder Langradius-Düse

D.1.2.1 Durchflußkoeffizienten für ISA 1932-Düsen

Die Gleichung für den Durchflußkoeffizienten lautet:

$$C = 0.9900 - 0.2262\beta^{4.1} + \left(0.000215 - 0.001125\beta + 0.002490\beta^{4.7}\right) \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{1.15} \quad (\text{D.23})$$

D_{\min} [mm]	D_{\max} [mm]	β_{\min} [-]	β_{\max} [-]	$Re_{D,\min}$ [-]	$Re_{D,\max}$ [-]
50	500	0.3	0.44	70000	10^7
		0.44	0.8	20000	

Tabelle D.2: Anwendungsbereich für ISA 1932-Düsen

D.1.2.2 Expansionskoeffizienten von ISA 1932-Düsen

Die Expansionszahl wird berechnet nach:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\kappa \left(\frac{p_{n,Bl}}{p_{v,Bl}}\right)^{\frac{2}{\kappa}}}{\kappa - 1}\right) \left(\frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \left(\frac{p_{n,Bl}}{p_{v,Bl}}\right)^{\frac{2}{\kappa}}}\right) \left(\frac{1 - \left(\frac{p_{n,Bl}}{p_{v,Bl}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{1 - \frac{p_{n,Bl}}{p_{v,Bl}}}\right)} \quad (\text{D.24})$$

Diese Gleichung gilt nur für:

$$\frac{p_{n,Bl}}{p_{v,Bl}} \geq 0.75$$

Strömt eine Flüssigkeit durch die Düse, ist $\varepsilon = 1$.

D.1.2.3 Druckverluste von ISA 1932-Düsen

Die Druckverluste werden nach derselben Methode wie für Blenden gerechnet (Abschnitt D.1.1.3).

D.1.3 Langradius-Düsen

Langradius-Düsen sind in ihrem Aufbau fast identisch mit ISA 1932-Düsen. Daher kann für den prinzipiellen Aufbau einer Meßstrecke mit Langradius-Düsen auch Abbildung D.3 herangezogen werden. Der Unterschied zu ISA 1932-Düsen besteht in der Gestaltung der Düsenkontur. Bei Langradius-Düsen wird der konvergente Düsenteil aus einem Viertel einer Ellipse gebildet. Den Gültigkeitsbereich für Langradius-Düsen zeigt Abbildung D.3. Die Druckentnahmepositionen entsprechen denen von ISA 1932-Düsen.

D_{\min} [mm]	D_{\max} [mm]	β_{\min} [-]	β_{\max} [-]	$Re_{D,\min}$ [-]	$Re_{D,\max}$ [-]
50	630	0.2	0.8	10^4	10^7

Tabelle D.3: Anwendungsbereich für Langradius-Düsen

D.1.3.1 Durchflußkoeffizienten für Langradius-Düsen

Die Gleichung für den Durchflußkoeffizienten lautet bei Verwendung der auf den Rohrdurchmesser bezogenen Reynolds-Zahl Re_D :

$$C = 0.9965 - 0.00653 \sqrt{\beta \frac{10^6}{Re_D}} \quad (\text{D.25})$$

oder für die auf den Düsendurchmesser bezogene Reynolds-Zahl Re_d :

$$C = 0.9965 - 0.00653 \sqrt{\frac{10^6}{Re_d}} \quad (\text{D.26})$$

D.1.3.2 Expansionskoeffizienten von Langradius-Düsen

Die Expansionszahl für Langradius-Düsen wird mit derselben Gleichung wie die Expansionszahl für ISA 1932-Düsen berechnet: Gleichung D.24. Die Gültigkeit der Gleichung ist aber auf den Gültigkeitsbereich für Langradius-Düsen (Tabelle D.3) beschränkt.

D.1.3.3 Druckverluste von Langradius-Düsen

Die Druckverluste werden nach derselben Methode wie für Blenden gerechnet (Abschnitt D.1.1.3).

D.1.4 Klassische Venturirohre

Ein klassisches Venturirohr besteht aus einem konischen Einlaufteil mit einem anschließenden zylindrischen Teil und einem konischen Auslauf und wird im allgemeinen aus Rohrstücken zusammengesetzt (schematische Abbildung D.4). Der Gültigkeitsbereich der Gleichungen für die Berechnung des Durchflußkoeffizienten ist in Tabelle D.4 angegeben.

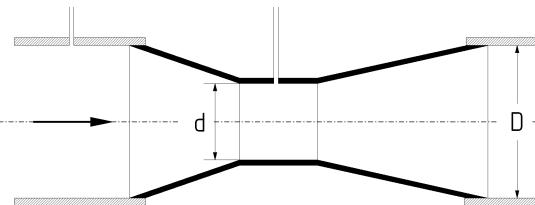


Abbildung D.4: Schematischer Aufbau einer Meßstrecke mit klassischem Venturirohr

D.1.4.1 Durchflußkoeffizienten von klassischen Venturirohren

Es gibt für verschiedene Auslegungsbereiche der klassischen Venturirohre nur feste Werte des Durchflußkoeffizienten. Sie sind zusammen mit dem Gültigkeitsbereich in Tabelle D.4 dargestellt.

D_{\min} [mm]	D_{\max} [mm]	β_{\min} [-]	β_{\max} [-]	$Re_{D,\min}$ [-]	$Re_{D,\max}$ [-]	C [-]	Einlaufkonus
100	800	0.3	0.75	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6$	0.984	gußrauh
50	250	0.4	0.75	$2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	0.995	bearbeitet
200	1200	0.4	0.7	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6$	0.985	rauh, geschweißt

Tabelle D.4: Anwendungsbereich und Durchflußkoeffizienten für klassische Venturirohre

D.1.4.2 Expansionskoeffizienten von klassischen Venturirohren

Die Expansionszahl für klassische Venturirohre wird mit derselben Gleichung wie die Expansionszahl für ISA 1932-Düsen berechnet: Gleichung D.24. Die Gültigkeit der Gleichung ist aber auf den Gültigkeitsbereich für klassische Venturirohre nach Tabelle D.4 beschränkt.

D.1.4.3 Druckverluste von klassischen Venturirohren

Es gibt in der Norm keine Berechnungsformel für die Abschätzung der Druckverluste. Lediglich Hinweise über den Einfluß einzelner Parameter werden gegeben.

D.1.5 Venturidüsen

Die Venturidüsen entsprechen in ihrem vorderen konvergenten Teil der Konstruktion der ISA 1932-Düsen. Dem zylindrischen Teil schließt sich ein konischer Teil an, bis der Rohrdurchmesser wieder erreicht ist. Die Druckentnahme für den hinteren Druck liegt im engsten Querschnitt im zylindrischen Teil. Den schematischen Versuchsaufbau zeigt Abbildung D.5. Der Gültigkeitsbereich ist in Tabelle D.5 dargestellt.

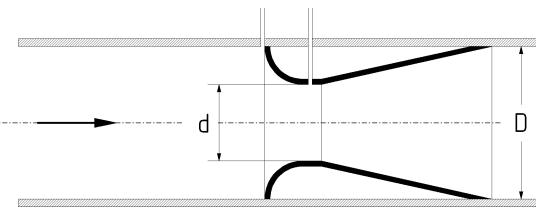


Abbildung D.5: Schematischer Aufbau einer Meßstrecke mit Venturidüse

d [mm]	D_{\min} [mm]	D_{\max} [mm]	β_{\min} [-]	β_{\max} [-]	$Re_{D,\min}$ [-]	$Re_{D,\max}$ [-]
≥ 50	65	500	0.316	0.775	$1.5 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6$

Tabelle D.5: Anwendungsbereich für Venturidüsen

D.1.5.1 Durchflußkoeffizienten von Venturidüsen

Der Durchflußkoeffizient für Venturidüsen ist unabhängig von der Reynolds-Zahl und wird berechnet nach:

$$C = 0.9858 - 0.196\beta^{4.5} \quad (\text{D.27})$$

D.1.5.2 Expansionskoeffizienten von Venturidüsen

Die Expansionszahl für Venturidüsen wird mit derselben Gleichung wie die Expansionszahl für ISA 1932-Düsen berechnet: Gleichung D.24. Die Gültigkeit der Gleichung ist aber auf den Gültigkeitsbereich für Venturidüsen nach Tabelle D.5 beschränkt.

D.1.5.3 Druckverluste von Venturidüsen

Die Druckverluste werden nach derselben Methode wie für Blenden gerechnet (Abschnitt D.1.1.3).

D.1.6 Ablauf der Durchflußberechnung

Das Ziel der Rechnung ist die Bestimmung des Volumenstromes nach Gl. (D.14) oder des Massenstromes nach Gl. (D.15). Geht man von der Annahme aus, daß die Meßstrecke nach der DIN-Norm ausgelegt und aufgebaut worden ist, sind folgende Werte von einer Messung gegeben:

1. Geometrie der Meßstrecke:
 - 1.1. Durchmesser der Blende d
 - 1.2. Durchmesser des Rohres D
2. Meßwerte für einen Strömungszustand:
 - 2.1. Druck vor der Blende $p_{v,Bl}$
 - 2.2. Wirkdruck an der Blende Δp_{Bl} oder
Druck nach der Blende $p_{n,Bl}$
 - 2.3. Totaltemperatur der Strömung $T_{t,Bl}$

Falls die Strömung starken Temperaturänderungen unterliegt, muß der Rechengang erweitert werden, um die Temperatureinflüsse auf die Rohrleitung und die Blende in Form von Durchmesseränderungen zu berücksichtigen. Das notwendige Verfahren ist in [13] erläutert.

Der Rechenablauf ist dann wie folgt:

1. Berechnung des Durchmesserverhältnisses β nach Gl. (D.5).
2. Berechnung des Vorgeschwindigkeitsfaktors E nach Gl. (D.19).
3. Ermittlung der Dichte ϱ . Die Dichte erhält man im allgemeinen aus Stoffwerttabellen oder aus empirischen Gleichungen in entsprechenden Handbüchern¹ Bei Gasen kann i.a. die ideale Gasgleichung benutzt werden:

$$\varrho = \frac{p}{RT} \quad (\text{D.28})$$

4. Ermittlung der Viskosität η . Hier gelten die Bemerkungen über die Dichtebestimmung ebenso.
5. Falls der Druck hinter der Blende $p_{n,Bl}$ gemessen worden ist, wird der Wirkdruck nach Gl. (D.9) bestimmt.
6. Falls es sich bei dem zu vermessenden Fluid um ein Gas handelt, wird der Expansionsfaktor ε nach Gl. (D.21) für die nachfolgende Iteration benötigt. Dazu muß das Druckverhältnis $p_{n,Bl}/p_{v,Bl} \geq 0.75$ sein.
Bei Flüssigkeiten wird für die weitere Rechnung $\varepsilon = 1$ gesetzt.

¹Die Bestimmung der Dichte kann ein sehr umfangreiches Problem werden, wenn man es mit Gasgemischen wie feuchter Luft oder Ähnlichem zu tun hat. Damit erhöht sich der Meßaufwand, da man auch noch die relative oder absolute Feuchte der Luft benötigt. Bei höheren Drücken müssen auf jeden Fall Realgaseffekte berücksichtigt werden. Einen Eindruck gibt die VDI/VDE-Richtlinie 2040 Blatt3 [14].

7. Der Startwert für die Reynoldszahl ist $Re_D = 10^6$.
8. Berechnung des Durchflußkoeffizienten C nach Gl. (D.20).
9. Berechnung des Durchflußzahl α nach Gl. (D.18).
10. Berechnung des Durchflußmassenstromes nach Gl. (D.15).
11. Ab dem zweiten Iterationsschritt i wird folgende Überprüfung durchgeführt, die den Abbruch der Iteration erlaubt:

$$\left| \frac{C_i - C_{i-1}}{C_i} \right| \leq 10^{-4} \quad (\text{D.29})$$

Falls diese Bedingung erfüllt ist, kann die Iteration abgebrochen werden. Die Rechnung wird mit Schritt 13 weitergeführt.

12. Berechnung der Reynoldszahl Re_D mit Hilfe der Gleichung:

$$Re_D = \frac{\rho c D}{\eta} = \frac{4\dot{m}}{\pi D \eta} \quad (\text{D.30})$$

Danach wird die Iteration mit der Berechnung eines neuen Durchflußkoeffizienten C erneut durchlaufen (zurück zu Schritt 8).

13. Nach Abbruch der Iteration ist die Berechnung normalerweise beendet. Gegebenenfalls benötigt man noch den Volumenstrom nach Gl. (D.14).
14. Der letzte Punkt der Berechnung besteht in der Überprüfung der Normbedingungen in diesem Beispiel nach Tabelle D.1 für Blenden.

D.1.7 Zusammenstellung der Gleichungen und ihre Optimierung

In diesem Absatz geht es darum, die erforderlichen Gleichungen so zusammenzustellen, daß eine Berechnung „von Hand“ schnell und effizient durchgeführt werden kann.

Es wird hier davon ausgegangen, daß Drücke und Temperatur in SI-Einheiten umgerechnet sind.

Da der Durchflußkoeffizient C von der Reynoldszahl abhängig ist, muß der Massenstrom \dot{m}_{Bl} iterativ ermittelt werden. Dazu kann der Nutzer sich die Arbeit wesentlich erleichtern, indem die Gleichungen unter dem Gesichtspunkt des Rechenaufwandes geschickt zusammengestellt werden. Das gilt auch für das Schreiben von Programmen.

Der Massenstrom wird berechnet nach Glg. (D.15):

$$\dot{m} = \alpha \varepsilon A_d \sqrt{2 \rho \Delta p_{Bl}} \quad (\text{D.31})$$

Die Durchflußzahl α setzt sich nach Glg. (D.18) zusammen aus:

$$\alpha = EC \quad (\text{D.32})$$

Der Vorgeschwindigkeitsfaktor E ist nach Glg. (D.19):

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (\text{D.33})$$

Dazu wird das Durchmesserverhältnis β nach Glg. (D.5) benötigt:

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (\text{D.34})$$

Die Gleichung für den Durchflußkoeffizienten ist abhängig von der Art des Drosselorgans. In diesem Beispiel wird mit einer Blende gearbeitet. Der Durchflußkoeffizient für Blenden lautet nach Glg. (D.20):

$$\begin{aligned} C = & 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.75} \\ & + 0.0900L_1 \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.00337L'_2\beta^3 \end{aligned} \quad (\text{D.35})$$

Ferner wird für den Massenstrom nach Glg. (D.31) die Expansionszahl nach Glg. (D.21) für Blenden benötigt:

$$\varepsilon = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta p_{Bl}}{\kappa p_{v,Bl}} \quad (\text{D.36})$$

Ebenfalls wird die Dichte ϱ_{Bl} an der Blende benötigt:

$$\varrho_{Bl} = \frac{p_{v,Bl}}{R T_{Bl}} \quad (\text{D.37})$$

Betrachtet man die Gleichung des Durchflußkoeffizienten Glg. (D.35), fällt auf, daß fast alle Terme der Gleichung nur einmal berechnet werden müssen. Dazu wird die Gleichung umgestellt und sinnvolle Abkürzungen eingeführt:

$$\begin{aligned} C = & 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 \\ & + 0.0900L_1 \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.00337L'_2\beta^3 \\ & + 0.0029\beta^{2.5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.75} \end{aligned} \quad (\text{D.38})$$

Nach der Umstellung und Einführung von Abkürzungen erhält Glg. (D.38) folgendes Aussehen:

$$\begin{aligned} C &= C_{K1} + C_{K2} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.75} \\ C_{K1} &= 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 \\ &+ 0.0900L_1 \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.00337L'_2\beta^3 \\ C_{K2} &= 0.0029\beta^{2.5} \end{aligned} \quad (\text{D.39})$$

Jetzt wird die Gleichung für den Massenstrom (D.31) umgestellt und dabei C nach Glg. (D.39) eingesetzt:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{Bl} &= \alpha \varepsilon A_d \sqrt{2 \varrho \Delta p_{Bl}} \\ &= E C \varepsilon A_d \sqrt{2 \varrho \Delta p_{Bl}} \\ &= E \left[C_{K1} + C_{K2} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.75} \right] \varepsilon A_d \sqrt{2 \varrho \Delta p_{Bl}} \\ &= K_1 \left[C_{K1} + C_{K2} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.75} \right] \end{aligned} \quad (\text{D.40})$$

mit:

$$K_1 = E \varepsilon A_d \sqrt{2 \varrho \Delta p_{Bl}} \quad (\text{D.41})$$

Die eckige Klammer wird aufgelöst und die Gleichung so umgestellt, daß sich wiederum Konstanten bilden lassen:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{Bl} &= K_2 + K_3 \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.75} \\ K_2 &= K_1 C_{K1} \\ K_2 &= K_1 C_{K2}\end{aligned}\tag{D.42}$$

Das Ergebnis der Umstellung der Gleichungen ist, daß die Iteration des Massenstromes in Absatz D.1.6 ohne zu umfangreiche Rechnung durchgeführt werden kann.

E Kommandozeile in Linux: bash

In diesem Kapitel werden einige Befehle für die Kommandozeile in Linux vorgestellt, mit denen die Arbeit mit den Auswerteprogrammen für Versuche erleichtert werden sollen.

Die Kommandozeile in Linux heißt bash (Born Agian Shell). Es gibt noch einige andere Shells, die aber hier nicht beschrieben werden.

Öffnet man in Linux eine Konsole oder Terminalfenster läuft darin die Shell. Das ist an dem sogenannten „Prompt“ erkennbar. In der bash shell sieht es so aus:

```
name@rechner verzeichnis>
```

Hierin bedeuten:

name Benutzername, d.h. es handelt sich um den Namen unter dem man sich angemeldet hat.

rechner Rechner, an dem der Benutzer sich angemeldet hat.

verzeichnis Derzeitiges Arbeitsverzeichnis. Entweder wird der gesamte Pfad oder nur der Name des augenblicklichen Verzeichnisses aufgeführt.

In den folgenden Beispielen wird als Name **gast**, als Rechner: **aldebaran** benutzt. Unmittelbar nach dem Öffnen der Konsole befindet man sich im sogenannten **home**-Verzeichnis. Der Prompt sieht dann so aus:

```
gast@aldebaran ~>
```

Die Tilde „~“ ist die Kurzform für das **home**-Verzeichnis.

Hinter dem Prompt kann der Benutzer Befehle eingeben.

Empfehlung für Datei- und Verzeichnisnamen: Es sollten keine Umlaute und Sonderzeichen wie „„ oder „„ benutzt werden. Leerzeichen sollte man vermeiden. Sie funktionsieren zwar, erhöhen aber den Aufwand beim Schreiben von Prozeduren gewaltig. Die Groß- und Kleinschreibung ist im Gegensatz zu Windows sehr wichtig: Die Datei **AAA.txt** ist eine andere Datei als **aaa.txt!** Der Buchstabe „/“ ist in Dateinamen verboten, weil dieser Buchstabe als Trenner in Pfaden zwischen Verzeichnissen und Dateien benötigt wird.

E.1 Datei-Befehle

Dieser Abschnitt enthält einige Befehle, mit denen Dateien gehandhabt werden können.

Kopieren von Dateien

Der Kopierbefehl lautet z.B.:

```
cp <zu kopierende Datei> <Zieldatei>
```

oder

```
cp <zu kopierende Datei 1> <zu kopierende Datei 2> ... <Zielverzeichnis>
```

Mit dem ersten Befehl wird die zu kopierende Datei zur Zieldatei kopiert. Sowohl die zu kopierende Datei als auch die Zieldatei kann Teile eines Pfades oder den gesamten Pfad enthalten.

Löschen von Dateien

Der Löschbefehl zum Löschen von Dateien und ganzen Verzeichnissen mit allen Dateien darin lautet:

```
rm <datei 1> <datei 2> ...
```

Mit dem Befehl werden die aufgeführten Dateien gelöscht. Falls eine oder mehrere Dateien schreibgeschützt sind, lautet der Befehl:

```
rm -f <datei 1> <datei 2> ...
```

Die Option **-f** kommt von englisch *force* und bedarf wohl keiner weiteren Erläuterung.

Ist ein Verzeichnis in der Liste der Dateien, muß die Option **-r** (recursively) angegeben werden:

```
rm -r <datei 1> <verzeichnis 2> ...
```

Die Kombination der Optionen **-f** und **-r** kann man auf zwei Weisen schreiben:

```
rm -r -f <datei 1> <verzeichnis 2> ...
```

oder in der Kurzform:

```
rm -rf <datei 1> <verzeichnis 2> ...
```

Das gilt für fast alle Optionen bei allen Befehlen, die mit einem einzelnen **-** versehen sind. Als Administrator ist dieser Befehl sehr gefährlich. Mit diesem Befehl kann man sehr leicht das Betriebssystem soweit zerstören, daß eine Neuinstallation erforderlich wird.

Auflisten von Dateien

Wenn man wissen will, welche Dateien sich in dem Verzeichnis befinden, in dem man sich gerade aufhält, lautet der Befehl:

```
ls
```

Es werden nur die Namen aller Dateien aufgeführt.

Beispiel: Der augenblickliche Ordner oder das Verzeichnis soll **aaa** heißen. Ist man mit dem **cd**-Befehl in diesen Ordner gegangen und gibt den Befehl **ls** ein, sieht man als Beispiel folgende Dateien:

```
Studienstruktur-M-P02001.pdf  ultraschall-1.jpg  ultraschall-2.epsf
```

```
Studienstruktur-P-P02001.pdf  ultraschall-1.pbm  ultraschall-2.jpg
ultraschall-1.bmp            ultraschall-1.pgm  ultraschall-2.pbm
ultraschall-1.epsf          ultraschall-2.bmp  ultraschall-2.pgm
```

Will man mehr über diese Dateien wissen, gibt man den Befehl

ls -l

oder die Kurzform

ll

ein. Dann wird folgender Output geliefert:

```
-rw----- 1 vnm prof    17454 15. Apr 09:20 Studienstruktur-M-P02001.pdf
-rw----- 1 vnm prof    17449 15. Apr 09:20 Studienstruktur-P-P02001.pdf
-rwxr--r-- 1 vnm prof 1208062 15. Apr 09:20 ultraschall-1.bmp
-rw----- 1 vnm prof 2165966 15. Apr 09:20 ultraschall-1.epsf
-rw----- 1 vnm prof 3012067 15. Apr 09:20 ultraschall-1.jpg
-rw----- 1 vnm prof 1065317 15. Apr 09:20 ultraschall-1.pbm
-rw----- 1 vnm prof 8567042 15. Apr 09:20 ultraschall-1.pgm
-rwxr--r-- 1 vnm prof 990654 15. Apr 09:20 ultraschall-2.bmp
-rw----- 1 vnm prof 1830620 15. Apr 09:20 ultraschall-2.epsf
-rw----- 1 vnm prof 2704919 15. Apr 09:20 ultraschall-2.jpg
-rw----- 1 vnm prof 899940 15. Apr 09:20 ultraschall-2.pbm
-rw----- 1 vnm prof 7216910 15. Apr 09:20 ultraschall-2.pgm
```

Darin bedeuten als Beispiel die erste Zeile:

-rw----	Rechte der Datei
vnm	Besitzer der Datei
prof	Gruppe des Besitzers der Datei
17454	Größe der Datei in Bytes
15. Apr 09:20	Datum der letzten Änderung oder Datum des letzten Zugriffes auf das Verzeichnis

Studienstruktur-M-P02001.pdf Dateiname

Möchte man nur die Dateien sehen, die mit **Studien...** beginnen, lautet der Befehl:

ll Studien*

Dann sieht man nur die beiden ersten Dateien im obigen Listing.

Befindet man sich in dem Ordner oberhalb von **aaa**, kann man eingeben:

ll aaa

Der Output ist der gleiche wie oben.

Umbenennen oder Verschieben von Dateien

Der Befehl:

mv <datei-alt> <datei-neu>

gibt der Datei einen neuen Namen. Mit diesem Befehl kann man auch Dateien verschieben:

```
mv <datei-alt> ../<verzeichnis>/
```

Die zuerst aufgeführte Datei wird in das angegebene Verzeichnis verschoben, ohne den Namen der Datei zu verändern. Das Verzeichnis liegt im gleichen Verzeichnis wie das augenblickliche Verzeichnis **aaa**.

Beispiel:

```
mv ultraschall-2.epsf ../bbb
```

verschiebt die Datei **ultraschall-2.epsf** in das Verzeichnis **bbb**, das „neben“ dem Verzeichnis **aaa** im übergeordneten Verzeichnis liegt. Die zwei Punkte am Anfang des Pfades .. sagen: Gehe ein Verzeichnis höher im Verzeichnisbaum. Mit „/“ werden die Namen der Verzeichnisse und Dateien getrennt. Dann folgt in diesem Beispiel das Zielverzeichnis.

Soll die Datei beim Verschieben noch umbenannt werden, lautet der Befehl z.B.:

```
mv ultraschall-2.epsf ../bbb/ultraschall.epsf
```

Im Verzeichnis **bbb** heißt die Datei dann **ultraschall.epsf**.

Das Ergebnis der Bemühungen kann man sich ansehen mit:

```
ll ../bbb/
```

und dem Output:

```
insgesamt 1792
-rw----- 1 vnm prof 1830620 15. Apr 09:51 ultraschall-2.epsf
```

E.2 Verzeichnis-Befehle

Hier werden einige Befehle aufgeführt, die sich mit Verzeichnissen befassen.

Erzeugen eines Verzeichnisses

Der Befehl:

```
mkdir <verzeichnis>
```

erzeugt im augenblicklichen Verzeichnis eine neuen Verzeichnis. Im Beispiel befinden wir uns immer noch im Verzeichnis **aaa**.

```
mkdir aaa-abc
```

erzeugt das Unterverzeichnis **aaa-abc**. Mit dem Befehl ll sieht man es dann:

```
insgesamt 29084
drwxr-xr-x 2 vnm prof 4096 15. Apr 09:57 aaa-abc
-rw----- 1 vnm prof 17454 15. Apr 09:20 Studienstruktur-M-P02001.pdf
-rw----- 1 vnm prof 17449 15. Apr 09:20 Studienstruktur-P-P02001.pdf
-rw-r--r-- 1 vnm prof 1208062 15. Apr 09:20 ultraschall-1.bmp
-rw----- 1 vnm prof 2165966 15. Apr 09:20 ultraschall-1.epsf
-rw----- 1 vnm prof 3012067 15. Apr 09:20 ultraschall-1.jpg
-rw----- 1 vnm prof 1065317 15. Apr 09:20 ultraschall-1.pbm
-rw----- 1 vnm prof 8567042 15. Apr 09:20 ultraschall-1.pgm
```

```
-rwxr--r-- 1 vnm prof 990654 15. Apr 09:20 ultraschall-2.bmp  
-rw----- 1 vnm prof 2704919 15. Apr 09:20 ultraschall-2.jpg  
-rw----- 1 vnm prof 899940 15. Apr 09:20 ultraschall-2.pbm  
-rw----- 1 vnm prof 7216910 15. Apr 09:20 ultraschall-2.pgm
```

Das Verzeichnis ist an dem „d“ ganz am Anfang der Rechte zu sehen. Verzeichnisse werden im Allgemeinen immer zuerst aufgeführt.

Neue Verzeichnisse haben anfangs immer die Größe 4096 Bytes. Später können Sie mit der Zahl der beherbergten Dateien und Verzeichnisse beliebig wachsen.

Löschen eines Verzeichnisses

Der Befehl:

```
rmdir <verzeichnis>
```

löscht ein Verzeichnis, wenn sich keine weiteren Dateien in diesem Verzeichnis befinden.

Andernfalls muß der „remove“-Befehl `rm` herangezogen werden:

```
rm -r <verzeichnis>
```

Hilfe zu Befehlen

Kennt man den Namen eines Befehls, kann man die Hilfeseiten aufrufen mit:

```
man <befehl>
```

Als erstes wird man aufgefordert, das „Buch“ in dem sich eine Hilfeseite befindet zu benennen. Üblicherweise wählt man 1. Dann erscheint die Hilfeseite.

In der Hilfeseite wird mit den Tasten Pfeil rau auf und runter oder Bild rau auf und runter geblättert. Mit dem Buchstaben `q` beendet man die Anzeige der Hilfeseite.

E.3 Aufruf von Programmen

F Installation und Konfiguration von FireFTP

Für den Datentransfer zwischen dem eigenen Rechner und dem Laborserver wird ein ftp-Programm benötigt. ftp heißt file transfer protocol und ist ein sehr altes, schnelles Protokoll. Beim Protokoll http gibt es nur die Einbahnstraße vom Server zum eigenen Rechner. ftp erlaubt auch das kopieren von Dateien vom eigenen Rechner zum Server.

Es gibt sehr viele ftp-Programme für Windows.

FireFTP ist ein sehr gutes plugin für den Browser Firefox. Zum Suchen des plugins FireFTP für den Browser wird z.B. bei google eingegeben:

fireftp download

Eine der ersten Suchergebnisse ist die Adresse:

<https://addons.mozilla.org/de/firefox/addon/fireftp/>

Dort gibt es auf der Seite einen großen grünen Button „+ Zu Firefox hinzufügen“, wenn die eigene Version von Firfox zum Plugin paßt. Andernfalls muß man Firefox updaten. Nach Drücken dieses Buttons wird das plugin installiert und Firefox möchte neu gestartet werden.

Danach findet man das Plugin unter dem Menü → „Extras“ → „Webentwickler“ → „FireFTP“, siehe Bild F.1.

Dann sieht der Benutzer das in Bild F.2 dargestellte Fenster. Oben links gibt es einen Button „Ein Benutzerkonto einrichten“. Der wird gedrückt.

Zur Einrichtung des Benutzerkontos sieht man im Firefox Fenster ein kleines Fenster entsprechend Bild fireftp-03. Hier werden die Zugangsdaten für den Laborserver eingegeben, die in der Laboreinführung genannt worden sind. Als Zugangsname verwendet man am besten **stlabstud**.

Nach der Eingabe der Zugangsdaten wird oben links der Button „Verbinden“ gedrückt, der die Verbindung zum Laborserver herstellt. Auf der linken Seite des Firefox Fensters sieht man dann die Dateien, die auf dem Server liegen (Bild F.4).

Über die verschiedenen Verzeichnisse, die im rechten Teil auf der linken Seite dargestellt sind, kann man sich in das eigene Versuchsverzeichnis klicken. Wird eine Datei markiert, kann sie mit den Pfeilen in der Mitte des Fensters kopiert werden (Bild F.5).

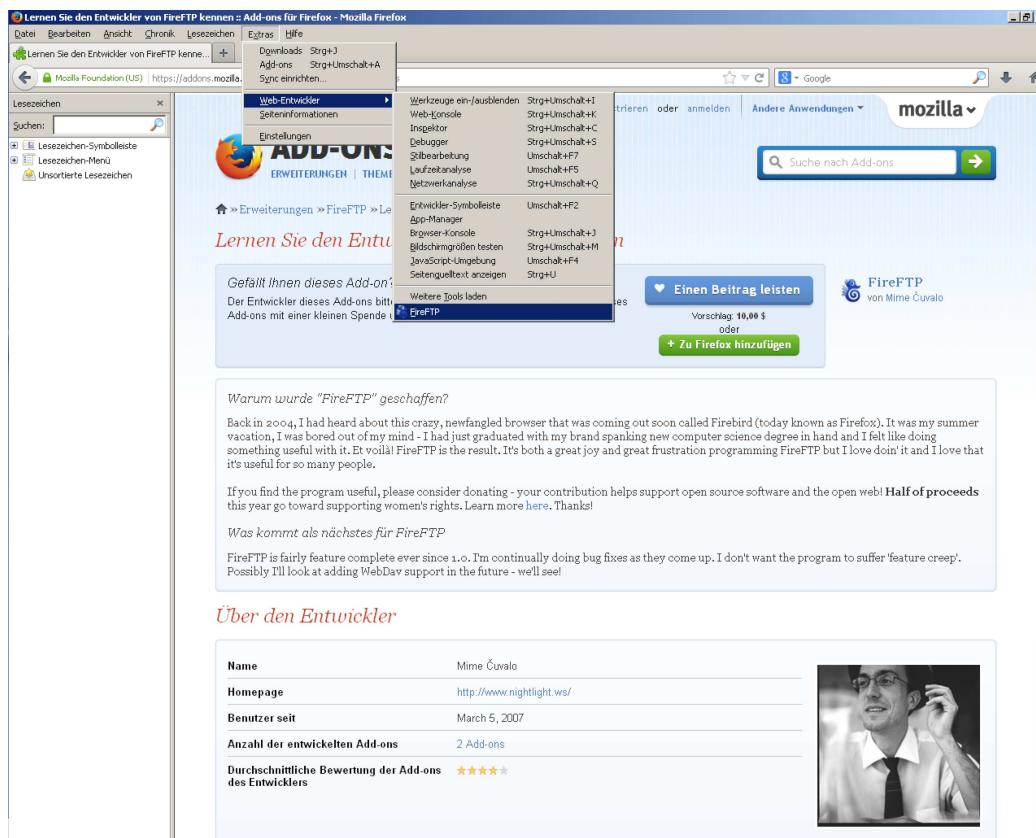


Abbildung F.1: Starten des Plugins FireFTP

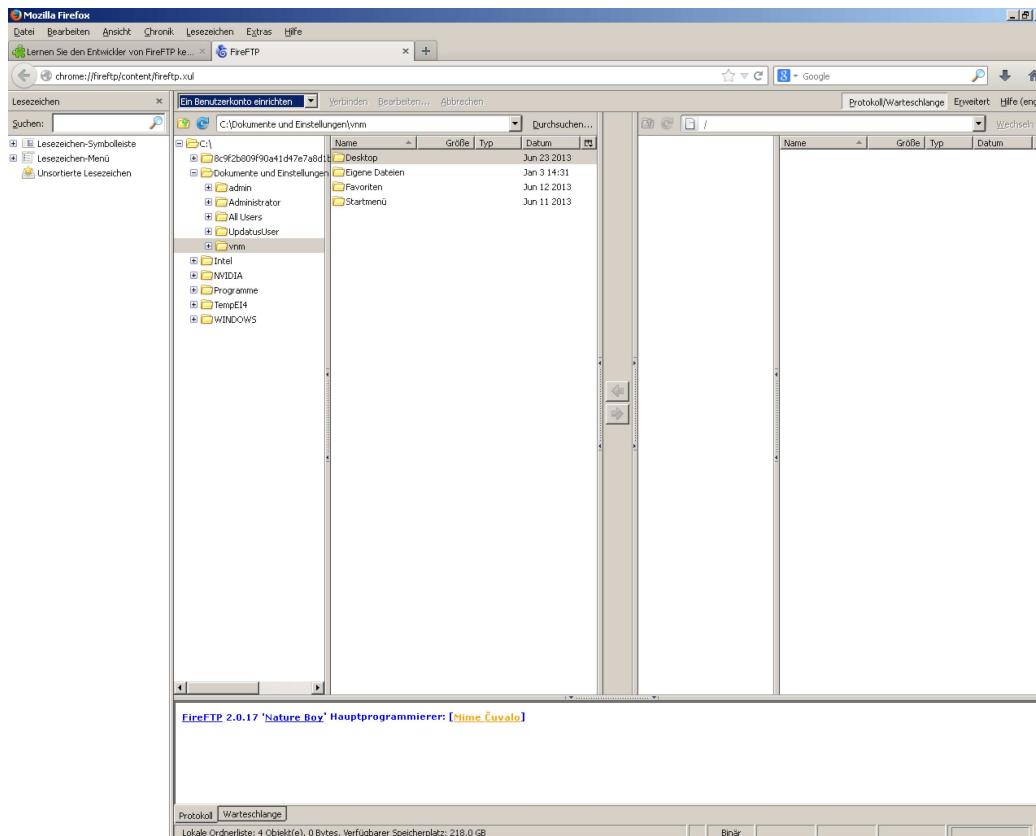


Abbildung F.2: Übliches Benutzeroberfenster von FireFTP

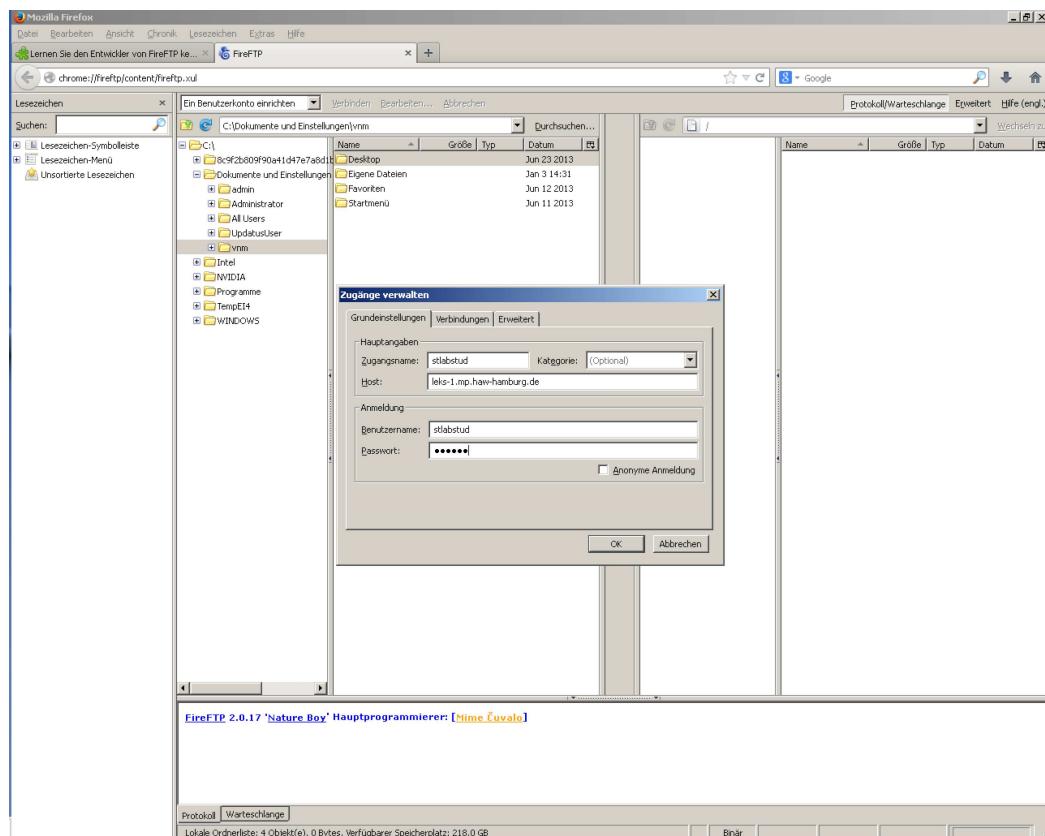


Abbildung F.3: fireFTP

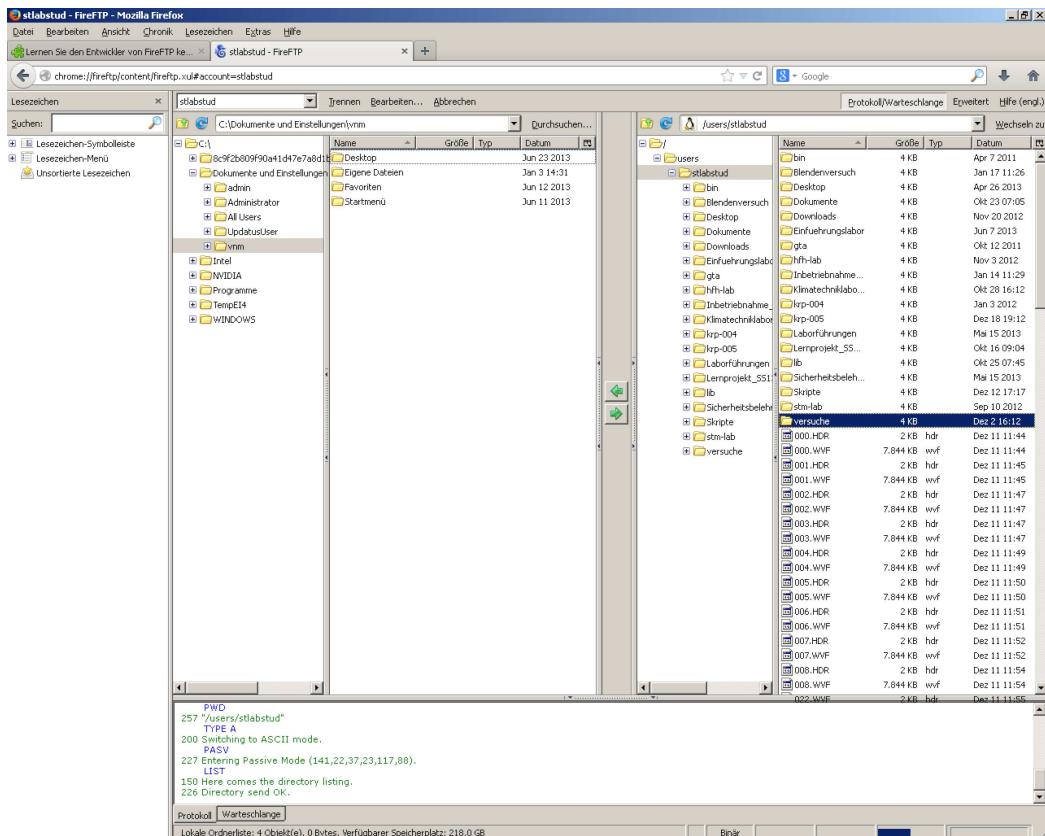


Abbildung F.4: Erfolgreiche Verbindung zum Laborserver

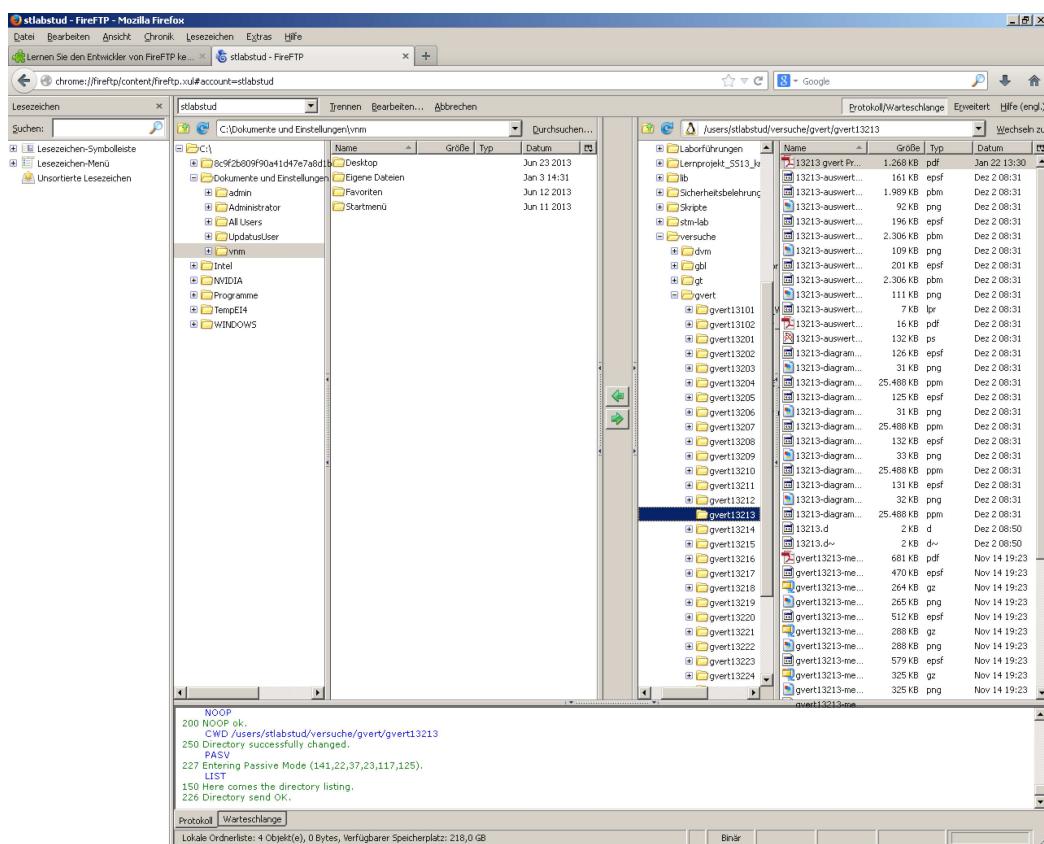


Abbildung F.5: Arbeiten mit FireFTP

