



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht 10. März 2010

Verschmutzung von Kleinwasserkraftwerken

Auftraggeber:

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

Auftragnehmer:

Hochschule Luzern – Technik & Architektur
CC Fluidmechanik und Hydromaschinen
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw
www.hslu.ch/technik-architektur

Autoren:

André Abgottspon, Hochschule Luzern, andre.abgottspon@hslu.ch
Prof. Dr. Thomas Staubli, Hochschule Luzern, thomas.staubli@hslu.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Dr. Klaus Jorde

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153010 / 102390

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

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS.....	3
ZUSAMMENFASSUNG	4
1 EINLEITUNG.....	5
2 VERSCHMUTZUNG IN KWKW.....	7
2.1 Definitionen / Begriffe	7
2.2 Leistungsabfall / Wirkungsgradreduktion	9
2.2.1 Ablagerungsstellen der Verschmutzung	9
2.2.2 Beispiele von Leistungsrückgängen	12
2.2.3 Begründung des Leistungsabfalls und der Wirkungsgradreduktion.....	15
2.2.4 Umströmung Laufradvorderkante mit CFD	17
2.3 Wasserbauliche Massnahmen	22
2.3.1 Anordnung Fassungsbauwerk	23
2.3.2 Geschiebeschwelle	26
2.3.3 Tauchwand / Schwimmbalken	26
2.3.4 Rechenreinigungsmaschine	30
3 MESSKAMPAGNE IM KWKW FREIENSTEIN	31
3.1 Beschreibung der Anlage und des Monitorings	31
3.2 Messresultate.....	33
3.2.1 Zusammenhang $H - Q$	34
3.2.2 Analyse eines Messdatensatzes	36
3.2.3 Anlagenindexwirkungsgrad	39
3.2.4 Turbulenzgrad	40
3.2.5 Schwingungsmessungen.....	41
3.2.6 Spülvariationen.....	44
3.2.7 Energieverlust	49
4 INTERVIEWS MIT KWKW – BETREIBERN.....	51
4.1 Einsatzbereiche der Turbinen in $f(H, Q)$ und in $f(H, nq)$	51
4.2 Antworten auf Fragestellungen.....	53
5 SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	56
LITERATURVERZEICHNIS	58
ANHANG A1 Berechnungen	59
ANHANG A2 Instrumentierung KWKW Freienstein.....	63
ANHANG A3 Standorte der interviewten KWKW	69
ANHANG A4 Interview im KWKW Freienstein	70
ANHANG A5 Interview im KWKW Neuhausen.....	73
ANHANG A6 Interview im KWKW Tecnicama.....	76
ANHANG A7 Interview im KWKW Windisch	79
ANHANG A8 Interview im KWKW Stoppel.....	82
ANHANG A9 Interview im KWKW Bürglen.....	85
ANHANG A10 Interview im KWKW Au-Schönenberg	88
ANHANG A11 Interview im KWKW Sarneraa	91
ANHANG A12 Interview im KWKW Emmenweid	94
ANHANG A13 Interview im KWKW Rathausen.....	97

ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Bericht befasst sich mit der Verschmutzungsproblematik in Kleinwasserkraftwerken. Das Projekt wurde Ende 2007 von der Hochschule Luzern Technik & Architektur (HSLU) initiiert und wurde vom Bundesamt für Energie (BFE) finanziell unterstützt. Hauptziele des Projekts waren, eine möglichst repräsentative Übersicht über die Thematik in der Schweiz zu erhalten und verschiedene Spülvarianten zur Reinigung der Turbinen zu analysieren und anhand deren Effizienz zu vergleichen. Das Projekt wurde parallel mit einem in Deutschland laufenden Projekt abgewickelt, welches vom Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen (IHS) der Universität Stuttgart geleitet wurde. Die dabei genutzten Synergien in der Zusammenarbeit erwiesen sich als sehr vorteilhaft.

Um möglichst breite Informationen dazu zu erhalten, wurden 10 Interviews / Befragungen von Kleinwasserkraftwerkbetreibern (KWKW – Betreiber) durchgeführt. Es zeigte sich, dass alle befragten Standorte von der Verschmutzung in unterschiedlichem Ausmass betroffen sind. Die eingesetzten wasserbaulichen Massnahmen zur Verhinderung des Geschwemmsel- und Geschiebeeintrags in den Turbineneinlauf differieren stark, was einerseits altersbedingt ist (die Baujahre der befragten Ausführungen reichen von 1926 bis 2004) und andererseits mit den Investitionskosten verbunden ist. Die laufenden Kosten bei KWKW werden wesentlich durch den Personalaufwand bestimmt. Im Herbst bei grösserem Laubeinfall oder bei Regen und Hochwassern, wo beispielsweise der Algenbewuchs im Fliessgewässer abgetragen werden kann, ist der Verschmutzungseintrag in die Anlage erhöht. Bei einigen KWKW führt diese erhöhte Geschwemmselfracht zu manuellen Reinigungsarbeiten, die die Personalkosten erhöhen. Vielfach muss auch ein Spülvorgang, zur Reinigung der Turbinenelemente wie Stütz-, Leit- und Laufrad, manuell vom Betriebspersonal in der Zentrale durchgeführt werden. Der Ablauf des Spülprogramms und deren Auslösung sind bei mehreren der befragten KWKW nicht automatisiert. Gespült wird individuell nach dem Leistungsverlauf. Ist kein Personal auf der Anlage anwesend, läuft die Turbine eventuell über mehrere Tage auf einem "verschmutzten Niveau" und es resultiert ein zusätzlicher Energieverlust.

Es werden verschiedenste Varianten von Spülprogrammen eingesetzt. Varianten die von den Betreibern selbst entwickelt wurden oder solche die durch den Hersteller der Turbinen vorgegeben sind. Numerische Strömungssimulationen des Instituts für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen der Universität Stuttgart haben gezeigt, dass vor allem die Leitradstellung entscheidend ist für eine Umströmung der Profilverdickung des Laufrades, wo die meisten Ablagerungen haften bleiben. Untersuchungen über die Anteile am Leistungsverlust haben gezeigt, dass vor allem bei kleinen Laufraddurchmessern um 1.2m – 1.4m, die Laufradverschmutzung mehr als die Hälfte der Gesamtverluste infolge Verschmutzung an Rechen, Stütz-, Leit- und Laufradschaufeln ausmacht. Die Erkenntnisse aus den Simulationen zu den optimalen Spülprogrammen wurden in einer Messkampagne beim KWKW Freienstein umgesetzt, wo über mehrere Monate ein Monitoring zur Indexwirkungsgraduntersuchung installiert wurde. Es zeigte sich anhand der Leistungssprünge nach den Spülvorgängen, dass ein fast geschlossenes Leitrad bei gleichzeitig geöffnetem Laufrad während des Spülens am effektivsten ist.

Abschätzungen ergaben für das KWKW Freienstein eine Einbusse infolge Verschmutzung von 3.7% der Jahresenergieproduktion. Bei dieser Anlage ist aber zum Unterschied zu mehreren anderen KWKW ein automatisches Spülprogramm mit einem einstellbaren Spülintervall vorhanden. Bei mehreren Anlagen ohne eine gewisse Spülautomatisierung wird der Verlust an Jahresenergie ein Vielfaches davon betragen. Die Befragungen der Betreiber haben dazu geführt, dass diese die Funktionalität der eigenen Anlage bezüglich der Verschmutzungsproblematik hinterfragten.

1 EINLEITUNG

- **Verschmutzungsproblematik**

Kleinwasserkraftwerke liefern in der Schweiz einen wertvollen Beitrag zur Stromversorgung. Wie die Studien im Rahmen des Programms Kleinwasserkraft des BFE zeigen, machen steigende Energiepreise alte wie auch ganz neue Standorte attraktiv. Diese Anlagen arbeiten - bei sachgemässer Auslegung und Installation - normalerweise effizient und mit einem hohen Wirkungsgrad. Ein Problem ergibt sich aber häufig durch die Verschmutzung der Turbinen. Dies ist vor allem im Herbst und bei starken Regenfällen der Fall, wenn grosse Mengen an Laub, Geäst und Ähnlichem anfallen.

- **Befragung von KWKW – Betreibern / Erfahrungsstand**

Nach einer Erhebung der Universität Stuttgart [1] stellt die Verschmutzung das im Grossraum Stuttgart am häufigsten auftretende und grösste Problem bei Kleinanlagen dar. Etwa 80% der Befragten (rund 100 Teilnehmer) gaben an, dass diese durch die Verschmutzung der Turbine mit Laub (Geschwemmsel) und Schwebstoffen erhebliche Leistungseinbussen hinnehmen müssen. Dadurch kann der Wirkungsgrad der Anlage innerhalb kurzer Zeit um 30 - 40% abfallen. Das bedeutet, dass sehr häufig entsprechende Spülprogramme durchgeführt werden müssen. In manchen Anlagen muss dies bei grossem Treibgutanteil im halbstündigen Rhythmus geschehen. Während des Spülens kann kein Strom produziert werden, je nach Spülprogramm wird von der Turbine sogar Leistung aufgenommen. Durch die Häufigkeit des Spülens und der in den Intervallen rasch zunehmenden Verluste ergibt sich damit ein erheblicher Verlust an Jahresarbeit, der je nach Anlage im Bereich von 3 - 10% der Jahresproduktion liegen kann. Diese Daten werden durch eine Untersuchung zu Verlusten bei der Anströmung von Wasserkraftanlagen bestätigt, vgl. Lang [2]. Hier gaben 67% der befragten Betreiber von Kraftwerken mit Rohrturbinen grosse Leistungsminderungen durch Verunreinigungen an.

Die Verschmutzung bzw. Reinigung der Laufrad- und Leitapparatschaufeln ist eine der Hauptschwierigkeiten beim Betrieb eines KWKW. Die gleiche Aussage wird auch von Bruno Guggisberg, bis Ende 2007 Verantwortlicher für den Bereich Kleinwasserkraft beim BFE, vgl. [3], bei einem Interview bestätigt: „Für den Betrieb wären wartungsfreie Rechen sowie optimierte Spülprogramme ein wichtiger Beitrag.“ Diese Notwendigkeit konnte durch die Befragung von 10 KWKW – Betreiber in der Schweiz für die vorliegende Untersuchung bestätigt werden.

Kropik [4] erwähnt, dass typischerweise bei Niederdruckanlagen eingesetzte schnellläufige Francisturbinen wegen der geometrischen Form der Laufschaufeln und des Anschlussbereiches an Laufradboden und Laufradkranz eine hohe Anfälligkeit von Ablagerungen von Geschwemmsel aufweisen. Die damit verbundene Verengung der Strömungsquerschnitte (Verlegungseffekt) und die Störung der Strömung an sich, führen zu einem unruhigen Lauf der Turbine, zu Wirkungsgradabfall und Leistungsverlusten. Die Leistung könne bis auf 80% der Ausbauleistung abfallen.

- **Wasserbauliche Massnahmen**

Wasserbauliche Anlagenelemente wie die Fassung, die Tauchwand, die Geschiebeschwelle oder der Rechen können massgeblich zur Reduktion des Feststoffeintrags (ob Geschwemmsel, Geschiebe oder Schwebstoffe) beitragen. Der Rechen, als eines der wichtigsten Elemente, um den Geschwemmseleintrag in das KWKW zu minimieren, stellte sich auch bei den Befragungen der KWKW – Betreiber als zentrales und noch vielfach zu optimierendes Bauteil dar. Bei einer Untersuchung, vgl. Meusburger [5], wurde erwähnt, dass Forderungen laut werden, die Stababstände der Rechen einheitlich auf 20mm festzulegen. Die erwähnte Studie zum Thema Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken beurteilt diesen 20mm – Rechen nicht nur im Hinblick auf die grossen Verluste sehr kritisch. Es wird angemerkt, dass durch den geringen Rechenabstand dem Fluss mehr Geschwemmsel durch einen ansteigenden Verlegungseffekt entnommen wird. Dies ist eine Aussage, welche in Übereinstimmung zu den Aussagen der KWKW – Betreiber steht, die sich auch möglichst wenig Geschwemmsel nach dem Rechen zu der Turbine hin

wünschen. Hier entsteht ein Zielkonflikt, bei welchem auf der einen Seite der erhöhte Energieverlust sowie der grössere Kompostieraufwand (wenn das Geschwemmsel nicht direkt an den Unterlieger weitergegeben wird) steht und auf der anderen Seite eine Verschmutzungsreduktion bei der Turbine und damit einhergehende Reduktion der benötigten Anzahl Spülungen der Turbine aufweist. Zudem sollte mit einem geringeren Rechenabstand verhindert werden, dass Fische in die Turbinen gelangen.

- **Spülvorgänge**

Die Verschmutzungsverluste ergeben sich ausser am Rechen an folgenden Turbinenelementen, vgl. Erlach [6]:

- Stützschaufeln
- Leitschaufeln
- Laufschaufeln

Zur Reinigung der Turbine – von den Stütz- bis zu den Laufradschaufeln – muss ein entsprechendes Reinigungsprogramm durchgeführt werden, bei dem die Turbine meist geschlossen wird und damit eine erhebliche Beeinflussung des Betriebs auftritt. Obwohl die Verschmutzung der KWKW eines der grössten Probleme darstellt, gibt es dennoch in der Literatur keine Aussagen über optimierte Spülvorgänge. Jede Firma hat hier ihre eigene Philosophie, die stark vom Turbinentyp (doppelt- oder einfachreguliert) abhängt. Es kommen unter anderem folgende Programme zum Einsatz:

- Bei Turbinen mit drehbaren Laufschaufeln (doppeltreguliert):
 - o Durchschwenken der Laufschaufeln in “negative Öffnungen“
 - o Schliessen des Leitapparates bei gleichzeitigem Öffnen des Laufrades
 - o Durchbrennen
 - o Abstellen der Maschine und Wiederauffahren
- Bei Turbinen mit feststehenden Laufschaufeln (einfachreguliert):
 - o Schliessen des Leitapparates, Anlage am Netz, Drehzahl wird beibehalten
 - o Schnellschluss
 - o Abstellen der Maschine und Wiederauffahren

Dies sind die meistverwendeten Spülprogramme, eine systematische Untersuchung und einen Vergleich der Effizienz gibt es nicht.

2 VERSCHMUTZUNG IN KWKW

2.1 Definitionen / Begriffe

Anhand nachfolgender Abbildung soll ein einheitlicher Sprachgebrauch der in einem Fliessgewässer transportierten Feststoffe / Sedimente (folgend auch "Verschmutzung" genannt) wie Geschwemmsel, Geschiebe, Schwebstoffe und Treibeis eingeführt werden (gelöste Stoffe werden nicht behandelt), nach DIANE 10 [7]:

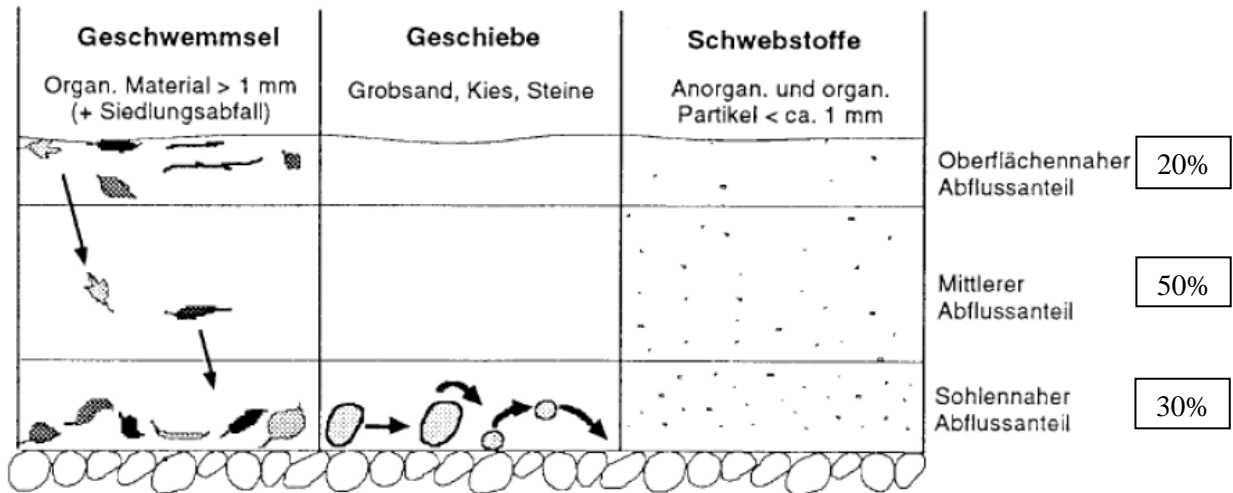


Fig. 1 Feststoffe und ihre Verteilung über die Abflusstiefe [7]

• Geschwemmsel

Geschwemmsel (oder Schwemmgut) besteht aus partikulärem organischen Material (POM) mit einem Durchmesser > 1mm sowie Siedlungsabfall. Das organische Material setzt sich zusammen aus:

- Laub, Nadeln
- Grobholz (Stämme, Äste, Wurzeln)
- Feinholz
- Gras, Heu, Spreu
- Moose, Flechten
- Knospenhüllen, Samen
- Algen, höhere Wasserpflanzen
- Kadaver, Leichen

Das Geschwemmsel kann sowohl schwimmend, schwebend als auch über der Gewässersohle transportiert werden. In welcher Form ein bestimmtes Partikel transportiert wird, ist abhängig von seiner Grösse, der Aufenthaltszeit im Wasser, den Materialeigenschaften sowie den Strömungsverhältnissen.

Die Zusammensetzung des POM in einem Fliessgewässer ist abhängig von der Vegetation entlang des Gewässers sowie im Fliessgewässer selbst, der Jahreszeit, dem Witterungsverlauf und dem Abflussgeschehen. Die folgende Fig. 2 zeigt die prozentuale Zusammensetzung des POM in der Töss bei Winterthur-Wülflingen für den Herbst/Winter 1993/1994. Eine ähnliche Zusammensetzung kann auch für den Flussabschnitt der Töss beim KWKW Freienstein angenommen werden, welches sich weniger als 10km flussabwärts der damaligen Messstelle Winterthur-Wülflingen befindet. Dazwischen werden keine bedeutenden Seitenbäche in die Töss geleitet, hingegen ist mit einem höheren Laubanteil zu

rechnen, da im Abschnitt zwischen der damaligen Messstelle und dem KWKW Freienstein längere Strecken am Fliessgewässer mit dichtem Waldbewuchs vorhanden sind.

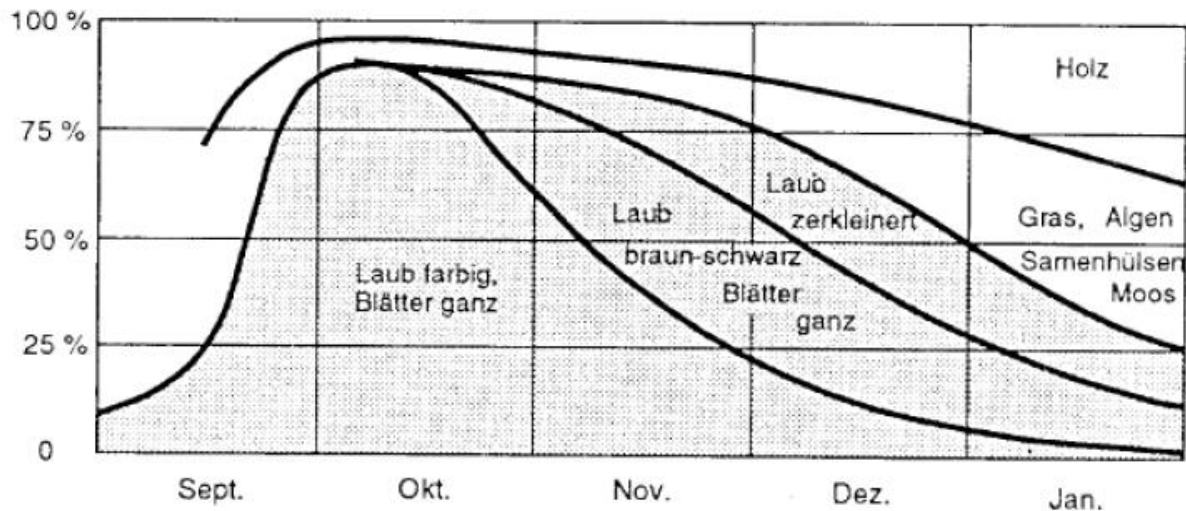


Fig. 2 Zusammensetzung des POM in der Töss bei Winterthur-Wülflingen im Jahr 1993/1994 [7]

Ein Grossteil des Geschwemmsels besteht anfänglich aus farbigem Laub, das sich in der Zeit braun verfärbt und zersetzt. Das Laub wird im Dezember und vor allem im Januar abgelöst durch Samenhüllen und Holzsplitter. Bei grösseren Abflüssen sind vermehrt Grobholz, Gras, Moos und Algen festzustellen, die durch die Strömung entwurzelt oder ab- und mitgerissen werden.

- **Geschiebe**

Geschiebe besteht aus Grobsand, Kies und Steinen, die rollend, gleitend oder springend über die Gewässersohle transportiert werden.

- **Schwebstoffe**

Zu den Schwebstoffen gehören alle organischen und anorganischen Feinpartikel (Durchmesser < ca. 1mm), die durch die Turbulenz des Abflusses (demnach geschwindigkeitsabhängig) immer wieder von der Sohle abgehoben werden und in Schwebelag bleiben. Sie werden über die gesamte Abflusstiefe verteilt, gerinneabwärts transportiert. Sie stellen mit Abstand den grössten Teil der Feststofffracht eines Fliessgewässers dar.

- **Treibeis**

Treibeis besteht aus Platten und Schollen, die schwimmend mit der Strömung gerinneabwärts transportiert werden.

Bei den befragten KWKW-Betreibern hatte einzig das KWKW Bürglen im Winter Probleme mit anfallendem Treibeis.

Die Zusammensetzung oder die Kategorisierung von Ursache (Mobilisation), Transport und Deposition der Feststoffe in einem Flussverlauf ist in der nachfolgenden Abbildung zusammengefasst:

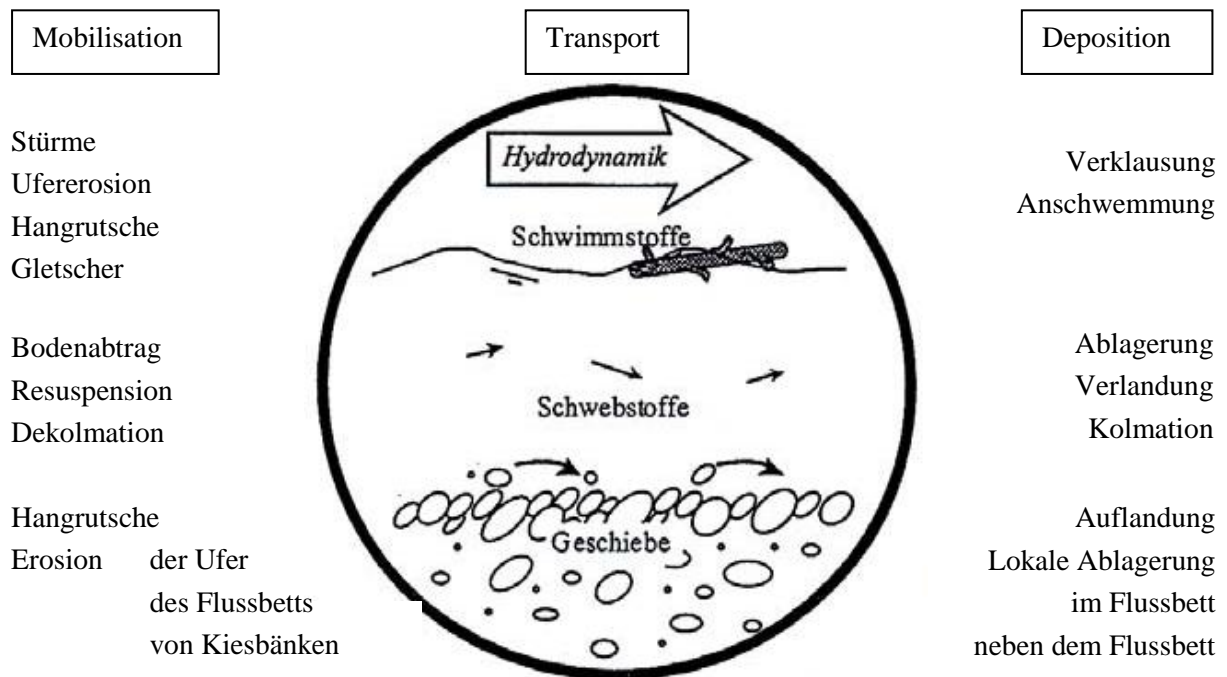


Fig. 3 Mobilisation, Transport und Deposition von partikulärem organischen Material [8]

2.2 Leistungsabfall / Wirkungsgradreduktion

2.2.1 Ablagerungsstellen der Verschmutzung

Das oberflächennahe Geschwemmsel kann von einer Tauchwand aufgehalten, an der Fassung der Anlage vorbeigeleitet und über einen Spülschütz an das Unterwasser weitergegeben werden. Der sohlennahe Abflussanteil (Geschwemmsel und Geschiebe) kann an einer Geschiebeschwelle mit einer Spülrinne an der Sohle der Fassung daran gehindert werden, in den Turbineneinlauf zu gelangen. Durch diese beiden baulichen Massnahmen kann ein Teil der Verschmutzung vom Turbineneinlauf ferngehalten werden.

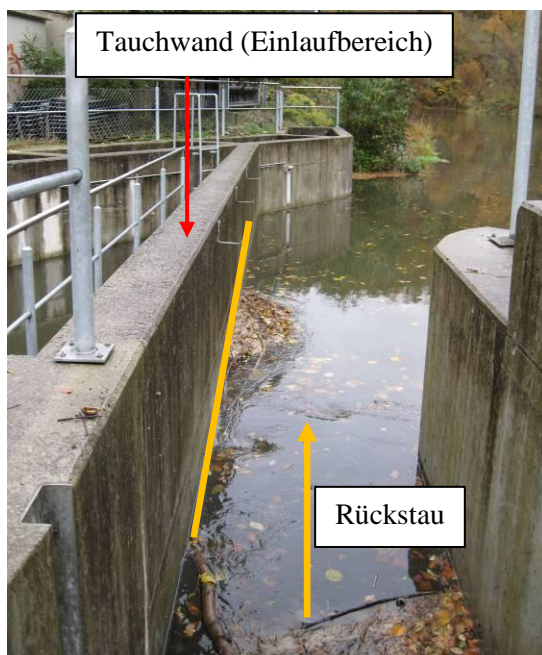


Fig. 5 Tauchwand im KWKW Freienstein



Fig. 4 Spülschütz im KWKW Freienstein

Beim KWKW Freienstein ist kein automatisierter Spülschütz in Betrieb, deshalb hat sich oft oberflächennahes Geschwemmsel, welches von der Tauchwand an den Spülschütz gelenkt wird, am Schütz angesammelt und wurde nicht in das Unterwasser weitergeleitet. Wenn sich das Geschwemmsel bis an die Tauchwand rückstaut, wird es dort wegen der grossen Ansammlung doch in den Turbineneinlauf gezogen (in Fig. 5 mit oranger Linie gekennzeichnet). Die Situation wurde kürzlich entscheidend verbessert, indem der Betriebsverantwortliche eine Überwachungskamera auf den Spülschütz gerichtet hat und von der Einsatzzentrale aus bei objektivem Geschwemmelaufstau am Spülschütz, diesen ferngesteuert betätigen kann.

Um den Verschmutzungseintrag in den Turbineneinlauf weiter zu reduzieren, wird dem Einlauf ein Rechen vorgeschaltet. Dieser hält je nach Stababständen, Stabform, Verlegungsgrad und Anströmgeschwindigkeit sowie Anströmrichtung mehr oder weniger Geschwemmsel oder Geschiebe zurück.

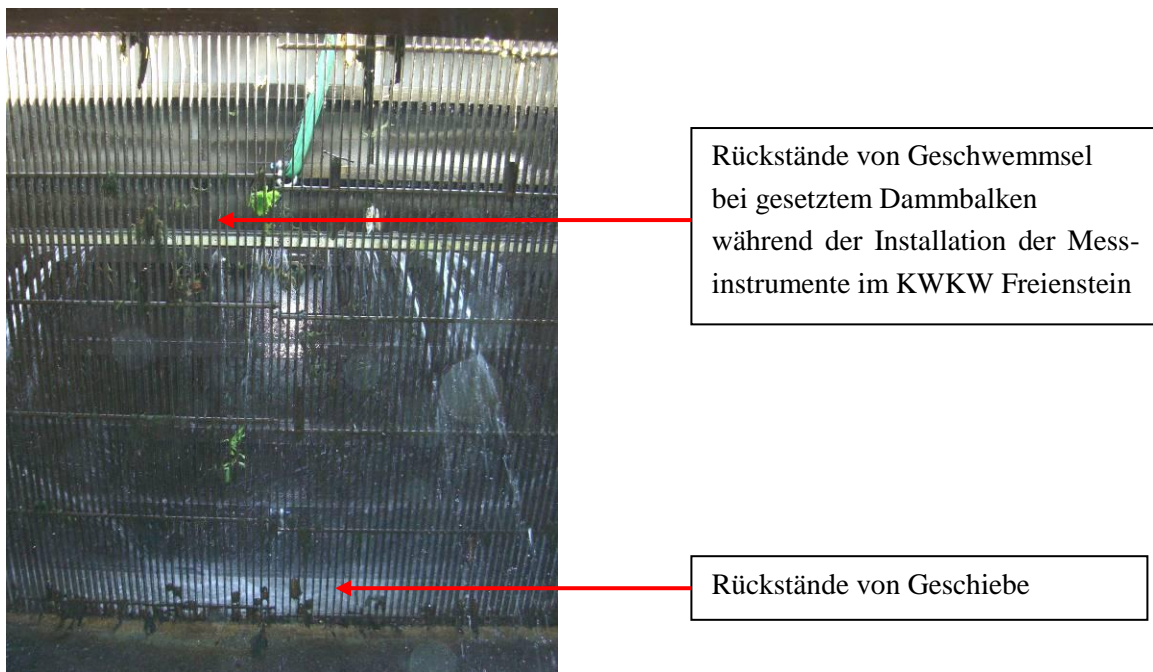


Fig. 6 Geschwemmsel- und Geschieberückstände im Rechen des KWKW Freienstein



Fig. 7 Deformation der Rechenstäbe infolge Feststoffrückhalt im KWKW Freienstein

Feststoffe, welche durch die Tauchwand, die Geschiebeschwelle und den Rechen nicht aufgehalten werden können, fließen zur Turbine. Dort können sich Ablagerungen an den Stütz-, Leit- und Laufradschaufeln bilden. Die erwähnten Ablagerungen bilden sich an Stellen, an denen die Strömungsgeschwindigkeit sehr klein oder beinahe Null ist (vgl. Fig. 8 Staupunkt, rot eingekreist). Dies ist an den Vorderkanten der jeweiligen Schaufeln (Stütz-, Leit- und Laufradschaufeln) der Fall.

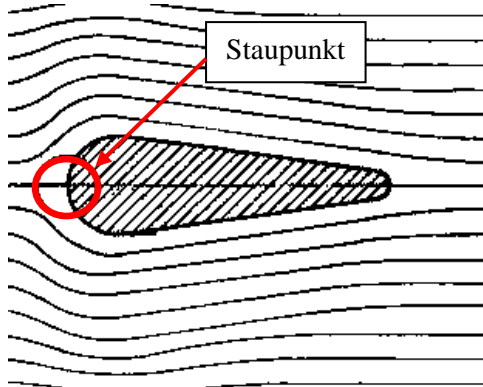


Fig. 8 Stromlinien um ein Schaufelprofil



Fig. 9 Verschmutzung an den Stützschaufeln [9]



Fig. 10 Verschmutzung an den Leitschaufeln



Fig. 11 Verschmutzung an den Laufschaufeln [4]

Erlach [6] hat die Anteile der Verluste infolge Verschmutzung der Einzelkomponenten dargestellt. Durch empirische Ermittlung bei Tests mit verschiedenen Spülmechanismen resultiert ein Zusammenhang zwischen der Höhe des Leistungsabfalls und dem Laufraddurchmesser. Bei Durchmessern um $D_1=1.2\text{m}$ kann der Leistungsabfall bis zu 25% betragen und bei Durchmessern $D_1 > 2\text{m}$ sind die Gesamtverluste $< 4\%$ bei mehrstündigem Betrieb. Schlüsselt man die Verluste nach den Einzelkomponenten auf, so ergeben sich die Einzelverluste nach

Fig. 12. Der grösste Anteil der Verluste ist bei Laufrädern mit $D_1 < 2\text{m}$ dem Laufrad zugeschrieben, der Anteil ist grösser je kleiner das Laufrad. Bei grösseren Laufrädern scheint die Verschmutzung nicht gleich stark an den Schaufelprofilen anzuhaften, womit die grössten Verluste auf den Rechen fallen. Verschmutzungen am Leitrad oder an den Stützschaufeln wirken sich dagegen nicht so gravierend auf die Gesamtverluste aus.

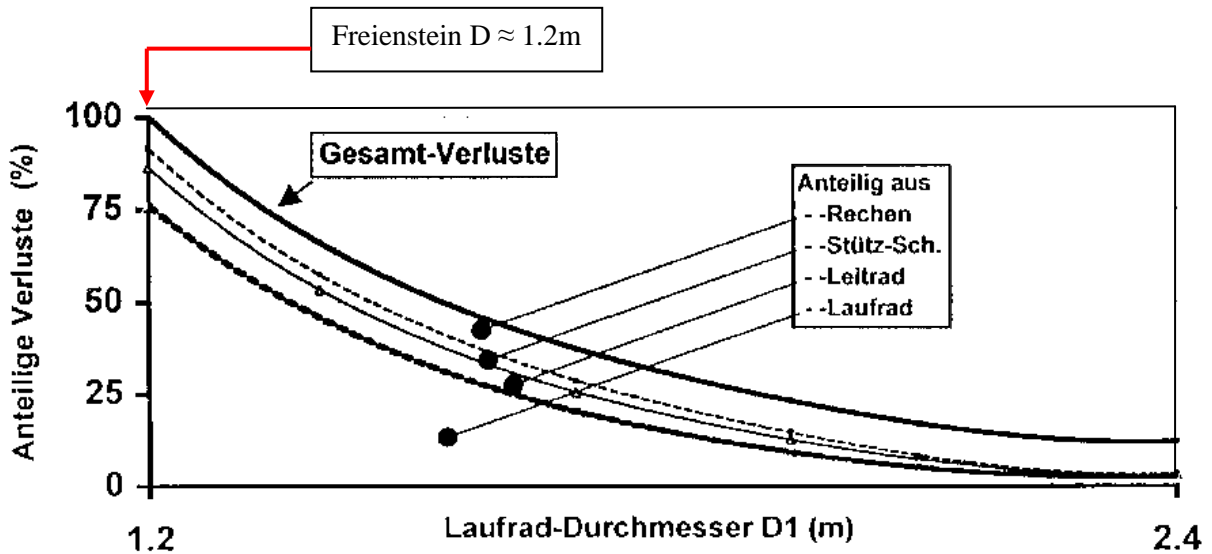


Fig. 12 Verluste der Verschmutzung der Einzelkomponenten als Funktion des Lauftraddurchmessers [6]

2.2.2 Beispiele von Leistungsrückgängen

Zur Dokumentation des derzeitigen Zustandes und zur Untersuchung der Notwendigkeit des häufigen Spülens wurden im KWKW Süssen (DE) der Firma Grau am 09.11.2007 Leistungsmessungen von unserem deutschen Projektpartner IHS (Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen, Universität Stuttgart) durchgeführt, vgl. Ruprecht [10]. Während der Messreihen lief kein Spülprogramm. Das Messintervall betrug 5min. Es wurden 2 Messreihen durchgeführt, eine bei Volllast und eine bei Teillast:

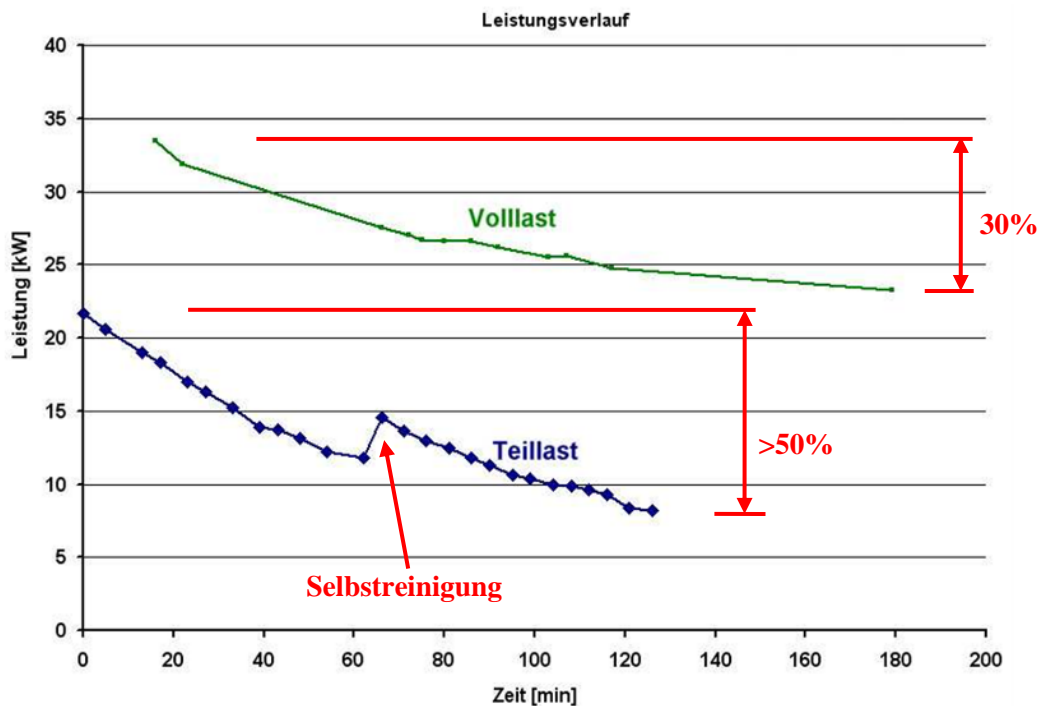


Fig. 13 Leistungsverlauf über die Zeit in der Anlage Süssen (DE) [10]

Besonders im Teillastbereich ist ein starker Leistungsabfall sichtbar. Die Leistung reduziert sich um über 50% in weniger als 2 Stunden und es ist immer noch kein ausgeprägter

Sättigungsbereich zu erkennen. Auch bei Volllast zeigt sich ein deutlicher Leistungsabfall. Der Knick in der unteren Messreihe ist nicht zu erklären, da die restlichen Werte wie Ober- und Unterwasserhöhe sich dadurch nicht deutlich geändert haben. Eventuell hat sich ein Teil der Verschmutzung selbständig gelöst.

Vom Betriebsverantwortlichen des KWKW Freienstein wurden folgende Messdaten der Betriebsinstrumentierung zur Verfügung gestellt, die einen typischen Tagesverlauf im Herbst (30.10.2008) zeigen:

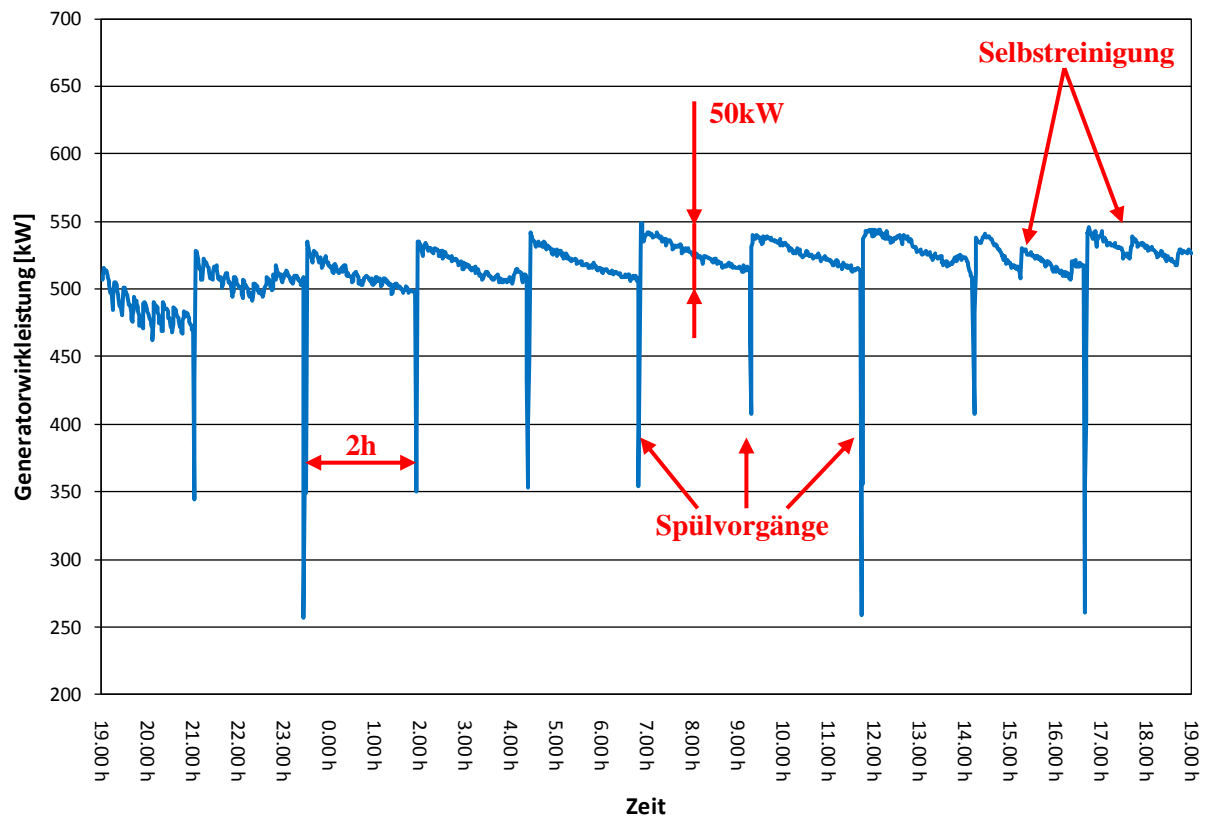


Fig. 14 Leistungsverlauf im KWKW Freienstein an einem typischen Herbsttag

Es wird alle 2 Stunden ein Spülvorgang gestartet. Die Leistungseinbuße vor dem Spülvorgang beträgt 30 – 50kW, was 5 – 9% der Nominalleistung von 570kW entspricht. Bei jedem Spülvorgang ist kurzfristig ein starker Leistungsrückgang feststellbar. Dies kann durch den Spülprozess selbst erklärt werden, wonach während 0.5min der Leitapparat und die Laufschaufeln fast geschlossen werden. Auch hier sind zwischenzeitliche Leistungssprünge erkennbar, die aus den anderen Anlagenparametern nicht rekonstruierbar sind. Es wird auch hier von Selbstreinigungseffekten ausgegangen, wobei sich durch zeitlich veränderliche Strömungsbedingungen die Verschmutzung lokal ablöst.

Im KWKW Windisch, einer der befragten Anlagen, ist ebenfalls ein markanter Leistungsabfall feststellbar:

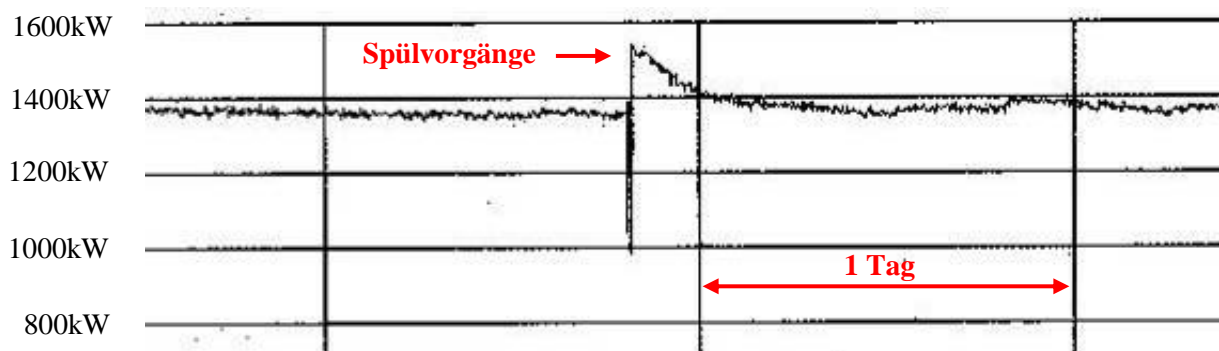


Fig. 15 Generatorleistung aller 3 Maschinengruppen im KWKW Windisch

In Fig. 15 ist die Generatorleistung aller 3 Maschinengruppen gezeigt (totale Leistung im KWKW Windisch). Der Leistungsverlauf ist während rund 3 Tagen abgebildet. Durch den Spülvorgang bei allen Maschinengruppen resultiert eine Leistungssteigerung von etwa 180kW, was einer Leistungssteigerung von 13% entspricht gegenüber der totalen abgegebenen Leistung vor dem Spülvorgang. Nach der Spülung sinkt die Leistung wiederum kontinuierlich ab. Nach ca. 8h pendelt sich die Leistung auf einem konstanten Niveau ein und verharrt in diesem Zustand. Erst nach etwa 3 Tagen erfolgt der nächste Spülvorgang. Anhand des Leistungsverlaufs ist klar, dass in dieser Anlage häufiger gespült werden sollte. Dies wird jedoch erschwert durch den Umstand, dass das KWKW nicht dauernd mit Personal besetzt ist. Das asymptotische Erreichen einer unteren Leistung ist ein Indikator dafür, dass die Verschmutzung (der Verschmutzungsgrad) nicht noch mehr anwächst.

Im KWKW Neuhausen, eine weitere befragte Anlage, sind vom 21. – 30. September 2009 Wirkungsgradmessungen von der Firma etaeval [11] durchgeführt worden, vgl.

Fig. 16. Am Tag der Kennlinienmessungen war die Turbine vor dem Start der Messungen nicht abgeschaltet worden. Ein Spülvorgang vor den Wirkungsgradmessungen sollte mögliche Verschmutzungen an der Turbine lösen. Das aufgenommene Wirkungsgradniveau (roter Verlauf) entsprach jedoch nicht den erwarteten Werten. Eine anschliessend durchgeführte Abschaltung der Turbine brachte den gewünschten Effekt der Verschmutzungslösung, so dass das Wirkungsgradniveau um 0.25% angehoben wurde (grüner Verlauf). Damit ist erwiesen, dass im KWKW Neuhausen der Abschaltvorgang der effektivere Spülvorgang ist, als derjenige der üblich eingesetzt wird (Verstellung des Leitapparates von der Normalstellung 100% auf ca. 30% für etwa 12s). Andererseits muss beim üblichen Spülvorgang der Generator nicht vom Netz genommen werden.

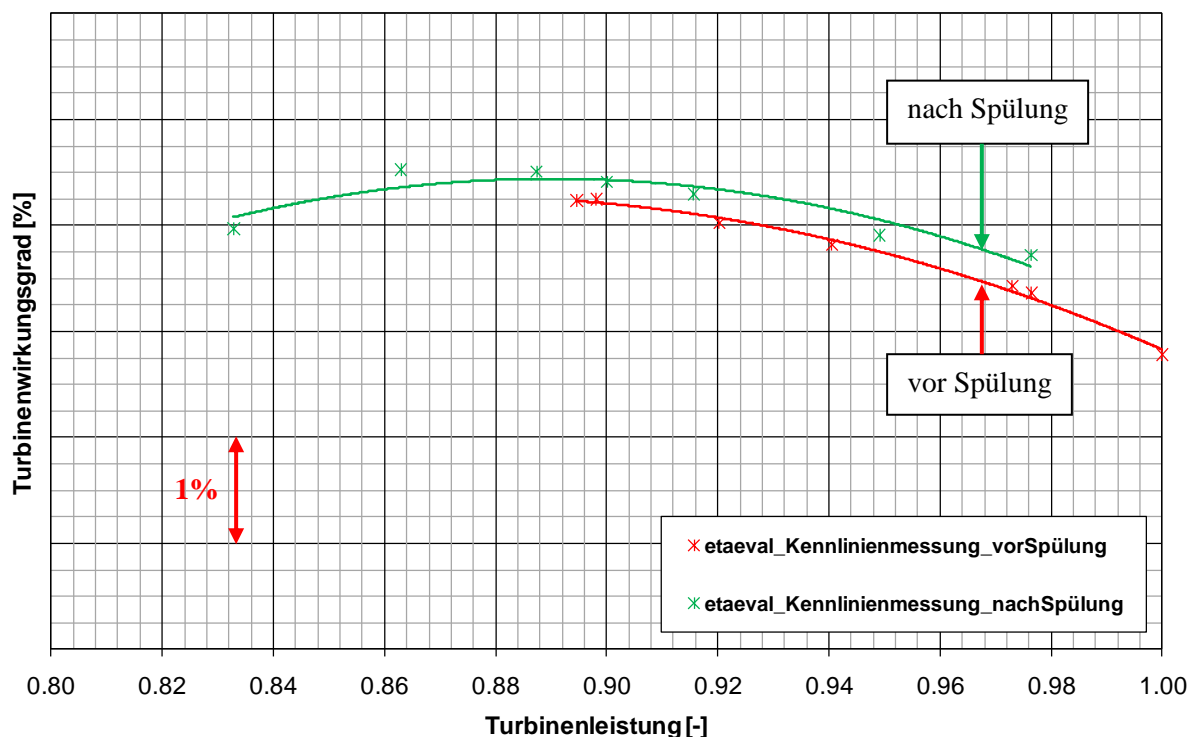


Fig. 16 Turbinenwirkungsgrad in Funktion der Turbinenleistung im KWKW Neuhausen [11]

Beim Interview im KWKW Neuhausen wurde zudem der nachfolgend aufgeführte Leistungsverlauf analysiert:

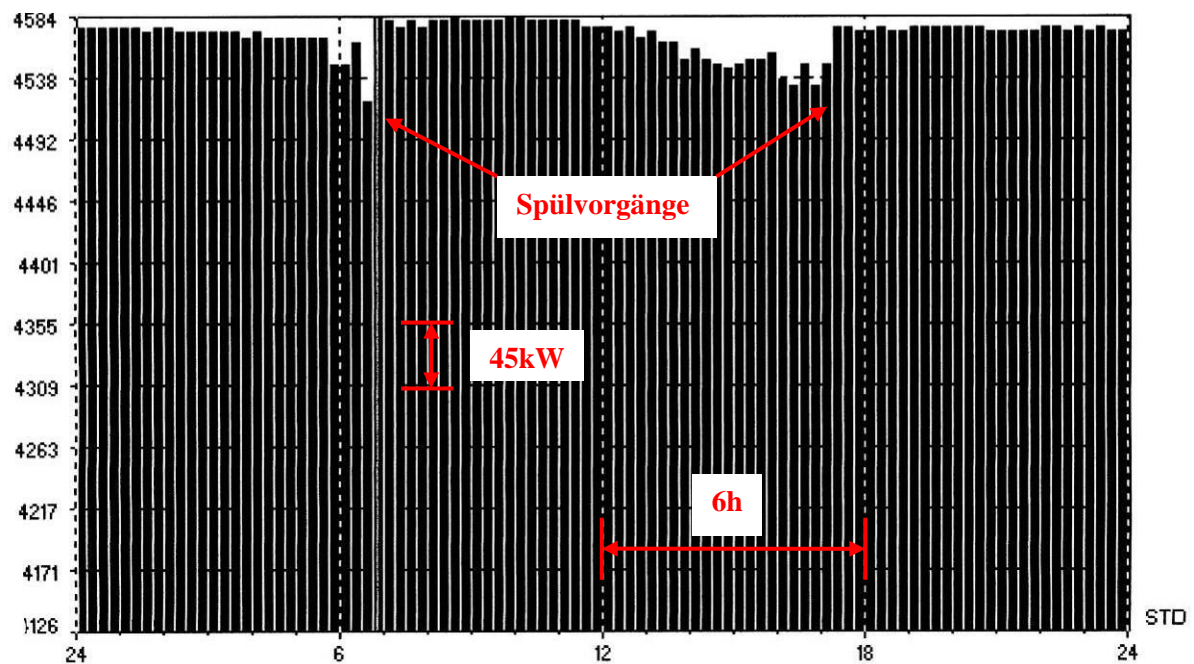


Fig. 17 Generatorleistung der Francisturbine im KWKW Neuhausen

Im KWKW Neuhausen wird alle 12h das übliche Spülprogramm durchgeführt. Zwischen zwei Spülungen sind Leistungseinbussen von 50 – 60kW keine Seltenheit. Dies entspricht einem Leistungsabfall von „nur“ 1.3% der Nominalleistung. Betrachtet man jedoch den Leistungsverlauf ist erkennbar, dass eine Spülung nach 6 anstatt 12 Stunden die Leistungseinbussen / Energieverluste minimieren würde.

2.2.3 Begründung des Leistungsabfalls und der Wirkungsgradreduktion

Der Indexwirkungsgrad einer Turbine berechnet sich wie folgt:

$$\eta_i = \frac{P_m}{P_{hyd}} = \frac{P_{Gen}}{\eta_{Gen} \cdot P_{hyd}} \quad \rightarrow \quad P_{Gen} = P_{hyd} \cdot \eta_i \cdot \eta_{Gen}$$

Dabei ist P_{Gen} die gemessene Leistung des Generators, η_{Gen} der Generatorwirkungsgrad und P_{hyd} die hydraulische Leistung die der Turbine zugeführt wird. Diese hydraulische Leistung berechnet sich aus:

$$P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot Q_i \cdot H$$

Bei der Messkampagne im KWKW Freienstein wurde der Volumenstrom nicht absolut gemessen, sondern nur seine relative Änderung analysiert (Indexvolumenstrom). Deshalb wurde auch nicht ein absolutes Turbinenwirkungsgradniveau ausgewiesen, sondern ein Indexwirkungsgrad.

Die gemessene Generatorleistung hängt von der hydraulischen Leistung und vom Turbinenwirkungsgrad (Indexwirkungsgrad) ab. Dieser wiederum ist abhängig vom hydraulischen und mechanischen Wirkungsgrad der Turbine:

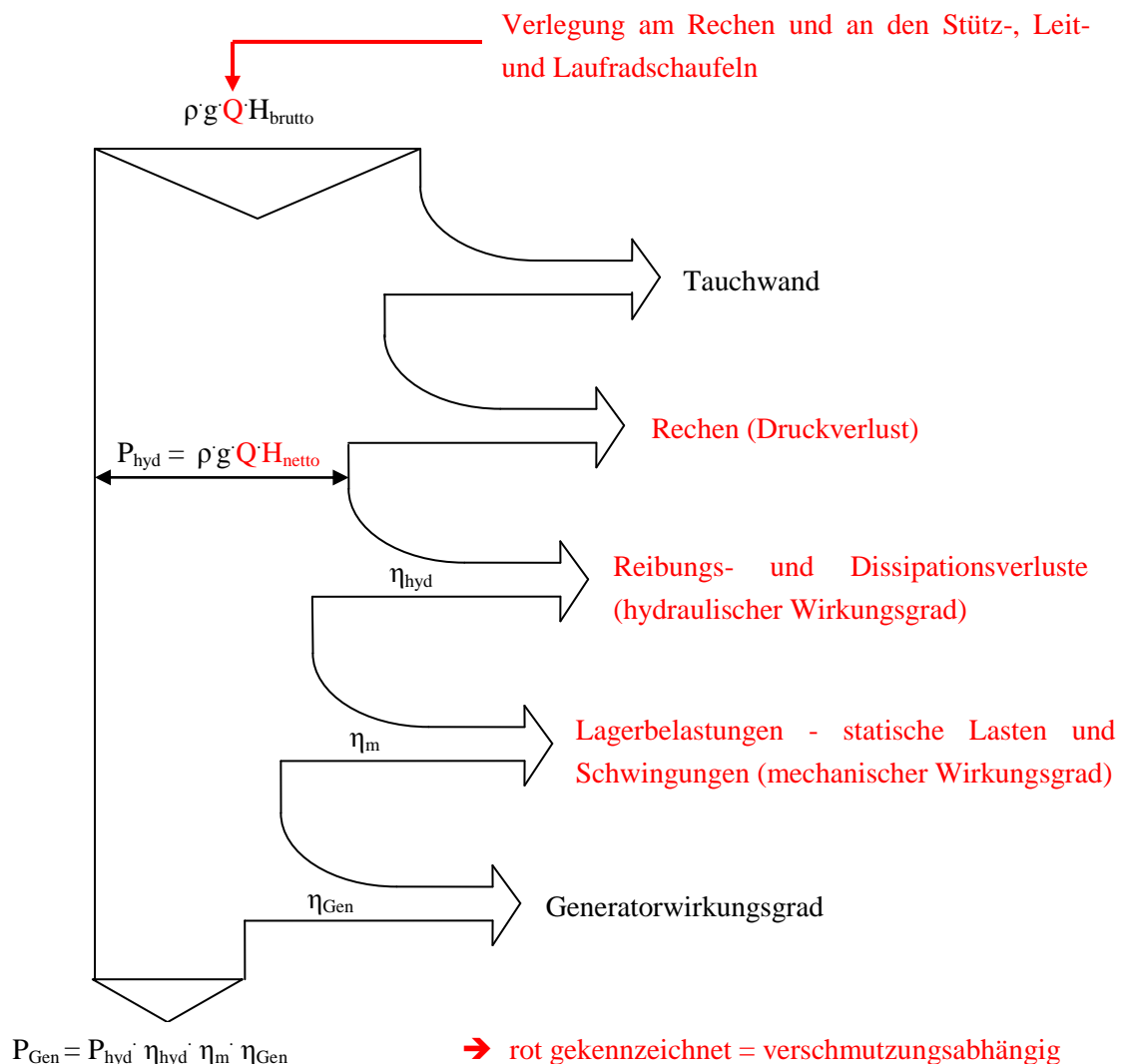
$$\eta_{Tu} = \eta_{hyd} \cdot \eta_m$$

Der mechanische Wirkungsgrad berücksichtigt die Verluste auf der Welle (Lagerverluste). Der hydraulische Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis von inneren Verlusten einer hydraulischen Maschine (Reibungs- und Dissipationsverluste) zur zugeführten hydraulischen Leistung.

Es werden 4 Ursachen für die Begründung der Leistungsabfälle unterschieden:

- Durch die Verschmutzung am Rechen, an den Stütz-, Leit- und Laufradschaufeln wird die Strömung durch die Turbine durch zusätzliche Ablösungen und zeitlich veränderliche Störungen beeinflusst. Diese zusätzlichen Störungen verursachen erhöhte Reibungs- und Dissipationsverluste, wonach der hydraulische Wirkungsgrad sinkt. Dies hat zur Folge, dass bei konstanter hydraulischer Leistung (Volumenstrom und Fallhöhe) die Generatorleistung abfällt.
- Kommt durch die Verschmutzung ein zusätzlicher Verlegungseffekt dazu (Verkleinerung der durchströmten Fläche), sinkt der Volumenstrom durch die Turbine. Die hydraulische Leistung nimmt ab, wenn die Fallhöhe durch Regelung der Oberwasserkote konstant gehalten wird. Wird angenommen, dass der hydraulische Wirkungsgrad konstant bleibt, fällt auch hier die Generatorleistung ab.
- Andererseits folgt aus einer grösser werdenden Verlegung am Rechen ein erhöhter Druckverlust, wobei die vor der Turbine zur Verfügung stehende hydraulische Leistung ebenfalls sinkt. Auch dies führt zu einer Reduktion der Generatorleistung.
- Liegt an den Stütz-, Leit- und Laufradschaufeln Verschmutzung an, so resultiert eine mechanische Belastungszunahme infolge erhöhten strömungsinduzierten Schwingungen. Demnach sinkt der mechanische Wirkungsgrad, was bei einer angenommenen konstanten hydraulischen Leistung und hydraulischen Wirkungsgrad einen Abfall der Generatorleistung mit sich bringt.

In der Praxis wird angenommen, dass die Leistungsabfälle eine Kombination aus den vier beschriebenen Ursachen ist.

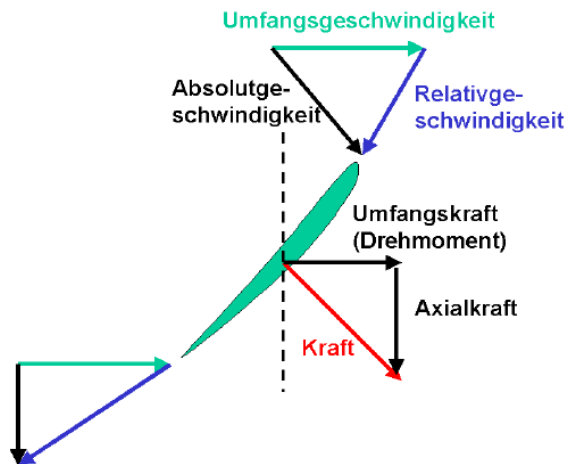


2.2.4 Umströmung Laufradvorderkante mit CFD

Wie im Abschnitt 2.2.1 erwähnt, legt sich die Verschmutzung an der Profilvorderkante der Schaufeln ab. Die Verschmutzung am Laufrad hat die grössten Auswirkungen auf die Verluste.

Deshalb wurden am IHS numerische Strömungssimulationen (CFD) einer Kaplanmaschine durchgeführt, deren Fokus auf die Vorderkantenumströmung des Laufradprofils lag. Die Zwischenresultate sind in einem Statusbericht zusammengefasst, vgl. Ruprecht [12].

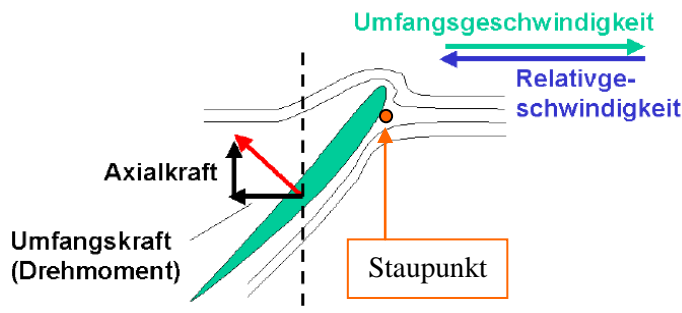
Übersicht der Geschwindigkeitsdreiecke und Kräfte im Optimum und bei den simulierten Spülvorgängen 1 und 2:



Im **Normalbetrieb (Optimum)** wird das Laufrad schaufelkongruent angeströmt.

Fig. 18 Geschwindigkeiten und Kräfte am Laufrad einer Kaplanmaschine im Optimum [12]

Die Strömung kommt drallbehaftet an die Schaufel und wird von ihr derart abgelenkt, dass die Strömung am Laufradaustritt drallfrei abströmt. Dieser Drallabbau führt zu einer Umfangskraft, welche das Drehmoment der Turbine bestimmt. Zudem stellt sich eine in Strömungsrichtung wirkende Axialkraft ein.



Spülvorgang 1:

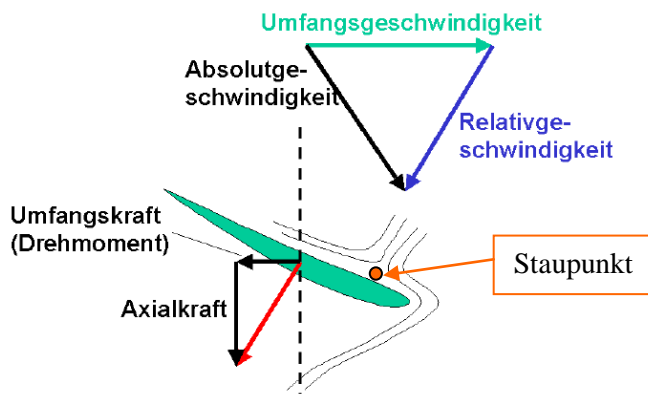
Schliessen des Leitapparats bei geöffnetem Laufrad.

-> Anwendung bei Francis-, Kaplan- und Propellerturbine

Fig. 19 Geschwindigkeiten und Kräfte am Laufrad einer Kaplanmaschine während des Spülvorganges 1 [12]

Beim Spülvorgang 1 wird der Leitapparat bei konstanter Laufradstellung geschlossen. Damit wird der Durchfluss durch die Turbine verringert. Im Extremfall wird der Leitapparat ganz geschlossen und der Durchfluss geht gegen Null (vgl. Fig. 19). Durch fehlende drallbehaftete Anströmung der Laufradschaufeln fällt die Absolutgeschwindigkeit weg und das Schaufelprofil wird entgegen der Umfangsgeschwindigkeit angeströmt. Die Strömung erfolgt auf der Saugseite des Profils und es entsteht ein Staupunkt an dieser Profilseite. Dies hat zur Folge, dass die Profilvorderkante von der Saug- zur Druckseite hin umströmt wird. Die Strömung auf die Saugseite des Profils bewirkt eine Umkehrung der Umfangskraft, d.h. der Generator läuft als Motor und treibt die Turbine an. Zudem wechselt auch die Axialkraft ihre

Richtung. Dies kann bei Turbinen mit vertikaler Achse zu einem Anheben der Maschine führen.



Spülvorgang 2:

Durchschwenken des Laufrades bei geöffnetem Leitapparat.

-> Anwendung nur bei Kaplanmaschine ohne Schaufelüberdeckung

Fig. 20 Geschwindigkeiten und Kräfte am Laufrad einer Kaplanmaschine während des Spülvorganges 2 [12]

Beim Spülvorgang 2 werden die Laufradschaufeln durchgeschwenkt, d.h. sie werden über die Schliessposition hinaus gedreht. Dieser Vorgang kann nur angewendet werden, wenn es keine Überdeckung bei den Laufradschaufeln gibt. Das Durchschwenken des Laufrades erfolgt bei geöffnetem Leitapparat. Während dieses Spülvorgangs trifft die Strömung auf die Druckseite der Schaufel, wo sich der Staupunkt einstellt (vgl. Fig. 20). Dies hat zur Folge, dass eine Umströmung der Vorderkante resultiert, diesmal von der Druck- zur Saugseite. Diese Umströmung löst wiederum vorhandene Verschmutzungen an der Schaufelvorderkante ab. Auch hier wechselt die Richtung der Umfangskraft. Das bedeutet, dass der Generator als Motor läuft und Leistung aus dem Netz bezieht. Die Richtung der Axialkraft bleibt bestehen, sie wirkt weiterhin in Strömungsrichtung.

Beurteilung der simulierten Spülvorgänge 1 und 2 anhand numerischer Strömungsbilder:

• Spülvorgang 1

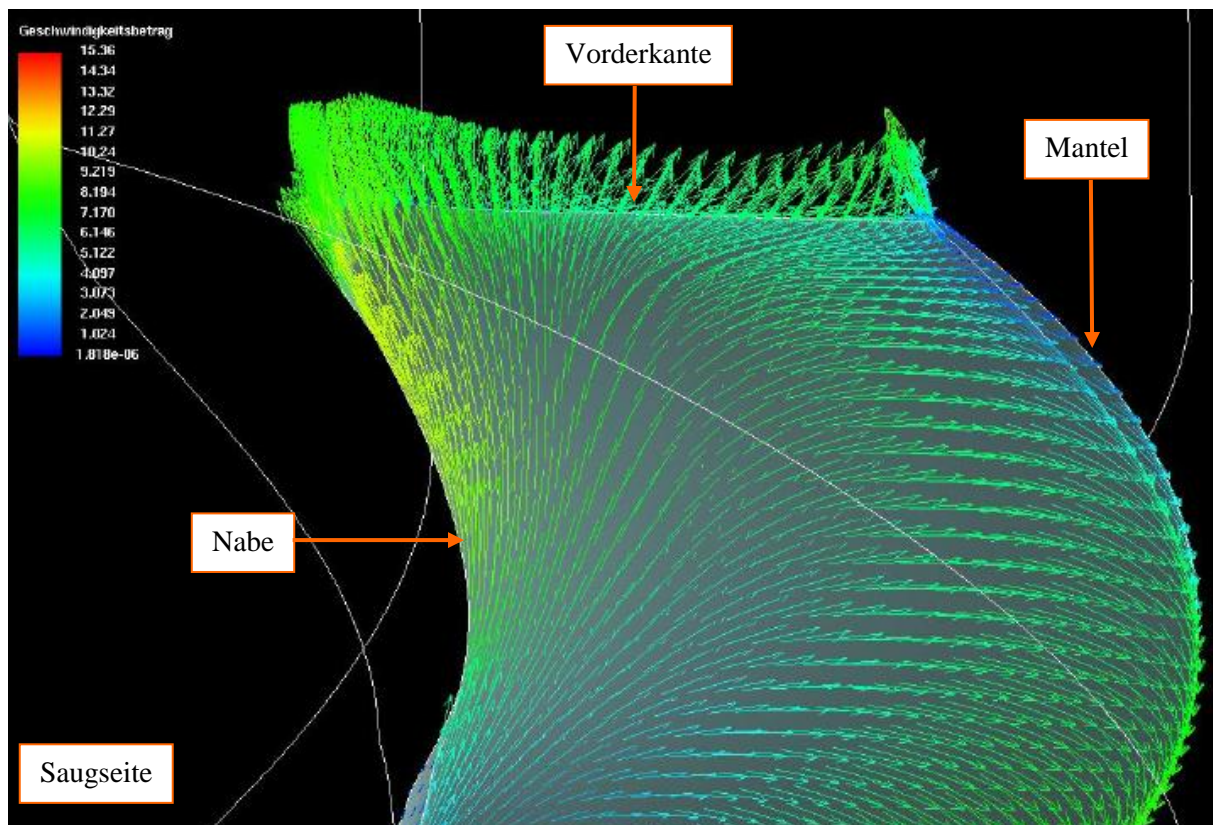


Fig. 21 Geschwindigkeitsvektoren auf der Saugseite beim Spülvorgang 1.1 [12]

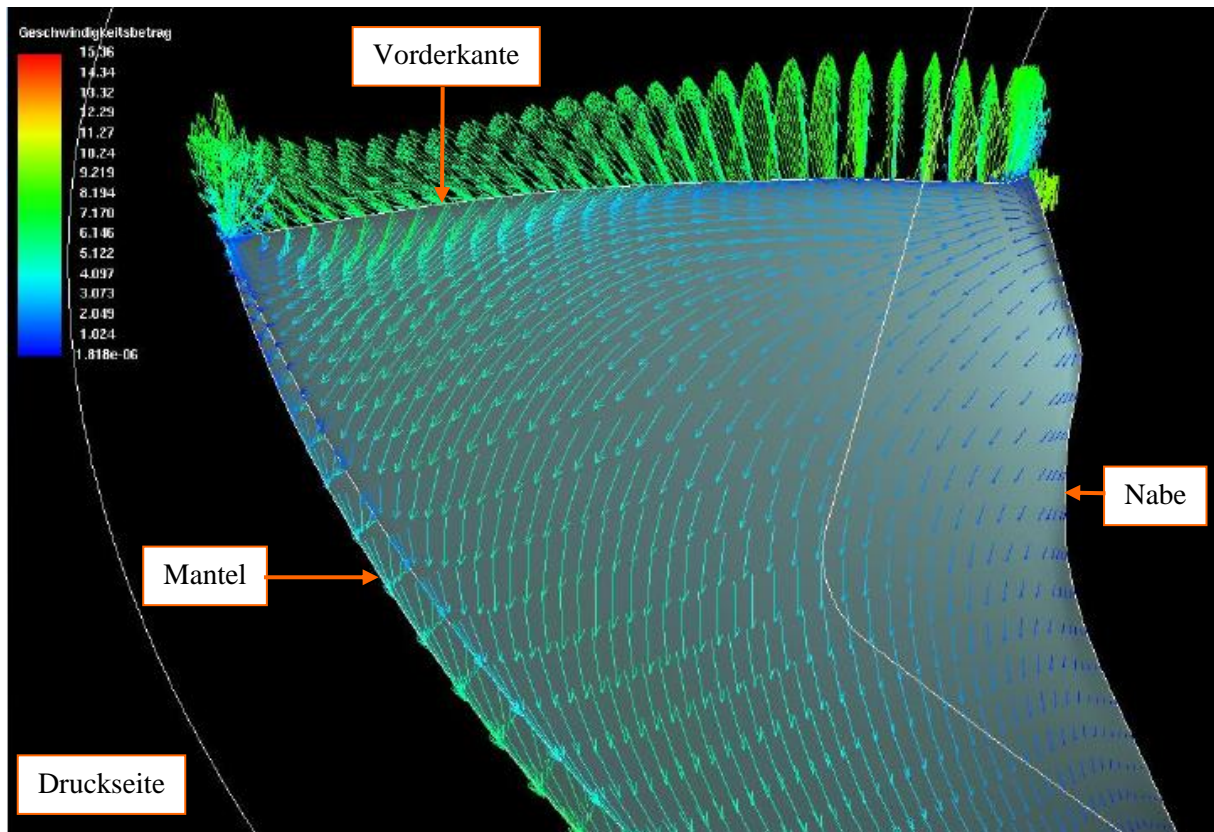


Fig. 22 Geschwindigkeitsvektoren auf der Druckseite beim Spülvorgang 1.1 [12]

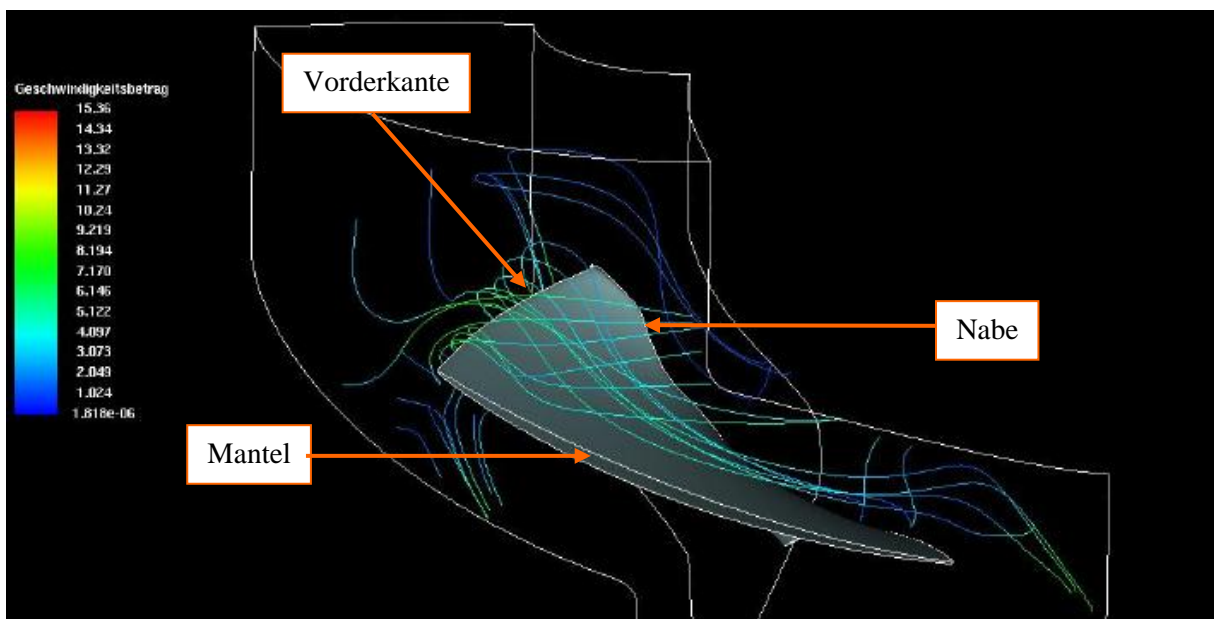


Fig. 23 Stromlinien beim Spülvorgang 1.1 [12]

Die oben gezeigten Strömungsbilder ergeben sich für den Fall, dass der Leitapparat vollständig geschlossen ist und das Laufrad in Normalstellung (optimal) bleibt (vgl. Tab. 1 -> Variante 1.1).

Anhand der Geschwindigkeitsvektoren in Fig. 21 und Fig. 22 ist ersichtlich, dass um die Vorderkante hohe Geschwindigkeiten resultieren. Die Stromlinien in Fig. 23 verdeutlichen die Umströmung der Vorderkante. Weil an der Laufradvorderkante die grösste Ablagerung der Verschmutzung zu erwarten ist, kann von einer guten Säuberung (von einem guten

Spüleffekt) ausgegangen werden. Die Richtungen der Axial- und Umfangskraft kehren sich um und sie haben fast den gleichen Betrag wie im Optimum.

Bei Kraftwerken, die eine Turbinenachse oberhalb des Unterwasserniveaus besitzen, bedeutet eine komplette Schliessung des Leitapparates, dass wegen Verdampfung oder Luft kein Wasser zur Spülung der Turbine mehr vorhanden ist. Daher wurden für verschiedene Leitradstellungen weitere Simulationen durchgeführt.

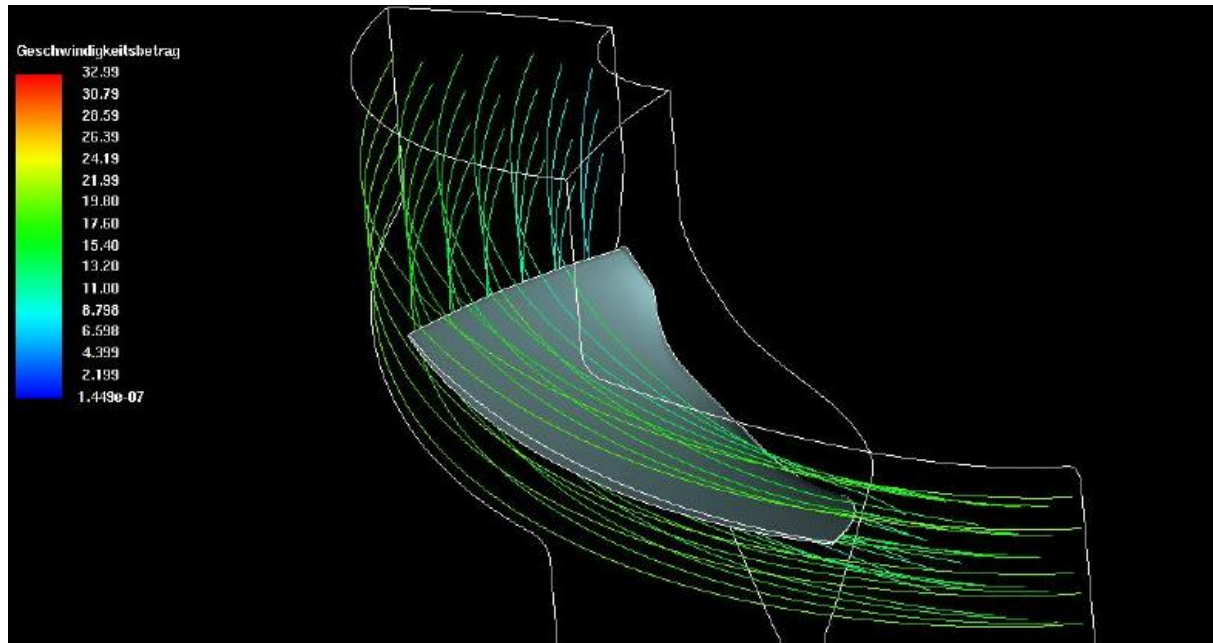


Fig. 24 Stromlinien beim Spülvorgang 1.4 [12]

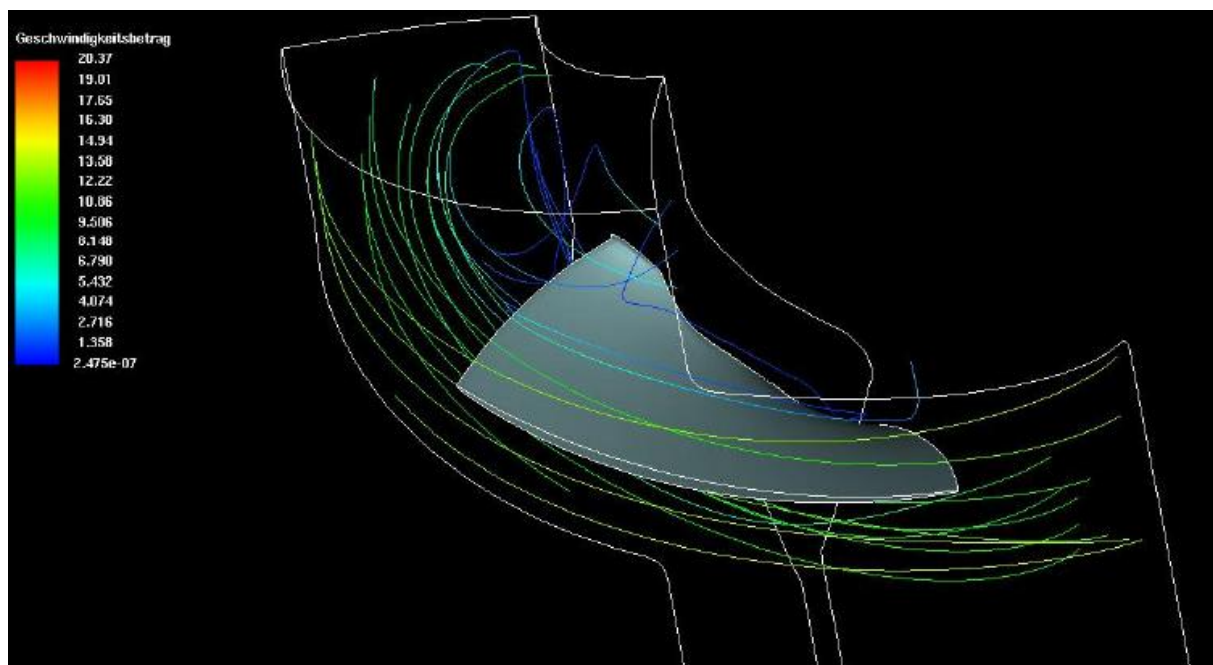


Fig. 25 Stromlinien beim Spülvorgang 1.5 [12]

Aus dem Stromlinienverlauf der Fig. 24 ist zu sehen, dass bei einer offenen Leitradstellung bei gleichzeitiger optimaler Laufradstellung kein Spüleffekt resultiert (keine Umströmung der Vorderkante). Die Stromlinien folgen der Schaufelkontur. Bei einer fast geschlossenen Leitradstellung (vgl. Fig. 25) und wiederum optimaler Laufradstellung ist nur an der Laufradnabe ein kleiner Spüleffekt erkennbar.

Aus den obigen Abbildungen resultiert, dass die Wahl der Kombination von Leit- und Laufradstellung entscheidend ist, ob überhaupt ein Reinigungseffekt herbei geführt werden kann. Deshalb wurden weitere Kombinationen simuliert, welche in der Tabelle 1 bewertet werden.

- **Spülvorgang 2**

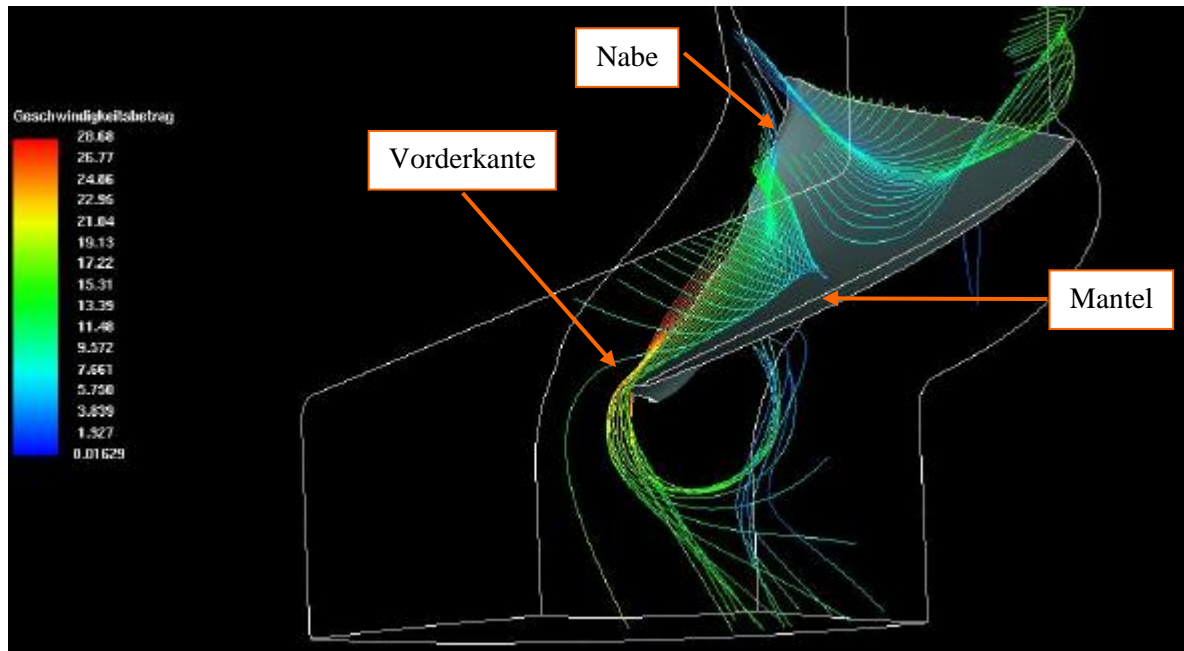


Fig. 26 Stromlinien beim Spülvorgang 2.1 [12]

Das in Fig. 26 gezeigte Strömungsbild ergibt sich für den Fall, dass der Leitapparat offen ist und das Laufrad durchgeschwenkt ist. Anhand des Stromlinienverlaufs ist ersichtlich, dass eine sehr gute Umströmung der Vorderkante resultiert. Je nach Winkelstellung der Schaufeln kann die Umströmung weit hinter der Vorderkante beginnen (auf der Saugseite). Dies könnte helfen, insbesondere langfasrige Verschmutzungsarten zu entfernen. Es wirken bei diesem Spülvorgang jedoch starke axiale Kräfte auf die Schaufeln.

- **Vergleich**

Am 7. Seminar Kleinwasserkraft wurden von Jurić [9] weitere Simulationen gezeigt, wo vor allem beim Spülvorgang 1 verschiedene Leit- und Laufradkombinationen untersucht wurden. Anhand der Tabelle 1 werden die simulierten Varianten beurteilt (Laufradstellung "geschlossen" heisst nicht, dass das Laufrad ganz geschlossen ist, es ist nur weiter geschlossen als im optimalen Betriebspunkt).

Der Bewertungsschlüssel gibt Antwort auf die Frage: Wie ist der Spüleffekt bei der Schaufelvorderkante des simulierten Spülvorganges zu bewerten, welcher aus den visualisierten Strömungsbildern analysiert wurde?

1: sehr gut 2: gut 3: gering 4: sehr schwach

Spülprogramm	Variante	Leitradstellung			Laufradstellung			Bewertung
		optimal	offen	geschlossen	optimal	offen	geschlossen	
1	1			0°	x			2
	2			0°		x		2
	3			0°			x	2
	4		61°		x			4
	5			10°	x			3
	6			5°	x			3
	7			10°		x		2
	8			5°		x		2
	9		53°				x	3
	10			10°			x	3
2	1		x		—	→		1

Tab. 1 Bewertung der simulierten Spülvarianten aus den CFD-Simulationen mit der Geometrie des KWKW Freienstein

Aus der Beurteilungsmatrix sowie den gesamten numerischen Untersuchungen der erwähnten Spülprogramme lässt sich zusammenfassen:

- Der Spülvorgang 1 kann effektiv sein, wenn entweder der Leitapparat ganz geschlossen werden kann oder bei einem fast geschlossenen Leitapparat die Schaufelstellung möglichst offen ist.
- Ein fast geschlossener Leitapparat in Kombination mit einer normalen Schaufelstellung bringt einen geringen Spüleffekt.
- Das Öffnen des Leitapparates bewirkt einen sehr schwachen Spüleffekt.
- Beim Spülvorgang 1 und geschlossenem Leitapparat (aber auch bei fast geschlossenem) muss auf die Richtungsänderung der Kräfte geachtet werden, was zu einem eventuellen Anheben der Turbine führen kann.
- Der Spülvorgang 2 ist sehr effektiv.
- Der Spülvorgang 2 kann nur durch Durchschwenken der Laufräder erzielt werden.
- Beim Spülvorgang 2 ändert ebenfalls die Umfangskraft die Richtung und der Generator läuft motorisch, die Axialkraft bleibt dieselbe wie in der Normalstellung.

2.3 Wasserbauliche Massnahmen

Im Folgenden soll auf die wichtigsten wasserbaulichen Anlagenelemente in Bezug auf die Verschmutzungsproblematik eingegangen werden. Bei der Geschiebeabweisung ist vor allem auf die Anordnung des Fassungsbauwerks wert zu legen. Die Geschiebeschwelle ist eine weitere lokale Möglichkeit, den Geschiebeeintrag in den Einlaufbereich der Turbine zu minimieren. Zur Geschwemmselabweisung kommen weitere lokale Möglichkeiten wie eine Tauchwand oder ein Schwimmbalken zum Einsatz. Der Rechen hält als letztes Anlagenelement einen weiteren Anteil an Geschwemmsel und Geschiebe zurück.

Es wird im Folgenden nur so vertieft in die einzelnen Anlagenelemente eingegangen, wie dies für eine erste einfache Beurteilung nötig ist, ansonsten sei auf die aufgeführte Literatur verwiesen. Zudem werden vor allem anhand des KWKW Freienstein die Auswirkungen aufgezeigt.

2.3.1 Anordnung Fassungsbauwerk

Natürliche Flüsse, wie der Oberwasserverlauf der Töss beim KWKW Freienstein, weisen variable Querschnitte und damit sich ändernde Wasserspiegellagen und Strömungsgeschwindigkeiten auf. Demnach ist die Geschwindigkeitsverteilung in einem natürlichen Gerinne sehr ungleichförmig (vgl. Fig. 27).

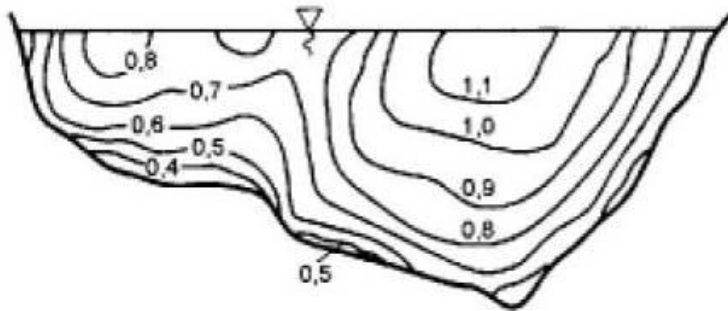


Fig. 27 Geschwindigkeitsverteilung anhand der Isotachen in einem natürlichen Fließgewässer [13]

Anhand der Isotachen, Linien gleicher Geschwindigkeit, ist ersichtlich, dass die maximalen Geschwindigkeiten im Bereich der grössten Abflusstiefe, nahe der Wasseroberfläche auftreten. In den Berandungen nehmen die Geschwindigkeiten ab. Diese Tatsache konnte im Oberwasser des KWKW Freienstein visuell anhand der Laubfortbewegungsgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche bestätigt werden. Demnach müssen im Oberwasserverlauf des KWKW Freienstein unterschiedliche Querschnittsformen des Gerinnes auftreten (vgl. Fig. 29).

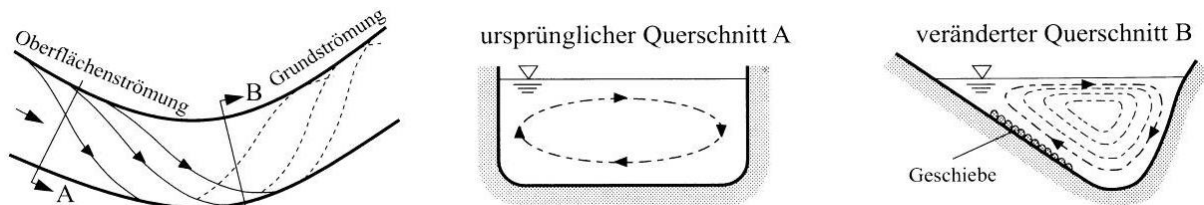


Fig. 28 Flechtströmung in Flusskrümmungen [14]

Beim KWKW Freienstein ist die Wasserrfassung als Seitenentnahme konzipiert (verbreitetster Fassungstyp). Von besonderer Bedeutung für die Geschiebeabweisung sind bei diesem Fassungstyp die Sekundärströmungen. Diese treten in jedem natürlichen Gewässer orthogonal zur Hauptströmung auf und werden auch Flecht- oder Spiralströmungen genannt. Sie werden vor allem durch Flusskrümmungen oder durch Verengungen und Einbauten verursacht. Die Flechtströmung führt an den Aussenufern der Krümmungen zu Kolkerscheinungen (Kurvenkolk) und das erodierte Material wird an das Innenufer transportiert (vgl. Fig. 28).

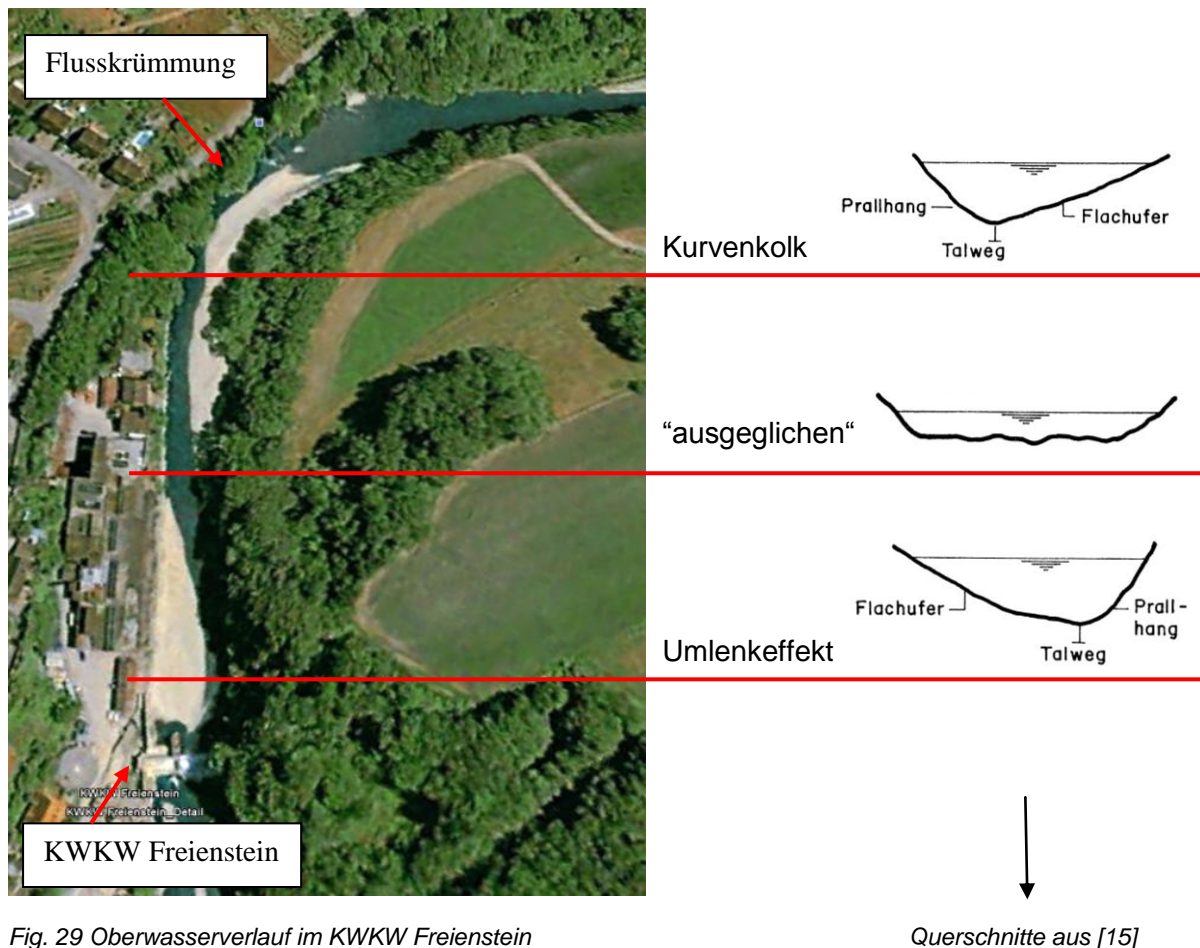


Fig. 29 Oberwasserverlauf im KWKW Freienstein

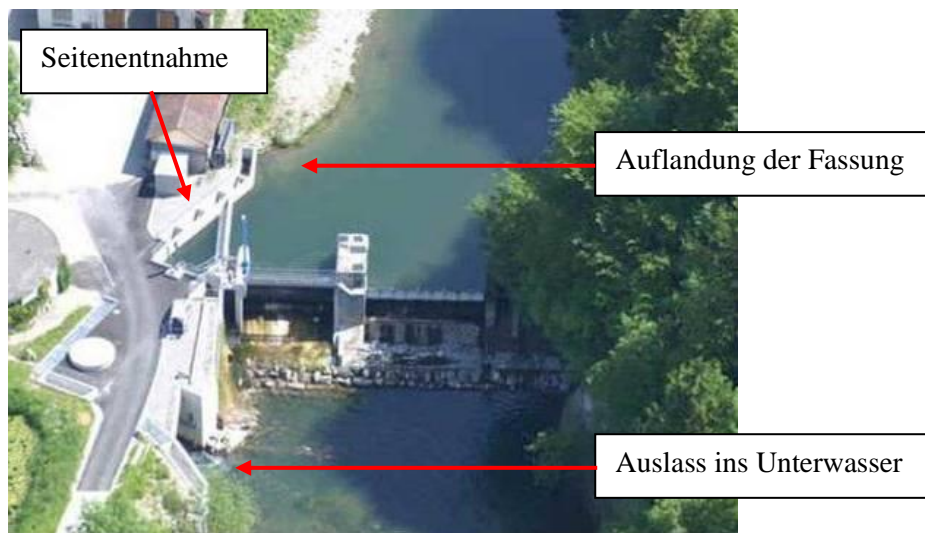


Fig. 30 Luftaufnahme des KWKW Freienstein

Der Kurvenkolk sollte bei Seitenentnahmen genutzt werden, indem die Fassung an der Aussenseite einer Flusskrümmung angeordnet wird (vgl. Fig. 31b). Eine solche Umlenkfassung sollte stromabwärts des Krümmungsscheitels zu liegen kommen, weil dort der Umlenkeffekt am stärksten ist. Beim KWKW Freienstein ist dies nicht der Fall (vgl. Fig. 29 und Fig. 30). Die Fassung des KWKW Freienstein ist an einem “geraden” Flussabschnitt angeordnet (vgl. Fig. 31a), wo der Umlenkeffekt dazu führt, dass das Geschiebe vor der Fassung auflandet und Anteile davon in diese hineingezogen werden (vgl. Fig. 30).

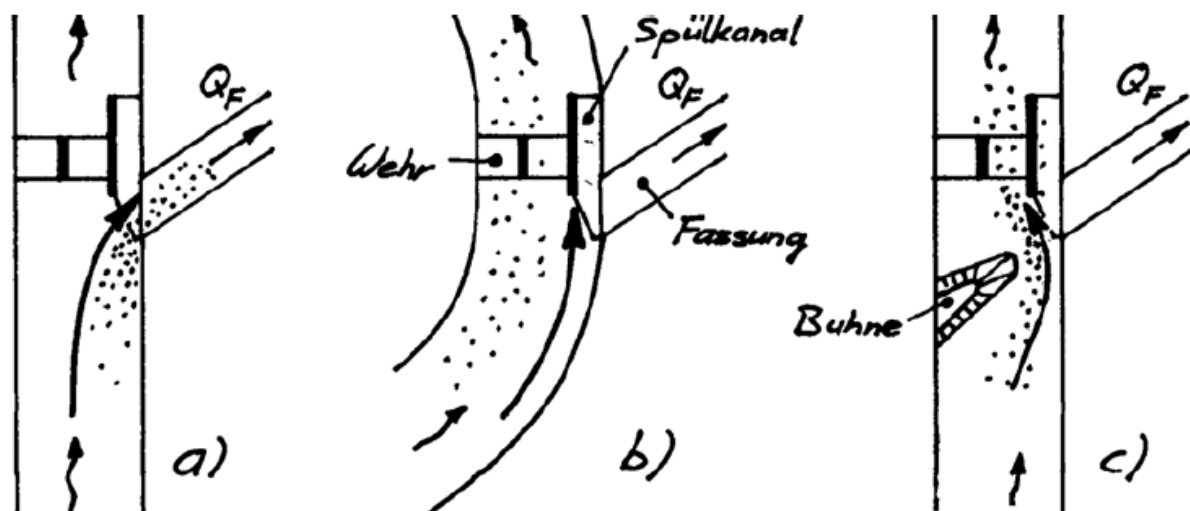


Fig. 31 Umlenkströmung und Auflandungszonen des Geschiebes [8]

Als meist genannte flussbauliche Massnahme, um an geraden Flussabschnitten einen künstlichen Umlenkeffekt zu bewirken, wird das Errichten von Bühnen am Gegenufer der Entnahmestelle bezeichnet (vgl. Fig. 31c). Dies ist am Gegenufer des KWKW Freienstein praktisch nicht realisierbar. Vor allem sollte das Geschiebe vor der Fassung entfernt werden, um die Auflandung der Fassung zu vermeiden. Aber auch bei einem Abtragen der Auflandung wird diese wegen der Anordnung der Fassung und dem oberwasserseitigen Flussverlauf voraussichtlich wieder selbst entstehen.

Demnach kommt der Spülung im KWKW Freienstein eine besondere Bedeutung zu, um die Auflandung zu kontrollieren. Eine automatische Geschiebespülung (Schützensteuerung) mit Sohlmembranen wäre eine Abhilfe. Diese Membranen messen die Höhe der Sedimentablagerung. Wird eine kritische Überdeckungshöhe erreicht, spricht die Schützensteuerung an. Die Auflandung könnte auch manuell mit einem Massstab von der Tauchwand aus kontrolliert werden.

Um möglichst wenig Geschwemmsel in die Fassung zu ziehen, ist entscheidend, welcher Abflussanteil gefasst wird, vgl. DIANE 10 [7]. In Fig. 32 sind die über die Monate Oktober 1993 bis Januar 1994 gemittelten Geschwemmselkonzentrationen des oberflächennahen, des mittleren und des sohlennahen Abflussanteils, im Verhältnis zur durchschnittlichen Geschwemmselkonzentration des gefassten Wassers dargestellt (relative Konzentration). Der sohlennahe Abflussanteil zeigt eine Konzentration, die etwa dem Doppelten des durchschnittlich gefassten Wassers entspricht. Die Geschwemmselkonzentration des mittleren Abflussanteils ist über die Monate hin konstant und beträgt etwa 54% der Konzentration des gefassten Wassers. Der oberflächennahe Abflussanteil weist in den Monaten Oktober und November eine Geschwemmselkonzentration auf, die etwa der durchschnittlichen Fassungskonzentration entspricht. Nach November sinkt die Konzentration im oberflächennahen Abflussanteil markant ab. Die Ursache ist mit dem Ende der Laubfallperiode zu erklären. Wie im Abschnitt 2.1 erwähnt, kann beim KWKW Freienstein von einer ähnlichen Konzentration ausgegangen werden, wie bei der damaligen Messstelle Winterthur-Wülflingen.

Aus dieser Analyse lässt sich schliessen, dass der mittlere Abflussanteil (50% des Abflusses) die kleinste mittlere Geschwemmselkonzentration aufweist und daher bevorzugt gefasst werden sollte. Der sohlennahe Abflussanteil sollte nicht in die Fassung geleitet werden. Es ist aber zu beachten, dass bei Hochwasser oder generell erhöhter Turbulenz eine vertikale Durchmischung des Wassers stattfindet und daher die Geschwemmselkonzentrationen in den Abflussanteilen ausgeglichen werden können.

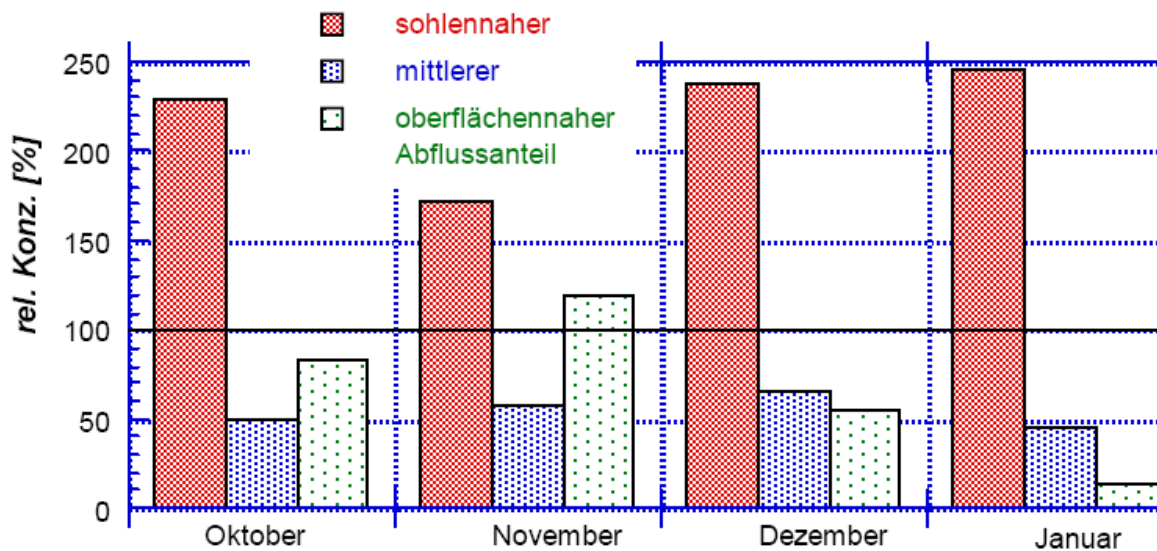


Fig. 32 Relative Geschwemmselkonzentration der Töss bei Winterthur-Wülflingen [7]

2.3.2 Geschiebeschwelle

Ist der Bemessungsdurchfluss über dem Grenzabfluss für Geschiebetrieb, so ist ein Eindringen des Geschiebes in die Fassung wahrscheinlicher. Aber auch bei Hochwassern und erhöhter Turbulenz wird es zu Geschiebeeinträgen in die Fassung kommen. Um zumindest den sohlennahen Geschiebeanteil abzufangen wird eine Geschiebeschwelle mit anschliessender Geschiebespülrinne angeordnet. Wird bei einem beweglichen Wehr die Lage der Flusssohle im Bereich der Fassung fixiert, werden üblicherweise bis zu zwei Geschiebeschwellen angeordnet. Die erste ragt ca. 1 bis 2m über die Flusssohle, vgl. Boes [8]. Sie wird durch die fassungsnahe Wehröffnungen gespült.

Im KWKW Freienstein wurde eine 1.1m hohe Geschiebeschwelle mit anschliessender Geschiebespülrinne gebaut (vgl. Fig. 33). Wie bereits beim vorigen Abschnitt erwähnt, ist die Gefahr gross, dass der Vorboden der Geschiebeschwelle durch das anfallende Geschiebe auflandet. Das weiter anfallende Geschiebe würde in die Geschiebespülrinne gelenkt, was zwar wünschenswert ist, aber eine permanente Spülung ins Unterwasser bedingt.

2.3.3 Tauchwand / Schwimmbalken

Eine Tauchwand bildet ein Höhenhindernis, welches das oberflächennahe Geschwemmsel an der Unterquerung hindern soll. Die Unterkante einer Tauchwand sollte mindestens 0.2m, bei grösseren Querschnitten im Allgemeinen in 0.5m bis 1.0m Tiefe unter dem Stauspiegel angelegt werden, vgl. Giesecke [14]. Die Tauchwand des KWKW Freienstein hat eine Eintauchtiefe von 0.4m, sie scheint deshalb an der unteren Grenze zu sein, bezüglich der in der Literatur vorgegebenen Richtwerte.

Tauchwände werden ebenfalls mit anschliessenden Spülvorrichtungen versehen, um das Geschwemmsel an einer Leitwand direkt ins Unterwasser abführen zu können.

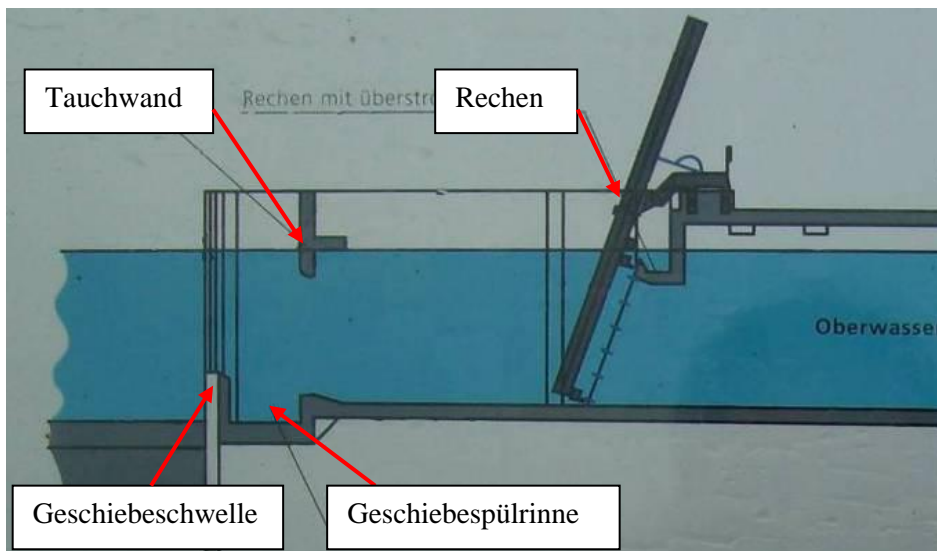


Fig. 33 Geschiebeschwelle, -spülrinne, Tauchwand und Rechen im KWKW Freienstein

Eine grössere Eintauchtiefe bedeutet aber auch grössere Verluste. Diese können nach dem Ansatz von Schröder [16] abgeschätzt werden:

Verlustbeiwert der Tauchwand
$$\zeta_T = 1 - 2 \cdot \frac{h_2}{h_E} + \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h_2}{h_E} \right)^2$$

Wobei h_E die Höhe des unter der Tauchwand verbliebenen Durchflussquerschnittes ist.

Damit berechnet sich die Verlusthöhe zu
$$h_v = \zeta_T \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$$

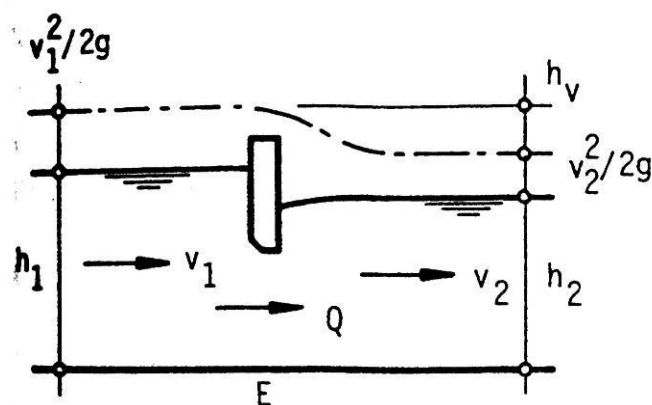


Fig. 34 Skizze zur Bestimmung des Tauchwandverlustes [16]

Mit den Angaben aus den Bauzeichnungen des KWKW Freienstein und einer Abschätzung bez. der Strömungsgeschwindigkeit nach der Tauchwand resultiert:

$$h_E = 2.60\text{m}$$

$$h_2 = 3.14\text{m}$$

$$v_2 = 1.0\text{m/s}$$

$$\zeta_T = 1 - 2 \cdot \frac{3.14m}{2.60m} + \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{3.14m}{2.60m} \right)^2 = 0.7724$$

$$h_v = 0.7724 \cdot \frac{\left(1 \frac{m}{s} \right)^2}{2 \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}} = 0.039m$$

Es ist mit einem Tauchwandverlust beim Ausbauchdurchfluss von etwa 4cm zu rechnen. Aus den Bauzeichnungen ist eine Pegeldifferenz von 5cm abzulesen. 4cm entsprechen etwa 0.7% der vom Hersteller angegebenen Nettofallhöhe für das KWKW Freienstein von 5.88m.

Ein beobachteter Effekt beim KWKW Freienstein, verursacht durch die Unterströmung der Tauchwand, war die Oberflächenströmung stromab der Tauchwand. Eine sich spiralförmig fortbewegende Rezirkulationsströmung, verursacht durch die Ablösungen an der Tauchwandunterkante, fördert grosse sichtbare Mengen an Geschwemmsel mit sich (im Vergleich zum übrigen sichtbaren Fassungsbereich).

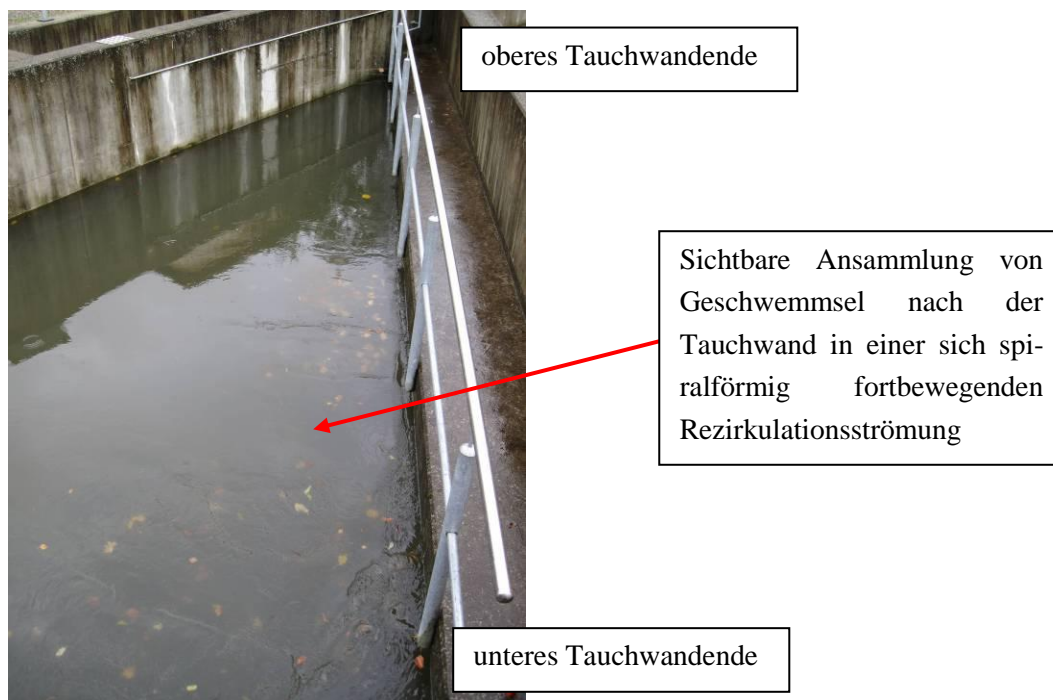


Fig. 35 Wasseroberfläche nach Tauchwand im KWKW Freienstein

Durch unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten zur Tauchwand hin infolge Umlenkeffekts werden die Ablösungen nach der Tauchwand unterschiedlich lang. Die Ablösungen am oberen Tauchwandende sind sichtbar weniger lang als die Ablösungen am unteren Tauchwandende. Wenn der Spülschütz nicht offen ist, staut sich das Geschwemmsel an diesem an und es kommt zu einer Ansammlung von Geschwemmsel vor der Tauchwand (vgl. Fig. 5). Wird die Ansammlung in der Tiefe über die Zeit grösser, wird das Geschwemmsel von den nächst liegenden Stromlinien unter die Tauchwand gezogen. Gelangt ein Feststoff nach der Ablösung an die Oberfläche, ergibt sich ein Oberflächenstauungspunkt, bei welchem das Fluid entweder zur Tauchwand fliesst (Rezirkulation) oder gegen den Einlaufbereich der Turbine strömt. Diese Rezirkulation ist ein der Hauptfliessrichtung in den Einlaufbereich der Turbine überlagerter Effekt. Deshalb hat die Strömung nach der Tauchwand eine Komponente zur Tauchwand hin und eine gegen den Einlaufbereich. Zusammengesetzt ergibt sich eine spiralförmig fortbewegende

Rezirkulationsströmung (vgl. Fig. 37). Bei einer Wirkungsgradmessung im KWKW Freienstein der HSLU [17] im Jahre 2006, wurde mittels ADP-Sonde (akustische Geschwindigkeitsmessung nach dem Impuls-Doppler-Prinzip) das Geschwindigkeitsprofil vor dem Einlaufrechen, im Querschnitt der Dammbalkennut, aufgenommen. Es wurde eine nach unten gerichtete Geschwindigkeitskomponente orthogonal zur Hauptfliessrichtung an der Tauchwandseite gemessen. Diese Messung bestätigt die spiralförmige Rezirkulationsströmung.

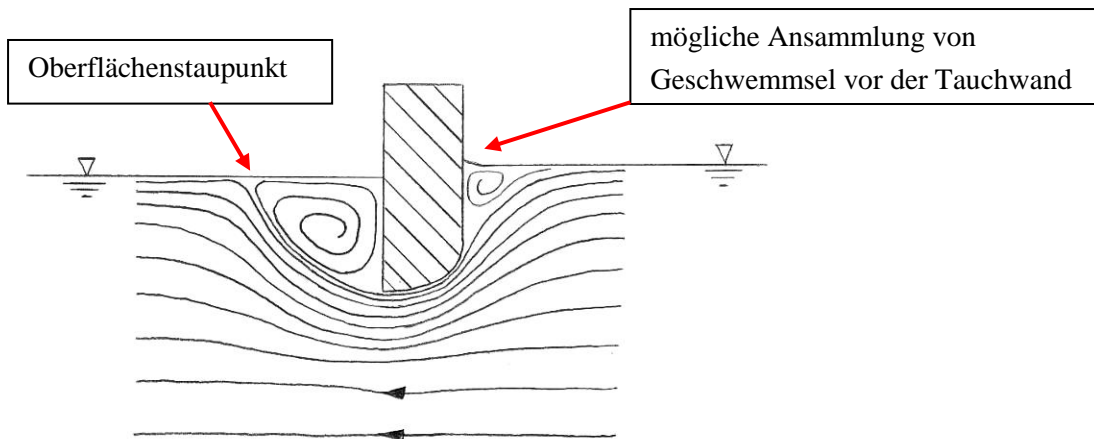


Fig. 36 Zeitgemittelte Stromlinien um eine Tauchwand

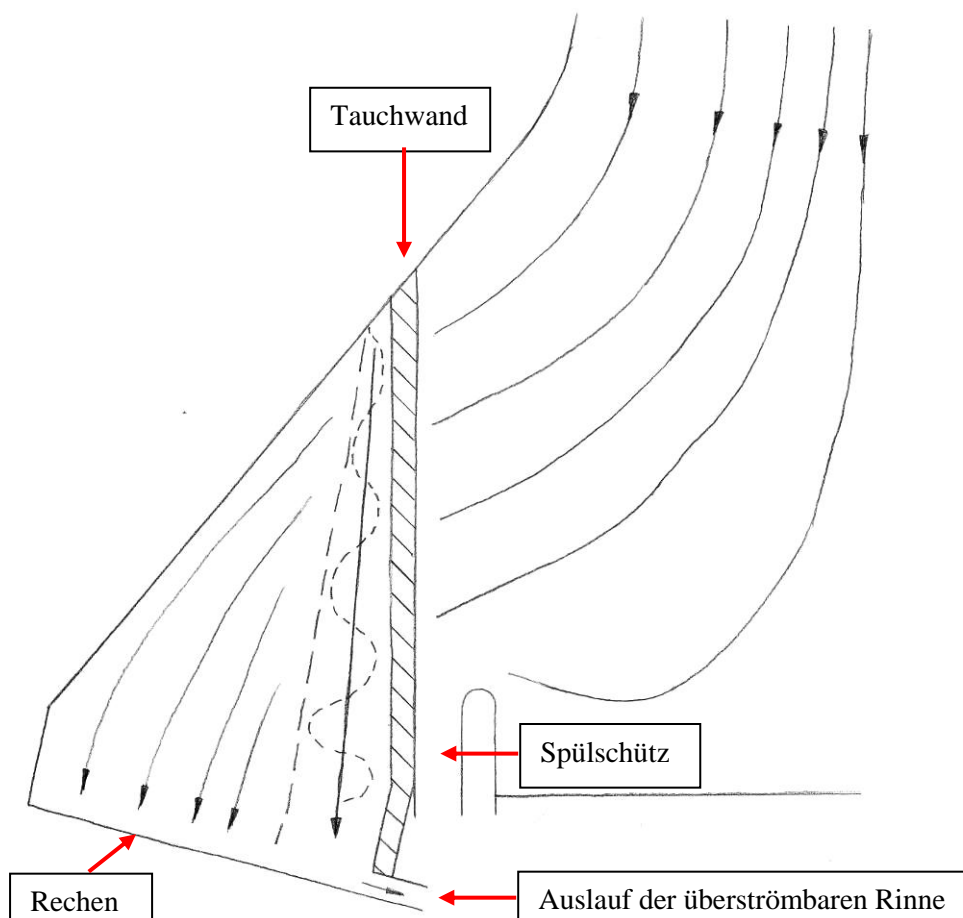


Fig. 37 Zeitgemittelte Stromlinien am Fassungsbauwerk des KWKW Freienstein

Diese Rezirkulationsströmung an der Tauchwand wird bei Einsatz des Rechens zu einem Teil zum Auslauf der überströmbaren Rinne geführt. Damit wird das in diesem Anteil der Rezirkulationsströmung befindliche Geschwemmsel nicht zum Einlaufbereich der Turbine geführt, sondern in den Auslauf der überströmbaren Rinne gelenkt und ins Unterwasser weitergeleitet. Ist die Rechenreinigungsmaschine nicht im Einsatz, versperrt dieser die überströmbare Rinne und die ganze Rezirkulationsströmung samt Geschwemmsel wird in den Einlaufbereich der Turbine gezogen. Den Effekt der Rezirkulationsströmung könnte man sich zu Nutzen machen, indem man bei Überlauf am Wehr einen Teil des gefassten Wassers an einer ähnlichen Stelle wie die überströmbare Rinne ins Unterwasser führt, ohne den Rechen im Einsatz haben zu müssen. Diese Durchführung würde wohl nur im Herbst bei erhöhter oberflächennahen Geschwemmselkonzentration (vgl. Fig. 32) sinnvoll sein.

Bei der befragten Anlage KWKW Stoppel wurde ein Schwimmbalken in den Fassungsbereich gelegt (vgl. Fig. 38). Ein Schwimmbalken erfüllt grundsätzlich die gleiche Funktion wie eine Tauchwand. Es soll der oberflächennahe Abflussanteil abgelenkt und darin befindliches Geschwemmsel vom Einlaufbereich der Turbine ferngehalten werden. Beim KWKW Stoppel wurde ein 40cm eintauchender Schwimmbalken installiert, der um eine Achse am Ende des Balkens gedreht und mit der vertikalen Führung in der Höhe verstellt werden kann. Damit ist es dem Betriebsverantwortlichen möglich, den optimalen Winkel zwischen dem Schwimmbalken und der Strömungsrichtung zu finden, um möglichst viel Geschwemmsel über das Streichwehr abzuführen.



Fig. 38 Schwimmbalken beim KWKW Stoppel

2.3.4 Rechenreinigungsmaschine

Der Rechen dient in erster Linie dem Auffangen des Geschwemmsels. Zu der Rechenanlage gehört neben dem Rechen, bei dem zwischen Fein- und Grobrechen unterschieden werden kann, auch die Einrichtung zur Reinigung, also die Rechenreinigungsmaschine. Von Meusburger [5] wurden verschiedene Parameter wie Verbauung, Verlegung (vor allem verschmutzungsbedingt), Strömungsinhomogenitäten, Schräganströmung und Rechenstabform untersucht und deren Einfluss auf den Energieverlust über den Rechen bestimmt. Dabei wird darauf hingewiesen, dass schon geringe Teilverlegungen (anhaftende Verschmutzung am Rechen) zu erhöhten Energieverlusten am Einlaufrechen führen.

Ein bei den Befragungen der KWKW-Betreiber immer wieder auftretendes Problem war, dass die Reinigungsmaschine zu schwach ausgelegt ist, vielfach aus Kostengründen. Zudem wurde erwähnt, dass festsitzende Hölzer oder festsitzendes Geschiebe nur manuell mit entsprechendem Aufwand entfernt werden können. Diese festsitzenden Stoffe vergrößern den Verlegungsgrad und damit den Verlust über den Rechen. Weiter kommt es durch solche Verkeilungen oft zu Deformationen der Rechenstäbe.

3 MESSKAMPAGNE IM KWKW FREIENSTEIN

3.1 Beschreibung der Anlage und des Monitorings

Im KWKW Freienstein ist eine vertikalachsige doppelt-regulierte Kaplan turbine installiert mit folgenden Angaben des Herstellers:

Nettofallhöhe	5.88m	Ausbauwassermenge	12m ³ /s
Vollastleistung	616kW	Nennndrehzahl	273U/min

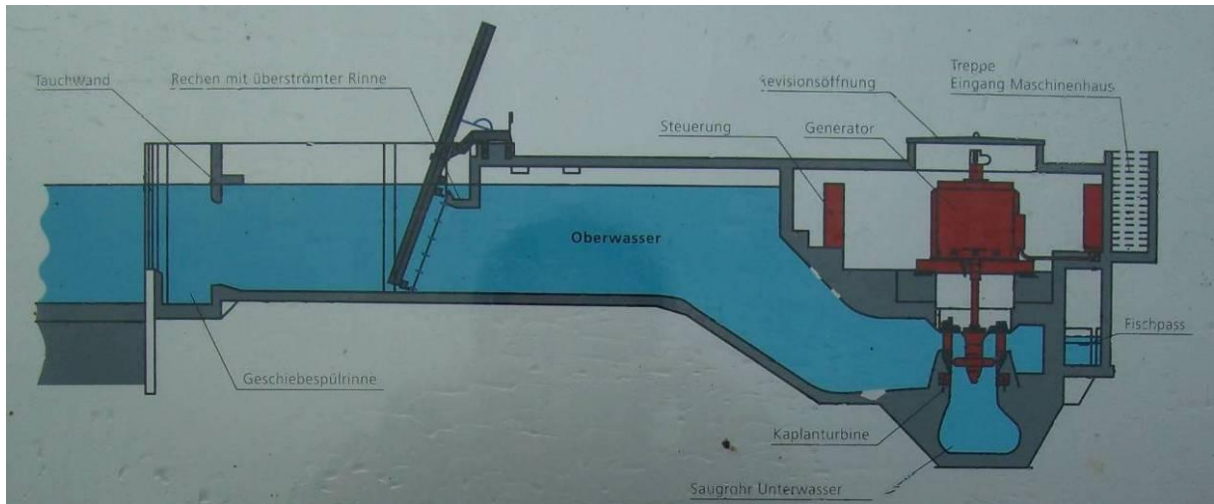


Fig. 39 Querschnitt im Oberwasser durch das KWKW Freienstein

Ziel der Messkampagne Freienstein war, nicht nur die Leistungskurve über der Zeit aufzuzeichnen, sondern auch den Indexwirkungsgrad. Mit der Messkampagne wurde untersucht, wie gross die Energieverluste infolge der Verschmutzung sind. Des Weiteren wurde die Effizienz verschiedener Spülprogramme analysiert, um daraus eine Aussage herleiten zu können, welches Spülprogramm am besten geeignet ist. Die Herleitung des Indexwirkungsgrades ist im Anhang A1 aufgeführt.

Die Geschwindigkeitsmessung (zur Bestimmung des Indexvolumenstromes) wurde mit eingetauchter PEMS-Sonde (Programmable Electromagnetic Current Velocity Meter System) realisiert. Der Messkopf (die Messstelle) war auf etwa halber Wasserstandshöhe im Oberwasser installiert. Das Messprinzip basiert auf der elektromagnetischen Induktion, welche proportional zur Fluidgeschwindigkeit ist.

Die Pegelmessungen ober- und unterwasserseitig (zur Bestimmung der Fallhöhe) wurden mit Ultraschallsonden realisiert. Es wurden jeweils 2 Ultraschallsonden installiert (gemäss IEC Standard 60041), für die Auswertung wurde der Mittelwert der 2 Messungen verwendet.

Die Messung der Leit- und Laufradstellungen werden in Prozent erfasst. Gemäss Angaben des Betriebsverantwortlichen entsprechen beim Laufrad 90% der vollen Betriebsöffnung und beim Laufrad 75%. Bei den Auswertungen wurden die 90% bzw. die 75% auf 100% gesetzt.

Der Druckverlust über den Rechen wird mit einem Differenzdruckaufnehmer gemessen. Zudem wird beim Rechen binär bei jedem Messpunkt angegeben, ob die Rechenreinigung aktiv ist (1) oder in der Ruhestellung ist (0).

Die Messung der Wasser- (zur Bestimmung der Dichte) und der Gleitlagertemperatur (Indiz der Lagerbelastung) erfolgte mit PT100 Temperaturfühlern.

Die Videoüberwachung diente zur Visualisierung des Saugrohraustrittes.

Alle analogen Messgrößen wurden an ein Datenerfassungsmodul geführt und per USB an einen Desktop-PC geleitet. Die Weiterverarbeitung der Signale zur Rekonstruktion der physikalischen Größen erfolgte mit LabVIEW. Die Speicherung der Rohdaten sowie deren Auswertung wurden mit Excel durchgeführt. Via Datenkommunikation über Internet konnte vom Standort des Verfassers auf den PC im KWKW Freienstein zugegriffen werden und dabei Messungen gestartet / beobachtet oder Messresultate auf den PC des Verfassers gespeichert werden (Online-Monitoring).

3.2 Messresultate

Die Instrumentierung war vom 04. Juni bis 16. Dezember 2009 in Betrieb. Die Messzeit war durch durchschnittliche Abflüsse der Töss während den Monaten Juni und Juli gekennzeichnet, sowie durch eine Trockenzeit beginnend im August bis Ende Oktober. Es konnten in dieser zweiten Periode keine repräsentativen Messungen aufgenommen werden, da die Töss zu wenig Wasser mit sich führte. Im November bis Mitte Dezember waren wiederum durchschnittliche Abflusswerte vorhanden mit zwischenzeitlichen Hochwassern und erhöhtem Geschwemmselaufkommen (typisch im Herbst).

In der folgenden Auswertung werden die Resultate von 9 Messungen behandelt. Weitere 4 Messungen wurden für die Auswertung der Spülprogrammvariationen verwendet. Die Messungen wurden jeweils über Zeiträume von 1-3 Tagen, mit einem Aufzeichnungsintervall von 1s durchgeführt. Die ersten 6 Messungen wurden im Juni / Juli 2009 aufgenommen und sind stellvertretend in nachfolgender Abbildung eingetragen:

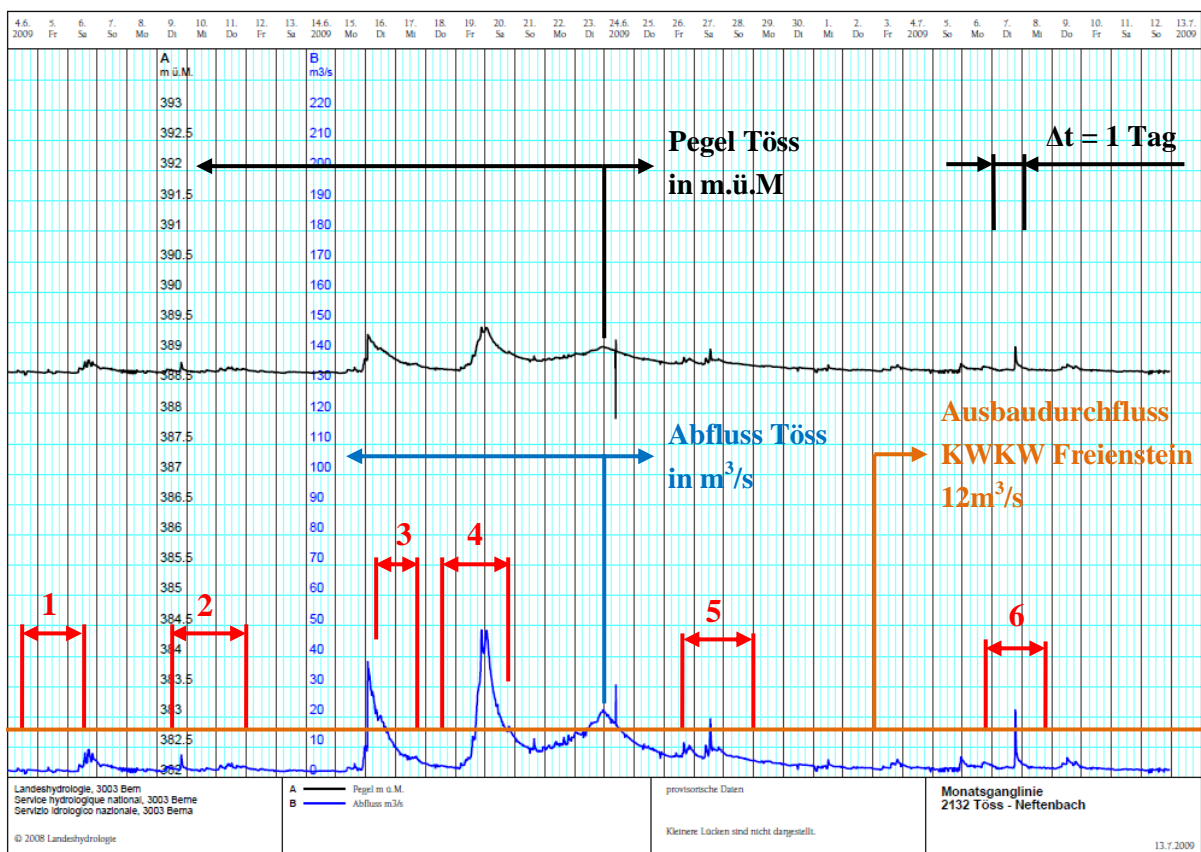


Fig. 42 Monatsganglinie der Töss vom 04.06. – 13.07.2009 [18]

Es ist ersichtlich, dass mit den durchgeführten Messungen ganz unterschiedliche Lastfälle (bestimmt durch den Abfluss der Töss) erfasst wurden.

3.2.1 Zusammenhang H – Q

Die in Fig. 42 visualisierten Abflüsse der Töss zeigen den gemessenen Zusammenhang zwischen dem Indexvolumenstrom durch das KWKW Freienstein und der Höhendifferenz zwischen Ober- (nach Rechen) und Unterwasser (Saugrohraustritt). Die Abbildung zeigt die Auswertung von über 700'000 Erfassungen, verteilt über den Zeitraum von Juni bis und mit November.

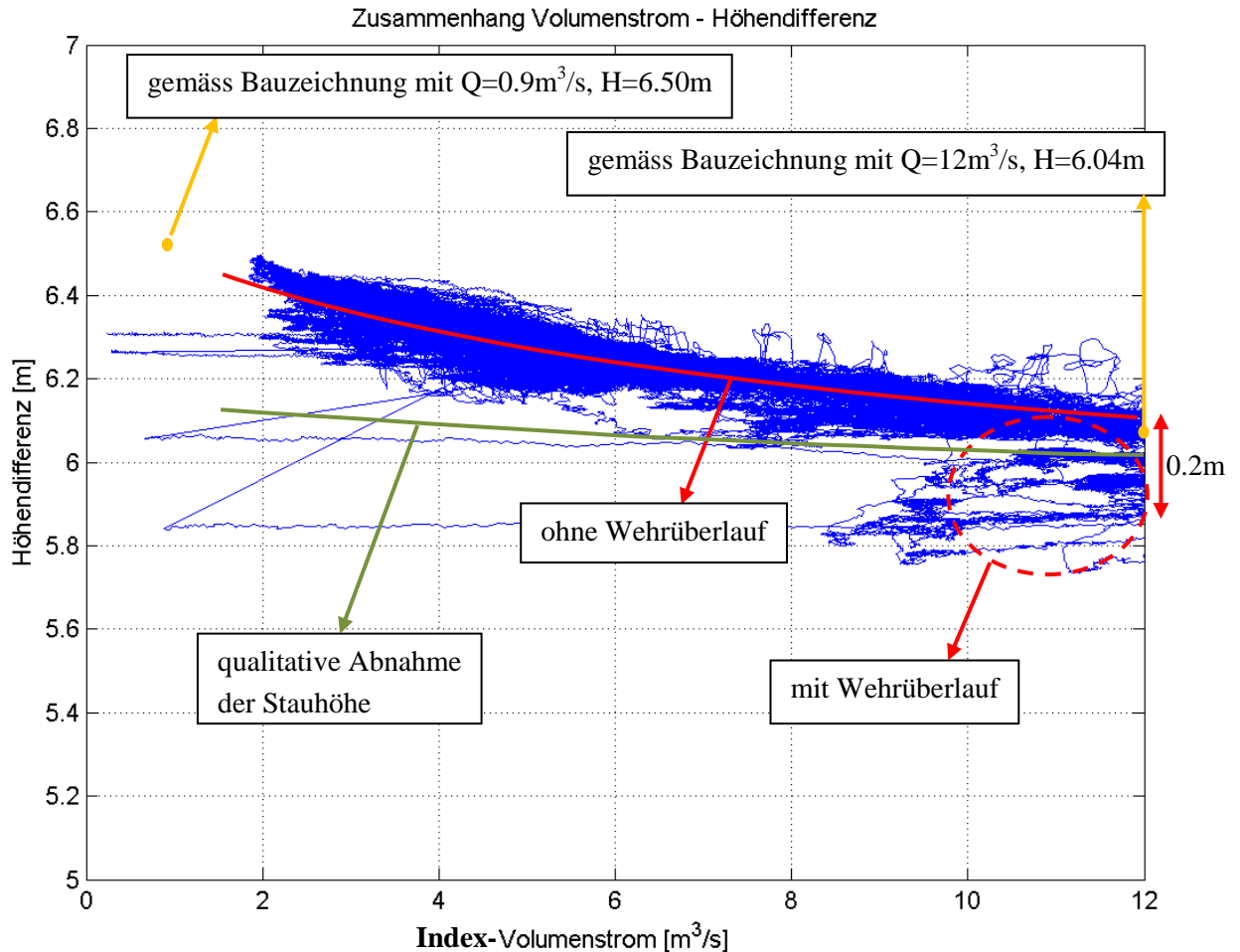


Fig. 43 Zusammenhang Indexvolumenstrom durch das KWKW Freienstein und Höhendifferenz

Die Konzession des KWKW Freienstein regelt die Haltung der Oberwasserkote. Führt die Töss nicht mehr als $12\text{m}^3/\text{s}$ (Ausbauwassermenge KWKW Freienstein), geht sämtliches anfallendes Wasser durch die Turbine. Ist der Abfluss der Töss grösser als $12\text{m}^3/\text{s}$ wird die Differenz dazu über das regulierte Wehr abgeführt.

Die Höhendifferenz bei kleinen Indexvolumenströmen nimmt stärker ab als bei grösseren. Die Ursache dafür liegt im Ablauf nach dem Saugrohr der Turbine in das Flussbett der Töss. Durch die Topologie (positive Sohlstufe, vgl. Fig. 45) und den strömenden Abflusszustand (Wassertiefe > Grenztiefe) ergibt sich ein Aufstau und damit ein Anheben des Wasserpegels im Unterwasserbecken (vgl. Fig. 44). Diese Stauhöhe h_{Stau} ist von der Grösse der positiven Sohlstufe abhängig, vom spezifischen Abfluss und berechnet sich nach dem Ansatz, vgl. Bollrich [19]:

$$h_{\text{Stau}}^3 - \left(\delta + \frac{3}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \right) \cdot h_{\text{Stau}}^2 + \frac{q^2}{2 \cdot g} = 0$$

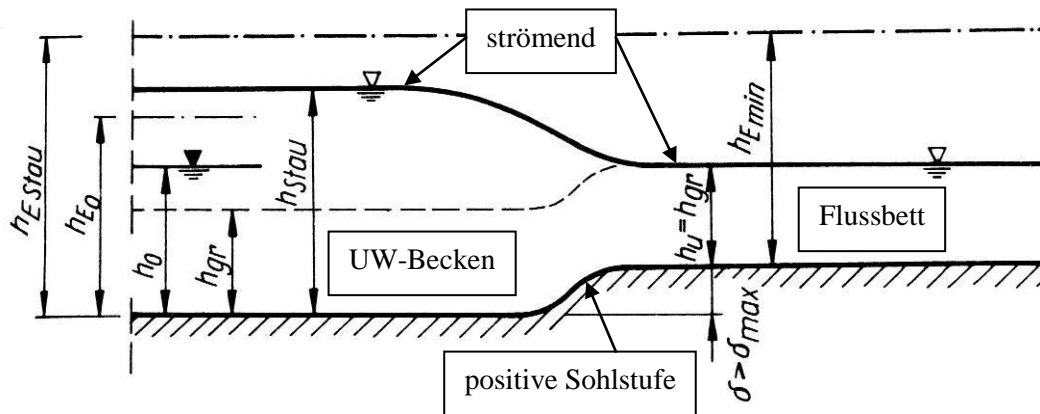


Fig. 44 Strömender Abfluss über eine positive Sohlstufe der Höhe $\delta \approx 1.6\text{m} > \delta_{\max} \approx 0.1\text{m}$ bei vernachlässigbaren Verlusten an hydraulischer Energie [19]

Der qualitative Verlauf dieser Gleichung ist in Fig. 43 eingetragen. Da der Manningbeiwert (Rauigkeit) sowie das Gefälle der Unterwasserbeckensohle unbekannt sind, wird auf eine analytische Berechnung der Stauhöhe in Bezug zur Normalabflusshöhe verzichtet. Der qualitative Verlauf zeigt, dass bei einer Volumenstromzunahme die Aufstauhöhe immer weniger zunimmt. Damit ist die stärkere Höhendifferenzabnahme bei kleineren Volumenströmen begründet.

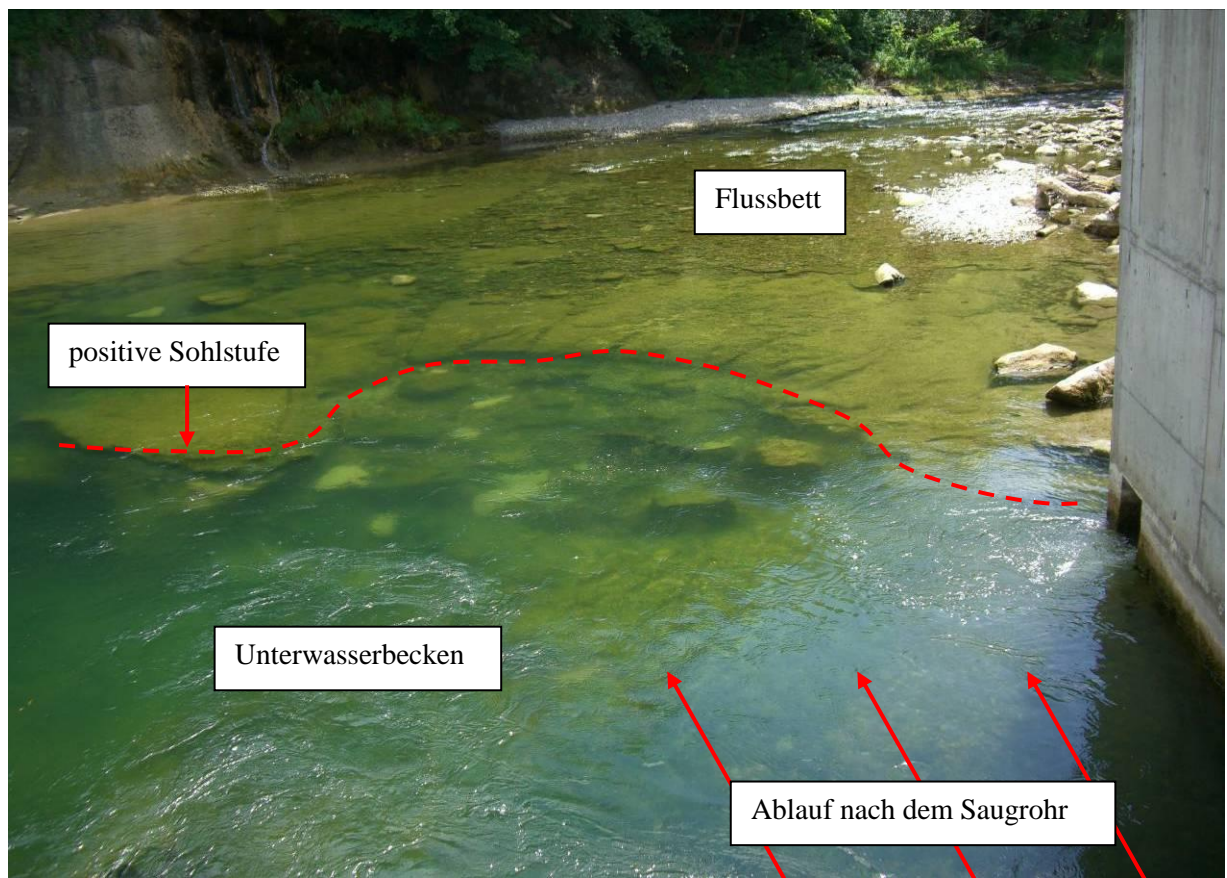


Fig. 45 Ablauf nach dem Saugrohr der Turbine des KWKW Freienstein in das Flussbett der Töss

Wird Wasser zusätzlich über das Wehr abgeführt (bei Abflüssen der Töss mit $11 - 12\text{m}^3/\text{s}$), ergibt sich eine deutlich grössere Streuung und vor allem eine zusätzliche Abnahme der nutzbaren Höhendifferenz. Der Pegel im Unterwasser steigt um bis zu 0.2m an. Wäre im Unterwasser ein freier Abfluss, so würde sich diese Differenz nicht einstellen. 0.2m mehr Fallhöhe bedeuten etwa 3.3% mehr hydraulische Leistung ($+23.5\text{kW}$), die zur Verfügung

stunden. Aus der Dauerlinie der Tagesmittel im Jahre 2008 bei der Messstation Töss-Neftenbach der Landeshydrologie des BAFU [18] ist ersichtlich, dass an mindestens 55 Tagen dort die Töss einen Abfluss von $12.4\text{m}^3/\text{s}$ mit sich führte. Das KWKW Freienstein befindet sich unmittelbar nach dieser Messstelle ohne nennenswerte Zuflüsse im Zwischenabschnitt.

Zur Plausibilitätsprüfung der gemessenen Höhendifferenz wurden die Bauzeichnungen herbeigezogen. Bei $0.9\text{m}^3/\text{s}$ resultiert eine Höhendifferenz von 6.50m, bei $12\text{m}^3/\text{s}$ ergibt sich 6.04m. Mit der Ausgleichskurve in der Fig. 43 resultieren Abweichungen, die kleiner 0.05m zur Bauzeichnung betragen..

Ein ungestörtes Ausbreiten des Ablaufs aus dem Saugrohr der Turbine ins Flussbett der Töss brächte im KWKW Freienstein eine messbare Mehrleistung.

3.2.2 Analyse eines Messdatensatzes

Im Folgenden wird mit den Fig. 47 und Fig. 48 eine typische Messung während der vorliegenden Kampagne analysiert. Während dieser Messperiode von 2.5 Tagen vom 06. – 09. 08.2009 steigt die Generatorleistung von rund 200kW bis auf ca. 570kW. So ist praktisch der ganze Arbeitsbereich dieser Anlage in dieser Auswertung enthalten.

Die Verläufe des Volumenstromes und der hydraulischen Leistung sind sehr ähnlich. Dies bedeutet, dass die Schwankungen der hydraulischen Leistung vor allem durch die Variationen des Volumenstromes bestimmt sind.

Der Verlauf der Generatorleistung folgt dem Verlauf der Leit- und Laufradöffnungen. Im Verlauf der Laufradöffnung ist zu erkennen, dass die Kurve nach ca. 47 Stunden, bei einer Öffnung zwischen 70% und 90%, zu schwingen beginnt. Dies ist anhand des Zusammenhanges der Öffnungen von Leitapparat und Laufrad erklärbar (vgl. Fig. 46). Die Messdaten zeigen, dass die Regelung der Leit- und Laufradöffnung stufenartig verläuft. Im Bereich um 85% Leitradöffnung kann die Laufradstellung kurzzeitig um mehr als 10% variieren.

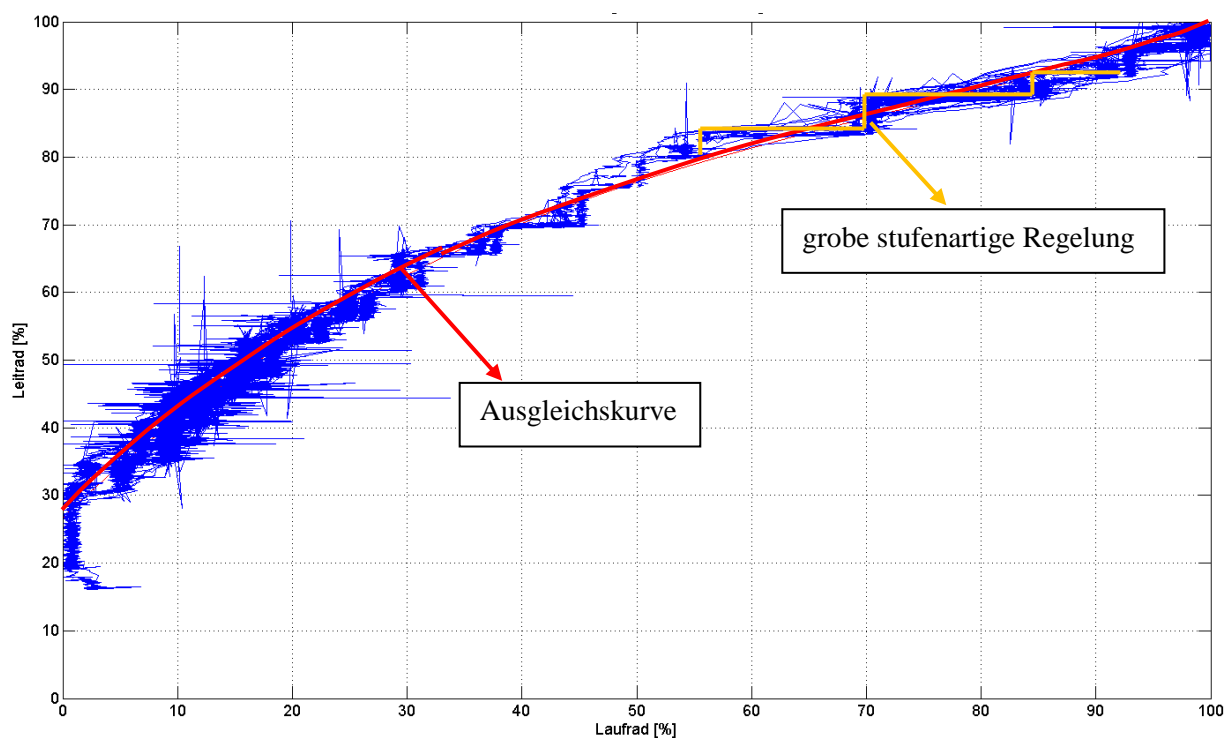


Fig. 46 Zusammenhang Leit- und Laufradöffnung im KWKW Freienstein

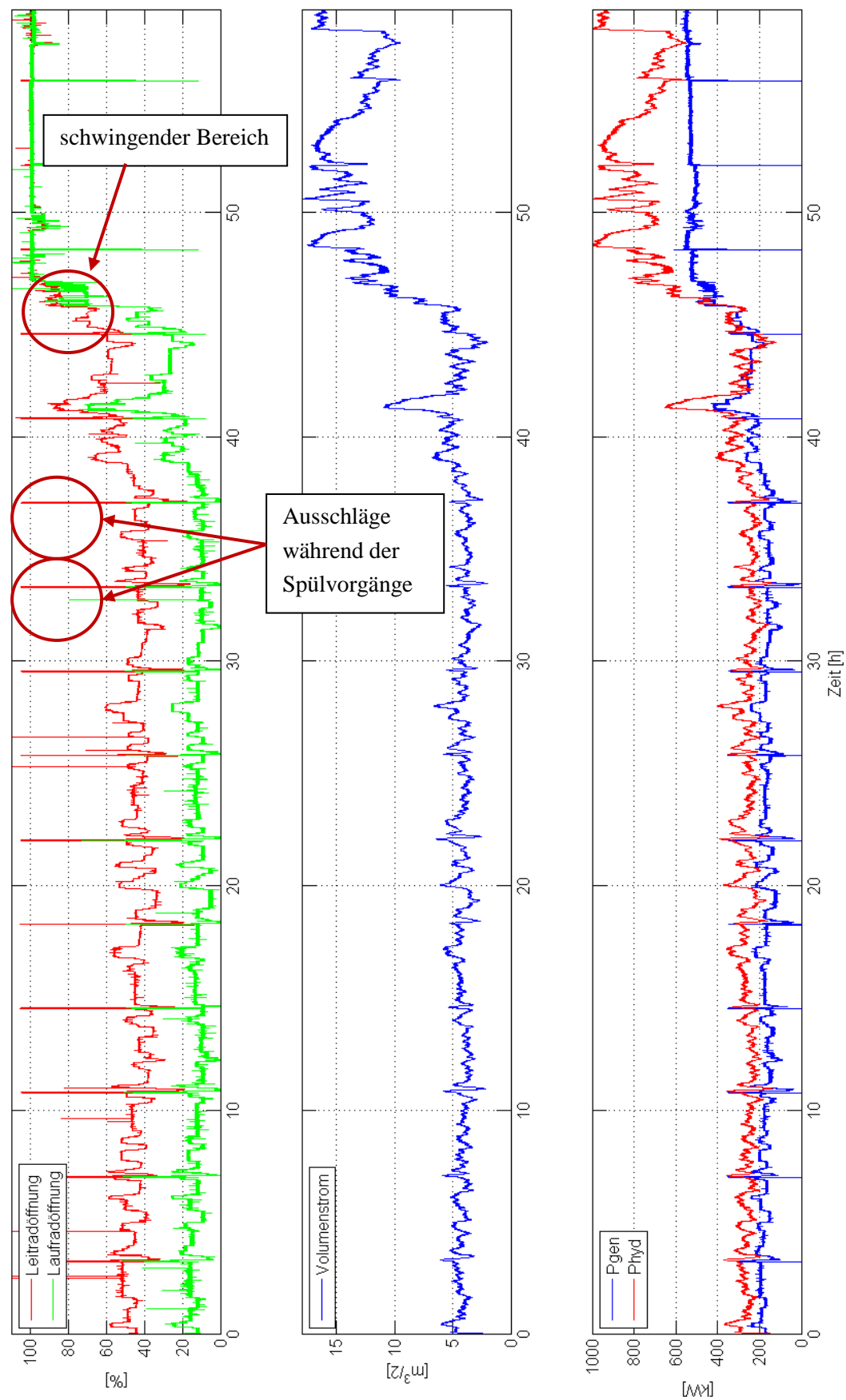


Fig. 47 Leit- / Laufradöffnung, Indexvolumenstrom und hydraulische Leistung sowie Generatorleistung

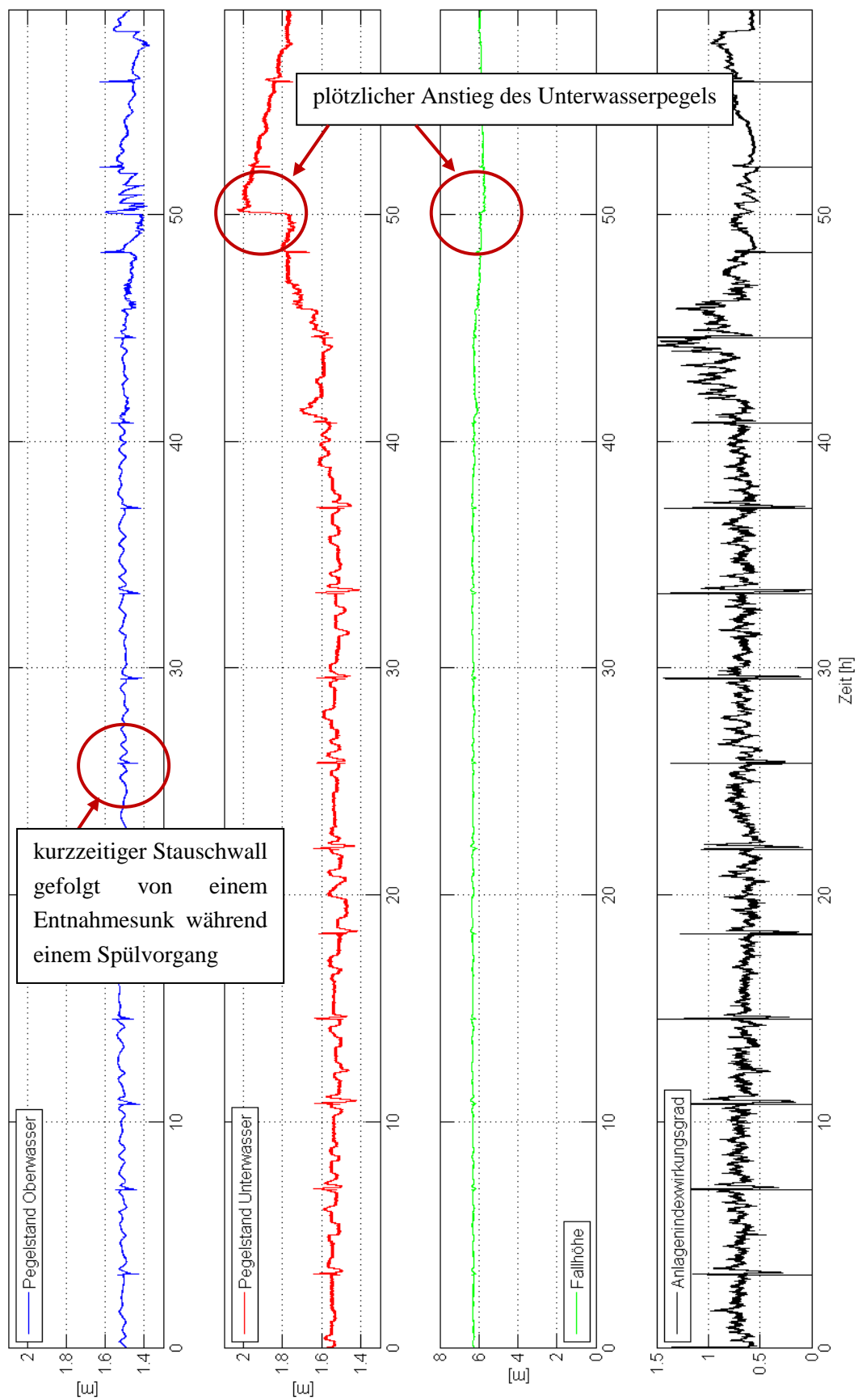


Fig. 48 Pegelstände Ober- / Unterwasser und Fallhöhe sowie Anlagenindexwirkungsgrad

Der Verlauf des Oberwasserpegels ist im gezeigten Beispiel über die Messdauer von 45 Stunden konstant. Dies ist auf die Regelung des Wehrüberlaufs zurückzuführen. Einzig während einem Spülvorgang (Variante 3, vgl. Abschnitt 3.2.5) kommt es aufgrund des Schliessens von Leit- und Laufrad zu einem kurzzeitigen Stauschwall und beim Öffnen zu einem Entnahmesunk.

Beim Verlauf des Unterwasserpegels fällt der Sprung bei 50 Stunden auf. Dort steigt der Pegel innert kurzer Zeit um über 20cm an. Dies ist mit dem Öffnen des Wehrs zu erklären (vgl. Abschnitt 3.2.1).

Die Berechnung des Indexvolumenstromes zeigt ab Stunde 40 in einigen Bereichen keine realistischen Resultate. Volumenströme grösser $12\text{m}^3/\text{s}$ können nicht durch die Turbine geführt werden. Die Differenz zum Zufluss der Töss wird über das Wehr abgeleitet. Der Indexvolumenstrom ist vor allem durch die Geschwindigkeitsmessung bestimmt. Diese misst punktuell eine Fluidgeschwindigkeit. Wird an diesem Punkt eine höhere Geschwindigkeit gemessen, z.B. durch zeitlich veränderliche Verformung des Geschwindigkeitsprofils, resultiert ein zu grosser Indexvolumenstrom.

3.2.3 Anlagenindexwirkungsgrad

Der Anlagenindexwirkungsgrad ist definiert durch das Verhältnis der Generatorleistung zur hydraulischen Leistung. Mit diesem Wirkungsgrad ist die Unsicherheit des Generatorwirkungsgrades eliminiert.

Bei konstanter hydraulischer Leistung sollte sich der Anlagenindexwirkungsgrad durch einen Spülvorgang messbar ändern, die Effizienz des Spülvorgangs könnte bestimmt werden. Dies war bei den Auswertungen der vorliegenden Messkampagne nicht eindeutig der Fall. Aus Fig. 48 ist keine Wirkungsgradzunahme durch einen Spülvorgang erkennbar. Dementsprechend wird es schwierig, anhand des Wirkungsgrades, bei der gewählten Volumenstrommessung, eine Spülung auszulösen. Erschwerend kommt hinzu, dass durch die stufenartige Regelung ständig Leit- und Laufradvariationen stattfinden.

In die Auswertung von Fig. 49 sind über 700'000 Erfassungen verteilt über den Zeitraum von Juni bis und mit November eingeflossen. In Kombination mit der Auswertung des Anlagenindexwirkungsgrades in Abhängigkeit der Leit- und Laufradstellung zeigt sich, dass das Optimum bei Laufradstellungen von 30% - 80% einen flachen Verlauf aufweist. Demnach ist das Optimum zwischen Generatorleistungen von 200 – 400kW und Volumenströmen von 5 – $7\text{m}^3/\text{s}$ zu finden. Im Diagramm ist auch der Verlauf des Turbinenwirkungsgrades gemäss den Angaben des Herstellers dargestellt. Die absoluten Niveaus der gemessenen Anlagenindexwirkungsgradcharakteristik und des garantierten Verlaufes können nicht verglichen werden. Anhand dieser Gegenüberstellung dürfen nur die Formen der Ausgleichskurven analysiert werden. Die garantierte Wirkungsgradkurve hat ihr Optimum bei grösseren Leistungen und ist zudem durch einen flacheren Verlauf gekennzeichnet.

Die vertikalen Streuungen des Wirkungsgrades kommen zustande, wenn bei konstanter Generatorleistung ein schwankender Volumenstrom ausgewiesen wird, was durch die Geschwindigkeitsmessung begründbar ist. Infolge schwankender Leit- und Laufradstellungen variieren kurzzeitig der Volumenstrom und die Generatorleistung, daraus folgen die "schrägen" Streuungen im Diagramm.

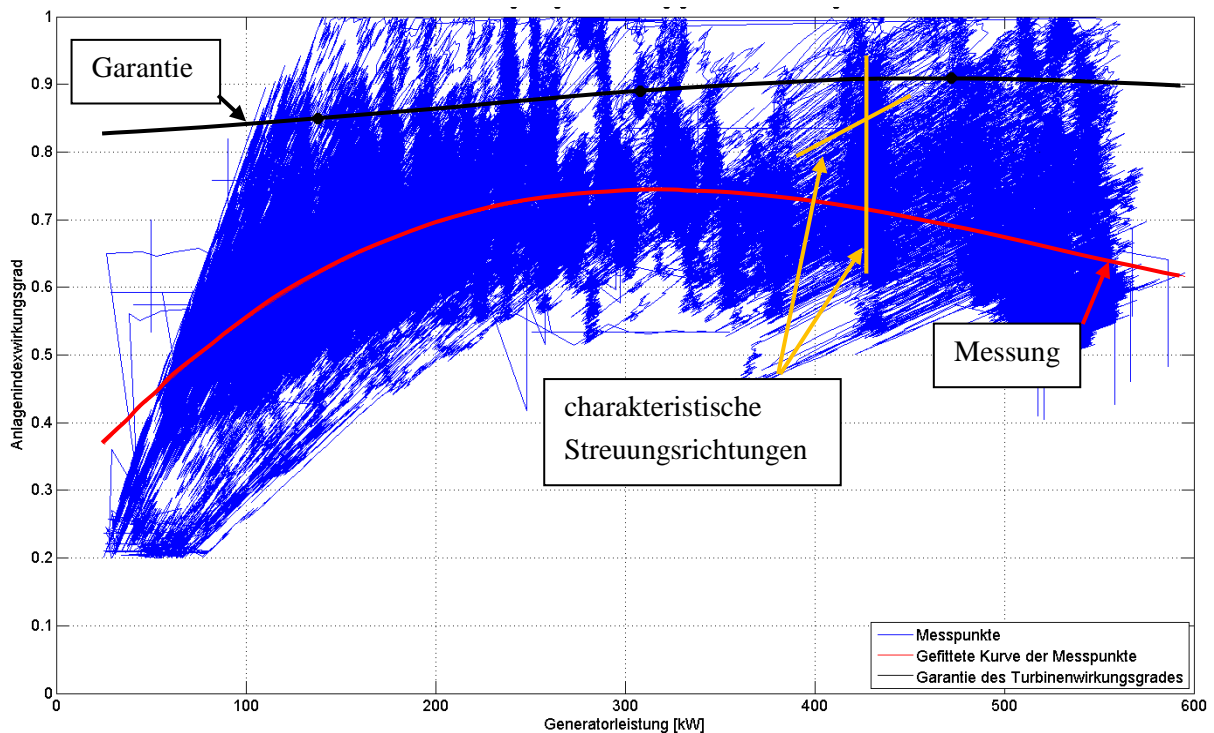


Fig. 49 Zusammenhang Anlagenindexwirkungsgrad und Generatorleistung im KWKW Freienstein

3.2.4 Turbulenzgrad

Die Geschwindigkeitsmessung zeigt sehr schwankende Resultate der Fluidgeschwindigkeit direkt unterhalb des PEMS-Sondenkopfs (vgl. Anhang A2). Für die Auswertung können diese Daten nicht verwendet werden, da auch Messungen von 0m/s ausgegeben werden und dies nicht der Realität entsprechen kann (grüner Verlauf, vgl. Fig. 50). Deshalb werden sie mit einem digitalen Tiefpassfilter verarbeitet, der folgende Parameter aufweist:

- Abtastfrequenz 10Hz
- Fpass 0.01Hz
- Fstop 0.038Hz

Durch dieses Filter werden die Geschwindigkeiten zwar nicht vollständig geglättet, aber es resultieren auch praktisch keine Phasenverschiebungen. Der Geschwindigkeitsverlauf resultiert aus denselben Messungen vom 06. – 09. 08.2009, welche auch im Abschnitt 3.2.2 analysiert werden.

Um die Strömung im Oberwasser zu charakterisieren, kann der Turbulenzgrad dieser Strömung bestimmt werden. Beim Turbulenzgrad handelt es sich um ein Mass für die Intensität der turbulenten Schwankungsbewegungen ("Störungsgrad der Turbulenz"). Die Berechnung dieser Strömungskennziffer ist im Anhang A1 aufgeführt. Der Turbulenzgrad ist das Verhältnis einer mittleren Schwankungsgeschwindigkeit zu einer Bezugsgeschwindigkeit, vgl. Herwig [20]. In diesem Fall ist die Bezugsgeschwindigkeit die mittlere Fluidgeschwindigkeit. Die mittlere Schwankungsgeschwindigkeit ist die Standardabweichung der Geschwindigkeit in x- und y-Richtung. Für den roten Geschwindigkeitsverlauf in Fig. 50 wurde der Turbulenzgrad für die ersten 38 Stunden bestimmt. Dieser Bereich wurde gewählt, weil während dieser Zeit die mittlere Geschwindigkeit praktisch konstant blieb. Die Berechnung ergab einen Turbulenzgrad von 20%. Es ist jedoch möglich, dass die Berechnung des Turbulenzgrades durch periodische Verläufe der Geschwindigkeit verfälscht wurde. Durch periodische Schwankungen wird der berechnete Turbulenzgrad zu gross, da dieser zufällige Schwankungen voraussetzt.

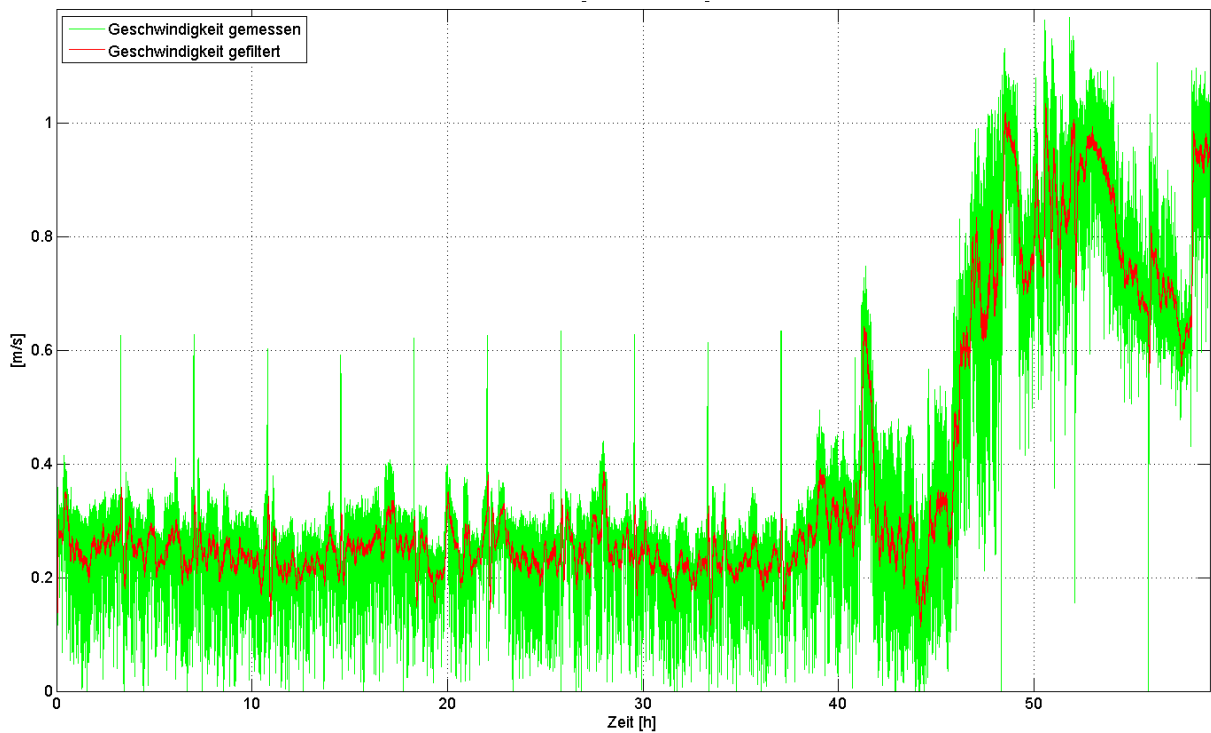


Fig. 50 Filterung der Geschwindigkeitsmessung

3.2.5 Schwingungsmessungen

Am 04. Nov. 2009 fanden im KWKW Freienstein Schwingungsmessungen statt. Die Messapparatur bestand aus 3 piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern, deren analogen Signale verstärkt und anschliessend in der Auswerteeinheit (MEScope VES 4.0 Software von Vibrant Technology) direkt analysiert und abgespeichert werden konnten. Alle 5min wurden über eine Messdauer von 1min die Schwingbeschleunigungen mit einer Abtastfrequenz von 500Hz erfasst. Es wurden die Beschleunigungen in axialer und radialer Richtung an einem Wellenring und in axialer Richtung am Leitapparatzapfen erfasst.

In den Fig. 52 und Fig. 53 sind Vergleiche zwischen den Generatorleistungsverläufen und den Effektivwerten der gemessenen Beschleunigungen abgebildet, jeweils über etwa 1 Stunde. Die Effektivwerte (RMS-Werte, Root Mean Square) werden über die Messdauer von 1min ausgerechnet und als Messpunkte in den Abbildungen dargestellt. Für die Darstellung der Generatorleistung standen alle Sekunden 1 Messwert zur Verfügung. In den Diagrammen wurden einzelne Bereiche / Verläufe mit Pfeilen hervorgehoben. Es ist ein Zusammenhang erkennbar zwischen Leistungsreduktion und mechanischer Belastungszunahme (grösser werdende Effektivwerte der Beschleunigungen) und umgekehrt. Damit führen Verschmutzungen an Stütz-, Leit- und Laufradschaufeln zu grösseren strömungsinduzierten Schwingungen. Es könnte eine mechanische oder hydraulische Unwucht bewirkt werden. Schwingungen oder Unwuchten können einen Anteil der Ursache von Leistungsreduktionen sein (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Die Schwingungsmessungen im KWKW Freienstein haben gezeigt, dass die obige Analyse der Schwingbeschleunigungen nicht in allen Bereichen gültig und daher bei der Interpretation der Resultate Vorsicht geboten ist (beachte nicht hervorgehobene Bereiche in den Fig. 52 und Fig. 53). Deshalb würde ein Monitoring der Beschleunigungen auch keine eindeutigen Rückschlüsse liefern über den Verschmutzungsgrad in der Turbine. Aus den Verläufen der Generatorleistung ist wiederum erkennbar, dass sich die Verschmutzung zwischenzeitlich selber löst (Selbstreinigung) und deshalb die Generatorleistung kurzzeitig ansteigt (vgl. Abschnitt 2.2.2).

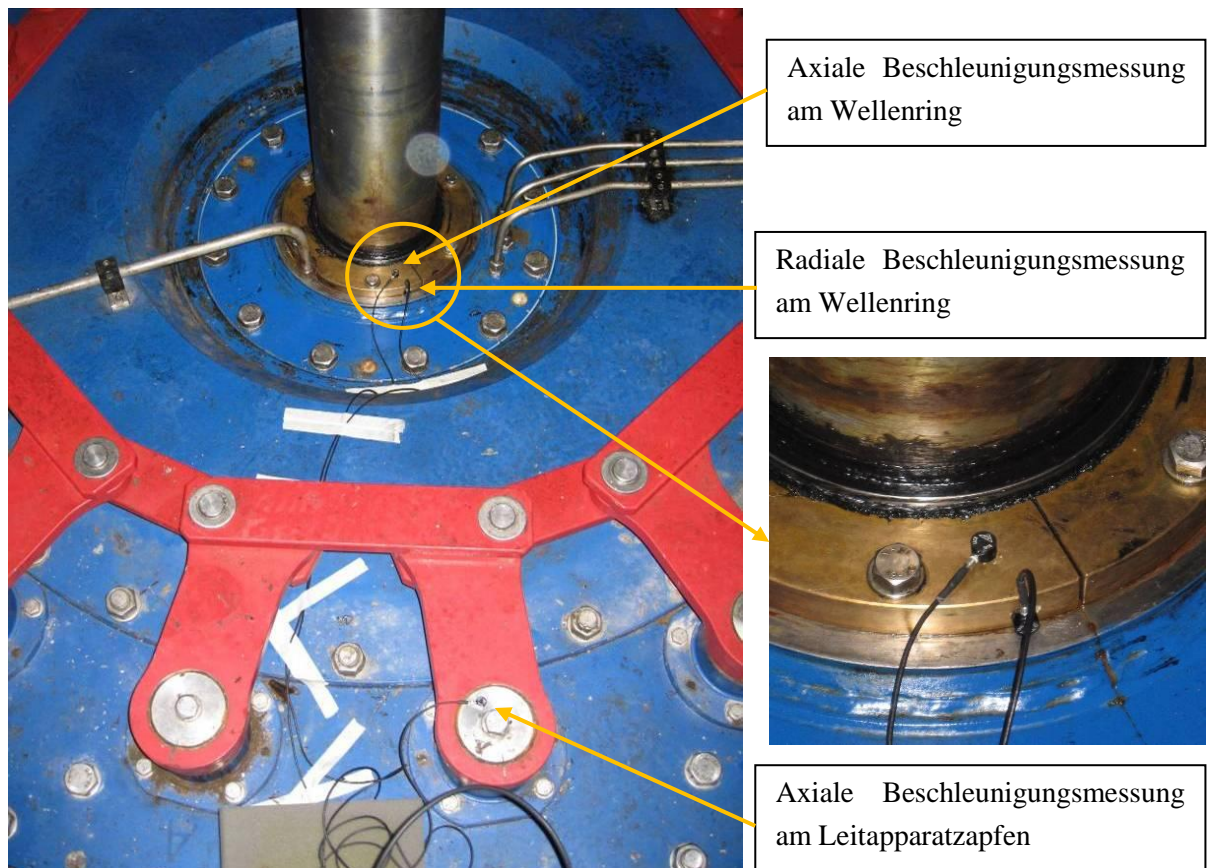


Fig. 51 Anordnung der Beschleunigungsaufnehmer im KWKW Freienstein

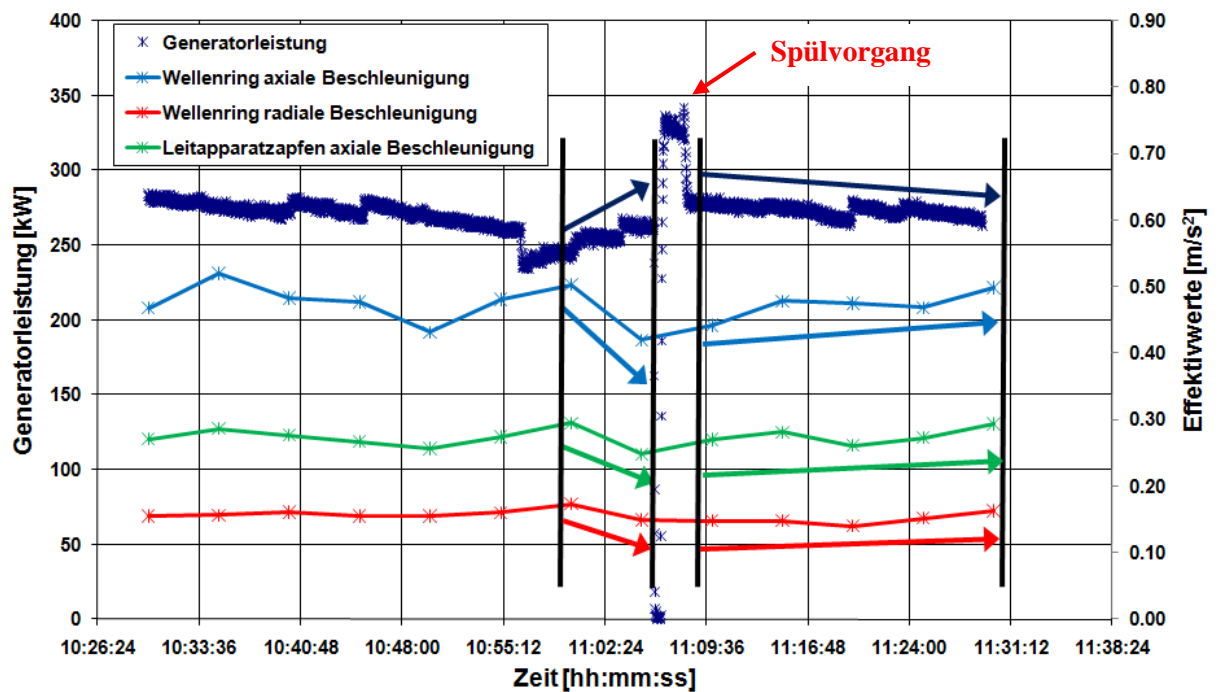


Fig. 52 Vergleich des Leistungsverlaufs mit den Effektivwerten der Schwingungsmessungen 1

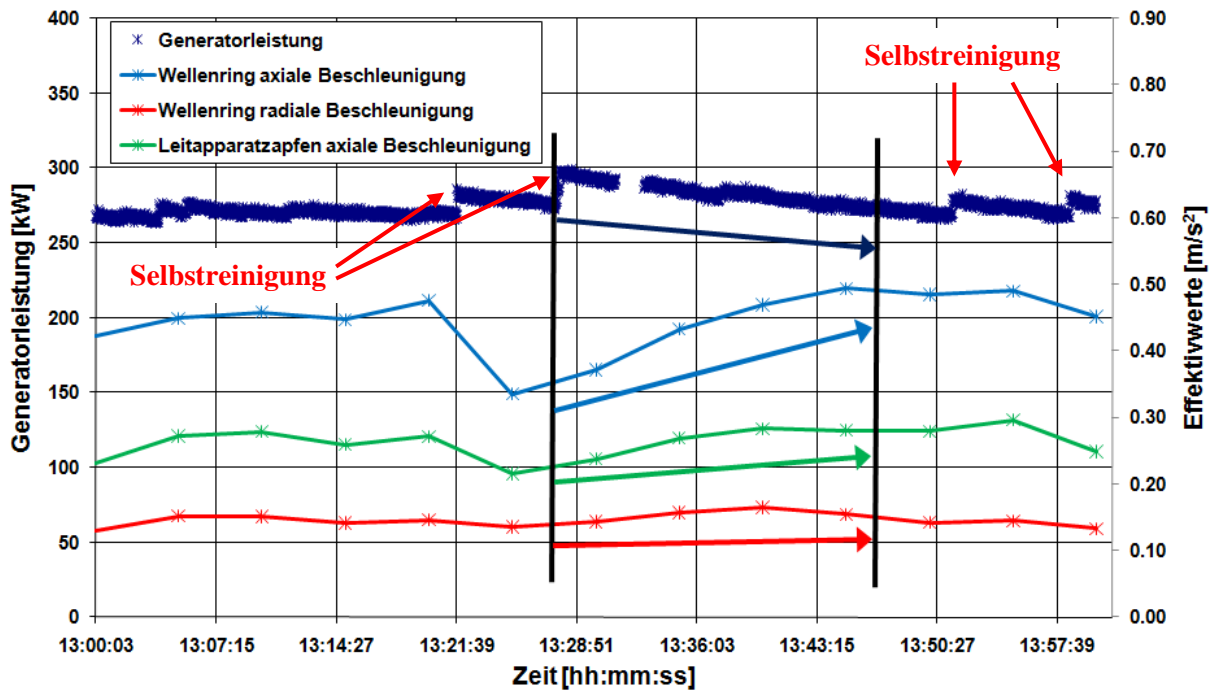


Fig. 53 Vergleich des Leistungsverlaufs mit den Effektivwerten der Schwingungsmessungen 2

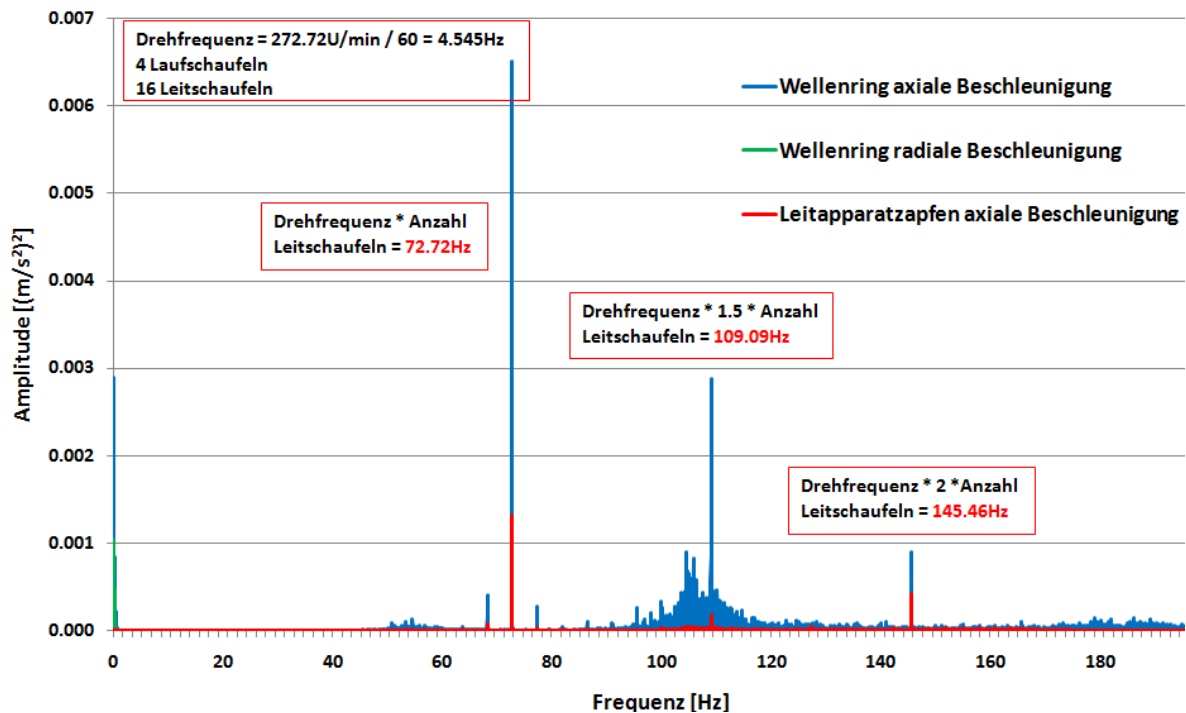


Fig. 54 Leistungsdichtespektrum einer Messreihe

Aus dem Leistungsdichtespektrum sind die Amplituden bei der Drehfrequenz der Turbine mal Anzahl Leitschaufeln und Vielfache davon für die 3 Messstellen abgebildet. Die Amplituden bei der axialen Messung am Wellenring sind um ein Mehrfaches grösser als die Amplituden der axialen Messung am Leitapparatzapfen. Die radialen Beschleunigungen am Wellenring sind unbedeutend. Bei den Auswertungen mehrerer nacheinander aufgenommener Messreihen ist keine Korrelation zwischen Amplitudenwachstum und Verschmutzungsgrad feststellbar.

Anhand einer Messuhr (vgl. Fig. 56) wurde zusätzlich die radiale Verschiebung der Turbinenwelle gemessen. Eine mögliche Hypothese für die Leistungsabnahme war, dass nicht die Verschmutzung, sondern eine Luftansammlung nach dem Laufrad für den Leistungsabfall verantwortlich ist. Eine kontinuierliche Ansammlung von Luft (Luftpolster) nach dem Laufrad würde zu einem möglichen Anheben der Turbine und darum der Turbinenwelle führen. Es konnte jedoch keine messbare Verschiebung bei Leistungsabfällen festgestellt werden. Bei Beobachtungen am Saugrohraustritt während der Spülvorgänge konnte ebenfalls kein erhöhter Luftausstoss gesichtet werden. Auch beim Rechen und in der Fassung wurden keine konstanten Wirbelbildungen (mögliche Luftansaugung durch Wirbel) beobachtet. Einzig wenn der Rechen in Betrieb ist, gibt es aufgrund der Ablösungen an der eingetauchten Führungsstange zeitlich veränderliche Wirbelbildungen (vgl. Fig. 55), welche Luft bis zu einer gewissen Tiefe ansaugen.



Fig. 56 Anordnung Messuhr



Fig. 55 Wirbelbildungen an Rechenführungsstange

3.2.6 Spülvariationen

Anhand der Resultate der numerischen Strömungssimulationen des IHS und der Bewertungsmatrix (Tab. 1) in Abschnitt 2.2.4 wurden folgende Spülprogramme im KWKW Freienstein untersucht:

- Variante 1: Leit- und Laufrad auf volle Öffnung, Ende.
- Variante 2: Leit- und Laufrad auf 15%, dann Leit- und Laufrad auf volle Öffnung, Ende.
- Variante 3: Leit- und Laufrad auf 15%, dann Leitrad voll auf und Laufrad auf 50%, Ende.
- Variante 4: Leitrad komplett schliessen, Laufrad auf 80%, Ende.
- Variante 5: Leitrad voll offen, Laufrad auf 10%, Ende.
- Variante 6: Leitrad auf 10%, Laufrad voll offen

Die Varianten 1 bis 3 wurden im KWKW Freienstein bereits eingesetzt oder wurden im Falle der Variante 3 im Berichtszeitraum installiert. Sie dauern jeweils rund 1.5min. Die neuen Varianten 4 bis 6 dauern jeweils nur 1min.

Das Ziel aller Spülprogramme ist, eine messbare Differenz der Generatorleistung vor und nach der Spülung nachzuweisen. Bei konstanter hydraulischer Leistung sollte sich demnach der Indexwirkungsgrad ebenfalls messbar ändern. Dies war bei den Auswertungen der vorliegenden Messkampagne nicht eindeutig der Fall. Dies ist vor allem auf die Geschwindigkeitsmessung zurückzuführen, welche nur punktuell eine Geschwindigkeitsinformation misst. Zudem kann der PEMS-Sondenkopf (vgl. Anhang A2) auch verschmutzt werden und die Messungen werden verfälscht. Deshalb wird die Effizienz der

Spülprogramme anhand der Leistungskurven bewertet. Bei allen Varianten wurde versucht, die anfallende hydraulische Leistung konstant zu halten. Anhand des Zuflusses der Töss wurde die maximal mögliche Leit- / Laufradkombination derart eruiert, dass eine Messung über 8 Stunden eine konstante hydraulische Leistung ermöglichen sollte. Die daraus resultierenden Leit- und Laufradstellungen wurden fest eingestellt, so dass keine Regulierbewegungen möglich waren. Während dieser rund 8 Stunden sollte der jeweilige Spülvorgang 4mal, also etwa alle 2 Stunden erfolgen. In den nachfolgenden Diagrammen sind jeweils 5 – 6 Stunden dargestellt, so dass mindestens 3 Spülvorgänge ersichtlich sind. Zudem sind die Verläufe der Lagertemperatur aufgeführt, um ein Indiz der Lagerbelastung vor, während und nach der Spülung zu erhalten. Die Skalierungen der Temperatur sind immer gleich, für die Generatorleistung ist ein Ausschnitt von 100kW dargestellt.

- **Spülvariante 1: Leit- und Laufrad auf volle Öffnung, Ende**

Die Variante 1 ist die Ursprungsvariante im KWKW Freienstein (vgl. Interview im Anhang A4), welche auch vom Hersteller empfohlen wurde.

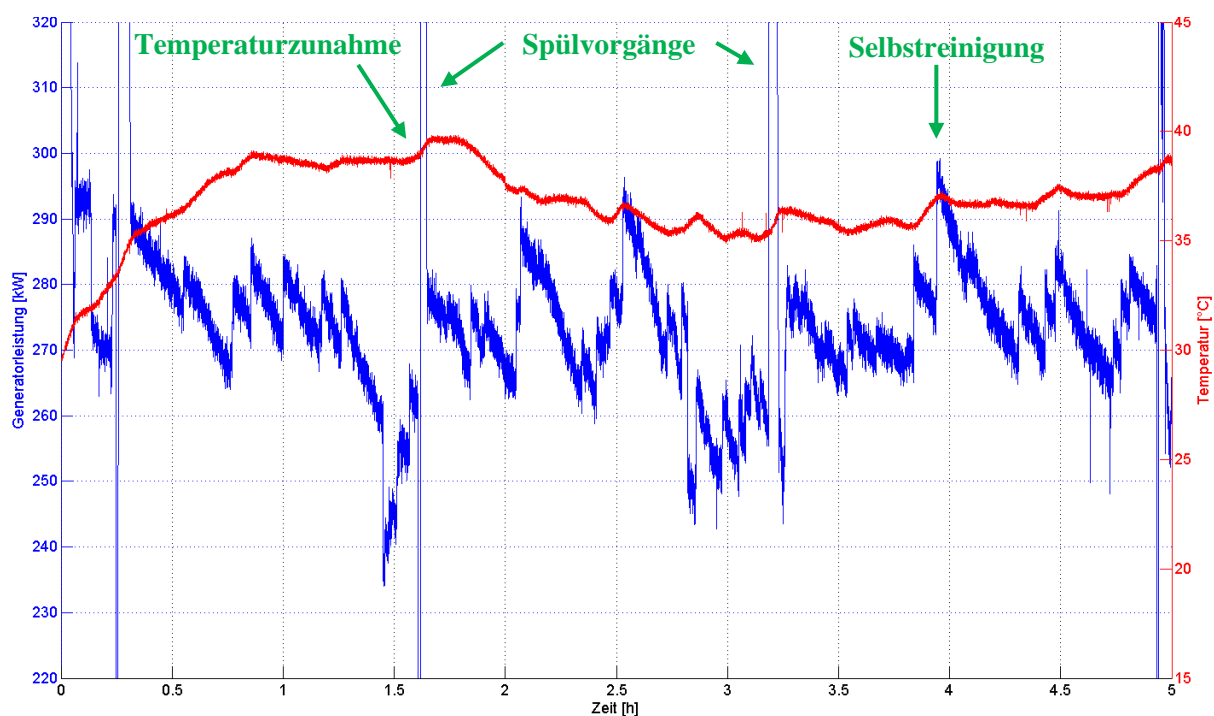


Fig. 57 Generatorleistung und Lagertemperatur für die Spülvariante 1

Die Leistungen sind nach dem Spülvorgang grösser als vorher. Anhand des Verlaufs zwischen den Spülvorgängen zeigt sich, dass die Turbine nicht vollständig gereinigt wurde, denn die Leistung erreicht das Maximum nicht nach dem Spülvorgang, sondern wird durch eine Selbstreinigung erzielt. Erstaunlicherweise zeigt die vom Hersteller empfohlene Spülung als einzige eine kurzfristige Temperaturzunahme nach einem Spülvorgang auf.

- **Spülvariante 2: Leit- und Laufrad auf 15%, dann Leit- und Laufrad auf volle Öffnung, Ende**

Die Variante 2 wurde als Verbesserungsvorschlag zu Variante 1 im KWKW Freienstein implementiert. Gemäss Aussagen des Betriebsverantwortlichen war die Verschmutzung des Wassers während der in Fig. 58 dargestellten Messperiode sehr gering. Daher ist es schwierig, eine Aussage über die Effizienz dieser Spülvariante zu machen. Weil die Variante sehr ähnlich ist wie die Variante 3, wäre eine ähnlich gute Spülwirkung zu erwarten. Der Temperaturverlauf zeigt, im Gegensatz zur Variante 1, keine Erhöhungen nach einem

Spülvorgang. Daraus lässt sich schliessen, dass die Lagerbelastung durch das Spülen nicht zusätzlich erhöht wird.

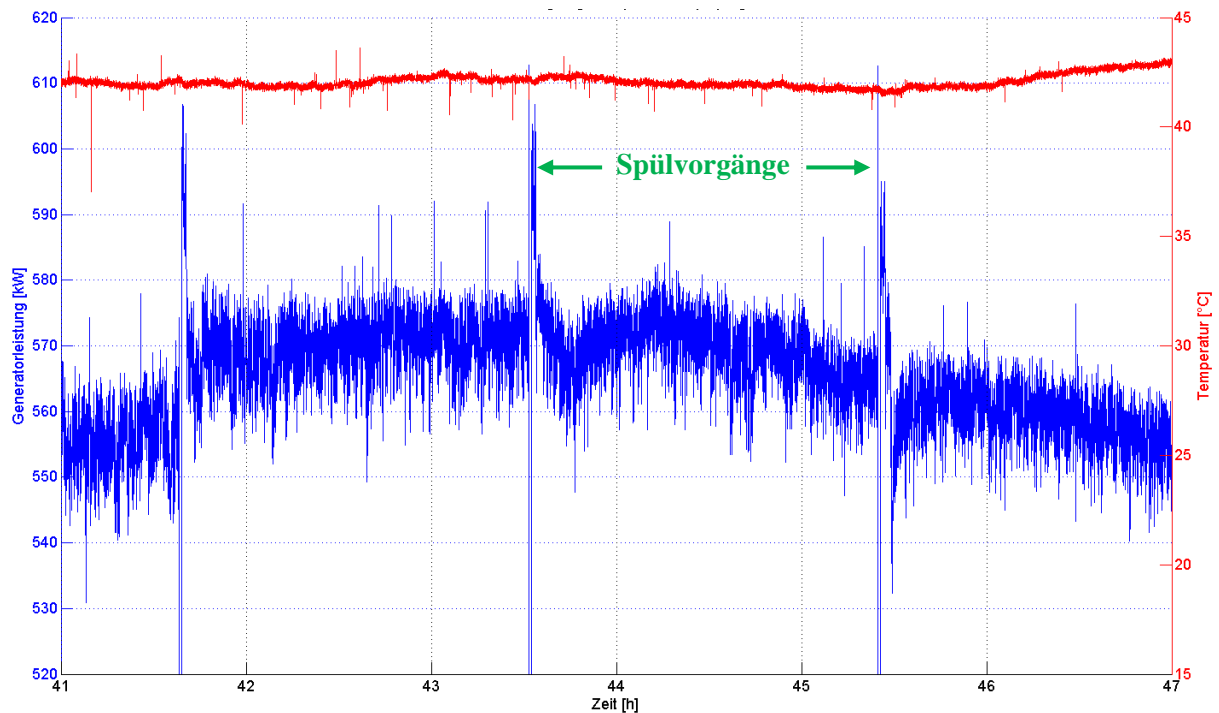


Fig. 58 Generatorleistung und Lagertemperatur für die Spülvariante 2

- **Spülvariante 3: Leit- und Laufrad auf 15%, dann Leitrad voll auf und Laufrad auf 50%, Ende**

Die Spülvariante 3, welche seit Oktober 2008 im KWKW Freienstein eingesetzt wird, zeigt einen eindeutigen Zusammenhang einerseits zwischen angenommener Verschmutzungszunahme und Leistungsreduktion und andererseits zwischen Spülvorgang und Leistungserhöhung (vgl. Fig. 59). Es ist zu erkennen, dass nicht nach jeder Spülung dasselbe Leistungsniveau erreicht wird, dies ist auf die hydraulische Leistung zurückzuführen, die während dieser Messperiode kontinuierlich leicht zunimmt. Die Lagertemperatur nimmt bei jeder Spülung ab. Deshalb werden auch bei dieser Spülvariante keine erhöhten Lagerbelastungen auftreten.

- **Spülvariante 4: Leitrad komplett schliessen, Laufrad auf 80%, Ende**

Die Spülvariante 4 leitet sich von der effektivsten Spülung nach den numerischen Strömungssimulationen ab, für Anlagen wo die Schaufeln nicht durchgeschwenkt werden können. Diese Variante konnte im KWKW Freienstein nicht realisiert werden. Da die Turbinenachse oberhalb des Unterwasserpegels liegt, fehlt bei kompletten Schliessen des Leitapparates Wasser zum Wegspülen der Verschmutzung. Zudem sprach bei Tests infolge motorischen Betriebs der Generatorschutz an, da die Turbine zu viel Leistung gezogen hat. Zudem bewirkten die Richtungsänderungen der Kräfte derart spürbare Lagerbelastungen, dass diese Variante für das KWKW Freienstein nicht sinnvoll ist.

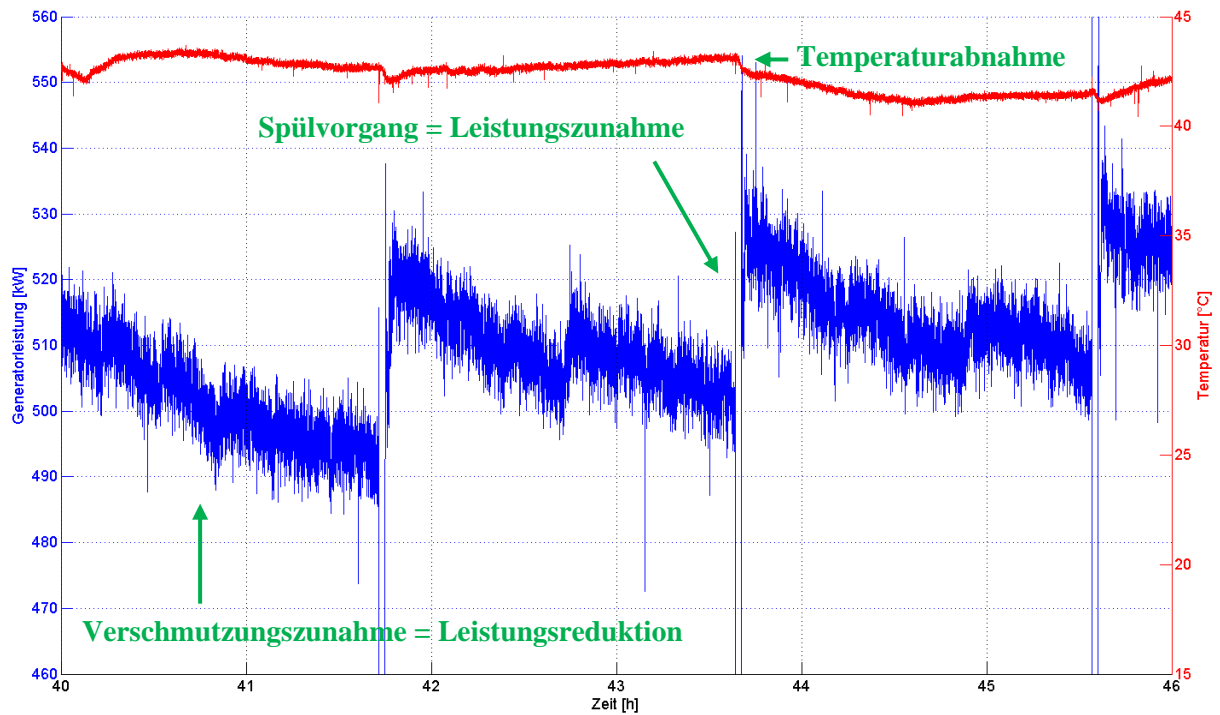


Fig. 59 Generatorleistung und Lagertemperatur für die Spülvariante 3

- **Spülvariante 5: Leitrad voll offen, Laufrad auf 10%, Ende**

Anhand des Leistungsverlaufs in Fig. 60 lässt sich schliessen, dass diese Variante unbrauchbar ist und zu keiner Leistungssteigerung durch den Spülvorgang führt. Dieses Ergebnis stimmt mit den Untersuchungen der numerischen Strömungssimulationen überein, wonach ein fast geschlossenes Laufrad bei gleichzeitiger Öffnung des Leitapparates keinen Spüleffekt mit sich bringt.

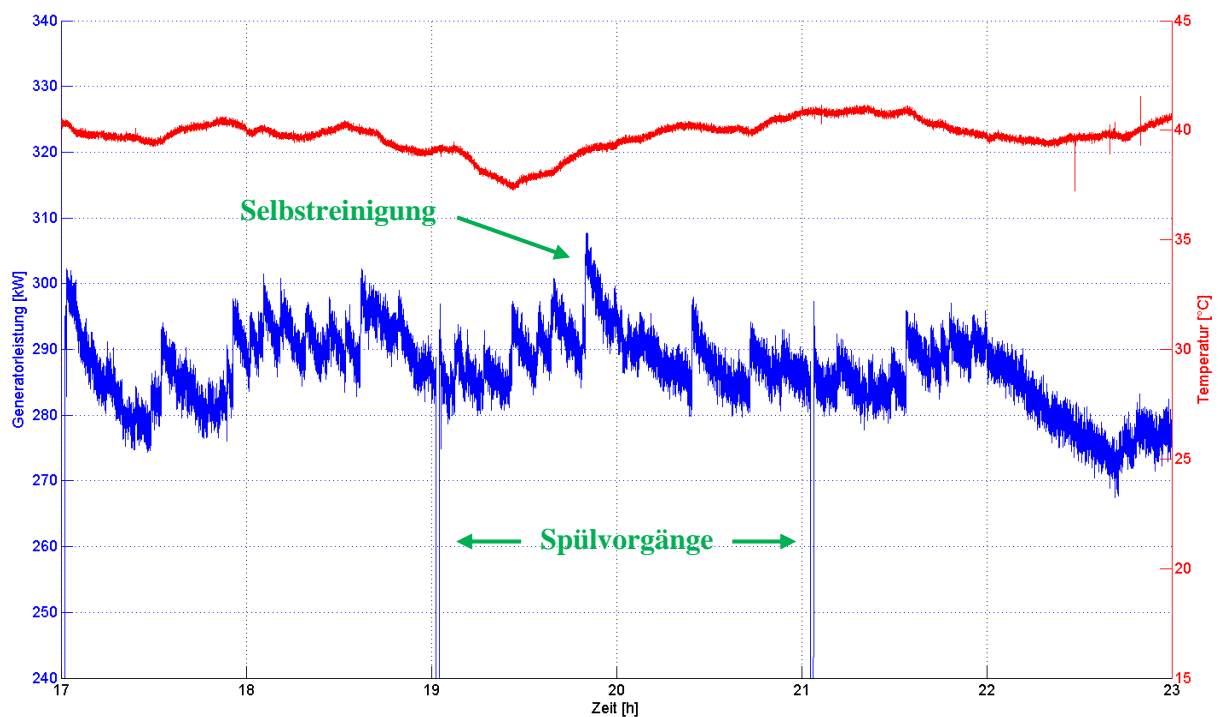


Fig. 60 Generatorleistung und Lagertemperatur für die Spülvariante 5

- **Spülvariante 6: Leitrad auf 10%, Laufrad voll offen, Ende**

Das Leitrad bis auf eine Öffnung von 10% zu schliessen, wäre die geeignetste Variante, die sich aus den numerischen Strömungssimulationen ergab. Schlussendlich wurden die Spülvorgänge mit einer Leitradöffnung von 15% durchgeführt. Unter dieser Leitradöffnung ergeben sich derart starke Vibrationen, dass die dauerhafte Anwendung nicht vertretbar ist.

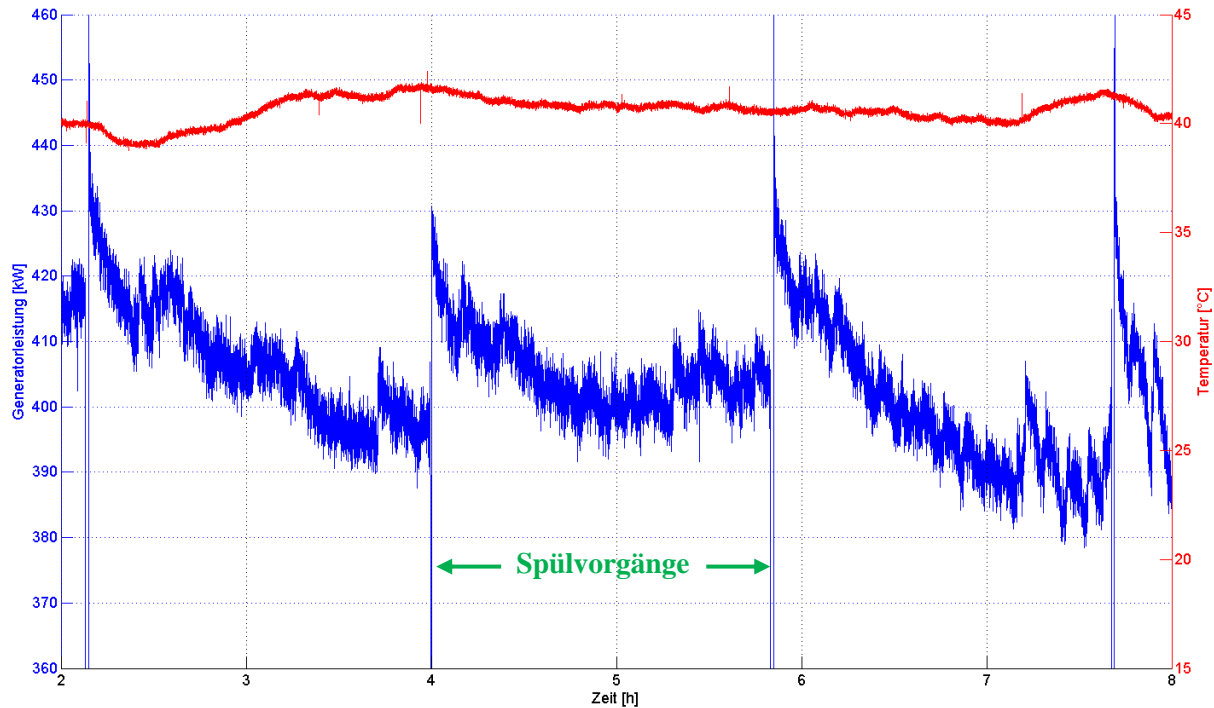


Fig. 61 Generatorleistung und Lagertemperatur für die Spülvariante 6

Diese Spülvariante in Fig. 61 zeigt wie Variante 3 markante Leistungssprünge durch den Spülvorgang. Die Leit- und Laufradstellungen sind genau umgekehrt vorgegeben wie in Variante 5. Es sind keine Auswirkungen auf die Lagertemperatur feststellbar.

- **Vergleich**

Für die jeweiligen Spülvarianten wurden die Leistungssprünge notiert. In der Tabelle 2 sind deren Mittelwerte ausgewiesen. Die Variante 2 wird nicht beurteilt, da die Resultate keine eindeutigen Schlüsse zulassen. Die Variante 4 wurde nicht durchgeführt.

Spülprogramm	Leistungssprung	Bewertung
1	9kW	3
3	26kW	2
5	2kW	4
6	29kW	1

Tab. 2 Bewertung der Spülvarianten aus den Messungen im KWKW Freienstein

Der Bewertungsschlüssel gibt Antwort auf die Frage: Wie ist der Spüleffekt der jeweiligen Variante?

1: sehr gut 2: gut 3: gering 4: sehr schwach

Aus der Beurteilungsmatrix sowie den gesamten Spülvariationen lässt sich zusammenfassen:

- Die Spülvariante 5 bringt keinen Spüleffekt.
- Die Spülvariante 1 bringt einen kleinen Spüleffekt. Nachteilig ist aber vor allem, dass bei Vollast keine Spülung mehr möglich ist, da die Leit- und Laufradstellungen bereits aufs Maximum eingestellt sind.
- Die Spülvarianten 3 und 6 weisen nahezu die gleichen Leistungssprünge aus. Der Spüleffekt der Variante 3 ist demnach vor allem auf den ersten Teil zurückzuführen, wo Leit- und Laufrad fast geschlossen werden.
- Weil die Spülvariante 5 keinen Spüleffekt bringt, ist der zweite Teil der Spülvariante 3 hinfällig.
- Die Resultate der Spülvariationen im KWKW Freienstein decken sich mit den Erkenntnissen aus den numerischen Strömungssimulationen.
- Es ist vor allem die Leitradstellung, die die Effizienz der Spülung ausmacht.
- Nachteilig für die Spülvariante 6 ist, dass mit erhöhten Lagerbelastungen zu rechnen ist. Dieser Umstand muss mit dem Turbinenhersteller abgesprochen werden.
- Die Spüldauer der effektivsten Variante 6 betrug 1min. Durch Beurteilung der Leistungsverläufe durch die KWKW – Betreiber liesse sich diese Zeit optimieren, um den kleinst möglichen Energieverlust zu erzielen.

Diese Zusammenfassung stützt sich auf die aufgenommenen Messreihen. Diese Messreihen wurden nicht zur gleichen Zeit durchgeführt und damit sind Unterschiede in der Wasserqualität oder im Verschmutzungsgrad zwischen den Messreihen unvermeidbar. Deshalb müssen die Leistungssprünge von den KWKW – Betreibern über einen längeren Zeitraum betrachtet werden, um den effektivsten Spülvorgang für ihre Anlage zu eruieren.

3.2.7 Energieverlust

Die durch die Verschmutzung verursachten Energieverluste setzten sich zusammen aus den zeitlich sinkenden Generatorleistungen während des Betriebs und aus der verlorenen Energie während der Spülvorgänge.

Zur Berechnung des Verlustes wird eine Messperiode von 10 Stunden analysiert, bei welcher der Zufluss der Töss die Ausbauwassermenge der Turbine übertraf und somit von einer konstanten hydraulischen Leistung ausgegangen werden kann. Dementsprechend blieben auch die Leit- und Laufradstellungen konstant, ausser während der Spülvorgänge. In Fig. 62 ist die Generatorleistung während dieses Betriebs dargestellt. Die Leistung nimmt zwischen den Spülvorgängen infolge steigender Verschmutzung ab. Durch die Spülvorgänge (Variante 3) sind die charakteristischen Leistungssprünge feststellbar. Gleichzeitig ist die mit dem entsprechenden Wirkungsgrad berechnete ideale Generatorleistung von 535kW eingetragen. Die durchschnittlich abgegebene Generatorleistung beträgt in dieser Messperiode 505kW. Damit beträgt die durchschnittliche Verlustleistung 30kW. Dies entspricht einer prozentualen Leistungseinbusse von 6%.

Die blaue Kurve in Fig. 63 stellt die Differenz der aufsummierten Energieverläufe aus idealer und durchschnittlicher Generatorleistung dar. Dies entspricht der Energie, die infolge Verschmutzung in diesen zehn Stunden verloren ging. Die Verlustenergie beträgt 298kWh.

Für die Berechnung des Verlustes an Jahresenergie wird angenommen, dass die evaluierten 6% Energieverlust nur für die Zeitspanne von April bis November berücksichtigt werden, denn während dieses Zeitraums ist die Verschmutzung am intensivsten.

Für das KWKW Freienstein ergibt sich:

Durchschnittliche Jahresenergieproduktion der Jahre 2005 – 2008:	2'114'423kWh
Durchschnittliche Energieproduktion in den Monaten April – November:	1'294'714kWh
Jährliche Energieverluste:	6% von 1'294'714kWh 77'683kWh

Damit entsprechen die abgeschätzten jährlichen Energieverluste infolge Verschmutzung im KWKW Freienstein 3.7% der Jahresenergieproduktion.

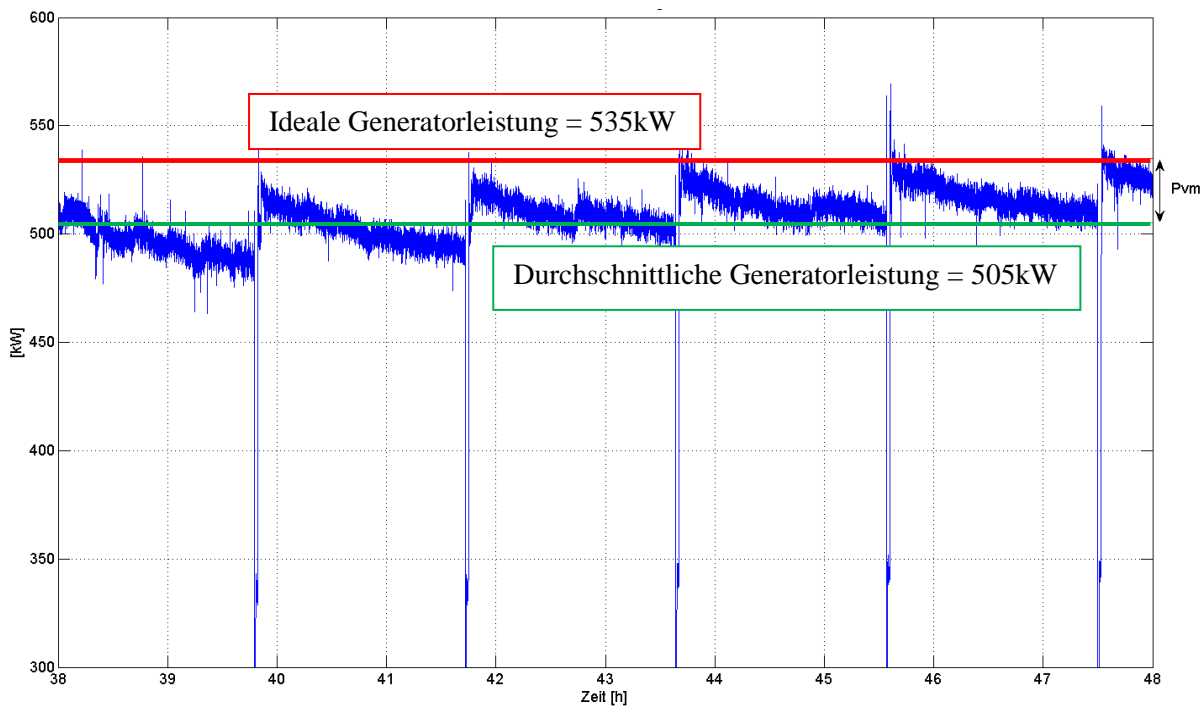


Fig. 62 Verlauf der Generatorleistung

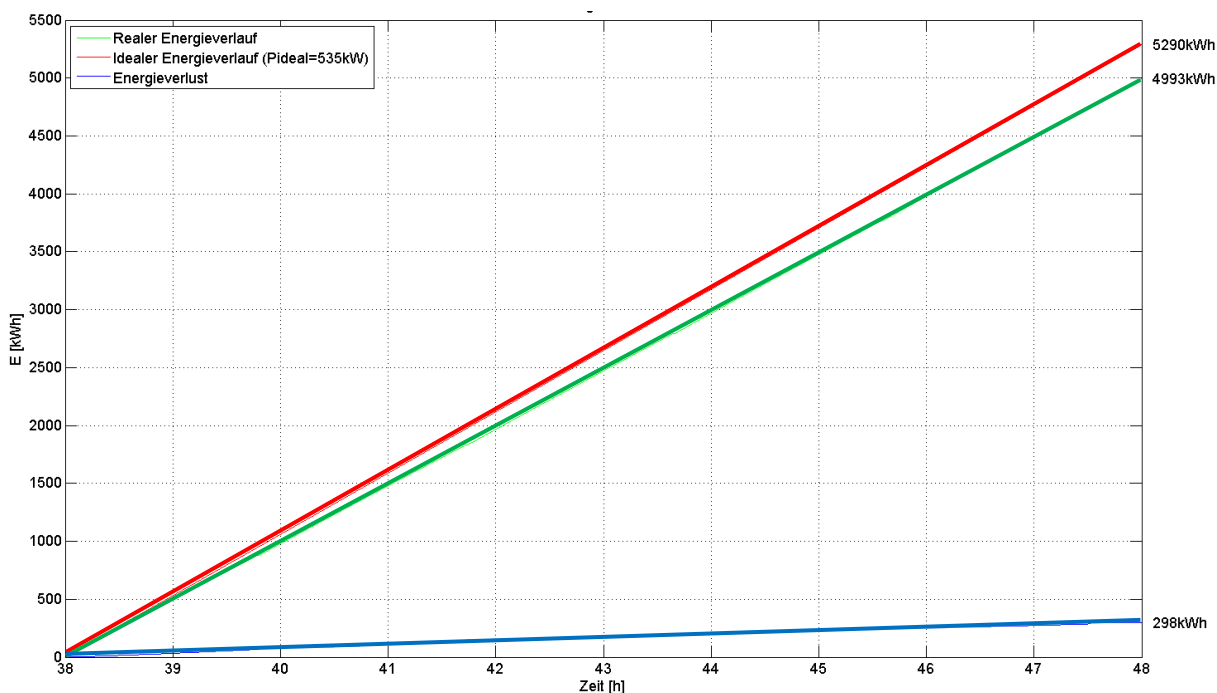


Fig. 63 Aufsummierte Energien und Energieverlust

4 INTERVIEWS MIT KWKW – BETREIBERN

4.1 Einsatzbereiche der Turbinen in $f(H, Q)$ und in $f(H, nq)$

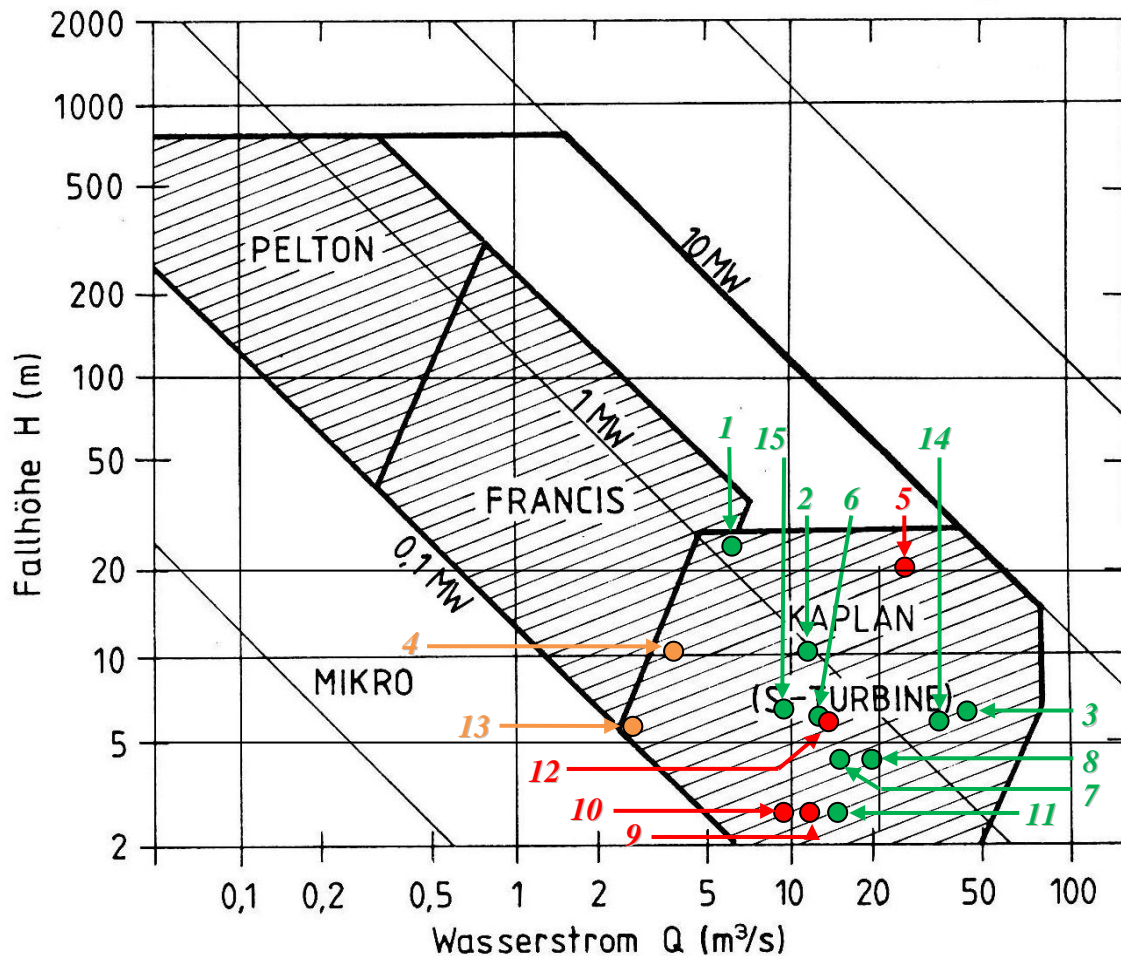


Fig. 64 Turbinentypen in Funktion der Fallhöhe und des Volumenstromes [21]

1:	1957	Sarneraa	Kaplan	6m³/s	23m
2:	2003	Emmenweid	Kaplan	12m³/s	10.5m
3:	1978	Rathausen	Rohrturbine	45m³/s	6.5m
4:	1957	Tecnicama	Francis	4m³/s	10.4m
5:	1952	Neuhausen	Francis	25m³/s	20.1m
6:	2004	Freienstein	Kaplan	12m³/s	6m
7:	1974	Windisch	MG 1 und 2 Kaplan	15.3m³/s	4.5m
8:	1926	Windisch	MG 3 Propeller	19m³/s	4.5m
9:	2004	Stroppel	MG 1 Francis	11m³/s	2.3m
10:	1907	Stroppel	MG 2 Francis	9m³/s	2.3m
11:	1996	Stroppel	MG 3 Kaplan	15m³/s	2.3m
12:	1947	Bürglen	MG 1 Doppelfrancis	13m³/s	5.9m
13:	1932	Bürglen	MG 2 Francis	3m³/s	5.9m
14:	2002	Au-Schönenberg	Hauptkaplan	34m³/s	5.9m
15:	2002	Au-Schönenberg	Dotierkaplan	9m³/s	6.4m

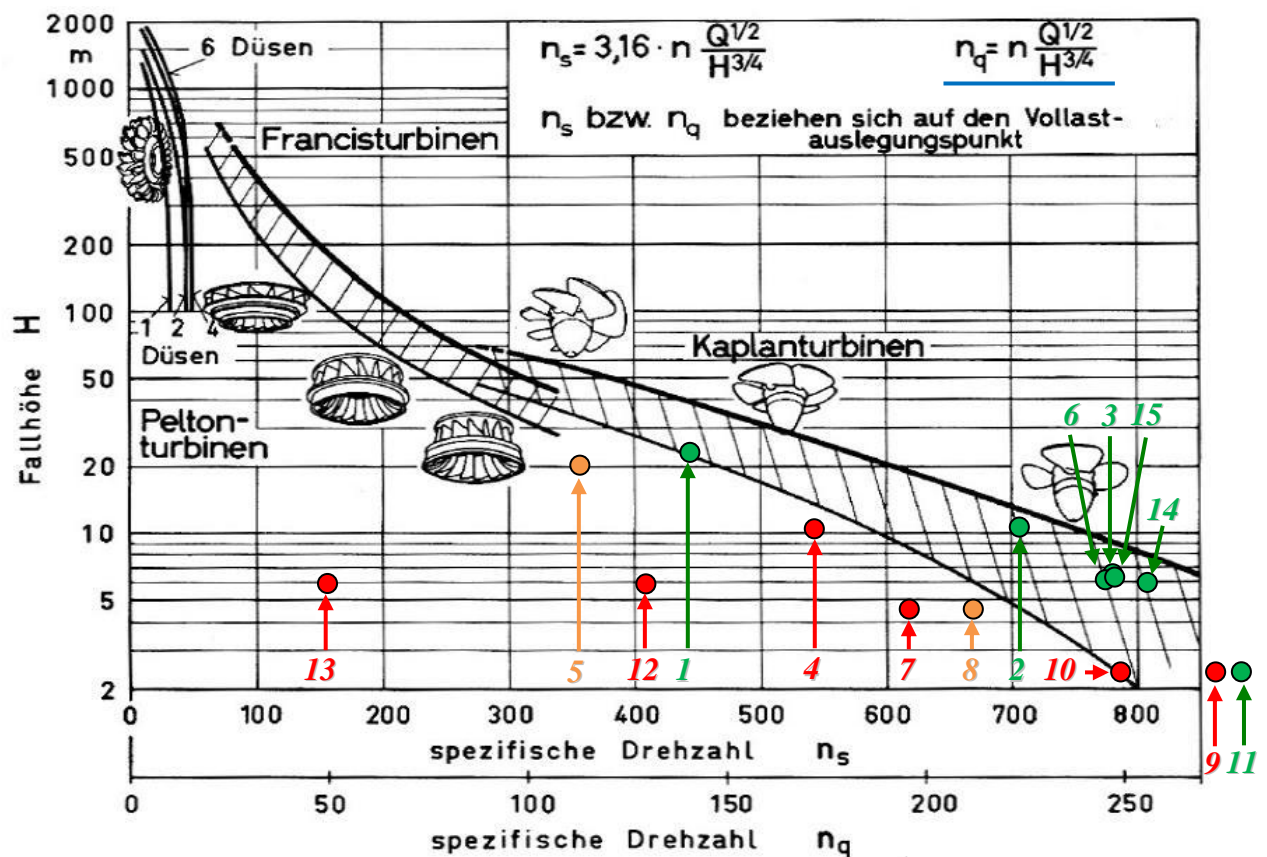


Fig. 65 Turbinentypen in Funktion der Fallhöhe und der spezifischen Drehzahl [Quelle: Voith]

1:	1957	Sarneraa	Kaplan	600U/min	139.9min ⁻¹
2:	2003	Emmenweid	Kaplan	375U/min	222.7min ⁻¹
3:	1978	Rathausen	Rohrturbine	150U/min	247.2min ⁻¹
4:	1957	Tecnicama	Francis	500U/min	172.7min ⁻¹
5:	1952	Neuhausen	Francis	214.3U/min	112.9min ⁻¹
6:	2004	Freienstein	Kaplan	272.7U/min	246.4min ⁻¹
7:	1974	Windisch	MG 1 und 2 Kaplan	155U/min	196.2min ⁻¹
8:	1926	Windisch	MG 3 Propeller	150U/min	211.6min ⁻¹
9:	2004	Stroppel	MG 1 Francis	155U/min	275.3min ⁻¹
10:	1907	Stroppel	MG 2 Francis	155U/min	249.0min ⁻¹
11:	1996	Stroppel	MG 3 Kaplan	135U/min	280.0min ⁻¹
12:	1947	Bürglen	MG 1 Doppelfrancis	136U/min	129.5min ⁻¹
13:	1932	Bürglen	MG 2 Francis	107U/min	49.0min ⁻¹
14:	2002	Au-Schönenberg	Hauptkaplan	167U/min	257.2min ⁻¹
15:	2002	Au-Schönenberg	Dotierkaplan	333U/min	248.3min ⁻¹

Die Beurteilung anhand eines Ampelsystems gibt Antwort auf die Frage: Sind die eingebauten Turbinen der KWKKW im typischen Einsatzbereich der standardisierten Hydraulik?

nicht Standard	Übergangsbereich	Standard

In Fig. 64 sind die Einsatzbereiche der Turbinentypen in Funktion der Fallhöhe und der zur Verfügung stehenden Durchflussmenge dargestellt. Es wird der Leistungsbereich von 0.1 bis 10MW kategorisiert, wobei die schraffierten Flächen als Bereiche "standardisierbare Hydraulik" bezeichnet werden, vgl. Haas [21]. In Fig. 65 sind die Einsatzbereiche der Turbinentypen in Funktion der Fallhöhe und spezifischen Drehzahl n_q dargestellt. Die Berechnung der spezifischen Drehzahl ist in demselben Diagramm oben rechts angegeben. Zu den jeweiligen durchnummerierten KWKW sind das Baujahr (Turbine), die Fallhöhe, der Durchfluss und die Drehzahl angegeben. Mit Hilfe eines Ampelsystems wird qualitativ beurteilt, ob die einzelnen Turbinen in den typischen Einsatzbereichen liegen oder nicht.

Aus Fig. 64 ist ersichtlich, dass alle eingesetzten Turbinen anhand ihrer Fallhöhe und ihrem Durchfluss im schraffierten Bereich der Kaplan turbinen zu liegen kommen. Die Francisturbinen des KWKW Tecnicama und Bürglen (MG 2) liegen dabei fast auf der Grenze und werden daher nicht beurteilt. Die übrigen Francisturbinen der KWKW Neuhausen, Stroppe l und Bürglen liegen anhand dieser Kategorisierung klar nicht innerhalb ihres üblichen Bereiches. Dabei sticht vor allem die 2004 eingesetzte Francisturbine der MG 1 im KWKW Stroppe l ins Auge. Wobei im gleichen Kraftwerk und mit der gleichen Fallhöhe im Jahre 1996 eine neue Kaplan turbine eingesetzt wurde. Der Grund eine Francisturbine zu wählen, lag in der ursprünglichen Typenwahl im KWKW Stroppe l mit 3 Francisturbinen aus dem Jahre 1907. Die 1996 eingebaute Kaplan turbine entspricht zwar dem heutigen gängigen Einsatzbereich, das Saugrohr wurde ursprünglich jedoch für eine Francisturbine ausgelegt. Deshalb wurde auch vom Betriebsverantwortlichen angemerkt, dass das Saugrohr gar nicht zur Kaplan turbine passen würde, dementsprechend wird dieser MG auch der schlechteste Wirkungsgrad nachgesagt. Eine Beobachtung der Austrittsströmungen aus dem Saugrohr im Unterwasser des KWKW Stroppe l, bestätigte den grössten Dissipationsschwall bei der Kaplan turbine.

Die Einteilung der eingesetzten Turbinen nach ihrer Schnellläufigkeit ist in Fig. 65 aufgeführt. Die spezifische Drehzahl beschreibt den "Namen" der Turbine. Sie bildet die Ausgangslage für die Dimensionierung der Maschine. Auffallend ist auch hier, dass keine Francisturbine im üblichen Einsatzbereich zu liegen kommt. Beim KWKW Windisch wurden im Jahre 1974 zwei neue Kaplan turbinen eingesetzt, die ursprüngliche Propellerturbine ist aber näher am üblichen Bereich und wird wohl geometrisch optimaler ausgelegt sein, als die neuen Kaplan turbinen, die ans alte Anlagendesgin angepasst werden mussten. Auch die horizontalachsige Francisturbine des KWKW Tecnicama passt mit ihrer geometrischen Gestaltung nicht in das übliche Einsatzschema. Beim KWKW Bürglen, deren Turbinen im Gesamten aus dem Rahmen fallen, wäre ein Erneuerungsprojekt wünschenswert.

4.2 Antworten auf Fragestellungen

• Eingesetzte Spülprogramme

Folgende Aufstellung zählt die eingesetzten Spülvarianten unter Einbezug der in der Einleitung (Abschnitt 1) erwähnten Spülprogramme auf:

- Doppeltreguliert
 - Abstellen der Maschine: 2 Turbinen
 - Verstellen des Leit- und Laufrades: 5 Turbinen
- Einfachreguliert
 - Abstellen der Maschine: 2 Turbinen
 - Abstellen des Wasserzuflusses: 1 Turbine
 - Schliessen des Leitapparates: 2 Turbinen

Wenn eine einfachregulierte Turbine vorhanden ist, wird entweder ein Abstellen der Maschine in Erwägung gezogen oder der Leitapparat mehr geschlossen als im Normalzustand. Im KWKW Neuhausen wird der Leitapparat auf 30% geschlossen. Aus den numerischen Strömungssimulationen und aus den Messergebnissen ist abzuleiten, dass diese Leitradstellung wohl nicht genügt, um eine effektive Spülung zu garantieren. Wenn es die Lagerbelastung zulässt, sollten hier einige Versuche mit Leitradstellungen von 20% oder 10% durchgeführt werden. Erwähnenswert bei diesem eingesetzten Spülprogramm ist, dass die geschlossene Leitradstellung nur 12s andauert. Die Zeitdauer des Spülvorgangs hat einen direkten Einfluss auf die Energieverluste. Hier hat das Schliessen des Leitapparates einen wesentlichen Vorteil gegenüber dem Abstellen der Maschine. Beim KWKW Tecnicama wird der Leitapparat ganz geschlossen, aber nur für 3s. Der ganze Spülvorgang, von der Auslösung der Spülung bis zum Wiedererreichen der Sollstellungen, dauert nur 30s. Die Leistungssteigerungen sind aber mit 5 - 10% dennoch beträchtlich. Dies deutet darauf hin, dass eine gestörte Schaufelprofilumströmung innert kurzer Zeit die Verschmutzung zu lösen vermag. Das Abstellen des Wasserzuflusses ist im KWKW Bürglen eine anlagenspezifische Sonderform.

Bei den doppeltregulierten Turbinen wird hauptsächlich eine Variation der Leit- und Laufradstellungen vorgenommen. Das Verbesserungspotential im KWKW Freienstein wurde bereits im Abschnitt 3.2.6 erläutert. Im KWKW Au-Schönenberg ist vom Hersteller ein Spülprogramm implementiert worden. Dieses sieht vor, zuerst das Laufrad in schliessende Position (15%) und das Leitrad in offene Position (85%) zu verschieben, und anschliessend wird auch das Leitrad in gleiche schliessende Position wie das Laufrad verstellt. Der ganze Vorgang dauert etwas weniger als 2min. Wie aus den Messresultaten ersichtlich (vgl. Abschnitt 3.2.6), bringt das Verstellen des Laufrades in schliessende Position einen geringen Spüleffekt. Deshalb könnte dieser Teil des Spülprogrammes weggelassen werden. Im KWKW Sarneraai wird das Laufrad mehrmals bei Normalstellung des Leitrades verstellt. Wie aus der Beurteilungsmatrix der numerischen Strömungssimulationen in Abschnitt 2.2.4 ersichtlich ist, bringt eine Variation des Laufrades bei normaler Stellung des Leitrades einen geringen Spüleffekt. Dasselbe gilt für das Spülprogramm im KWKW Emmenweid. Im KWKW Rathausen, einzige installierte Rohrturbine der befragten Anlagen, wird das Leitrad zuerst auf 50% geschlossen und anschliessend das Laufrad auf ebenfalls 50% nachgefahren. Ob sich die Resultate von numerischen Strömungssimulationen an einer Kaplan turbine und Messergebnissen am KWKW Freienstein auch auf Rohrturbinen übertragen lässt, ist nicht erwiesen. Es sollten dennoch Versuche durchgeführt werden, bei denen die Auswirkungen einer weiteren Schliessung des Leitapparates analysiert werden. Der zweite Teil des Spülprogramms mit dem Verstellen des Laufrades bringt wohl keinen zusätzlichen Spüleffekt und kann damit weggelassen werden.

Es sei erwähnt, dass die Leistungssprünge und Effizienz der Spülprogramme in Abhängigkeit der Spüldauer (1min, 30s usw.) und der Leitradstellungen (30%, 15% usw.) bei jedem KWKW unterschiedlich ausfallen werden und zeitlich variabel sind infolge Verschmutzungsgrad.

- **Gibt es ein genaues Spülkriterium?**

- Ja: 1 Anlage
- Nein: 9 Anlagen

In 9 von 10 Anlagen ist kein definiertes Spülkriterium vorhanden. In diesen Anlagen wird fast ausnahmslos anhand einer individueller Beurteilung des Leistungsverlaufs die Spülung ausgelöst. Zusätzlich kann in 7 Anlagen das Spülprogramm nur manuell in der Zentrale durchgeführt / ausgelöst werden. Damit ist immer ein entsprechender Personalaufwand verbunden, was bei KWKW ein beträchtliches Verbesserungspotential mit sich bringt. In 2 der 9 Anlagen kann zumindest ein festes Zeitintervall der Spülauslösung eingestellt werden. Es hat sich gezeigt, dass in mehreren Anlagen der Leistungsverlauf während den

periodischen Visiten der Anlagen beurteilt wird. Findet keine Visite statt, kann sich die Leistung unter Umständen über mehrere Tage auf einem "verschmutzten Niveau" befinden.

Beim KWKW Au-Schönenberg sind vom Hersteller zwei Spülkriterien hinterlegt worden. Beim Ansprechen eines der beiden Kriterien wird automatisch eine Spülung ausgelöst. Das überlagerte Spülkriterium ist ein Zeitintervall (6h, 12h oder 24h), das vom Betriebsverantwortlichen eingestellt werden kann. Die Zeitintervalle werden mittels steigender Betriebserfahrung justiert. Die Messungen im KWKW Freienstein, sowie nach Aussagen anderer KWKW – Betreiber, haben jedoch gezeigt, dass Spülintervalle von 1h – 2h üblich sind. Deshalb ist im KWKW Au-Schönenberg ein zweites Spülkriterium aktiv. Wird eine zu grosse Leistungsdifferenz, von Ist- zu Sollleistung registriert, wird automatisch ein Spülvorgang ausgelöst. Die Sollleistung wird aus der Leit- und Laufradstellung (Volumenstrom) und der aktuellen Fallhöhe bestimmt, der Turbinenwirkungsgrad wird vom Hersteller angegeben. Hier ist ein Verbesserungspotential für die Regelung vorhanden, weil der Turbinenwirkungsgrad bei KWKW vielfach nicht mit einer absoluten Messung nach IEC Standard 60041 nachgewiesen wird und damit die Garantie des Herstellers nicht überprüft ist.

- **Wo treten die Verschmutzungen auf?**

Hier ergibt sich keine eindeutige Priorisierung. Fast alle befragten Betriebsverantwortlichen gaben an, dass sicherlich am Leitrad Ablagerungen auftreten. Diese Antworten leiten sich zum grössten Teil aus Beobachtungen bei einer Visite der Turbine ab. Dabei wird die Turbine natürlich abgeschaltet, was wie schon erwähnt ein sehr effektiver Spülvorgang ist. Deshalb können Ablagerungen an den Laufrädern meistens nicht mehr nachgewiesen werden.

- **Wünschen Sie sich ein anderes Spülprogramm?**

- Ja: 7 Anlagen
- Nein: 3 Anlagen

Es wurde bei den Interviews ersichtlich, dass die Personalsituation bei KWKW nicht vergleichbar ist mit derer von Grosswasserkraftwerken. Deshalb hat für viele der Befragten eine Automatisierung der Spülauslösung Priorität. Als automatisiertes Spülkriterium wird mehrmals eine Wirkungsgradabhängigkeit angegeben. Bei der Messkampagne im KWKW Freienstein konnte kein klarer Zusammenhang zwischen Verschmutzungszunahme und Wirkungsgradabfall festgestellt werden. Dies wird vor allem auf die gewählte Indexvolumenstrombestimmung zurückzuführen sein. Punktuelle Geschwindigkeitsmessungen sind anfällig auf zeitlich veränderliche Strömungen, wie sie bei Flusskraftwerken infolge Entnahme an einem natürlichen Flussverlauf oft vorkommen.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Vor allem im Herbst, bei erhöhtem Laubeintrag in das Fliessgewässer, oder bei Hochwassern leiden KWKW unter der Verschmutzung verschiedener Anlagenkomponenten wie Rechen, Stütz-, Leit- und Laufradschaufeln. Bei stärkerer Verschmutzung am Rechen kommt der Leistungsfähigkeit der Rechenreinigungsanlage eine grosse Bedeutung zu. Bei einigen befragten KWKW müssen während dieser Zeit die Reinigungsarbeiten von Hand ausgeführt werden, da die automatische Rechenreinigungsanlage überfordert oder unterdimensioniert ist. Dies erfordert einen erhöhten Personalaufwand, welcher bei KWKW betriebswirtschaftlich besonders ins Gewicht fällt. Deshalb sollten schon bei der Projektierung Extremsituationen mitberücksichtigt werden, um beim langjährigen Betrieb Überraschungen vermeiden zu können. Dabei kann vor allem ein Erfahrungsaustausch zwischen KWKW – Betreibern helfen, Investitionen bei der Ausstattung der Anlage im Hinblick auf die Verschmutzungsproblematik zu planen, denn die Verschmutzungen treten jedes Jahr auf.

Um einen Anteil der Verschmutzung daran zu hindern, zu den Turbinenelementen zu gelangen, sind einige im Bericht erwähnte wasserbauliche Massnahmen zu empfehlen. Eine Tauchwand oder ein Schwimmbalken kann helfen, Geschwemmsel zumindest im oberflächennahen Zuflussanteil abzuweisen. Dazu braucht es aber eine wirksame Spüleinrichtung, um das Geschwemmsel an der Fassung vorbeizuleiten. Bei Aufstau des Geschwemmselteppichs, wird das zusätzlich anfallende oberflächennahe Geschwemmsel trotzdem unter die Tauchwand in die Fassung hineingezogen.

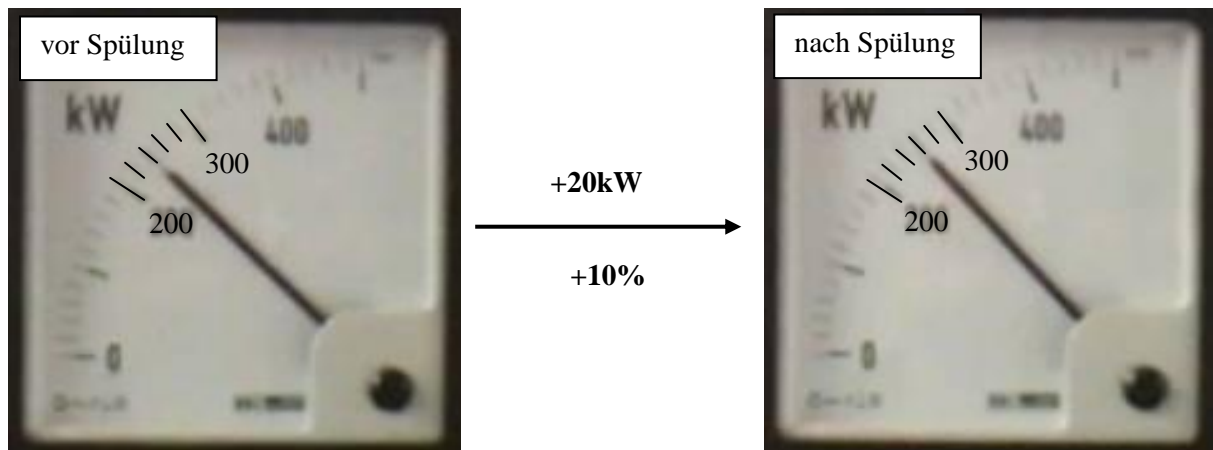
Eine Tauchwand oder ein Schwimmbalken kann auch nachträglich realisiert werden. Die Anordnung der Entnahmestelle der Fassung selbst hingegen wird bestehen bleiben. Deshalb sind hier bei der Projektierung Analysen des Oberwasserverlaufs unerlässlich. Dies einerseits, um möglichst wenig Geschiebe an die Fassung zu leiten und damit eine Auflandung zu vermeiden, und andererseits, um eine möglichst gleichförmige Geschwindigkeitsverteilung in der Fassung zu erhalten.

Eine gewisse Verschmutzung an Stütz-, Leit- und Laufradschaufeln ist nur schwer zu vermeiden. Dabei führt die Verschmutzung infolge zusätzlicher Strömungsablösungen, Verwirbelungen und anwachsendem Verlegungseffekt zu Leistungseinbussen. Um diese zu minimieren, werden die Turbinen gespült. Dabei hat sich aus numerischen Strömungssimulationen und den gewonnenen Erkenntnissen während der Messkampagne beim KWKW Freienstein gezeigt, dass die Leitradstellung während eines Spülvorgangs wesentlich dessen Effektivität beeinflusst. Die besten Resultate wurden erzielt, wenn das Leitrad bei gleichzeitigem Öffnen der Laufradstellung soweit geschlossen werden konnte, wie es die Lagerbelastungen zulassen. Noch nicht schlüssig geklärt ist, wie lange ein solcher Spülzustand gehalten werden muss. Bei der Messkampagne im KWKW Freienstein wurden Spülzeiten von 1min miteinander verglichen. In anderen KWKW reichen auch schon 30s aus, um einen beträchtlichen Leistungssprung herbeizuführen. Die Variation der Spüldauer sollte von jedem KWKW – Betreiber getestet werden, um die Energieverluste zu minimieren.

Doch nach welchem Kriterium soll ein Spülprogramm ausgelöst werden? Hier scheint das grösste Verbesserungspotential zu liegen. Wie im Bericht empfohlen, sollte zumindest ein automatischer Spülvorgang in der Steuerung integriert sein. Wie die Befragungen gezeigt haben, ist dies aber längst nicht überall der Fall. Spülungen werden nach einem erfahrungsgemässen Vorgang durch das Bedienpersonal in der Zentrale ausgeführt. Ist keine personelle Besetzung in der Zentrale anwesend, wird auch nicht gespült, unabhängig auf welchem "verschmutzten Niveau" die Turbine läuft. Ist ein Spülvorgang in der Steuerung integriert, sollte deren Auslösung unabhängig vom Personal erfolgen. Ein Spülvorgang sollte weiter nach zwei Kriterien wie im KWKW Au-Schönenberg automatisch ausgelöst werden. Einerseits müsste ein frei wählbares Zeitintervall eingestellt werden können, und andererseits ein vom Wirkungsgrad oder Leistung der Turbine abhängiges Kriterium, welches dem Zeitkriterium überlagert ist. Um eine wirkungsgradabhängige Spülauslösung zu realisieren, müssen die Leit- und Laufradstellungen, die Generatorleistung, die Fallhöhe und der Turbinendurchfluss gemessen und im Leitsystem erfasst werden. Wird eine vom

Hersteller hinterlegte Wirkungsgradkurve verwendet, sollte diese bei der Abnahme überprüft werden.

Durch die Befragungen hat sich gezeigt, dass durch fehlende Automatisierung bei den Spülauslösungen die Anlagen zeitweise tagelang auf einem verschmutzten Niveau sind. In einem der befragten KWKW wird normalerweise 1 mal pro Woche gespült, beim Besuch der Anlage hat der Betriebsverantwortliche am Morgen bei der Besichtigung zusätzlich gespült. Bei der Befragung auf der Anlage am gleichen Tag, wurde, unüblich für diese Maschine, ein weiterer Spülvorgang ausgelöst, um die Verstellungen der Stellglieder zu protokollieren. Vor und nach dem Spülvorgang ergaben sich folgende Leistungen, fotografiert an den Anzeigeelementen:



Obwohl mehr Spülvorgänge durchgeführt wurden als üblich, konnte eine Leistungssteigerung von 10% notiert werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Zöller, A., Lippold, F., Schelle, R., Wider, D., Wiebrecht, S.: **Ertüchtigung der kleinen Wasserkraft für die Herausforderungen der Zukunft**, Studie, Stuttgart, Universität, 2005.
- [2] Lang, T., Strobl, T., Nothhaft, S.: **Verluste bei der Anströmung von Wasserkraftanlagen**, Wasserwirtschaft, Jubiläumsheft – 90 Jahre, Vieweg, 2000.
- [3] Niederhäusern, A., Guggisberg, B.: **Tour d'horizon der Kleinwasserkraft**, Interview Bulletin SEV/VSE, 2/2008.
- [4] Kropik, P.: **Betriebserfahrungen mit Francisturbinen mit hoher spezifischer Drehzahl**, 1. Praktikerkonferenz Wasserkraft, TU Graz, 2009.
- [5] Meusburger, H.: **Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken**, Mitteilung 179, VAW, ETH, Zürich, 2002.
- [6] Erlach, J.: **Betrachtung der Gesamt-Energiebilanz einer Wasserkraftanlage mit Aufschlüsselung der Einzelverluste**, 2. Seminar Kleinwasserkraft, Stuttgart, 1999.
- [7] Schälchli, U., Baumgartner, A., Baumann, P.: **DIANE 10: Geschwemmsel bei Kleinwasserkraftwerken**, BEW, Bern, 1997.
- [8] Boes, R.: **Skript Wasserbau**, ETH, Zürich, Fassung 2009.
- [9] Jurić, M.: **Verschmutzungsprobleme bei Kleinwasserkraftanlagen**, 7. Seminar Kleinwasserkraft, Stuttgart, 2009.
- [10] Ruprecht, A.: **Verschmutzung von Kleinwasserkraftanlagen**, 1. Statusbericht, Stuttgart, Universität, 2008.
- [11] Abgottspon, A., Staubli, T.: **Wirkungsgradmessung mit akustischer Durchflussmessung im KWKW Neuhausen**, Horw, etaeval GmbH, 2009.
- [12] Ruprecht, A.: **Verschmutzung von Kleinwasserkraftanlagen**, 3. Statusbericht, Stuttgart, Universität, 2009.
- [13] Patt, H., Jürging, P., Kraus, W.: **Naturnaher Wasserbau – Entwicklung und Gestaltung von Fliessgewässern**, Springer-Verlag, 1998.
- [14] Giesecke, J., Mosonyi, E.: **Wasserkraftanlagen**, 4. Auflage, Springer-Verlag, 2005.
- [15] Vischer, D., Huber, A.: **Wasserbau**, 6. Auflage, Springer-Verlag, 2002.
- [16] Schröder, R., Zanke, U.: **Technische Hydraulik**, 2. Auflage, Springer-Verlag, 2003.
- [17] Hofer, St., Staubli, Th.: **Wirkungsgradmessung Kraftwerk Freienstein**, HSLU, Horw, 2006.
- [18] <http://www.hydrodaten.admin.ch/d/2132.htm>, Hydrologische Daten der Messstelle Neftenbach gerinneaufwärts des KWKW Freienstein, 30.01.2010.
- [19] Bollrich, G.: **Technische Hydromechanik Band 1**, 6. Auflage, 2007.
- [20] Herwig, H.: **Strömungsmechanik A-Z**, 1. Auflage, 2004.
- [21] Haas, P.: **Kriterien zur Wahl der geeigneten Turbine**, Vorträge einer Fachtagung über Kleinwasserkraftwerke, Verbandsschrift Nr. 45 des SWV, Zürich, 1984.
- [22] IEC Standard 60041: **Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines**, 3. Ausgabe, Genf, 1991-11.
- [23] PEMS manual: **Programmable Electromagnetic Liquid Velocity Meter**, WL delft hydraulics, version 2.01, May 2001.

ANHANG A1 Berechnungen

Nachfolgend die aus der International Electrotechnical Commission (IEC) Standard 60041 [22] abgeleitete Berechnung des Indexwirkungsgrades:

- **Fallhöhe**

Zur Bestimmung der Fallhöhe bei Anlagen mit freien Wasserständen (Pegelmessung) ist folgende Abbildung zur Veranschaulichung der Messebenen / -stellen nützlich:

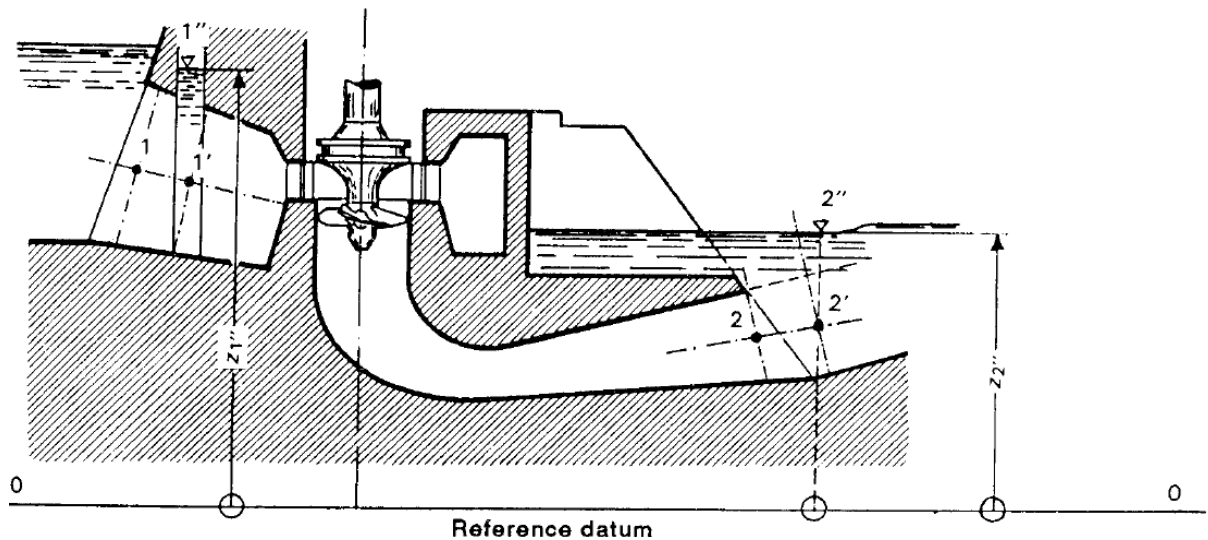


Fig. 66 Querschnitt durch eine Niederdruckanlage mit Bezeichnung der Messebenen / -stellen [22]

Die spezifische hydraulische Energie ist nach IEC Standard 60041 unter 11.2.5.3.2 definiert durch

$$E = \bar{g} \cdot H = \frac{(p_{abs1} - p_{abs2})}{\bar{\rho}} + \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2} + \bar{g} \cdot (z_1 - z_2).$$

Da diese Referenzebenen nicht zugänglich sind, resp. nicht dort sind wo eine freie Wasserstandsfläche zur Verfügung steht, berechnet sich die Fallhöhe zu (neue Messebenen 1' und 2')

$$H = \frac{E}{\bar{g}} = \frac{(p_{abs1'} - p_{abs2'})}{\bar{\rho} \cdot \bar{g}} + \frac{(v_{1'}^2 - v_{2'}^2)}{2 \cdot \bar{g}} + (z_{1'} - z_{2'}) + E_{L1-1'} - E_{L2-2'},$$

unter Vernachlässigung der Verluste

$$E_{L1-1'} = E_{L2-2'} = 0,$$

sowie mit

$$\rho_{1'} = \rho_{2'} = \bar{\rho},$$

ergibt sich

$$H = \frac{(p_{abs1'} - p_{abs2'})}{\bar{\rho} \cdot \bar{g}} + \frac{(v_{1'}^2 - v_{2'}^2)}{2 \cdot \bar{g}} + (z_{1''} - z_{2''}) \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\bar{\rho}}\right).$$

Wird zudem der Unterschied im Luftdruck zwischen den Messstellen 1'' und 2'' vernachlässigt

$$P_{abs1'} = P_{abs2'}$$

und der Term

$$\left(1 - \frac{\rho_a}{\bar{\rho}}\right) \approx 1$$

gesetzt, sowie die Erdbeschleunigungsunterschiede nicht berücksichtigt (\bar{g} wird zu g bezogen auf die Turbinenkote) ergibt sich die vereinfachte Formel für die Fallhöhe unter Verwendung der Pegelmessmethode (Messstellen 1'' und 2'')

$$H = \frac{(v_{1'}^2 - v_{2'}^2)}{2 \cdot g} + (z_{1''} - z_{2''})$$

Für das KWKW Freienstein sind die Messebenen / -stellen an folgenden Orten:

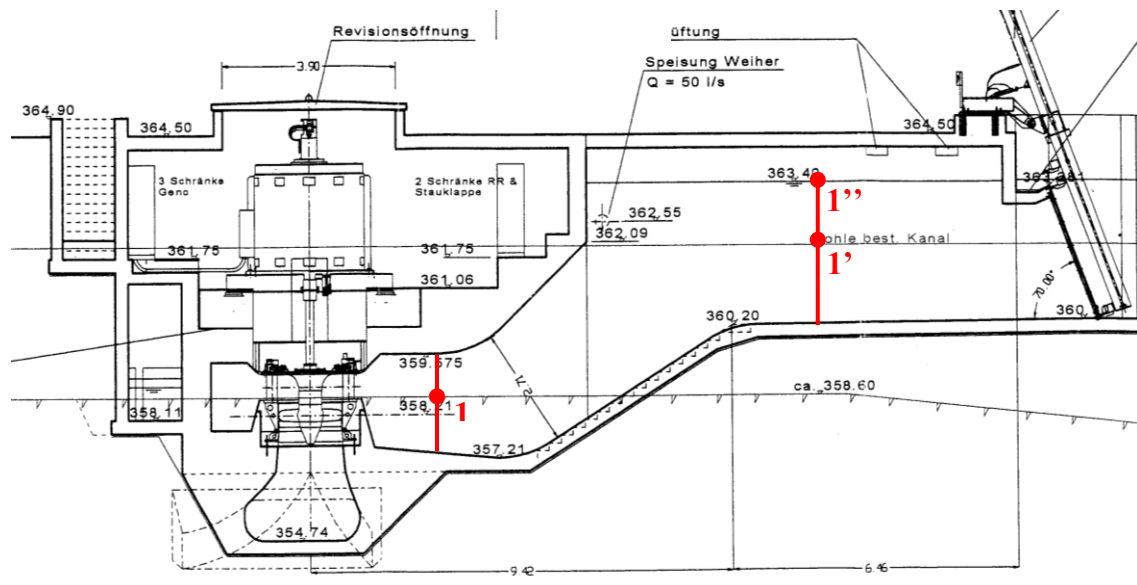


Fig. 67 Bezeichnung der Messebenen / -stellen im Oberwasser des KWKW Freienstein

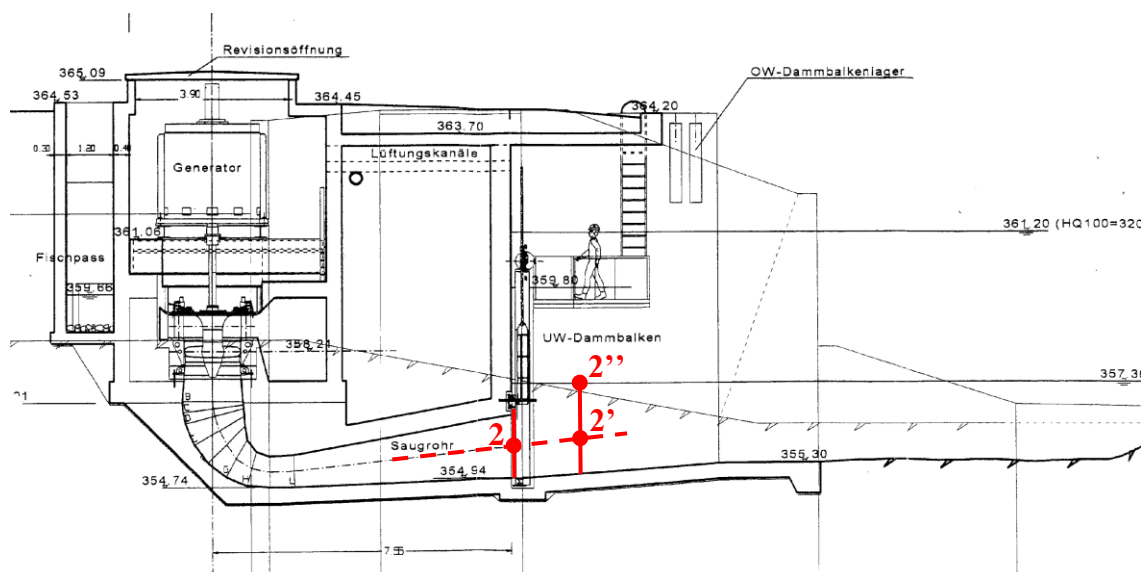


Fig. 68 Bezeichnung der Messebenen / -stellen im Unterwasser des KWKW Freienstein

- **Geschwindigkeiten / Volumenstrom**

Die Geschwindigkeit $v_{1'}$ für die Berechnung der Fallhöhe, ergibt sich direkt aus der Geschwindigkeitsmessung mittels magnetisch induktiver Messsonde (vgl. Anhang A2) im Oberwasser an der Messstelle 1'

$$v_{1'} = v_{PEMS} \cdot$$

Daraus ergibt sich der Indexvolumenstrom durch die Messebene 1' (wobei $A_{1'}$ das Produkt aus der Breite des Kanals und der gemessenen Wasserstandshöhe ist)

$$Q_i = v_{1'} \cdot A_{1'}$$

Aus der Kontinuitätsgleichung $Q_i = \text{konst.}$ resultiert die Geschwindigkeit an der Messstelle 2'

$$v_{2'} = \frac{Q_i}{A_{2'}}$$

Die konstruierte Fläche $A_{2'}$ ist, wie in der folgenden Abbildung dargestellt, abhängig von der Kanalbreite, aber nicht von der Wasserstandshöhe im Unterwasser.

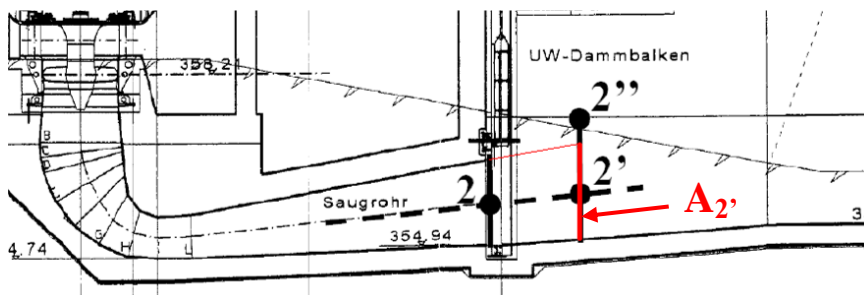


Fig. 69 Detailansicht Unterwasser des KWKW Freienstein

- **Leistungen**

Die Leistungsmessung erfolgte direkt nach dem Generator. Die mechanische Laufradleistung (Nutzen) wird aus der gemessenen Generatorleistung unter Berücksichtigung des Generatorwirkungsgrades berechnet zu

$$P_m = \frac{P_{Gen}}{\eta_{Gen}}$$

Die hydraulische Leistung (Aufwand) ergibt sich aus

$$P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot Q_i \cdot H$$

- **Wirkungsgrade**

Der Indexwirkungsgrad wird folgendermassen berechnet

$$\eta_i = \frac{P_m}{P_{hyd}}.$$

Bei Nichtberücksichtigung des Generatorwirkungsgrades resultiert der Anlagenindexwirkungsgrad

$$\eta_{iA} = \frac{P_{Gen}}{P_{hyd}}.$$

Um die Strömung im Oberwasser zu charakterisieren kann der Turbulenzgrad dieser Strömung bestimmt werden anhand der Geschwindigkeitsmessung mittels PEMS-Sonde (vgl. Anhang A2), aus Herwig [20]:

- **Turbulenzgrad**

Der Turbulenzgrad berechnet sich aus

$$Tu = \frac{1}{\bar{v}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (vx'^2 + vy'^2)}.$$

wobei

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(x, y) dt \quad \text{mittlere Geschwindigkeit}$$

$$vx'^2 = \frac{1}{T-1} \cdot \sum_{t=1}^T (vx_t - \bar{v}\bar{x})^2 \quad \text{Standardabweichung der x-Geschwindigkeitskomponente}$$

$$vy'^2 = \frac{1}{T-1} \cdot \sum_{t=1}^T (vy_t - \bar{v}\bar{y})^2 \quad \text{Standardabweichung der y-Geschwindigkeitskomponente}$$

mit

$$\bar{v}\bar{x} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(x) dt \quad \text{mittlere Geschwindigkeit der x-Komponente}$$

$$\bar{v}\bar{y} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(y) dt \quad \text{mittlere Geschwindigkeit der y-Komponente}$$

ANHANG A2 Instrumentierung KWKW Freienstein

Nachfolgend die zur Indexwirkungsgradmessung im KWKW Freienstein benötigte Instrumentation und deren Funktionsprinzipien, sowie deren Aussehen nach erfolgter Montage:

1. Datenerfassung

Die folgende Tabelle listet die verschiedenen Messgrößen auf und zeigt deren Übertragungskennwerte. Die erste Hälfte bis und mit Videoüberwachung zeigt die Instrumentierung der HSLU, danach folgen die Messgrößen, welche vom Kraftwerk und deren Betriebsinstrumentierung übernommen wurden:

Kanal (ai)	Belegung	Messgröße	Symbol	Geber/Messgerät	Signal	Abbildung	Speisung	Bürde	Erfassung	Messspanne	Kabel
0	0, AGND	Oberwasserpegel links	$h_{OW,li}$	Ultraschallsonde	4 - 20mA	0 - 1.7m	220V	500Ω	RSE	2 - 10V	50m
1	1, AGND	Oberwasserpegel rechts	$h_{OW,re}$	Ultraschallsonde	4 - 20mA	0 - 1.7m	220V	500Ω	RSE	2 - 10V	50m
2	2, AGND	Unterwasserpegel links	$h_{UW,li}$	Ultraschallsonde	4 - 20mA	0 - 3.7m	220V	500Ω	RSE	2 - 10V	20m
3	3, AGND	Unterwasserpegel rechts	$h_{UW,re}$	Ultraschallsonde	4 - 20mA	0 - 3.7m	220V	500Ω	RSE	2 - 10V	20m
4	4, AGND	Geschwindigkeitsmessung X	v_x	PEM	0 - ±10V	0 - ±2m/s	220V	-	RSE	0 - ±10V	50m
5	5, AGND	Wassertemperatur	T_W	PT100	4 - 20mA	0 - 100°C	24V	500Ω	RSE	2 - 10V	30m
6	6, AGND	Geschwindigkeitsmessung Y	v_y	PEM	0 - ±10V	0 - ±5m/s	220V	-	RSE	0 - ±10V	50m
-	-	Videoüberwachung	-	Logitech Kamera	-	-	220V	-	USB	-	20m
7	7, AGND	Wirkleistung	P_{Gen}	Zähler mit Umwandlung	0 - 20mA	0 - 600kW	Nein	10Ω	RSE	0 - 0.2V	12m
17	17, 25	Pegelmessung vor Rechen	h_{vR}	Druckmesssonde	4 - 20mA	0 - 100mbar	Nein	10Ω	Differential	0.04 - 0.2V	12m
18	18, 26	Pegelmessung nach Rechen	h_{nR}	Druckmesssonde	4 - 20mA	0 - 100mbar	Nein	10Ω	Differential	0.04 - 0.2V	12m
19	19, 27	Gleitlagertemperatur	T_G	PT100	4 - 20mA	0 - 100°C	Nein	10Ω	Differential	0.04 - 0.2V	12m
20	20, 29	Leitradöffnung	s_{Le}	Wegaufnehmer	0 - 20mA	0 - 100%	Nein	10Ω	Differential	0 - 0.2V	12m
21	21, 30	Lauftradöffnung	s_{La}	Wegaufnehmer	0 - 20mA	0 - 100%	Nein	10Ω	Differential	0 - 0.2V	12m
22	22, 31	Differenz Rechenreinigung	h_{Re}	Berechnung	0 - 20mA	0 - 100cm	Nein	10Ω	Differential	0 - 0.2V	12m
port 0, line 0		Rechenreinigung	i	Relais	5V TTL	Ein / Aus	24V + 5V	-	Digital	Digital	12m

Fig. 70 Kennwerte der Messgrößen / -signale

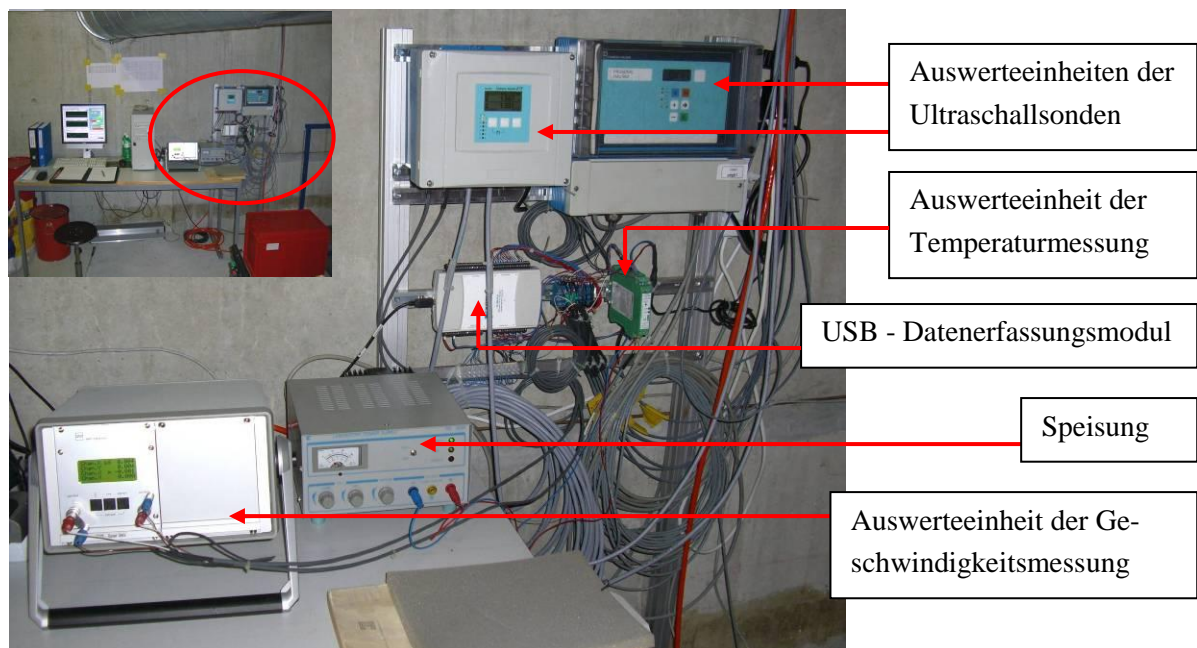


Fig. 71 Anordnung der Datenerfassungsmodule im Maschinensaal des KWKW Freienstein

Die Messunsicherheiten der wichtigsten eingesetzten Messinstrumente sind:

- Ultraschallsonden: Typische Messunsicherheit $\pm 2\text{mm} + 0.17\%$ der Messdistanz
Messwertauflösung 1mm

Ein Messfehler von 5mm bei der Bestimmung der Fallhöhe (Pegeldifferenz) resultiert in einer Abweichung kleiner 0.1% beim Indexwirkungsgrad (bei $Q=3\text{m}^3/\text{s}$ und $H=6.3\text{m}$).

- PEMS-Sonde: Messunsicherheit $\pm 0.01\text{m/s} + 1\%$ des Messwertes

Ein Messfehler von 0.01m/s in der Geschwindigkeitsmessung resultiert in einer Abweichung von etwa 6% beim Indexwirkungsgrad (bei $Q=3\text{m}^3/\text{s}$ und $H=6.3\text{m}$).

2. Oberwassermessebene

Die Oberwassermessebene unserer Instrumentierung beinhaltet 2 Ultraschallsonden und eine Geschwindigkeitsmessung (PEMS - Sonde) zur Bestimmung der Fallhöhe und des Volumenstromes (hydraulische Leistung):

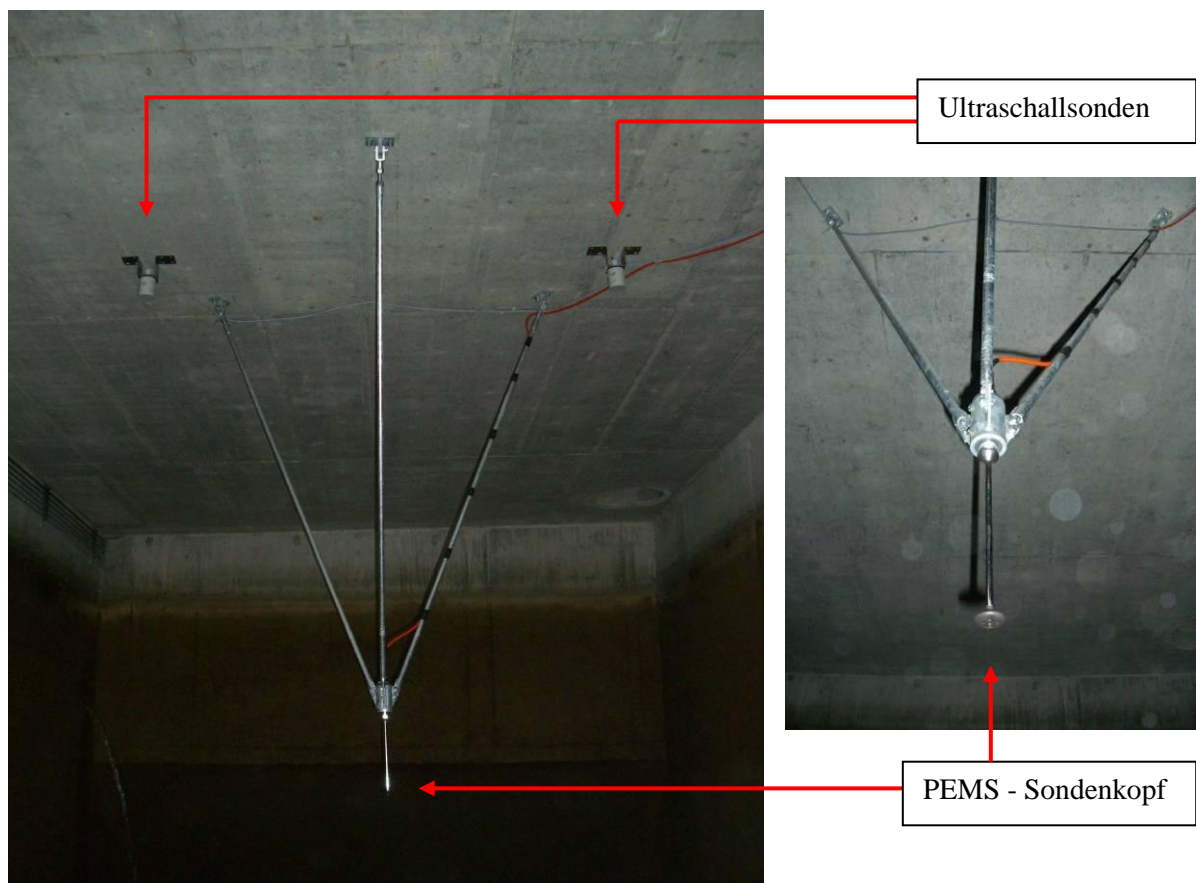


Fig. 72 Anordnung der Messinstrumente in der Oberwassermessebene

2.1 Ultraschallsonden

Die Ultraschallsonde strahlt zyklisch einen kurzen, hochfrequenten Schallimpuls aus. Dieser pflanzt sich mit Schallgeschwindigkeit aus. Trifft er auf die Oberfläche des Mediums, wird er dort reflektiert und gelangt als Echo zurück zur Ultraschallsonde. Aus der Zeitspanne zwischen dem Aussenden des Schallimpulses und dem Empfang des Echosignals berechnet

der Messumformer die Entfernung.

$$D = c \cdot \frac{t}{2}$$

D = Messdistanz von Sondenoberfläche bis Oberfläche des Mediums
 c = Schallgeschwindigkeit
 t = Laufzeit von Sondenoberfläche bis Oberfläche Medium und zurück

Zur Korrektur der temperaturabhängigen Schalllaufzeit ist ein Temperatursensor in den Ultraschallsonden integriert.

2.2 PEMS – Sonde (Programmable Electromagnetic Current Velocity Meter)

2.2.1 Physikalisches Funktionsprinzip

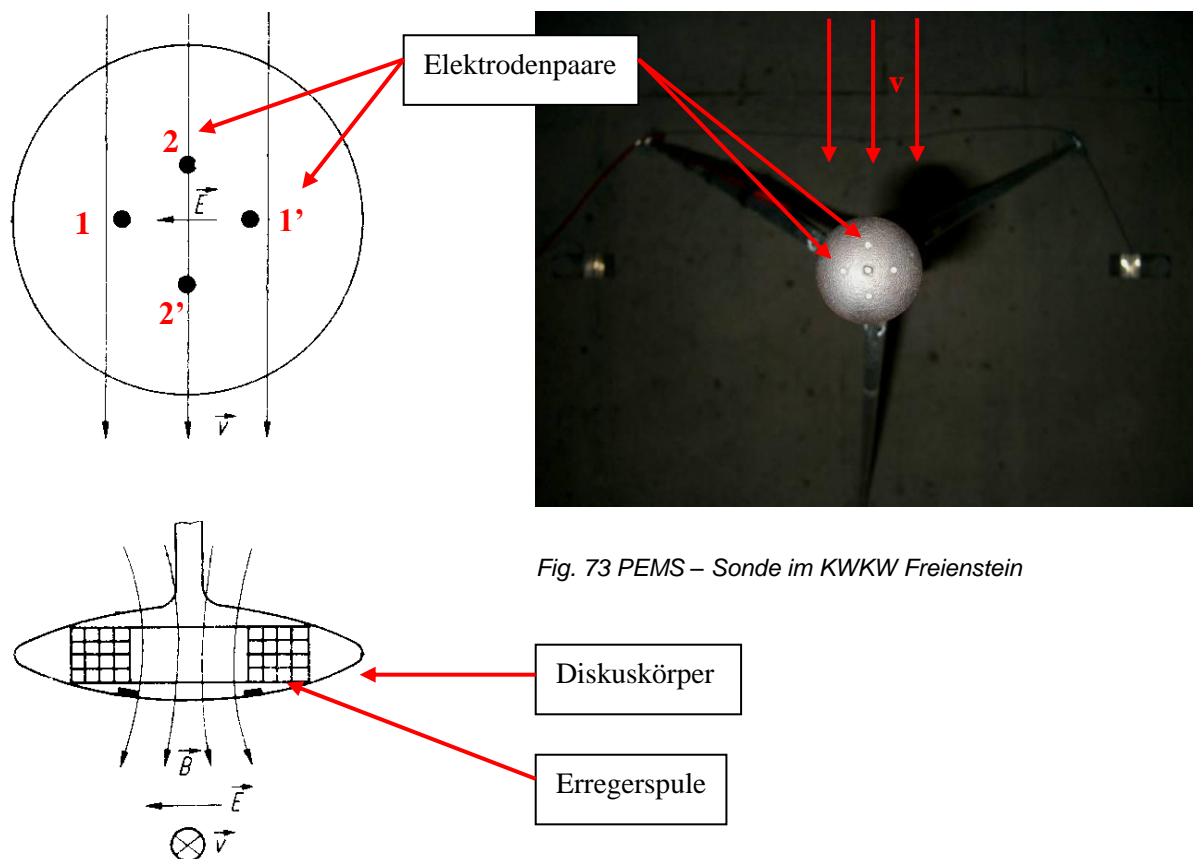


Fig. 73 PEMS – Sonde im KWKW Freienstein

Fig. 74 Diskussonde bei Zweikomponentensonde [23]

Eine Magnetspule (Erregerspule) im Innern der Diskussonde wird mit einem gepulsten Strom versorgt. Mit dem stromdurchflossenen Leiter resultiert ein magnetisches Feld für den Messraum an der Unterseite der Sonde. Dieses Magnetfeld ist im obigen Bild mit der magnetischen Flussdichte B gekennzeichnet.

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot \frac{n}{l}$$

B = magnetische Flussdichte
 μ_0 = magnetische Feldkonstante
 μ_r = Permeabilität des von der Spule umschlossenen Raumes

I = Speisestrom
 n = Windungszahl
 l = Länge der Spule

Nach dem Faradayschen Induktionsgesetz entsteht in einer Flüssigkeit, die Ladungsträger mit sich führt und durch ein Magnetfeld fließt, eine elektrische Feldstärke E senkrecht zur Strömungsrichtung und zum Magnetfeld B (vgl. Fig. 74):

$$E = [v \times B] \quad \begin{array}{ll} E & = \text{elektrische Feldstärke} \\ v & = \text{Strömungsgeschwindigkeit} \end{array}$$

Das entstehende elektrische Feld E ist verantwortlich für die Potentialverteilung im Raum (ausgedrückt in der Poissongleichung):

$$\Delta\varphi = -\operatorname{div}\vec{E} = \operatorname{div}(\vec{v} \times \vec{B}) \quad \varphi = \text{elektrisches Potential}$$

Die Lösung dieser Gleichung ist für den unendlich ausgedehnten Raum gegeben, für ein Gebiet mit begrenzten Randflächen (Einlaufkanal), an denen vorgegebene Bedingungen zu erfüllen sind, ist diese Lösung jedoch nicht geeignet, deshalb sind einige Annahmen und Umrechnungen nötig. Zudem wird das in der Realität nicht unendlich ausgedehnte Magnetfeld und der Strömungszustand (laminar, turbulent) mit dem Faktor k berücksichtigt, welcher durch Experimente validiert wurde. Damit sind die Beiträge des entstehenden elektrischen Feldes zur Messspannung durch folgende Gleichung gegeben:

$$U_M = k \cdot a \cdot v \cdot B \quad \begin{array}{ll} U_M & = \text{Messspannung} \\ k & = \text{Korrekturfaktor [siehe 23]} \\ a & = \text{Elektrodenabstand} \end{array}$$

2.2.2 Anwendung auf eingesetzte PEMS – Sonde

Die induzierten Spannungen sind wie oben beschrieben proportional zu dem Sinus (V_y) und Kosinus (V_x) des Fluidgeschwindigkeitswertes (V_e), vgl. hierzu nachfolgende Abbildung mit den Bezeichnungen des Herstellers:

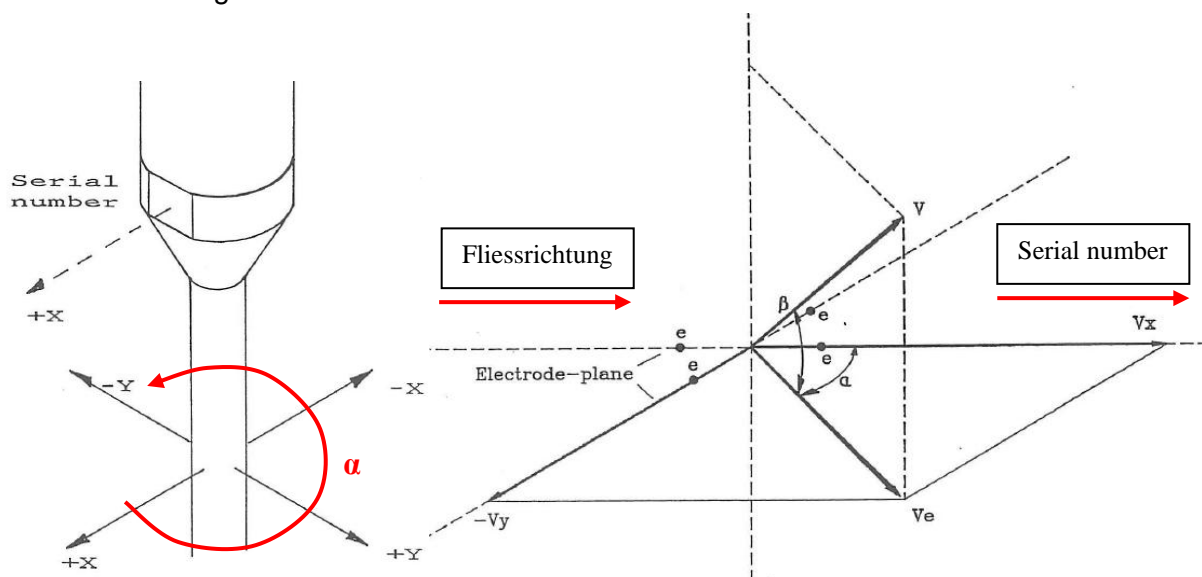


Fig. 75 Orientierung des Koordinatensystems der PEMS - Sonde relativ zur Strömung [23]

Eine reale Bahnlinie eines Fluidteilchens, welches unter dem Winkel β die Ebene schneidet, und eine Geschwindigkeit V aufweist, wird mit dem Wert $V \cos \beta = V_e$ gemessen. Es ist ersichtlich, dass die genaue 3D-Geschwindigkeit nur dann evaluiert werden kann, wenn die Richtung des Fluides zur Elektrodenebene bekannt ist – Winkel β .

Die Fläche der Seriennummer ist genau parallel zur Y – Ebene. Die aktuelle Geschwindigkeit V_e kann berechnet werden aus den gemessenen V_x – und V_y – Komponenten mit:

$$V_e = v_{PEMS} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$$

Der Winkel zwischen der positiven x – Achse und der Fluidbahn in der XY – Ebene berechnet sich aus:

$$\tan \alpha = \frac{V_y}{V_x}$$

3. Unterwassermessebene

Die Unterwassermessebene unserer Instrumentierung beinhaltet 2 Ultraschallsonden zur Bestimmung der Fallhöhe und hydraulischen Leistung, eine Temperaturmessung zur Berechnung der Dichte des Wassers sowie eine Videoüberwachung zur möglichen Visualisierung des Saugrohraustritts:

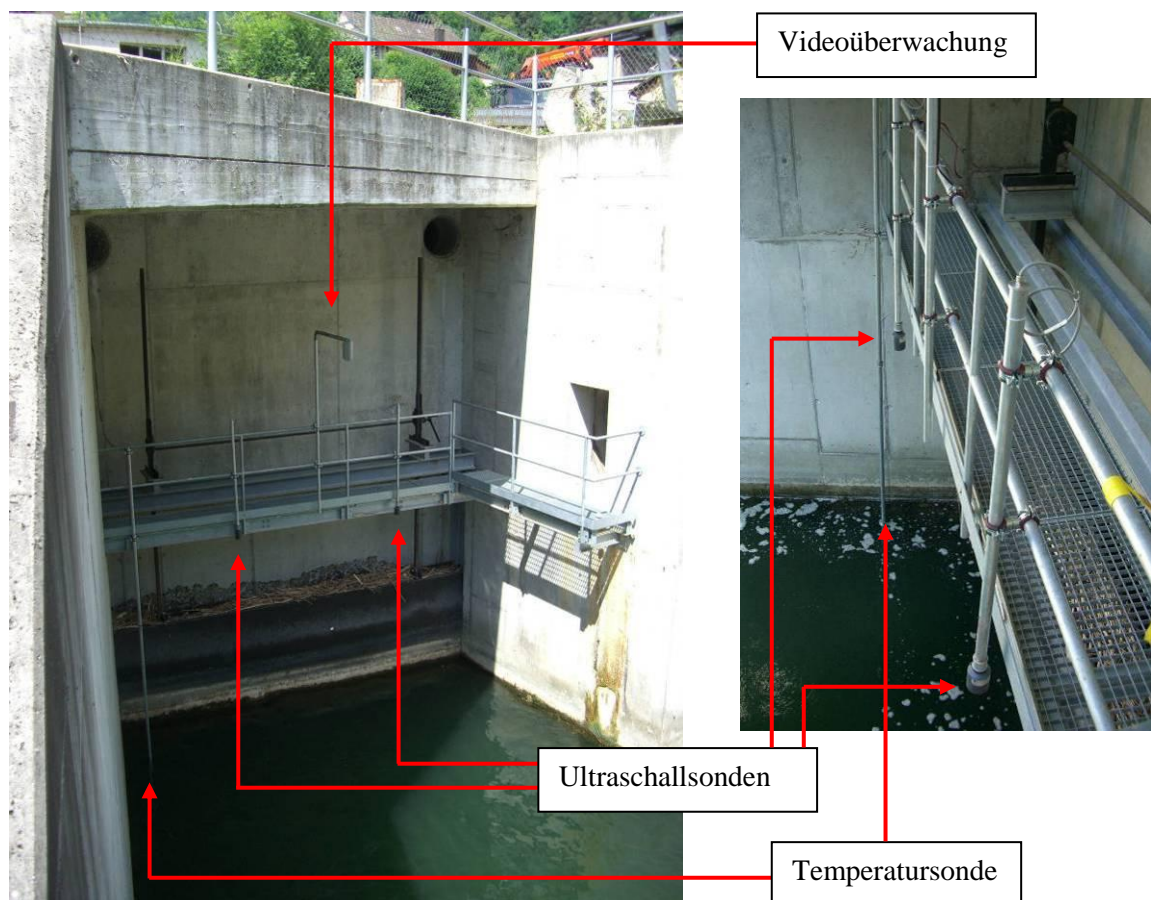


Fig. 76 Anordnung der Messinstrumente in der Unterwassermessebene

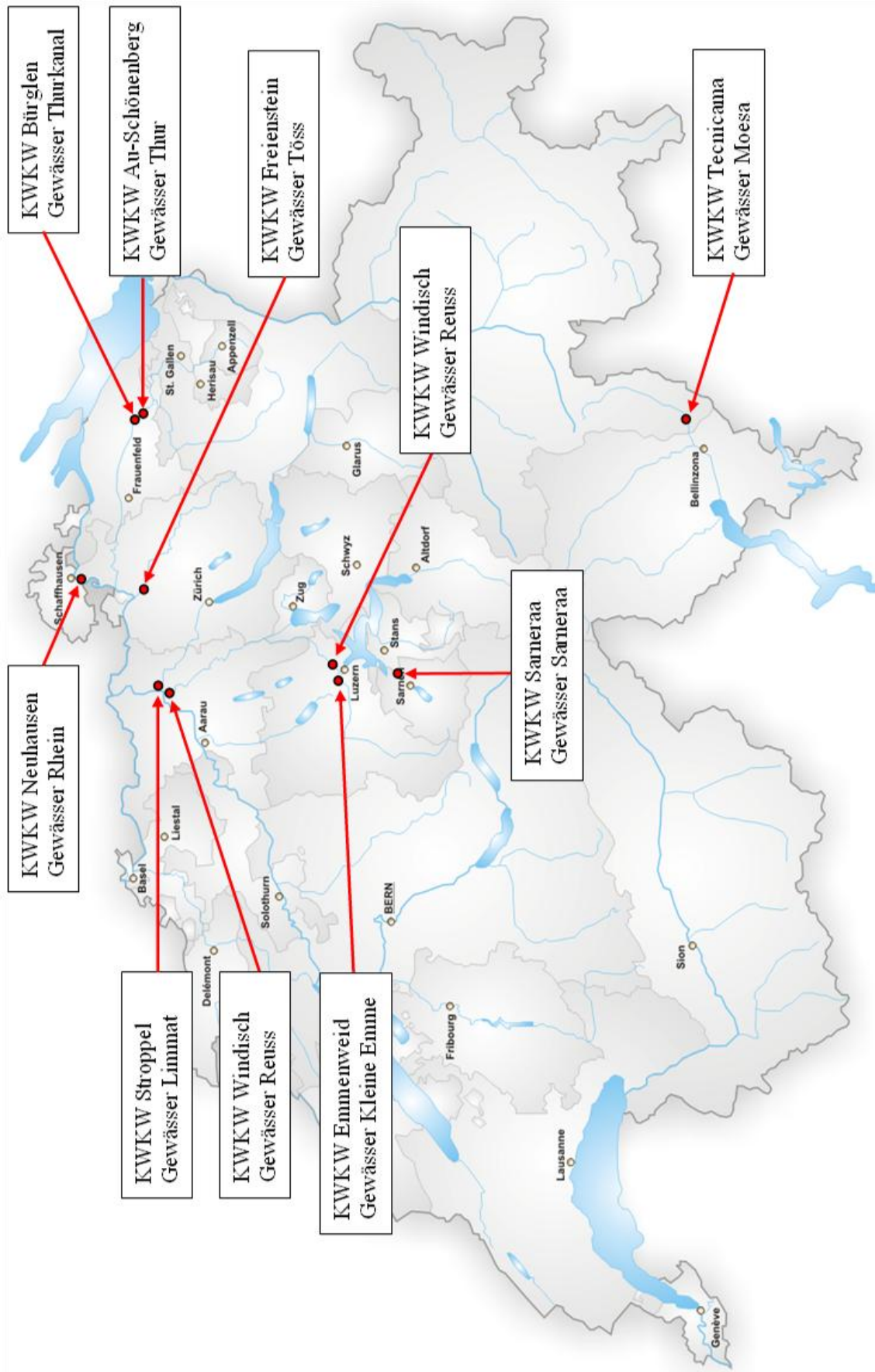
3.1 Temperatursonde

Die Temperaturmessung des Wassers wird mit einem eingetauchten PT100 – Thermometer durchgeführt. PT100 – Sensoren sind Temperaturfühler, die auf der Widerstandsänderung von Platin unter Temperatureinfluss basieren.

Die Auswertung des Sensor – Widerstands erfolgt üblicherweise, indem der Spannungsabfall an dem von einem konstanten Messstrom durchflossenen Sensor gemessen wird. Damit ist die Spannungsänderung dU annähernd proportional zur Widerstandsänderung dR .

Die Auswertung wird mittels Vierleiterschaltung ausgeführt. Bei der Vierleitermessung werden getrennte Leitungspaare für den Speisestrom des Sensors und für die Messung des Spannungsabfalls am Sensor verwendet. Da in den Fühlerleitungen zur Spannungsmessung ein vernachlässigbar kleiner Messstrom fließt, ist die Beeinflussung des Messergebnisses durch den Leitungswiderstand minimal. Die Länge der Anschlussleitung darf in Vierleiterschaltung sehr groß sein und es dürfen Adern unterschiedlichen Querschnitts verwendet werden. Deshalb ist die Vierleiterschaltung für Präzisionsmessungen am besten geeignet. Für die vorliegenden Ansprüche zur Berechnung der Dichte reicht aber eine Auflösung von $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

ANHANG A3 Standorte der interviewten KWKW



ANHANG A4 Interview im KWKW Freienstein

Interview vom 11.11.2008

1. Allgemeine Daten

- **Name der Anlage**
KWKW Freienstein
- **Standort der Anlage**
Freienstein - Teufen
- **Gewässername**
Töss
- **Betreiber der Anlage (Kontaktdaten)**
toesStrom AG
c/o EW Embrach
Dorfstrasse 83
8424 Embrach
- **Kraftwerkstyp**
Flusskraftwerk, Buchtenkraftwerk mit Entnahmebauwerk

2. Technische Daten

- **Maschinentyp**
Vertikalachsige Kaplan turbine
- **Hersteller**
Wiegert & Bähr
- **Baujahr**
2004
- **Regulierung**
Doppeltreguliert (Verstellbare Leit- und Laufschaufeln)
- **Nennleistung**
570kW, Maximalleistung 616kW
- **Nenndurchfluss**
Ausbauwassermenge 12m³/s
- **Nennfallhöhe**
Nettofallhöhe 5.88m
- **Nenndrehzahl**
3000/min / Polpaarzahl 11 = 272.737/min
- **Lafraddurchmesser**
1166 mm
- **Wirkungsgrad im Optimum (ist ein entsprechendes Diagramm einsehbar?)**
Wirkungsgradgarantiedaten sind vorhanden und in Besitz der HSLU
- **Generatortyp, Betriebsart, Getriebeart**
Synchronbetrieb, Hersteller Bartholdi

3. Verschmutzung

- **Zu welchen Jahreszeiten treten Probleme mit der Verschmutzung auf?**

Verschmutzung oder Geschwemmsel treten über das ganze Jahr auf (nicht nur im Herbst).

- **Womit wird die Anlage verschmutzt?**

Laub, Fadenalgen (im Sommer eher stärker), Äste, Zivilabfall

- **Ist der Anlage ein Rechen vorgeschaltet? Gibt es eine Rechenreinigungsanlage?**

Der Anlage ist ein Feinrechen mit einer Rechenreinigungsanlage vorgeschaltet.

- **Wie wird der Rechen reguliert? (manuell, automatisch, Zeitprogramm, Druckverlust)**

Einerseits automatisch über die Druckverlustmessung über dem Rechen (wenn die Wasserstandsdifferenz grösser 15cm wird). Andererseits kann der Rechen auch manuell gesteuert werden in dem Sinn, dass die Rechenreinigungsintervalle fest vorgeschrieben werden können (z.B. alle 1/4h einmal reinigen oder einmal am Tag usw.). Ein Rechenreinigungsintervall wird auch gestartet, wenn der Rechen aufgrund der Schwerkraft zu weit vom Endscharter entfernt ist.

- **Sind Spülprogramme vorhanden?**

Ja.

- **Wie funktioniert dieses Spülprogramm?**

Aktuelle Variante 3 (seit Anfangs Oktober 2008):

Regelbetrieb – Leit- und Laufrad auf 15% (bedeutet für Leitrad 1/5 Öffnung, für Laufrad effektiv 15%) für 30s – anschliessend Leitrad 75% (Achtung: ist volle Betriebsöffnung) und Laufrad 50% (effektiv) für 1min – Ende Spülvorgang – Regelbetrieb.

(Der Regelbetrieb wird bei Laufwasserkraftwerken bestimmt durch den Oberwasserstand, den s.g. Oberwasserkonzessionspegel).

Variante 1 (ursprüngliche Variante):

Regelbetrieb – Leit- und Laufrad auf volle Öffnung – Ende Spülvorgang – Regelbetrieb.

Problem: Bei Vollast gibt es keine Spülung, da Leit- und Laufrad ebenfalls schon voll offen sind.

Variante 2:

Regelbetrieb – Leit- und Laufrad auf 15% für 30s (siehe aktuelle Variante) – anschliessend Leit- und Laufrad auf volle Öffnung für 1min – Ende Spülvorgang – Regelbetrieb.

Problem: Die Spülung war effektiv, da die ursprüngliche Leistung erreicht werden konnte. Aber es gab weiterhin akustische Probleme wonach die Spülung 3-4mal durchgeführt werden musste, bis die Akustik wiederum in Ordnung war.

- **Gibt es ein genaues Spülkriterium?**

Nein, eine Automatik (z.B. Auslösung bei gewisser Differenzdruckänderung) gibt es nicht.

- **Wie wird gespült (z.B. von Hand oder nach einer gewissen Zeit)?**

Gespült wird individuell je nach Geschwemmselstand beim Rechen. Das Intervall von Spülprogrammen kann manuell auf z.B. 4h oder alle 6h eingestellt werden.

- **Wie oft wird gespült?**

Keine durchschnittlichen Angaben möglich – individuell je nach Geschwemmselstand. Auffallend ist die Tendenz, dass bei Vollast mehr gespült werden muss als bei Teillast (dies kann voraussichtlich durch den höheren Volumenstrom und den daraus folgenden erhöhten Geschwemmselmitzug erklärt werden).

- **Wo treten die Verschmutzungen auf?**
Bei Inspektion ist nichts sichtbar, alles ist weggespült. Dies erfolgt durch den Abschaltvorgang und den daraus resultierenden Spülvorgang. Der Abschaltvorgang wird als effektives Spülprogramm angesehen.
- **Sieht man einen Verschmutzungsausstoß nach dem Spülvorgang?**
Teilweise (es wird das Beispiel der "Maisstengel" geschildert, wonach der Anlagenwart nach einem Spülvorgang im Unterwasser die austretenden Geschwemmsel gesehen hat).
- **Wie hoch sind die Wirkungsgradverluste?**
Nach Angaben des Anlagenbetreibers vermutet er Wirkungsgradeinbußen von 10%.
- **Wie groß ist die Leistungseinbuße vor einem Spülvorgang und wird die volle Leistung nach dem Spülvorgang wiederum erreicht (ist eine Leistungskurve vorhanden)?**
Im Schnitt wird eine Leistungseinbuße von 50kW beobachtet. Die volle Leistung wird nach einem oder mehreren Spülvorgängen wiederum erreicht.
- **Gibt es Schwall- oder Saugwasser Probleme wegen dem Spülvorgang?**
Es können teilweise Schwallwasserprobleme entstehen, wenn der Spülvorgang bei Teillast durchgeführt wird (da im Spülprogramm während 1min fast voller Durchfluss gefahren wird).
- **Hätten Sie Vorschläge, für das die Verschmutzung nicht in die Anlage eintreten kann?**
Nein, auch eine Kombination mit vorgeschaltetem Grobrechen wird nicht als reale Option gesehen.
- **Sind Sie mit Ihrem aktuellen Spülprogramm allgemein zufrieden?**
Ja, aber besser wäre, wenn der Spülvorgang wirkungsgradgesteuert ausgelöst werden könnte. Die Effizienz des aktuellen Spülvorganges wird als sehr gut erachtet.
- **Kennen oder wünschen Sie sich ein anderes Spülungsprogramm?**
Ja – wirkungsgradgesteuert.

ANHANG A5 Interview im KWKW Neuhausen

Interview vom 14.10.2009

1. Allgemeine Daten

- **Name der Anlage**
Rheinkraftwerk Neuhausen
- **Standort der Anlage**
Neuhausen, am Rheinfall
- **Gewässername**
Rhein
- **Betreiber der Anlage (Kontaktdaten)**
Rheinkraftwerk Reckingen AG
5332 Reckingen
- **Kraftwerkstyp**
Flusskraftwerk, Buchtenkraftwerk mit Entnahmebauwerk

2. Technische Daten

- **Maschinentyp**
Vertikalachsige Francisturbine
- **Hersteller**
Vor Revision: Bell Nach Revision: Voith
- **Baujahr**
1952
- **Regulierung**
Einfachreguliert (verstellbare Leitschaufeln)
- **Nennleistung**
4600kW
- **Nenndurchfluss**
25m³/s
- **Nennfallhöhe**
20.12m
- **Nenndrehzahl**
3000/min / Polpaarzahl 14 = 214.286/min
- **Laufreddurchmesser**
2300 mm
- **Wirkungsgrad im Optimum (ist ein entsprechendes Diagramm einsehbar?)**
Ja, durch Partnerfirma etaeval vor Revision aufgenommen.
- **Generatortyp, Betriebsart, Getriebeart**
Synchronbetrieb, Hersteller ABB, Neuentwicklung seit 1983

3. Verschmutzung

- **Zu welchen Jahreszeiten treten Probleme mit der Verschmutzung auf?**
Vor allem im Spätsommer während der Laubfallperiode. Leistungseinbussen infolge Verschmutzung treten aber praktisch das ganze Jahr auf, dies ist auf einem Leistungsverlauf vom Juli 2009 ersichtlich.
- **Womit wird die Anlage verschmutzt?**
Laub, Gras (Fadenalgen)
- **Ist der Anlage ein Rechen vorgeschaltet? Gibt es eine Rechenreinigungsanlage?**
Der Anlage ist ein Feinrechen (Stabweite 5.5cm) mit einer Rechenreinigungsanlage vorgeschaltet.
- **Wie wird der Rechen reguliert? (manuell, automatisch, Zeitprogramm, Druckverlust)**
Es ist eine kontinuierliche Zeitsteuerung vorhanden wobei 2x am Tag gereinigt wird. Ist der Gefällsverlust über den Rechen grösser 70cm wird zusätzlich gereinigt (Messpunkt nach Rechen liegt bereits auf geneigter Ebene, daher nicht effektive Rechendifferenz).
- **Sind Spülprogramme vorhanden?**
Ja.
- **Wie funktioniert dieses Spülprogramm?**
Der Leitapparat wird aus der Normalstellung (fast immer Nennlastöffnung) auf ca. 30% geschlossen, die Leistung sinkt von 4.6MW auf ca. 2.4MW. Der ganze Vorgang dauert etwa 12s.
- **Gibt es ein genaues Spülkriterium?**
Nein, nur durch Zeit bestimmt.
- **Wie wird gespült (z.B. von Hand oder nach einer gewissen Zeit)?**
Es kann ein festes Zeitintervall oder Zeitpunkte eingestellt werden. Aktuell wird um 07:00 am Morgen und um 17:00 am Nachmittag gespült.
Es besteht die Möglichkeit manuell zu spülen. Aber wer entscheidet darüber? Das KWKW Neuhausen wird vom Rheinkraftwerk Reckingen aus gesteuert, die Anlage ist somit nicht dauerhaft mit Personal belegt. Die manuelle Spülung kann nur bei der Zentrale Neuhausen ausgelöst werden und nicht extern von Reckingen, wenn die Leistungsanalyse, welche in Reckingen gemacht werden kann, starke Einbussen infolge Verschmutzung ergeben.
- **Wie oft wird gespült?**
Derzeit 2x am Tag.
- **Wo treten die Verschmutzungen auf?**
Vor allem am Stützschaufelapparat bleibt Wassergras hängen. Diese Verschmutzung wurde auch noch nach dem Abschalten gesichtet, wie auch Ablagerungen am Lagerzapfen der Leitschaufeln.
- **Sieht man einen Verschmutzungsausstoß nach dem Spülvorgang?**
Nein, der Auslass in den Rhein ist zu weit weg.
- **Wie hoch sind die Wirkungsgradverluste?**
Von Herr Zink wird aus Erfahrungswerten der Abschaltvorgang als effektiverer Spülvorgang angesehen als der normal durchgeführte Spülvorgang, bei welchem die Maschine nicht abgeschaltet wird (in Generatorbetrieb bleibt).

- **Wie gross ist die Leistungseinbusse vor einem Spülvorgang und wird die volle Leistung nach dem Spülvorgang wiederum erreicht (ist eine Leistungskurve vorhanden)?**

Es werden Leistungseinbussen zwischen 50 und 100kW beobachtet. Die ursprüngliche Leistung wird nach einem Spülvorgang wiederum erreicht. Anhand eines Tagesverlaufs wird analysiert, eventuell das Spülintervall auf alle 6h zu erweitern als bisher alle 12h. Das Problem ist aber auch, dass man beim Spülvorgang auftretende Unregelmässigkeiten beim Leistungsverlauf dem Netzbetreiber anmelden und die Unregelmässigkeiten entsprechend entgelten muss.

- **Gibt es Schwall- oder Saugwasser Probleme wegen dem Spülvorgang?**
Nein.
- **Hätten Sie Vorschläge, für das die Verschmutzung nicht in die Anlage eintreten kann?**
Nein.
- **Sind Sie mit Ihrem aktuellen Spülprogramm allgemein zufrieden?**
Ja.
- **Kennen oder wünschen Sie sich ein anderes Spülungsprogramm?**
Nein.

ANHANG A6 Interview im KWKW Tecnicama

Interview vom 23.10.2009

1. Allgemeine Daten

- **Name der Anlage**
Tecnicama SA
- **Standort der Anlage**
Piani di Verdabbio, 6557 Cama
- **Gewässername**
Moesa
- **Betreiber der Anlage (Kontaktdaten)**
Elektrizitätsgesellschaft Laufenburg AG
c/o Officine Idroelettriche di Mesolcina SA,
Centrale Soazza
6558 Lostallo
- **Kraftwerkstyp**
Ausleitungskraftwerk, Kanalkraftwerk

2. Technische Daten

- **Maschinentyp**
Horizontalachsige Francisturbine
- **Hersteller**
Piccard-Pictet & Cie
- **Baujahr**
1920 (Turbine), installiert bei Tecnicama SA im Jahr 1957, Erneuerung Jahr 1986
- **Regulierung**
Einfachreguliert (verstellbare Leitschaufeln)
- **Nennleistung**
350kW
- **Nenndurchfluss**
ca. 4m³/s
- **Nennfallhöhe**
10.39m
- **Nenndrehzahl**
3000/min / Polpaarzahl 6 = 500/min
- **Laufreddurchmesser**
920mm
- **Wirkungsgrad im Optimum (ist ein entsprechendes Diagramm einsehbar?)**
Nur ein altes Wirkungsgraddiagramm mit vorgängigem Laufrad und anderer Fallhöhe.
- **Generatortyp, Betriebsart, Getriebeart**
Synchronbetrieb, Generator Hitzinger, Typ SGF 768/12, 413/238 V AC, 134 A, 50 Hz, 453 kVA, cos Phi 0.8

3. Verschmutzung

- **Zu welchen Jahreszeiten treten Probleme mit der Verschmutzung auf?**
Verschmutzung oder Geschwemmselanfall treten verteilt über das ganze Jahr auf. Es gibt aber Spitzenaufkommen vor allem während dem Herbst und bei Gewittern/Hochwassern.
- **Womit wird die Anlage verschmutzt?**
Laub, Äste, Gras (von Rasen) von Haushalten, Kehrlicht, sehr wenig Algenaufkommen
- **Ist der Anlage ein Rechen vorgeschaltet? Gibt es eine Rechenreinigungsanlage?**
Grob- und Feinrechen (als einziger mit Rechenreinigungsmaschine) bei der Fassung, Einlauf- Feinrechen beim Ausgleichsbecken.
- **Wie wird der Rechen reguliert? (manuell, automatisch, Zeitprogramm, Druckverlust)**
Automatisch über Druckverlustmessung, kann auch von Hand ausgelöst werden bei der Fassung und in der Zentrale.
- **Sind Spülprogramme vorhanden?**
Ja.
- **Wie funktioniert dieses Spülprogramm?**
Maschine auf aktueller Last (je nach Zuflüsse) und Netzbetrieb, Spülbefehl einleiten, Leitapparat schliesst auf 0% für etwa 3s. Nachfolgend wird die Maschine wieder auf die aktuelle Last (je nach Zuflüsse) geregelt. Der ganze Vorgang dauert etwa 30s.
- **Gibt es ein genaues Spülkriterium?**
Nein. Keine definierte Beurteilung vorhanden.
- **Wie wird gespült (z.B. von Hand oder nach einer gewissen Zeit)?**
Auslösung nur von Hand bei der Zentrale Tecnicama möglich.
- **Wie oft wird gespült?**
Ca. 1x pro Woche während Visite.
- **Wo treten die Verschmutzungen auf?**
Ein Foto zeigt Ablagerungen am Leitapparat. Andere Feststellungen können nicht gemacht werden.
- **Sieht man einen Verschmutzungsausstoss nach dem Spülvorgang?**
Vom Betriebsverantwortlichen ist nach einem Spülvorgang ein erhöhter Laubaustrag gesichtet worden.
- **Wie hoch sind die Wirkungsgradverluste?**
Keine Angaben, leider.
- **Wie gross ist die Leistungseinbusse vor einem Spülvorgang und wird die volle Leistung nach dem Spülvorgang wiederum erreicht (ist eine Leistungskurve vorhanden)?**
Keine Angaben. Die Leistung scheint ca. 10% zu steigen. Ein live durchgeführter Spülvorgang ergab eine Leistungserhöhung nach dem Spülen von 10%, wobei die Maschine erst ein halber Tag lief. Ansonsten wird der Spülvorgang erst nach etwa einer Woche Betrieb durchgeführt.
- **Gibt es Schwall- oder Saugwasser Probleme wegen dem Spülvorgang?**
Teilweise, das Wasser strömt kurzzeitig nicht mehr aus der Turbine sondern überläuft beim Ausgleichsbecken. Es sind keine Störungen von Ober- oder Unterlieger bekannt.

- **Hätten Sie Vorschläge, für das die Verschmutzung nicht in die Anlage eintreten kann?**
Eine weitere Rechenreinigungsmaschine beim Einlaufrechen im Ausgleichbecken könnte eventuell etwas verbessern.
- **Sind Sie mit Ihrem aktuellen Spülprogramm allgemein zufrieden?**
Schwierig zu beurteilen, wurde bis jetzt nicht analysiert. Sollte automatisiert werden.
- **Kennen oder wünschen Sie sich ein anderes Spülungsprogramm?**
Wirkungsgradgesteuert.

ANHANG A7 Interview im KWKW Windisch

Interview vom 26.10.2009

1. Allgemeine Daten

- **Name der Anlage**
KWKW Windisch
- **Standort der Anlage**
Windisch, Unterwindisch
- **Gewässername**
Reuss
- **Betreiber der Anlage (Kontaktdaten)**
Elaqua AG
Flughofstrasse 54
8152 Glattbrugg
- **Kraftwerkstyp**
Ausleitungskraftwerk mit Streichwehr, Schleifenkraftwerk

2. Technische Daten

- **Maschinentyp**
Vertikalachsige – MG 1 + 2 Kaplan turbine, MG 3 Propellerturbine
- **Hersteller**
MG 1 + 2 Charmilles, MG 3 Escher Wyss
- **Baujahr**
MG 1 + 2 1974, MG 3 1926
- **Regulierung**
MG 1 + 2 Doppeltreguliert, MG 3 Einfachreguliert
- **Nennleistung**
MG 1 + 2 590kW, MG 3 700kW
- **Nenndurchfluss**
MG 1 + 2 $15.25\text{m}^3/\text{s}$, MG 3 ca. $18 - 20\text{m}^3/\text{s}$
- **Nennfallhöhe**
MG 1 + 2 4.50m, MG 3 4.50m
- **Nenndrehzahl**
MG 1 + 2 ca. 170U/min (wegen Getriebe etwas weniger, ca. 155U/min), MG 3 150U/min
- **Laufdurchmesser**
MG 1 + 2 1.90m, MG 3 2.20m
- **Wirkungsgrad im Optimum (ist ein entsprechendes Diagramm einsehbar?)**
Unbekannt
- **Generatortyp, Betriebsart, Getriebeart**
Synchronbetrieb – MG 1 + 2 BBC mit Reduziergetriebe, MG 3 BBC

3. Verschmutzung

- **Zu welchen Jahreszeiten treten Probleme mit der Verschmutzung auf?**
Einerseits im Herbst beim Laubeinfall und andererseits im Sommer mit der Algenproblematik. Aber natürlich auch bei Hochwassern (erhöhter Geschwemmselanfall sowie Grobholz bei der kleinen Emme werden in der Anlage Windisch bemerkt).
- **Womit wird die Anlage verschmutzt?**
Laub, Algen (Moosalgen, Hahnenfuss), kleine Äste nur bei Sturm, fast kein Zivilabfall.
- **Ist der Anlage ein Rechen vorgeschaltet? Gibt es eine Rechenreinigungsanlage?**
Grobrechen (Stabweite 9 – 10cm) mit Rechenreinigungsmaschine und Feinrechen (Stabweite ca. 5cm) ebenfalls mit Rechenreinigungsmaschine.
- **Wie wird der Rechen reguliert? (manuell, automatisch, Zeitprogramm, Druckverlust)**
Grobrechen: Reinigung von Hand mit maschinellem Rechenreinigungsarm. Hier wird erwähnt, dass die Automatisierung gewisse Gefahren bergen würde, wenn grosse Bäume oder Wurzelstöcke im Rechen eingeklemmt wären. Die Reinigungsanlage ist für solch starke Verschmutzung nicht ausgelegt.
Feinrechen: Automatisiert über einen Timer, normal wird alle 3h gereinigt und im Extremfall alle 0.5h.
- **Sind Spülprogramme vorhanden?**
Nein. Eigenes Spülprogramm entwickelt.
- **Wie funktioniert dieses Spülprogramm?**
Maschine auf aktueller Last und Netzbetrieb, Maschine wird abgeschaltet (vom Netz getrennt), bei Faststillstand wird der Leitapparat manuell 2 – 3 mal geöffnet/geschlossen damit sich die Drehzahl der Turbine wieder erhöht/verkleinert (im Bereich der Nenndrehzahl), danach wird die Maschine wieder aufgefahren auf Netzbetrieb. Der Spülvorgang dauert für alle 3 Maschinen zusammen bis zu 20min.
- **Gibt es ein genaues Spülkriterium?**
Nein. Kein definiertes Kriterium (z.B. Leistungswert) vorhanden. Die Beurteilung vom Betriebsleiter erfolgt individuell nach dem Leistungsverlauf.
- **Wie wird gespült (z.B. von Hand oder nach einer gewissen Zeit)?**
Auslösung nur von Hand bei der Zentrale vom Betriebspersonal möglich.
- **Wie oft wird gespült?**
Ca. 1x pro Woche während Visite/Wartungsarbeiten. Gewöhnlich am Montag.
- **Wo treten die Verschmutzungen auf?**
Am Lauf- und Leitrad. Nach Abschaltung und Besichtigung sind immer noch Ablagerungen vor allem am Leit-, aber auch am Laufrad erkennbar.
- **Sieht man einen Verschmutzungsausstoss nach dem Spülvorgang?**
Vom Betriebsverantwortlichen ist nach einem Spülvorgang ein erhöhter Laubaustrag gesichtet worden.
- **Wie hoch sind die Wirkungsgradverluste?**
Unbekannt

- **Wie gross ist die Leistungseinbusse vor einem Spülvorgang und wird die volle Leistung nach dem Spülvorgang wiederum erreicht (ist eine Leistungskurve vorhanden)?**

Ein live durchgeführter Spülvorgang ergab eine Leistungssteigerung der gesamten Anlage von etwa 120kW was einer Leistungssteigerung von 6.5% entspricht, bei einer total installierten Leistung von ca. 1880kW.

- **Gibt es Schwall- oder Saugwasser Probleme wegen dem Spülvorgang?**

Durch Drosselung der Anlage vor dem Spülvorgang auf ein Minimum, gibt es wegen der analgenspezifischen Anordnung mit Überlaufschwelle beim Turbineneinlauf keine Probleme. Bei Notabschaltung kann das Areal überfluten, weil die Schützen im Einlauf nicht genug schnell schliessen können.

- **Hätten Sie Vorschläge, für das die Verschmutzung nicht in die Anlage eintreten kann?**

Bei erhöhtem Geschwemmselaufkommen wird der Seitenschütz vor dem Grobrechen geöffnet um eine Sogströmung zu generieren, die das meiste Geschwemmsel direkt ins Unterwasser leitet. Durch einen Schwellbaum (ca. 40cm eingetaucht) im Fassungsbe- reich wird zudem das oberflächennahe Geschwemmsel zu diesem Seitenschütz gelenkt.

- **Sind Sie mit Ihrem aktuellen Spülprogramm allgemein zufrieden?**

Sollte automatisiert werden.

- **Kennen oder wünschen Sie sich ein anderes Spülungsprogramm?**

Wirkungsgradgesteuert wäre erwünscht. Auch eine Auslösung bei einem Leistungs- schwellwert kommt in Betracht.

ANHANG A8 Interview im KWKW Stroppel

Interview vom 26.10.2009

1. Allgemeine Daten

- **Name der Anlage**
KWKW Stroppel
- **Standort der Anlage**
Untersiggental
- **Gewässername**
Limmat (letzte Meter), Unterwasser Aareaufstau
- **Betreiber der Anlage (Kontaktdaten)**
Elaqua AG
Flughofstrasse 54
8152 Glattbrugg
- **Kraftwerkstyp**
Ausleitungskraftwerk mit Streichwehr, Schlingenkraftwerk

2. Technische Daten

- **Maschinentyp**
Vertikalachsige – MG 1 + 2 Francisturbine, MG 3 Kaplan turbine
- **Hersteller**
MG 1 Wiegart und Bähr, MG 2 Rieter, MG 3 EFG Feldkirch
- **Baujahr**
MG 1 2004, MG 2 1907, MG 3 1996
- **Regulierung**
MG 1 + 2 Einfachreguliert, MG 3 Doppeltreguliert
- **Nennleistung**
MG 1 250kW, MG 2 250kW, MG 3 300kW
- **Nenndurchfluss**
MG 1 ca. 10 – 12m³/s, MG 2 ca. 8 – 10m³/s, MG 3 ca. 15m³/s
- **Nennfallhöhe**
MG 1 + 2 + 3 2 – 2.5m (je nach Aarestand)
- **Nenndrehzahl**
MG 1 ca. 150 – 160U/min, MG 2 ca. 150 – 160U/min, MG 3 135U/min
- **Laufdurchmesser**
MG 1 ca. 1.80m, MG 2 ca. 1.80m, MG 3 2.27m
- **Wirkungsgrad im Optimum (ist ein entsprechendes Diagramm einsehbar?)**
Unbekannt
- **Generatortyp, Betriebsart, Getriebeart**
Flender Getriebe MG 1 Asynchron, MG 2 Asynchron, MG 3 Synchron

3. Verschmutzung

- **Zu welchen Jahreszeiten treten Probleme mit der Verschmutzung auf?**
Einerseits im Herbst beim Laubeinfall und andererseits im Sommer mit der Algenproblematik
- **Womit wird die Anlage verschmutzt?**
Laub, Algen (Moosalgen, Hahnenfuss), Zivilabfall, Kadaver.
Das Problem ist, dass nur ein Rechen vorhanden ist, und sämtliches Geschwemmsel an diesem abgelagert wird, resp. herausgenommen werden muss.
- **Ist der Anlage ein Rechen vorgeschaltet? Gibt es eine Rechenreinigungsanlage?**
Feinrechen (Stabweite ca. 4cm) mit Rechenreinigungsmaschine.
- **Wie wird der Rechen reguliert? (manuell, automatisch, Zeitprogramm, Druckverlust)**
Die Rechenreinigungsanlage des Feinrechens vor den Turbineneinläufen wird von Hand bedient. Die Problematik ist, dass die Rechenreinigung mit eingetauchten Ketten realisiert ist, wodurch ein Bruchpotential dieser besteht durch Korrosion und Abnützung an Schwachstellen.
- **Sind Spülprogramme vorhanden?**
MG 1 + 2 Nein, MG 3 Ja (jedoch nicht eingesetzt, resp. Programm wurde vom Hersteller noch nicht in die Steuerung geladen).
- **Wie funktioniert dieses Spülprogramm?**
MG 1 + 2: Maschine auf aktueller Last und Netzbetrieb, Maschine wird abgeschaltet, resp. der Leitapparat schliesst auf 0% und der Generator wirkt kurzzeitig als Motor, dann wird wiederum synchronisiert und die Leitapparatstellung 1 – 2mal variiert. Nachfolgend wird die Maschine wieder aufgefahren auf Netzbetrieb. Dieses Vorgehen wird nur vom Betriebsleiter angewendet. Vom Betriebspersonal wird ein vereinfachter Spülvorgang durchgeführt. Die Maschine wird einfach abgeschaltet, die Drehzahl sinkt bis Stillstand, anschliessend wird wieder aufgefahren auf Netzbetrieb.
MG 3: Maschine auf aktueller Last und Netzbetrieb, Maschine wird abgeschaltet (vom Netz getrennt), bei Faststillstand wird der Leitapparat manuell 2 – 3 mal geöffnet/geschlossen damit sich die Drehzahl der Turbine wieder erhöht/verkleinert (im Bereich der Nenndrehzahl), danach wird die Maschine wieder aufgefahren auf Netzbetrieb. Der ganze Vorgang für die 3 Turbinen dauert etwa 15min.
- **Gibt es ein genaues Spülkriterium?**
Nein. Die Beurteilung vom Betriebsleiter erfolgt individuell nach dem Leistungsverlauf.
- **Wie wird gespült (z.B. von Hand oder nach einer gewissen Zeit)?**
Auslösung nur von Hand bei der Zentrale vom Betriebspersonal möglich.
- **Wie oft wird gespült?**
Ca. 1x pro Woche. Bei Bedarf aber auch täglich.
- **Wo treten die Verschmutzungen auf?**
MG 1 + 2 Leitrad-schaukeln, MG 3 Leit- und Laufrad-schaukeln.
- **Sieht man einen Verschmutzungsausstoss nach dem Spülvorgang?**
Vom Betriebsverantwortlichen ist nach einem Spülvorgang ein erhöhter Laubaustrag gesichtet worden.
- **Wie hoch sind die Wirkungsgradverluste?**
Unbekannt

- **Wie gross ist die Leistungseinbusse vor einem Spülvorgang und wird die volle Leistung nach dem Spülvorgang wiederum erreicht (ist eine Leistungskurve vorhanden)?**

Eine live durchgeführte Spülung bei der MG 3 ergab eine Leistungserhöhung nach dem Spülen von 27kW was einer Steigerung von 14% entspricht bei 192kW aktueller Betriebslast.

Die Leistungssteigerung bei den MG 1 + 2 wird vom Betriebsleiter mit knapp 10% beziffert. Dabei wird angemerkt, dass wohl die Kaplan turbine empfindlicher auf die Verschmutzungen reagiert als Francisturbinen.

Es wird erwähnt, dass das Saugrohr der Kaplan turbine (MG 3) von der früher eingebauten Francisturbine übernommen wurde und eigentlich nicht für die neue Kaplan turbine ausgelegt ist. Dies kann durch die Beobachtung bei den Saugrohraustritten bestätigt werden, wonach bei dieser Turbine der Dissipationsschwall sichtlich am höchsten ist.

- **Gibt es Schwall- oder Saugwasser Probleme wegen dem Spülvorgang?**
Lediglich auf der Unterwasserseite zu beobachten, aber problemlos in der Beurteilung.
- **Hätten Sie Vorschläge, für das die Verschmutzung nicht in die Anlage eintreten kann?**

Weitere Tests mit dem kürzlich eingebauten Schwellbaum werden fortgesetzt um den optimalen Stellwinkel des Elements zur Strömungsrichtung herauszufinden. Zudem ist eine stärkere Rechenreinigungsanlage in Planung.

- **Sind Sie mit Ihrem aktuellen Spülprogramm allgemein zufrieden?**

Sollte automatisiert werden.

- **Kennen oder wünschen Sie sich ein anderes Spülungsprogramm?**

Bei Anschaffung der neuen Leittechnik wäre es von Vorteil, die Rechenreinigung mit dem Spülvorgang zu kombinieren, z.B. zuerst den Rechen reinigen und anschliessend (nach etwa 2min.) den Spülvorgang einleiten um das Geschwemmsel bei der Turbine ableiten zu können.

Es wird der Umstand erläutert, dass bei einem KWKW die Personalsituation einfach nicht gleich ist, wie bei den Grosskraftwerken. Daher ist die Personalbelegung in einem KWKW bei weitem nicht immer gegeben. Daher wäre eine Automatisierung umso wichtiger.

ANHANG A9 Interview im KWKW Bürglen

Interview vom 28.10.2009

1. Allgemeine Daten

- **Name der Anlage**
KWKW Bürglen
- **Standort der Anlage**
8575 Bürglen, Thurgau
- **Gewässername**
Ausleitkanal an der Thur, Thurkanal
- **Betreiber der Anlage (Kontaktdaten)**
Elaqua AG
Flughofstrasse 54
8152 Glattbrugg
- **Kraftwerkstyp**
Ausleitungskraftwerk, Kanalkraftwerk

2. Technische Daten

- **Maschinentyp**
Horizontalachsige – Doppelfrancis turbine, Francis turbine
- **Hersteller**
Bell Kriens
- **Baujahr**
Doppelfrancis turbine 1947, Francis turbine 1932
- **Regulierung**
Doppelfrancis turbine einfachreguliert (Schwimmerregulierung), Francis turbine gar nicht
- **Nennleistung**
Doppelfrancis turbine 550kW, Francis turbine 142kW
- **Nenndurchfluss**
Doppelfrancis turbine 13m³/s, Francis turbine 3m³/s
- **Nennfallhöhe**
5.90m
- **Nenndrehzahl**
Doppelfrancis turbine 136U/min, Francis turbine 107U/min
- **Laufdurchmesser**
Doppelfrancis turbine 1.20m, Francis turbine 0.95m
- **Wirkungsgrad im Optimum (ist ein entsprechendes Diagramm einsehbar?)**
Unbekannt
- **Generatortyp, Betriebsart, Getriebeart**
Synchronbetrieb – Doppelfrancis turbine direkt gekoppelt, Francis turbine mit Riemen-
übersetzung, Oerlikon

3. Verschmutzung

- **Zu welchen Jahreszeiten treten Probleme mit der Verschmutzung auf?**

Einerseits im Sommer bei Hochwasser und andererseits im Herbst beim Laubeinfall und erhöhtem Windaufkommen. Speziell wird diese Anlage im Winter mit der Eisbildungsproblematik belastet (entweder schwimmend ankommend oder Eisbildung auch an Rechenstäben). Im Extremfall muss alle 3h die schwimmende Eisschicht in Abstimmung mit den Unterliegern abgeführt werden.

- **Womit wird die Anlage verschmutzt?**

Laub, Schwemmh Holz, Äste, Zivilabfall (Aludosen, Petflaschen, Autoreifen, Plastik von Baustellen, Verpackungsfolien). Sehr schwache Algenproblematik. Diese kommt vor allem bei Kraftwerken vor, die oberwasserseitig kleine Fliessgeschwindigkeiten haben oder sogar Totwasserregionen – und bei hohen Temperaturen.

- **Ist der Anlage ein Rechen vorgeschaltet? Gibt es eine Rechenreinigungsanlage?**

Direkt vor der Turbine gibt es ein Feinrechen mit Rechenreinigungsanlage.

- **Wie wird der Rechen reguliert? (manuell, automatisch, Zeitprogramm, Druckverlust)**

Der Rechenreinigungsprozess wird automatisiert über einen Timer ausgelöst, normal wird alle 10h gereinigt und im Extremfall im Dauerbetrieb, je nach Beurteilung der Wasserqualität. Diese Beurteilung basiert auf Erfahrung. Wird ein Hochwasser prognostiziert, wird das Intervall vorzeitig reduziert.

- **Sind Spülprogramme vorhanden?**

Nein, eigenes Spülprogramm entwickelt.

- **Wie funktioniert dieses Spülprogramm?**

Maschine auf aktueller Last und Netzbetrieb, Abschalten des Wasserzuflusses, Leitapparat wird voll offen gelassen, Maschine bleibt am Netz, Wasserzufuhr wird wieder geöffnet, Maschine fährt wieder auf Sollleistung.

Mehrere Versuche mit Leitapparatvariationen ergaben keinen zusätzlichen Spüleffekt, resp. grössere Leistungssteigerung nach Spülvorgang.

- **Gibt es ein genaues Spülkriterium?**

Nein. Die Beurteilung vom Betriebsleiter erfolgt individuell nach dem Leistungsverlauf. Das Bedienpersonal ist instruiert, bei einer Unterschreitung eines Leistungsschwellwertes die Spülung durchzuführen. Es wird an jedem Tag (bei Visite) beurteilt ob gespült werden muss oder nicht.

- **Wie wird gespült (z.B. von Hand oder nach einer gewissen Zeit)?**

Manuelle Auslösung nur von Hand bei der Zentrale vom Betriebspersonal möglich.

- **Wie oft wird gespült?**

Wenn eine gute Wasserqualität vorliegt 1mal pro Woche, im Extremfall auch 2mal pro Tag.

- **Wo treten die Verschmutzungen auf?**

Am Lauf- und Leitrad. Vor allem am Laufradeintritt, Geschwemmsel legt sich um die Vorderkante, aber auch die Leitschaukeln werden von Geschwemmsel umschlingt und es tritt ein Verlegungseffekt ein. Von der Erfahrung her, ist die Beeinflussung der Verschmutzung im Laufrad entscheidender für den Leistungsrückgang.

- **Sieht man einen Verschmutzungsausstoss nach dem Spülvorgang?**

Vom Betriebsverantwortlichen ist nach einem Spülvorgang ein erhöhter Laubaustrag gesichtet worden.

- **Wie hoch sind die Wirkungsgradverluste?**

Unbekannt

- **Wie gross ist die Leistungseinbusse vor einem Spülvorgang und wird die volle Leistung nach dem Spülvorgang wiederum erreicht (ist eine Leistungskurve vorhanden)?**

Die Leistungssteigerung durch den Spülvorgang wird mit 5 – 10% beziffert. Es wird vom Betriebsverantwortlichen erwähnt, dass Sie die Leistung nicht zu lange auf einem tiefen Niveau lassen, sondern immer bedarfsgerecht spülen.

- **Gibt es Schwall- oder Saugwasser Probleme wegen dem Spülvorgang?**

Da direkt nach diesem Kraftwerk eine weitere Kraftwerksstufe folgt, ist der Unterlieger vom Spülvorgang betroffen. Es wird demnach versucht, vom Wassermanagement der anderen Maschinen den Entnahmesunk zu minimieren. Da aber der Unterlieger ebenfalls Spülvorgänge durchführt wird die Problematik von ihm verstanden.

- **Hätten Sie Vorschläge, für das die Verschmutzung nicht in die Anlage eintreten kann?**

Erwähnt wird, dass die Stabweite des Rechens einen wesentlichen Einfluss auf den Verschmutzungsgrad der Turbine hat. Zudem hängt betrieblich viel von der Rechenreinigungsanlage ab, die oftmals zu schwach ausgelegt ist um erhöhtes Geschwemmselaufkommen vom Rechen zu entfernen.

Die Eisbildungsproblematik wird vom Betriebsleiter als abschwächend empfunden, da weniger oft ausgeprägte Kälteperioden im Winter auftreten als noch zu früheren Zeiten.

Weiter kann von der Erfahrung her berichtet werden, dass wenn verschmutztes dreckiges Wasser vorliegt, weniger Leistung produziert wird (wegen geringeren spezifischen Gewichts). Auch die Temperatur des Wassers hat einen Einfluss auf die maximale Leistung, bei 4° wird die höchste Leistung erreicht, bei 20° oder 1° ist es weniger.

- **Sind Sie mit Ihrem aktuellen Spülprogramm allgemein zufrieden?**

Ja. Eine Automatisierung wäre zwar erwünscht - jedoch nicht realisierbar, da das Projekt zum Neubau dieser Anlage gestartet wurde.

- **Kennen oder wünschen Sie sich ein anderes Spülungsprogramm?**

Vom Betrieb her ist ein automatisiertes Spülprogramm unerlässlich.

ANHANG A10 Interview im KWKW Au-Schönenberg

Interview vom 28.10.2009

1. Allgemeine Daten

- **Name der Anlage**
KWKW Au-Schönenberg
- **Standort der Anlage**
Kradolf-Schönenberg
- **Gewässername**
Thur
- **Betreiber der Anlage (Kontaktdaten)**
Elaqua AG
Flughofstrasse 54
8152 Glattbrugg
- **Kraftwerkstyp**
Flusskraftwerk, Buchtenkraftwerk mit Entnahgebauwerk

2. Technische Daten

- **Maschinentyp**
Vertikalachsige Kaplan turbine, Hauptturbine und Dotierturbine
- **Hersteller**
VATECH (heute Andritz Hydro)
- **Baujahr**
2002
- **Regulierung**
Doppeltreguliert
- **Nennleistung**
Hauptturbine 1737kW, Dotierturbine 498kW
- **Nenndurchfluss**
Hauptturbine 34m³/s, Dotierturbine 2m³/s – 9m³/s (d.h. 2m³/s ist Dotierstellung)
- **Nennfallhöhe**
Hauptturbine 5.91m, Dotierturbine 6.41m
- **Nenndrehzahl**
Hauptturbine 167U/min, Dotierturbine 333U/min
- **Laufdurchmesser**
Hauptturbine 2350mm, Dotierturbine 1200mm
- **Wirkungsgrad im Optimum (ist ein entsprechendes Diagramm einsehbar?)**
Wurde vom Lieferant überprüft.
- **Generatortyp, Betriebsart, Getriebeart**
Bartholdi, Synchronbetrieb

3. Verschmutzung

- **Zu welchen Jahreszeiten treten Probleme mit der Verschmutzung auf?**
Einerseits im Sommer bei Hochwasser und andererseits im Oktober und November bei Laubeinfall. Im Winter tritt keine Verschmutzungsproblematik auf.
- **Womit wird die Anlage verschmutzt?**
Schwemmholz, Laub, Zivilabfall (Siedlungsabfall).
- **Ist der Anlage ein Rechen vorgeschaltet? Gibt es eine Rechenreinigungsanlage?**
Bei beiden Turbinen ist ein Feinrechen (Stabweite 4cm Dotierturbine, 6cm Hauptturbine) mit Rechenreinigungsanlage installiert.
- **Wie wird der Rechen reguliert? (manuell, automatisch, Zeitprogramm, Druckverlust)**
Die Auslösung der Rechenreinigung wird über den Druckverlust reguliert, die maximalen Druckverluste vor Auslösung betragen 6cm bei der Dotierturbine und 9cm bei der Hauptturbine. Es besteht auch die Möglichkeit des manuellen Eingriffs (der manuellen Auslösung) mit Einstellung der Zyklenzahl.
- **Sind Spülprogramme vorhanden?**
Ja.
- **Wie funktioniert dieses Spülprogramm?**
Maschine auf aktueller Last und Netzbetrieb, Leit- und Laufrad auf entsprechender optimaler Stellung, Start Spülvorgang, Laufrad schliesst auf etwa 15% (Leitrad bleibt in Ursprungstellung), Leitrad geht auf etwa 85% auf (Laufrad bleibt bei 15%), Leitrad ebenfalls auf 15% (wie Laufrad), Spülprogramm Ende, Netzbetrieb. Der Vorgang dauert im Gesamten weniger als 2min.
- **Gibt es ein genaues Spülkriterium?**
Einerseits gilt immer ein Zeitkriterium (siehe „Wie oft wird gespült?“). Andererseits ist auch eine nicht zu überschreitende Leistungsdifferenz hinterlegt zwischen Sollleistung, bei entsprechendem Gefälle und Leit- / Laufradstellung, und Istleistung.
- **Wie wird gespült (z.B. von Hand oder nach einer gewissen Zeit)?**
Gespült wird automatisch sobald ein Spülkriterium anspricht. Eine manuelle Auslösung ist in der Kraftwerkszentrale möglich.
- **Wie oft wird gespült?**
Das Zeitintervall kann zwischen 6h (Frühling/Sommer/Herbst), 12h (Winter) und 24h (Urstellung, vom Turbinenlieferant) eingestellt werden. Die Zeitintervalle werden mittels Betriebserfahrung justiert - entsprechend steigender Erfahrung angepasst.
- **Wo treten die Verschmutzungen auf?**
Am Leit- und Laufrad.
- **Sieht man einen Verschmutzungsausstoss nach dem Spülvorgang?**
Vom Betriebsverantwortlichen ist nach einem Spülvorgang ein erhöhter Laubaustrag gesichtet worden.
- **Wie hoch sind die Wirkungsgradverluste?**
Unbekannt

- **Wie gross ist die Leistungseinbusse vor einem Spülvorgang und wird die volle Leistung nach dem Spülvorgang wiederum erreicht (ist eine Leistungskurve vorhanden)?**

Erfahrungsgemäss wird eine Leistungssteigerung von ca. 5% durch den Spülvorgang erreicht. Durch das relativ häufige Spülen sinkt die Leistung nicht so stark ab, wie bei vielen anderen Anlagen, wo weniger gespült wird.

- **Gibt es Schwall- oder Saugwasser Probleme wegen dem Spülvorgang?**

Bei der Dotierturbine gibt es wegen dem relativ kleinen Durchfluss keine Probleme. Bei der Hauptturbine wird der Durchfluss, welcher beim Spülvorgang kurzzeitig variiert, mit dem gekoppelten Grundablass (mit aufgesetzter Klappe) auf möglichst konstantem Niveau gehalten.

- **Hätten Sie Vorschläge, für das die Verschmutzung nicht in die Anlage eintreten kann?**

Es könnte eventuell die Tauchwandtiefe vergrössert werden.

- **Sind Sie mit Ihrem aktuellen Spülprogramm allgemein zufrieden?**

Ja. Momentan werden keine weiteren Ansprüche gesehen.

- **Kennen oder wünschen Sie sich ein anderes Spülungsprogramm?**

Nein.

ANHANG A11 Interview im KWKW Sarneraa

Interview vom 11.11.2009

1. Allgemeine Daten

- **Name der Anlage**
KWKW Sarneraa
- **Standort der Anlage**
Alpnach-Dorf
- **Gewässername**
Sarneraa
- **Betreiber der Anlage (Kontakt Daten)**
Centralschweizerische Kraftwerke AG
Hirschengraben 33
Postfach, 6002 Luzern
- **Kraftwerkstyp**
Ausleitungskraftwerk mit oberwasserseitigem Stausee und Druckstollen

2. Technische Daten

- **Maschinentyp**
2 vertikalachsige Kaplan turbinen
- **Hersteller**
Bell, Kriens
- **Baujahr**
1957, Laufrad frisch revidiert, Leittechnik wird derzeit erneuert
- **Regulierung**
Doppeltreguliert (verstellbare Leit- und Laufradschaufeln)
- **Nennleistung**
1150kW pro Maschine
- **Nenndurchfluss**
 $6\text{m}^3/\text{s}$ pro Maschine
- **Nennfallhöhe**
23m
- **Nenndrehzahl**
600U/min
- **Laufraddurchmesser**
1.00m
- **Wirkungsgrad im Optimum (ist ein entsprechendes Diagramm einsehbar?)**
92% bei 90% Last, gewichteter Mittelwert 90.6%
- **Generatortyp, Betriebsart, Getriebeart**
BBC, Synchronbetrieb

3. Verschmutzung

- **Zu welchen Jahreszeiten treten Probleme mit der Verschmutzung auf?**
Hauptsächlich im Herbst beim Laubeinfall.
- **Womit wird die Anlage verschmutzt?**
Laub, Holz, Seegras, Schilf
- **Ist der Anlage ein Rechen vorgeschaltet? Gibt es eine Rechenreinigungsanlage?**
Feinrechen (Stabweite ca. 3-4cm) mit Rechenreinigungsmaschine beim Fassungsbaupark am Stausee.
- **Wie wird der Rechen reguliert? (manuell, automatisch, Zeitprogramm, Druckverlust)**
Einerseits wird nach festen Zeitintervallen gereinigt (am Morgen um 06:00Uhr und am Abend um 18:00Uhr) und andererseits ist eine Auslösung der Rechenreinigung bei einer Überschreitung einer definierten Wasserstands Differenz vor und nach dem Rechen überlagert.
- **Sind Spülprogramme vorhanden?**
Bisher eigenes Spülprogramm durchgeführt. Derzeit Erneuerung der Leittechnik und daher wird ein Spülprogramm vom Hersteller implementiert.
- **Wie funktioniert dieses Spülprogramm?**
Bisher: Das Laufrad wird manuell mehrere Male auf- und zugeschwenkt bei fester Leitradstellung.
Neu: Unbekannt.
- **Gibt es ein genaues Spülkriterium?**
Nein. Die Beurteilung vom Betriebspersonal erfolgt individuell nach dem Leistungsverlauf oder nach der Geräuschentwicklung der Turbine.
- **Wie wird gespült (z.B. von Hand oder nach einer gewissen Zeit)?**
Auslösung nur von Hand bei der Zentrale vom Betriebspersonal möglich.
- **Wie oft wird gespült?**
Keine durchschnittlichen Angaben möglich (so viel wie nötig).
- **Wo treten die Verschmutzungen auf?**
Am Leitapparat.
- **Sieht man einen Verschmutzungsausstoß nach dem Spülvorgang?**
Nein.
- **Wie hoch sind die Wirkungsgradverluste?**
Unbekannt.
- **Wie groß ist die Leistungseinbuße vor einem Spülvorgang und wird die volle Leistung nach dem Spülvorgang wiederum erreicht (ist eine Leistungskurve vorhanden)?**
Ist nicht quantifiziert.
- **Gibt es Schwall- oder Saugwasser Probleme wegen dem Spülvorgang?**
Nein.
- **Hätten Sie Vorschläge, für das die Verschmutzung nicht in die Anlage eintreten kann?**
Nein. Ein Vorschlag für eine Tauchwandanordnung im Fassungs Bereich wird als nicht realistisch oder realisierbar angesehen.

- **Sind Sie mit Ihrem Spülprogramm allgemein zufrieden?**

Das bisherige Verfahren ist mit der neuen Leittechnik im Umbruch. Nach deren Implementation wäre eine Automatisierung der Spülvorgangsauslösung erwünscht.

- **Kennen oder wünschen Sie sich ein anderes Spülungsprogramm?**

Nachrüstung erfolgt durch derzeitige Leittechnikerneuerung.

ANHANG A12 Interview im KWKW Emmenweid

Interview vom 11.11.2009

1. Allgemeine Daten

- **Name der Anlage**
KWKW Emmenweid
- **Standort der Anlage**
Emmenbrücke, Swiss Steel Areal
- **Gewässername**
Kleine Emme
- **Betreiber der Anlage (Kontaktdaten)**
Centralschweizerische Kraftwerke AG
Hirschengraben 33
Postfach, 6002 Luzern
- **Kraftwerkstyp**
Ausleitungskraftwerk, Kanalkraftwerk

2. Technische Daten

- **Maschinentyp**
Vertikalachsige Kaplan turbine
- **Hersteller**
VATECH, Ravensburg
- **Baujahr**
2003, kompletter Umbau
- **Regulierung**
Doppeltreguliert (verstellbare Leit- und Laufradschaufeln)
- **Nennleistung**
1080kW
- **Nenndurchfluss**
 $12\text{m}^3/\text{s}$
- **Nennfallhöhe**
10.5m
- **Nenndrehzahl**
375U/min
- **Laufraddurchmesser**
1.45m
- **Wirkungsgrad im Optimum (ist ein entsprechendes Diagramm einsehbar?)**
Unbekannt
- **Generatortyp, Betriebsart, Getriebeart**
Bartholdi, Synchronbetrieb

3. Verschmutzung

- **Zu welchen Jahreszeiten treten Probleme mit der Verschmutzung auf?**
Einerseits im Herbst beim Laubeinfall und andererseits im Winter bei Eisbildung, oder bei Anschwimmen von Eisblöcken aus der kleinen Emme.
- **Womit wird die Anlage verschmutzt?**
Laub, kleine Äste, keine Algenproblematik.
- **Ist der Anlage ein Rechen vorgeschaltet? Gibt es eine Rechenreinigungsanlage?**
Grobrechen (Stabweite grösser 30cm) bei Stauwehr, vor Rechenhaus ein Grobrechen (Stabweite ca. 10cm) und Feinrechen (Stabweite ca. 5cm) mit Rechenreinigungsmaschine im Rechenhaus vor Druckleitung.
- **Wie wird der Rechen reguliert? (manuell, automatisch, Zeitprogramm, Druckverlust)**
Die Auslösung der Rechenreinigung wird über eine Messung der Wasserstands Differenz vor und nach dem Feinrechen gesteuert.
- **Sind Spülprogramme vorhanden?**
Ja.
- **Wie funktioniert dieses Spülprogramm?**
Maschine auf aktueller Last und Netzbetrieb, Start Spülvorgang, das Laufrad schliesst und das Leitrاد öffnet gleichzeitig, danach schliesst das Leitrاد (Laufrad bleibt in Schliessstellung), Spülprogramm Ende, Netzbetrieb. Der Spülvorgang dauert etwa 2min.
- **Gibt es ein genaues Spülkriterium?**
Nein. Die Beurteilung vom Betriebspersonal erfolgt individuell nach dem Leistungsverlauf.
- **Wie wird gespült (z.B. von Hand oder nach einer gewissen Zeit)?**
Auslösung nur von Hand bei der Zentrale vom Betriebspersonal möglich.
- **Wie oft wird gespült?**
Nur wenn nötig, im Durchschnitt weniger als 1x pro Woche.
- **Wo treten die Verschmutzungen auf?**
Vor allem am Stützschaufelring (weniger am Leitrاد), nach Abschaltung und Besichtigung sind immer noch Ablagerungen erkennbar.
- **Sieht man einen Verschmutzungsausstoss nach dem Spülvorgang?**
Nein.
- **Wie hoch sind die Wirkungsgradverluste?**
Unbekannt.
- **Wie gross ist die Leistungseinbusse vor einem Spülvorgang und wird die volle Leistung nach dem Spülvorgang wiederum erreicht (ist eine Leistungskurve vorhanden)?**
Ein live durchgeführter Spülvorgang ergab eine Leistungssteigerung von etwa 25kW (von vor Spülvorgang 620kW zu nach Spülvorgang 645kW) was einer Leistungssteigerung von 4% entspricht bei 620kW Ausgangsleistung.
- **Gibt es Schwall- oder Saugwasser Probleme wegen dem Spülvorgang?**
Nein.

- **Hätten Sie Vorschläge, für das die Verschmutzung nicht in die Anlage eintreten kann?**

Nein. Beim Fassungsbereich hat man aber auch eine erhöhte Geschiebeproblematik. Vom Betriebsleiter wird erwähnt, dass sich die Problematik verschärfte über die letzten Jahre, da die Gewässer immer sauberer würden und damit das Geschiebe nicht mehr an der Sohle festgehalten werde.

- **Sind Sie mit Ihrem Spülprogramm allgemein zufrieden?**

Ja.

- **Kennen oder wünschen Sie sich ein anderes Spülungsprogramm?**

Nach Umrüstung der vorhandenen Leittechnik auf eine neue Softwareversion wäre eine automatische Spülauslösung wünschenswert.

ANHANG A13 Interview im KWKW Rathausen

Interview vom 11.11.2009

1. Allgemeine Daten

- **Name der Anlage**
KWKW Rathausen
- **Standort der Anlage**
Rathausen, Emmen
- **Gewässername**
Reuss
- **Betreiber der Anlage (Kontaktdaten)**
Centralschweizerische Kraftwerke AG
Hirschengraben 33
Postfach, 6002 Luzern
- **Kraftwerkstyp**
Ausleitungskraftwerk, Kanalkraftwerk

2. Technische Daten

- **Maschinentyp**
Horizontalachsige Rohrturbine
- **Hersteller**
Bell, Kriens
- **Baujahr**
1978, Leittechnik wird derzeit erneuert
- **Regulierung**
Doppeltreguliert (verstellbare Leit- und Laufradschaufeln)
- **Nennleistung**
H=4m 1555kW, H=5.2m 2080kW, H=6.0m 2425kW
- **Nenndurchfluss**
45m³/s
- **Nennfallhöhe**
siehe Nennleistung
- **Nenndrehzahl**
Turbine 150U/min, Generator 1000U/min
- **Laufraddurchmesser**
2.80m
- **Wirkungsgrad im Optimum (ist ein entsprechendes Diagramm einsehbar?)**
Unbekannt
- **Generatortyp, Betriebsart, Getriebeart**
Synchronbetrieb mit Planetengetriebe

3. Verschmutzung

- **Zu welchen Jahreszeiten treten Probleme mit der Verschmutzung auf?**
Einerseits im Herbst beim Laubeinfall und andererseits bei Gewittern.
- **Womit wird die Anlage verschmutzt?**
Laub, Holz (bei Gewittern), Zivilabfall.
- **Ist der Anlage ein Rechen vorgeschaltet? Gibt es eine Rechenreinigungsanlage?**
Vor der Turbine ist ein Feinrechen (Stabweite ca. 4cm) mit einer Rechenreinigungsmaschine installiert.
- **Wie wird der Rechen reguliert? (manuell, automatisch, Zeitprogramm, Druckverlust)**
Die Auslösung der Rechenreinigung wird über eine Messung der Wasserstands Differenz vor und nach dem Feinrechen gesteuert. Zudem besteht die Möglichkeit ein festes Reinigungsintervall einzustellen.
- **Sind Spülprogramme vorhanden?**
Ja.
- **Wie funktioniert dieses Spülprogramm?**
Maschine auf aktueller Last und Netzbetrieb, Start Spülvorgang, Leitrad schliesst auf 50% (Laufrad in Ursprungsstellung), Laufrad schliesst ebenfalls auf 50%, Ende Spülprogramm, Netzbetrieb (Leit- und Laufrad gehen auf Stellungen wie vor dem Spülvorgang). Der Spülvorgang dauert etwa 2min.
- **Gibt es ein genaues Spülkriterium?**
Nein.
- **Wie wird gespült (z.B. von Hand oder nach einer gewissen Zeit)?**
Auslösung nur von Hand bei der Zentrale vom Betriebspersonal möglich.
- **Wie oft wird gespült?**
Keine durchschnittlichen Angaben – wenn notwendig wird gespült.
- **Wo treten die Verschmutzungen auf?**
Am Leitrad.
- **Sieht man einen Verschmutzungsausstoss nach dem Spülvorgang?**
Nein.
- **Wie hoch sind die Wirkungsgradverluste?**
Unbekannt
- **Wie gross ist die Leistungseinbusse vor einem Spülvorgang und wird die volle Leistung nach dem Spülvorgang wiederum erreicht (ist eine Leistungskurve vorhanden)?**
Ist nicht quantifiziert.
- **Gibt es Schwall- oder Saugwasser Probleme wegen dem Spülvorgang?**
Ja.
- **Hätten Sie Vorschläge, für das die Verschmutzung nicht in die Anlage eintreten kann?**
Nein.
- **Sind Sie mit Ihrem Spülprogramm allgemein zufrieden?**
Ja.
- **Kennen oder wünschen Sie sich ein anderes Spülungsprogramm?**
Nein.