

Ausstattung Energie- und Strömungslabor

Im Energie- und Strömungstechniklabor sind mehrere Prüfstände für experimentelle Untersuchungen in den nachfolgenden Themengebieten aufgebaut:

1. Strömungsmesstechnik mit:
 - 1.1. Sondenkalibrierung
 - 1.2. Windkanal

2. Thermischen Strömungsmaschinen mit:
 - 2.1. Gasturbine
 - 2.2. Axialverdichter

3. Hydraulischen Strömungsmaschinen mit:
 - 3.1. Peltonturbine
 - 3.2. Kaplan turbine

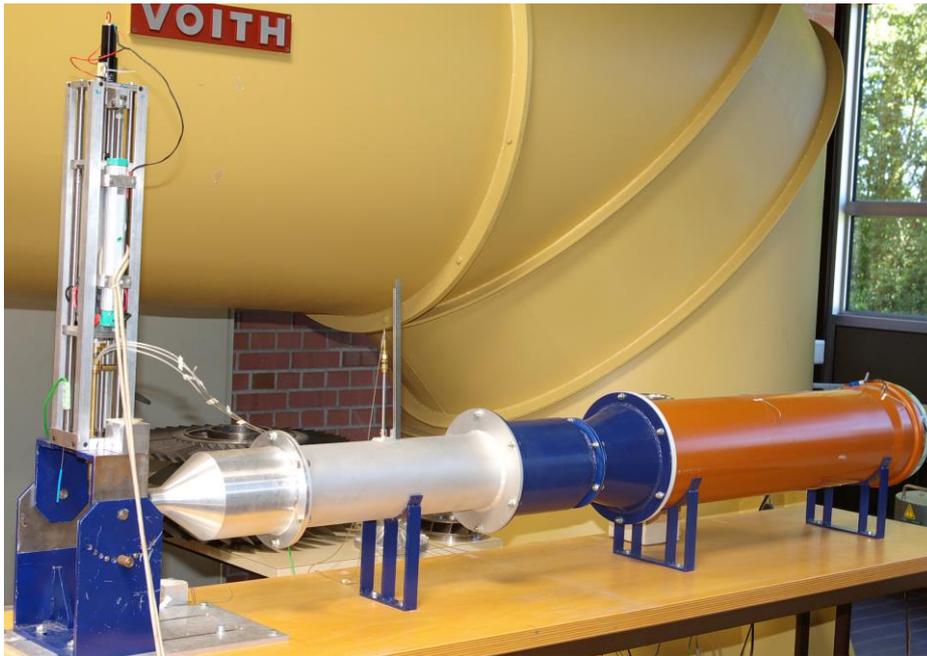
4. Energietechnik für die Hausversorgung mit:
 - 4.1. Brennstoffzelle
 - 4.2. Wärmepumpe

Alle Prüfstände sind mit modernen Messwerverfassungs- und -verarbeitungssystemen ausgestattet. Als Messsoftware wird überwiegend LabVIEW von National Instruments eingesetzt.

Prüfstände

1. Strömungsmesstechnik

1.1. Strömungsmesstechnik mit Strömungssonden und Sondenkalibrierung



Messstrecke zur Sondenkalibrierung

Die experimentelle Untersuchung von Strömungsfeldern ist sehr wichtig, um das Verhalten realer Strömungsvorgänge experimentell erfassen und um Berechnungsverfahren mit gemessenen Werten validieren zu können. Hierzu werden pneumatisch messende Mehrlochsonden eingesetzt. Im Labor werden folgende Sonden eingesetzt:

- Keilsonde (Vierlochsonde) für dreidimensionale Strömungen
- Zylindersonde (Dreilochsonde) für zweidimensionale Strömungen

Alle Sonden werden im Strömungstechniklabor und mit der Hochschulwerkstatt entwickelt und gefertigt. Die Abmessungen werden so klein wie möglich gehalten, um den Einfluss des Sondenkopfes auf die Strömung so klein wie möglich zu halten.

Die Vierlochsonde (rechtes Bild) kann dreidimensionale Strömungen messen.



Die Dreilochsonde (linkes Bild) ist eine Zylindersonde und kann zweidimensionale Strömungen messen. Der Durchmesser der Zylindersonde beträgt 2-3 mm, zusätzlich ist am Sondenkopf ein Thermoelement zur Temperaturmessung angebracht.



Beim Versuch Sondenkalibrierung wird die Dreilochsonde bzw. die Vierlochsonde im Sondenkalibrierkanal kalibriert. Aus der Druckverteilung am Sondenkopf kann die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden.

Es werden folgende Messungen durchgeführt:

- Druckverteilung an der Dreilochsonde bzw. Vierlochsonde und im Sondenkalibrierkanal
- Temperatur an der Sonde und im Kalibrierkanal
- Drehzahl des Gebläses im Kalibrierkanal

Mit den Messungen können dann folgende Ergebnisse bestimmt werden:

- Ermittlung von Kalibrierfaktoren für den statischen Druck und den Totaldruck an der Sonde
- Messung von Geschwindigkeiten beliebiger Strömungen (Betrag der Strömungsgeschwindigkeit) bei abgeglichener Sonde
- Variation von Gier- und Nickwinkel des Sondenverstellgerätes

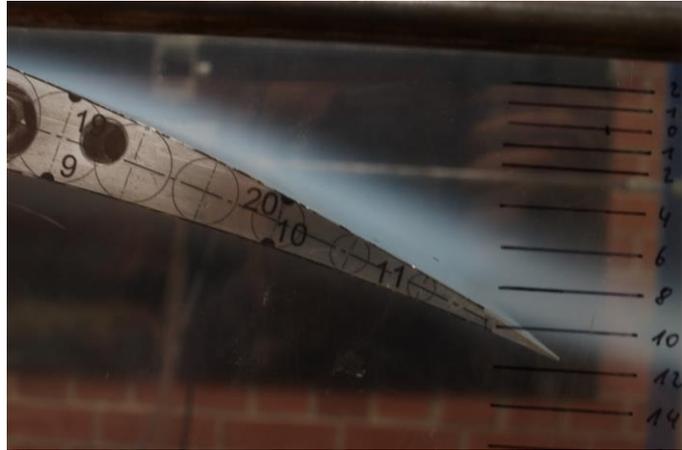
Die Kalibrierfaktoren für den statischen Druck und den Totaldruck werden später für den Praktikumsversuch „Axialverdichter“ benötigt. Dort werden mehrere Sonden eingesetzt und mit Hilfe der ermittelten Kalibrierfaktoren können beliebige Strömungsfelder gemessen werden. Alle Messgrößen werden in LabVIEW erfasst und stehen dann zur Weiterverarbeitung zur Verfügung.

1.2. Tragflügelumströmung im Windkanal



Tragflügel im Windkanal

Im Labor ist ein Windkanal Göttinger Bauart mit einfacher, geschlossener Strömungsrückführung und offener Messstrecke aufgebaut. Der messtechnische Aufbau des Windkanals besteht aus einem Messtisch und einer mit Plexiglasscheiben verkleideten Messkammer, in dem das Tragflügelprofil aufgehängt ist. Die Aufhängung wird über senkrechte und waagrechte Stangen in der Messkammer realisiert. Durch diese Konstruktion werden in vertikaler und horizontaler Richtung voneinander unabhängige Bewegungen erzielt. Mittels Kraftsensoren in den senkrechten und waagrechten Stangen werden Kräfte in diesen beiden Richtungen aufgenommen. Mit Hilfe eines regelbaren Schrittmotors wird das Tragflügelprofil bei unterschiedlichen Anstellwinkeln positioniert. Die Zuströmung zum Tragflügel erfolgt in horizontaler Richtung, die Umströmung des Tragflügelprofils in der Messkammer ergibt sich weitgehend als zweidimensionale Strömung.



Angeströmter Tragflügel

Im Tragflügelversuch werden folgende Parameter ermittelt:

- Die Druckverteilung über der Tragflügeloberfläche wird über Messbohrungen und mit Hilfe des Druckscanners bei unterschiedlichen Anstellwinkeln gemessen
- Mit dem Flügelradanemometer wird die Zuströmgeschwindigkeit und die Temperatur gemessen
- Mit dem Prandtl-Staurohr wird der statische Druck und der Totaldruck der Zuströmung gemessen
- Die Auftriebskraft F_A wird über die Druckverteilung ermittelt
- Die Auftriebskraft F_A wird über die an der Aufhängung angebrachten Kraftsensoren gemessen
- Die Widerstandskraft F_W wird aus der Änderung des Geschwindigkeitsfeldes in horizontaler Richtung ermittelt (Impulsverlust)
- Aus F_A und F_W werden die Widerstandsbeiwerte c_A und c_W berechnet

Die Messwerte werden in LabVIEW erfasst, die Ansteuerung des Druckscanners und des Schrittmotors für die Variation des Anstellwinkels erfolgt ebenfalls in LabVIEW.

Technische Daten:

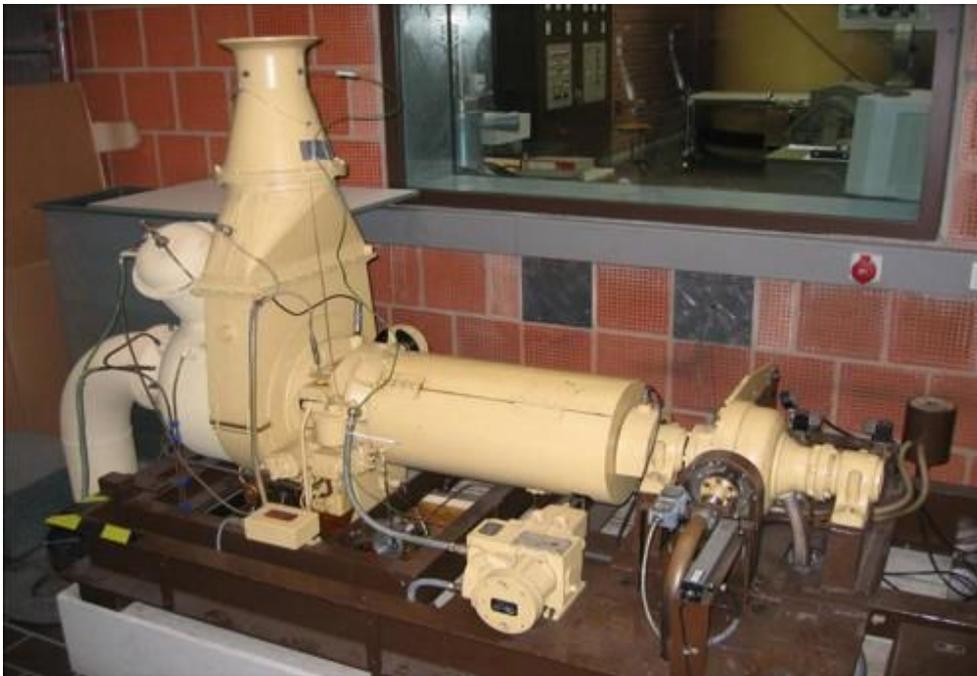
Durchmesser am Düsenaustritt	1000 mm
Strömungsgeschwindigkeit am Düsenaustritt	max. 90 m/s
Volumenstrom am Düsenaustritt	max. 70 m ³ /s
Elektrische Leistung des Windkanalgebläses	180 kW
Durchmesser des Windkanalgebläses	1600 mm

2. Thermische Strömungsmaschinen

Im Labor werden experimentelle Untersuchungen in thermischen Strömungsmaschinen an einer Gasturbine, im Axialverdichter und im sich in Aufbau befindenden Radialverdichter durchgeführt.

2.1. Gasturbinenprüfstand

Gasturbinen können schnell in Betrieb gesetzt werden und dienen daher als Spitzenlastkraftwerke für die Stromerzeugung. Durch die kompakte Bauweise der Gasturbine werden diese auch als Antriebe in Schiffen, im Kfz und in Diesellokomotiven eingesetzt. Bedeutende Anwendung hat die Gasturbine als Triebwerk in Flugzeugen erfahren.



Gasturbine

Beim Gasturbinenprüfstand werden folgende Größen messtechnisch bestimmt oder aus anderen Messgrößen berechnet:

- Der Luftmassenstrom am Gasturbineneintritt wird mit Hilfe der Einströmdüse ermittelt
- Die Brennstoffmenge wird im Brennstoffzuteilsystem gemessen
- Das Drehmoment wird über einen eingebauten Torsionsstab (Verdrehwinkel) erfasst
- Die Drehzahl der Gasturbinenabtriebswelle wird induktiv mit Hilfe einer Zahnscheibe bestimmt



- Die Temperaturen in der Gasturbine werden mit Thermoelementen gemessen
- Die Drücke in der Gasturbine werden mit Drucksensoren erfasst

Alle Daten werden rechnergestützt erfasst und ausgewertet (LabVIEW).

Das Versuchsprogramm umfasst folgende Teile:

- Darstellung des Gasturbinen- Prozesses im T,s- und h,s-Diagramm
- Daraus die Bestimmung der übertragenen Wärmen und Arbeiten
- Ermittlung und Darstellung des thermodynamischen Wirkungsgrades
- Bestimmung und Darstellung der Nutzleistung
- Ermittlung von Gasturbinenkennwerten (Turbine und Verdichter)

Die technischen Daten der Gasturbine:

Nennleistung (Nutzleistung)	$P_{\text{nutz}} = 73,5 \text{ kW (100 PS)}$
Getriebeverhältnis	$z = 16,667:1$
Druckverhältnis	$\pi < 2,8$
Luftdurchsatz	$\dot{m}_{\text{Luft}} = 0,9 \text{ kg/s}$
Zünddrehzahl	$n_{\text{zünd}} \approx 5000 \text{ U/min}$
Brennstoff	Heizöl EL
Einlaufdüse	$D = 135 \text{ mm}$
Drehzahl der Nutmaschine (Wasserwirbelbremse)	$n_{\text{nutz}} = 3000 \text{ U/min}$
Eintrittstemperatur Verdichter	$T_{\text{Umg}} \approx 20 \text{ °C}$
Austrittstemperatur Verdichter	$T_{\text{verd}} = 250\text{-}300 \text{ °C}$
Eintrittstemperatur Turbine	$T_{\text{Turb_ein}} = 700\text{-}1000 \text{ °C}$
Austrittstemperatur Turbine	$T_{\text{Turb_aus}} = 400\text{-}500 \text{ °C}$

Bei Austrittstemperaturen der Turbine von $T_{\text{Turb_aus}} = 480 \text{ °C}$ ist eine Wärmenutzung auf hohem Temperaturniveau möglich. Bei gleichzeitiger Nutzung der Nutzarbeit und der Nutzwärme spricht man von „Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)“

2.2. Axialverdichterprüfstand



Axialverdichter

Im Axialverdichterprüfstand werden der Strömungszustand in der Axialverdichterbeschaufelung, die relevanten Kenngrößen des Axialverdichters und das Betriebsverhalten der Gesamtanlage - bestehend aus Axialverdichter und Last (Verbraucher) bestimmt.

Bei Axialverdichtern erfolgt die Hauptströmungsrichtung in axialer Richtung. Die Axialverdichterstufe - bestehend aus Laufrad und Leitrad - wird axial angeströmt, im Laufrad wird die Strömung in Umfangsrichtung umgelenkt und nach dem Leitrad erfolgt die Abströmung in axialer Richtung.

Beim Axialverdichterprüfstand werden folgende Kenngrößen messtechnisch ermittelt oder aus anderen Messgrößen berechnet:

- Der Massenstrom am Axialverdichtereintritt mittels der Einströmdüse
- Die Strömungsgeschwindigkeiten über der Axialverdichterstufe (Laufrad, Leitrad) mit Dreilochsonden bzw. Vierlochsonden
- Das Drehmoment an der Axialverdichterwelle des Antriebsmotors über eine Messwaage
- Die Drehzahl über einen Tachogenerator
- Der Arbeitspunkt des Verbrauchers über die Verstellung einer Drosselklappe (Jalousiewinkel)
- Die Druckverteilung im Axialverdichter über Messbohrungen und mit einem Druckscanner

Folgende Parameter und Kennlinien werden im Axialverdichterprüfstand ermittelt:

- Die Verbraucher- bzw. Lastkennlinie
- Der Druckverlauf in der Axialverdichterstufe
- Der Zustandsverlauf im Axialverdichter im h,s -Diagramm

- Der Strömungszustand über der Axialverdichterstufe
- Die Geschwindigkeitsdreiecke und Schaufelpläne im Mittelschnitt
- Verdichterkennlinie des Axialverdichters
- Die Arbeitspunkte des Axialverdichters (Gesamtanlage)
- Der Polytropenexponent n des Axialverdichters

Die Messwerterfassung und -ansteuerung des Druckscanners und die Weiterverarbeitung der Messwerte erfolgt in LabVIEW.

Technische Daten des Axialverdichters:

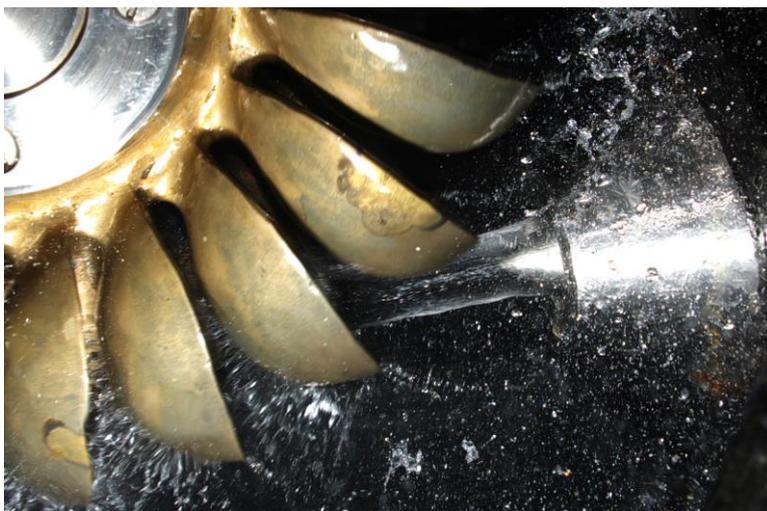
Volumenstrom	$\dot{V} = 4,5 \text{ m}^3/\text{s}$
Antriebsleistung	$P_{\text{an}} = 5,25 \text{ kW}$
Drehzahl	$n_{\text{AV}} = 3000 \text{ U/min}$
Druckdifferenz der Axialverdichterstufe	$\Delta p = 981 \text{ Pa} = 9,81 \text{ mbar}$

3. Hydraulische Strömungsmaschinen

Im Labor werden experimentelle Untersuchungen in hydraulischen Strömungsmaschinen an einer Peltonturbine und an einer Kaplan-Rohrturbine durchgeführt.

3.1. Peltonturbinenprüfstand

Die Peltonturbine wird in Wasserkraftwerken bei sehr großen Fallhöhen eingesetzt.



Laufgrad der Peltonturbine mit Zuströmdüse

Die Peltonturbine ist eine Freistrahlturbine. Dabei werden von außen durch Düsen gebündelte freie Wasserstrahlen tangential auf die Schaufeln geleitet, welche das Laufgrad der Turbine

antreiben.

Die Peltonturbine ist mit einem Synchrongenerator gekoppelt und ermöglicht die Kopplung zum elektrischen Netz.

Die Ertüchtigung der Leittechnik des Peltonturbinenprüfstandes durch eine neue Siemens-Leittechnik ist annähernd abgeschlossen. Die Steuerung und Regelung der Peltonturbine und die komplette Bedienung des Peltonturbinenprüfstandes erfolgt nun softwaregesteuert über einen Panel-PC.



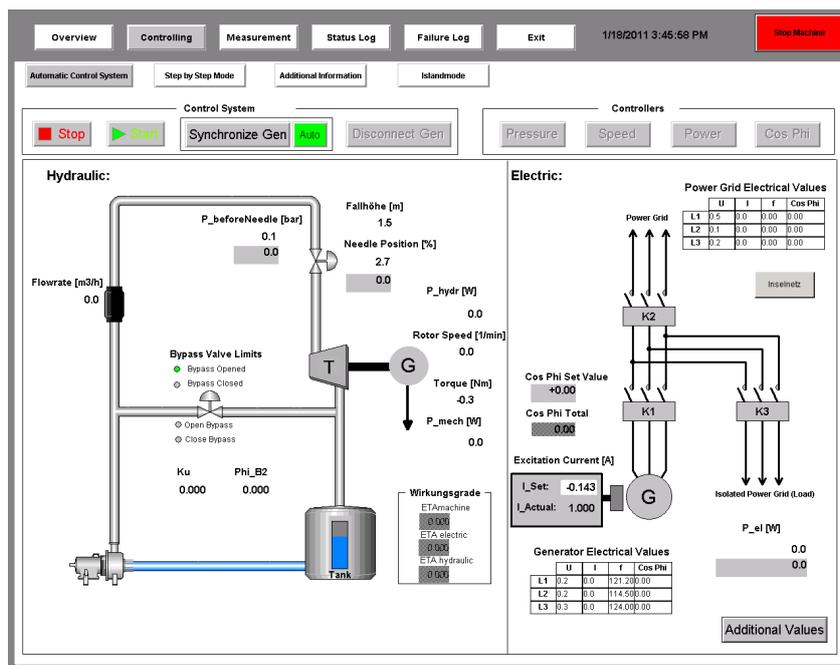
Peltonturbinenprüfstand

Es können folgende Betriebsarten mit der Peltonturbine realisiert werden:

- Netzbetrieb (Synchronisation mit dem öffentlichen Stromnetz)
- Inselbetrieb (Synchronisation mit einem Inselnetz)
- Phasenschieberbetrieb

Mittels der neuen Leittechnik können durch das Human Machine Interface (HMI) alle elektrischen, hydraulischen und mechanischen Messgrößen erfasst werden.

Im Rahmen von Forschungsarbeiten wurde das Wirkungsgradkennfeld, das sog. Muscheldiagramm der Peltonturbine ermittelt. Zusätzlich werden Polradwinkel und die Induktivität des Generators bestimmt, um das in der Leittechnik integrierte Generatorschutzrelais anzupassen.



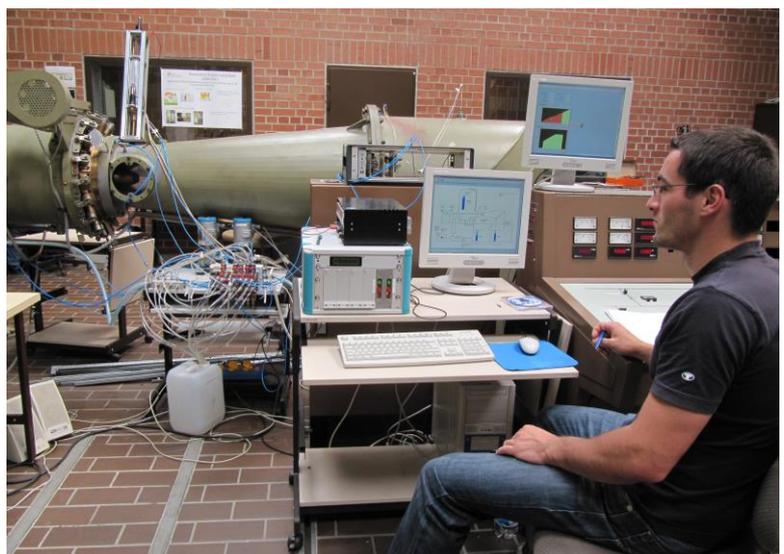
3.2. Kaplan - Rohrturbinen - Prüfstand

Kaplan-Rohrturbinen kommen bei kleineren Fallhöhen in Flusskraftwerken zum Einsatz.



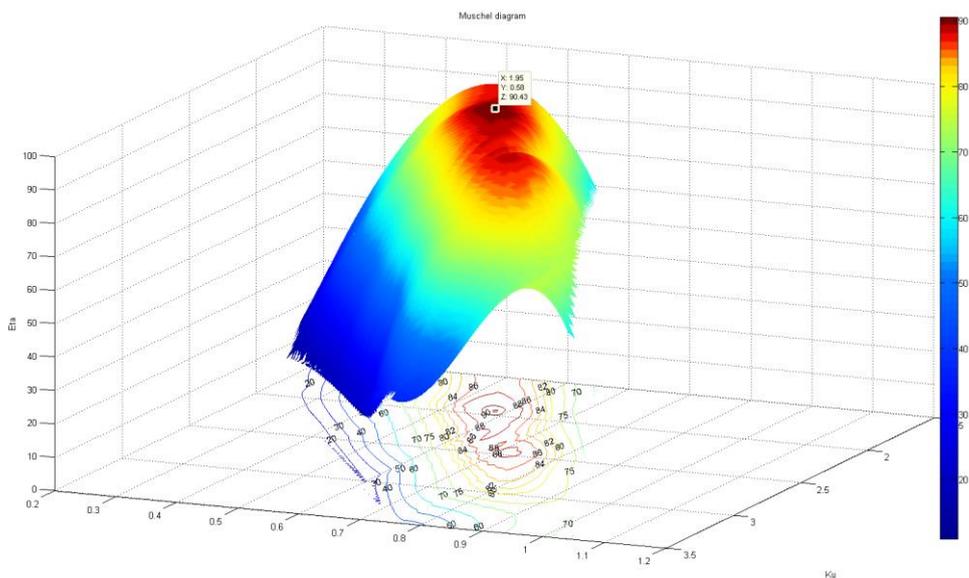
Kaplan-Rohrturbinen-Prüfstand

Im Labor ist eine Kaplan-Rohrturbine mit gekoppeltem Gleichstromgenerator und Netzeinspeisung über Stromrichter aufgebaut. Die Rohrturbine besitzt verstellbare Leit- und Laufbeschaufelungen. Dadurch kann die Rohrturbine an unterschiedliche Massenströme, Druckgefälle und mittels Gleichstromgenerator an unterschiedliche Drehzahlen angepasst werden.



Beim Kaplan-Rohrturbinen-Prüfstand kann der Wirkungsgrad der Turbine bei verschiedenen Leitrad- und Laufradschaufelstellungen und Betriebszuständen ermittelt werden. Es werden der hydraulische und der mechanische Wirkungsgrad ermittelt. Dazu werden das Druckgefälle, der Volumenstrom, die Drehzahl und das Drehmoment gemessen.

In folgender Grafik ist das Wirkungsgraddiagramm (Muscheldiagramm) der Kaplan-Rohrturbine zu sehen.



Muscheldiagramm Kaplan-Rohrturbine

Zusätzlich können beim Rohrturbinenprüfstand auch Kavitationsphänomene durch das Sichtfenster im Schaufelbereich beobachtet werden. Durch Aufprägung eines Druckes im Windkessel bis maximal $p = 4$ bar kann die Fallhöhe erhöht werden.

Technische Daten der Rohrturbine:

Volumenstrom	$\dot{V} = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$
Nutzleistung	$P_{\text{nutz}} = 40 \text{ kW}$
Drehzahl	$n = 1480 \text{ U}/\text{min}$
Maximale Fallhöhe (mit Druckaufprägung)	$h = 49 \text{ m}$
Druckaufprägung	$p = 4 \text{ bar (40 m)}$

Derzeit wird am Rohrturbineprüfstand eine Regelklappe zur Druckregelung am Turbinenaustritt eingebaut.

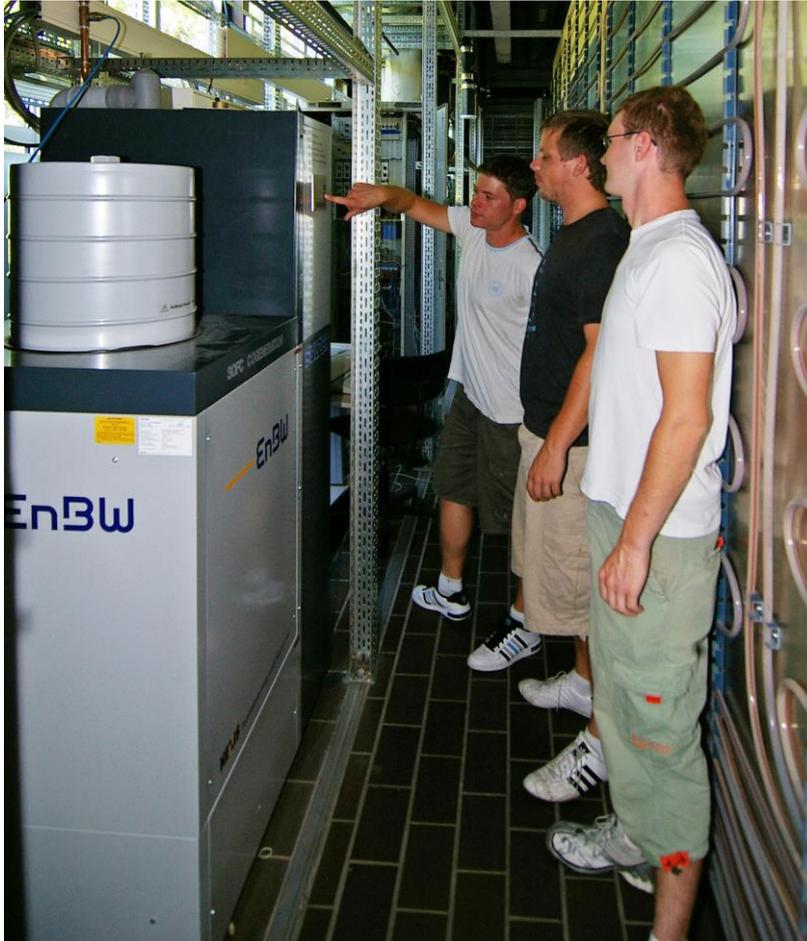
Folgende Parameter und Kennlinien werden im Kaplan-Rohrturbinen-Prüfstand ermittelt:

- Druckverlauf über der Versuchsanlage bestehend aus Kaplanstufe (Leit- und Laufrad, Diffusor)

- Strömungszustand über Leit- und Laufradbeschaukelung mit Strömungssonde (Geschwindigkeitsdreiecke)
- Kennlinie der Kaplan turbine mit Muscheldiagramm

4. Energietechnik für die Hausenergieversorgung

4.1. Brennstoffzellenversuchsstand - Hausenergieversorgung



Brennstoffzellenversuchsstand

Im Rahmen einer Forschungs Kooperation mit der EnBW AG steht der Hochschule Weingarten ein mit Erdgas betriebenes Brennstoffzellen-Heizsystem der Firma Sulzer Hexis AG zur Verfügung. Im Brennstoffzellen-Heizsystem ist eine Hochleistungs-Brennstoffzelle (Solid Oxid Fuel Cell SOFC) eingebaut. Brennstoffzellen wandeln auf direktem Wege Wasserstoff und Sauerstoff in Strom und Wärme um, dabei entsteht Wasser als Abfallprodukt. Der



Wasserstoff wird aus dem Brennstoff Erdgas in einer vorgelagerten Umwandlungsstufe erzeugt. Dadurch entsteht im Gegensatz zu konventionellen Technologien praktisch kein Lärm und ist zudem noch schadstoff- und kohlendioxidemissionsarm (CO₂-Emissionen).

Im Brennstoffzellen-Heizsystem ist zusätzlich ein Brennwertgerät eingebaut, welches bei Bedarf zusätzliche Heizleistung bereitstellt.

Zu Forschungszwecken werden die Lastprofile ausgewählter Niedrigenergiehäuser energetisch untersucht und im Brennstoffzellenheizgerät simuliert.

Im Rahmen von Diplomarbeiten wurde das Leitungssystem mit Beimischventilen im Simulationsprogramm „Flowmaster“ abgebildet. Ein Vergleich von experimentellen und numerischen Simulationen ist möglich und dient somit dem thermodynamischen und strömungstechnischen Überblick der Anlage. Die so gewonnenen Ergebnisse werden im Brennstoffzellenversuchsstand umgesetzt und nachgefahren und mit den Simulationsergebnissen verglichen.

Technische Daten SOFC-Brennstoffzelle:

Elektrische Leistung Brennstoffzelle	$P_{el} = 1 \text{ kW}$
Thermische Leistung Brennstoffzelle	$P_{th} = 2,5 \text{ kW}$
Thermische Leistung Brennwertgerät	$P_{th_Zusatz} = 22 \text{ kW}$
Puffer-Wärmespeicher	$V = 200 \text{ l}$

4.2. Wärmepumpe

Zudem wird das Brennstoffzellen-Heizsystem mit einer integrierten Luft-Wasser-Wärmepumpe gekoppelt. Wärmepumpensysteme mit integrierter Lüftungstechnik und Wärmerückgewinnung stellen innovative Heizsysteme für Gebäude dar, mit denen die geforderten Anforderungen der Energieeinsparverordnung EnEV erfüllt werden können.

Die Wärmepumpe hat folgende Funktionen: Heizen, Warmwasserbereitung und Lüften.



Technische Daten Luft-Wärmepumpe:

Wärmeleistung	$P_{th} = 6 \text{ kW}$
Elektrische Zusatzheizung	$P_{Zusatz_{el}} = 8,8 \text{ kW}$
Luftvolumenstrom Wärmepumpe	$\dot{V} = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$
Einsatzbereich T_{min}/T_{max}	$T = -18\dots+30^\circ\text{C}$