



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 1. November 2012

Pilotanlage Münster (VS) – Universalmaschine für Wasserversorgungen

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wasserkraft
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

stiftung revita, CH-4438 Langenbruck

Auftragnehmer:

stiftung revita
Schwengiweg 12
CH-4438 Langenbruck
www.revita.ch

Autoren:

Patrick Kamber, stiftung revita, patrick.kamber@revita.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Dr. Klaus Jorde

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 154190 / 103181

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

In Münster VS betreibt das Elektrizitätswerk Obergoms ein Kleinwasserkraftwerk mit 200 kW Leistung, das das reichlich vorhandene Wasser im Sommerhalbjahr bei weitem nicht zu schlucken vermag. Die Eigenheit dieses KWKW ist der Umstand, dass gefasstes Quell- und gefasstes Bachwasser in der Brunnstube in getrennten Becken zur Verfügung steht und über zwei getrennte Leitungen nach unten zum Turbinenhaus geführt wird. Dort werden die Leitungen vereint und auf eine horizontalachsige Pelton turbine geführt. Im Rahmen dieses Projektes wurden die beiden Leitungen getrennt und die Trinkwasserleitung auf eine neu installierte Universalturbine geführt. Die Universalturbine ist eine modular aufgebaute Pelton turbine, die sich einfach an verschiedene Potenziale anpassen lässt und diese wirtschaftlich nutzt.

Aufgrund der stark verzögerten Fertigstellung der Installation durch den Turbinenbauer konnte die Pilotanlage zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht in den Dauerbetrieb übergeben werden. Glücklicherweise konnte der Nachweis der Betriebstauglichkeit der Universalturbine bereits an anderen Standorten erbracht werden. Am Pilotstandort der Universalturbine wurde eine Visualisierung ausgearbeitet, die sich dem Thema der Trinkwasserturbinierung mit der gegendruckfähigen Universalturbine annimmt.

Zur Weiterentwicklung der Universalturbine in Richtung geschlossener Gegendrucksysteme wurde eine Modellturbine gebaut, die die Entwicklung der Gegendruckregelung und Untersuchungen zum Lufteintrag ermöglichte. Die Modellturbine dient als Prüf- und Entwicklungsstand und eignet sich durch die gute Visualisierung als Demonstrationsobjekt. Die Gegendruckregelung für geschlossene Systeme hat auf der Modellturbine einen guten Reifegrad erreicht. Die Modellturbine hat auch an der Universität Stuttgart für die Untersuchungen zum Luftaustrag gedient. Die Ergebnisse zeigen, dass bei richtiger Auslegung des Turbinenkessels nur Luft, die sich im Wasser gelöst hat, ausgetragen wird. Das Wasser, das den Kessel verlässt, ist dabei mit Luft gesättigt.

Das Wissen zur Auslegung und zum Bau einer Gegendruckpelton turbine für geschlossene Systeme ist nun vorhanden. Welche Luftmenge in der Versorgungsleitung zum Verbraucher akzeptiert werden kann, ist die gegenwärtig einzige offene Fragestellung. Eine Projekteingabe beim BMBF der Universität Stuttgart, an der die Stiftung Revita mitgearbeitet hat, macht sich unter anderem die Beantwortung dieser Frage zum Ziel. Sobald diese letzte Frage geklärt ist, steht der Weg offen für Energieerzeugungen in geschlossenen Gegendrucksystemen.

Abbildungsverzeichnis

Fig. 1: Brunnenstube KWKW EWO.....	6
Fig. 2: Turbinenhaus KWKW EWO	6
Fig. 3: 2-düsige Pelton-turbine	6
Fig. 4: 2-düsige Universalturbine.....	6
Fig. 5: 2-düsige Universalturbine in Oberriet.....	7
Fig. 6: Gegendruckturbine in Gordola	7
Fig. 7: Versuchsturbinenwagen mit Turbinenwagen links und Tankwagen rechts. (Lippunertagung 2010)	9
Fig. 8: LabView-Oberfläche Versuchsturbinenwagen.....	9
Fig. 9: Die neue Leitvorrichtung	10
Fig. 10: Konstruktion Leitvorrichtung.....	10
Fig. 11: Die Millenium 3 von Crouzet.	11
Fig. 12: Abflussvariation mit Gegendruckregelung.....	13
Fig. 13: Versuchsturbine im Wasserkreislauf des LWW an der Universität Stuttgart.....	15
Fig. 14: Schematischer Versuchsaufbau mit Messeinrichtung.....	16
Fig. 15: Drosselung vor Abscheidekammer.....	17
Fig. 16: Drosselung nach Abscheidekammer.....	17
Fig. 17: Abscheidekammer nach zweitem Absperrschieber.....	18
Fig. 18: Berechnung für 3 Punkte im Kennfeld der Universalturbine.....	19
Fig. 19: Wasserstrahl-Gasverdichter an der Modellturbine.....	20
Fig. 20: Luftaustrag in Abhängigkeit des Drucks.....	21
Fig. 21: Füllzeit Turbinenkessel [min].....	21
Fig. 22: Schematische Anordnung Turbinenkessel und Reservebehälter (ohne Ventile).....	22
Fig. 23: Entleerungszeit Reservebehälter nach Ausflussformel von Torricelli [min].....	23
Fig. 24: Fördervolumen normiert auf Umgebungsdruck [l/min].....	24
Fig. 25: permanente Kompressorleistung [W].....	24
Fig. 26: Lagereinheit Modellturbine.....	26
Fig. 27: Anordnung Generator und Lagerung. Modellturbine (Riemen und Riemenscheibe fehlen.)...	26
Fig. 28: Lagerbuchse und Welle nach dem Einlaufen.....	27
Fig. 29: Lagerbuchse und Welle nach 50 Stunden.....	27
Fig. 30: Lagerbuchse nach 150 Stunden.....	28
Fig. 31: Lagerbuchse nach 300 Stunden.....	28
Fig. 32: Reibstelle.....	28
Fig. 33: Funktionsweise der Universalturbine.....	30
Fig. 34: Anwendungen der Universalturbine.....	30

Projektziele

Viele Wasserversorgungen für Trinkwasser, Wässerwasser, Berieselungen, Beschneigungsanlagen etc. beinhalten durch die Höhenunterschiede Energiepotenziale, von denen nur ein Teil für die Wasserversorgung genutzt werden kann. Der Rest wird heute meist mit Druckbrecherschächten und Druckreduzierventilen in nicht weiter nutzbare Wärme umgewandelt. Alleine im Trinkwasserbereich ist das Potenzial immens. Rund 40 % des schweizerischen Trinkwasserbedarfs, das sind 400 Millionen Kubikmeter jährlich, werden durch Quelfassungen gewonnen.

Die Universalturbine ist eine universell einsetzbare Turbine, die die ungenutzten Energien in Wasserversorgungen in elektrische Energie umwandelt. Die Turbine basiert auf dem Prinzip der Peltonturbine und deckt dank modularer Bauweise den Bereich von 5.5 bis 55 kW ab. Mit der Universalturbine werden Energiepotenziale auch im Gegendruck- und im kleinen Leistungsbereich effizient und wirtschaftlich genutzt.

In Münster betreibt das Elektrizitätswerk Obergoms (EWO) ein Kleinwasserkraftwerk mit rund 200 kW Leistung. Es werden aktuell eine Schmutzwasserquelle und eine Trinkwasserquelle auf ein und dieselbe Turbine geleitet. Die Turbine ist jedoch nicht im Stande, das ganze Jahr über die vorhandene Wassermenge abzuturbinieren. Aus diesem Grund wird zukünftig das Wasser der Trinkwasserquelle auf die Pilotanlage geleitet. Durch die Trennung der beiden Quellzuflüsse kann das Trinkwasser bei Bedarf als Notwasserversorgung der Region dienen.

Im Rahmen Projekts „Pilotanlage in Münster (VS)“ gibt es die folgenden Projektziele:

- Umbau Druckleitung und Turbinenhaus; Planung, Bau und Installation der Pilotanlage
- Nachweis der Betriebstauglichkeit der Universalturbine
- Untersuchung von verschiedenen Lufteintragsmöglichkeiten, Untersuchung von Wasserstrahl-Gasverdichtern im Speziellen
- Untersuchungen bezüglich Luftaustrag
- Simulation von Turbinenbetriebe an anderen Standorten und damit einhergehend Untersuchungen und Entwicklungen betreffend Gegendruckregelung
- Weiterentwicklung der Universalturbine: Kombination von Wellendichtung und Lager
- Visualisierungen und Informationen für Fachleute und Interessierte entsprechend Visualisierungskonzept

Ein integraler Bestandteil des Projekts ist der Bau einer Modellturbine (Versuchsturbine). Die Modellturbine soll, wie der Name schon sagt, ein Modell der Universalturbine sein, das gegendruckfähig ist. Sie wird die Entwicklungen und Untersuchungen im Projekt erst möglich machen. Die Modellturbine soll so konzipiert sein, dass sie einfach anpassbar und erweiterbar ist und als Entwicklungs- und Prüfstand dient. In der Entwicklung der Modellturbine ist die Entwicklung einer Leitvorrichtung (Düsennadelverstellung) enthalten. Die Leitvorrichtung muss die Anforderungen der Gegendruckregelung umsetzen können.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Pilotanlage Münster

Die Brunnstube des KWKW des EWO (Fig. 1) beinhaltet 2 Speicherbecken: ein Trinkwasserbecken und ein Bachwasserbecken. Von diesen Becken führen je eine Leitung ins rund 220 Höhenmeter tiefer gelegene Turbinenhaus (Fig. 2). Gleich vor dem Turbinenhaus vereinten sich die beiden Leitungen zu einer und gingen auf die 200 kW-Peltonanlage (Fig. 3). Im Rahmen der Pilotanlage wurden die beiden Leitungen getrennt und separat ins Turbinenhaus geführt. Die Leitung mit dem Bachwasser speist die bestehende Turbine, die Leitung mit dem Trinkwasser speist nun neu die Pilotanlage (Fig. 4).



Fig. 1: Brunnenstube KWKW EWO



Fig. 2: Turbinenhaus KWKW EWO



Fig. 3: 2-düsige Pelton turbine



Fig. 4: 2-düsige Universal turbine

Die Pilotanlage ist eine 2-düsige 45 kW Universal turbine. Die Umbauarbeiten an der Druckleitung wurden von der VWI Ingenieure AG geleitet. Der Turbinenbauer und -Lieferant ist die Zobo Hydropower GmbH. Die Steuerungsbauer ist die Küffer Elektrotechnik AG. Die Auslegung der Steuerung und die Erstellung der Software wurden von der Stiftung Revita durchgeführt.

Obwohl die Turbine bereits im Sommer 2009 fertig gebaut war, ist sie, aufgrund verschiedener und langwieriger Differenzen zwischen dem EWO und der Zobo Hydropower GmbH, erst diesen Herbst durch die Zobo Hydropower GmbH Inbetriebnahme bereit erstellt worden. So konnte sie zwar zum Zeitpunkte der Niederlegung dieses Schlussberichtes einmal kurz in Betrieb genommen werden, musste daraufhin jedoch wegen Problemen am Kessel wieder abgestellt werden. Der Nachweis der Betriebstauglichkeit konnte an diesem Standort nicht, oder noch nicht, erbracht werden.

Im Gegensatz dazu konnten in Oberriet SG im Frühjahr 2010 eine 2-düsige Universalturbine mit 7.5 kW Leistung (Fig. 5) und in Gordola TI im Frühjahr 2012 eine Gegendruckanlage mit 30 kW Leistung (Fig. 6) in Betrieb genommen werden. Das Gegendrucksystem in Gordola basiert auf einem Reservoireinlauf, der oberhalb des Turbinenstandorts liegt. Es ist ein offenes System. Die Gemeinde Gordola hat 2010 übrigens den Prix Watt d'Or für ihre Anstrengungen in der Wasserversorgung gewonnen. Die Installation der Gegendruckturbine bildet der krönende Abschluss dieser Optimierungsphase. Diese beiden Anlagen laufen störungsfrei und haben den Nachweis der prinzipiellen Betriebstauglichkeit der Universalturbine erbracht. Sie sind mit Komponenten ausgerüstet, die auch Thema der nachfolgenden Kapitel sind. Die beiden Anlagen wurden von der Stiftung Revita und ihren Partnern geplant, gebaut und in Betrieb genommen.



Fig. 5: 2-düsige Universalturbine in Oberriet



Fig. 6: Gegendruckturbine in Gordola

Fazit

Der Nachweis der Betriebstauglichkeit der Universalturbine für den Standort Münster konnte aufgrund der stark verzögerten Fertigstellung der Installation nicht erbracht werden. Hingegen konnte die prinzipielle Betriebstauglichkeit mit der 2-düsigen Anlage in Oberriet nachgewiesen werden. Die eindüsige Anlage in Gordola beweist die Funktionstüchtigkeit der Technologie im offenen Gegendruckbereich.

Modellturbine

Ein Modellturbinenwagen, oder auch Versuchsturbinenwagen, ist in vielerlei Hinsicht gewinnbringend. Enthält er einen eigenen Wasserkreislauf, dann können mit ihm steuerungs- oder turbinentechnische Entwicklungsthemen autonom bearbeitet werden. Er fungiert dann als Entwicklungs- und Prüfstand. Er kann aber auch zur Bekanntmachung der Trinkwasserturbinierung, mitsamt Gegendruckregelung an Messen, Ausstellungen und anderen PR Aktionen eingesetzt werden.

Ein Versuchsturbinenwagen ohne eigenen Wasserkreislauf bietet die Möglichkeit, an potenten Standorten oder Versuchsanstalten Versuche unter spezifischen Bedingungen zu fahren. Ausserdem können andere Standorte wie Bondo, an dem 11 bar Gegendruck benötigt wird, simuliert werden. Dabei werden optimale Regelparameter der Gegendruckregelung gefunden, sowie die Auslegung zur Lufteinbringung überprüft.

Das Konzept des Versuchsturbinenwagens ermöglicht den autonomen Betrieb mit eigener Wasserversorgung wie auch den Versuchsbetrieb mit Fremdwasser. Dazu wurde die Modellturbine mit Steuerung auf einem ersten Wagen (in *Fig. 7* links) angeordnet und der Wassertank mit Pumpe auf einem zweiten (in *Fig. 7* rechts). Die beiden Wagen sind koppelbar. Die aufgebaute Modellturbine ist vollumfänglich gegendruckfähig. Eine Zeichnung mit Beschriftung der Hauptkomponenten befindet sich in Anhang A. Der Versuchsturbinenwagen ist zur Erfassung der hydraulischen und elektrischen Kenngrössen mit Sensoren und Messgeräten ausgerüstet. Anhang B informiert über den hydraulischen Aufbau des Versuchswagens. Die Steuerung der Modellturbine übernimmt eine Steuerung, die derjenigen der Universalturbine entspricht. Mit LabView wurde die Steuerung der Peripherie des Versuchswagens wie Pumpe und Abflussventil übernommen, die Kenngrössen der Modellturbine dargestellt sowie die Messdatenerfassung sämtlicher Grössen realisiert. *Fig. 8* zeigt die LabView-Oberfläche. Sie errechnet und stellt auch die Grössen wie hydraulische und elektrische Leistung dar.

Einige Merkmale des Versuchsturbinenwagens:

- Das Verhältnis der Abmasse der Modellturbine zur Universalturbine ist ein wenig kleiner als 1:2. Das Peltonrad hat einen Beaufschlagungskreisdurchmesser von 145 mm.
- Die Modellturbine ist 2-düsig ausgerüstet. Die Düsen und die Leitvorrichtungen entsprechen technisch der Ausrüstung der Universalturbine.
- Der Bohrungsdurchmesser der beiden Düsen beträgt 11 mm. Der Durchsatz bei 10 bar nutzbaren Drucks beträgt 6 l/s, was einer hydraulischen Leistung von 4.8 kW entspricht.
- Die Modellturbine ist mit allen Komponenten für den Gegendruckbetrieb ausgerüstet. Mit dem Versuchsturbinenwagen kann die Funktionsweise der Gegendruckregelung für geschlossene Systeme – dem Einsatz zwischen Reservoir und Verbraucher ohne Ausgleichsbecken – demonstriert werden.
- Die Modellturbine ist mit 2 Wasserstrahl-Gasverdichtern versehen. Die beiden Strahlpumpen lassen sich einzeln ansteuern.
- Die Modellturbine ist ausgelegt, um mit einem Zuflussdruck bis 30 bar und einem Gegendruck bis 16 bar umgehen zu können.
- Die Steuerung der Turbine übernimmt eine SPS von Crouzet. Die Peripherie wird via LabView bedient.
- Zu- und Abflussströme sowie Zu- und Abflussdrücke werden gemessen und mit einer Vielzahl weiterer Grössen visualisiert.
- Zur Sicherheit der Anlage öffnet ein Überströmventil bei Drücken von über 16 bar im Abfluss.

Fazit

Der Versuchsturbinenwagen eignet sich durch seinen modularen Aufbau, die gute Messausrüstung, den autonomen Betrieb und die Visualisierung sehr gut zur Weiterentwicklung der Universalmaschine und zur Bekanntmachung und Vorführung der Gegendruckturbinierung. Mit ihm und auf ihm wurde zum Beispiel die Gegendruckregelung entwickelt und der Luftaustrag untersucht. Der LWW an der Universität Stuttgart hat den Versuchsturbinenwagen für ihre Untersuchungen zum Thema „Einsatz von Kleinturbinen in Trinkwasserversorgungsnetzen“ einsetzen können.



Fig. 7: Versuchsturbinenwagen mit Turbinenwagen links und Tankwagen rechts. (Lippunertagung 2010)

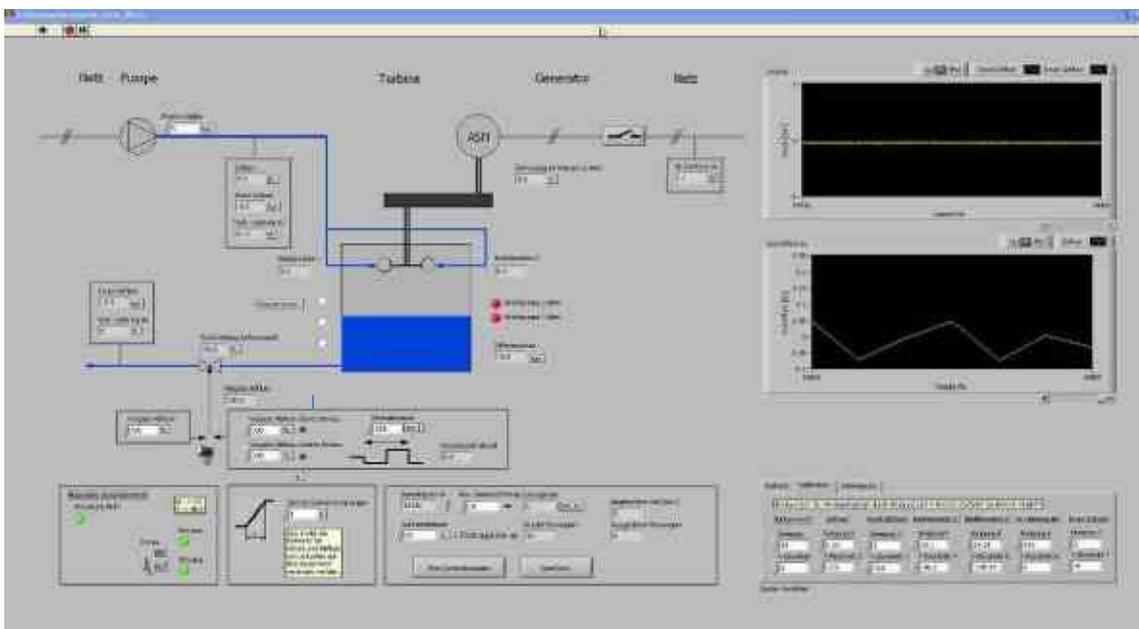


Fig. 8: LabView-Oberfläche Versuchsturbinenwagen

Entwicklung Leitvorrichtung

Vergangene Entwicklungen und Untersuchungen^[1] haben gezeigt, dass die Gegendruckregelungen auf Basis eines Proportionalventils oder eines unterlagerten Positionsreglers nicht befriedigend funktionieren. In beiden Fällen war das Schwingverhalten dieser hydraulischen oder pneumatisch-hydraulischen Systeme nicht genügend.

Da weiterhin nicht an der Notwendigkeit und am grossen Potenzial einer Gegendruckregelung gezweifelt wurde, wurden neue Wege gesucht. Dies hat zur Entwicklung eines mechanischen Düsennadelantriebes und einer elektronischen Gegendruckregelung geführt. Dazu wurde für die bestehenden Düsen eine neue Antriebseinheit entwickelt (Fig. 9 & Fig. 10). Die neue Leitvorrichtung baut sehr kompakt und unterstützt den Leitgedanken, dass die Turbine auch in engen Druckbrecherschächten Platz finden muss. Sie weist die folgenden Features auf:

- Sie ist mit einer ausgeklügelten Mechanik versehen, damit ein Blockieren der Düsennadel durch Gegenstände detektiert wird und keine Schäden an der Düse und der Leitvorrichtung entstehen können.
- Sie ist mit einer variablen Übersetzung ausgestattet, mit der die Öffnungs- und Schliessgeschwindigkeiten entsprechend der Druckpulsberechnung für die Druckleitung eingestellt werden können. Der Verstellmotor hat dadurch trotz langsamen Bewegungsvorgängen die volle Leistung, was einen sicheren und zuverlässigen Betrieb gewährleistet.
- Sie verfügt über einen hochauflösenden Weggeber für die Rückmeldung der Nadelposition. Mit der in der Steuerung hinterlegten Düsennadelkennlinie kann die Düse somit exakt auf die gewünschten Durchflüsse eingestellt werden. Die Regelvorgänge werden dadurch auch bei grossen Änderungen schnell und präzise.

Die Versuchsturbine wurde mit zwei solchen Leitvorrichtungen ausgerüstet. Messungen auf der Versuchsturbine haben gezeigt, dass sich die Düsen genügend schnell und präzise einstellen lassen, um die Gegendruckregelung für geschlossene Systeme zu ermöglichen.



Fig. 9: Die neue Leitvorrichtung

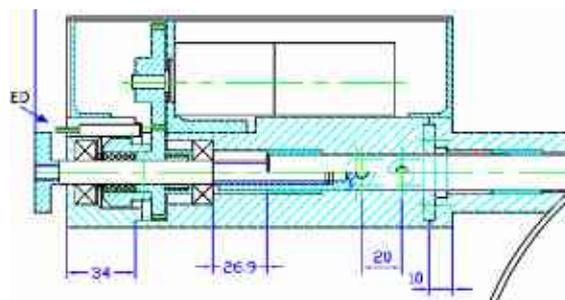


Fig. 10: Konstruktion Leitvorrichtung

Die Leitvorrichtung wurde erfolgreich auf der 2-düsigen Universalturbine in Oberriet (Fig. 5) und der Gegendruckturbine in Gordola (Fig. 6), beides Trinkwasserkraftprojekte, eingesetzt. Die Einsatzdauer in Oberriet beträgt bis jetzt rund 2.5 Jahre; in Gordola ein $\frac{3}{4}$ -Jahr. Die Betriebszeit der Düse in Gordola ist aufgrund von sehr variablen Zu- und Abflüssen sehr hoch. In beiden Fällen hat sich das Konzept bewährt.

Gegendruckregelung für geschlossene Systeme

Wenn die gegendruckfähige Universaltriebmaschine ein Druckreduzierventil zwischen Reservoir und Verbraucher ersetzen und die ungenutzte Druckenergie in elektrische Energie wandeln soll, werden an die Turbine und die Regelung spezielle Anforderungen gestellt. In dieser Situation befindet sich nach der Turbine kein Ausgleichsbecken mehr. Sprich, das Wasser, das die Turbine verlässt, wird weiter unten direkt als Trinkwasser verwendet. Die Turbine muss bei dieser Anwendung im geschlossenen System mit Gegendruck – im Gegensatz zum offenen System mit Gegendruck (z. B. erhöhter Reservoireinlauf) – den Durchfluss nach dem Bedarf der Verbraucher regeln. Wird viel Wasser konsumiert, werden die Düsen stark geöffnet, bei kleinerem bis gar keinem Konsum, werden die Düsen nur wenig geöffnet oder sogar ganz geschlossen. Während dieses Regelvorgangs muss der Sekundärdruck nach der Turbine, den die Wasserversorgung für die Erreichung aller Wasserbezüger benötigt, aufrechterhalten werden.

Die Gegendruckregelung wurde mit einer SPS von Crouzet (Fig. 11) aufgebaut. Entwickelt wurde die Gegendruckregelung auf dem Versuchsturbinenwagen.



Fig. 11: Die Millennium 3 von Crouzet.

Der Sekundärdruck am Ausgang der Turbine wird erreicht, indem im Turbinenkessel ein Druckluftpolster aufgebaut wird. Das Druckluftpolster hält den Wasserstand im Kessel unterhalb des Peltonrades und setzt das abfließende Wasser unter Druck. Die Gegendruckregelung öffnet oder schliesst die Düsen in Abhängigkeit des Drucks im Druckluftpolster. Steigt der Verbrauch, sinkt der Druck im Kessel leicht ab und wird durch Öffnen der Düsen kompensiert.

Das Druckluftpolster wird durch die Wasserstrahl-Gasverdichter erzeugt und aufrechterhalten. Die Strahlpumpen saugen Luft an, komprimieren diese und bringen die Druckluft in das Kesselinnere.

Bei dieser Anwendung der Gegendruckregelung ist zu vermeiden, dass Luft mit dem abfließenden Wasser mitgeht. Luftblasen in der Druckleitung erzeugen beim Bezüger Druckschläge. Aus diesem Grund regelt die Gegendruckregelung den Wasserstand im Kessel in einem definierten Band. Sinkt das Wasserniveau zu tief, wird Luft über ein gesteuertes Ventil aus dem Kessel abgelassen.

Zustände der Gegendruckregelung

Der Entwicklung der Gegendruckregelung für geschlossene Systeme wurde ein System von einer Gegendruckturbine und einem Bypass, in dem sich ein Druckreduzierventil befindet, zugrunde gelegt. Das ist die Anordnung, wie die Gegendruckturbine in geschlossenen Systemen eingesetzt werden wird. Für diese Konfiguration wurden drei prinzipielle Zustände definiert, die die Gegendrucksteuerung bedienen können muss:

- Herunterfahren der Turbine: Die Düsen schliessen langsam. Der Leitungsdruck in der Wasserleitung nach der Turbine sinkt unter den Normdruck, weil die Bezüger mehr

Wasser brauchen als die Turbine durchlässt. Das Druckreduzierventil im Bypass spricht bei einem Druck von rund 0.2 bar unter Normdruck an und übernimmt die Aufgabe des Zudosierens des Wassers. Die Düsen werden komplett geschlossen. Die Gegendruckregelung hält den Wasserstand im Kessel auf geforderter Höhe.

- Hochfahren der Turbine: Die Düsen öffnen langsam. Der Druck in der Wasserleitung steigt durch das zusätzliche Wasser der Turbine auf Normdruck an und das Druckreduzierventil schliesst. Die Gegendruckregelung regelt wieder den notwendigen Normdruck und hält den Wasserstand im Kessel auf gewünschter Höhe.
- Normalbetrieb: Die Gegendruckregelung hält den geforderten Normdruck im Unterwasser konstant, regelt den Wasserdurchfluss durch die Turbine nach Bedarf und hält den Wasserstand im Kessel.

Messung Abflussvariation

Exemplarisch für alle Messungen und die Funktionsweise der Gegendruckregelung zeigt *Fig. 12* eine Messung im Normalbetrieb, bei der die Abflussmenge über ein Abflussventil trapezförmig gesteigert und wieder verringert wird, und der Sekundärdruck dabei konstant bei 1.5 bar gehalten wird:

- Bis Sekunde 100 läuft die Anlage konstant. Die Gegendruckregelung hält den Druck im Abfluss konstant bei 1.5 bar. Der Zuflussdruck, generiert durch die Pumpe, beträgt 10.3 bar. Düse 2 ist geschlossen, die andere ist rund 25 % (Wegprozent) geöffnet. Der Wasserstand im Kessel befindet sich auf dem Minimum. Das Abflussventil ist 30 % geöffnet, 1.3 l/s Wasser strömen durch die Turbine.
- Ab Sekunde 100 bis Sekunde 300 wird das Abflussventil kontinuierlich auf 100 % geöffnet. Der Abflussdruck wird konstant gehalten, Düse 1 öffnet stetig, bis sie 70 % (entspricht 95 % des maximalen Durchflusses) offen ist, dann wird die Düse 2 geöffnet und der Durchfluss auf beide Düsen verteilt. Der Wasserstand steigt dann über die erste Schwelle, über die zweite und ein Wasserstrahl-Gasverdichter wird zugeschaltet.
- Ab Sekunde 300 bis Sekunde 500 wird die Anlage bei voll geöffnetem Abflussventil betrieben. Der Abflussdruck wird weiter konstant gehalten. Der Durchfluss durch die Modellturbine beträgt rund 3.1 l/s. Der Generator der Modellturbine läuft in dieser Phase bei rund 1.3 kW (nicht in Diagramm ersichtlich). Der Wasserstand pendelt um die Mitte, eine Strahlpumpe ist konstant eingeschaltet.
- Ab Sekunde 500 wird das Abflussventil wieder langsam, bis zum Endwert von 30 %, geschlossen. Die Düsen verringern den Durchfluss um den Sekundärdruck zu halten. Der Endzustand der Gegendruckregelung entspricht in etwa dem Anfang der Prozedur.

Fazit

Die verschiedensten Versuche bei unterschiedlichen Drücken und Durchflüssen haben gezeigt, dass die Gegendruckregelung einen hohen Reifegrad besitzt und nun eingesetzt werden kann.

Gegendruckregelung, Variation Abfluss

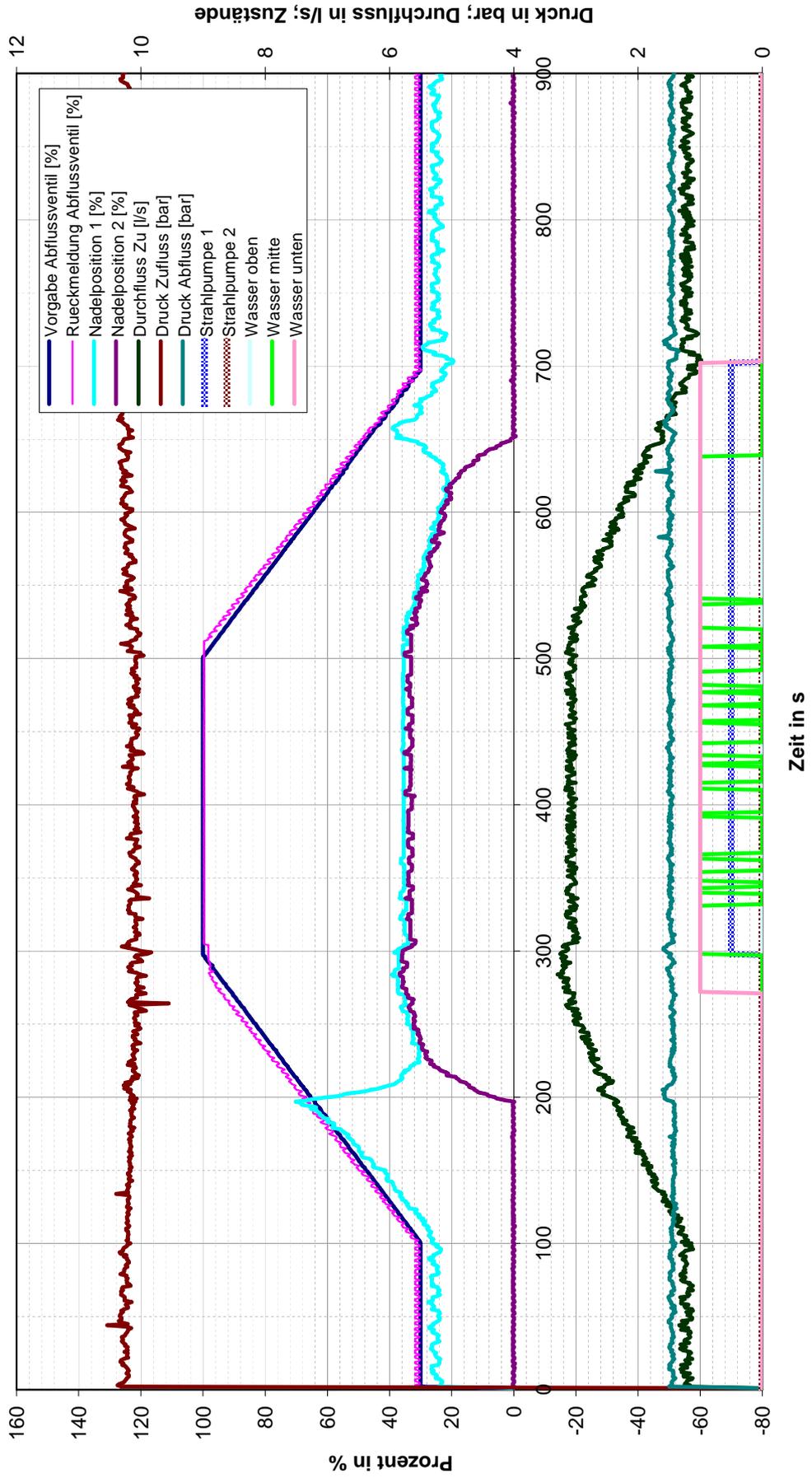


Fig. 12: Abflussvariation mit Gegendruckregelung

Luftaustrag

Beim Einsatz der Turbine im Gegendruckbereich wird Luft über das abfließende Wasser ausgetragen. Die Luft geht dabei in Blasenform oder vollständig gelöst mit. Dies hat zwei unangenehme Nebeneffekte. Einerseits verringert sich dadurch das Luftpolster im Kessel. Das Luftpolster muss mit einem nicht unbedeutenden energetischen Aufwand wieder ergänzt werden. Andererseits gelangt durch den Luftaustrag unnötige Luft ins Leitungsnetz. Neben möglichen Luftblasen kann die im Wasser gelöste Luft bei weiterem Druckabfall ausgasen und ebenfalls Luftblasen bilden. Ansammlungen von Luftblasen ergeben beim Wasserbezug Leitungsschläge und werden als störend empfunden. Feine Luftblasen verursachen in gewissen Wasseraufbereitungsanlagen Fehldiagnosen und sind ebenfalls unerwünscht.

Frühere Untersuchungen^[2] haben gezeigt, dass bei einer Turbine im Gegendruck betrieben, eine Luftmasse von bis zu $2.25 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_{\text{Luft}} / (\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{bar})$ (entspricht der Sättigungsgrenze von Luft in Wasser) ausgetragen wird. Eigene Untersuchungen am Versuchsturbinenwagen haben diese Messresultate in Frage gestellt. Es wurde aber auch festgestellt, dass bei diesem Aufbau ein Eruiieren der ausgetragenen Luftmenge schwierig ist, weil durch den geschlossenen Kreislauf immer dasselbe Wasser turbinert wird und zum Teil auch Luftblasen aus dem Wassertank über die Pumpe wieder in den Turbinenkessel gelangen.

Nach Prüfung verschiedener Vorgehensweisen und der Suche nach Partnern konnte schlussendlich eine Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft (LWW) der Universität Stuttgart eingegangen werden. Die Untersuchungen des Luftaustrages an der Versuchsturbine konnten anschliessend an Untersuchungen des LWW zum Thema „Einsatz von Kleinturbinen in Trinkwasserversorgungsnetzen“ gemacht werden und so von der teilweise vorhandenen Infrastruktur profitieren.

Die Versuchsturbine wurde an den internen Wasserkreislauf der Versuchsanstalt Wasserbau angeschlossen (Fig. 13). Das Wasser wird vom Hochbehälter mit einem Vordruck von circa 1 bar auf die Kreislumpumpe (1) zur Druckerhöhung von bis zu 10 bar geleitet. Von der Kreislumpumpe fließt das Wasser auf die Düsen der Versuchsturbine (2) und wird dort abturbiniert. Nach der Turbine fließt das Wasser durch einen ersten Absperrschieber (3), vorbei an zwei Steigrohren (4 & 5) zur Luftabscheidung, durch einen zweiten Absperrschieber (6) und vor dem Einlauf ins Tiefbecken noch durch einen Rohrabschnitt aus Plexiglas mit Luftabscheidekammern (nicht in Fig. 13, jedoch separat als Fig. 17).

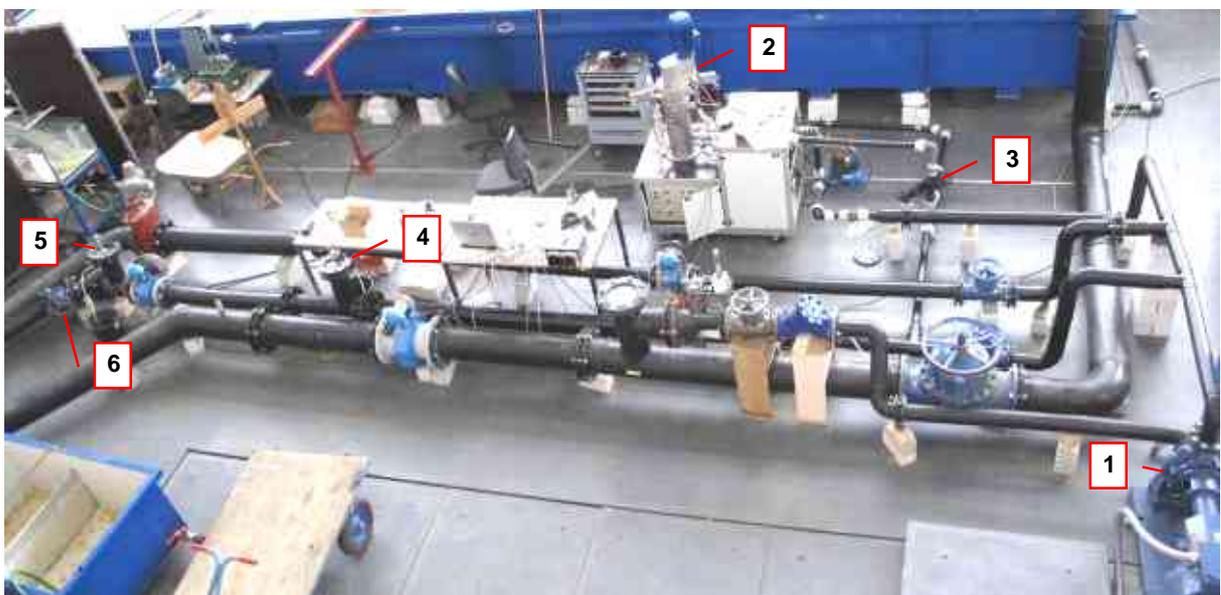


Fig. 13: Versuchsturbine im Wasserkreislauf des LWW an der Universität Stuttgart

Dieser Versuchsaufbau erlaubt die Erzeugung des Gegendrucks durch Drosselung über den Absperrschieber 1 oder 2 (Fig. 14). Bei Drosselung über den ersten Schieber kann die gelöste Luft in der drucklosen Rohrleitung wieder ausgasen und über die beiden Steigrohre abgeschieden werden. Bei Drosselung über den zweiten Schieber gast die gelöste Luft entsprechend erst danach aus. Die beiden Steigrohre (Abscheidekammern) scheiden dabei nur die ausgetragene ungelöste Luft ab.

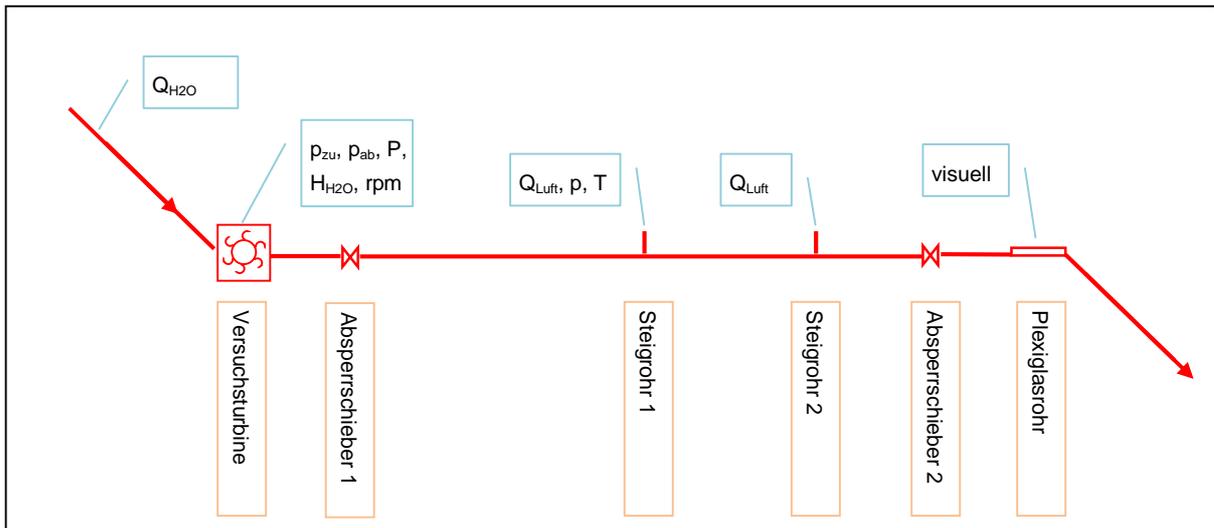


Fig. 14: Schematischer Versuchsaufbau mit Messeinrichtung

Der Kessel der Versuchsturbine ist mit Leitblechen ausgerüstet. Die Leitbleche sollen das tiefe Eintauchen von Wasser/Luft-Wirbeln gegen den Kesselboden hin verhindern und Rotationen um die Senkrechte abbremsen. Die Luftzuführung in den Kessel erfolgt bei diesen Versuchen über einen ölfreien Kompressor. Die bedarfsgerechte, feine Zudosierung erfolgte über Drosseln und Magnetventile.

Resultate

Es wurden verschiedene Punkte bei Drosselung vor Abscheidekammer (DvA) und Drosselung nach Abscheidekammer (DnA) gemessen. Die Durchflüsse variierten zwischen 1.8 und 3 l/s bei ungefähr 4 bis 10 bar Primärdruck. Der Gegendruck (Sekundärdruck) wurde zwischen 0.4 und 2 bar eingestellt. Eine Übersicht über alle gemessenen Punkte gibt Anhang C.

Bei der Messreihe mit der Drosselung vor der Abscheidekammer konnte die ganze ausgetragene Luft durch die erste Abscheidekammer abgeschieden werden. Die zweite Abscheidekammer brachte keine zusätzliche Abscheidung und die visuelle Kontrolle im Plexiglasrohr zeigte einen blasenfreien Durchfluss. Werden die gemessenen Luftaustragsraten den theoretischen druck- und temperaturabhängigen Austragsraten, die der maximal löslichen Luftmasse entsprechen, gegenübergestellt (Fig. 15), dann ist ersichtlich, dass sich alle Punkte höchstens auf der Winkelhalbierenden befinden. Das heißt, dass der ausgetragene Luftmassenstrom höchstens gleich dem maximal löslichen Luftmassenstrom ist. Dies gilt für die Messpunkte, die manuell eingestellt wurden und auch für diejenigen, die die Gegendruckregelung selbstständig eingeregelt hat. Diese Messreihe klärt nicht darüber auf, welcher Anteil des Luftmassenstromes im Wasser gelöst und welcher in Blasenform ausgetragen wurde.

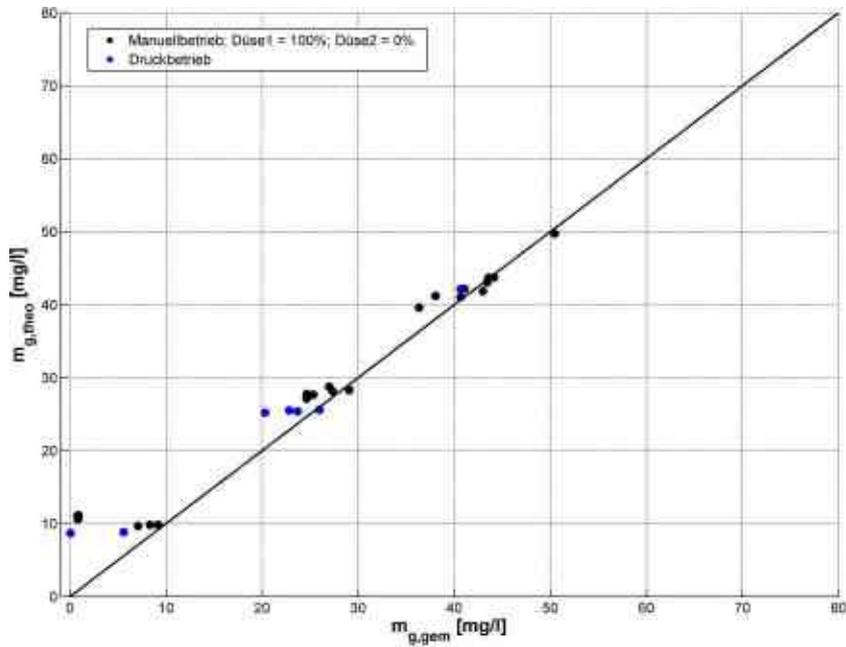


Fig. 15: Drosselung vor Abscheidekammer

Bei der Drosselung nach der Abscheidekammer wurden 2 verschiedene Messreihen durchgeführt. Bei der ersten wurden Punkte nach dem gleichen Muster wie oben angefahren. Dabei konnte über die beiden Abscheidekammern keine bis wenig Luft abgeschieden werden. Diese Messpunkte liegen in Fig. 16 auf oder knapp neben der Ordinate. Da wir aus den obigen Messreihen jedoch wissen, dass in etwa der theoretische Luftmassenstrom ausgetragen wird, kann die Luftmasse nur in gelöster Form ausgetragen worden sein. Dies wird auch durch die visuelle Kontrolle an der dritten Abscheidekammer aus Plexiglas, die sich direkt hinter dem zweiten Absperrschieber befindet, bestätigt (Fig. 17). Die gelöste Luft gast wieder aus und bildet kleinste Blasen, die sich zu grösseren Blasen agglomerieren müssen, damit sie abgeschieden werden können.

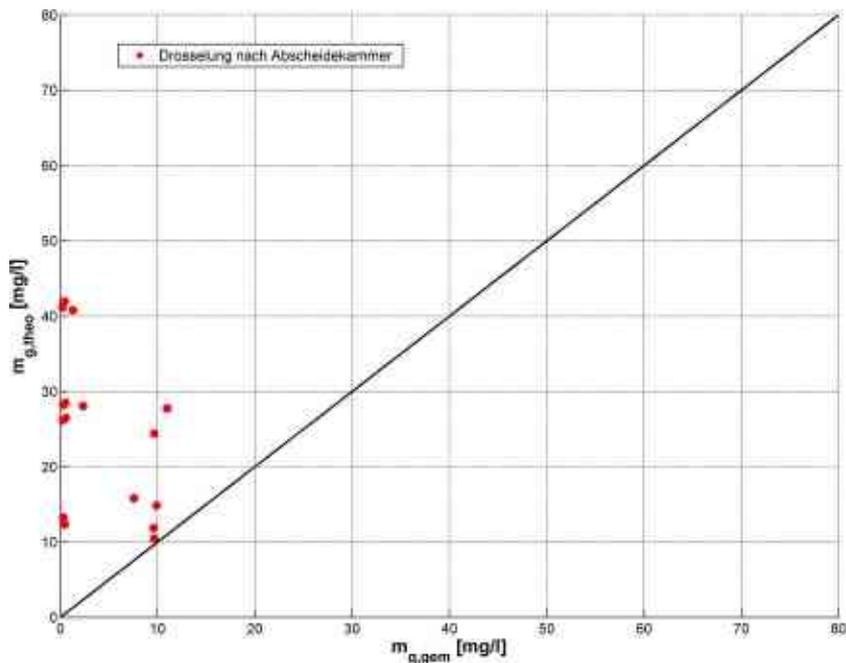


Fig. 16: Drosselung nach Abscheidekammer



Fig. 17: Abscheidkammer nach zweitem Absperrschieber

Bei einer weiteren Messreihe mit Drosselung nach der Abscheidkammer wurden bewusst ungünstige Betriebspunkte eingestellt. Einerseits wurde mit tiefen Wasserständen im Kessel, die ein Ausschwemmen von Luftblasen provozieren, gefahren und andererseits wurden tiefe Laufzahlen eingestellt, die durch eine hohe Restenergie im Wasserstrahl für starke Turbulenz im Kessel sorgen. Bei dieser Messreihe wurde erwartungsgemäss mehr Luft ausgetragen. Diese Messpunkte liegen in *Fig. 16* rechts neben der Ordinate.

Fazit:

Die Messreihen haben gezeigt, dass der ausgetragene Luftmassenstrom in erster Näherung der theoretischen Löslichkeit von Luft in Wasser entspricht und dass die Kesselgeometrie zusammen mit den Leitblechen einen weiteren Luftaustrag in Blasenform wirksam minimiert oder sogar verhindert. Beim maximal gemessenen Durchfluss von 3 l/s ist die durchschnittliche Verweilzeit des Wassers im Kessel rund 3.5 s. Diese Verweilzeit scheint für ein Aufsteigen der Luftblasen nahezu genügend zu sein und kann für Kesselauslegungen herangezogen werden.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Durchmischung von Luft und Wasser und die Verweilzeit des Wassers im Kessel bei Gegendrücken von bis zu 2 bar ausreichend ist, dass das Wasser nahezu in Sättigung geht. Optisch wird dieses Verhalten auch durch ein sehr schnelles Ausgasen nach der Drosselstelle bestätigt.

Die Messreihen haben auch bestätigt, dass ein Luftaustrag durch die Löslichkeit von Luft in Wasser nicht zu verhindern ist. Auch wenn die Turbine durch weitere Untersuchungen auf ein Optimum hin designt und betrieben werden kann, ist ein bestimmter Austrag unumgänglich. Die gelöste Luft wird bei Druckabfall in der Rohrleitung oder spätestens beim Konsumenten ausgasen. In Hochpunkten kann die bis dahin ausgegaste Luft abgeschieden werden. Welche Folgen die restliche gelöste Luft für den Versorger und den Bezüger hat, ist noch nicht bekannt und muss in einem Folgeprojekt ermittelt werden.

Dynamische Regelvorgänge an der Turbine haben gezeigt, dass sie einen Mehraustrag an Luft begünstigen. Im Rahmen der Messreihen wurde jedoch die Grenzen der Dynamik nicht ausgelotet und für dieses Verhalten keine Antwort gesucht. Ebenso wurde nicht untersucht, ob die Durchmischung von Luft und Wasser genügend ist, dass sich das Wasser auch bei höheren Gegendrücken vollständig zu sättigen vermag.

Lufteintrag

Um die ausgetragene Luftmasse des Druckluftpolsters wieder zu ersetzen ist der Einsatz von Wasserstrahl-Gasverdichter eine interessante Methode, weil die Strahlpumpen, wie sie auch genannt werden, wenig anfällig auf Verschleiss sind. Die Schwierigkeit im Umgang mit Wasserstrahl-Gasverdichtern ist jedoch deren Auslegung um hohe Wirkungsgrade von 25% und mehr zu erhalten. Tiefe Wirkungsgrade fordern hohe hydraulische Verluste, da das Wasser für die Wasserstrahlverdichter nicht mehr zum Turbinieren verwendet werden kann. Anhand von früheren Untersuchungen^[2] wurden Wirkungsgradberechnungen durchgeführt, die zeigen, dass bei einem Gegendruck von 6 bar und beim Einsatz von Strahlpumpen mit einem Wirkungsgrad von lediglich 14% bis zu 10 % der zur Verfügung stehenden hydraulischen Leistung für die Aufrechterhaltung des Druckluftpolsters verwendet werden müssen. Fig. 18 zeigt die benötigten hydraulischen Leistungen für 3 Punkte bei 16 bar Differenzdruck im Kennfeld der Universalturbine.

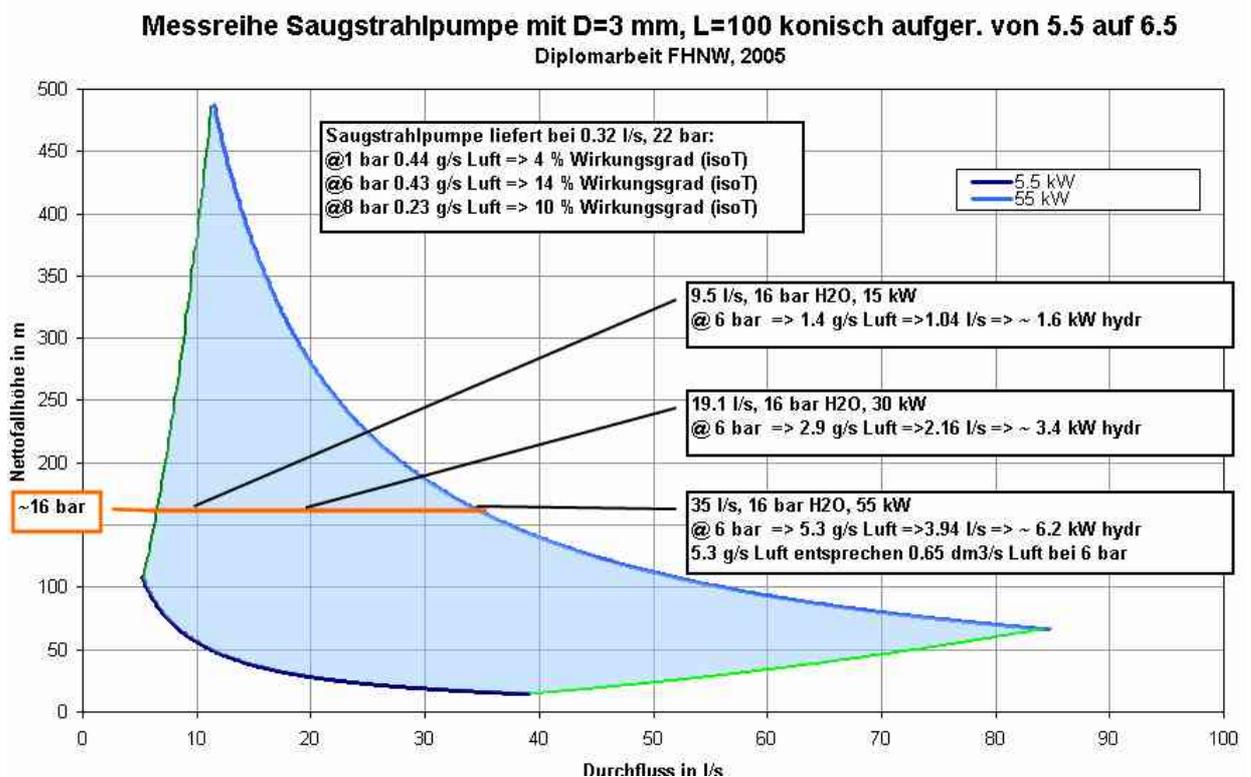


Fig. 18: Berechnung für 3 Punkte im Kennfeld der Universalturbine

Käufliche Wasserstrahlverdichter laufen zwar stabil, haben aber das Problem, dass sie genau bezüglich Wirkungsgrad nicht zu überzeugen vermögen. Die kommunizierten Wirkungsgrade liegen zwischen 10 und 15 %. Viel Wissen in der Auslegung von Wasserstrahlverdichtern hat das Institut Thermo- und Fluid-Engineering der FHNW um Herrn Prof. Dr. Heiniger. An seinem Institut wurde die Auslegung von Wasserstrahlverdichtern auf wissenschaftliche Füße gestellt, sodass die Auslegung von einzelnen Verdichtern nun gerechnet werden kann. Die Erfahrungen an der FHNW zeigen, dass Wirkungsgrade von 20 bis 25 % erreicht werden können, die Wirkungsgrade bei Abweichung vom Auslegungspunkt jedoch sehr schnell zusammenfallen.

Wasserstrahl-Gasverdichter am Versuchsturbinenwagen

Für die Modellturbine wurden 2 Wasserstrahl-Gasverdichter mit einer Bohrung von je $D = 2.8 \text{ mm}$ und einer variablen Mischrohrlänge gebaut. In der Konfiguration in *Fig. 19* sind sie bis zu Gegendrücken von 2.5 bar einsetzbar. Sie wurden mit Magnetventilen, die über die Steuerung geöffnet und geschlossen werden, an den hochdruckseitigen Wasserkreislauf angeschlossen. Für den optimalen Betrieb wurden auch die Luftansaugstutzen der Wasserstrahl-Gasverdichter mit Magnetventilen versehen. Auf der Modellturbine konnten sie vermessen werden, in dem das durch die Düsen strömende Wasser in Bezug auf Volumen und Druck gemessen wurde. Wird beim aus dem Kessel fließenden Wasser davon ausgegangen, dass es mit Luft vollkommen gesättigt ist, dann konnten bei circa 8 bar Primärdruck und 2 bar Sekundärdruck ein Wirkungsgrad von rund 13 % nachgewiesen werden. Dieser Wert ist nicht berauschend, ist jedoch für den Nachweis der Integrierbarkeit ins System nicht von übergeordneter Bedeutung.

Obwohl die Strahlpumpen neben Luft natürlich auch Wasser in den Kessel bringen, stellte das Einbinden der Strahlpumpen in die Gegendruckregelung keine grösseren Probleme dar. Die Wasserstandsregelung und die Druckregelung funktionieren bei verschiedenen Zuflussdrücken, Gegendrücken und Durchflüssen einwandfrei. Selbst das Ausblasen eines vollständig gefüllten Kessels ist damit möglich.

Fazit:

Die Messungen (unter anderen *Fig. 12*) haben gezeigt, dass die Strahlpumpen von der Funktionsweise her für den Einsatz in Gegendruckregelungen für geschlossene Systeme geeignet sind. Da die neuesten Erkenntnisse auf diesem Gebiet jedoch nicht öffentlich zugänglich sind, ist die Auslegung in Richtung optimaler Wirkungsgrade nicht ohne weiteres möglich. Und selbst wenn sie möglich ist, wird der maximal erreichbare Wirkungsgrad für jeden Anwendungsfall ein sorgfältiges Abwägen und ein Vergleich mit alternativen Techniken verlangen.



Fig. 19: Wasserstrahl-Gasverdichter an der Modellturbine

Alternativer Lufteintrag

Zur Kompensation des Luftaustrags auf der Modellturbine wird eine Strahlpumpe verwendet, welche mit Wasser direkt aus der Druckleitung gespeist wird. Als grosser Vorteil dieser Pumpengattung ist die einfache Bauweise (keine beweglichen Teile) und die daraus resultierende lange Lebensdauer bei unwesentlichem Wartungsaufwand anzusehen.

Negativ fällt hingegen der schlechte Wirkungsgrad ins Gewicht, dieser beträgt bei einer guten Strahlpumpe etwa 0.24. Eingesetzt zur Luftkompensation bei einer Gegendruckturbine bedeutet dies, dass ein nicht unwesentlicher Teil des Druckwassers aus der Druckleitung für den Betrieb der Strahlpumpe abgezweigt werden muss. Dieses Wasser steht zwar schlussendlich dem Endverbraucher zur Verfügung, kann jedoch nicht zur Energiegewinnung mittels Turbine genutzt werden.

Im Folgenden sollen mit zwei Alternativen zur Strahlpumpe diskutiert werden, wobei der Schwerpunkt auf Energiebetrachtungen und Wartungsaufwand gelegt wird. Als Basis für alle Berechnungen dient der Löslichkeitswert von Luft in Wasser (Fig. 20). Dieser nimmt linear mit dem Druck zu, was für den aus der Turbine ausgetragenen Volumenstrom einen druckunabhängigen, konstanten Wert von $0.0224 \text{ dm}^3/\text{kg}_{\text{Wasser}}$ bedeutet. Die Entleerungszeit des Luftpolsters im Turbinenkessel ist demnach eine lineare Funktion der Wasserdurchflussmenge. Temperatureinflüsse werden vernachlässigt.

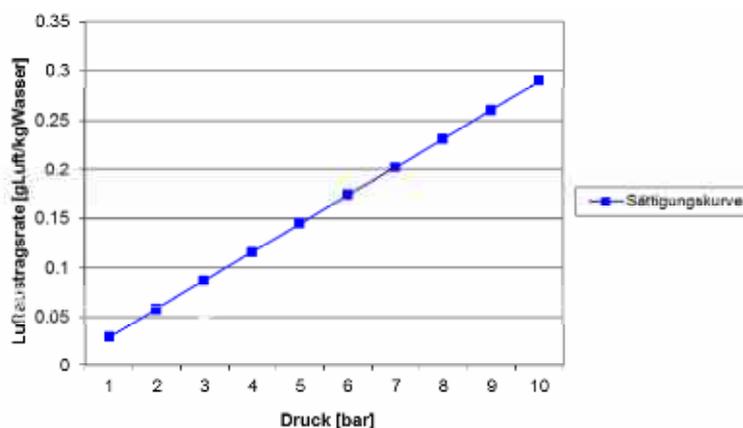


Fig. 20: Luftaustrag in Abhängigkeit des Drucks

Fig. 21 zeigt die Füllzeit des anfänglichen Luftvolumens im Turbinenkessel mit Wasser aufgrund des Luftaustrags. Als Nutzvolumen wird dabei das Differenzvolumen zwischen minimalem Wasserstand und maximal möglichem Wasserstand angenommen.

Nennwasser-Menge [l/min]	Nutzvolumen Turbinenkessel [l]						
	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00
600	1.49	2.24	2.98	3.73	4.47	5.22	5.97
800	1.12	1.68	2.24	2.80	3.36	3.91	4.47
1000	0.89	1.34	1.79	2.24	2.68	3.13	3.58
1200	0.75	1.12	1.49	1.86	2.24	2.61	2.98
1400	0.64	0.96	1.28	1.60	1.92	2.24	2.56
1600	0.56	0.84	1.12	1.40	1.68	1.96	2.24
1800	0.50	0.75	0.99	1.24	1.49	1.74	1.99

Fig. 21: Füllzeit Turbinenkessel [min]

Als mögliche Alternative zur Strahlpumpe kann ein Windkessel als Luftreservebehälter eingesetzt werden. Von diesem strömt die Luft in die Turbinenkammer und ersetzt dort die ausgetragene Luft.

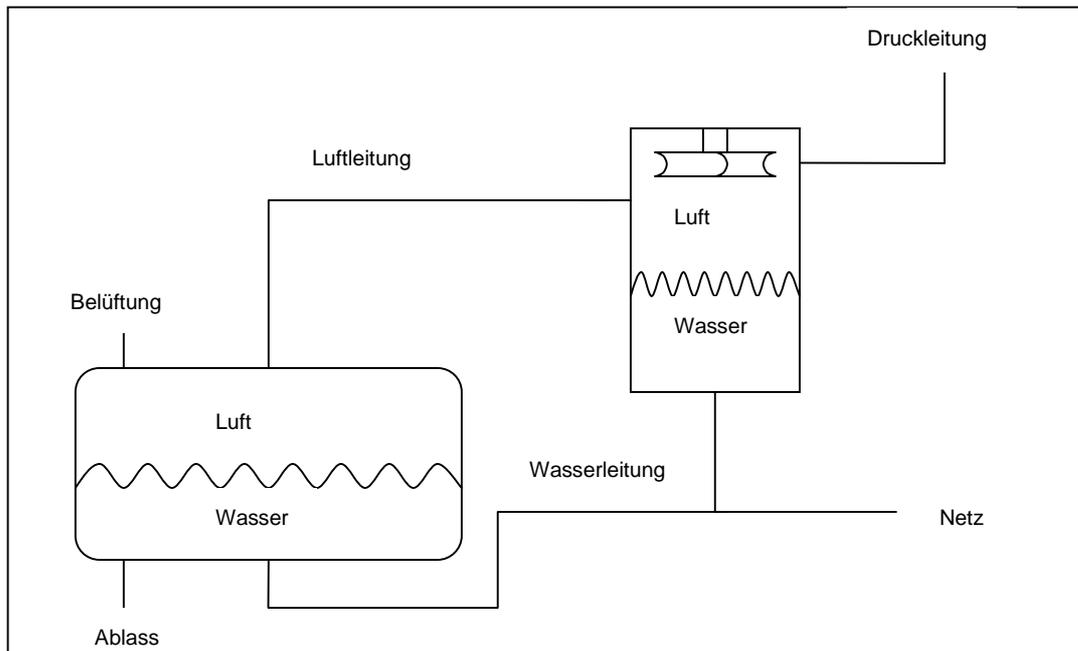


Fig. 22: Schematische Anordnung Turbinenkessel und Reservebehälter (ohne Ventile)

Die Anordnung nach Fig. 22 entspricht zwei korrespondierenden hydraulischen Gefässen, welche zu einem Niveuausgleich tendieren. Dieser Niveuausgleich kann durch ein mit dem Füllstandsensoren im Turbinenkessel gekoppeltes Ventil in der Wasserleitung zwischen Reservebehälter und Turbinenkessel bewerkstelligt werden. In der Luftleitung zwischen den beiden Behältern genügt ein Rückschlagventil. Der Reservebehälter muss zwingend etwas tiefer platziert werden als der Turbinenkessel, nur so verläuft ein Niveuausgleich in die richtige Richtung und es fließt so lange Luft vom Reservebehälter in den Turbinenkessel bis sich keine Luft mehr im Reservebehälter befindet. Ist der Reservebehälter mit Wasser gefüllt, so wird der Turbinenkessel temporär durch Schliessen des Ventils in der Wasserleitung vom Reservebehälter entkoppelt. Nun wird das Ablassventil und das Entlüftungsventil des Reservebehälters geöffnet und das Wasser fließt aus. Nach der Entleerung werden diese Ventile wieder geschlossen und beide Behälter wieder miteinander hydraulisch über die Wasserleitung verbunden, Wasser fließt nun nach bis sich im Reservebehälter ein Druckluftpolster, dessen Druck dem Gegendruck entspricht, gebildet hat. Der Niveuausgleich kann nun wieder beginnen.

Die in Fig. 21 aufgeführten Füllzeiten des Turbinenkessels geben einen Eindruck der benötigten Menge an Reserveluft und sind zugleich limitierende Größen für die Wasserentleerungszeit des Reservebehälters. Denn diese darf keinesfalls grösser sein als die Füllzeit der Turbine. In Fig. 23 werden die Ausflusszeiten gemäss Ausflussformel von Torricelli in Abhängigkeit des Öffnungsquerschnitts des Ausflussventils und des Nutzvolumens des Reservebehälters angegeben.

Öffnungs- durchmesser Ventil [mm]	Nutzvolumen Luftreservebehälter [l]						
	10	20	30	40	50	60	70
	angenommene Höhe Luftreservebehälter [m]						
	0.30	0.45	0.60	0.75	0.90	1.05	1.20
10	2.73	4.46	5.80	6.91	7.89	8.76	9.56
12	1.90	3.10	4.03	4.80	5.48	6.09	6.64
15	1.21	1.98	2.58	3.07	3.51	3.89	4.25
18	0.84	1.38	1.79	2.13	2.43	2.70	2.95
20	0.68	1.12	1.45	1.73	1.97	2.19	2.39
22	0.56	0.92	1.20	1.43	1.63	1.81	1.98
24	0.47	0.77	1.01	1.20	1.37	1.52	1.66
26	0.40	0.66	0.86	1.02	1.17	1.30	1.41

Fig. 23: Entleerungszeit Reservebehälter nach Ausflussformel von Torricelli [min]

Zur Dimensionierung der Grösse von Reservebehälter dessen Ausflussventildurchmesser müssen nun einerseits die Werte von Fig. 21 mit denen von Fig. 23 verglichen werden. Folgende Bedingungen müssen eingehalten werden:

- Entleerungszeit Reservebehälter < Füllzeit Turbinenkessel
- Luftspeichervolumen Reservekessel > Nutzvolumen Turbinenkessel

Hierbei muss berücksichtigt werden, dass das Luftspeichervolumen des Reservekessels mit der Formel $V_{\text{Kessel}}/(p+1)$ mit dem Gegendruck p verknüpft ist.

Fazit:

Das vorgestellte Prinzip zur Kompensation der ausgetragenen Luft hat einerseits den Vorteil, dass das zum Druckaufbau im Reservebehälter gebrauchte Wasser erst nach der Turbine entnommen wird und dadurch keine Produktionseinbussen entstehen. Andererseits ist die dadurch verbrauchte Wassermenge nicht unbeträchtlich (sie beträgt $(p+1) \cdot V_{\text{ausgetragene Luft}}$) und sie liegt nach dem Ablass aus dem Reservebehälter bei Umgebungsdruck im Turbinenraum vor und geht durch die Kanalisation oder einen Sickerschacht verloren, oder muss zurück in ein Reservoir gepumpt werden. Bei kontinuierlichem Betrieb einer Anlage mit Nennwassermenge 1400 l/min bei und 2 bar Gegendruck ergibt sich eine Wassermenge von 13,5 m³ pro Tag. Dies entspricht 6.7 Promille des turbinierten Tagesvolumens.

Die Anlagenkosten sind in einem vernünftigen Rahmen, die Wartungskosten können sogar als sehr gering eingestuft werden.

Diese Anwendung ist vor allem an denjenigen Standorten von Interesse, wo zu keiner Jahreszeit die volle Wassermenge zur Verfügung stehen muss.

Als weitere mögliche Alternative kann ein einfacher Kompressor zur Bereitstellung der benötigten Luft eingesetzt werden. Um den Lebensmittelnormen zu genügen muss ein ölfreier Kompressor eingesetzt werden, welcher in Anschaffung und Unterhalt deutlich teurer ist als ein normaler Kompressor. Er könnte ohne Windkessel direkt in den Turbinenkessel fördern und dabei jeweils durch einen Niveauregler ein und ausgeschaltet werden. Fig. 24 zeigt das normierte Fördervolumen in Abhängigkeit des Gegendrucks und der Nennwassermenge. Aus diesen Werten kann nun die Verdichtungsleistung, aufgeführt in Fig. 25, berechnet werden. Es wird eine isotherme Verdichtung angenommen und ein Kompressorwirkungsgrad von 0.4.

Nennwasser-Menge [l/min]	Gegendruck [bar]						
	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
600	26.82	40.23	53.64	67.05	80.46	93.87	107.29
800	35.76	53.64	71.52	89.40	107.29	125.17	143.05
1000	44.70	67.05	89.40	111.76	134.11	156.46	178.81
1200	53.64	80.46	107.29	134.11	160.93	187.75	214.57
1400	62.58	93.87	125.17	156.46	187.75	219.04	250.33
1600	71.52	107.29	143.05	178.81	214.57	250.33	286.09
1800	80.46	120.70	160.93	201.16	241.39	281.62	321.86

Fig. 24: Fördervolumen normiert auf Umgebungsdruck [l/min]

Nennwasser-Menge [l/min]	Gegendruck [bar]						
	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
600	77.46	184.16	309.85	449.66	600.72	761.13	929.56
800	103.28	245.55	413.14	599.55	800.96	1014.84	1239.41
1000	129.11	306.94	516.42	749.43	1001.20	1268.55	1549.26
1200	154.93	368.33	619.70	899.32	1201.44	1522.26	1859.11
1400	180.75	429.72	722.99	1049.20	1401.67	1775.98	2168.97
1600	206.57	491.10	826.27	1199.09	1601.91	2029.69	2478.82
1800	232.39	552.49	929.56	1348.98	1802.15	2283.40	2788.67

Fig. 25: permanente Kompressorleistung [W]

Das Wartungsintervall bei gewissen Membrankompressoren wird mit 8000 Betriebsstunden angegeben. Bei einem durchschnittlichen Betrieb von 25 % der Turbinenstunden müsste die Membrane alle 4 Jahre getauscht werden. Die Anbindung des Kompressors an den Kessel kann über ein Rückschlagventil erfolgen und ist somit denkbar einfach.

Fazit:

Greift man beispielhaft eine Anlage mit einer Nennwassermenge von 1400l/min und einem Gegendruck von 2 bar heraus ergibt sich bei durchgehendem Betrieb der Turbine einen Tagesenergieverbrauch von 10.3 kWh. Aufgrund der Einfachheit des Systems kann diese Alternative vor allem für kleine Gegendrücke mit geringem Druckluftbedarf interessant sein.

Die 30 kW-Anlage in Gordola (Fig. 6) mit rund 600 mbar Gegendruck wurde mit einem kleinen doppelköpfigen Membrankompressor realisiert. Die Erfahrungen aus dem bisherigen Einsatz bestätigen den einfachen Aufbau und den dadurch unproblematischen Betrieb.

Gleitlagerung

Die berührungslose Dichtung, die das Druckluftpolster nicht aus dem Kessel über die Peltonradwelle entweichen lässt, ähnelt sehr der hydrodynamischen Gleitlagerung. Der Wasserfilm im minimalen Spalt zwischen Welle und Dichtungsbüchse (Nr. 10 in Fig. 26) wirkt als Dichtung. Die Welle selbst wird über die beiden Wälzlager (Nr. 6 in Fig. 26) gelagert. Das Thema Gleitlagerung ist die Idee, die Dichtung und die Lagerung in einem Element zu kombinieren. Auf der Modellturbine wird dazu die Dichtungsbüchse (Nr. 10 in Fig. 26) durch eine Büchse aus Sinterbronze ersetzt. Das untere der beiden Wälzlager wird entfernt. Geschmiert wird die Dichtungs-/Lagereinheit nach wie vor mit über Druck eingebrachtem Wasser.

Die berührungslose Dichtung hat gegenüber einer konventionellen den Vorteil, dass sie langlebiger ist und weniger Reibleistung aufweist. Hingegen ist der Bedarf an Bauraum grösser. Die Kombination aus Lagerung und Dichtung würde die kompaktere Bauweise der Lagerung und somit eine günstigeren Herstellung derer ermöglichen.

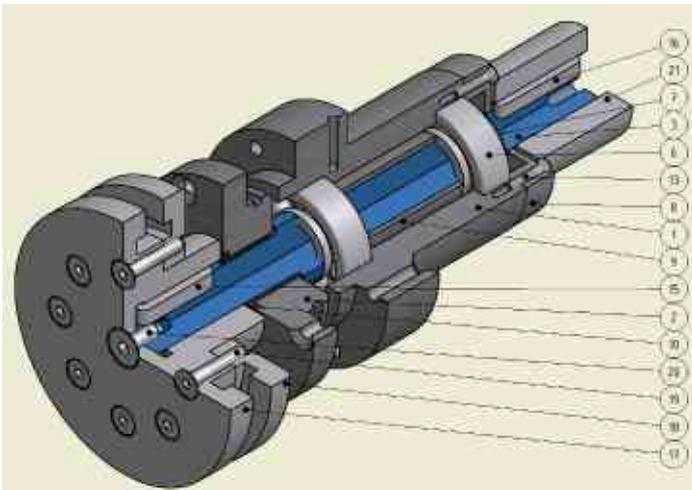


Fig. 26: Lagereinheit Modellturbine

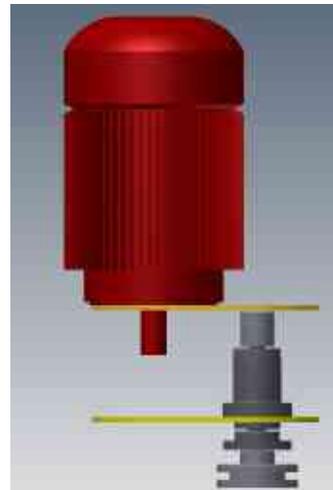


Fig. 27: Anordnung Generator und Lagerung. Modellturbine (Riemen und Riemenscheibe fehlen.)

Dauerlauf

Ein Dauerlauf soll die Eignung des Gleitlagers in dieser Anwendung zeigen. Das Dichtungsspiel lässt sich auf der Modellturbine durch konisch gefertigte Welle und Büchse einstellen. Das ist eine Eigenheit der Modellturbine. Das Dichtungsspiel wird auf 0.015 mm festgelegt. Über die Riemen spannung und die Beaufschlagung der Düse wird ein hoher pv-Wert des Gleitlagers von über $1.6 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{m/s}$ eingestellt. Da die Spannung des Flachriemens nicht exakt ermittelt werden konnte, kann die exakte Belastung des Gleitlagers nicht mit hoher Genauigkeit angegeben werden.

30 minütiger Einlauf:

Während des Einlaufens wird die Lagereinheit über den Generator motorisch angetrieben. Nach wenigen Minuten sinkt die Leelaufleistung von 250 Watt auf 180 Watt hinunter. Die obere Leckwassermenge beträgt rund 0.1 l/min. Der Zustand von Lagerbuchse und Wellenkonus ist nach dem Einlaufen einwandfrei. Die Welle liegt an zwei Punkten (Kreisen) am Konus an, oben und unten am Einstich (Fig. 28).



Fig. 28: Lagerbuchse und Welle nach dem Einlaufen

Dauerlauf 300 Stunden:

Für den Dauerlauf wurde die Modellturbine über den eigenen Pumpenwagen gespeist. Die Leistung am Generator betrug permanent 1.2 kW. Aufgrund des tiefen Gesamtwirkungsgrades durch Hochdruckpumpe und Turbine erwärmte sich das Wasservolumen von rund 80 l, das ständig im Kreis herumgepumpt wird, relativ rasch. So brauchte es einige Optimierungen, bis im Dauerbetrieb gefahren werden konnte:

- Die Wasserführung zur Schmierung des Gleitlagers wurde umgebaut, sodass kühles Frischwasser auf die Dichtung hat geleitet werden. Damit wurde sichergestellt, dass die Spaltverhältnisse konstant blieben.
- Der Rücklauf des Dichtungswassers wurde mit zusätzlichem Frischwasser angereichert, damit das Turbinenwasser nicht über 50°C warm wurde.

Bei der ersten Inspektion nach 50 h wurden einige rundumlaufende Kratzspuren in der Buchse festgestellt (Fig. 29). Es wurde daraufhin ein Korbfilter mit einer Maschenweite von 0.18 mm in die Leitungsführung des Dichtungswassers eingebaut.



Fig. 29: Lagerbuchse und Welle nach 50 Stunden

Bei der zweiten Inspektion nach 150 Stunden konnte festgestellt werden, dass es noch mehr Rillen in Buchse gegeben hat (Fig. 30). Die Rillen befinden sich nicht nur auf der Belastungsstelle, sondern sie laufen ringsum. Auch auf der Welle konnten nun Furchen auf Höhe des Einstichs festgestellt werden. Es ist davon auszugehen, dass Schmutzpartikel über das Schmierwasser in den Dichtungsspalt gelangen und durchgezogen werden. Im Auffangbereich des Schmierwassers oberhalb der Buchse konnten auch Bronzerückstände gefunden werden. Dies weist doch auf einen gewissen Materialabtrag hin. Der einfache Korbfilter wird nun mit einem 100 µm-Feinfilter ersetzt. Vor dem Zusammenbau wurde Lagebuchse mit wasserfestem Filzstift eingefärbt.



Fig. 30: Lagerbuchse nach 150 Stunden

Bei der Inspektion nach 300 Stunden sieht man einige Reibstellen, es wurde jedoch nirgends viel Material abgetragen, da in den Rillen immer noch die blaue Farbe sichtbar ist (Fig. 31). Einzig in Lastrichtung sind 1, 2 Reibstellen ersichtlich (Fig. 32). Die Welle ist in sehr gutem Zustand. Sie weist keine weitere Rillen oder gar Abnutzungen auf.



Fig. 31: Lagerbuchse nach 300 Stunden



Fig. 32: Reibstelle

Fazit:

Insgesamt kann der Materialabtrag nach 300 h Dauerlauf als gering bezeichnet werden. Die Belastung des Gleitlagers war sehr hoch und auch die teilweise vorhandene zusätzliche Belastung durch erhöhte Lagertemperaturen muss berücksichtigt werden. Der Materialabtrag fand nur am Körper mit dem weicheren Material, der Buchse, statt, während die Welle diesbezüglich intakt blieb. Um einem schnellen Verschleiss des Lagers vorzubeugen ist das Dichtungswasser auf alle Fälle zu filtern. Insgesamt hat das Gleitlager seine Aufgabe erfüllen können.

Die 30 kW-Gegendruckanlage in Gordola (*Fig. 6*) wurde mit einem trinkwasserverträglichen Gleitlager ausgerüstet. Der pv-Wert beträgt bei Vollast knapp 1. Das Dichtungswasser wird durch einem 50 µm-Feinfilter gereinigt. Die Anlage läuft seit einem $\frac{3}{4}$ - Jahr mit einer durchschnittlichen Leistung von 28 kW, dies ohne Probleme.

Visualisierung am Standort Münster

Mit der Visualisierung werden 2 Ziele angestrebt. Einerseits sollen die Einsatzmöglichkeiten und die Merkmale der Universaltrbine dargestellt werden, und andererseits soll der Betrieb der Turbine am Standort Münster illustriert werden. Alle notwendigen Plakate wurden entwickelt und in der Grösse A1 gedruckt. Sobald die Inbetriebnahme abgeschlossen und von keinen Änderungen an der Infrastruktur mehr auszugehen ist, wird das Turbinengebäude damit gestaltet.

Komponenten der Visualisierung

1. Übersicht Gesamtanlage: Die Übersicht über die Gesamtanlage stellt mit einem Höhenprofil die Anlage in Münster dar.
2. Pilotanlage Universaltrbine: Die Pilotanlage wird mit Schildern und technischen Angaben ergänzt.
3. Darstellung und Beschreibung der Funktionsweise: Das Schema der Universaltrbine beinhaltet alle für die Funktion notwendigen Komponenten. Die einzelnen Komponenten sind über die Legende angeschrieben. Die Sensoren und Aktoren der Niveauregelung oder der Druckregelung sind ebenfalls dargestellt und beschrieben (Fig. 33).
4. Schematische Darstellung verschiedener Anwendungen: Das Abturbinieren von Reservoirzuflüssen und Ortsnetzzuflüssen, das Abturbinieren von Druckreserven in geschlossenen Systemen und das Abturbinieren von Überläufen bilden die Hauptanwendungen der Universaltrbine (Fig. 34).
5. Einsatzbereich der Universaltrbine: Die Universaltrbine gibt es 1- bis 6-düsig und deckt den Leistungsbereich von 5 bis 50 kW ab.



Fig. 33: Funktionsweise der Universaltrbine



Fig. 34: Anwendungen der Universaltrbine

6. Modellturbine mit Gegendruckregelung: Die Modellturbine wurde technisch stark weiterentwickelt. Sie ist nun eine voll funktionstüchtige, gegendruckfähige Pelton-turbine, die sich einerseits für die spezifische Weiterentwicklung von steuerungs- und turbinentechnischen Aspekten eignet und andererseits auch zur Demonstration und zum Näherbringen der Trinkwasserturbinierung verwendet werden kann. Einzelheiten sind weiter oben unter Versuchsturbinenwagen beschrieben.
7. Flyer „Universalturbine für Wasserversorgungen: Zur Illustration der Trinkwasserturbinierung wurde der Flyer „Universalturbine für Wasserversorgungen“ erstellt. Er bietet auf 2 Seiten Informationen zum aktuellen Stand der Technik und zu den möglichen Einsatzgebieten einer Trinkwasserturbine. Der Flyer befindet sich in Anhang D.

Nationale Zusammenarbeit

Im Rahmen dieses Projekts besteht vor allem die Zusammenarbeit mit dem EW Obergoms. Das EWO ist der Käufer und der zukünftige Betreiber der Pilotanlage. Sie stellen ihre Infrastruktur für die Weiterentwicklung der Universalmaschine zur Verfügung und geben das Turbinenhaus für die Visualisierung her. Das EWO hat speziell für die Versuche mit der Modellmaschine die dafür benötigten Anschlüsse anfertigen lassen. Die Zusammenarbeit mit dem EWO ist vorbildlich. Wir erhalten für unser Vorhaben grosse Unterstützung. Hingegen hat es die Stiftung Revita in den Anfängen des Projektes unterlassen, ihre Mitsprache in der Projektleitung einzufordern. Die Missverständnisse, die zusehends zwischen dem Turbinenlieferanten, dem Bauingenieur und dem EWO entstanden sind, konnten selbst mit grössten Anstrengungen der Revita nicht aus dem Wege geräumt werden, weil die Handhabung fehlte. Die Missverständnisse haben das Projekt unnötigerweise um über 3 Jahre verlängert.

Eine geringe Zusammenarbeit besteht mit dem Institut für Thermo- und Fluid-Engineering der FHNW unter Herrn Prof. Dr. Heiniger. Leider konnte die Zusammenarbeit nicht in einer studentischen Arbeit zum Thema Wasserstrahl-Gasverdichter münden, weil das Institut nicht über genügend freien Kapazitäten verfügte.

Internationale Zusammenarbeit

Im Projekt war keine internationale Zusammenarbeit im Rahmen eines IEA-Programmes vorgesehen. Zur Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der Universität Stuttgart kam es spontan durch den gleichzeitigen Bedarf an Partnern auf beiden Seiten. Die Zusammenarbeit ist als sehr gelungen und gewinnbringend einzustufen. Sie kumulierte in der Mitarbeit der Stiftung Revita an einer Projekteingabe beim BMBF zum Thema „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft“ (ERWAS).

Bewertung

In Münster VS wurden die Druckleitung um- und die 2-düsige Universal turbine eingebaut. Hingegen konnte die Turbine noch nicht in Dauerbetrieb genommen werden. Das heisst, die Betriebstauglichkeit der Turbine für diesen Standort konnte bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht erbracht werden. Dies ist der einzige Wehrmutstropfen eines ansonsten gelungenen Gesamtprojektes. Im Gegensatz dazu konnte glücklicherweise die allgemeine Betriebstauglichkeit und die Betriebstauglichkeit für offene Gegendruckprojekte mit den beiden Turbinen in Oberriet SG und Gordola TI nachgewiesen werden.

Die Luftaustrags- und Lufteintragsuntersuchungen haben sehr wichtige Erkenntnisse für die Auslegung von Turbinenanlagen gegeben. Schon mit verhältnismässig kleinen Kesseln werden zusammen mit Beruhigungsblechen Austragsraten erreicht, die dem Aufnahmevermögen des Wassers entsprechen und sich nicht verhindern lassen, solange als gasförmiges Medium Luft eingesetzt wird. Die Berechnungen zum Lufteintrag lassen je nach Einsatzbedingungen einer Gegendruckturbine die geeignetste Technologie bestimmen und so Turbinenanlagen auslegen.

Die Realisierung der Modellturbine mit Turbinenwagen und Pumpenwagen hat sich ausbezahlt. Auf ihr wurde die neu entwickelte Leitvorrichtung geprüft und die Gegendruckregelung für geschlossene Systeme entwickelt. Ausserdem wurde der Turbinenwagen für die Lufteintrags- und –Austragsuntersuchungen sowie weitere Untersuchungen eingesetzt. Aufgrund seiner Auslegung für Primär- und Sekundärdrücke von 30 bar, respektive 16 bar, wird die Modellturbine auch für weiterführende Untersuchungen geeignet sein.

Die entwickelte Gegendruckregelung für geschlossene Systeme hat auf der Modellturbine einen vielversprechenden Reifegrad gezeigt. Mit ihr lassen sich alle nötigen Betriebszustände realisieren.

Schlussfolgerungen / Ausblick

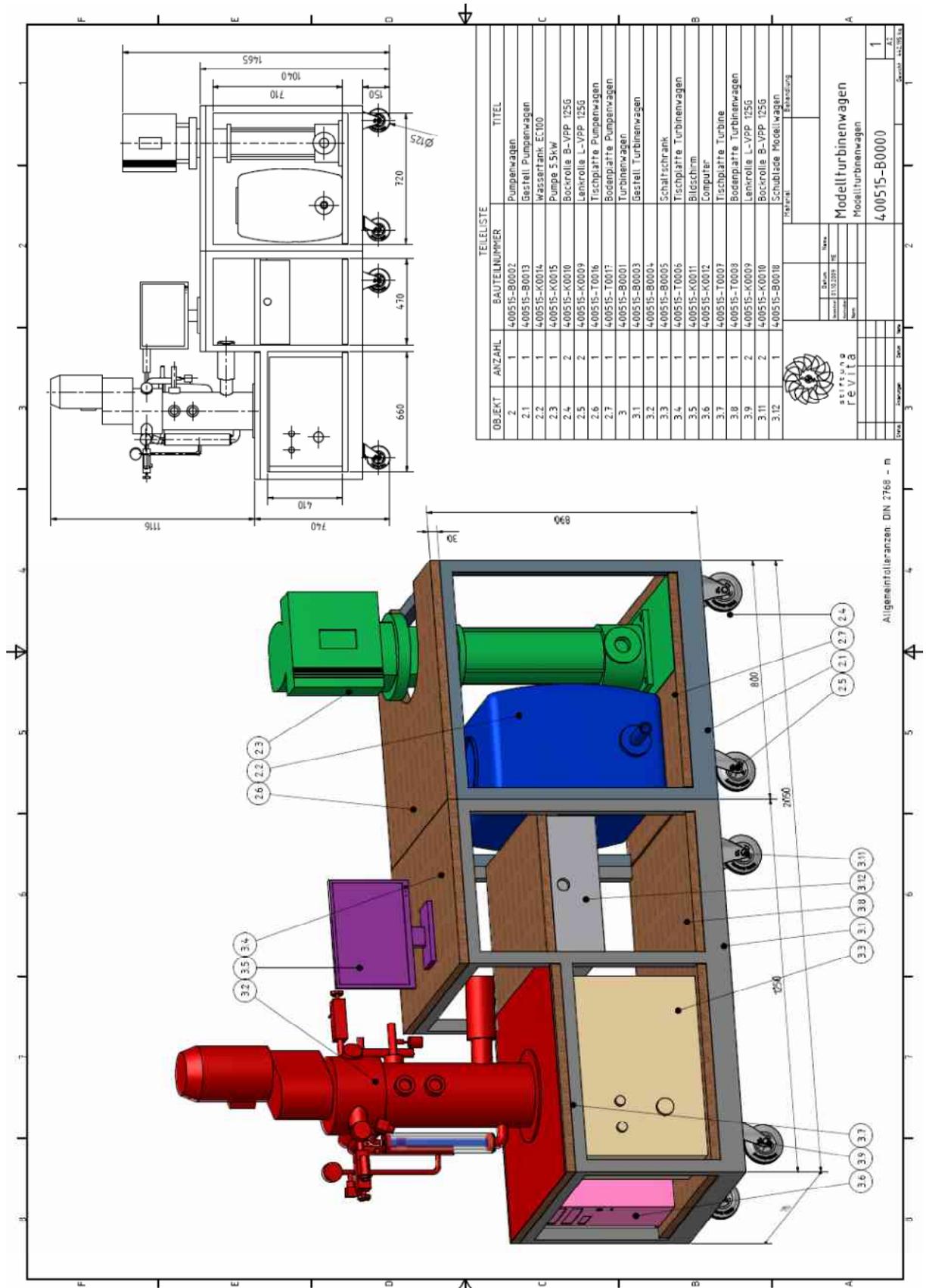
Das Wissen zur Auslegung und zum Bau einer Gegendruckpeltonturbine für geschlossene Systeme ist nun vorhanden. Welche Luftmenge in der Versorgungsleitung zum Verbraucher technisch gesehen unbedenklich ist und akzeptiert werden wird, ist die gegenwärtig einzige offene Fragestellung. Die Technologie wiederum zum Ausscheiden von Luftblasen in der Versorgungsleitung ist bekannt.

Eine Projekteingabe beim BMBF der Universität Stuttgart, an der die Stiftung Revita mitgearbeitet hat, macht sich unter anderem die Beantwortung dieser Frage zum Ziel. Sobald diese letzte Frage geklärt ist, steht der Weg offen für Energieerzeugungen in geschlossenen Gegendrucksystemen.

Referenzen

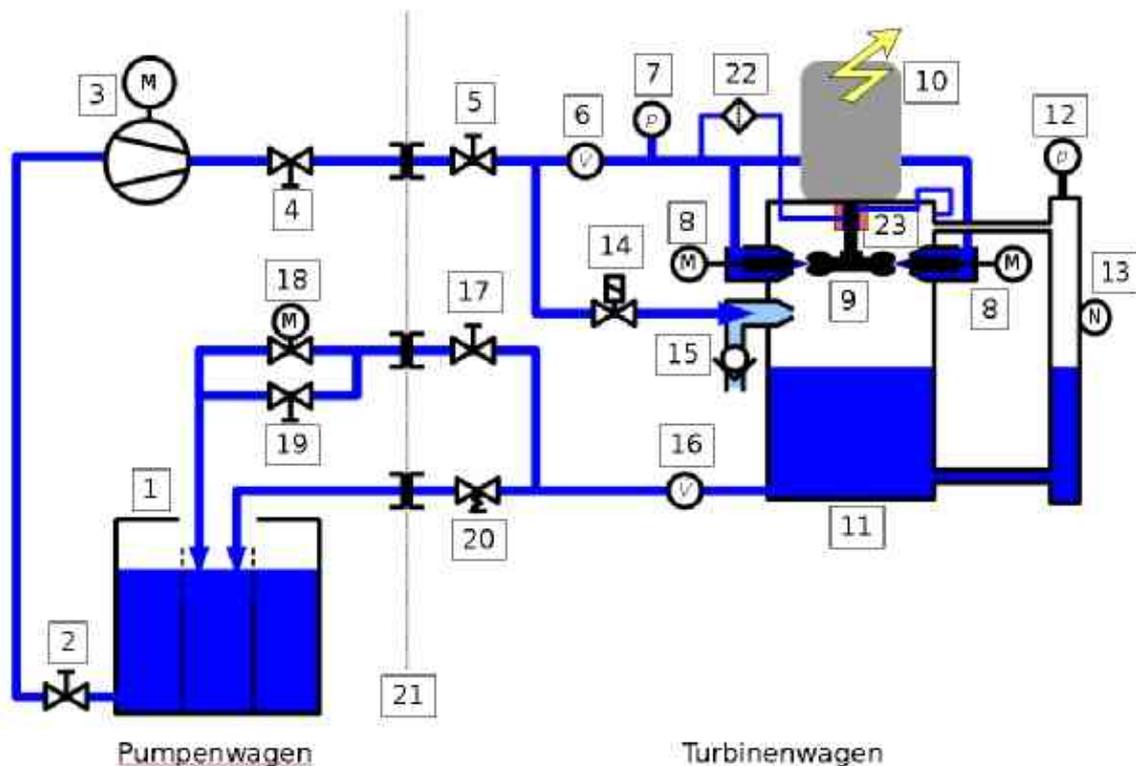
- [1] B. Schindelholz, stiftung revita: **Universell einsetzbare Turbine für Wasserversorgungen (BFE-Projekt Nummer 102033/152529)**, Schlussbericht 20. März 2009.
- [2] Chr. Gmünder, FHNW: Energienutzung in geschlossenen Wasserversorgungssystemen, Diplomarbeit 1. Dezember 2005

Anhang A: Zeichnung Versuchsturbinenwagen



Allgemeintoleranzen: DIN 2768 - m

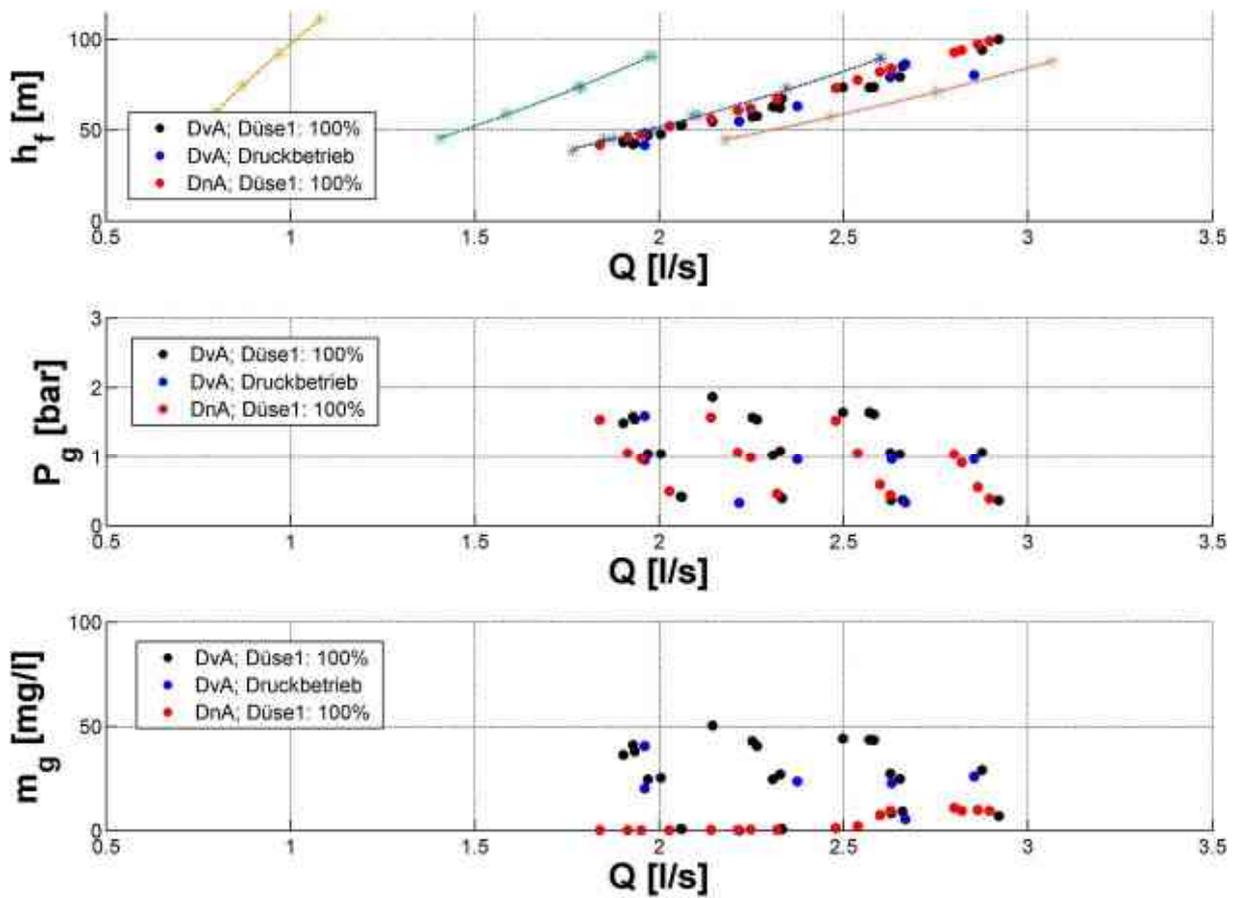
Anhang B: Hydraulischeschema Versuchsturbinenwagen



Legende:

- | | | | |
|----|--|----|--|
| 1 | Wassertank 100l (1 ½" Anschluss) | 13 | Füllstandssensor (Kapazitiv, Sn=15mm) |
| 2 | Kugelhahn 1 ½" (nach Tank) | 14 | Magnetventile (für Strahlpumpen, 50bar, ½" DN12, 33.3l/min bei 1bar, 24VDC) |
| 3 | Kreiselpumpe (5.5kW, 3.6l/s, 16bar) | 15 | 2x Strahlpumpen (für Druckluftkissen, je max. 20l/min, 1.93g(Luft)/s bei 8.5l/s) |
| 4 | Kugelhahn 1 ½" (nach Pumpe) | 16 | Durchflussmesser Paddle-Wheel (Abfluss, 10bar / 25bar) |
| 5 | Kugelhahn 1 ½" (Zulauf Turbinenwagen) | 17 | Kugelventil 2" (Ablauf Turbinenwagen) |
| 6 | Durchflussmessung MID (Druckleitung, 1.5", 40bar, 0.5 - 10l/s) | 18 | Stetiges Regelventil (2", Dp=6bar, PN16, Stellzeit 2s, 3.3l/s bei 1bar) |
| 7 | Druckmessung (Druckleitung, bis 30bar) | 19 | Kugelhahn 2" (statt Regelventil) |
| 8 | Düse el. (Gegendruck geregelt) | 20 | Überströmventil 1" (16bar, 9.3l/s) |
| 9 | Peltonrad (Kunststoffschaufeln, BAK Ø145) | 21 | Feuerwehrrkupplungen zwischen Wagen |
| 10 | Generator mit Leistungsmessung und Netzeinspeisung (1,5kW, 400V, 4 Pol, 1500U/min (-> 2 Pol, 3000U/min)) | 22 | Schmutzfänger (für Wasserdichtung, 30bar, Maschenweite 0.18mmsch) |
| 11 | Turbinenkessel (Gegendruck, bis 16bar) | 23 | Wassergeschmierte Dichtung (Spaltmass einstellbar) |
| 12 | Druckmessung (Gegendruck, bis 16bar) | | |

Anhang C: Messungen und Resultate Luftaustrag



Anhang D: Flyer „Universalturbine für Wasserversorgungen“

Flyer aussen:



