

Beschreibung der Prüfstände des Labors für Hydraulische Maschinen

Laborleiter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Kauke
Labormitarbeiter: Helmut Karl (Oberwerkmeister)

1. LaboraAusstattung

Das Labor für Hydraulische Maschinen befindet sich im Untergeschoss des Laborgebäudes und erstreckt sich über zwei Stockwerke. Die Grundfläche beträgt 250 m². Zusätzlich stehen 45 m² auf einer Galerie zur Verfügung. Neben Wasser, Strom und Internet verfügt das Labor über mehrere Labortische mit Anschlüssen für Druckluft und Strom (220 und 380 Volt). Derzeit sind zwei Maschinenprüfstände aufgebaut, die nachfolgend beschrieben werden. Es handelt sich um einen Prüfstand für Hydraulische Strömungsmaschinen

und einen Kammerprüfstand für Ventilatoren.



Labor für Hydraulische Maschinen
(Blick von der Galerie)

2. Prüfstand für Hydraulische Strömungsmaschinen

2.1 Aufbau des Prüfstandes

Einsatzspektrum:

Am Prüfstand für Hydraulische Strömungsmaschinen können strömungstechnische Untersuchungen an Kreiselpumpen und Wasserturbinen im Modellmaßstab durchgeführt werden. Derzeit ist eine Francis-Pumpenturbine und eine doppelverstellbare Kaplan-Modellturbine eingebaut. Nach entsprechenden Umbaumaßnahmen sind auch Untersuchungen an strömungsführenden Bauteilen, wie z. B. Druckverlustmessungen möglich. Alle Prüfstandskomponenten sind so dimensioniert, dass über den Einsatz im Lehrbetrieb hinaus, auch Projekte aus dem Bereich der anwendungsorientierten Forschung

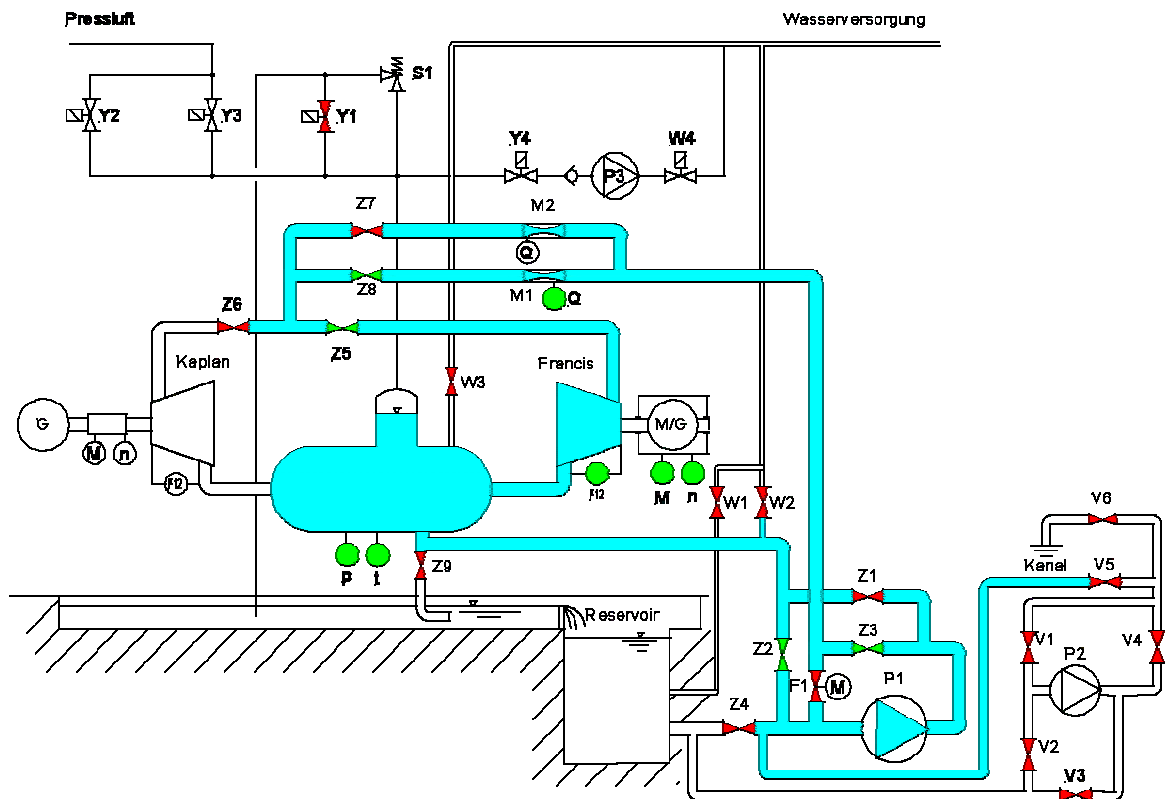
und Entwicklung sowie Industrieaufträge bearbeitet werden können.



Prüfstand für Hydraulische Maschinen

Prüfstandskonzept:

Der Prüfstand kann sowohl im offenen als auch im geschlossenen Kreislauf betrieben werden. Die Einstellung des Prüfstandes auf die jeweilige Versuchsaufgabe erfolgt durch Betätigen entsprechender Absperrschieber (Abb. 1). Zu den zentralen Prüfstandskomponenten gehören die Kreislaufpumpe (P1) und der Unterwasserkessel. Mit Hilfe dieser Einrichtungen können die Druckniveaus im Ein- und Austritt der zu untersuchenden Komponente variabel eingestellt werden.



Schema des Prüfstandes (Schieberstellungen für den Turbinenbetrieb der Francis-Pumpenturbine im geschlossenen Kreislauf)

Betriebsart (offener und geschlossener Kreislauf):

Im offenen Betriebsmodus saugt die Kreislaufpumpe das Wasser aus dem offenen Reservoir an und beaufschlagt damit die zu untersuchende Komponente. Nach Durchströmen der Turbine wird das Wasser über den Unterwasserkessel und ein offenes Gerinne wieder dem Reservoir zugeleitet. Da die Abströmung in ein offenes Gerinne bei Umgebungsbedingungen erfolgt, ist der Druck im Unterwasser (Turbinenausritt) vorgegeben und kann nicht variiert werden. Vorteilhaft ist, dass die Stabilität des eingestellten Betriebspunktes im allgemeinen mit hoher Sicherheit gewährleistet werden kann. Diese Betriebsart eignet sich somit zur Untersuchung von Turbinen und strömungsführenden Bauteile, wenn keine Variation des Gegendruckes erforderlich ist und der Druck im Austritt des Prüflings bei konstanten Werten in der Größenordnung des Atmosphärendruckes liegen kann.

Sollen an einer Turbine oder einem strömungsführenden Bauteil Untersuchungen bei unterschiedlichen Gegendrücken durchgeführt werden, sind die Messungen im geschlossenen Kreislauf mit Einbeziehung des Unterwasserkessels durchzuführen. Der

Unterwasserkessel hat bei dieser Betriebsart keine Verbindung zum offenen Gerinne, so dass der Druck im Unterwasserkessel den Anforderungen entsprechend eingestellt werden kann. Die Kreislaufpumpe saugt das Wasser unmittelbar aus dem Unterwasserkessel an und fördert es über eine Druckleitung zum Prüfling, von dem es wieder in den Unterwasserkessel abströmt.

Für Untersuchungen an Kreiselpumpen wird der Prüfstand generell im geschlossenen Kreislauf betrieben. Gegenüber dem Turbinenbetrieb erfolgt die Durchströmung bei Pumpenuntersuchungen in umgekehrter Richtung, so dass der Unterwasserkessel der zu untersuchenden Pumpe vorgeschaltet ist. Somit kann über den Unterwasserkessel der Pumpeneintrittsdruck variiert werden. Die zu untersuchende Kreiselpumpe saugt das Wasser aus dem Unterwasserkessel an und fördert es durch eine Druckleitung, in der die Drosselklappe eingebaut ist, zurück zum Unterwasserkessel. Dabei kann die Kreislaufpumpe bei Bedarf zugeschaltet werden.

Kreislaufpumpe "P1":

In beiden Betriebsarten (offen und geschlossen) wird mit Hilfe der Kreislaufpumpe der Druck im Eintritt des Prüflings den Anforderungen entsprechend eingestellt. Im Turbinenbetrieb wirkt sich dies auf den Druck im Oberwasser (Druckseite) aus, wodurch unterschiedliche Fallhöhen simuliert werden können. Im Pumpenbetrieb kann die Kreislaufpumpe optional zugeschaltet werden, um das Einsatzspektrum des Prüfstandes – durch Ausgleich der Kreislaufverluste – zu erweitern. Auf diese Weise können Kennlinienmessungen auch in Bereichen kleinster Förderhöhen, bis hin zur Null-Förderhöhe durchgeführt werden. Somit lassen sich auch komplette Kennlinien von Niederdruckpumpen aufnehmen, auch wenn deren Förderhöhe bei hohen Durchsätzen nicht ausreicht, um die Kreislaufverluste auszugleichen. Ferner können unterschiedliche Einbausituationen für die zu untersuchende Kreiselpumpe simuliert werden.

Unterwasserdruckbehälter:

Mit dem Unterwasserkessel ist, bei Betrieb im geschlossenen Kreislauf, eine Möglichkeit zur Einstellung unterschiedlicher Druckniveaus gegeben. Dies geschieht einerseits durch Aufladen des Speichervolumens mit Pressluft (Erzeugung eines Überdruckes auf der Saugseite des Prüflings = Austritt Turbine bzw. Eintritt Pumpe) und andererseits durch Zuschalten einer Vakuumpumpe, über die ein Unterdruck im Dom des Unterwasserkessels und damit auf der Saugseite des Prüflings eingestellt werden kann. Im Zusammenwirken mit der Kreislaufpumpe kann somit das Druckniveau im Ein- und Austritt des Prüflings unabhängig voneinander eingestellt werden. Damit ist der Prüfstand variabel einsetzbar und auch zur Untersuchung von Kavitationseffekten geeignet.

Kavitationsbeobachtung:

Zur optischen Untersuchung der Kavitationseffekte sind die relevanten Wandbereiche des Pumpeneintritts und Turbinenaustritts mit Plexiglaseinsätzen versehen, durch die der Prozess der Dampfblasenbildung über den Transport bis hin zum Zusammenfallen beobachtet werden kann. Hierzu wird ein Stroboskop eingesetzt, dessen Blitzfrequenz mit der Schaufelgrundfrequenz getriggert und gegenüber dieser um einstellbare Phasenwinkel verschoben werden kann. Dadurch können Aufnahmen des quasistationären Strömungsfeldes zu definierten Zeitpunkten, d. h. definierten Relativpositionen der Laufschaufeln zum Trigger, erzeugt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit die Strömungskonfiguration im rotierenden Laufrad durch Einstellen eines Zeitlupeneffektes zu beobachten.

2.2 Kenndaten der Prüfstandskomponenten

Kenndaten des Prüfstandes

- Durchsatz:	bis 0,3 m ³ /s (bis 1080 m ³ /h)
- Pumpenförderhöhe:	ca. 15 mWS
- Turbinenfallhöhe:	ca. 10 mWS
- Antriebsleistung der Kreislaufpumpe:	55 kW
- zul. Druck für den Unterwasserkessel (p_{\min} bis p_{\max}) _{abs.} :	0,15 bis 3,5 bar

Kenndaten der Kreislaufpumpe

- Nenn-Fördermenge:	0,3 m ³ /s (1080 m ³ /h)
- Nenn-Förderhöhe:	15 mWS
- maximale Förderhöhe:	25 mWS
- NPSH-Wert:	5,4 m
- Nenndaten des Antriebsmotors:	55 kW, 960 min ⁻¹

Kenndaten des Unterwasserkessels

- Nenndruck:	-0,85 bis 2,5 bar
- Durchmesser:	1,2 m
- Volumen:	3,5 m ³

Kenndaten des Drosselschiebers

- Nenndurchmesser:	300 mm
- Nenndruck:	6,0 bar
- maximale Druckdifferenz:	5,0 bar

Kenndaten der Kaplan-Modellturbine

- Nenndaten des Generators:	22 kW, 3000 min ⁻¹
- maximale Drehzahl:	2000 min ⁻¹
- Referenzdurchmesser (D):	0,15 m
- Anströmfläche Hochdruckseite (A_1):	0,05309 m ²
- Abströmfläche Niederdruckseite (A_2):	0,08663 m ²

Kenndaten der Francis-Pumpe

- Nennbetriebsdaten des Antriebsmotors (Pumpbetrieb):	45 kW, 1500 min ⁻¹
- Nenndrehzahl:	1500 min ⁻¹
- maximale Drehzahl:	3000 min ⁻¹
- Referenzdurchmesser (D):	0,1792 m
- Durchmesser Hochdruckseite (d_1):	0,250 m
- Anströmfläche Hochdruckseite (A_1):	0,01779 m ²
- Abströmfläche Niederdruckseite (A_2):	0,05711 m ²

2.3 Versuchs- und Messtechnik

Die Versuchssteuerung erfolgt von einem zentralen Fahrstand aus. Mit Hilfe von Servomotoren werden die Parameter des jeweiligen Messpunktes eingestellt. Hierzu gehören die Drosselschieber- und Leitschaufelstellung, der Druck im Unterwasserbehälter, sowie die Förderhöhe der Kreislaufpumpe. Die Variation der Drehzahl erfolgt im Turbinenbetrieb durch Verändern der Belastung am Generator und im Pumpenbetrieb mit Hilfe einer Frequenzumformung am Motor. Als Belastungseinrichtungen kommen auf der Seite der Kaplan-turbine ein Generator und nachgeschaltete Belastungswiderstände zum Einsatz und auf der Francis-Seite das öffentliche Netz, in das mit Hilfe einer automatischen Synchronisierereinrichtung eingespeist wird. Die gesamte Messwertaufnahme, Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse wird über einen PC gesteuert.

3. Saugseitiger Kammerprüfstand für Ventilatoren

3.1 Entstehungsgeschichte des Prüfstandes

Der Ventilatorenprüfstand wurde in Kooperation mit einem mittelständischen Unternehmen (Gebrüder Schmidt AG, Beilngries) errichtet. Beteiligt waren zahlreiche Studenten im Rahmen ihrer Diplomarbeiten. Zunächst standen Überlegungen zur Konzeptfindung und darauf aufbauend die Auslegung der Prüfstandsgeometrie im Mittelpunkt. Anschließend ging es um die Ausarbeitung der Detailkonstruktionen und die Errichtung des Prüfstandes. In der dritten Phase lagen die Arbeitsschwerpunkte auf der Einrichtung der Messtechniken sowie auf der Erstellung der Autosequenzen zur rechnergesteuerten Messwertfassung und Versuchsauswertung.

Ausführliche Beschreibungen des Ventilatorenprojektes sind in der Hochschulzeitschrift der FH Regensburg (Ausgabe 1/95 und 1/97) enthalten.



Saugseitiger Kammerprüfstand für Ventilatoren

3.2 Einsatzspektrum, Prüfstandskonzept und Messtechnik

Einsatzspektrum

Der Kammerprüfstand wird eingesetzt zur messtechnischen Erfassung der Kennlinien von Ventilatoren. Ferner können Druckverlustmessungen an strömungsführenden Bauteilen durchgeführt werden. Alle Prüfstandskomponenten sind so dimensioniert, dass über den Einsatz im Lehrbetrieb hinaus, auch Industrieaufträge bearbeitet werden können. Im Hinblick darauf wurde die Prüfstandskonstruktion möglichst variabel gestaltet, so dass unterschiedliche Ventilatorbauarten mit differierenden Abmessungen und Anschlussmaßen eingebaut und untersucht werden können.

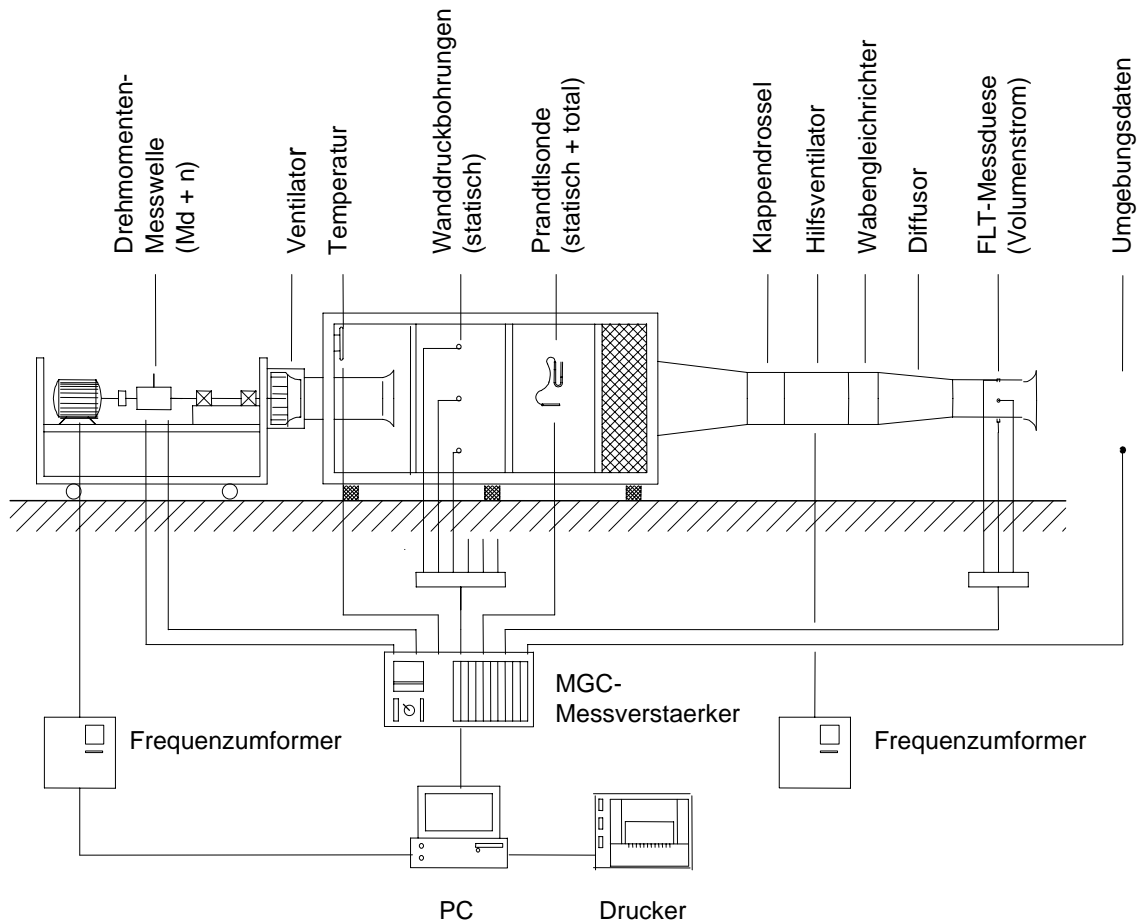
Im Rahmen des Ventilatorenprojektes wurden auf dem Prüfstand die Kennlinien der neu entwickelten Ventilatorenbaureihe der Firma Gebrüder Schmidt AG, Beilngries ermittelt. Nach Abschluss des Projektes wurde der Prüfstand auch zur Ermittlung der Druckverluste von Sieben eingesetzt.

Prüfstandskonzept

Grundlage des Prüfstandskonzeptes ist die DIN 24163. Sie umfasst drei Teile und gilt in erster Linie für Ventilatoren, die ohne Kenntnis der im jeweiligen Anwendungsfall vorhandenen Einbaubedingungen in Katalogen angeboten und nach den darin genannten Daten ausgewählt werden. Bei der konstruktiven Gestaltung des Prüfstandes wurden die Anforderungen der DIN und der ISO im Grundsatz erfüllt.

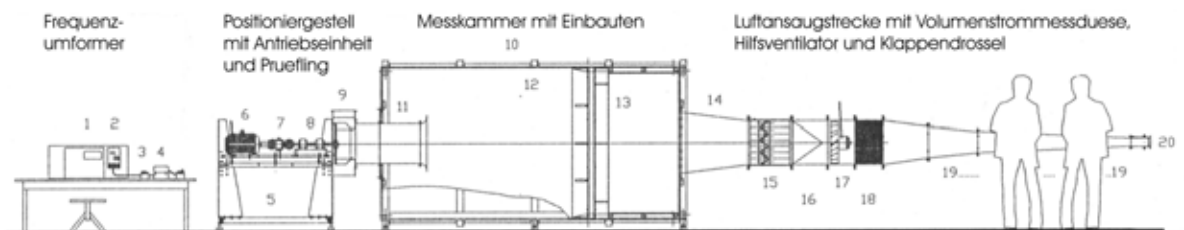
Messtechnik und Rechneranschluss

Die Erfassung und Auswertung der Messdaten sowie die Darstellung der Kennlinien erfolgt PC-gesteuert, auf der Basis der DIA/DAGO-Software (GfS Aachen), mit Hilfe selbstentwickelter Autosequenzen (siehe nachfolgendes Schema).



3.3 Beschreibung der konstruktiven Ausführung der Prüfstandskomponenten

Die nachfolgend dargestellte Zusammenstellungszeichnung gibt einen Überblick über die wichtigsten Bauteile des Prüfstandes.



Volumenstrom-Messeinrichtung (Bauteil Nr.: 20):

Nach DIN 24163 sind zur Volumenstrommessung unterschiedliche Blenden, Düsen oder Netzmessverfahren zugelassen. Die ausgewählte Viertelkreis-Einlaufmessdüse (FLT-Düsen) ist auch im Entwurf der ISO 5801 enthalten. Ausgelegt wurden 3 FLT-Düsen mit unterschiedlichen Durchmessern ($d_0 = 105, 210$ und 270 mm). Die Bemessung der Düsendurchmesser erfolgte in der Weise, dass für festgelegte Volumenstrombereiche zwischen 1000 und 10.000 m^3/h der Wirkdruck Δp_0 für die betreffende Düse zwischen ca. $100 \text{ Pa} < \Delta p_0 < 1000 \text{ Pa}$ liegt ($10^5 < \text{Re}_0 < 10^6$).

Diffusoren (Bauteil Nr.: 19)

Im Anschluss an das zylindrische Rohrstück der FLT-Düse wird die Strömung in Diffusoren mit konstanten Öffnungswinkeln verzögert. Um einen möglichst großen statischen Druckrückgewinn zu erzielen wurden die Öffnungswinkel der Diffusoren so bemessen, dass eine ablösungsfreie Verzögerung der Strömung gewährleistet wird.

Gleichrichter (Bauteil Nr.: 18):

Zum Einsatz kommt ein Wabengleichrichter, der in der zylindrischen Rohrstrecke zwischen der FLT-Düse und dem Hilfsventilator eingebaut ist. Zweck des Gleichrichters ist es, den Einfluss der vom Laufrad des Hilfsventilators ausgehenden, sich stromauf ausbreitenden Dreckgradienten (Drallströmungen) auf die Volumenstrommessung auszuschalten.

Hilfsventilator (Bauteil Nr.: 2, 17):

Um die gesamte Ventilator Kennlinie, einschließlich des Grenzbereichs $\dot{V} = \dot{V}_{\max}$; $\Delta p = 0$ aufnehmen zu können ist ein Hilfsventilator erforderlich, der den Widerstand der Prüfstandseinbauten bei voll geöffneter Drossel ausgleicht. Zum Einsatz kommt ein Axialventilator mit Frequenzumformer der Fa. Gebhardt Ventilatoren, Waldenburg.

Klappendrossel (Bauteil Nr.: 15):

Zur Regelung des Volumenstroms wird eine Klappendrossel eingesetzt, deren konstruktive Ausführung nicht in vollem Umfang den Vorgaben der DIN 24163 entspricht. Um die in der Norm geforderte gleichförmige und achsparallele Abströmung exakt zu gewährleisten sind Leitbleche zwischen jeder Klappe erforderlich sowie bestimmte Geometrievorgaben einzuhalten. Aufgrund der Prüfstandsart und der Ausführung der Messkammer sind beide Forderungen auch mit der eingesetzten Klappendrossel in Standardausführung erfüllbar.

Messkammer mit Einbauten (Bauteile Nr.: 10, 13):

Das Grundgerüst der Kammer besteht aus Vierkantstahlrohren, die durch eingeschweißte Gewindeeinsätze miteinander verschraubt sind. Um Strömungssichtbarmachungstechniken einsetzen zu können sind an den Seiten, im Bereich der Einströmdüse durchsichtige Makrolonplatten eingeschraubt. Der Rest ist mit funierten Spanplatten verkleidet. Alle Fugen und Nahtstellen zwischen den Platten und dem Grundrahmen bzw. den Anschlüssen sind sorgfältig abgedichtet. Abschließende Dichtheitstests haben gezeigt, dass auch bei hohen Druckdifferenzen die verbleibende Leckage äußerst gering ist.

Der Kammerquerschnitt beträgt 1,92m x 1,92m. Daraus resultiert bei einem Volumenstrom von 4000 m³/h eine Strömungsgeschwindigkeit in der Messkammer von $c = 0,3$ m/s. Die gesamte Länge der Messkammer beträgt 3,72 m. Zur Vergleichmäßigung der Strömung in der Kammer sind Lochbleche, Bremssiebe und Filtermatten eingebaut, deren Fixierung mit Hilfe eines Rahmengestells erfolgt, das konstruktiv so ausgeführt ist, dass es einen Teil der hohen Druckkräfte aufnimmt, die sich aufgrund der großen Flächen einstellen.

Messung des Kammerdruckes (Bauteil Nr.: 12):

Die Messung des statischen Kammerdruckes erfolgt über mehrere Wandbohrungen in den Makrolonplatten. Die Oberfläche, in der sich die Bohrungen befinden ist absolut ebenen, so dass eine genaue Messung des statischen Kammerdruckes gewährleistet ist.

Einströmdüse des zu untersuchenden Ventilators (Bauteile Nr.: 11):

Der zu untersuchende Ventilator saugt über eine austauschbare Einströmdüse aus der Kammer an und bläst in die Umgebung aus. Die Geometrie der Einströmdüse kann an die in der Anlage bestehenden Verhältnisse angepasst werden.

Positioniergestell, Antriebseinheit und Spiralgehäuse (Bauteile Nr.: 1, 5, 6, 9)

Auf dem separaten Positioniergestell ist die gesamte Antriebseinheit, bestehend aus E-Motor, Bogenzahnkupplung mit Drehmomentenmesswelle und Stehlager montiert.

Stirnseitig ist das Spiralgehäuse des zu untersuchenden Ventilators angeschraubt. Über ein zylindrisches Rohrstück wird das Spiralgehäuse an die Messkammer angeflanscht.

Das Ventilatorlaufrad ist fliegend gelagert und wird mit Hilfe einer TAPER LOCK Buchse auf dem freien Wellenende montiert. Die M_d - Messwelle ist zwischen Motor und Stehlager fest eingebaut, so dass zur Ermittlung der inneren Laufradleistung die mechanischen Verluste des Stehlagers von der gemessenen Antriebsleistung ($M_d \times \omega$) abzuziehen sind.

Zur Montage des Prüflings wird das gesamte Positioniergestell vom Prüfstand gelöst und mit Hilfe von Hubrollern zur Seite gefahren. Die Ausrichtung des Laufrades im Spiralgehäuse und die Einstellung der exakten Spaltweite erfolgt über eine Justierung der Grundplatte, auf der die komplette Antriebseinheit montiert ist. Hierzu kann die Platte über mehrere Gewindebolzen in ihrer Höhe und Neigung verstellt werden. Im Druckstutzen ist das eingebaute Ventilatorlaufrad erkennbar.