



Schlussbericht 20. März 2009

Universell einsetzbare Turbine für Wasserversorgungen

Nutzung von Druckreduzierenergie im Gegendruckbereich

Auftraggeber:

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

Auftragnehmer:

Stiftung revita
Ökozentrum Langenbruck
Schwengiweg 12
CH-4438 Langenbruck

Autoren:

Bruno Schindelholz, stiftung revita, bruno.schindelholz@revita.ch
Markus Fritschi, stiftung revita, markus.fritschi@revita.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Dr. Klaus Jorde

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 152529 / 102033

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

Inhaltsverzeichnis

| | |
|-----------------------------|----|
| Zusammenfassung | 1 |
| Resumé | 2 |
| Abstract | 3 |
| 1. Ausgangslage | 4 |
| 2. Ziel der Arbeit | 4 |
| 3. Methode | 5 |
| 4. Ergebnisse | 9 |
| 5. Diskussion | 11 |
| 6. Schlussfolgerungen | 11 |
| Referenzen | 12 |

Zusammenfassung

Viele Wasserversorgungen beinhalten durch die Höhenunterschiede grosse Energiepotenziale in Form von Druckreduzierenergie. Für die Wasserversorgung wird meist nur ein Teil dieser Energie benötigt. Der Rest wird in nicht weiter nutzbare Wärme gewandelt.

Die Idee einer Peltonturbine im Druckluftpolster, zur Nutzung dieser Energie, wurde schon im Jahr 2004 von der *stiftung revita* weiterverfolgt und die Machbarkeit nachgewiesen. Erste Versuche an den Fachhochschulen zeigten positive Ergebnisse aber auch technische Probleme, die der Gegendruckturbinierung anhaften. Das Ziel dieser Arbeit ist das Aufzeigen dieser Probleme und deren Lösungen.

Wellendichtung

Für die Funktion der Peltonturbine im Gegendruckbereich ist das Druckluftpolster von entscheidender Bedeutung. Luftverluste bei der Wellendurchführung müssen unbedingt vermieden werden. Handelsübliche Wellendichtungen können die Anforderungen nicht erfüllen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine hydrodynamische, wassergeschmierte Wellendichtung entwickelt, die mit Druckwasser vom Turbinenzufluss versorgt wird. Durch das Sperrwasser wird die Dichtung luftdicht und der hydrodynamische Schmiereffekt sorgt für einen verschleissfreien Betrieb. Bei der Versuchsturbine kann das Dichtungsspiel (Schmierspaltstärke) zu Versuchszwecken eingestellt werden. Eine Versuchreihe und ein Dauertest im Pumpwerk von Crémines (BE) zeigten positive Ergebnisse.

Gegendruckregelung

In Wasserversorgungen gibt es Zonen, die mit sehr hohem Druck versorgt werden. Besitzen diese Zone keine Reservoirs, die den Druck begrenzen können, werden Druckreduzierventile eingesetzt. Druckreduzierventile regeln den Zufluss so, dass kein überhöhter Zuflussdruck in die Zone entstehen kann. Der Durchfluss wird dabei genau dem Verbrauch angepasst. Soll nun die Universal turbine anstelle von Druckreduzierventilen eingesetzt werden, muss der Durchfluss entsprechend dem Gegendruck geregelt werden. Mehrere Regelsysteme wurden an den Fachhochschulen getestet. Die Systeme sind in der Praxis noch nicht anwendbar. Weitere Versuche sind in Vorbereitung.

Luftetrug und Regelung

Die mit dem abfliessenden Wasser ausgetragene Luft muss ersetzt werden. Strahlpumpen haben sich bisher dafür gut bewährt. Die an der Fachhochschule BFH entwickelte Strahlpumpe ist noch nicht regelbar. Vorgesehen ist daher eine Strahlpumpe pro Düse so, dass eine grobe Luftetragsregelung möglich ist. Überschüssige Luft kann bei Bedarf über Entlüftungsventile abgeführt werden. Diese Ausführung genügt für die meisten Anwendungsfälle. Problematisch ist die Löslichkeit von Luft in Wasser unter Druck. Beim Turbinenvorgang geht das Wasser mit der Luft nahezu in Sättigung. Mit dem abfliessenden Wasser wird die gelöste Luft ausgetragen. Bei sinkendem Druck gas die Luft aus und bildet Luftblasen im Leitungsnetz. Dieses Problem ist noch ungelöst.

Industriepartner

Mit der Firma Küffer AG und neu der Firma zobo hydropower gmbh konnten kompetente Industriepartner gefunden werden. Mit ihnen wurde eine Zusammenarbeitsvereinbarung ausgearbeitet. Beide Firmen beteiligen sich aktiv an der Entwicklung und Markteinführung der Universal turbine P2E.

Entwicklung neue Turbinenreihe (Typisierung)

Die mit der Versuchsturbine gemachten Erfahrungen wurden bei der Entwicklung der Universal turbine P2E berücksichtigt. Die Typisierungsgrundlagen für eine einheitliche Baugrösse und universelle Anwendung wurde erarbeitet und konstruktiv umgesetzt.

Resumé

Beaucoup de distributions en eau contiennent, en raison des différences de hauteur, de grands potentiels d'énergie sous forme de limiteurs de pression. Pour la distribution en eau, seulement une partie de cette énergie est utilisée. Le reste est transformé en énergie calorifique non mise à profit.

L'idée pour une turbine de type Pelton à coussin d'air comprimé pour l'exploitation de cette énergie a été suivie déjà en 2004 par la *Fondation revita*, et la faisabilité prouvée. Les premiers essais effectués par les Hautes écoles spécialisées ont montré des résultats positifs, mais aussi des problèmes d'ordre technique inhérents à la contrepression de la turbine. L'objectif primaire de ce travail est de mettre en évidence ce problème et ses solutions.

Etanchéité de l'arbre

Pour le fonctionnement en contrepression de la turbine de type Pelton, le coussin d'air comprimé est d'une importance primordiale. Les pertes d'air au niveau du passage de l'arbre doivent être absolument évitées. Les garnitures d'étanchéité du commerce ne peuvent remplir les exigences requises. Dans le cadre de ce travail, une garniture d'étanchéité hydrodynamique et lubrifiée par l'eau a été conçue, alimentée par l'eau sous pression provenant de la turbine. Grâce à l'eau de blocage, la garniture est étanche à l'air et l'effet lubrifiant hydrodynamique pourvoit à un fonctionnement résistant à l'usure. Sur la turbine d'essai, le jeu d'étanchéité (fente de lubrification) peut être ajusté à but expérimental. Une série d'essais et un test de longue durée dans la station de pompage de Crémines (BE) ont révélé des résultats positifs.

Réglage de la contrepression

Il existe des régions, pour la distribution d'eau, qui doivent être alimentées sous haute pression. Lorsque ces régions ne possèdent pas de réservoirs pour limiter la pression, on placera des limiteurs de pression qui régularisent l'arrivée en eau de telle manière qu'aucune surpression ne puisse se créer dans cette région. Le débit sera exactement ajusté à la consommation en eau. Dans le cas où ce serait la turbine universelle qui est installée au lieu de limiteurs de pression, le débit devrait être réglé en fonction de la contrepression. Plusieurs systèmes de réglage ont été testés par les écoles supérieures spécialisées. Ces systèmes ne sont pas encore éprouvés dans la pratique. D'autres essais sont en préparation.

Entrée d'air et réglage

L'air évacué avec l'eau d'écoulement doit être remplacé. Des pompes à injection se sont avérées efficaces jusqu'à présent. La pompe à injection développée à la Haute école spécialisée du canton de Berne n'est pas encore réglable. Pour cette raison, on prévoit de concevoir une pompe à injection par buse pour qu'un réglage grossier de l'entrée de l'air puisse s'effectuer. L'air excédentaire peut, selon les besoins, être évacué par une vanne de dépressurisation. Cette exécution suffit pour la plupart des applications. Le problème est la solubilité de l'air dans l'eau sous pression. Pendant le processus de turbinage, l'eau et l'air arrivent pratiquement à saturation. L'air dissous est évacué avec l'eau d'écoulement. Lors d'une diminution de pression, l'air se dégaze et forme des bulles dans le réseau de distribution. Ce problème n'est pas encore résolu.

Partenaires industriels

Nous avons trouvé des partenaires industriels compétents: la société Küffer AG et récemment la société zobo hydropower gmbh. Nous avons élaboré avec ces deux sociétés un accord de coopération. Elles participent activement au développement et au lancement sur le marché de la turbine universelle du type P2E.

Développement de nouvelles séries de turbines (Classification par types)

Les expériences faites avec la turbine d'essai ont été prises en compte lors du développement de la turbine universelle du type P2E. Les principes de base de la classification par types pour un dimensionnement uniforme et une application universelle ont été élaborés et mis en œuvre sur le plan de la construction.

Abstract

Due to differences in height above sea level, many water supplies have great energy potential in the form of energy created from pressure reduction. Usually only part of this energy is needed to actually supply the water. The rest is transformed into heat, which is of no further use.

As far back as 2004, the idea of harnessing this energy by means of a Pelton turbine in a cushion of compressed air was followed up by the *revita foundation* and its feasibility was proven. Initial testing at Swiss Universities of Applied Sciences showed both positive results and technical problems, which were due to the counterpressure turbine. This paper aims to discuss those problems and their solutions.

Wave seal

If a Pelton turbine is to work in the counterpressure area, the compressed air cushion is of critical importance. Air losses during the wave passage must be prevented at all costs. Commercially available wave seals cannot fulfill these requirements. We have developed a hydrodynamic, water-lubricated wave seal, which is fed with compressed water from the turbine inflow. The sealing water makes the seal airtight and the hydrodynamic lubrication ensures wear-proof operation. In the trial turbine, the clearance of the seal (depth of lubrication gap) can be adjusted for testing purposes. A series of trials and an endurance test at the pumping station in Crémines (CH) showed positive results.

Counterpressure control

In water supplies, there are zones which are supplied with very high pressure. If those zones don't have any reservoirs that can limit the pressure, pressure-reducing valves are used. Pressure reducing valves control the inflow, thus ensuring that there will be no increase in inflow pressure in a given zone. The flow is adapted to exactly fit consumption. If the universal turbine is to be used instead of pressure reducing valves, the flow has to be controlled in line with counterpressure. Several control systems have been tested at the Universities of Applied Science. These systems cannot yet be used in practice. Further tests are being prepared.

Air inflow and control

The air that is removed along with the out-flowing water has to be replaced. Until now, jet pumps have proved to be well suited for this task. The jet pump developed at the BFH University of Applied Sciences cannot yet be regulated. The intention is to use one jet pump per nozzle, making it possible to roughly control air inflow. Excess air can be removed via air-release valves if necessary. This design is sufficient for most applications. A problem is caused by the fact that air is soluble in water under pressure. During the turbine process, the water is almost totally saturated with air. The outflowing water takes the dissolved air with it. When the pressure drops, the air separates out from the water and forms air bubbles in the supply network. No solution for this problem has yet been found.

Industry partners

We have been able to find expert industrial partners at Küffer AG and also now at zobo hydropower gmbh. A collaboration agreement has been drawn up with these companies, both of which are actively participating in the development of the P2E universal turbine and its launch onto the market.

Development of a new turbine series (standardisation)

The experiences with the test turbine were taken into account during the development of the P2E universal turbine. A basis for standardisation (uniform size and universal application) was developed and implemented.

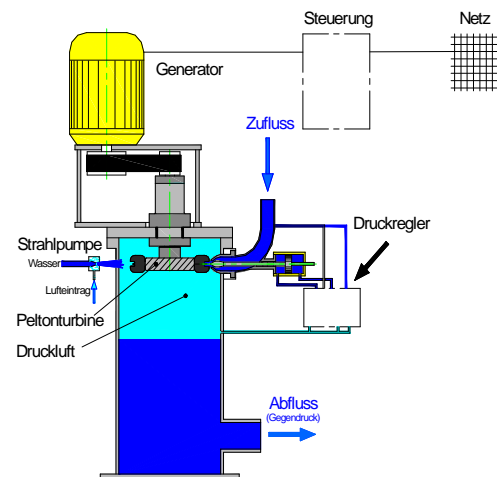
1. Ausgangslage

Elektrische Energie gewinnt zunehmend an Bedeutung. Ihre Aufbereitung ist weltweit grösstenteils noch immer mit grossen Umweltbelastungen behaftet. Speziell aus diesem Grund ist es wichtig ökologisch unbedenkliche Energiepotenziale zu nutzen. Viele Wasserversorgungen beinhalten durch die Höhenunterschiede solche Energiepotenziale in Form von Druckreduzierenergie, bei deren Nutzung normalerweise keine negativen ökologischen Nachteile zu erwarten sind. Für die Wasserversorgung wird meist nur ein Teil dieser Energie benötigt. Der Rest wird in nicht weiter nutzbare Wärme gewandelt. Mit Pelton-turbinen im Druckluftpolster kann diese Druckreduzierenergie an beliebigen Stellen und neu vor allem auch im Gegendruckbereich in elektrische Energie gewandelt und somit nutzbar gemacht werden.

Systembeschreibung

Durch das Druckluftpolster wird das Turbinenlaufrad frei von Flüssigkeitsreibung gehalten und Druckschläge im Leitungsnetz gedämpft. Der entsprechende Gegendruck (Versorgungsdruck) kann mit dem Druckluftpolster gewährleistet werden. Das Druckluftpolster selber muss allerdings erhalten werden. Dazu ist es unabdingbar das Druckgefäss, insbesondere die Wellendurchführung luftdicht auszuführen. Die im Wasser gelöste Luft wird mit dem Abfluss ausgetragen und muss ersetzt werden. Strahlpumpen haben sich dafür bisher gut bewährt. Das Aufrechterhalten des Druckluftpolsters innerhalb des Turbinengehäuses und die Gegendruckregelung sind die zentralen Elemente des vorliegenden Projektvorhabens.

Figur 1: Universalturbine schematisch



Grundlagen

Dank einer vom Bundesamt für Energie (BfE) und weiteren privaten Geldgebern unterstützten Studie, konnte im Jahr 2004, die Möglichkeit der Pelton-turbine im Druckluftpolster untersucht und die Machbarkeit aufgezeigt werden. Zusammengefasst sind die meisten nutzbaren Energiepotenziale in Wasserversorgungen aufgrund von Druckdifferenz und Durchfluss mit Pelton-turbinen bei gutem Wirkungsgrad nutzbar. Zentral stellte sich nun die Frage, wie kann das Druckluftpolster für die Gegendruckturbinierung erhalten werden? Mehrere Semester- und Diplomarbeiten an den beiden Fachhochschulen FHNW und BFH wurden daraufhin diesem Thema gewidmet und die Machbarkeit mit einer Versuchsturbine nachgewiesen. Im Anschluss erfolgte der Antrag für dieses Forschungsvorhaben, mit dem die konkreten Probleme der Gegendruckturbinierung untersucht und Lösungen erarbeitet werden konnten.

2. Ziel der Arbeit

Ein erstes Ziel dieser Arbeit sind Lösungen für die technischen Probleme der Gegendruckturbinierung. Dies betrifft insbesondere die unbedingt luftdicht und verschleissfrei auszuführende Wellendichtung, die Gegendruckregulierung für den Einsatz der Turbine in Zonen ohne Druckausgleich, und die Luft-eintragsmöglichkeiten mit deren Regelung.

Ein weiteres Ziel ist die universelle Einsetzbarkeit der Turbine in Wasserversorgungen. Die einzelnen Energiepotenziale weisen in Bezug auf nutzbare Druckdifferenz, Durchfluss und Gegendruck grosse Unterschiede auf. Bisher wird jede Turbine speziell nach Nettofallhöhe, Durchfluss und nur für atmosphärischen Gegendruck konzipiert und hergestellt. Von daher sind diese Turbine weitgehend Unikate und relativ teuer. Die Universalturbine soll in einheitlicher Baugrösse die meisten Energiepotenziale effizient nutzen können. Sie kann mit wenig Aufwand den bereits erwähnten standortspezifischen Gegebenheiten angepasst werden und weist trotzdem einen sehr guten Wirkungsgrad auf.

Im Rahmen dieser Arbeiten entstand die Idee einer Universalturbine P2E für Wasserversorgungen. Aus diesen Zielvorgaben ergaben sich die einzelnen Teilschritte für den Projektantrag.

3. Methode

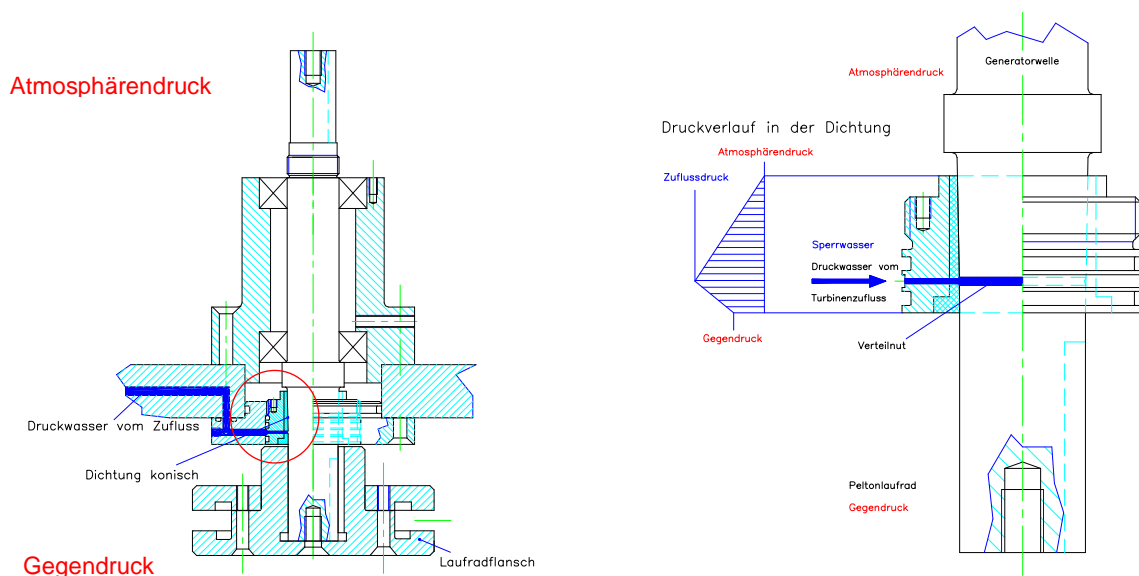
Wellendichtung

Für die Gegendruckturbinierung ist der Erhalt vom Druckluftpolster von zentraler Bedeutung. Erforderlich dazu ist eine Wellendichtung, die absolut luftdicht und verschleissfrei ist. Handelsübliche Produkte konnten die Erwartungen in Bezug auf Lebensdauer, Verschleissfreiheit und Dichtheit nicht erfüllen. Aus diesem Grund wurde die Idee einer wassergeschmierten, hydrodynamischen Dichtung genauer untersucht und die Versuchsturbine damit ausgerüstet. Welle und Dichtung sind leicht konisch ausgeführt. Durch axiale Verstellung der Dichtungsbuchs kann der Dichtungsspiels verändert werden. In einer Testreihe (Tabelle 3) wurden Leckwassermenge und Reibungsverhalten in Abhängigkeit des Dichtungsspiels aufgenommen.

Funktionsbeschreibung

Wasser vom Turbinenzufluss wird über einen Filter, Bohrungen und Verteilnut in die Dichtungsmitte eingepresst. Der Zuflussdruck ist generell grösser wie der Gegendruck im Turbinenkessel. Dadurch wird die Wellendichtung luftdicht. Dank dem hydrodynamischen Schmiereffekt entsteht mit dem Wasser zwischen Welle und Dichtung ein tragender Schmierspalt mit reiner Flüssigkeitsreibung. Als nachteilig erweisen sich die Leckverluste gegen aussen. Diese müssen über eine Abflussleitung abgeführt werden.

Figur 2: Schnitt hydrodynamische Wellendichtung



Versuchsreihe

In der Versuchsreihe vom 2.8.2008 wurden Funktionstauglichkeit und das Reibungsverhalten in Abhängigkeit vom Dichtungsspalt untersucht.

Tabelle 3: Messreihe, Reibungsverhalten in Abhängigkeit vom Dichtungsspalt, Leckverluste

Testbedingungen

Datum 2.8.2007

Abflussdruck (Gegendruck)

0.5 bar

Dichtungsspiel zu Beginn der Messung

0.02 mm (im Radius)

Übersetzung Spieleinstellung

38.2 U ergibt 0.01 mm im Radius

| Dichtungs- einstellung | Veränderung Dichtungsspiel | Dichtungsspiel eingestellt | Leckwasser gemessen | Durchgangs - drehzahl | Dichtungsspiel theoretisch |
|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Umdrehungen | mm | mm | cm ³ /s | U/min. | mm |
| 0 | 0.00000 | 0.0200 | 1.681 | 2543.5 | 0.02461 |
| 5 | -0.00131 | 0.0187 | 1.361 | 2544.5 | 0.02294 |
| 10 | -0.00262 | 0.0174 | 1.099 | 2544.5 | 0.02136 |
| 15 | -0.00393 | 0.0161 | 0.935 | 2544.5 | 0.02024 |
| 20 | -0.00524 | 0.0148 | 0.617 | 2542.0 | 0.01763 |
| 25 | -0.00654 | 0.0135 | 0.495 | 2542.0 | 0.01638 |
| 30 | -0.00785 | 0.0121 | 0.450 | 2546.5 | 0.01587 |
| 35 | -0.00916 | 0.0108 | 0.323 | 2546.5 | 0.01420 |
| 40 | -0.01047 | 0.0095 | 0.185 | 2554.0 | 0.01179 |
| Stillstand der Anlage ca. 2 Std. 1) | | | | | |
| 40 | -0.01047 | 0.0095 | 0.450 | 2546.0 | 0.01587 |
| 45 | -0.01178 | 0.0082 | 0.214 | 2544.0 | 0.01238 |
| 50 | -0.01309 | 0.0069 | 0.126 | 2547.0 | 0.01038 |
| 55 | -0.01440 | 0.0056 | 0.104 | 2552.0 | 0.00974 |
| 60 | -0.01571 | 0.0043 | 0.157 | 2553.0 | 0.01117 |

- 1) Nach dem zweistündigen Stillstand der Anlage erhöhte sich die Leckwassermenge wieder geringfügig. Wir vermuten, dass dies mit der Wärmedehnung zusammenhängt. Welle und Dichtung müssten sich um ca. 1.5 °C abgekühlt haben. Temperaturmessungen wurden nicht durchgeführt.

Bemerkungen

Mit kleiner werdendem Dichtungsspiel reduziert sich erwartungsgemäss die Leckwassermenge, die Durchgangsdrehzahl bleibt nahezu konstant, das Reibungsverhalten ändert sich unwesentlich. Nach dem Unterschreiten des Dichtungsspiels von 0.0043 mm verliert die Welle den hydrodynamischen Schmierfilm. Die Welle klemmt sich fest. Als ideal scheint uns ein Dichtungsspiel von 0.01 mm.

Ergänzende Erfahrungen im Labor der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW)

Die gesamten Testläufe für den Druckregler (zwei Diplomarbeiten) wurden mit der gleichen Wellendichtung durchgeführt. Störungen diesbezüglich wurden keine festgestellt.

Dauertest

Ab Juli 2008 bis Januar 2009 war die Versuchsturbine mit der beschriebenen Dichtung im Pumpenhaus in Crémines (BE) im Dauertest. Das Dichtungsspiel wurde auf 0,01 mm eingestellt und war in diesem Zeitraum über 2000 Stunden in Betrieb. Probleme mit der Dichtung wurden keine festgestellt. Die Leckwassermenge blieb konstant.

Gegendruckregelung

In Wasserversorgungen gibt es Zonen (Dörfer, Quartiere), die mit sehr hohem Druck versorgt werden. Besitzen nun diese Zonen keine Reservoirs, die den Druck begrenzen können, werden Druckreduzierventile eingesetzt. Druckreduzierventile regeln den Zufluss so, dass kein überhöhter Zuflussdruck in den Zonen entstehen kann. Der Durchfluss wird dabei über die Druckvorgabe genau dem Verbrauch angepasst. Soll nun die Universal turbine anstelle von Druckreduzierventilen eingesetzt werden, muss der Durchfluss ebenfalls entsprechend dem Gegendruck geregelt werden. An den beiden Fachhochschulen FHNW und BFH wurden die beiden nachfolgend beschriebenen Reglersysteme gebaut und getestet. Die Diplom- und Semesterarbeiten dazu sind bei der *stiftung revita* einsehbar.

Funktionsbeschreibung

Allein durch Messen vom Gegenruck soll bei stark änderndem Abfluss die Nadelposition so verstellt werden, dass keine zu grossen Druckschläge in der Zuflussleitung entsteht. Andererseits soll der Gegendruck (Versorgungsdruck) in einem bestimmten Bereich gehalten werden.

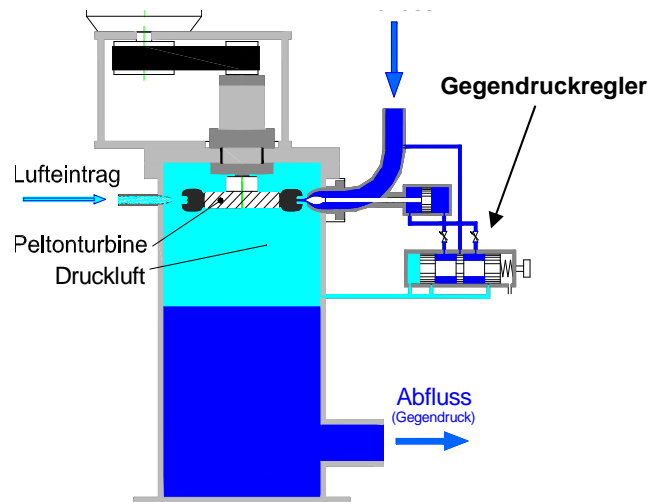
Proportionalventil (mechanisch)

Erste Versuche wurden an der FHNW mit dem in Figur 4 schematisch dargestellten Gegendruckregler (Proportionalventil) durchgeführt. Dabei wurde der Abfluss nach unterschiedlichen Funktionen verändert und das Regelverhalten aufgezeichnet.

Ergebnis

Der Gegendruck kann mit dem Regler einigermaßen konstant gehalten werden. Durch das Integrationsglied (Kesselraum) und das Proportionalventil neigt das System sehr stark zum Schwingen. Die Düsennadel ist dabei fast dauernd in Bewegung. Für den Praxiseinsatz ist das Regelsystem nicht geeignet.

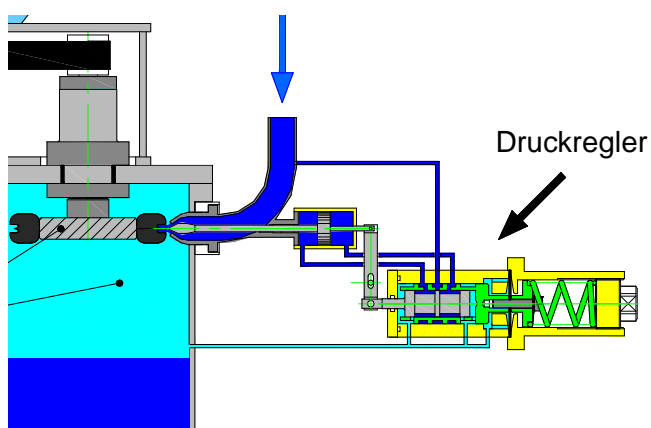
Figur 4: Proportionalventil schematisch



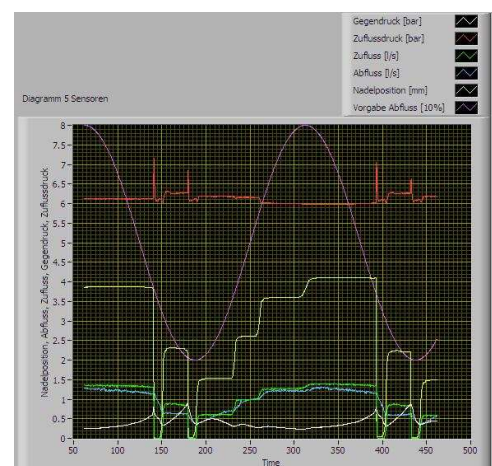
Unterlagerter Positionsregler (mechanisch)

Als Weiterentwicklung des Proportionalventils entstand der "Unterlagerte Positionsregler". Bei diesem System wird die Nadelbewegung über eine Hebelübersetzung auf den Steuerkolben rückgeführt. Das Schwingverhalten wird durch diese Rückführung gedämpft.

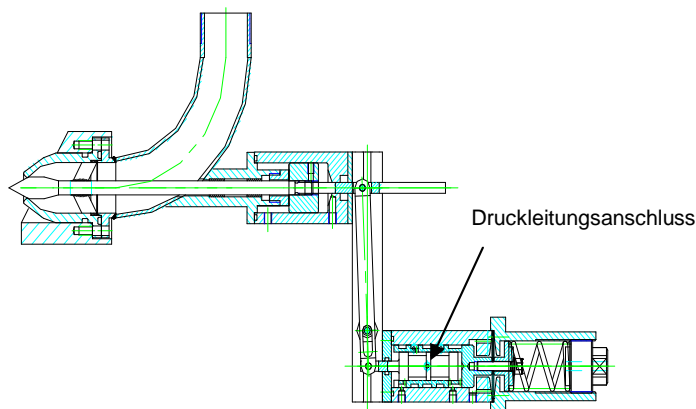
Figur 5: Unterlagerter Positionsregler schematisch



Figur 6: Messreihe an der FHNW



Figur 7: Zusammenstellzeichnung unterlagerter Positionsregler



Ergebnis

Das System ist mechanisch aufwendig und in Betrieb anfällig auf mechanische Reibung. Das Schwingverhalten ist gedämpft aber noch immer vorhanden. Ein zufrieden stellendes Regelverhalten konnte damit nicht erreicht werden.

Fazit

Beide Reglertypen funktionieren ansatzweise, für einen Praxiseinsatz genügt das noch nicht.

Weiteres Vorgehen

Anfragen und Marktrecherchen zeigen, dass eine solche Regeleinrichtung für den beschriebenen Anwendungsfall benötigt wird. Aus diesem Grund soll die Entwicklung weitergeführt werden. Aufgrund der gemachten Erfahrungen mit den bisherigen Reglern und dank Simulationen konnte ein Regelalgorithmus gefunden werden, der zumindest theoretisch das gewünschte Regelverhalten erreicht. Seit Januar 2009 wird bei der *stiftung revita* die Versuchsturbine umgebaut und mit dem Regler nachgerüstet. Erste Versuche sind ab April 2009 vorgesehen.

Lufteintrag und Regelung

Damit das Luftpolster erhalten werden kann, muss die mit dem abfließenden Wasser ausgetragene Luft ersetzt werden. Strahlpumpen haben sich bisher dafür gut bewährt. Die an der Fachhochschule BFH entwickelte Strahlpumpe kann bis zu einem Gegendruck von 6 bar eingesetzt werden, ist aber noch nicht regelbar. Vorgesehen ist daher eine Strahlpumpe pro Düse so, dass eine grobe Luftetragsregelung möglich ist. Mit dem Zu- und Abschalten der Düse soll auch die Strahlpumpe zu- und abgeschaltet werden. Überschüssige Luft kann bei Bedarf über Entlüftungsventile abgeführt werden. Für Anwendungsfälle mit direkter Einspeisung ins Wassernetz kann die gelöste Luft im Wasser insofern problematisch sein, dass sie bei sinkendem Druck zum Teil ausgasen wird und dadurch Luftblasen im Leitungsnetz entstehen. In der Turbine selber kann der Luftaustrag ins Leitungsnetz mit einer geregelten Strahlpumpe oder einem Entlüftungsventil, nur soweit verhindert werden, dass keine Luftblasen vom abfließenden Wasser ausgetragen werden. Die im Wasser gelöste Luft wird ausgetragen. Ihr Anteil liegt knapp unter der Sättigungsgrenze bei den entsprechenden Druck- und Temperaturverhältnissen. Sinkt der Druck im Leitungsnetz durch die Höhenunterschiede, werden Luftblasen im Leitungsnetz entstehen.

In der Praxis wurden diese Laborfeststellungen von uns noch nicht weiter untersucht. Eine erste Anlage dieser Art könnte in Bondo (GR) gebaut werden. Druckleitungen, Turbinenhaus und Druckreduzierventile sind bereits realisiert. Wie weit die Gemeinde bereit ist einen solchen Versuch zu wagen, ist noch nicht klar.

Die Variante mit einem Entlüftungsventil soll in Münster (VS) geprüft werden. Gelingt es damit den Austrag von Luftblasen zu verhindern, könnte ein Versuch in Bondo (GR) überlegt werden.

Industriepartner

Mit der Firma Küffer AG und neu der Firma zobo hydropower gmbh konnten kompetente Industriepartner für die Herstellung und Vermarktung der Universalturbine gefunden werden. Mit den beiden Firmen wurde eine Zusammenarbeitsvereinbarung ausgearbeitet. Beide Firmen beteiligen sich aktiv an der Entwicklung und Markteinführung der Universalturbine. Die Firma Küffer AG übernimmt Logistik und Montage von Turbine und Steuerung. Die Fa. zobo hydropower gmbh liefert Turbinenlaufrad und Leitvorrichtung. Sie beteiligt sich aktiv an der Vermarktung. Die *stiftung revita* ist zuständig für Forschung, Entwicklung und Engineering.

Entwicklung neue Turbinenreihe (Typisierung)

Druckdifferenz, Durchfluss und Gegendruck sind für die verschiedenen Turbinenstandorte unterschiedlich. Bisher wurden Pelton-turbinen speziell für den entsprechenden Standort konzipiert und nur im atmosphärischen Gegendruckbereich eingesetzt. Jede Turbine war ein Unikat. Die Universalturbine soll in einheitlicher Baugröße die meisten Energiepotenziale auch im Gegendruckbereich effizient nutzen können. Zu diesem Zweck wurden Berechnungsmodelle entwickelt, mit denen systematisch die Turbinenauslegung für verschiedene Druckdifferenzen und Abflussgrößen rasch durchgerechnet werden können. Im Anhang 1 und 2 sind die Ergebnisse ersichtlich. Zusammengefasst können die meisten Energiepotenziale in Wasserversorgungen mit einer Turbinen- und Laufradgröße, mit zwei Düsengrößen und mit bis zu sechs Düsen bei gutem Wirkungsgrad genutzt werden. Mit einer Riemenumübersetzung ist die Feinabstimmung der Laufraddrehzahl auf die nächstliegende Netzdrehzahl möglich. Die Generatöraufnahmen müssen nach Baugröße (Leistung) ausgeführt werden.

4. Ergebnisse

Die Forschungsergebnisse für die einzelnen Themenschwerpunkte sind nachfolgend umschrieben.

Wellendichtung

Die Tests und Feldversuche mit der hydrodynamischen, wassergeschmierten Wellendichtung in der Versuchsturbine verliefen zu unserer vollsten Zufriedenheit. Entsprechend wird die Universalturbinen P2E mit dieser Dichtung ausgerüstet. Die beiden ersten Anlagen in Oberriet (SG) und Münster (VS) werden mit dieser Dichtung ausgerüstet.

Gegendruckregelung

Die bisher getesteten Regelsysteme sind mechanisch aufwendig, neigen zu Schwingungen und sind anfällig auf mechanische Reibung. Ein zufrieden stellendes Regelverhalten konnte damit bisher nicht erreicht werden. Für einen Praxiseinsatz genügt das noch nicht.

Wie bereits erwähnt wird an der Problemlösung vorerst weitergearbeitet.

Lufteintrag und Regelung

Der Lufteintrag über Strahlpumpen funktioniert im Labor bis zu einem Gegendruck von 8 bar. In der Praxis sind mit den bisherigen Strahlpumpen sicher 6 bar erreichbar. Mit einer Strahlpumpe pro Düse und einem Entlüftungsventil ist die Regelung möglich.

Bei höheren Gegendrücken ist der Lufteintrag noch nicht zufrieden stellen gelöst. Marktrecherchen zeigen Potenziale, die mit bis zu 16 bar versorgt werden müssten. Wie das effizient geschehen kann ist noch unklar.

Zur Diskussion stehen folgende Vorschläge:

- Verbesserung der Strahlpumpe
- Lufteintrag über die Druckleitung
- Eintrag mit mechanischen Kompressoren (Tauchkompressor)

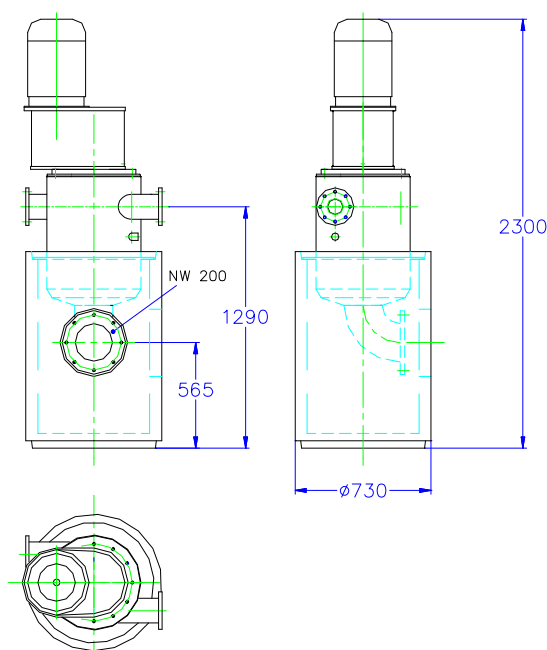
Industriepartner

Die Zusammenarbeit mit den Industriepartnern war bisher erfolgreich. Zwei Turbinen konnten bereits verkauft werden. Die beiden Projekte sind Bearbeitung.

Entwicklung neue Turbinenreihe (Typisierung)

Der Grundgedanke mit der Universalturbine P2E 5 bis 50 kW möglichst viele der vorhandenen Energiepotenziale in Wasserversorgungen mit einer einheitlichen Turbinengrösse nutzen zu können, wurde umgesetzt. Mit den Berechnungsmodellen konnte eine passende, einheitliche Turbinengrösse gefunden werden. Im Anhang 1 und 2 sind die Ergebnisse ersichtlich. Zusammengefasst können die meisten Energiepotenziale in Wasserversorgungen mit einer Turbinen- und Laufradgrösse, mit zwei Düsengrössen und mit bis zu sechs Düsen bei gutem Wirkungsgrad genutzt werden. Mit einer Riemenübersetzung ist die Feinabstimmung der Laufraddrehzahl auf die nächstliegende Netzdrehzahl möglich. Die Generatorkaufnahmen müssen entsprechend der Baugrösse adaptiert werden.

Figur 8: Masszeichnung " Universalturbine P2E, 5 - 50 kW"



Übersicht bisherige Anwendungsmöglichkeiten

Das Anwendungsgebiet nach Druck und Durchfluss ist in Anhang 1 und 2 dargestellt. Der Gegendruck in dem die Universalturbine eingesetzt werden kann reicht von Vakuum mit Saugrohr bis zu einem Gegendruck (Versorgungsdruck) von 6 bar.

| Anwendungsfälle | Regelung | Gegendruck |
|------------------------------------|---------------------|--------------------|
| ➤ Quellzufluss in Reservoirs | Niveau Brunnenstube | Vakuum bis 0.5 bar |
| ➤ Druckreduzierung im Zonenzufluss | Niveau / Gegendruck | Vakuum bis 6 bar |
| ➤ Abturbinierung Überschusswasser | Niveau Reservoir | Vakuum bis 0 bar |

5. Diskussion

In Wasserversorgungen sind die Energiepotenziale im Gegendruckbereich schon länger bekannt. Erste Versuche mit einer Art Rohrturbine scheiterten an diversen technischen Problemen. An der HEVs Hochschule Wallis in Sion wurde fast gleichzeitig eine Anlage mit Umkehrpumpe und Rückspeisefrequenzumrichter realisiert. Bei dieser Anlage zeigte sich, dass der Durchfluss nicht wie gewünscht regelbar ist und der Wirkungsgrad nicht den erhofften Wert erreicht. Druckstösse im Leitungsnetz stören zudem den Turbinenbetrieb und wirken sich negativ auf die Rückspeisung aus. Die Entwicklung wurde daraufhin nicht weitergeführt.

Mit der Pelton-turbine im Druckluftpolster waren schon konzeptionell die Probleme wie sie der Umkehrpumpe anhaften nicht vorhanden. Pelton-turbinen sind aufgrund der Druck- und Abflussverhältnisse, aufgrund der Radformkennzahl beurteilt, geeignet für diese Anwendung. Technische Probleme zur Aufrechterhaltung vom Druckluftpolster konnten soweit gelöst werden, dass die Universal-turbine bis zu einem Gegendruck von 6 bar realisierbar ist. Marktrecherchen zeigen weitere Energiepotenziale mit spezifischen Anforderungen, die mit der Universal-turbine noch nicht erfüllt werden können. Um das Anwendungsgebiet der Universal-turbine zu erweitern schlagen wir folgende Entwicklungsschwerpunkte vor:

- 1) Zweikammerturbine
Bei vielen Anwendungen ist die Quellwassermenge grösser, wie die Wassermenge, die für die Versorgung der Zone benötigt wird. Energetisch gesehen macht es Sinn, dieses Überschusswasser im unteren Zonenbereich auf Umgebungsdruck ab zu Turbinieren. Dazu ist eine zusätzliche Kammer notwendig.
- 2) Gegendruckregelung
Die Gegendruckregelung ist technisch noch nicht gelöst, würde aber den Anwendungsbereich der Universal-turbine stark erweitern. Die *stiftung revita* arbeitet weiterhin an der Lösung dieses Problems.
- 3) Lufteintragsmöglichkeit für hohen Gegendruck (6 bis 16 bar)
Für Beschneigungssysteme wurden in letzter Zeit enorme Infrastrukturen aufgebaut. Viele dieser Anlagen können zusätzlich für die Turbinierung genutzt werden. Der erforderliche Gegendruck nach der Turbine für die Beschneigung beträgt dabei ca. 16 bar.
- 4) Kombination Wellendichtung und Lager
Die Kombination von Dichtung und Lager in einem Bauelement würde kleinere Baumasse ermöglichen und Kosten senken.
- 5) Grössenstandart für die Universal-turbine P2E
Die Universal-turbine arbeitet grundsätzlich umso wirtschaftlicher je grösser ihre elektrische Leistung ist. Um den unteren Leistungsbereich wirtschaftlicher abdecken zu können, müssten die Herstellkosten gesenkt werden. Mit einer weiteren Grössenunterteilung könnten einige Bauteile kostengünstiger hergestellt werden, dagegen nimmt der Logistikaufwand zu. Es gilt diese beiden Komponenten zu optimieren.

6. Schlussfolgerungen

Dank diesem Entwicklungsprojekt konnten wesentliche Probleme der Gegendruckturbिनierung gelöst werden. Für viele, bisher nicht erschliessbare Energiepotenziale, besteht damit die Möglichkeit ihrer Nutzung. Ein ansehnliches Energiepotenzial kann damit neu erschlossen werden. Mit der universellen Anwendungsmöglichkeit und der damit verbundenen Typisierung kann die Universal-turbine in Kleinserien hergestellt werden, das Engineering reduziert sich weitgehend. Zusammen mit der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) verschiebt sich damit die wirtschaftliche Leistungsgrenze bis hinunter auf wenige Kilowatt.

Referenzen

- Literaturverzeichnis

Bisherige Berichte der *stiftung revita*

| | | |
|--------------------|--|------|
| Schafroth Thomas | Vorstudie Drehzahlvariable Turbinen in geschlossenen Systemen | 2003 |
| Schindelholz Bruno | Vorstudie Energienutzung in geschlossenen Wasserversorgungssystemen | 2004 |

Durch die *stiftung revita* betreute Semester- und Diplomarbeiten der Fachhochschulen

| | | | | |
|-------------------|---|----------------|------|---------|
| Gmünder Christoph | Energienutzung in geschlossenen Wasserversorgungssystemen | Diplomarbeit | FHNW | 2005 |
| Bächli Jonas | Durchflussregelung Peltonturbine | Diplomarbeit | FHNW | 2006 |
| Schraner Emanuel | Durchflussregelung Peltonturbine | Semesterarbeit | FHNW | 2006 |
| Burkhardt Daniel | Energienutzung in Trinkwassernetzen | Semesterarbeit | BFH | 2006 |
| Burkhardt Daniel | Energienutzung in Trinkwassernetzen | Diplomarbeit | BFH | 2006/07 |
| Kronig Florian | Druckregler im Kleinwasserkraftwerk | Semesterarbeit | BFH | 2007 |
| Kronig Florian | Energienutzung in Trinkwassernetzen | Diplomarbeit | BFH | 2007 |
| Beerli Christian | Modell Universalturbine | Semesterarbeit | FHNW | 2007 |
| Widmer Daniel | Modell Universalturbine | Diplomarbeit | FHNW | 2007 |

Anhang 1

Anwendungsgebiet der Universalturbine 5 - 50 kW

| | | |
|--------------------------|--------|--|
| Beaufschlagungskreis BAK | 300 mm | |
| Laufzahl | 0.47 - | |
| Geschwindigkeitsbeiwert | 0.97 - | |
| Kontraktionszahl | 0.90 - | |
| Turbinenwirkungsgrad | 0.80 - | |

| |
|--|
| Universalturbine Strahldurchmesser 18 - 25.5 mm |
| Universalturbine Strahldurchmesser grösser 25.5 mm |
| Universalturbine Strahldurchmesser kleiner 18 mm |
| Leistung kleiner 5 kW oder grösser 50 kW |
| Radformkennzahl ungünstig |

| Hn m | Δp bar | n U/Min. | Bezeichnung | Durchfluss (l/s) | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------|-------------|-------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 |
| 20 | 2.0 | 584 | Anz. Düsen | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | |
| | | | nq | 4.4 | 4.4 | 5.3 | 5.0 | 4.9 | 5.3 | 5.2 | 5.0 | 5.3 | 5.6 | 5.9 | 6.2 | 6.4 | 6.7 | 6.9 | 7.1 |
| | | | Leistung kW | 0.8 | 1.6 | 2.4 | 3.1 | 3.9 | 4.7 | 5.5 | 6.3 | 7.1 | 7.8 | 8.6 | 9.4 | 10.2 | 11.0 | 11.8 | 12.6 |
| | | | ø Strahl mm | 20.2 | 20.2 | 24.8 | 23.4 | 22.6 | 24.8 | 23.9 | 23.4 | 24.8 | 26.1 | 27.4 | 28.6 | 29.8 | 30.9 | 32.0 | 33.0 |
| 40 | 3.9 | 826 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | |
| | | | nq | 3.7 | 5.2 | 4.5 | 5.2 | 4.7 | 5.2 | 4.9 | 5.2 | 4.9 | 5.2 | 5.4 | 5.2 | 5.4 | 5.6 | 5.8 | 6.0 |
| | | | Leistung kW | 1.6 | 3.1 | 4.7 | 6.3 | 7.8 | 9.4 | 11.0 | 12.6 | 14.1 | 15.7 | 17.3 | 18.8 | 20.4 | 22.0 | 23.5 | 25.1 |
| | | | ø Strahl mm | 17.0 | 24.1 | 20.8 | 24.1 | 22.0 | 24.1 | 22.5 | 24.1 | 22.8 | 24.1 | 25.2 | 24.1 | 25.0 | 26.0 | 26.9 | 27.8 |
| 60 | 5.9 | 1011 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | |
| | | | nq | 3.3 | 4.7 | 4.1 | 4.7 | 5.2 | 4.7 | 5.1 | 5.4 | 5.0 | 5.2 | 5.5 | 5.1 | 4.9 | 5.1 | 5.2 | 5.4 |
| | | | Leistung kW | 2.4 | 4.7 | 7.1 | 9.4 | 11.8 | 14.1 | 16.5 | 18.8 | 21.2 | 23.5 | 25.9 | 28.3 | 30.6 | 33.0 | 35.3 | 37.7 |
| | | | ø Strahl mm | 15.4 | 21.7 | 18.8 | 21.7 | 24.3 | 21.7 | 23.5 | 25.1 | 23.1 | 24.3 | 25.5 | 23.8 | 22.6 | 23.5 | 24.3 | 25.1 |
| 80 | 7.8 | 1168 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 6 | |
| | | | nq | 3.1 | 4.4 | 5.3 | 4.4 | 4.9 | 5.3 | 4.7 | 5.0 | 5.3 | 4.9 | 5.1 | 5.3 | 5.0 | 5.2 | 5.3 | 5.0 |
| | | | Leistung kW | 3.1 | 6.3 | 9.4 | 12.6 | 15.7 | 18.8 | 22.0 | 25.1 | 28.3 | 31.4 | 34.5 | 37.7 | 40.8 | 43.9 | 47.1 | 50.2 |
| | | | ø Strahl mm | 14.3 | 20.2 | 24.8 | 20.2 | 22.6 | 24.8 | 21.8 | 23.4 | 24.8 | 22.6 | 23.7 | 24.8 | 23.1 | 23.9 | 24.8 | 23.4 |
| 100 | 9.8 | 1305 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | |
| | | | nq | 2.9 | 4.1 | 5.1 | 4.1 | 4.6 | 5.1 | 5.5 | 4.8 | 5.1 | 5.3 | 4.8 | 5.1 | 5.3 | 5.5 | 5.1 | 5.2 |
| | | | Leistung kW | 3.9 | 7.8 | 11.8 | 15.7 | 19.6 | 23.5 | 27.5 | 31.4 | 35.3 | 39.2 | 43.2 | 47.1 | 51.0 | 54.9 | 58.9 | 62.8 |
| | | | ø Strahl mm | 13.5 | 19.1 | 23.4 | 19.1 | 21.4 | 23.4 | 25.3 | 22.1 | 23.4 | 24.7 | 22.4 | 23.4 | 24.4 | 25.3 | 23.4 | 24.2 |
| 120 | 11.8 | 1430 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | |
| | | | nq | 2.8 | 3.9 | 4.8 | 3.9 | 4.4 | 4.8 | 5.2 | 4.6 | 4.8 | 5.1 | 5.3 | 4.8 | 5.0 | 5.2 | 5.4 | 5.0 |
| | | | Leistung kW | 4.7 | 9.4 | 14.1 | 18.8 | 23.5 | 28.3 | 33.0 | 37.7 | 42.4 | 47.1 | 51.8 | 56.5 | 61.2 | 65.9 | 70.6 | 75.3 |
| | | | ø Strahl mm | 12.9 | 18.3 | 22.4 | 18.3 | 20.4 | 22.4 | 24.2 | 21.1 | 22.4 | 23.6 | 24.7 | 22.4 | 23.3 | 24.2 | 25.0 | 23.1 |
| 140 | 13.7 | 1544 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| | | | nq | 2.7 | 3.8 | 4.6 | 5.4 | 4.2 | 4.6 | 5.0 | 5.4 | 4.6 | 4.9 | 5.1 | 5.4 | 4.8 | 5.0 | 5.2 | 5.4 |
| | | | Leistung kW | 5.5 | 11.0 | 16.5 | 22.0 | 27.5 | 33.0 | 38.5 | 43.9 | 49.4 | 54.9 | 60.4 | 65.9 | 71.4 | 76.9 | 82.4 | 87.9 |
| | | | ø Strahl mm | 12.4 | 17.6 | 21.5 | 24.9 | 19.7 | 21.5 | 23.3 | 24.9 | 21.5 | 22.7 | 23.8 | 24.9 | 22.4 | 23.3 | 24.1 | 24.9 |
| 160 | 15.7 | 1651 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | |
| | | | nq | 2.6 | 3.7 | 4.5 | 5.2 | 4.1 | 4.5 | 4.9 | 5.2 | 4.5 | 4.7 | 5.0 | 5.2 | 5.4 | 4.9 | 5.0 | 5.2 |
| | | | Leistung kW | 6.3 | 12.6 | 18.8 | 25.1 | 31.4 | 37.7 | 43.9 | 50.2 | 56.5 | 62.8 | 69.1 | 75.3 | 81.6 | 87.9 | 94.2 | 100 |
| | | | ø Strahl mm | 12.0 | 17.0 | 20.8 | 24.1 | 19.0 | 20.8 | 22.5 | 24.1 | 20.8 | 22.0 | 23.0 | 24.1 | 25.0 | 22.5 | 23.3 | 24.1 |
| 180 | 17.7 | 1751 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | |
| | | | nq | 2.5 | 3.6 | 4.4 | 5.0 | 4.0 | 4.4 | 4.7 | 5.0 | 5.3 | 4.6 | 4.8 | 5.0 | 5.2 | 5.4 | 4.9 | 5.0 |
| | | | Leistung kW | 7.1 | 14.1 | 21.2 | 28.3 | 35.3 | 42.4 | 49.4 | 56.5 | 63.6 | 70.6 | 77.7 | 84.8 | 91.8 | 98.9 | 106 | 113 |
| | | | ø Düse mm | 11.7 | 16.5 | 20.2 | 23.4 | 18.5 | 20.2 | 21.8 | 23.4 | 24.8 | 21.3 | 22.4 | 23.4 | 24.3 | 25.2 | 22.6 | 23.4 |
| 200 | 19.6 | 1846 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | |
| | | | nq | 2.5 | 3.5 | 4.3 | 4.9 | 5.5 | 4.3 | 4.6 | 4.9 | 5.2 | 5.5 | 4.7 | 4.9 | 5.1 | 5.3 | 5.5 | 4.9 |
| | | | Leistung kW | 7.8 | 15.7 | 23.5 | 31.4 | 39.2 | 47.1 | 54.9 | 62.8 | 70.6 | 78.5 | 86.3 | 94.2 | 102 | 110 | 118 | 126 |
| | | | ø Strahl mm | 11.4 | 16.1 | 19.7 | 22.7 | 25.4 | 19.7 | 21.3 | 22.7 | 24.1 | 25.4 | 21.8 | 22.7 | 23.7 | 24.6 | 25.4 | 22.7 |
| 220 | 21.6 | 1936 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | |
| | | | nq | 2.4 | 3.4 | 4.2 | 4.8 | 5.4 | 4.2 | 4.5 | 4.8 | 5.1 | 5.4 | 4.6 | 4.8 | 5.0 | 5.2 | 5.4 | 4.8 |
| | | | Leistung kW | 8.6 | 17.3 | 25.9 | 34.5 | 43.2 | 51.8 | 60.4 | 69.1 | 77.7 | 86.3 | 95.0 | 104 | 112 | 121 | 129 | 138 |
| | | | ø Strahl mm | 11.1 | 15.7 | 19.2 | 22.2 | 24.8 | 19.2 | 20.8 | 22.2 | 23.6 | 24.8 | 21.3 | 22.2 | 23.1 | 24.0 | 24.8 | 22.2 |
| 240 | 23.5 | 2022 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| | | | nq | 2.3 | 3.3 | 4.1 | 4.7 | 5.2 | 4.1 | 4.4 | 4.7 | 5.0 | 5.2 | 5.5 | 4.7 | 4.9 | 5.1 | 5.2 | 5.4 |
| | | | Leistung kW | 9.4 | 18.8 | 28.3 | 37.7 | 47.1 | 56.5 | 65.9 | 75.3 | 84.8 | 94.2 | 104 | 113 | 122 | 132 | 141 | 151 |
| | | | ø Strahl mm | 10.9 | 15.4 | 18.8 | 21.7 | 24.3 | 18.8 | 20.3 | 21.7 | 23.1 | 24.3 | 25.5 | 21.7 | 22.6 | 23.5 | 24.3 | 25.1 |
| 260 | 25.5 | 2105 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| | | | nq | 2.3 | 3.3 | 4.0 | 4.6 | 5.1 | 4.0 | 4.3 | 4.6 | 4.9 | 5.1 | 5.4 | 4.6 | 4.8 | 5.0 | 5.1 | 5.3 |
| | | | Leistung kW | 10.2 | 20.4 | 30.6 | 40.8 | 51.0 | 61.2 | 71.4 | 81.6 | 91.8 | 102 | 112 | 122 | 133 | 143 | 153 | 163 |
| | | | ø Düse mm | 10.7 | 15.1 | 18.4 | 21.3 | 23.8 | 18.4 | 19.9 | 21.3 | 22.6 | 23.8 | 25.0 | 21.3 | 22.2 | 23.0 | 23.8 | 24.6 |
| 280 | 27.5 | 2184 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| | | | nq | 2.3 | 3.2 | 3.9 | 4.5 | 5.0 | 3.9 | 4.2 | 4.5 | 4.8 | 5.0 | 5.3 | 4.5 | 4.7 | 4.9 | 5.0 | 5.2 |
| | | | Leistung kW | 11.0 | 22.0 | 33.0 | 43.9 | 54.9 | 65.9 | 76.9 | 87.9 | 98.9 | 110 | 121 | 132 | 143 | 154 | 165 | 176 |
| | | | ø Strahl mm | 10.5 | 14.8 | 18.1 | 20.9 | 23.4 | 18.1 | 19.6 | 20.9 | 22.2 | 23.4 | 24.5 | 20.9 | 21.8 | 22.6 | 23.4 | 24.1 |
| 300 | 29.4 | 2261 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | |
| | | | nq | 2.2 | 3.1 | 3.8 | 4.4 | 5.0 | 5.4 | 4.1 | 4.4 | 4.7 | 5.0 | 5.2 | 5.4 | 4.6 | 4.8 | 5.0 | 5.1 |
| | | | Leistung kW | 11.8 | 23.5 | 35.3 | 47.1 | 58.9 | 70.6 | 82.4 | 94.2 | 106 | 118 | 129 | 141 | 153 | 165 | 177 | 188 |
| | | | ø Strahl mm | 10.3 | 14.5 | 17.8 | 20.6 | 23.0 | 25.2 | 19.2 | 20.6 | 21.8 | 23.0 | 24.1 | 25.2 | 21.4 | 22.2 | 23.0 | 23.7 |
| 320 | 31.4 | 2335 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | |
| | | | nq | 2.2 | 3.1 | 3.8 | 4.4 | 4.9 | 5.3 | 4.1 | 4.4 | 4.6 | 4.9 | 5.1 | 5.3 | 4.5 | 4.7 | 4.9 | 5.0 |
| | | | Leistung kW | 12.6 | 25.1 | 37.7 | 50.2 | 62.8 | 75.3 | 87.9 | 100 | 113 | 126 | 138 | 151 | 163 | 176 | 188 | 201 |
| | | | ø Strahl mm | 10.1 | 14.3 | 17.5 | 20.2 | 22.6 | 24.8 | 18.9 | 20.2 | 21.5 | 22.6 | 23.7 | 24.8 | 21.1 | 21.8 | 22.6 | 23.4 |
| 340 | 33.4 | 2407 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | |
| | | | nq | 2.1 | 3.0 | 3.7 | 4.3 | 4.8 | 5.3 | 4.0 | 4.3 | 4.6 | 4.8 | 5.0 | 5.3 | 5.5 | 4.6 | 4.8 | 5.0 |
| | | | Leistung kW | 13.3 | 26.7 | 40.0 | 53.4 | 66.7 | 80.0 | 93.4 | 107 | 120 | 133 | 147 | 160 | 173 | 187 | 200 | 213 |
| | | | ø Strahl mm | 10.0 | 14.1 | 17.3 | 19.9 | 22.3 | 24.4 | 18.6 | 19.9 | 21.1 | 22.3 | 23.4 | 24.4 | 25.4 | 21.5 | 22.3 | 23.0 |
| 360 | 35.3 | 2477 | Anz. Düsen | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | |
| | | | nq | 2.1 | 3.0 | 3.7 | 4.2 | 4.7 | 5.2 | 4.0 | 4.2 | 4.5 | 4.7 | 5.0 | 5.2 | 5.4 | 4.6 | 4.7 | 4.9 |
| | | | Leistung kW | 14.1 | 28.3 | 42.4 | 56.5 | 70.6 | 84.8 | 98.9 | 113 | 127 | 141 | 155 | 170 | 184 | 198 | 212 | 226 |
| | | | ø Strahl mm | 9.8 | 13.9 | 17.0 | 19.6 | 22.0 | 24.1 | 18.4 | 19.6 | 20.8 | 22.0 | 23.0 | 24.1 | 25.0 | 21.2 | 22.0 | 22.6 |

Anhang 2

