



Schlussbericht 30.11.2015

Monitoring der Abnutzung an Bechern von Peltonturbinen mittels 3d-Digitalisierungen und Schichtdickenmessungen

Monitoring of wear at buckets of Pelton turbines
based on 3d-digitizing and coating thickness
measurements



Bild: HSLU



Bild: VAW



ETH zürich



Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie

**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik und Architektur
Kompetenzzentrum Fluidmechanik
und Hydromaschinen

Datum: 30.11.2015

Ort: Bern

Auftraggeberin:

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

Auftragnehmerin:

ETH Zürich
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
Hönggerbergring 26
CH-8093 Zürich
www.vaw.ethz.ch

Hochschule Luzern, Technik und Architektur (HSLU)
Kompetenzzentrum für Fluidmechanik und Hydromaschinen
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw
<http://www.hslu.ch/fmhm>

Autoren:

David Felix, VAW, felix@vaw.baug.ethz.ch
André Abgottspon, HSLU, andre.abgottspon@hslu.ch
Dr. Ismail Albayrak, VAW, albayrak@vaw.baug.ethz.ch
Prof. Dr. Robert Boes, VAW, boes@vaw.baug.ethz.ch
Prof. Dr. Thomas Staubli, HSLU, thomas.staubli@hslu.ch

BFE-Bereichsleitung: Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung: Dr. Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.net

BFE-Vertragsnummer: SI/500960-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

In Hoch- und Mitteldruck-Wasserkraftanlagen kann der Hydroabrasiv-Verschleiss an Turbinen infolge schwebstoffhaltigem Triebwasser erhebliche Unterhaltskosten und Ertragseinbussen verursachen sowie die Elektrizitätsproduktion infolge Wirkungsgradabnahme reduzieren. Im Rahmen einer Forschungsarbeit über die Zusammenhänge zwischen Schwebstoffbelastung, Turbinenabrasion und Wirkungsgradänderungen wurden im vorliegenden Projekt die Abnutzung an Bechern von Pelton-turbinen in einer Fallstudie am Kraftwerk Fieschertal (Wallis, Schweiz) quantifiziert. In den Jahren 2013 und 2014 wurden die Geometrie der abgenutzten Becher mit einem optischen 3d-Digitalisier-System und die Dicke der Beschichtung in den Bechern mit einem magnetisch-induktiven Schichtdickenmessgerät mehrmals gemessen. Geometrieveränderungen und Materialverluste wurden durch Vergleich der Messungen vor und nach der Schwebstofftransportsaison quantifiziert. Mit den optischen 3d-Vermessungen konnten Geometrieveränderungen, welche typischerweise an Mittelschneiden und Becher-eintrittskanten vorkommen, bis in den Bereich von Zehntelmillimetern räumlich detailliert erfasst werden. Bei den Schichtdickenmessungen trug die Verwendung von Schablonen zur besseren Reproduzierbarkeit der Messungen bei.

Résumé

Aux aménagements hydro-électriques à haute ou moyenne chute, l'usure des turbines, provoquée par des particules minérales dures contenues dans l'eau, peut engendrer des coûts de maintenance considérables ainsi que des pertes de production et de revenu dues à la réduction du rendement des turbines. Pour contribuer à la recherche sur ces sujets, le présent projet avait pour but de quantifier l'abrasion aux augets des roues des turbines Pelton dans une étude de cas à la centrale hydroélectrique de Fieschertal (Valais, Suisse). La géométrie des augets usées et l'épaisseur de leur revêtement ont été mesurées plusieurs fois entre 2013 et 2014. Un scanner optique 3d (system de numérisation) et un appareil de mesure d'épaisseur de revêtement basé sur l'induction magnétique ont été utilisés. Des différences géométriques et des pertes de matériel ont été calculées en comparant des mesurages avant et après la saison de transport des sédiments. En utilisant le scanner optique, des différences géométriques apparaissant typiquement aux arêtes des augets ont été relevées en détail jusqu'à quelques dixièmes de millimètres. Concernant les épaisseurs du revêtement, l'utilisation des gabarits définissant les endroits des mesurages a contribué à améliorer la reproductibilité des mesurages.

Abstract

At high and medium head hydro-electric power plants (HPPs), hydro-abrasive erosion at turbine parts caused by hard mineral particles in the water may cause considerable maintenance costs as well as decreased revenues and production losses due to reduced turbine efficiency. As part of a research work on these topics, the present project aimed at quantifying the erosion on buckets of Pelton turbine runners at the case study HPP Fieschertal (Valais, Switzerland). The geometry of two eroded buckets and the thickness of their coating were repeatedly measured in the years 2013 and 2014. An optical 3d-scanner (digitizing system) and a coating thickness gauge based on magnetic induction were used. Changes in bucket geometry and material losses were calculated by comparing the measurements before and after the sediment transport seasons. With the optical 3d-scanner, the geometrical changes occurring typically at the main splitters and cut-out edges of Pelton buckets were quantified in detail down to some tenths of millimetres. Regarding the coating thickness, the use of templates defining the measurement locations contributed to a better reproducibility of the measurements.



Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	6
1.1	Hydroabrasiv-Verschleiss an Peltonturbinen	6
1.2	Forschungsprojekt.....	7
2	Ziel der Arbeit.....	8
3	Grundlagen.....	8
3.1	Beschreibung der Turbinen im KW Fieschertal.....	8
3.2	Verschleiss-Monitoring in der bisherigen Praxis	9
3.3	Typische Revisionsarbeiten.....	9
3.4	Wirkungsgradabnahme infolge Verschleiss	10
3.5	Bedeutung von Hydroabrasiv-Verschleiss.....	11
4	Vorgehen	12
4.1	Generelles	12
4.1.1	Messzeitpunkte	12
4.1.2	Laufräder und Revisionsarbeiten	12
4.1.3	Beteiligte.....	12
4.2	Optische Vermessung (Digitalisierungen)	13
4.2.1	Messprinzip und Gerätebescrieb	13
4.2.2	Kalibrierung	13
4.2.3	Durchführung der Messungen	14
4.2.4	Vorgehen bei der Auswertung	15
4.3	Schichtdickenmessungen.....	16
4.3.1	Messprinzip und Gerätebescrieb	16
4.3.2	Kalibrierung	17
4.3.3	Schablonen	18
4.3.4	Durchführung der Messungen	18
4.3.5	Vorgehen bei der Auswertung	19
5	Ergebnisse und Diskussion.....	20
5.1	Optische Vermessung (Digitalisierungen)	20
5.1.1	Einzelne 3d-Modelle.....	20
5.1.2	Vergleich von 3d-Modellen und ermittelte Massenverluste	21
5.1.3	Vergleich der Geometrie in Schnitten	22
5.1.4	Reproduzierbarkeit.....	23
5.1.5	Relativer Fehler der Erosionstiefe.....	25



5.2	Schichtdickenmessungen	25
5.2.1	Schichtdicken	25
5.2.2	Schichtdicken-Differenzen	27
5.2.3	Reproduzierbarkeit.....	28
5.2.4	Relativer Fehler der Erosionstiefe.....	29
6	Schlussfolgerungen	30
7	Ausblick	31
8	Referenzen	32
8.1	Publikationen in Zusammenhang mit dem vorliegenden Projekt	32
8.2	Weitere Referenzen	32
	Anhang	33



1 Ausgangslage

1.1 Hydroabrasiv-Verschleiss an Peltonturbinen

Bei Hoch- und Mitteldruck-Wasserkraftanlagen können mineralische Schwebstoffe im Triebwasser zu Abrasion an Turbinen und stahlwasserbaulichen Anlageteilen führen (Hydroabrasiv-Verschleiss). Bei solchen Wasserkraftanlagen, mit Fallhöhen von mehreren hundert Metern, kommen Francis- und Peltonturbinen zum Einsatz.

Bei den grössten Fallhöhen werden Pelton-Turbinen eingesetzt. Es handelt sich dabei um eine Freistrahlturbine, bei welcher das Laufrad am Umfang mit zweiteiligen Bechern versehen ist, in denen die auf den Laufradumfang gerichteten Wasserstrahlen umgelenkt werden (Abb. 1). In Peltonturbinen, die mit stark sedimenthaltigem Wasser betrieben werden, kann an Düsen, Laufrädern und anderen Bauteilen starker Verschleiss auftreten (z.B. Bajracharya *et al.* 2008). Der Verschleiss ist in diesem Turbinentyp besonders gross, weil hohe Geschwindigkeiten und hohe Beschleunigungen vorkommen:

- Bei einer Fallhöhe von beispielsweise 500 m beträgt die Geschwindigkeit zwischen dem Wasser und der Düse ca. 100 m/s bzw. zwischen dem Wasser und dem Laufradbecher ca. 50 m/s. Diese Geschwindigkeiten sind von der Fallhöhe abhängig und können durch das Turbinendesign nicht reduziert werden.
- Bei einer Becherbreite von beispielsweise 40 cm beträgt die Zentrifugalbeschleunigung während der Umlenkung in einer Becherhälfte bis zum 2500-fachen der Erdbeschleunigung.

Bei der Passage von schwebstoffhaltigem Wasser durch den Becher bewegen sich gröbere Partikel aufgrund der Zentrifugalbeschleunigung tendenziell zur Becherwand hin, an welcher sie durch Gleiten oder Anprall zu Abrasion bzw. allgemeiner ausgedrückt zu Erosion (Materialabtrag) führen können. An den Mittelschneiden wird der bzw. die Wasserstrahlen aufgeteilt (Abb. 1). Die Mittelschneiden (auch Hauptschneiden genannt) und die Bechereintrittskanten (beim Becher-Ausschnitt, auch Nebenschneiden genannt) sind speziell dem Verschleiss ausgesetzt (Abb. 2).

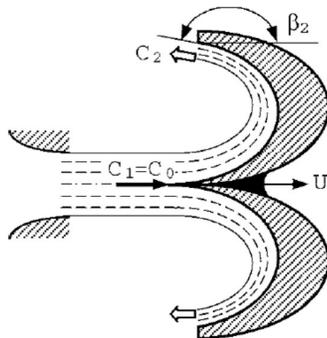


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Aufteilung und Umlenkung des Wasserstrahls in einem Becher eines Peltonlaufrads (Zhang 2009).

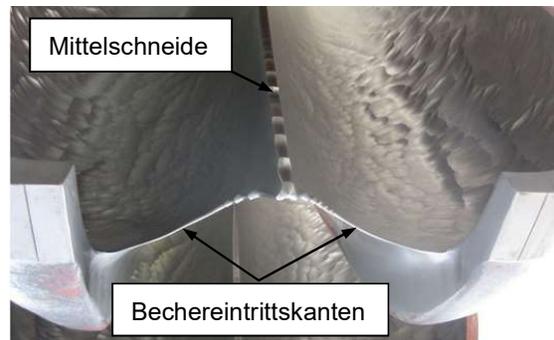


Abbildung 2: Beispiel von Abrasionsschäden an den Bechern eines unbeschichteten Peltonlaufrads (Ausstellungsobjekt bei der Wasserkraftanlage Emosson, Schweiz, Bild: VAW, 2010).

Bei starkem Verschleiss können auch Kavitation oder Tropfenschlagerosion auftreten (Sekundärschäden). Kavitation und Hydroabrasiv-Verschleiss können sich gegenseitig verstärken. Es wird versucht, Laufräder in einem solchen Zustand zu halten, dass keine starken Sekundärschäden auftreten.



Bei Kraftwerksanlagen mit feinsedimentreichem Triebwasser ist es üblich, die wasserberührten Teile zu beschichten, um deren Abrasionswiderstand zu erhöhen und somit deren Einsatzzeit zwischen Revisionen zu verlängern. Bei Fallhöhen von mehreren hundert Metern, d.h. bei Francis und Pelton-turbinen, haben sich seit einigen Jahren Hartbeschichtungen (*hard coating*) durchgesetzt. Diese bestehen aus keramischen Partikeln (Wolframkarbid, Englisch: *Tungsten carbide*), die fast so hart wie Diamant sind und in einer Kobalt-Chrom-Legierung eingebettet sind. Die Mischung (WC-CoCr) wird als *Cermet* bezeichnet (von Englisch: *ceramic* und *metal*). Solche Beschichtungen sind meist nur einige hundert Mikrometer dick (in der Regel 300 bis 500 μm) und werden durch Hochgeschwindigkeitsflammspritzten aufgetragen (Englisch: *HVOF = high velocity oxy fuel*).

Bei Pelton-turbinen werden in der Regel die Innenseite der Becher der Laufräder und die Düsenbauteile beschichtet. Für Düsenbauteile sind kombinierte Produkte mit sehr hohem Erosionswiderstand erhältlich. Bei beschichteten Laufrädern können Abnutzungsschäden insbesondere an den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten auftreten, weil die Beschichtung lokal abgetragen wird. Dann können relativ tiefe Erosionen im Grundmaterial entstehen, da das Grundmaterial einen deutlich geringeren Erosionswiderstand aufweist als das Beschichtungsmaterial. Zur Vermeidung grösserer Schäden wird deshalb angestrebt, dass während der Schwebstoffsaison an möglichst allen relevanten Stellen eine ausreichende Beschichtungsdicke vorhanden ist.

Die Thematik der Turbinenabration gewinnt aus folgenden Gründen an Aktualität:

- Infolge des beobachteten Rückzugs von Gletschern und Permafrost im alpinen Raum und durch die zunehmende Variabilität der Niederschläge werden tendenziell mehr Sedimente in Fließgewässer eingetragen.
- Bei Stauanlagen mit aktuellen Verlandungsproblemen bzw. zum Reduzieren von Konzentrationsspitzen während Spülungen aus ökologischen Gründen wird auch die Möglichkeit des kontinuierlichen Weiterleitens von Feinsedimenten über den Triebwasserweg vermehrt geprüft (z.B. DWA 2006).
- Der Kostendruck in der Wasserkraftbranche fordert weitere wirtschaftliche Optimierungen, beispielsweise auch bezüglich der Zustandsüberwachung von wichtigen Komponenten wie der Turbinen.
- Aufgrund der energiepolitischen Zielsetzungen soll das bestehende Wasserkraftpotential bestmöglich genutzt werden (Energieeffizienz).

1.2 Forschungsprojekt

Für einen optimierten, nachhaltigen Betrieb von Hoch- und Mitteldruck-Wasserkraftanlagen an Flüssen mit hohem Sedimentaufkommen sind verbesserte Kenntnisse über den Hydroabrasiv-Verschleiss und seine Auswirkungen erforderlich. Im Forschungsprojekt „Schwebstoffmonitoring und Verschleiss an Pelton-turbinen“, welches die VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie) der ETH Zürich und die HSLU (Hochschule Luzern, Technik & Architektur) gemeinsam mit Industriepartnern anhand einer Fallstudie am KW Fieschertal durchführen, werden die Schwebstoffe im Triebwasser, die Abnutzung der Turbinen und deren Wirkungsgrad gemessen, um das Phänomen des Hydroabrasiv-Verschleisses mit seinen Ursachen und Auswirkungen besser beschreiben und quantifizieren zu können. Mehrere Teile dieses Forschungsprojekts wurden bzw. werden u.a. durch das BFE gefördert (Verträge Nr. SI/500638-01 für die Periode von Juli 2011 bis Dezember 2013, SI/500638-02 für die Periode von Oktober 2014 bis April 2016, SI/500638-03 für die Periode von Oktober 2015 bis Dezember 2017).

Das vorliegende Projekt, das seit Herbst 2013 durch das BFE gefördert wurde und mit dem vorliegenden Bericht abgeschlossen wird, liefert einen weiteren Baustein zum genannten übergeordneten



Forschungsprojekt. Das vorliegende Projekt bezieht sich auf das **Monitoring** und die **Quantifizierung der Abnutzung** an Bechern von Peltonturbinen mittels zwei Methoden:

- Erfassung der räumlichen Geometrie ausgewählter Laufradbecher mit einem optischen Messsystem basierend auf Streifenlichtprojektion (**3d-Digitalisierung**) sowie
- **Schichtdickenmessungen** in den Bechern mit einem magnetisch-induktiven Messgerät und Schablonen.

2 Ziel der Arbeit

Im vorliegenden Projekt sollen, als Teil des oben genannten Forschungsprojekts,

- die Geometrie von ausgewählten abgenutzten Bechern von Peltonlaufrädern mittels eines optischen Digitalisierungssystems wiederholt vermessen werden,
- Schichtdicken in ausgewählten Bechern von Peltonlaufrädern wiederholt gemessen werden,
- Geometrieveränderungen und Materialverluste ausgewertet und dargestellt werden;
- entsprechende Auswertungsmethoden weiterentwickelt werden und
- Informationen über die praktisch erreichbare Genauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit der Messungen und den Arbeitsaufwand gewonnen werden.

3 Grundlagen

3.1 Beschreibung der Turbinen im KW Fieschertal

In der Zentrale des Wasserkraftwerks Fieschertal sind zwei baugleiche Maschinengruppen je bestehend aus einer horizontalachsigen zweidüsigen Pelton turbine und einem Generator vorhanden. Das Kraftwerk wurde 1975 in Betrieb genommen. Die Kenndaten einer Maschinengruppe sind:

- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| - Nennleistung | 32 MW |
| - Bruttofallhöhe | ca. 520 m |
| - Volumenstrom bei Nennleistung | ca. 7.5 m ³ /s |
| - Anzahl Düsen | 2 |
| - Strahldurchmesser (nominal) | 228 mm |
| - Laufradaussendurchmesser | 2.79 m |
| - Anzahl Becher pro Laufrad | 20 |
| - Becherinnenbreite | 65 cm |
| - Laufradmasse | ca. 8 t |

Es sind vier Laufräder aus den 1970er- und 1980er-Jahren vorhanden. Die Laufräder sind mehrmals revidiert worden. Vor etwa zehn Jahren wurde jeweils nach einer grossen Revision in den Bechern die erwähnte Hart-Beschichtung aufgetragen.



3.2 Verschleiss-Monitoring in der bisherigen Praxis

Die Laufräder von Peltonturbinen können relativ einfach inspiziert werden, da sich das Laufrad einer Pelton turbine im Gegensatz zu Francis- und Kaplan turbinen nicht im Wasser befindet, wenn die Turbine abgestellt ist. Bei grösseren Pelton turbinen ist unter dem Laufrad ein begehrbarer Rost vorhanden, der über eine Drucktür zugänglich ist. Die einzelnen Becher eines Pelton laufrads und die Seriennummer eines Laufrads sind in der Regel mit Schlagzahlen auf der Becheraussenseite gekennzeichnet und so eindeutig identifizierbar.

Die Abnutzung von Turbinenbauteilen wird oft visuell kontrolliert und mit Fotos dokumentiert. Bei beschichteten Bauteilen können Stellen, an denen die Beschichtung nicht mehr vorhanden ist, dank einem Farbunterschied einfach erkannt oder von Hand ertastet werden. Bei unbeschichteten Bauteilen ist Erosion zum Teil an der welligen oder schuppigen Beschaffenheit der Oberflächen erkennbar.

Für die Bestimmung der Abrasion in Peltonbechern werden seit Jahrzehnten Blech-Schablonen eingesetzt, die an bestimmten Stellen in den Becher gehalten werden. Die Grösse des Spalts zwischen einer Schablone und dem Becherprofil kann mit entsprechender Beleuchtung gut sichtbar gemacht werden. Diese Methode eignet sich mehr für die Kontrolle des Becherprofils als für die Erfassung von lokalen Schäden. Die Mittelschneidenbreite oder die Grösse von zu reparierenden Erosionsstellen werden manchmal näherungsweise mit einem Massstab gemessen. Der Materialverlust an den zum Teil doppelt gekrümmten Formen von Peltonbechern oder beispielsweise die räumliche Form des Becherausschnitts sind mit einfachen Methoden kaum erfassbar.

Zur Bestimmung des Massenverlusts an Laufrädern wurde auch die Wägemethode eingesetzt, z.B. von Singh *et al.* (2013) an einem grossen unbeschichteten Francis-Laufrad (76 MW, Masseverlust ca. 1500 kg in einem Revisionszyklus), von Maldet *et al.* (2008) an einem unbeschichteten Pelton-laufrad (10 MW, Masseverlust ca. 100 kg), sowie von Rai *et al.* (2015) und Padhy *et al.* (2011) an Modell-Peltonlaufrädern mit demontierbaren Bechern (Masseverluste ca. 0.4 – 10 g). Die Wägemethode eignet sich für Laboruntersuchungen oder in Fällen, wo Laufräder ohnehin ausgebaut werden und ein beträchtlicher Masseverlust auftritt. Falls Laufräder nicht ohnehin ausgebaut werden müssen, der Massenverlust im Verhältnis zur Laufradmasse klein ist, oder eine räumlich detaillierte Information über die Abrasion gewünscht wird, ist die Wägemethode nicht geeignet.

In grösseren Werkstätten für die Revision von Peltonlaufrädern wird auch 3d-Laserscanning, evtl. kombiniert mit einem fest installierten Messarm, eingesetzt.

Für die Messung der aktuell vorhandenen Beschichtungsdicken werden oft Schichtdickenmessgeräte benutzt. Diese Geräte sind handlich und geben eine lokale Schichtdicke an. In der Regel fällt es aber der messenden Person schwer, die Lage der Messpunkte in den Bechern zu dokumentieren und bei Folgemessungen wieder aufzufinden.

3.3 Typische Revisionsarbeiten

Um den durch Hydroabrasiv-Verschleiss verursachten Unterhaltsaufwand zu illustrieren, werden nachfolgend typische Revisionsarbeiten an einer Hochdruckwasserkraftanlage mit hoher Sedimentbelastung und beschichteten Laufrädern aufgelistet:

jährlich, ausserhalb der Volllastzeit: **kleine Revision (im Turbinengehäuse):**

- Zwischenschliff (vor allem Abrunden der Mittelschneiden und Bechereintrittskanten),
- evtl. kleine Schweissreparaturen
- evtl. lokales Nachbeschichten (blanke Stellen)



alle paar Jahre: **grosse Revision (beim Turbinenhersteller):**

- Vollständiges Entfernen der Beschichtung mit Spezial-Sandstrahlen
- Systematisches Aufschweissen, wo Material fehlt
- Wärmebehandlung (zum Abbau von Eigenspannungen)
- Schleifen (auf Sollgeometrie) und Polieren
- Prüfung auf Risse, Auswuchten etc.
- Neubeschichtung

3.4 Wirkungsgradabnahme infolge Verschleiss

Infolge Erosion an Turbinenbauteilen weicht deren Geometrie zunehmend vom ursprünglichen hydraulischen Profil ab. Die Geometrieänderungen können lokal, z.B. an Mittelschneiden oder Bechereintrittskanten, oder flächig, z.B. als rauhere, gewellte oder geschuppte Oberflächen, auftreten. Dies führt zu einer Verschlechterung der Strömungsbedingungen und zu einer Wirkungsgradabnahme (z.B. Cateni *et al.* 2008). Bei unbeschichteten Peltonturbinen kann die Wirkungsgradreduktion über eine Schwebstofftransportseason (Sommerhalbjahr) mehrere Prozente betragen (Abb. 3).

Von besonderer Bedeutung für die Wirkungsgradreduktion sind die Geometrie der Mittelschneiden und der Bechereintrittskanten. Aus der Literatur (Brekke *et al.* 2002, Maldet 2008) ist bekannt, dass der Wirkungsgrad um einige Prozente abfallen kann, wenn die Mittelschneidenbreite einige Prozente der Becherbreite erreicht (Abb. 4). Die Mittelschneidenbreite wird in der Praxis oft als Indikator für die Abnutzung verwendet (z.B. Boes 2010). Die Mittelschneidenbreite ist aber nicht die einzige relevante Grösse für die Beschreibung des Verschleisses und seiner Auswirkungen. Die Wirkungsgradreduktion kann auch mit einer Vertiefung der Becherausschnitte in Verbindung gebracht werden (Hassler und Schnablegger 2006).

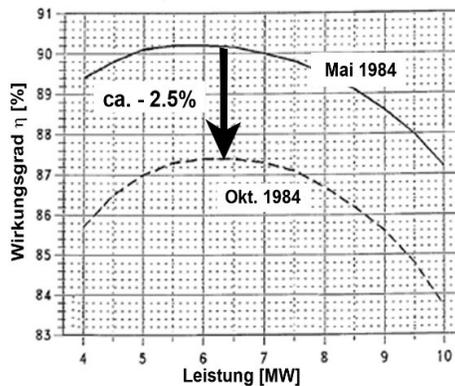


Abbildung 3: Wirkungsgrad in Funktion der Turbinenleistung vor und nach einer Schwebstoffseason, gemessen am KW Aletsch-Mörel, Schweiz (Strübin und Bussy 1988)

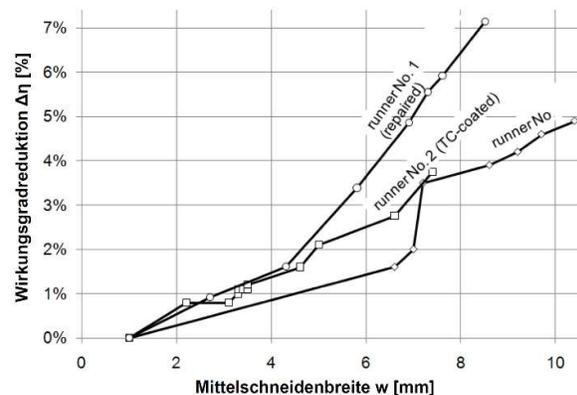


Abbildung 4: Wirkungsgradabnahme infolge Verbreiterung der Mittelschneide an einem Pelton-Laufrad (Becherbreite 228 mm); Messungen am KW Dorferbach, Österreich (Maldet 2008).

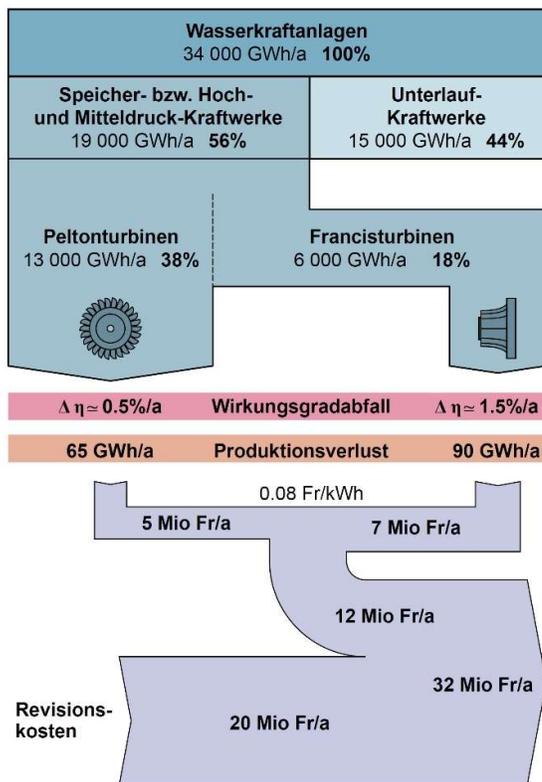


3.5 Bedeutung von Hydroabrasiv-Verschleiss

Hydroabrasiv-Verschleiss kann beträchtliche Kosten für Instandhaltung und Ersatzinvestitionen an Turbinenbauteilen verursachen. Weiter können Laufradwechsel zu Produktionsausfall führen, wenn diese nicht wie üblich ausserhalb der Volllastzeit durchgeführt werden können, sondern kurzfristig erforderlich werden, z.B. nach einem Hochwasserereignis mit hohem Sedimentaufkommen.

Weiter sind Produktionsverluste infolge verschleissbedingter Wirkungsgradabnahmen von Bedeutung. Wie erwähnt, können solche Wirkungsgradabnahmen im Prozentbereich liegen. Für eine Anlage in der Grösse des Kraftwerks Fieschertal (64 MW, 144 GWh/a) kann dies beispielsweise einige Hundert kW bzw. etwa 1 GWh/a ausmachen, was dem Verbrauch von bis zu 250 typischen Schweizer Haushalten entspricht.

Kalberer (1988) schätzte die Produktionsverluste infolge Wirkungsgradabfall bei Pelton-Anlagen im zeitlichen Mittel auf 0.5%. In Abbildung 5 sind die geschätzten jährlichen Kosten, die durch Hydroabrasiv-Verschleiss an Turbinen in der Schweiz verursacht werden, mit Berechnungsannahmen von 1988 zusammengestellt. In der Zwischenzeit ist der Strompreis gesunken und die Revisionskosten dürften aufgrund der Teuerung gestiegen sein.



Für die Sedimentabscheidung und -bewirtschaftung sind kostenintensive Anlagenkomponenten (Entkieser, Entsander oder Speicher) zu erstellen und zu betreiben (betrieblich aufwendige Durchführung von Spülungen, Produktionsausfälle infolge Spülwasserverlusten). Das Thema Hydroabrasiv-Verschleiss hängt eng mit dem Sedimentmanagement an Wasserkraftanlagen und somit auch mit ökologischen Fragen und der gesellschaftlichen Akzeptanz der Wasserkraftnutzung zusammen.

Abbildung 5: Abschätzung der durch Hydroabrasiv-Verschleiss an Turbinen verursachten Kosten in der Schweiz (gemäss Kalberer 1988)



4 Vorgehen

4.1 Generelles

4.1.1 Messzeitpunkte

Die im Proposal vorgesehenen Messungen am Ende der Schwebstoffsaason 2013, sowie vor und nach der Schwebstoffsaason 2014 wurden wie geplant durchgeführt:

- Im Dezember 2013, im April und November 2014 wurde die aktuelle Geometrie von je zwei Bechern der Laufräder der beiden Peltonturbinen im KW Fieschertal digitalisiert.
- Im November 2013 sowie im April/Mai und November 2014 wurden in denselben Bechern die lokalen Dicken der Beschichtung gemessen.

Zusätzlich wurde im April 2014 ein Becher einer Peltonturbinen zweimal direkt nacheinander vermessen, um die Reproduzierbarkeit des optischen Messverfahrens zu untersuchen.

Das optische Messverfahren wurde bereits im Jahr 2012 mehrmals für die Aufnahme der aktuellen Geometrie von Peltonbechern im Kraftwerk Fieschertal eingesetzt. So konnte die Anwendbarkeit des gewählten Messverfahrens vor dem Beginn des vorliegenden Projekts abgeklärt werden. Da es im Jahr 2012 ein grösseres Hochwasserereignis mit hoher Sedimentfracht gab, traten relativ grosse Geometrieänderungen und Materialverluste auf.

Für die Beurteilung der Reproduzierbarkeit der Schichtdickenmessungen war keine Wiederholung der Messungen innerhalb einer Messkampagne erforderlich. Da sich Nachbeschichtungen auf die Bereiche der Mittelschneiden und Bechereintrittskanten beschränkten und somit die Beschichtung im Becher im Winterhalbjahr im Bereich der gewählten Messpunkte unverändert bleibt, konnten für die Untersuchung der Reproduzierbarkeit des Schichtdicken-Messverfahrens die Messungen vom Spätherbst und vom Frühjahr verglichen werden.

4.1.2 Laufräder und Revisionsarbeiten

Während der Monitoringperiode des vorliegenden Projekts, d.h. von Herbst 2013 bis Ende 2014, war in der Maschinengruppe 1 ein Laufrad eingebaut, das seit April 2012 im Einsatz stand. Es wurde damals nach einer grossen Revision in gutem Zustand eingebaut. Bei der Maschinengruppe 2 war im Herbst 2013 ein Laufrad im Einsatz, das am 13.08.2013 (nach dem grösseren Hochwasserereignis vom Juli 2012) eingebaut wurde. Während der Revisionsarbeiten im Winter wurde an diesem Laufrad ein mechanisches Problem festgestellt. Das Laufrad wurde am 21.02.2014 durch eines ersetzt, das seit seiner letzten grossen Revision bereits drei Saisons im Einsatz war.

Die Mittelschneiden und Bechereintrittskanten dieser hart-beschichteten Laufräder wurden innerhalb der Monitoringdauer des vorliegenden Projekts am 14.01.2014 geschliffen und am 04.03.2014 vor Ort nachbeschichtet.

4.1.3 Beteiligte

Die optischen Vermessungen der Laufradbecher im Rahmen dieses Projekts wurden durch A. Abgottspon von der Hochschule Luzern (HSLU) unter Mithilfe von D. Felix von der VAW der ETH Zürich durchgeführt. Bei früheren Aufnahmen war A. Schwery (HSLU) beteiligt. Die aufwendigen Auswertungen der optischen Vermessungen (3d-CAD) wurden von Philip Stern (HSLU), unter Anleitung von A. Abgottspon und im Austausch mit Prof. Dr. T. Staubli und D. Felix durchgeführt.

Die Schablonen für die Schichtdickenmessungen wurden von D. Felix mit Unterstützung durch Werkstattmitarbeiter der VAW und Mitarbeiter des KW Fieschertal erstellt. Die Schichtdickenmessungen wurden von D. Felix durchgeführt und ausgewertet, wobei A. Abgottspon, Dr. I. Albayrak und Prof. Dr. R. Boes mitwirkten.

Die Gommerkraftwerke AG als Betreiberin des KW Fieschertal unterstützte die Durchführung der Messungen durch Mitarbeit des Kraftwerkspersonals (Öffnen und Schliessen des Turbinengehäuses und Einrichten bzw. Entfernen von Bodenplatten bzw. Gerüst), durch zur Verfügung stellen von Hilfsmaterial (Leitern, Beleuchtung, Heizung etc.) und durch Koordination der Messkampagnen mit dem Produktionsprogramm, dem Wasserdargebot und den Revisionsarbeiten.

4.2 Optische Vermessung (Digitalisierungen)

4.2.1 Messprinzip und Gerätebeschreibung

Für die Vermessung der Laufradbecher wurde ein optischer 3d-Scanner verwendet: *Comet L3D 5M* von Steinbichler, Deutschland (seit 2015: Carl Zeiss Optotechnik). Das Messsystem hat eine Auflösung von 5 Mio. Punkten pro Aufnahme. Mit einem Messvolumen von 480 x 400 x 250 mm beträgt der Abstand der Messpunkte auf der Oberfläche im Mittel 190 μm (Steinbichler Optotechnik 2012). Das System basiert auf den Methoden der Streifenlichtprojektion und der räumlichen Triangulation (Abb. 6a). Der Projektor und die Kamera sind in einem Gerät kombiniert, das auf einem Stativ frei platziert wird.

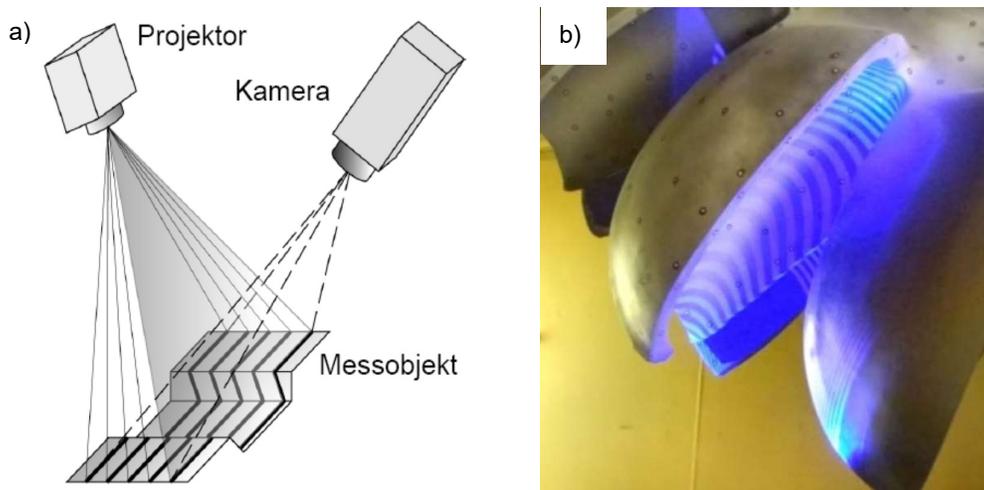


Abbildung 6: a) Zum Messprinzip des optischen Scanners (Quelle: Steinbichler Optotechnik 2012) und b) Lichtstreifen bei der Anwendung an den Bechern von Pelton-turbinen

4.2.2 Kalibrierung

Das Messsystem wurde im Werk kalibriert und validiert. Dazu wird das Messgerät vor einer Referenzplatte aufgestellt. Auf der Referenzplatte ist ein Muster mit bekannter Grösse abgebildet. Bei zwei Validierungsmessungen im Werk betragen die Abweichungen zum Soll und untereinander gemäss Prüfprotokoll lediglich ca. 10 μm ; Abweichungen bis 40 μm werden vom Hersteller als zulässig erachtet (Steinbichler Optotechnik 2012). Nach dem Transport des optischen Messsystems zur

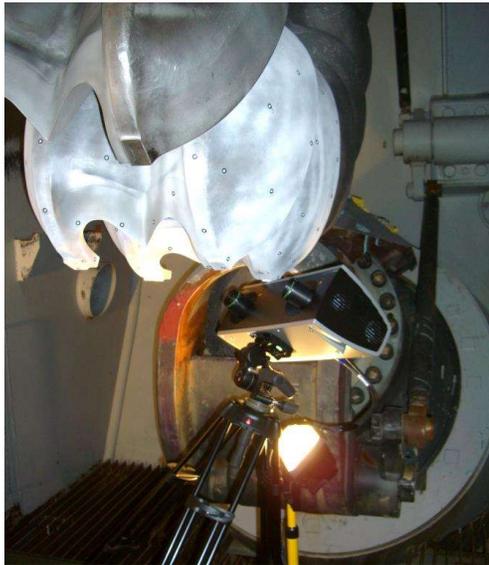


Kraftwerksanlage wurde jeweils die Kalibrierung des Messsystems validiert, nachdem es an die am Messort vorhandene Lufttemperatur akklimatisiert wurde.

4.2.3 Durchführung der Messungen

Die aufzunehmenden Becher werden gereinigt und getrocknet. Zur Reduktion von Reflexionen werden die Becher (bestehend aus rostfreiem Stahl) vor dem Digitalisieren mit einer weisslichen Substanz eingesprüht (Entwicklerspray). Dann werden Markierpunkte in einem unregelmässigen Muster aufgeklebt, in einem Abstand von maximal ca. 15 cm. Die Lufttemperatur im Turbinengehäuse wurde mittels einer Heissluft-Heizung innerhalb des vom Messgerätehersteller vorgeschriebenen Temperaturbereichs gehalten, passend zur Lufttemperatur bei der Kalibrierung.

Das Messgerät wird auf einem Stativ im Turbinengehäuse aufgebaut (Abb. 7) und mit einem leistungsfähigen Messrechner (Laptop) verbunden. Auf dem Messrechner wurde die entsprechende Software installiert.



Das Messgerät wird in der passenden Distanz zum Becher frei positioniert und darf während der Aufnahme nicht verschoben werden. Am Messrechner werden die Parameter für die Aufnahme (Beleuchtungshelligkeit, Kontrast etc.) eingestellt. Aus den Aufnahmen der projizierten Streifenmuster (Abb. 6b) wird die räumliche Lage der Oberflächenpunkte der aufzunehmenden Partie berechnet und als Teilmodell auf dem Bildschirm des Mess-Laptops angezeigt (Abb. 8a).

Abbildung 7: Anordnung für die optische Vermessung der aktuellen Geometrie von ausgewählten Bechern eines Pelton-Laufrads im Turbinengehäuse (Abgottsson *et al.* 2013a)

Aufgrund der gegebenen geometrischen Verhältnisse (Sichteinschränkungen durch benachbarte Becher bzw. durch Becherrand und Mittelschneide) und der Grösse der Peltonbecher im vorliegenden Fall (Becherbreite ≈ 65 cm) kann ein Becher nicht mit einer einzigen Aufnahme vermessen werden, sondern es sind pro Becher ca. 75 Einzelaufnahmen aus verschiedenen Blickwinkeln und mit geeigneter Distanz erforderlich. Die Einzelaufnahmen werden mithilfe der Markierpunkte zu einem Gesamtmodell zusammengefügt (Abb. 8b). Dabei wird die neue Aufnahme durch die Software jeweils möglichst gut in das schon bestehende Modell eingefügt. Aufnahmen bzw. Teilbereiche mit schlechter Aufnahmequalität können verworfen werden.

Für die Aufnahme eines Peltonbeckers wurde ein Vorgehen entwickelt, dank welchem die Teilaufnahmen beginnend von der Becheraussenseite möglichst gut zusammengefügt werden können. Von einigen Bereichen der Becherinnenseite und der Mittelschneide nahe der Becherwurzel ist es aufgrund der geometrischen Verhältnisse schwierig, gute Aufnahme zu machen. Dem optischen Messprinzip entsprechend können keine „hinterschnittenen“ Erosionsformen (z.B. grössere Auswaschung hinter einer kleinen Öffnung) aufgenommen werden.

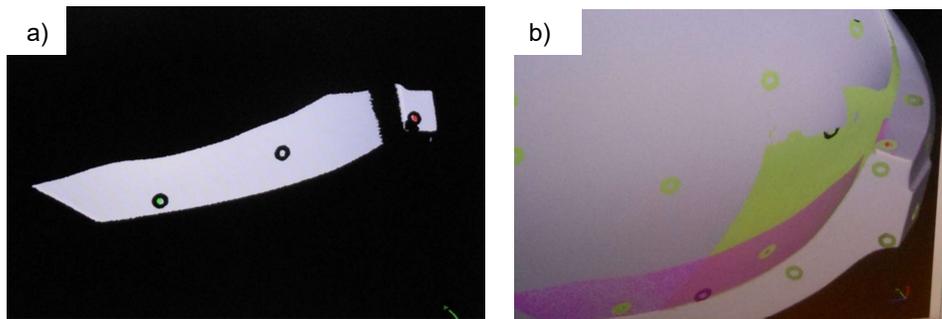


Abbildung 8: a) Teilmodell und b) Gesamtmodell am Bildschirm des Mess-Laptops während des Digitalisierens eines Bechers einer Peltonmaschine

Für die optische Vermessung von zwei Bechern pro Laufrad von zwei Maschinen waren inklusive Reise, Einrichten und Aufräumen, Vorbereiten der Laufradbecher, Kalibrierung, Fotodokumentation und Notizen bei den ersten Messkampagnen eine Arbeitswoche eines Zweierteams erforderlich. Bei den letzten Messkampagnen konnte der Einsatz vor Ort auf drei bis vier Tage reduziert werden.

Während den Aufnahmen arbeitet eine Person mit Kenntnis der Aufnahmesoftware vorwiegend am Messrechner, die andere Person am Stativ mit dem Messgerät. Die Arbeit erfordert ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen und Erfahrung im Umgang mit dem Messsystem. Die Grundkenntnisse für die Anwendung des Messsystems wurden in einem Kurs, der vom Gerätehersteller angeboten wird, erworben.

4.2.4 Vorgehen bei der Auswertung

Die einzelnen Aufnahmen wurden im Büro nochmals gesichtet und gegebenenfalls ganz oder teilweise verworfen. Die konsolidierten geometrischen Modelle (3d-Punktwolken) wurden räumlich auf Referenzflächen ausgerichtet. Als Referenzflächen wurden der Becherrand und die seitlichen Partien der Becherausschnitte verwendet, da diese eben und nicht von Hydroabrasiv-Verschleiss betroffen sind. Näheres zum verwendeten Bezugssystem ist in Abgottspon *et al.* (2013b) beschrieben. Das Ausrichten der Modelle an Referenzflächen ist erforderlich, um Messungen, die zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt wurden, vergleichen zu können.

Wie einleitend erwähnt, ist die Mittelschneidenbreite ein wichtiger Parameter für die Zustandsbeurteilung und den Wirkungsgrad eines Peltonlaufrads. Wenn die Mittelschneide durch den Hydroabrasiv-Verschleiss praktisch eben abgetragen wurde, wie in Abbildung 9a dargestellt, ist die Breite klar ersichtlich und messbar. Wenn aber die Mittelschneiden einen anderen Querschnitt aufweisen, z.B. gerundet sind nach einem Zwischenschliff, ist die Breite nicht eindeutig. Für die Bestimmung der Mittelschneidenbreite wurde die in Abbildung 9b dargestellte Definition eingeführt. Dies erlaubte, die Mittelschneidenbreite auf der ganzen Länge der Mittelschneide und zu jedem Zeitpunkt aus den 3d-Modellen zu bestimmen. Weitere Definitionen, beispielsweise zur Tiefe der Becherausschnitte, können Abgottspon *et al.* (2013b) entnommen werden.

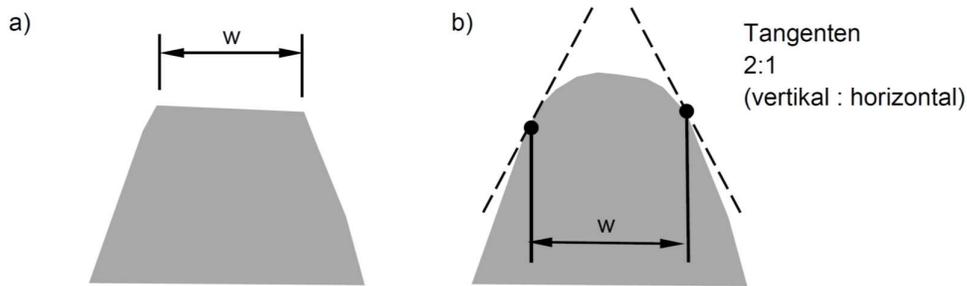


Abbildung 9: Gewählte Definition der Mittelschneidenbreite w illustriert an zwei Mittelschneiden-Querschnitten

Aus den 3d-Modellen wurden diverse Schnitte erzeugt. Durch Vergleich der geometrischen Modelle und Schnitte, die zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen wurden, wurden folgende Grössen bestimmt:

- Abnahme der Mittelschneidenhöhe
- Zunahme der Mittelschneidenbreite
- Zunahme der Becherausschnittstiefe
- Volumenunterschiede an den Mittelschneiden
- Volumenunterschiede bei den Becherausschnitten

Volumenunterschiede wurden mit einer Dichte von 7.7 g/cm^3 für das übliche Turbinengrundmaterial in einen Masseverlust umgerechnet. Das Auswerten der optischen Vermessungen (räumlich Referenzieren, Erzeugen von Schnitten, Volumenberechnungen) sind relativ aufwendig und erfordern einen erfahrenen CAD-Anwender.

4.3 Schichtdickenmessungen

4.3.1 Messprinzip und Gerätebeschreibung

Die Messung der lokalen Dicke der Beschichtung in den Peltonbechern erfolgte mit einem Schichtdickenmessgerät, das auf dem Prinzip der magnetischen Induktion beruht (Abb. 10a). Dabei wird der Unterschied genutzt, dass die Beschichtung praktisch nicht magnetisch ist, während das Turbinengrundmaterial (martensitischer Chromnickelstahl) magnetisch ist. Letzteres wurde zuerst mit einem Magnet getestet.

Es wurde ein tragbares Schichtdickenmessgerät *Deltascope FMP30* von Helmut Fischer AG (Abb. 12b) mit einer Zweipolsonde (Bezeichnung *V7FKB4*, Abb. 10b) verwendet. Damit können Schichtdicken bis 2 mm gemessen werden. Gemäss Angaben des Herstellers ist eine Zweipolsonde für die Messung auf rauen Oberflächen – wie im vorliegenden Fall – besser geeignet als eine Einpolsonde. Bei einer Zweipolsonde wird die Beschichtungsdicke im Bereich zwischen den beiden Sondenpolen gemessen. Durch den grösseren räumlichen Messbereich als bei einer Einpolsonde sind die Schichtdickenmesswerte weniger von lokalen Effekten abhängig. Der Achsabstand der beiden Sondenpole beträgt ca. 4.5 mm, der Radius der Sondenpole 1.25 mm. Der Sondenkopf hat einen Aussendurchmesser von 18 mm.



Die verwendete Methode ist für Schichtdickenmessungen auf einem Körper ohne Diskontinuitäten geeignet. Auf den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten sowie in deren Nähe (im Millimeterbereich) wären spezielle Effekte zu berücksichtigen bzw. es sind keine Messungen möglich. Daher wurden nur Messungen in der Fläche der beiden Becherhälften durchgeführt.

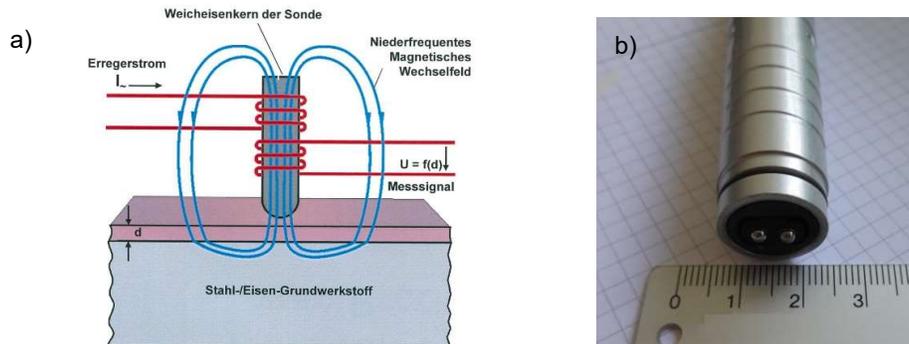


Abbildung 10: a) Funktionsprinzip einer magnetisch-induktiven Sonde für die Messung der Schichtdicke d (Quelle: Helmut Fischer 2012) und b) Kopf der verwendeten Zweipolsonde

4.3.2 Kalibrierung

Das Messgerät ist für jedes Grundmaterial zu kalibrieren, da verschiedene Stahlsorten unterschiedlich stark magnetisch sind. Das Vorgehen bei der ersten Anwendung des Geräts war wie folgt:

- für den Nullabgleich wird wiederholt auf einer unbeschichteten, möglichst ebenen und glatten Stelle eines Bechers gemessen,
- dann wurde eine 239 μm -Folie auf diese Stelle aufgelegt und der Mittelwert aus 10 Schichtdickenmessungen wurde der nominalen Dicke dieser Folie gleichgesetzt.

Es wurde also eine Zweipunkt-Kalibrierung verwendet. Die Linearität des Messgeräts wurde vom Hersteller bereits bei der Auslieferung geprüft.

Bei den folgenden Messungen wurde die Kalibrierung des Geräts belassen und systematische Abweichungen der Messwerte von den Referenzwerten bei der Auswertung rechnerisch korrigiert. Solche Vergleichsmessungen mit verschiedenen Folien bekannter Dicke (Abb. 11a) wurden in jeder Messkampagne an mindestens zwei unbeschichteten Stellen pro Becher durchgeführt (Abb. 11b).

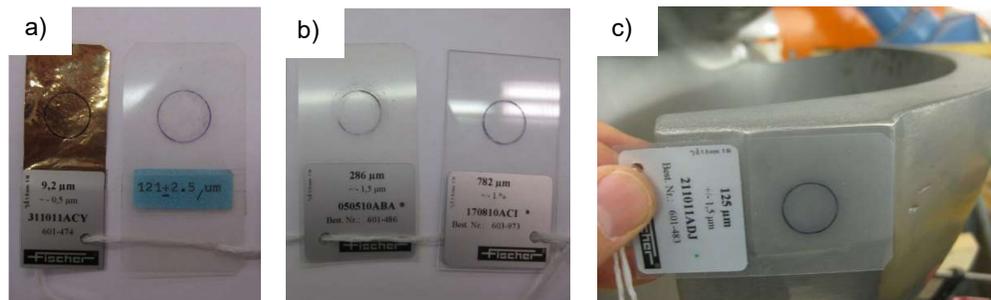


Abbildung 11: a) und b) Folien mit bekannter Dicke, die für die Kalibrierung des Schichtdickenmessinstruments verwendet werden und c) Anwendung an einer unbeschichteten und ebenen Stelle



4.3.3 Schablonen

Für die Definition der Lage der Messpunkte innerhalb des Laufrad-Bechers und zum Wiederauffinden der Punkte bei Folgemessungen wurden Schablonen mit Löchern verwendet. Für jede Becherhälfte wurde Ende 2012 eine Schablone aus Pappmaché durch Abformen an einem Laufradbecher erstellt (Abb. 12a). In die Schablonen wurden Löcher mit einem Durchmesser von 20 mm gestanzt, in welche der Sondenkopf mit allseitig ca. 1 mm Spiel platziert werden kann. Um die Schablonen wasserbeständig zu machen, wurden sie mit einer Synthetik-Farbe mehrmals gestrichen. Die Schablonen für die linke und die rechte Becherhälfte weisen dasselbe gespiegelte Lochmuster mit 152 Messpunkten auf. Der maximale Zentrumsabstand der Löcher beträgt ca. 40 mm.

Im KW Fieschertal ist für die beiden Maschinengruppen je ein Ersatzlaufrad vorhanden. Die insgesamt vier Laufräder verschiedener Jahrgänge und mit unterschiedlicher Revisionsgeschichte haben dieselbe nominale Becherbreite, die Bechergeometrie variiert aber um wenige cm. Gemäss Beobachtungen beim Einsetzen der Schablonen in die Becher der unterschiedlichen Laufräder wird geschätzt, dass mit diesen Schablonen die Lage der Messpunkte in den Bechern auf ca. ± 1 cm genau definiert ist.

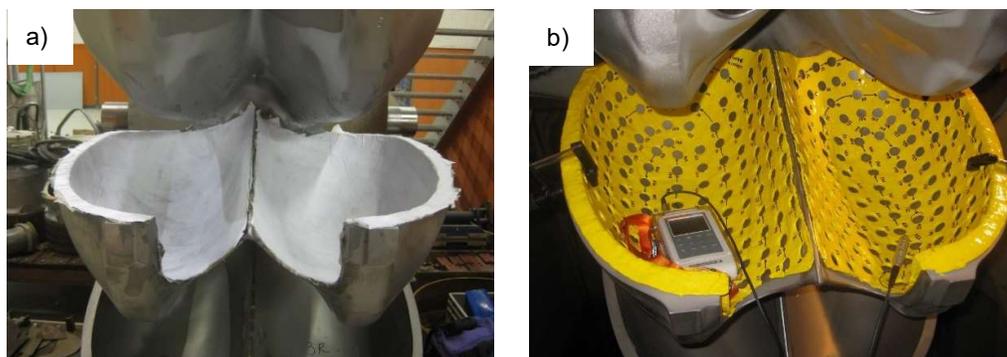


Abbildung 12: a) Herstellung und b) Anwendung der Schablonen für die Messung der Schichtdicken in den Bechern eines Pelton-Laufrads

4.3.4 Durchführung der Messungen

Vor Beginn der Schichtdickenmessungen wurden die Becher gereinigt und getrocknet. Die Schablonen wurden eingesetzt und mit Schraubzwingen befestigt (Abb. 12b). Bei Folgemessungen wurde die Lage der Schablonen gemäss Fotos von früheren Messkampagnen kontrolliert.

In jeder Messkampagne wurde die Schichtdicke an jedem Messpunkt $n=10$ Mal gemessen, um bei der Auswertung durch Mittelwertbildung die Messunsicherheit zu reduzieren. Für jede Messung ist die Sonde erneut abzusetzen, wodurch die Messung ausgelöst wird. Von Einzelmessung zu Einzelmessung wurde die Sonde jeweils leicht um ihre Längsachse gedreht (gegen 180° innerhalb von $n=10$ Messungen), damit die Messstrecke zwischen den beiden Sondenpolen keine bevorzugte Richtung aufweist. Der Mittelwert aus den $n=10$ Messungen charakterisiert somit die Schichtdicke innerhalb einer Fläche von 4.5 mm Durchmesser (= Abstand der Sondenpole).

In einer Messkampagne wurden ca. 3'000 Schichtdicken pro Becher gemessen. Die Messwerte können auf dem Gerät in so genannten Blöcken gespeichert und anschliessend als Tabelle auf einen Computer exportiert werden. Die Messwerte mit den Block-Nummern wurden gemäss Messprotokollen den Messstellen zugeordnet.



Die reine Messzeit für die systematischen Schichtdickenmessungen betrug bei der letzten Messkampagne noch etwas mehr als 1 h pro Becherhälfte. Zusammen mit Reise, Einrichten und Aufräumen, Kalibriermessungen, Fotos, Messprotokoll und Notizen waren für die Schichtdickenmessungen und Inspektion von zwei Bechern pro Laufrad etwa zwei Arbeitstage einer Person erforderlich.

4.3.5 Vorgehen bei der Auswertung

Die Daten der verschiedenen Messkampagnen wurden in derselben Datenstruktur abgespeichert. Für die Auswertung und Darstellung der Schichtdickenverteilungen in den Bechern wurde ein Matlab-Skript entwickelt. Zur Prüfung der Qualität der Messwerte wurde die Standardabweichung von den in der Regel $n=10$ Messwerten pro Messstelle und Messkampagne berechnet. Die Verteilungen dieser Standardabweichungen in den vier Messkampagnen sind in Abbildung 13 dargestellt. Die Verteilungen weisen ein ähnliches Muster auf, was darauf hindeutet, dass bei den vier Messkampagnen vergleichbare Bedingungen vorhanden waren.

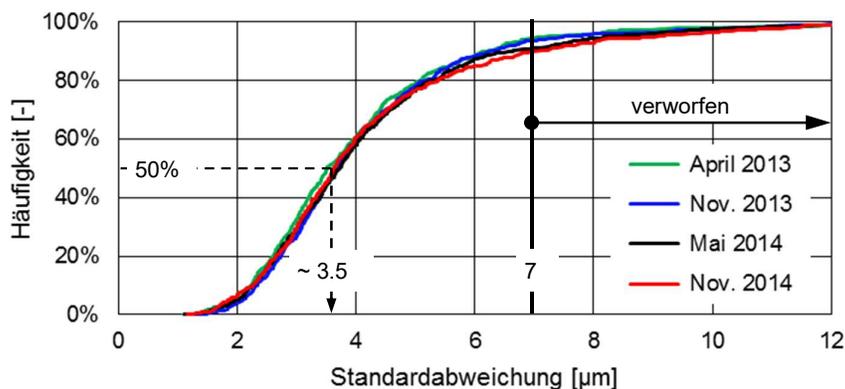


Abbildung 13: Häufigkeitsverteilung der Standardabweichungen von $n=10$ Messungen je Messstelle in vier Messkampagnen (Daten der Becher Nr. 1 und Nr. 2 der MG 1)

Folgende Messwerte wurden von der Auswertung ausgeschlossen:

- Einzelne Messwerte, die weit von den anderen entfernt waren (Ausreisser), z.B. weil die Sonde während der Messung möglicherweise nicht korrekt (rechtwinklig und berührend) positioniert war;
- Alle Messwerte an einem Messpunkt in einer Kampagne, deren Streuung als zu gross beurteilt wurde (falls $\sigma \geq 7 \mu\text{m}$, siehe Abb. 13), z. B. Fehlmessungen oder lokal aussergewöhnlich unregelmässige Oberfläche z.B. infolge Nachbeschichtung;

Von den verbleibenden Messwerten wurde pro Messstelle und Messkampagne ein Mittelwert der Schichtdicke berechnet. Seit der Anschaffung des Schichtdickenmessgeräts wurden ca. 60'000 Einzelmessungen durchgeführt. Im Verlauf der vielen Messungen auf der Hartbeschichtung wurden die Sondenpole sicht- und messbar abgenutzt. Die Abrasion an den Sondenpolen betrug ca. $1 \mu\text{m}$ während der Messungen in einer Becherhälfte. Die Abrasion an der Sonde beeinflusst die Messungen der Schichtdicke systematisch. Dieser Effekt wurde in der Auswertung durch laufende Anpassung der Kalibrierbeziehung kompensiert.

Bei $n=10$ Messungen an einem Messort in einer Kampagne beträgt die erweiterte Messunsicherheit des Mittelwerts das 0.71-fache der Standardabweichung (gemäss Studentischer t-Verteilung, mit 95%-



Vertrauensintervall). Damit beträgt die erweiterte Messunsicherheit für die Hälfte der Messungen weniger als $2.5 \mu\text{m}$ ($\approx 0.71 \cdot 3.5 \mu\text{m}$, Median aus Abb. 13) oder maximal $5 \mu\text{m}$ ($\approx 0.71 \cdot 7 \mu\text{m}$). Bei einer nominellen Beschichtungsdicke von $300 \mu\text{m}$ entspricht dies 0.8% bzw. maximal 1.6% . Es wird davon ausgegangen, dass die hier empirisch ermittelte absolute Messunsicherheit ($2.5 \mu\text{m}$ bzw. $5 \mu\text{m}$) aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit auch bei geringerer Beschichtungsdicke zutreffend wäre und die relative Messunsicherheit (in %) zunimmt.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Optische Vermessung (Digitalisierungen)

5.1.1 Einzelne 3d-Modelle

Ein Beispiel eines Modells von jeweils zwei Peltonbechern (Innen- und Aussenseiten) ist in Abbildung 14a dargestellt. Abbildung 14b zeigt ein Detail des Modells im Bereich der Spitze der Mittelschneide. Es ist eine hohe Dichte von erfassten Oberflächenpunkten zu erkennen.

Abbildungen 15 und 16 geben einen Eindruck von der hohen Auflösung der optischen Vermessung. Wie die blanke Stelle links in Abbildung 15 zeigt, können auch Erosionen mit einer Tiefe im Bereich von Zehntelmillimetern detailgetreu erfasst werden.

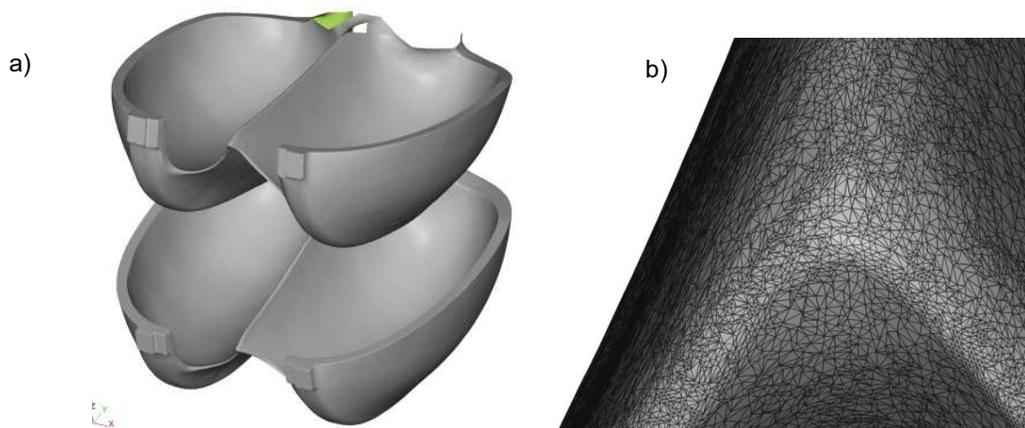


Abbildung 14: a) 3d-Modell von zwei Peltonbechern eines gebrauchten Laufrads und b) Detail des Oberflächenmodells im Bereich einer Mittelschneidenspitze

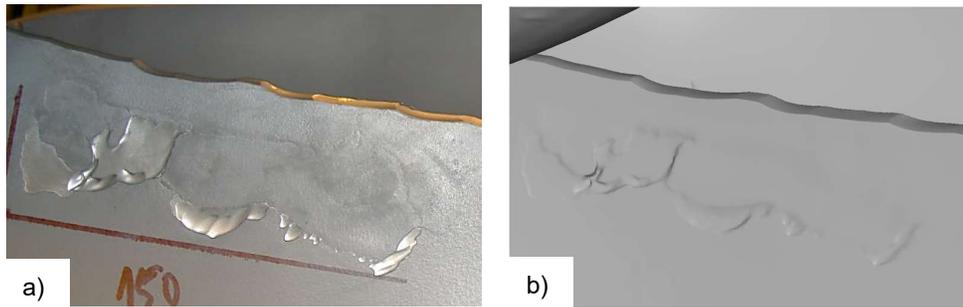


Abbildung 15: Stark abgenutzte Mittelschneide eines Peltonlaufrads mit stellenweisem Verlust der Beschichtung bzw. Nachbeschichtung und Erosion: a) Foto und b) Digitalisierung

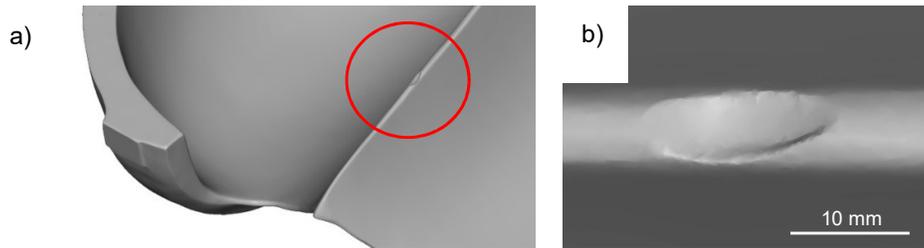


Abbildung 16: 3d-Modell eines abgenutzten Peltonbeckers mit einem lokalen Schaden auf der Mittelschneide: a) Übersicht und b) Detail

5.1.2 Vergleich von 3d-Modellen und ermittelte Massenverluste

Der Vergleich der digitalen Geometriemodelle der Becher, die zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen worden waren, zeigte ein stark unterschiedliches Ausmass der Geometrieänderungen. Dies ist in Tabelle 1 qualitativ zusammengefasst und kann unter anderem durch die unterschiedlichen Schwebstoffbelastungen erklärt werden.

Tabelle 1: Übersicht Turbinenverschleiss KW Fieschertal 2012-2014

Schwebstoff-saison	Hydroabrasiv-Verschleiss		Schwebstoffbelastung
	Maschinengruppe 1	Maschinengruppe 2	
2012	stark	sehr stark	gross (mit Hochwasser im Juli)
2013	fast null	leicht	mittel
2014	fast null	fast null	klein bis mittel

Im Folgenden werden einige Geometrie-Vergleiche aus dem Jahr 2012 dargestellt, da diese aussagekräftiger sind als diejenigen der Jahre 2013 und 2014.



Abbildung 17 zeigt Mittelschneiden eines Bechers jeder Maschinengruppe am Anfang und am Ende einer Beobachtungsperiode mit hoher Schwebstoffbelastung. Im mittleren Drittel der Länge der Mittelschneide, wo der Wasserstrahl am stärksten einwirkt, wurde am meisten Material abgetragen. Die Geometrie der Mittelschneide zu Beginn der Schwebstoffsaison beeinflusst das Ausmass der Schadenszunahme stark: Bei Maschinengruppe MG 2 (Abb. 17b) war die Mittelschneide infolge Betrieb während drei vorhergehenden Schwebstoffsaisons und vor Ort durchgeführten Revisionen schon vor der Schwebstoffsaison 2012 stark gerundet, was bei ähnlicher Schwebstoffbelastung zu deutlich mehr Materialverlust als bei MG 1 (Abb. 17a) führte. In MG 1 war anfangs der Schwebstoff-saison 2012 ein neuwertiges Laufrad (nach Revision in der Fabrik) eingesetzt worden.

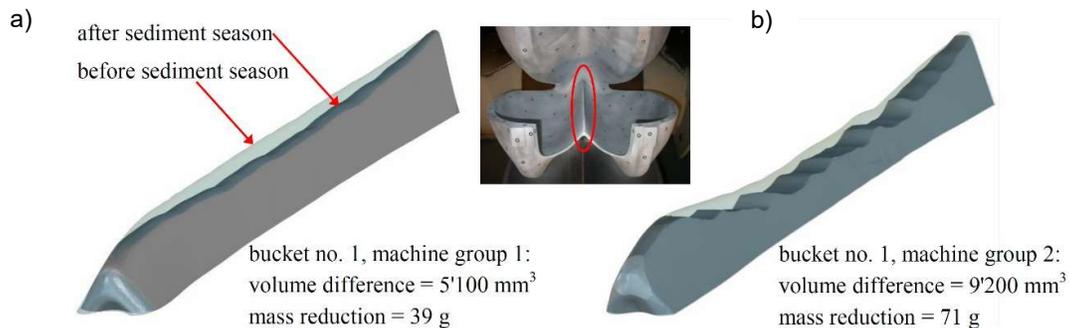


Abbildung 17: Vergleich der Geometrien der Mittelschneiden (rote Ellipse) des Bechers Nr. 1 der Peltonlaufräder der Maschinengruppen MG 1 (a) und MG 2 (b) des Kraftwerks Fieschertal vor (transparent) und nach der Schwebstoff-saison 2012 (dunkelgrau), aus Abgottspon *et al.* (2013a, 2014)

5.1.3 Vergleich der Geometrie in Schnitten

Abbildung 18a zeigt ein Beispiel von zwei Längsschnitten durch die Mittelschneide des Bechers Nr. 1 des Laufrads der MG 2, welche vor (rot) und nach (grün) einer Schwebstoff-saison gemessen wurden. Die Reduktion der Mittelschneidenhöhe Δh ist als schwarz gestrichelte Linie bezüglich der Achse am linken Rand des Diagramms dargestellt. Die schwarze ausgezogene Linie zeigt zusätzlich die Reduktion der Mittelschneidenhöhe des Bechers Nr. 2. An beiden Bechern wurde die Mittelschneidenhöhe um bis zu ca. 6 mm reduziert und das Ausmass der Abrasion an beiden untersuchten Bechern hat einen ähnlichen Verlauf. Im Gegensatz dazu treten kleinere Abrasionsschäden, wie z.B. in Abbildung 16 dargestellt, nicht systematisch auf.

In Abbildung 18b ist die Vertiefung des Becherausschnitts (von oben gesehen) in derselben Art dargestellt. Die Becherausschnitte wurden im Jahr 2012 um bis zu 7 mm zur Becherwurzel hin vertieft. Bei diesem ausgeprägten Materialverlust trat an beiden untersuchten Bechern ein ähnliches Abrasionsmuster auf.

In Abbildung 19 sind Querschnitte durch Mittelschneiden in unterschiedlichen Abnutzungs- bzw. Revisionszuständen dargestellt. Bei MG 1 war in den Jahren 2012-2014 stets dasselbe Laufrad im Einsatz. Die Mittelschneide wurde durch den starken Hydroabrasiv-Verschleiss im 2012 und das anschliessende Schleifen verbreitert und gerundet. Bei MG 2 war die Mittelschneide zu Beginn der Saison bereits relativ breit und wurde durch den starken Hydroabrasiv-Verschleiss im Jahr 2012 weiter verbreitert, bevor das Laufrad ausser Betrieb genommen wurde. Bei ähnlicher Reduktion der Mittelschneidenhöhe wurde bei der breiteren Mittelschneide von MG 2 deutlich mehr Material erodiert als bei MG 1.

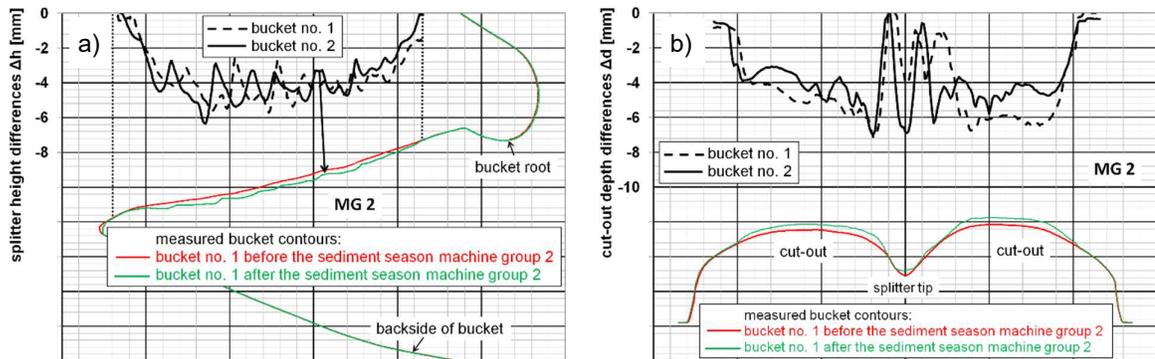


Abbildung 18: Geometrieveränderungen bezüglich a) der Mittelschneidenhöhe und b) der Becherausschnitttiefe an Bechern eines Peltonlaufrads des KW Fieschertal im Jahr 2012 (aus Abgotzpon *et al.* 2013b)

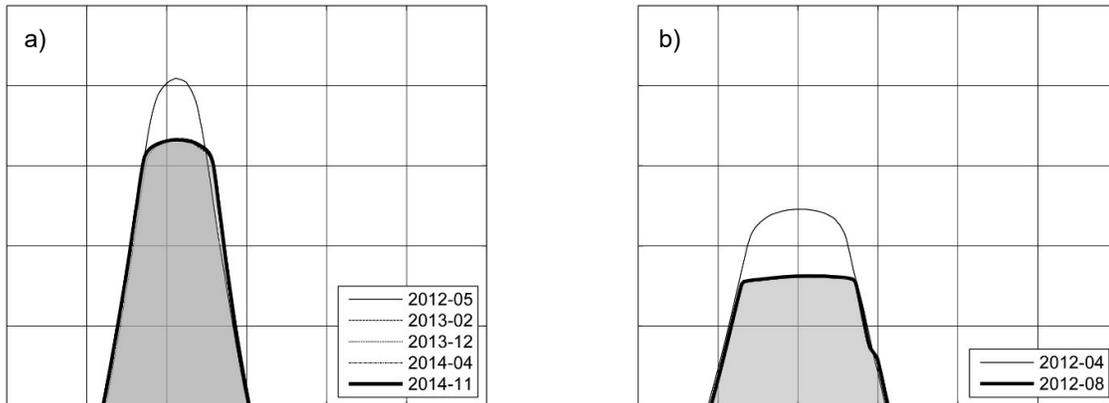


Abbildung 19: Querschnitte durch die Mittelschneiden von gebrauchten Peltonlaufrädern der a) MG 1 und b) MG 2 des Kraftwerks Fieschertal

5.1.4 Reproduzierbarkeit

Weiter wurde die Reproduzierbarkeit der verwendeten Methode der optischen Vermessung eines Peltonbeckers untersucht. Dafür wurden zwei Geometriemodelle eines Peltonbeckers, die zu verschiedenen Zeiten aufgenommen wurden und bei denen das gleiche Resultat erwartet wurde, verglichen.

In Abbildung 20a ist der Vergleich der in Abschnitt 4.1.1 erwähnten direkt nacheinander durchgeführten Messungen dargestellt. Die beiden Messungen wurden mit demselben Messgerät, denselben Operateuren, aber mit einer unterschiedlichen Reihenfolge und Einteilung der Einzelaufnahmen durchgeführt. Während die gemessenen Oberflächen in einem Grossteil des Beckers weniger als ± 0.3 mm voneinander abweichen, sind die Abweichungen in der rechten Becherhälfte bis $+0.4$ mm. Es wird davon ausgegangen, dass in diesem Bereich eine oder mehrere Einzelaufnahmen nicht mit der üblichen Güte ins Gesamtmodell eingefügt wurden.

In den Abbildungen 20b bis 20d sind weitere Vergleiche von Bechergeometrien, die zu Beginn bzw. gegen Ende des schwebstoffarmen Jahres 2014 aufgenommen wurden, dargestellt. Da in diesem Jahr die Beschichtung an keiner Stelle in den Bechern vollständig abgetragen wurde und davon ausgegangen wurde, dass die Becher nicht plastisch verformt worden sind, sind nur geometrische



Differenzen, die kleiner sind als die Beschichtungsdicke, plausibel. Gemäss Schichtdickenmessungen (Abschnitt 5.2.1) liegt die Geometrieänderung in den Bechern im Jahr 2014 sogar nur zwischen 0 und -0.03 mm (maximal 30 µm Abrasion der Beschichtung).

Die Aufnahmen, die in Abbildung 20b verglichen wurden, sind von hoher Qualität, da deren Abweichung praktisch überall kleiner als ± 0.2 mm ist. In Abbildung 20c hingegen sind Abweichungen von bis zu +0.5 mm am Becherrand und in Abbildung 20d von bis zu +0.7 mm an der Aussenwand des linken Bechers aufgetreten. Offenbar ist bei der Aufnahme des Bechergrunds bzw. der Innenseite der Becheraussenwand eine grössere Messunsicherheit vorhanden. Dies kann mit einer geringeren Qualität der Einzelaufnahmen in diesen Messpositionen oder mit ungünstigeren Bedingungen beim Einfügen von Einzelaufnahmen ins Gesamtmodell zusammenhängen (vorhandene Anschlusspunkte bzw. Überlappungsflächen).

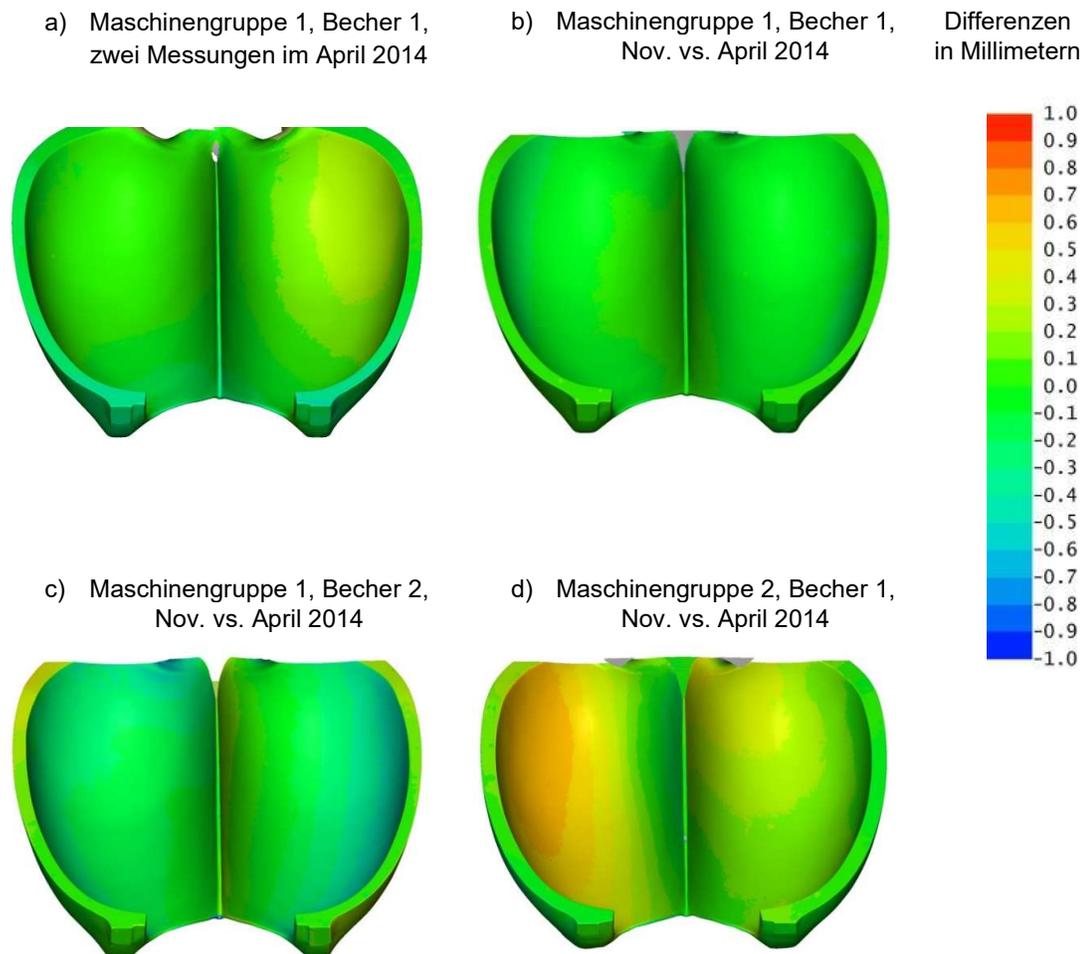


Abbildung 20: Vergleich von jeweils zwei aufgenommenen Bechergeometrien zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit (Wiederholmessung oder in Phasen mit geringem Verschleiss)



In der vorliegenden Anwendung ist die Geometrie im Bereich der Mittelschneiden und Bechereintrittskanten relevant. In diesen Bereichen eines Peltonbeckers in der untersuchten Grösse wird die Reproduzierbarkeit der Messmethode auf ± 0.2 mm geschätzt. Für kleinere Peltonbecher, oder Teilbereiche von grösseren Bechern, die mit einer oder wenigen Einzelaufnahmen erfasst werden können, ist die Reproduzierbarkeit deutlich besser und dürfte gegen die im Abschnitt 4.2.2 erwähnte Messunsicherheit eines Punkts innerhalb einer Einzelaufnahme von ± 0.010 bis ± 0.040 mm tendieren.

5.1.5 Relativer Fehler der Erosionstiefe

Die optische Messmethode eignet sich für das Erosionsmonitoring von Peltonbechern, wenn die gesuchte Erosionstiefe während einer Beobachtungsperiode deutlich grösser ist als die Reproduzierbarkeit. Die Reproduzierbarkeit ist von der Bechergrösse und den betrachteten Stellen im Becher abhängig. Bei grösseren, beschichteten Peltonbechern, bei denen die Erosion an den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten von Interesse ist, beträgt der relative Fehler der Erosionstiefe beispielsweise 20%, wenn die Erosionstiefe 1 mm und die Reproduzierbarkeit ± 0.2 mm betragen. Bei kleineren Peltonbechern oder klar referenzierbaren Detailaufnahmen von Teilen grösserer Bechern wird erwartet, dass auch kleinere Erosionstiefen mit akzeptierbarem relativem Fehler gemessen werden können, weil die Unsicherheit des Zusammenfügens der Einzelaufnahmen in der Software weniger ins Gewicht fällt.

5.2 Schichtdickenmessungen

5.2.1 Schichtdicken

In Abbildung 21 sind die gemessenen Schichtdicken an den Messpunkten einer Schablone, d.h. in einer Becherhälfte, zu vier Zeitpunkten innerhalb von zwei Jahren dargestellt. Bei den dargestellten Werten handelt es sich um die gemäss Abschnitt 4.3.5 berechneten Mittelwerte aus $n=10$ Messungen (nach Ausschliessen von Ausreissern und Messwerten mit zu grosser Streuung, mit Sonden-Kalibrierung und Kompensation der Sondenabration).

Die Messwerte variieren relativ stark von Messpunkt zu Messpunkt, was auf die Wichtigkeit der Lage der Messpunkte hindeutet. Die Abnahme der Schichtdicke in den zwei Jahren ist relativ gering. Da sich das Nachbeschichten am 03.03.2014 auf die Mittelschneiden und Bechereintrittskanten beschränkte, wird erwartet, dass die Schichtdickenmesswerte konstant bleiben oder infolge der Abrasion im Lauf der zwei Jahre abnehmen. Dies ist bei den Messwerten generell zutreffend, mit wenigen Ausnahmen, bei welchen sich die Linien der Schichtdickenmessungen der einzelnen Messkampagnen infolge zufälliger Messfehler überkreuzen.

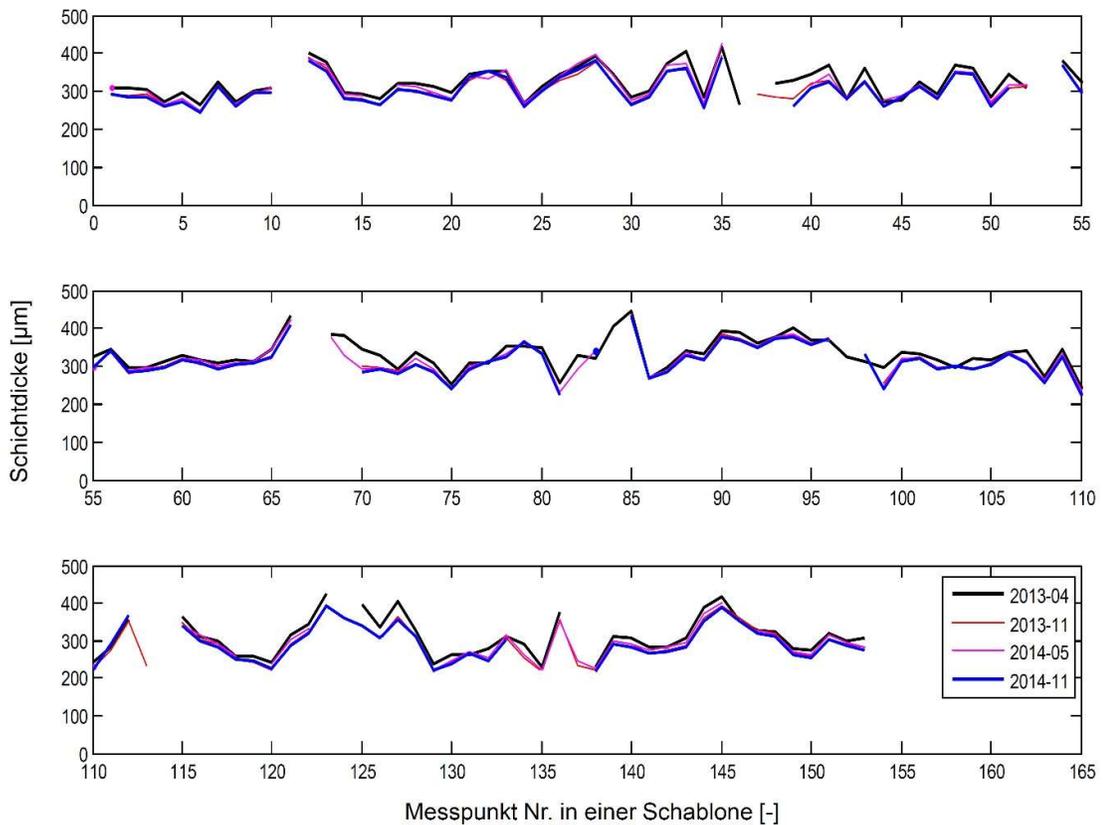


Abbildung 21: Gemessene Schichtdicken an den Messpunkten einer Schablone (MG1, rechte Hälfte des Bechers Nr. 1) in vier Messkampagnen.

Abbildung 22 zeigt Beispiele der räumlichen Verteilungen der Schichtdicken, die in Bechern von nicht fabrikneuen Peltonlaufrädern gemessen wurden. Die Schichtdicken sind farblich interpoliert auf einer in der Ebene dargestellten Abwicklung der Becherinnenseite dargestellt. Die schwarzen Kreissymbole stellen die Messpunkte dar.

Bei der MG 1 variieren die Beschichtungsdicken zwischen ca. 200 und 500 µm. Bei der MG 2 sind lokal Beschichtungsdicken von bis zu 800 µm vorhanden, da beim Nachbeschichten stellenweise Material auch auf die vorhandene Beschichtung aufgetragen wurde. Die Schichtdickenverteilungen der Becher Nr. 1 und Nr. 2 an jeweils einem Laufrad weisen einen ähnlichen Charakter auf. Auch ohne lokales Nachbeschichten kann die Schichtdicke von benachbarten Messpunkten stark variieren: z.B. am linken Rand des Bechers Nr. 1 der MG 1 variiert die Schichtdicke auf einer Distanz von nur 4 cm um bis zu ca. 200 µm.

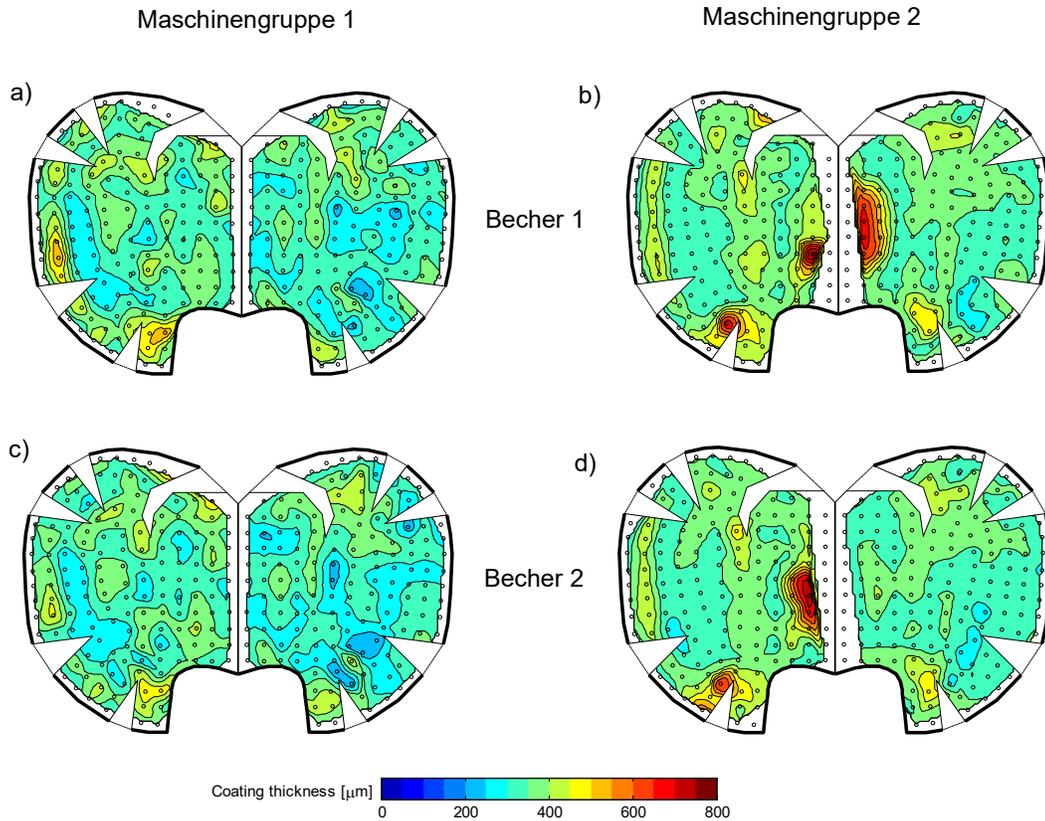


Abbildung 22: Schichtdickenverteilungen in Bechern von Peltonlaufrädern des Kraftwerks Fieschertal, Beispiele vom April 2013

5.2.2 Schichtdicken-Differenzen

Abbildung 23 zeigt Beispiele der berechneten räumlichen Verteilungen der Schichtdicken-Differenzen in Peltonbechern vor und nach einer Schwebstoffsaison. Über die Innenfläche der Becher gemittelt, wurden an der MG 1 die Schichtdicken-Differenzen in Tabelle 2 berechnet, wobei hier positive Differenzwerte eine Abnahme der Schichtdicke bedeuten.

Tabelle 2: Berechnete mittlere Schichtdickendifferenzen in Peltonbechern der MG 1 des KW Fieschertal

Schwebstoffsaison	Becher Nr. 1	Becher Nr. 2
2013	11 µm	8 µm
2014	4 µm	3 µm

Die Schichtdicken-Differenzen über die Schwebstoffsaisons 2013 und 2014 sind relativ klein im Vergleich zu den üblichen Beschichtungsdicken von mehreren hundert Mikrometern, d.h. der Erosionswiderstand der Beschichtung in den Bechern ist wie erwünscht relativ hoch. In schwebstoffreichen Jahren, wie z.B. 2012 (vgl. Tab. 1), kann die Beschichtungsdicke stärker abnehmen.

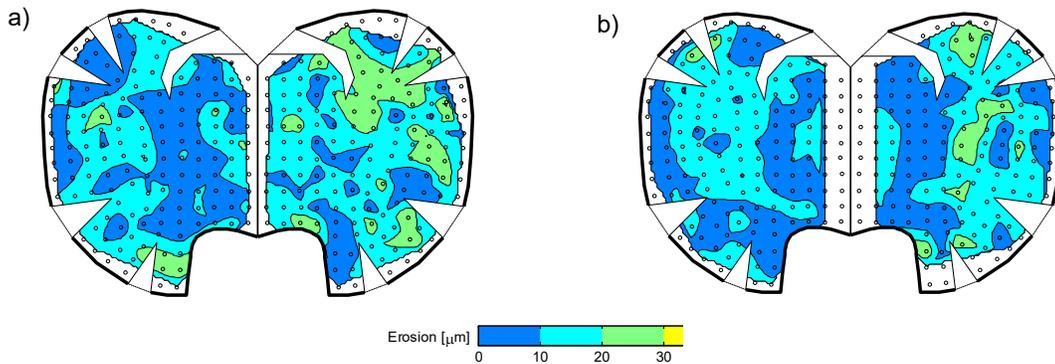


Abbildung 23: Verteilungen der Schichtdickendifferenzen je im Becher Nr. 1 von zwei Peltonlaufrädern des Kraftwerks Fieschertal, Beispiele während der Schwebstoffsaison 2013: a) von der MG 1 und b) der MG 2

5.2.3 Reproduzierbarkeit

Gemäss Datenblatt der verwendeten Zweipolsonde können Schichtdicken im Bereich von 100 bis 1500 μm mit Einzelmessungen unter günstigen Bedingungen auf $\pm 1\%$ genau gemessen werden im Vergleich zu Kalibriernormalen (Helmut Fischer 2012). Mit Wiederholmessungen kann eine Reproduzierbarkeit von besser als $\pm 1\%$ erreicht werden. Zu den günstigen Bedingungen für Schichtdickenmessungen zählen: ebene, glatte und harte Oberflächen mit gleichmässiger Schichtdicke, genügende Grundwerkstoffdicke, genügender Randabstand, rechtwinkliges Aufsetzen der Messsonde mit definiertem Druck (möglich mit einem Stativ).

Bei den Schichtdickenmessungen an einem Peltonbecher ist die Reproduzierbarkeit weniger gut, weil einige der genannten Bedingungen zum Teil nicht erfüllt sind. Es wird davon ausgegangen, dass die Ungenauigkeit in der Lage der Messpunkte (Spiel der Schablonen im Becher und Spiel des Sodenkopfs in den Löchern der Schablone) in Verbindung mit räumlich stark variablen Beschichtungsdicken oder relativ grosser Rauheit die Hauptrolle spielen.

Abbildung 24 zeigt räumliche Verteilungen von Schichtdicken-Differenzen, die aus Messungen vom Mai 2014 im Vergleich zum November 2013 berechnet wurden. Da diese Periode ausserhalb der Schwebstoffsaison liegt (praktisch keine Abrasion) und die Nachbeschichtung der Mittelschneiden und Bechereintrittskanten ausserhalb des Bereichs der Messpunkte erfolgte, wird davon ausgegangen, dass die Schichtdicken physisch nicht verändert wurden. Die berechneten Differenzen werden als empirische Reproduzierbarkeit interpretiert. Bei wenigen Punkten (ca. 3%) betragen die Differenzen bis $\pm 30 \mu\text{m}$ (rot und blau), bei den meisten Punkten liegen die Differenzen innerhalb von $\pm 10 \mu\text{m}$ (gelb und grün).

Da die Erosionstiefe aus der Differenz von zwei Schichtdickenmessungen berechnet wird, wurde in erster Näherung erwartet, dass die Messunsicherheit der Schichtdickendifferenz doppelt so gross ist wie die Messunsicherheit der Schichtdicke. Demnach und bezugnehmend auf Abschnitt 4.3.5. beträgt die Messunsicherheit der Schichtdickendifferenz an einem Messpunkt $5 \mu\text{m}$ für die Hälfte der Messpunkte bzw. maximal $10 \mu\text{m}$. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass die Messungen am Anfang und am Ende der Beobachtungsperiode an genau derselben Stelle durchgeführt worden sind oder dass

die Schichtdicken räumlich nicht variieren. Diese Voraussetzung war meist erfüllt, da die Reproduzierbarkeit der Schichtdickendifferenz gemäss Abbildung 24 bei vielen Messpunkten besser als $\pm 10 \mu\text{m}$ war.

Für die Becher, die in Abbildung 24 dargestellt sind, betrug die Differenz zwischen den Messungen über die Innenfläche gemittelt $-2 \mu\text{m}$ für den einen und $-4 \mu\text{m}$ für den anderen Becher. Aufgrund dieser beiden Werte wird geschätzt, dass die Reproduzierbarkeit der Schichtdickendifferenz gemittelt über einen Becher besser als $\pm 5 \mu\text{m}$ ist.

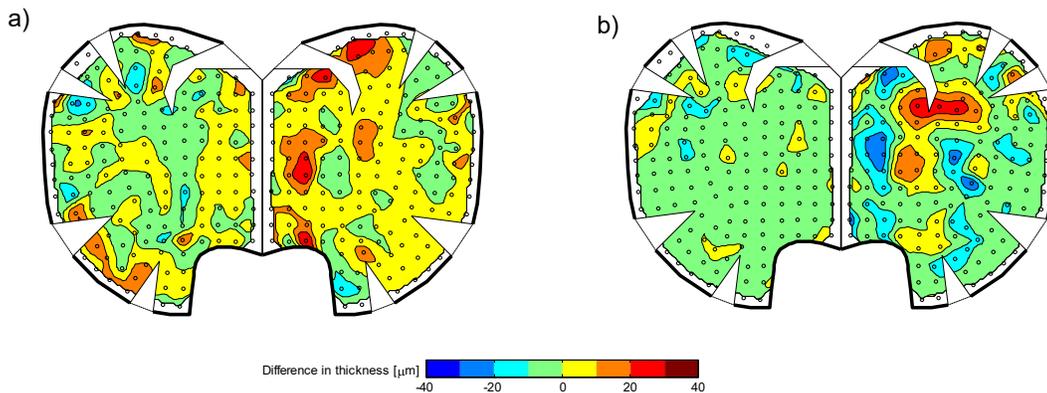


Abbildung 24: Verteilungen der Schichtdickendifferenzen zwischen Mai 2014 und Nov. 2013 (ausserhalb der Schwebstoffsaison) zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Messmethode: a) im Becher Nr. 1 und b) im Becher Nr. 2 des Peltonlaufrads der MG 1 des Kraftwerks Fieschertal

5.2.4 Relativer Fehler der Erosionstiefe

Die Methode der Schichtdickenmessungen eignet sich für das Erosionsmonitoring in Peltonbechern, wenn die gesuchte Erosionstiefe während einer Beobachtungsperiode deutlich grösser ist als die Reproduzierbarkeit. Die Reproduzierbarkeit der Schichtdickenmessungen ist von der räumlichen Ungleichmässigkeit bzw. Rauheit der Schichtdicke, der Lagegenauigkeit der Messpunkte und der Kalibrierung des Geräts abhängig.

Mit einer Reproduzierbarkeit der Schichtdickendifferenz an einem Messpunkt von $\pm 10 \mu\text{m}$ würde der relative Fehler der Erosionstiefe beispielsweise 20% nicht überschreiten, wenn die Schichtdicke um mindestens ca. $50 \mu\text{m}$ abgenommen hätte. Wenn die über die ganze Becherinnenfläche gemittelte Schichtdickendifferenz betrachtet wird, ist die Reproduzierbarkeit deutlich besser und es können entsprechend kleinere Erosionstiefen mit akzeptierbarem Fehler gemessen werden.

Die über die Becherinnenfläche gemittelten Schichtdickendifferenzen im Abschnitt 5.2.2 werden zusammen mit der im vorherigen Abschnitt erwähnten Reproduzierbarkeit von $\pm 5 \mu\text{m}$ wie folgt beurteilt:

- Im Jahr 2013 ist die gemessene Schichtdickendifferenz etwa doppelt so gross wie die geschätzte Reproduzierbarkeit: die Schichtdickendifferenz ist signifikant und kann als Erosionstiefe interpretiert werden, mit einem relativen Fehler von bis zu $\pm 50\%$;
- Im Jahr 2014 ist die gemessene Schichtdickendifferenz etwas kleiner als die geschätzte Reproduzierbarkeit: die Schichtdickendifferenz ist nicht signifikant, die Erosionstiefe konnte nicht verlässlich gemessen werden. Für den Nachweis des hohen Erosionswiderstands einer Beschichtung kann aber auch die Aussage wertvoll sein, dass mit einer gewissen Sedimentbelastung keine messbare Erosionstiefe festgestellt werden konnte.



Die in Abbildung 23 dargestellten Verteilungen der Schichtdickendifferenzen werden als nicht belastbar eingestuft, da die ermittelten Schichtdickendifferenzen von einzelnen Punkten (bis $\pm 30 \mu\text{m}$) nicht grösser sind als die Reproduzierbarkeit der Schichtdickendifferenzen einzelner Punkte ($\pm 30 \mu\text{m}$). Bei grösserer Erosionstiefe (längere Beobachtungsperiode und/oder höhere Sedimentbelastung) könnten belastbare und vermutlich aussagekräftigere Verteilungen ermittelt werden. Bei den in Abbildung 22 dargestellten Verteilungen der Schichtdicken hingegen fällt der relative Fehler nicht ins Gewicht.

6 Schlussfolgerungen

Es wurden zwei Messmethoden für das Monitoring und die Quantifizierung der Abnutzung an Bechern von Peltonlaufrädern in einer Fallstudie untersucht. Diese Messmethoden erlauben im Vergleich zur üblichen Praxis eine detailliertere und räumlich klar definierte Quantifizierung der Abrasion. Das Kraftwerk Fieschertal ist für die Untersuchung der beschriebenen Thematik gut geeignet, da seit dessen Inbetriebnahme im Jahr 1975 relativ starker Hydroabrasiv-Verschleiss beobachtet wird.

Die **optische Vermessung** erlaubt, Geometrieänderungen an Peltonturbinen bis in den Bereich von Zehntelmillimetern räumlich detailliert zu quantifizieren. Solche Geometrieänderungen können bei unbeschichteten Bechern je nach Sedimentbelastung und Betriebsstunden nicht nur an Mittelschneiden und Bechereintrittskanten (Ausschnitt), sondern auch in den Bechern vorkommen. Bei beschichteten Bechern von Peltonlaufrädern treten solche Geometrieänderungen typischerweise an Mittelschneiden und Bechereintrittskanten auf. Die optische Vermessung eignet sich gut für die detaillierte Aufnahme von grösseren Erosions- und Sekundärschäden, wie z.B. infolge von Hochwassern mit hoher Sedimentbelastung. Nebst Geometrieänderungen können Volumen- und Massendifferenzen bestimmt werden. Die Durchführung der optischen Vermessung erfordert gute Kenntnisse des Messsystems, Erfahrung bezüglich eines zweckmässigen Vorgehens und einen erfahrenen CAD-Anwender in der Auswertung. Nach Kenntnis der Autoren wurden vorher weltweit noch keine Vermessungen von Peltonbechern mit der hier beschriebenen Methode direkt im Turbinengehäuse durchgeführt.

Die Erosion der Beschichtung in Peltonbechern kann mit **Schichtdickenmessungen** und Schablonen räumlich verteilt quantifiziert werden. Da der Erosionswiderstand der Beschichtung wie gewünscht relativ hoch ist, sind Schichtdickendifferenzen je nach Sedimentbelastung nur über mehrere Jahre zuverlässig messbar. Da eine Beschichtung mit einer anfänglichen Dicke von ca. $300 \mu\text{m}$ in den Bechern ohne aussergewöhnliche Schwebstofftransportereignisse für mehrere Jahre ausreichend ist, wird die Erosion *in* beschichteten Bechern in normalen Betriebsjahren als nicht kritisch angesehen. Die Durchführung der Schichtdickenmessungen ist relativ einfach; eine Schulung ist in wenigen Stunden möglich. Durch die Verwendung von Schablonen kann der Aufwand für das Lokalisieren der Messpunkte reduziert und die Reproduzierbarkeit der Messungen verbessert werden. Solche Schablonen können mit relativ einfachen Mitteln erstellt werden.

Die optische Vermessung und die Schichtdickenmessungen ergänzen sich und ermöglichen weitere Erkenntnisse für die Erforschung der Abrasion bzw. Erosion an Wasserturbinen. Die beiden Messmethoden können auch an anderen Hoch- und Mitteldruckwasserkraftanlagen eingesetzt werden. Beide Messmethoden können zudem genutzt werden, um aufgetretene Erosionen mit Spezifikationen oder Vertragsbestimmungen bezüglich der Erosionsbeständigkeit zu vergleichen und um Unterhaltmassnahmen zu optimieren.



7 Ausblick

Die technische Entwicklung von Vermessungssystemen, die vor Ort für die Erfassung von Freiformen eingesetzt werden können, geht weiter. Es könnte untersucht werden, welche Genauigkeit mit tragbaren (*handheld*) Laserscannern bei Erfassen der aktuellen Geometrie von Turbinenbauteilen erreicht werden kann. Neu aufkommende „*structure by motion*“-Techniken, d.h. die Berechnung von 3d-Geometriemodellen aus Bildern, die unter verschiedenen Winkeln aufgenommen wurden, sind vermutlich für die Erfassung von Abrasionsschäden an Peltonlaufrädern zu wenig genau. Rai *et al.* (2015) haben die in diesem Projekt verwendete Technik der optischen Vermessung aufgenommen, um die Abrasion an Peltonbechern einer Modellturbine in einer Laboruntersuchung zu bestimmen.

Bezüglich Schichtdickenmessgeräten sind den Autoren keine Neuentwicklungen bekannt. Verbesserungspotential besteht bezüglich der Lagedefinition der Messpunkte. Da bei beschichteten Peltonbechern die Beschichtung im Bereich der Mittelschneiden und Bechereintrittskanten relativ rasch abgetragen wird, wird empfohlen, diesbezüglich relevante Prozesse und Messmethoden weiter zu untersuchen.

Die Ergebnisse dieses Projekts fließen in das einleitend erwähnte, aus mehreren Teilprojekten bestehende Forschungsprojekt ein. In diesem Rahmen ist vorgesehen:

- Untersuchen der Beziehungen zwischen Geometrieveränderungen bzw. Materialverlust und dem Schwebstoffaufkommen im Triebwasser, Vergleich mit Literaturdaten, Untersuchen und Weiterentwickeln von Abrasions-Modellen;
- Untersuchen der Beziehungen zwischen Geometrieveränderungen bzw. Materialverlust und Wirkungsgradänderungen, Vergleich mit Literaturdaten.

Der Inhalt des Forschungsprojekts wird in der Dissertation von D. Felix beschrieben. Weiter sind folgende Publikationen und Anlässe geplant:

- Im Frühjahr 2016 soll ein deutschsprachiger Artikel über die Fallstudie Fieschertal in der Fachzeitschrift „*wasser, energie, luft*“ erscheinen. Der Artikel bezieht sich auf die Resultate, die an der Tagung „Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen an Pelton-Turbinen“ am 30.09.2015 an der Hochschule Luzern präsentiert wurden.
- Am 06.07.2016 ist ein englischsprachiger Workshop im Rahmen des „IAHR-Symposium on Hydraulic Machinery and Systems“ in Grenoble geplant. Es ist vorgesehen, in einem Tagungsbeitrag auch über das vorliegende Projekt zu berichten (Kurzfassung wurde akzeptiert).

Mit verbesserten Kenntnissen betreffend Hydroabrasiv-Verschleiss lassen sich Modelle und Strategien ableiten, um die Anlagenkonzeption bzw. den Anlagenbetrieb bezüglich dem Umgang mit Feinsedimenten vor allem wirtschaftlich zu optimieren. Dabei ist das Gesamtsystem, welches aus baulichen Anlagen und elektromechanischer Ausrüstung besteht, zu betrachten. Dies trägt auch zur Steigerung der Effizienz der Wasserkraftnutzung bei.



8 Referenzen

8.1 Publikationen in Zusammenhang mit dem vorliegenden Projekt

- Abgottspon A., Staubli T., Felix D., Albayrak I., Boes R.M. (2013a): **Hydro-abrasive Erosion of Pelton buckets and Suspended Sediment Monitoring**. *Proc. Hydrovision International 2013*, Denver, USA.
- Abgottspon A., Stern P., Staubli T., Felix D., Winkler K. (2013b): **Measuring Turbine Abrasion and Efficiency Decrease: First Results of the Case Study at HPP Fieschertal**. *Proc. Hydro 2013 Conference*, Innsbruck, Austria: paper no. 18.05.
- Abgottspon A., Staubli T., Felix D., Albayrak I., Boes R.M. (2014): **Monitoring Suspended Sediment and Turbine Efficiency**. *Hydro Review Worldwide*, 22(4): 28-36.
- Abgottspon A., Felix D., Staubli T., Albayrak I., Boes R.M. (2016): **Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen an Peltonturbinen des KW Fieschertal (2012-2014)**. *Wasser, Energie, Luft* [in Vorbereitung]

Das vorliegende Projekt ist Bestandteil der Dissertation von D. Felix. Nach Abschluss der Dissertation, voraussichtlich ab Sommer 2016, wird diese in der ETH-Bibliothek sowie als VAW-Mitteilung in elektronischer Form frei zugänglich sein:

<http://e-collection.library.ethz.ch/search.php>

http://www.vaw.ethz.ch/publications/vaw_reports/2010-2019

8.2 Weitere Referenzen

- Bajracharya T.R., Acharya B., Joshi C.B., Saini R.P., Dahlhaug O.G. (2008): **Sand erosion of Pelton turbine nozzles and buckets: A case study of Chilime Hydropower Plant**. *Wear*, 264(3-4): 177-184.
- Boes R.M. (2010): **Kontinuierliche Messung von Schwebstoffkonzentration und -korngrößenverteilung im Triebwasser und Quantifizierung der Hydroabrasion an einer Peltonmaschine**. *Wasser Energie Luft*, 102(2): 101-107.
- Brekke H., Wu Y.L., Cai B.Y. (2002): **Design of Hydraulic Machinery Working in Sand Laden Water**. In Duan C.G. und Karelin V.Y. (eds.), *Abrasive Erosion & Corrosion of Hydraulic Machinery* (pp. 155-233). London: Imperial College Press.
- Cateni A., Magri L., Grego G. (2008): **Optimization of Hydro Power Plants Performance – Importance of rehabilitation and maintenance in particular for the runner profiles**. *Proc. 7th Int. Conf. on Hydraulic Efficiency Measurements (IGHM)*, Milan, Italy.
- DWA (2006): **Entlandung von Stauräumen**. *Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.*, Hennef, Deutschland.
- Hassler P. und Schnablegger W. (2006): **Pelton runner maintenance and its results at Verbund-Austrian Hydro Power AG**. *Proc. 14th International Seminar on Hydropower Plants*, Doujak E. (ed.), Wien, Österreich: 445-454.
- Helmut Fischer AG (2012): **Datenblätter und Schulungsunterlagen**. helmut-fischer.com.
- Kalberer A. (1988): **Erfahrungen mit neuartigen Beschichtungen im Wasserturbinenbau**. *Intern. Symposium über Erosion, Abrasion und Kavitation im Wasserbau*. VAW-Mitteilung Nr. 100, Vischer D. (ed.), ETH Zürich, Switzerland: 245-258.
- Maldet R. (2008): **Pelton runner with high erosion caused by glacier sediment: assessment and measures**. *Proc. 15th International Seminar on Hydropower Plants*, Doujak E. (ed.), Wien, Österreich: 639-646.
- Padhy M.K. und Saini R.P. (2011). **Study of silt erosion on performance of a Pelton turbine**. *Energy*, 36(1): 141-147.
- Rai A.K., Kumar A., Staubli T. (2015): **Developing a test rig to measure hydro-abrasive erosion in Pelton turbine**. *International Conference on Hydropower for Sustainable Development*, February 05-07, 2015, Dehradun, India: 535 - 547.
- Singh M., Banerjee J., Patel P.L., Tiwari H. (2013): **Effect of silt erosion on Francis turbine: a case study of Maneri Bhal Stage-II, Uttarakhand, India**. *ISH J. of Hydraulic Eng.*, 19(1): 1-10.
- Steinbichler Optotechnik GmbH (2012): **Datenblatt und Qualitätsurkunde**. www.steinbichler.de.
- Strübin P. und Bussy M. (1988): **Erosionserscheinungen im Kraftwerk Mörel der Aletsch AG aus Sicht der Betriebsleitung**. *Intern. Symposium über Erosion, Abrasion und Kavitation im Wasserbau*. VAW-Mitteilung Nr. 100, Vischer D. (ed.), ETH Zürich, Switzerland: 95-123.
- Zhang Z. (2009): **Freistrahlturbinen, Hydrodynamik und Auslegung**, *Springer Verlag*, Berlin und Heidelberg.



Anhang

Drei Fachartikel von Abgottspon *et al.* (2013a, 2013b und 2014), die sich zum Teil auf die optische Vermessung von Pelton-Bechern und die Schichtdickenmessungen beziehen, liegen diesem Schlussbericht bei.