



Universität für Bodenkultur Wien

Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und
Konstruktiven Wasserbau

Vorstand:

O.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Hans-Peter Nachtnebel

Betreuer:

Ao.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.nat.techn. Helmut Mader

REVITALISIERUNGSPOTENTIAL VON KLEINWASSERKRAFTANLAGEN

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur
an der Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht von

Philipp Matiasch

Matrikelnummer: 0125791

Studienrichtung: Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

Wien, Juni 2011

DANKSAGUNG

Ich möchte mich bei meinen Freunden und meiner Familie bedanken die mich immer unterstützt haben. Weiters möchte ich mich bei Allen bedanken die ihren Teil zu dieser Arbeit beigetragen haben, ganz besonders beim meinem Betreuer Dipl.-Ing.Dr.nat.techn. Helmut Mader. Danken will ich auch dem wichtigsten Menschen in meinem Leben, der alle Höhen und Tiefen meines Studiums mit mir erlebt hat. Danke Christiane!

KURZFASSUNG

Die gegenständliche Arbeit soll überprüfen, ob statistisch relevante Zusammenhänge zwischen dem praktisch erzielbaren Ertragssteigerungspotential von Kleinwasserkraftwerken und einzelnen Kenngrößen dieser Kleinwasserkraftwerke, unter Berücksichtigung des jeweiligen Baujahres, festgestellt werden können und diese möglichen Gesetzmäßigkeiten formelmäßig erfassen. Es werden 143 Anlagen betrachtet. In 82 der 143 Anlagen ist eine Francisturbine verbaut, in 30 Anlagen ist eine Kaplan-turbine eingebaut, in 15 Anlagen ist eine Pelton-turbine vorhanden, in 9 Anlagen ist eine Ossbergerturbine verbaut und in 7 Anlagen ist ein anderer Turbinentyp zu finden.

Bei 118 der 143 Anlagen ist die Fallhöhe geringer als 15 Meter, bei 17 Anlagen liegt die Fallhöhe zwischen 15 und 100 Metern und bei 5 Anlagen über 100 Meter. Bei den übrigen 3 Anlagen ist die Fallhöhe nicht bekannt.

Bei 94 der 143 Anlagen liegt der Anlagendurchfluss unter 3000 Liter pro Sekunde, bei 32 Anlagen liegt der Anlagendurchfluss zwischen 3000 und 10.000 Liter pro Sekunde und bei 12 Anlagen liegt er über 10.000 Liter pro Sekunde. Bei den übrigen 5 Anlagen ist der Anlagendurchfluss nicht bekannt.

Die statistische Auswertung ist für Pelton- und Ossbergerturbinen aufgrund der zu geringen Datenmenge nicht sinnvoll, für Francis- und Kaplan-turbinen sind statistische Aussagen zu einzelnen Detailfragen beschränkt möglich. Diese geringe Aussagekraft ist einerseits auf die zu kleine Datenmenge und andererseits auf die Vielzahl der sich gegenseitig beeinflussenden Faktoren zurückzuführen.

ABSTRACT

The aim of this study is to examine whether statistically relevant connections between the practically attainable increased returns potential by small hydroelectric power plants and individual characteristics of these small hydroelectric power plants, under consideration of the respective year of construction. 143 plants are regarded. In 82 of the 143 plants a Francis water turbine is installed, in 30 plants a Kaplan turbine, in 15 plants a Pelton turbine, in 9 plants an Ossberger turbine and in 7 plants is another type of turbine to be found.

With 118 of the 143 plants the head is smaller than 15 meters, with 17 plants the head is between 15 and 100 meters and about 5 plants over 100 meters. With the remaining 3 plants the head is not known.

With 94 of the 143 plants the plant flow is under 3000 liters per second, with 32 plants lies the plant flow between 3000 and 10.000 liters per second and with 12 plants lies it over 10.000 liters per second. With the remaining 5 plants the plant flow is not well-known.

The statistic evaluation is not meaningful for Pelton and Ossbergerturbinen due to the too small data set, for Francis and Kaplan turbines is limited possible statistic statements to individual detail questions. This small force of expression is to due itself on the one hand to the too small data set and on the other hand to the multiplicity of the mutually affecting factors.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINFÜHRUNG	1
1.1	Zielsetzung	1
1.2	Arbeitsschritte	2
2	ROHDATEN	4
2.1	Gutachter Bernhard PELIKAN	4
2.2	Verein Kleinwasserkraft Österreich	5
2.3	Energiesparverband Oberösterreich	6
2.4	Literaturrecherche	6
2.5	Internetrecherche	7
3	METHODIK	8
3.1	Erstellung der Datenbank	8
3.1.1	Kurzbeschreibung der Anlagen	8
3.1.2	Hydrologie des anspeisenden Gewässers	9
3.1.3	IST-Zustand der Kraftwerke	9
3.1.4	SOLL-Zustand der Kraftwerke	10
3.1.5	durchgeführte Sanierungs- und Erneuerungsmaßnahmen	10
3.1.6	prozentuelle Steigerung von Kennwerten	11
3.2	Statistische Auswertung der Grundparameter	17
3.3	Auswertungen der Tabelle	21
3.4	Statistik	22
4	ERGEBNISSE	24
4.1	Steigerung des Jahresarbeitsvermögens	24
4.2	Steigerung der Leistung	35
4.3	Steigerung des Gesamtwirkungsgrades	43
4.4	Steigerung des Durchflusses	48
4.5	Steigerung der Fallhöhe	52
5	DISKUSSION DER ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	57
6	LITERATURVERZEICHNIS	60
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	61
8	TABELLENVERZEICHNIS	64

1 EINFÜHRUNG

Im Jahr 2009 gibt die Salzburger Landesregierung eine Studie bei der Universität für Bodenkultur, mit dem Ziel der Ermittlung des Wasserkraftpotentials der Fließgewässer des Bundeslandes Salzburg, in Auftrag. Es soll das Revitalisierungspotential von bestehenden Anlagen unter Berücksichtigung von alternativen Konzepten ermittelt werden. Zu diesem Zweck vergibt das Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau neben anderen Bakkalaureats- und Diplomarbeiten auch die vorliegende Arbeit.

1.1 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Ermittlung des Revitalisierungspotentials von Kleinwasserkraftanlagen durch statistische Korrelationsanalyse anhand der Daten bereits erneuerter Anlagen. Dazu wurden die Daten von 143 Kleinwasserkraftwerken, die in der Vergangenheit revitalisiert wurden, erhoben und in eine Datenbank eingegeben. Die Daten wurden auf Ersuchen der Autoren anonymisiert. Die anschließende Analyse versucht Gesetzmäßigkeiten und Trends einzelner Revitalisierungsparameter aufzuzeigen, um daraus Prognosen ableiten zu können. Als Ziele der vorliegenden Arbeit können genannt werden:

- Bestimmung des Verbesserungspotentials von Kleinwasserkraftanlagen in Abhängigkeit von verschiedenen Kenngrößen
- Darstellung der durch die Verbesserungsmaßnahmen realisierten Effizienzsteigerungen in Streudiagrammen
- Überprüfung der statistischen Zusammenhänge zwischen den Verbesserungsmaßnahmen und den daraus resultierenden Steigerungen durch Regressions- und Sensitivitätsanalysen
- Ermittlung von Prognosewerten (-funktionen) für zukünftige Revitalisierungsmaßnahmen

1.2 Arbeitsschritte

Im ersten Arbeitsschritt erfolgt die Sammlung der Daten, die als Gutachten für Kraftwerke oder in der Form von Bewertungen von anerkannten Fachleuten vorliegen. Im Kapitel „*Rohdaten*“ wird ein Überblick über diejenigen Institutionen und Personen gegeben, die Teile ihrer gesammelten Daten anonymisiert zur Verfügung stellen. Problematisch ist hierbei das Vorliegen der Daten in unterschiedlichem Umfang, woraus sich teilweise Inhomogenitäten der Datensätze ergeben. Deshalb konnten einige Datensätze nicht zur weiteren Analyse herangezogen werden. Als Gründe für die Inhomogenität der Daten sind zu nennen:

- unterschiedliche Begutachtungsstile:
Durch die unterschiedlichen Begutachtungsstile der Autoren der Gutachten wird die Systematisierung erschwert.
- unterschiedliche Anforderungen der einzelnen Institutionen an ihre Daten:
Teile der für die gegenständliche Arbeit als notwendig erachteten Informationen konnten nicht in Erfahrung gebracht werden, da sie von einzelnen Institutionen nicht erfasst und daher im Rahmen ihrer Untersuchungen als nicht notwendig erachtet wurden.
- nicht vollständige Überlassung der Daten:
Aus rechtlichen Gründen stellen die einzelnen Institutionen nicht alle ihnen vorliegenden Informationen über die Kraftwerke zur Verfügung. Dieser Verlust an Information begrenzt die Auswertemöglichkeiten.

Nach abgeschlossener Datenerhebung wird die gesammelte Information aufbereitet und in einer Datenbank (= Tabelle) erfasst. Im Kapitel „*Methodik*“ wird ein Überblick über die Erstellung und den Inhalt dieser Tabelle gegeben. Weiters werden in diesem Kapitel die statistischen Methoden und Mittel zur Analyse der Daten erläutert.

Im zweiten Arbeitsschritt erfolgt die Auswertung dieser Datentabelle durch die Darstellung von Klassifikationsparametern und realisierten Effizienzsteigerungen in Streudiagrammen. Die Klassifikationsparameter werden zur grafischen Interpretation auf der Abszisse (x-Achse) und die Steigerungen auf der Ordinate (y-Achse) aufgetragen. Aufgrund der unterschiedlichen Klassifikation von

Wasserkraftanlagen hinsichtlich ihres Baujahres, Turbinentyps, etc. und den Effizienzsteigerungen ergibt sich eine Fülle von zu untersuchenden Kombinationsmöglichkeiten.

Im dritten Arbeitsschritt erfolgt die statistische Überprüfung dieser Streudiagramme hinsichtlich Plausibilität und Aussagekraft mittels Regressions- und Sensitivitätsanalysen. Die Darstellung dieser Streudiagramme und der Ergebnisse der Regressions- und Sensitivitätsanalysen erfolgt im Kapitel „*Ergebnisse*“.

Im Kapitel „*Diskussion der Ergebnisse mit Schlussfolgerungen*“ erfolgt die Zusammenfassung der Ergebnisse. Weiters wird die Verwertbarkeit der Auswertungen diskutiert und anschließend Schlussfolgerungen aus den gewonnenen Erkenntnissen abgeleitet.

2 ROHDATEN

Alle der vorliegenden Arbeit zu Grunde gelegten Kraftwerksdaten sind vor der Auswertung zur Wahrung der Anonymität der Anlagenbetreiber anonymisiert worden. Die Rohdaten der untersuchten Anlagen stammen aus drei voneinander unabhängigen Quellen und der Fachliteratur. Die Überlassung der Datensätze erfolgt auf Anfrage bei den einzelnen Institutionen. Die Daten beinhalten aufgrund der teilweise differenzierten Fragestellung bei der Ersterhebung unterschiedliche Informationen. Die Sicherung der Vergleichbarkeit war dementsprechend eine der größten Herausforderungen bei der Erstellung der Datenbank. Im Folgenden werden die einzelnen Datenquellen vorgestellt, deren Erhebungen oder Unterlagen der weiteren statistischen Auswertung zu Grunde gelegt werden.

2.1 *Gutachter Bernhard PELIKAN*

21 Datensätze stammen aus Gutachten zur Erzeugungssteigerung von Kleinwasserkraftwerken, die von den jeweiligen Betreibern direkt beim Gutachter in Auftrag gegeben wurden. Zur Verfügung gestellt wurden diese Gutachten von AO. UNIV. PROF. DIPL.-ING. DR. Bernhard PELIKAN, allgemein beeideter und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger für Wasserkraftanlagen. Die Gutachten sind durchgehend einheitlich aufgebaut und enthalten zur Charakterisierung der begutachteten Wasserkraftanlagen folgende Parameter bzw. Kapitel.

Gliederung der Gutachten:

- Kurzbeschreibung der Kraftanlage
- Hydrologische Gegebenheiten
- Frühere Erzeugung
- Darstellung der Verbesserungsmaßnahmen
- Gegenwärtige / zukünftige Erzeugung
- Zusammenfassung

Aus diesen 21 Gutachten können alle, für die gegenständliche Untersuchung relevanten, Daten übernommen werden. Aus der Kurzbeschreibung der Anlage sind dies das Baujahr, der Ausbaudurchfluss, die Ausbaufallhöhe und die Ausbauleistung.

Aus den hydrologischen Gegebenheiten stammen die Angaben zur Größe des Einzugsgebietes und die hydrologischen Daten des Gewässers, welches das Kraftwerk anspeist.

Der gegliederte Aufbau der möglichen Verbesserungsmaßnahmen wird in die vorliegende Arbeit übernommen. Im Kapitel „gegenwärtige / zukünftige Erzeugung“ der Gutachten sind Angaben und Berechnungen zu den Wirkungsgraden, zum Jahresarbeitsvermögen und zur theoretischen Volllaststundenzahl gegeben. In der Zusammenfassung erfolgt die Beurteilung der Zweckmäßigkeit der Investition durch die Darstellung der erzielbaren Produktionssteigerung.

2.2 Verein Kleinwasserkraft Österreich

47 Datensätze stammen aus Beratungsprotokollen für Kleinwasserkraftwerksbetreiber des Vereins Kleinwasserkraft Österreich. Zur Verfügung gestellt wurden diese Protokolle von Christoph WAGNER, dem Präsidenten und Landessprecher des Vereins Kleinwasserkraft Österreich für das Land Oberösterreich. Der Aufbau und die in den Beratungsprotokollen enthaltenen Informationen sind ähnlich den Gutachten von PELIKAN. Die vom Verein Kleinwasserkraft Österreich durchgeführten Beratungen geben den Kleinwasserkraftwerksbetreibern vor der Revitalisierung ihrer Kleinwasserkraftanlagen einen Einblick in mögliche zukünftige Produktionssteigerungen. Die Beratungsprotokolle bestehen aus einem Anlagendatenblatt und einem technischen Bericht inklusive der dafür notwendigen Berechnungen und Erhebungen. Im Anlagendatenblatt wurden die Grunddaten der Kraftwerke aufgrund einer Besichtigung der Kleinwasserkraftanlage durch Mitarbeiter der Beratungsstelle erfasst.

Gliederung der Anlagendatenblätter:

- Angaben zum Kraftwerksbetreiber
- Angaben zur Kleinwasserkraftanlage
- Daten zur Kleinwasserkraftanlage

Die Angaben zum Kraftwerksbetreiber und zur Kleinwasserkraftanlage werden nicht übernommen um die erbetene Anonymität der Daten zu wahren. Die Informationen, die für die Stromerzeugung der Wasserkraftanlagen relevant sind, werden, soweit vorhanden, übernommen.

Der technische Bericht enthält eine Beschreibung der Anlage, Maßnahmen zur Leistungssteigerung und Prognosen zur künftig möglichen Erzeugung. Aus dem technischen Bericht stammen die Daten zur möglichen Produktionssteigerung und den dazu notwendigen Verbesserungsmaßnahmen.

2.3 Energiesparverband Oberösterreich

55 Datensätze werden Förderakten des oberösterreichischen Energiesparverbandes entnommen. Zur Verfügung gestellt wurden die Akten von DIPL.-ING. DR. Gerhard DELL, dem Geschäftsführer des Energiesparverbandes und Energiebeauftragten des Landes Oberösterreich. Diese Förderakten enthalten Finanzierungsansuchen, Kostenaufstellungen, Daten zu den einzelnen Anlagen, etc. Ebenfalls angefügt waren, soweit vorhanden, technische Berichte und Gutachten zu den Anlagen. Der Schwerpunkt dieser Unterlagen liegt auf den finanziellen Aspekten und technische Angaben sind nur dann enthalten wenn sie förderungsrelevant waren. Alter bzw. Baujahr der Kleinwasserkraftwerke wurden vom Energiesparverband nicht erhoben. In die Kurzbeschreibung der Anlage übernommen werden der Turbinentyp, der Ausbaudurchfluss, die Ausbaufallhöhe und die Leistung. Das Baujahr ist nur bei 12 der 55 Anlagen ermittelbar. Hinsichtlich der Hydrologie gibt es bei 5 Anlagen Angaben zur Pflichtwassermenge. Weitere Informationen sind nicht vorhanden. Zu den Teilwirkungsgraden der elektromaschinellen Ausrüstung gibt es keine oder nur unvollständige Angaben. Die Erzeugungssituation vor und nach der Revitalisierung der Anlagen wurde komplett in die Tabelle übernommen. Die Daten sind zwar umfangreich aber bei 43 der 55 Anlagen aufgrund der fehlenden Angaben zum Alter der Anlage für die vorgesehenen Auswertungen nicht verwendbar.

2.4 Literaturrecherche

20 Datensätze können nach der Literaturrecherche aus Fachbüchern entnommen werden. 10 der Datensätze stammt aus den Büchern zu den internationalen Anwenderforen Kleinwasserkraftwerke für Planer, Betreiber und Hersteller des Ostbayerischen Technologie-Transfer-Institut e.V. – Regensburg. 10 der Datensätze sind in den Büchern zu den internationalen Seminaren für Wasserkraftanlagen des

Institutes für Energietechnik und Thermodynamik der technischen Universität Wien enthalten. Die betreffenden Werke sind im Literaturanhang aufgelistet.

2.5 Internetrecherche

Generell liegen im Internet keine für diese Arbeit relevanten Datensätze zu Kleinwasserkraftanlagen auf. Die Kraftwerksbetreiber geben auf ihren Internetseiten meist nur populärwissenschaftliche Eckparameter ihrer Anlagen an, die sich im Wesentlichen auf die wirtschaftlichen Kennzahlen beschränken. Daher können aus dem Internet keine zusätzlichen Daten für die gegenständliche Arbeit entnommen werden.

3 METHODIK

Nach abgeschlossener Datensammlung wird im folgenden Kapitel die Auswertung der Datensätze beschrieben.

3.1 Erstellung der Datenbank

Erster Teil dieser Auswertung ist die systematische Dateneingabe in eine Tabelle. Dazu wird das Programm Microsoft EXCEL © verwendet, da damit auch die Datenauswertung durchgeführt werden soll. Die Tabelle ist im Anhang enthalten und umfasst 143 Anlagen, zu denen alle relevanten Daten und Werte eingegeben werden. Gegliedert ist die Datenbank in sechs Obergruppen.

Diese Obergruppen sind:

- Kurzbeschreibung der Anlage
- Hydrologie des anspeisenden Gewässers
- IST-Zustand der Kraftwerke
- SOLL-Zustand der Kraftwerke
- durchgeführte Sanierungs- und Erneuerungsmaßnahmen
- prozentuelle Steigerung von Kennwerten

3.1.1 Kurzbeschreibung der Anlagen

Die Kurzbeschreibung der Anlage umfasst den Turbinentyp des Kraftwerkes vor der Revitalisierung und nach der Revitalisierung. Neben den weit verbreiteten Turbinentypen (Francis-, Kaplan-, Pelton- und Ossbergerturbinen) sind auch seltene Typen (Reiffenstein- und Jonvalturbinen) und nicht zeitgemäße Mühlräder verbaut worden. Bei 125 Kraftwerken ist der Turbinentyp im Zuge der Revitalisierung beibehalten worden, bei 18 Anlagen wurde die Turbinenart bei der Revitalisierung getauscht.

Bei 16 dieser 18 Kraftwerke, bei denen der Turbinentyp verändert wurde, wurde eine Francisturbine durch eine Kaplan turbine ersetzt. Weiters umfasst die Kurzbeschreibung der Anlage das Baujahr des Kraftwerkes, den Ausbaudurchfluss und die Ausbaufallhöhe der Wasserkraftanlage sowie die Leistung der Turbine.

3.1.2 Hydrologie des anspeisenden Gewässers

Das Kapitel Hydrologie beinhaltet Angaben über die dem Kraftwerk nächstgelegene Pegelmessstelle am anspeisenden Gewässer. Hier wird der mittlere Abfluss (MQ), der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) und der niedrigste jemals gemessene Niedrigwasserabfluss (NNQ) angegeben. Diese Abflusswerte sind wichtig bei der Planung der Kraftwerke und bei der Wahl der Betriebsführung. Da die Abflussmengen nur bei 14 Datensätzen ermittelbar sind wird nicht näher auf die Auswirkungen auf das Revitalisierungspotential eingegangen. Weiters sind die laut Wasserrechtsbescheid im Gewässer verbleibende Pflichtwassermenge im Sommer und im Winter, das Vorhandensein einer Fischaufstiegshilfe und die Größe des Einzugsgebietes des Gewässers angegeben. Angaben zu den Pflichtwassermengen sind bei 18 Kraftwerken vorhanden. Die Größe des Einzugsgebietes ist bei 11 Datensätzen ausgewiesen, 7 Anlagen hatten vor der Revitalisierung eine Fischaufstiegshilfe. Diese Informationen sind zu wenig für statistische Auswertungen, auch ist aus diesen Parametern kein Ertragssteigerungspotential ableitbar und es wird daher nicht näher auf diese Daten eingegangen.

3.1.3 IST-Zustand der Kraftwerke

Die Gruppe IST-Zustand enthält Angaben zu den Teilwirkungsgraden der im jeweiligen Kraftwerk eingebauten Turbine, des Generators und des Getriebes und den Gesamtwirkungsgrad der elektromaschinellen Ausrüstung des Wasserkraftwerkes vor der Revitalisierung. Weiters ist hier das Jahresarbeitsvermögen und die theoretische Volllaststundenanzahl, errechnet aus der Stromerzeugung vor der Erneuerung, angegeben.

3.1.4 SOLL-Zustand der Kraftwerke

Das Kapitel SOLL-Zustand enthält die gleichen Angaben zu den Wirkungsgraden wie das Kapitel IST-Zustand. Allerdings sind die Wirkungsgrade für die revitalisierten Anlagenteile erfasst. Die Angaben zum Jahresarbeitsvermögen und der theoretischen Volllaststundenzahl der Kleinwasserkraftwerke sind Hochrechnungen unter Berücksichtigung der ausgeführten Änderungen.

3.1.5 durchgeführte Sanierungs- und Erneuerungsmaßnahmen

Die Angaben zu den durchgeführten Verbesserungsmaßnahmen sind Informationen aus den Gutachten über die erfolgten Sanierungen. Hier wurde festgehalten, ob eine bestimmte Verbesserungsmaßnahme durchgeführt wurde (diese Maßnahme ist dann angekreuzt), oder nicht. Die möglichen Optimierungen betreffen Adaptierungen an der Wehranlage, Veränderungen der hydrologischen Parameter, Änderungen an der Rechenanlage, Anpassung der elektrischen Ausrüstung an den Stand der Technik sowie Überholung oder Erneuerung der elektromaschinellen Ausrüstung (Turbine, Getriebe und Generator). Zur Vervollständigung der Daten sind Ausbaudurchfluss, Fallhöhe und Leistung der Kraftwerke nach der Revitalisierung angeführt.

Verbesserungsmaßnahmen, die unter Adaptierungen der Wehranlage fallen, sind das Absenken des Unterwassers, die Sanierung der Schütze und der Umbau auf eine wasserstandsabhängige Wehranlage.

Veränderungen der hydrologischen Parameter sind die Errichtung einer Fischaufstiegshilfe, die Wiederherstellung der ursprünglichen Fallhöhe und die Erneuerung oder Vergrößerung der Rohrleitungen zu den Turbinen.

Unter das Kapitel Änderungen an der Rechenanlage fallen die Sanierung oder Erneuerung des Rechens oder das Nachrüsten einer Rechenreinigungsanlage.

Als Anpassung der elektrischen Ausrüstung, darunter fallen Schaltschränke, Relais, Alarmierungseinrichtungen, usw., wird die teilweise oder vollständige Erneuerung der elektrischen Ausrüstung oder der Anschluss von „Inselanlagen“ (ausschließliche Eigenstromerzeugung) an das öffentliche Netz gewertet.

Die Optimierung der elektromaschinellen Ausrüstung kann neben dem Austausch oder der Sanierung der Turbine, des Getriebes oder des Generators auch durch die Nachrüstung einer Turbinenregelung erfolgen.

3.1.6 prozentuelle Steigerung von Kennwerten

Die Angaben zu den prozentuellen Steigerungen werden aus dem Vergleich der einzelnen Parameter vor und nach der Revitalisierung der Kleinwasserkraftanlage errechnet. Angegeben ist das Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens, der Leistung der Turbine, des Gesamtwirkungsgrades, der Fallhöhe und des Turbinendurchflusses.

Ermittlung der Steigerung des Jahresarbeitsvermögens, der Leistung und der Fallhöhe:

Die prozentuelle Steigerung des Jahresarbeitsvermögens, der Leistung und der Fallhöhe berechnet sich wie folgt:

$$\text{Wert nach der Revitalisierung} / (\text{Wert vor der Revitalisierung} / 100) - 100$$

Ermittlung der Steigerung des Durchflusses:

Die Ermittlung der Durchflusssteigerung erfolgt über die Berechnung der nutzbaren Jahreswasserfracht. Die nutzbare Jahreswasserfracht berechnet sich näherungsweise nach folgender Formel:

$$\frac{\text{Jahresarbeitsvermögen JAV [kWh/a]}}{\text{Fallhöhe } h \text{ [m]} \cdot \text{Gesamtwirkungsgrad } \eta \text{ []} \cdot \text{Gravitationskonstante } g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]} \cdot 365 \cdot 24}$$

Die nutzbare Jahreswasserfracht wird für die Erzeugungssituation vor und nach der Revitalisierung berechnet. Die Steigerung des Durchflusses errechnet sich dann analog zur Steigerung des Jahresarbeitsvermögens, der Leistung und der Fallhöhe.

Ermittlung der Steigerung des Turbinenwirkungsgrades:

Die Wirkungsgrade zweier Turbinen sind vergleichbar indem man ihre Anteile, gemessen am Maximalwirkungsgrad, berechnet und anschließend die Flächeninhalte unter den Wirkungsgradkurven vergleicht.

Die Ausgangskurven für die Pelton-, die Francis- und die Kaplan turbine werden aus folgender Grafik entnommen:

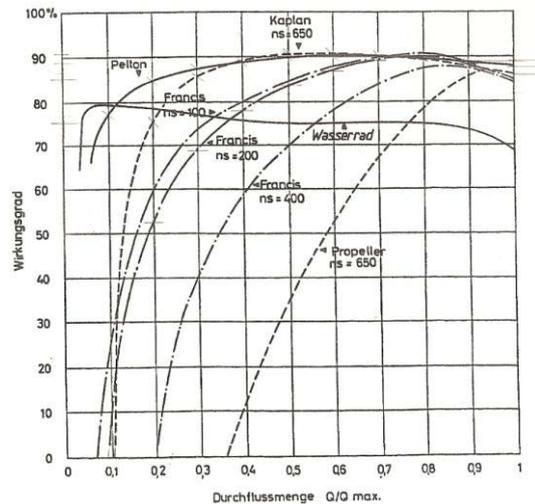


Abbildung 1: Turbinenwirkungsgrade Pelton-, Francis- und Kaplan turbine [SANDOR O. PALFFY]

Die Ausgangskurve für die Ossbergerturbine wird aus folgender Grafik entnommen:

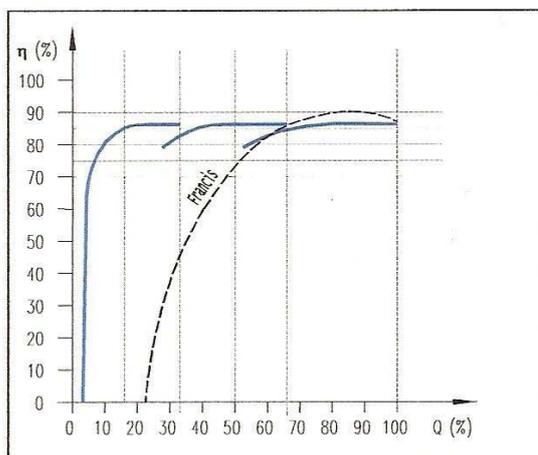


Abbildung 2: Turbinenwirkungsgrad Ossberger [OSSBERGER GmbH + Co]

Vor der Ermittlung der Steigerung des Wirkungsgrades werden die Ausgangskurven zunächst tabellarisch erfasst. Dazu wird der Wert für den Wirkungsgrad an jedem Zehntelpunkt graphisch ermittelt und in eine Tabelle übertragen.

	Francis	Pelton	Kaplan	Ossberger
Q / Q_{MAX}	η	η	η	η
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,1	0,00	0,77	0,00	0,80
0,2	0,53	0,85	0,75	0,86
0,3	0,69	0,87	0,85	0,86
0,4	0,78	0,89	0,89	0,86
0,5	0,83	0,90	0,91	0,86
0,6	0,87	0,91	0,91	0,86
0,7	0,89	0,90	0,90	0,86
0,8	0,90	0,89	0,89	0,86
0,9	0,88	0,89	0,87	0,86
1,0	0,81	0,88	0,86	0,86

Tabelle 1 : Wirkungsgradverläufe

Dann wird für jeden ermittelten Wert das Verhältnis zum Maximalwirkungsgrad errechnet und in der Tabelle eingefügt.

Q / Q_{MAX}	Francis		Pelton		Kaplan		Ossberger	
	η	η / η_{MAX}	η	η / η_{MAX}	η	η / η_{MAX}	η	η / η_{MAX}
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,1	0,00	0,00	0,77	0,85	0,00	0,00	0,80	0,93
0,2	0,53	0,59	0,85	0,93	0,75	0,82	0,86	1,00
0,3	0,69	0,77	0,87	0,96	0,85	0,93	0,86	1,00
0,4	0,78	0,87	0,89	0,98	0,89	0,98	0,86	1,00
0,5	0,83	0,92	0,90	0,99	0,91	1,00	0,86	1,00
0,6	0,87	0,97	0,91	1,00	0,91	1,00	0,86	1,00
0,7	0,89	0,99	0,90	0,99	0,90	0,99	0,86	1,00
0,8	0,90	1,00	0,89	0,98	0,89	0,98	0,86	1,00
0,9	0,88	0,98	0,89	0,98	0,87	0,96	0,86	1,00
1,0	0,81	0,90	0,88	0,97	0,86	0,95	0,86	1,00

Tabelle 2 Wirkungsgradverläufe und Verhältnisse zum Maximalwirkungsgrad

Anschließend erfolgt die Darstellung der Wirkungsgradverläufe und der Verhältnisse in Diagrammen wobei der Kurvenverlauf geglättet wurde. Die blau gefärbten, unteren Kurven zeigen den digitalisierten Verlauf der Wirkungsgrade. Die rosa gefärbten, oberen Kurven zeigen das Verhältnis zwischen dem Wirkungsgrad am jeweiligen Zehntelpunkt und dem Maximalwirkungsgrad.

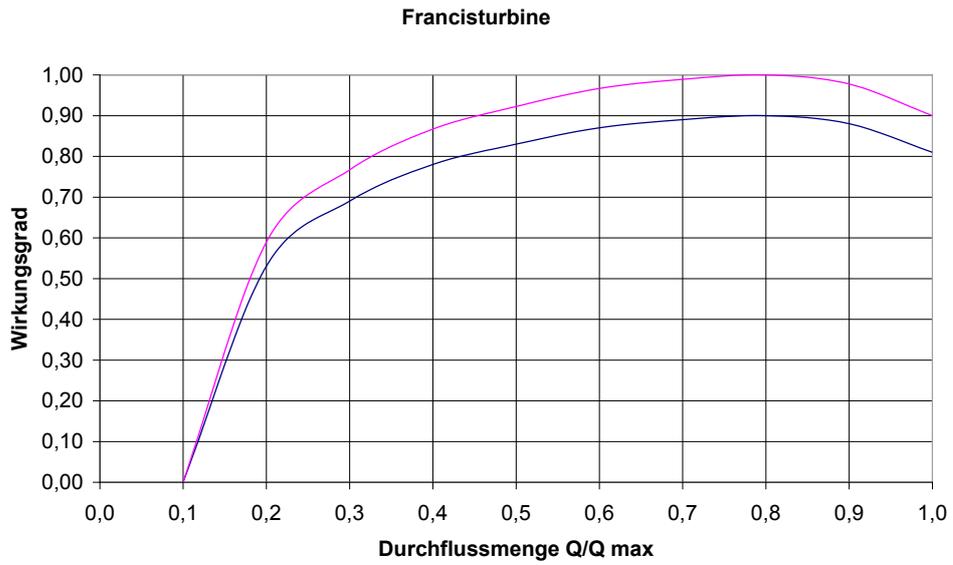


Abbildung 3: Turbinenwirkungsgrad Francisturbine

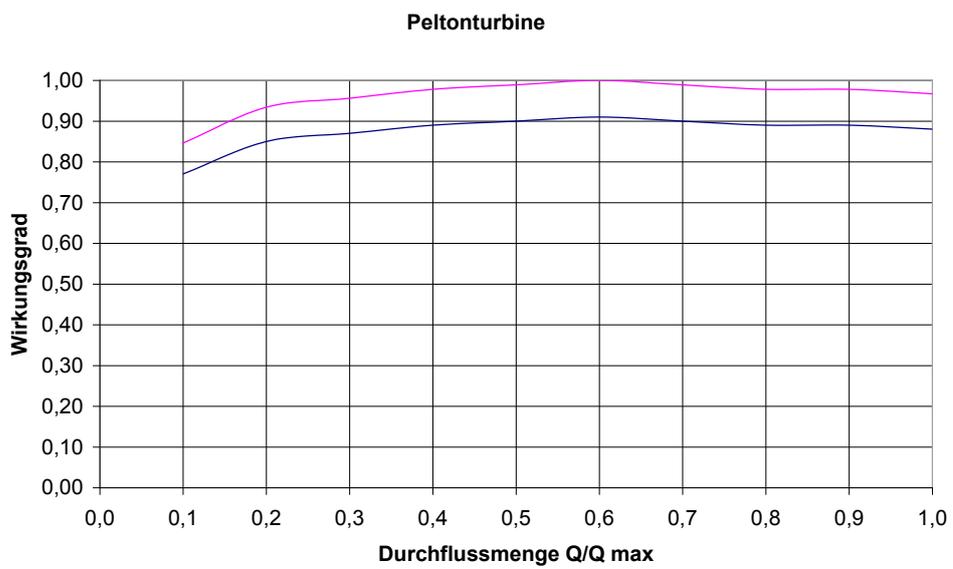


Abbildung 4: Turbinenwirkungsgrad Pelton-turbine

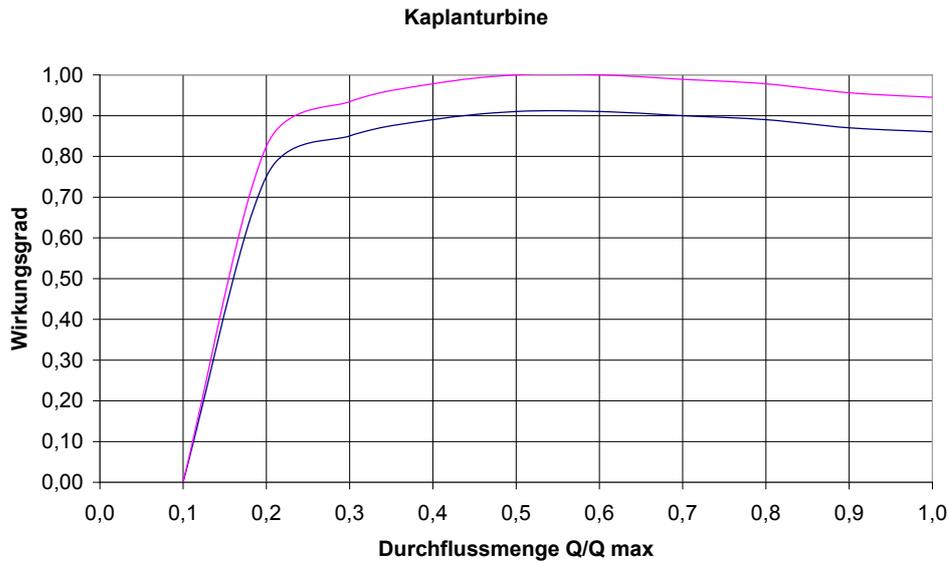


Abbildung 5: Turbinenwirkungsgrad Kaplanturbine

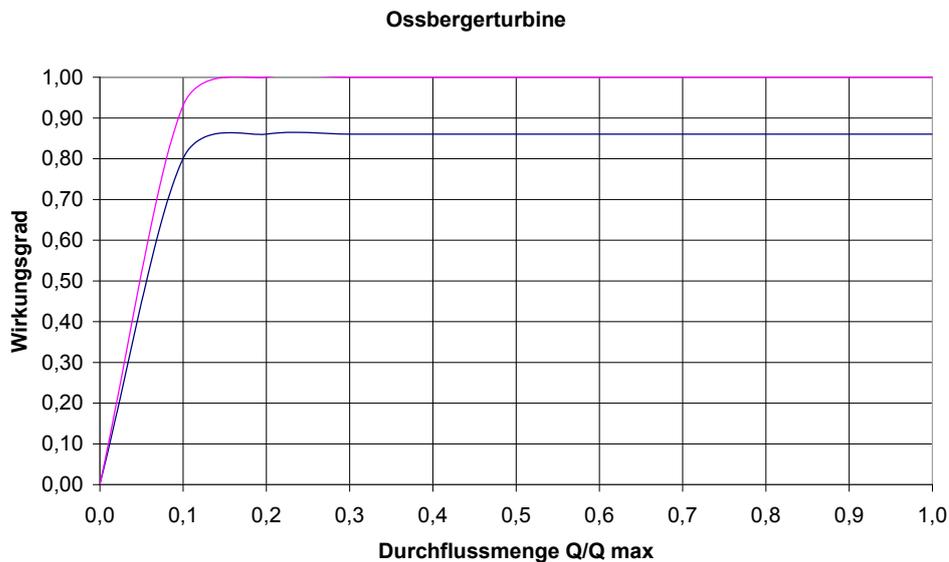


Abbildung 6: Turbinenwirkungsgrad Ossbergerturbine

Zur Ermittlung der Steigerung des Turbinenwirkungsgrades erfolgt die Multiplikation des jeweiligen tatsächlichen Wirkungsgrades einer konkreten Turbine mit dem Verhältnis von Wirkungsgrad zu Maximalwirkungsgrad. Es werden also die gemessenen Wirkungsgrade der einzelnen Turbinen mit den Zehntelpunkten der rosa gefärbten Kurven multipliziert. Dies dient dazu den Wirkungsgradverlauf der betrachteten Turbine zu ermitteln.

Schließlich erfolgt die Berechnung der Flächen unter der Kurve des Wirkungsgradverlaufes vor und nach der Revitalisierung. Die Steigerung errechnet

sich dann analog zur Steigerung des Jahresarbeitsvermögens, der Leistung und der Fallhöhe.

Wert nach der Revitalisierung / (Wert vor der Revitalisierung / 100) – 100

Beispiel: Steigerung des Wirkungsgrades einer Anlage, die mit einer Francisturbine ausgerüstet ist, von $\eta = 0,65$ auf $\eta = 0,80$

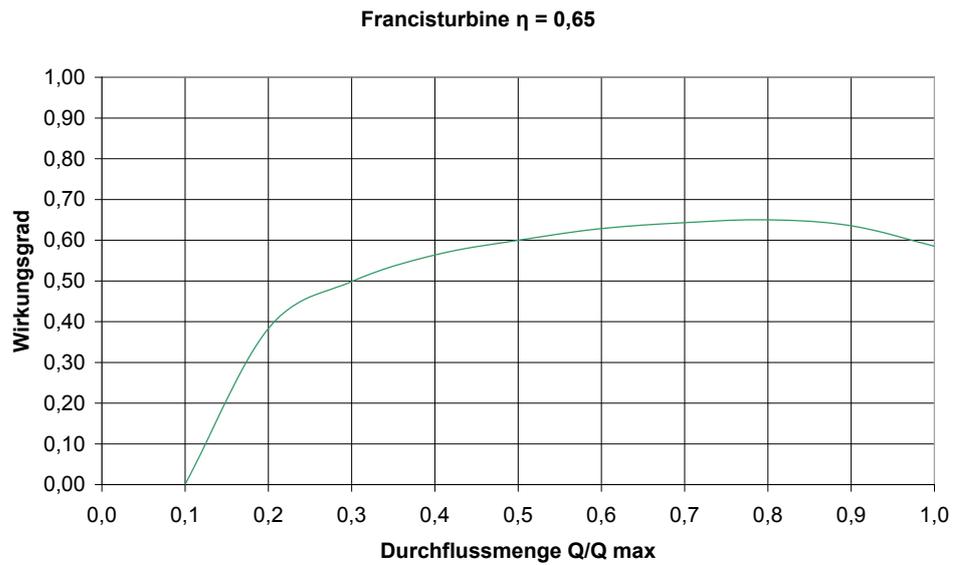


Abbildung 7: Wirkungsgradverlauf Francis $\eta = 0,65$

Flächeninhalt unter der Kurve: $A = 0,49$

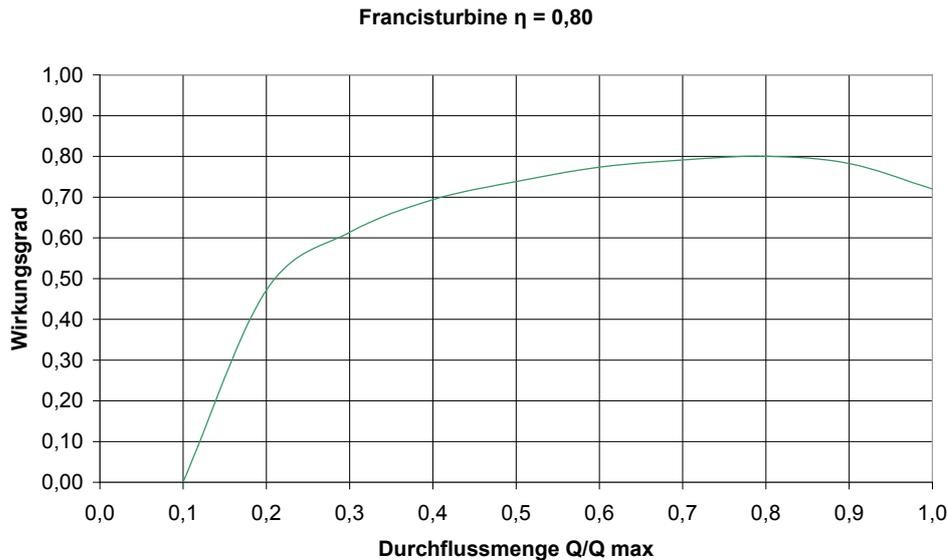


Abbildung 8: Wirkungsgradverlauf Francis $\eta = 0,80$

Flächeninhalt unter der Kurve: $A = 0,60$

Steigerung des Wirkungsgrades: $0,60 / (0,49 / 100) - 100 = 22,4 \%$

3.2 *Statistische Auswertung der Grundparameter*

- In 118 von den 143 erfassten Kleinwasserkraftwerken ist nur eine Turbine verbaut, das sind 82,5 Prozent.
- Turbinenart
Bei den Turbinen, die in den Kraftwerken verbaut sind, überwiegt mit rund 57 Prozent die Francisturbine, gefolgt von der Kaplanturbine mit rund 21 Prozent. Eine Peltonturbine ist in rund 10 Prozent der Anlagen verbaut, eine Ossbergerturbine ist in rund 6 Prozent eingebaut. Die restlichen 5 Prozent entfallen auf Anlagen mit anderen Turbinentypen.

TURBINENART		[%]
Francis	82	57
Kaplan	30	21
Pelton	15	11
Ossberger	9	6
Andere	7	5
Gesamt	143	100

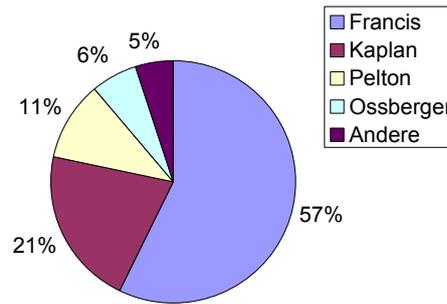


Tabelle 3: Anteile der einzelnen Turbinenarten
Turbinenarten

Abbildung 9: Anteile der einzelnen Turbinenarten

- Anlagenalter

Das Anlagenalter der Kraftwerke zeigt für den Zeitraum des 20. Jahrhunderts eine relativ gleichmäßige Verteilung zwischen 9 und 19 Prozent je 25 Jahre. 3,5 Prozent wurden vor 1900 oder nach 2000 errichtet. Bei rund 44 Prozent der Anlagen war das Alter der Anlage vor der Revitalisierung nicht bekannt.

ALTER DER ANLAGE		[%]
vor 1900	2	2
1901-1925	17	12
1926-1950	26	18
1951-1975	13	9
1976-2000	19	13
nach 2000	3	2
keine Angabe	63	44
	143	100

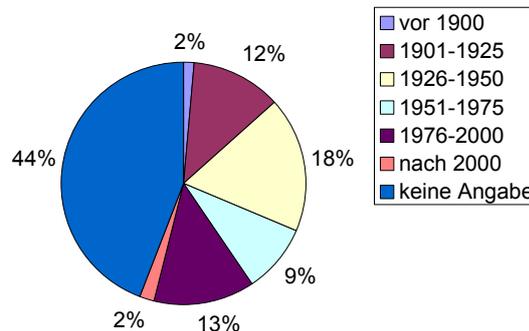


Tabelle 4: Anteile des Turbinenalters

Abbildung 10: Anteile des Turbinenalters

- Anlagendurchfluss

Der Durchfluss der Anlagen zeigt einen großen Streubereich, es lässt sich erkennen, dass 2/3 der Anlagen einen Durchfluss unter 3000 l/s haben. Zwischen 3001 l/s und 8000 l/s sind ca. 20 Prozent zu finden. Rund 10 Prozent der Anlagen weisen einen Ausbaudurchfluss größer 8000 l/s auf. Der Maximalwert liegt bei 130000 l/s. Bei 5 Anlagen ist der Ausbaudurchfluss unbekannt.

DURCHFLUSS DER ANLAGE		[%]
0 – 200 l/s	18	13
201 – 1000 l/s	37	26
1001 – 2000 l/s	24	17
2001 – 3000 l/s	15	10
3001 – 4000 l/s	9	6
4001 – 5000 l/s	7	5
5001 – 6000 l/s	7	5
6001 – 7000 l/s	3	2
7001 – 8000 l/s	5	3
8001 – 10000 l/s	1	1
> 10000 l/s	12	9
keine Angabe	5	3
	143	100

Tabelle 5: Anteile des Durchflusses

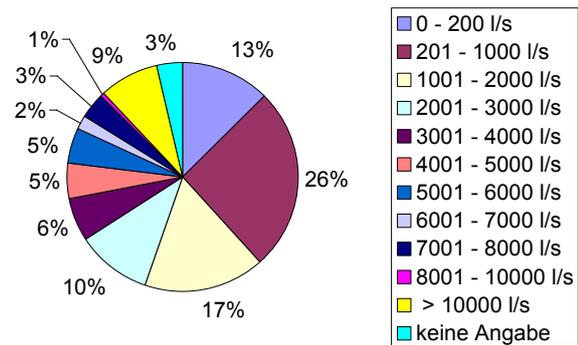


Abbildung 11: Anteile des Durchflusses

- Fallhöhe der Anlage

Rund 83 Prozent aller Anlagen haben eine Fallhöhe von unter 15 Metern (Niederdruckanlagen), rund 12 Prozent haben eine Fallhöhe zwischen 15 und 100 Metern (Mitteldruckanlagen) und rund 3 Prozent haben eine Fallhöhe von über 100 Metern (Hochdruckanlagen).

FALLHÖHE DER ANLAGE		[%]
< 15 m	118	83
15 – 100 m	17	12
> 100 m	5	3
keine Angabe	3	2
	143	100

Tabelle 6: Anteile der Fallhöhen

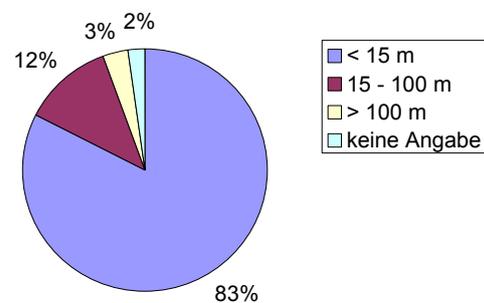


Abbildung 12: Anteile der Fallhöhen

- Nennleistung

Die Leistung von Kleinwasserkraftwerken darf gemäß europäischen Vorgaben 10 Megawatt, also 10000 Kilowatt, nicht überschreiten. Zu den Daten der erhobenen Anlagen ist hier ein österreichweiter Vergleich angeführt [MADER & PELIKAN, 2006] der deutliche Unterschiede zu den analysierten Kraftwerken aufweist.

In die Kategorie 0 bis 200 kW sind von den untersuchten Anlagen rund 80 Prozent einzuordnen, im österreichweiten Vergleich sind dort rund 60 Prozent der Anlagen zu finden. In der Kategorie 201 bis 1000 kW sind rund 11 Prozent der in der vorliegenden Arbeit bewerteten Anlagen enthalten, während im österreichweiten Vergleich rund 28 Prozent der Anlagen in diesem Bereich zu finden sind. In den Kategorien größer 1001 kW sind in von den 143, in dieser Arbeit erfassten Anlagen, rund 5 Prozent zu finden. Im österreichweiten Vergleich hingegen sind dort rund 10 Prozent der Anlagen zu finden. Die Verteilung der erfassten Datensätze ist nicht exakt die gleiche wie die aller in Österreich befindlichen Anlagen. Die Stichprobe ist aufgrund der geringfügigen Abweichungen als repräsentativ zu betrachten.

LEISTUNG DER ANLAGE			Vergleich österreichweit	
		[%]		
0 – 200 kW	115	80	60	
201 – 1000 kW	16	11	28	
1001 – 2000 kW	4	3	6	
2001 – 3000 kW	1	1	3	
3001 – 4000 kW	1	1	1	
> 4000 kW	1	1	2	
keine Angabe	5	3	0	
	143	100	100	

Tabelle 7: Anteile der Leistung – Gegenüberstellung angeführte Anlagen und österreichweiter Vergleich

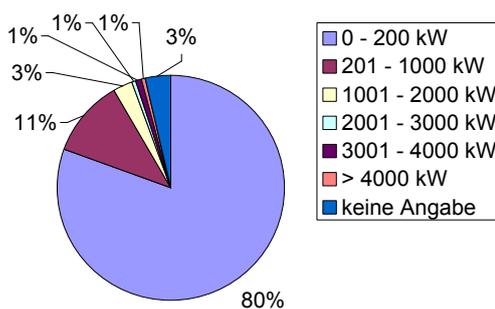


Abbildung 13: Anteile der Leistung – Erfasste Österreichweit Kraftwerke

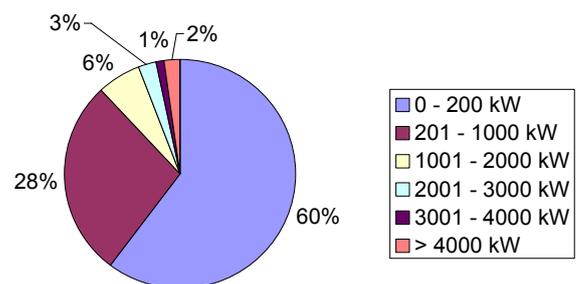


Abbildung 14: Anteile der Leistung –

3.3 Auswertungen der Tabelle

Vor Beginn der Auswertung erfolgt die Entfernung der Datensätze der Anlagen 2, 31, 32, 52 und 100, da aus den erhobenen Daten keine Steigerungen errechnet werden können. Die Anlage 37 wird ebenfalls ausgeschieden, da sie komplett neu errichtet wurde und daher nicht repräsentativ ist. Weiters wird die Anlage 4 nicht berücksichtigt, da sie vom „Inselbetrieb“ (ausschließliche Eigenstromerzeugung) an das öffentliche Stromnetz angeschlossen wurde, daher nun eine neue Betriebsweise fährt und damit die Daten nicht mehr vergleichbar sind.

Im folgenden Kapitel wird die schrittweise Auswertung der Tabelle mit den insgesamt 136 verbliebenen Anlagen erläutert. Die Datenanalyse erfolgt ebenfalls mit dem Programm Microsoft EXCEL ©.

Als erster Schritt bei der Datenauswertung erfolgt die Erstellung von Streudiagrammen. In den Streudiagrammen werden Wertepaare eingetragen, wobei jedes Wertepaar für eine Anlage steht und einen Punkt im Streudiagramm ergibt. Insgesamt werden für diese Auswertung 5 Typen von Streudiagrammen erstellt: Baujahr / Steigerung des Jahresarbeitsvermögens, Baujahr / Steigerung der Leistung, Baujahr / Steigerung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage, Baujahr / Steigerung der Fallhöhe und Baujahr / Steigerung des Durchflusses. Auf der Abszisse (x-Achse) wird dabei das Baujahr aufgetragen und auf der Ordinate (y-Achse) die dazugehörige realisierte Steigerung des Jahresarbeitsvermögens, der Leistung, des Wirkungsgrades, der Fallhöhe und des Durchflusses.

Im zweiten Schritt werden die einzelnen Turbinentypen unterschieden. Es werden aus den im ersten Schritt erstellten Streudiagrammen die Wertepaare der Francis-, Kaplan-, Pelton- und Ossbergerturbinen gesondert betrachtet und dargestellt.

Im dritten Schritt wird dann unterschieden, ob bei der Revitalisierung der Kleinwasserkraftanlage die Turbine verändert oder im Ursprungszustand belassen wurde. Bei den überarbeiteten Turbinen erfolgt weiters die Unterscheidung, ob die Turbine saniert oder komplett erneuert wurde. Dieser dritte Schritt wird nur bei Francis- und Kaplan-turbinen durchgeführt, da bei Pelton- und Ossbergerturbinen die Datenmengen zu gering sind, um sie noch ein weiteres Mal zu unterteilen.

Mit dieser weiteren Unterteilung wird überprüft, wie groß das Steigerungspotential einer Kraftwerksanlage ist wenn die Turbine komplett ausgetauscht wird.

3.4 Statistik

Die statistische Auswertung erfolgt für die zuvor erstellten Streuungsdiagramme. Datenmengen unter 5 Wertepaaren werden jedoch nicht ausgewertet, da nach Ansicht des Verfassers hier kein statistisch sinnvolles Ergebnis zu erwarten ist. In den Streuungsdiagrammen wird eine lineare Regressionsgerade (rot) $y = a \cdot x + b$, eine exponentielle Regressionsgerade (blau) $y = a \cdot e^{b \cdot x}$ und eine polynomische Regressionsgerade (grün) $y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ eingefügt. Zu diesen Regressionsgeraden erfolgt die Angabe des jeweiligen Bestimmtheitsmaßes r^2 . Das Bestimmtheitsmaß r^2 ($0 \leq r^2 \leq 1$) gibt an wie gut, oder schlecht, eine Regressionsgerade die abhängige Variable erklärt. Das Bestimmtheitsmaß $r^2 = 1$ wenn alle Punkte des Streuungsdiagramms auf der Regressionsgeraden liegen und $r^2 = 0$ wenn die Regressionsgerade keine Erklärung des Streuungsdiagramms darstellt [ZIEGLER, 2007]. Anhand des Bestimmtheitsmaßes kann man also erkennen, ob die Regressionsgerade einen Zusammenhang zwischen den gewählten Variablen darstellt oder nicht.

Die Quadratwurzel des Bestimmtheitsmaßes r^2 ergibt den Korrelationskoeffizienten r ($-1 \leq r \leq 1$). Der Korrelationskoeffizient r lässt erkennen wie hoch die Abhängigkeit zwischen den beiden Variablen ist [PAREY, 1982]. Bei der Bestimmung der

Abhängigkeit mittels des Korrelationskoeffizienten r gilt folgendes:

$ r = 0,00$	kein Zusammenhang
0,00 bis 0,50	kein bis schwacher Zusammenhang
0,50	schwacher Zusammenhang
0,50 bis 0,75	schwacher bis deutlicher Zusammenhang
0,75	deutlicher Zusammenhang
0,75 bis 1,00	deutlicher bis gesetzmäßiger Zusammenhang
1,00	gesetzmäßiger Zusammenhang [verändert nach PAREY, 1982]

Das Bestimmtheitsmaß und der Korrelationskoeffizient geben also Auskunft über die Reliabilität der Regressionsgeraden.

Nach Berechnung des Korrelationskoeffizienten wird eine Sensitivitätsanalyse der Daten durchgeführt. Bei der Sensitivitätsanalyse wird die Empfindlichkeit der Ergebnisse gegenüber Änderungen der Grunddaten untersucht [PAREY, 1982].

Es erfolgt die Entfernung einzelner Punkte unter Prüfung der Veränderung der Bewertungsfaktoren. Im speziellen werden mögliche Ausreißer und nicht plausible Punkte entfernt und die Auswirkungen auf das jeweilige Streudiagramm beobachtet.

4 ERGEBNISSE

4.1 Steigerung des Jahresarbeitsvermögens

Bei 128 der 136 Anlagen ist eine Steigerung des Jahresarbeitsvermögens errechenbar. Bei 69 dieser 128 Anlagen gibt es Angaben zum Alter der Anlage vor der Revitalisierung.

Im folgenden Kapitel sind die Diagramme dargestellt die aus der Analyse der 69 Datensätze gewonnen werden können.

Alle Anlagen

Im Streudiagramm in dem alle Anlagen dargestellt sind, zeigen die lineare und die exponentielle Regressionsgerade keine nennenswerten Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und dem Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens.

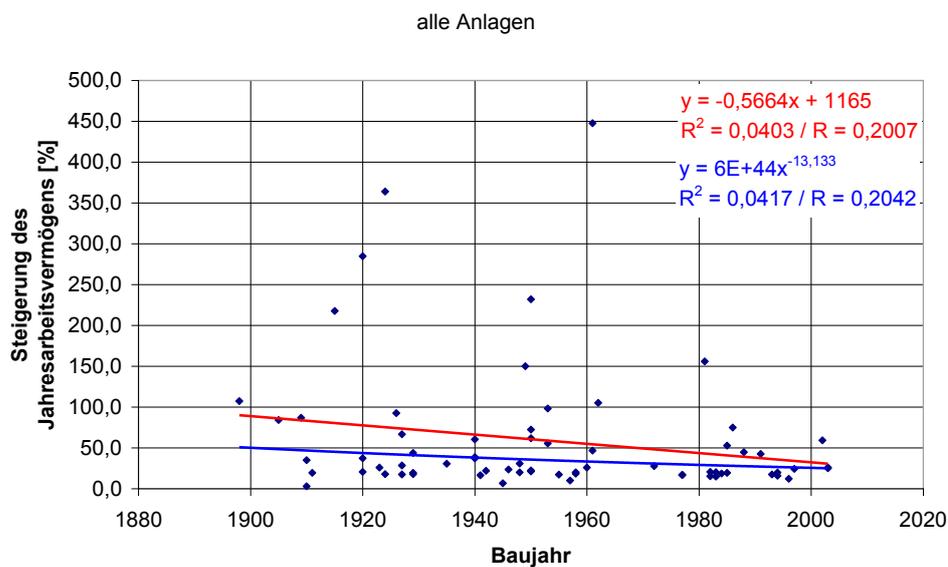


Abbildung 15: Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei allen Anlagen

Bei 25 dieser 69 Anlagen wurden erhebliche Veränderungen durchgeführt. So wurde beispielsweise eine neue Turbine mit bis zu fünfmal höherer Leistung verbaut, der Turbinendurchfluss verdoppelt oder die Anzahl der Volllaststunden auf das dreifache angehoben. Es werden alle Anlagen von der weiteren statistischen Analyse ausgeschlossen die ein Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens von über 50

Prozent aufweisen. Solche Umbaumaßnahmen oder Änderungen der Betriebsführung stellen keine repräsentativen Steigerungen dar.

Im Streudiagramm, in dem alle 44 Kleinwasserkraftwerke dargestellt sind, deren Jahresarbeitsvermögen um weniger als 50 Prozent erhöht werden konnte, zeigen die lineare und die exponentielle Regressionsgerade keine nennenswerten Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung des Jahresarbeitsvermögens.

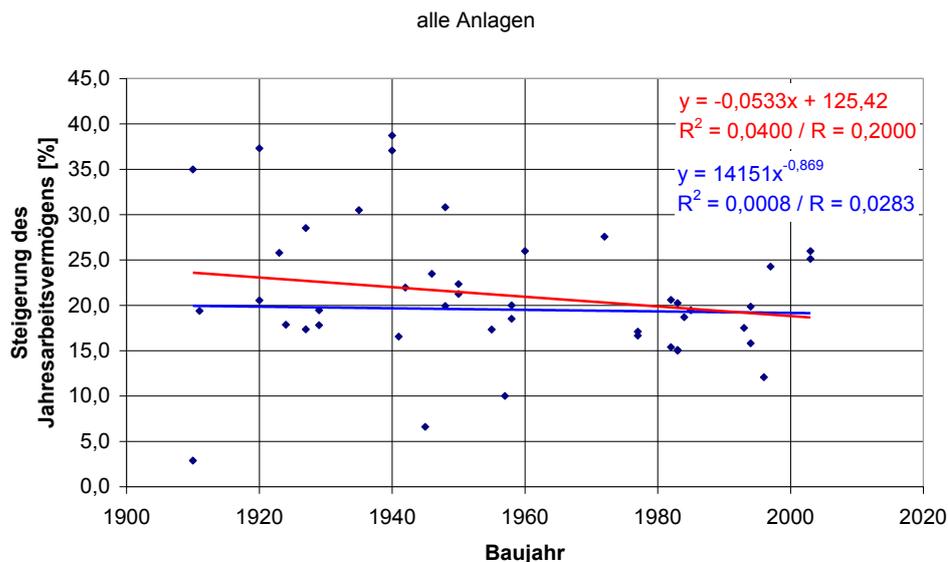


Abbildung 16: Steigerung des Jahresarbeitsvermögens unter 50 Prozent bei allen Anlagen

Dennoch erfolgt für diese Kraftwerke eine genauere statistische Auswertung entsprechend der Art der durchgeführten Verbesserungsmaßnahmen und dem eingebauten Turbinentyp, da hier statistische Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und dem Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens erwartet werden.

Betrachtet man jene 8 Anlagen, bei denen nur der Gesamtwirkungsgrad der Anlage verbessert wurde, bei gleich bleibendem Durchfluss und gleich bleibender Fallhöhe, so zeigen die lineare und die polynomische Regressionsgerade deutliche Zusammenhänge und die exponentielle Regressionsgerade zeigt deutliche bis gesetzmäßige Zusammenhänge zwischen dem Alter der Anlage und dem Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens. Die Kurven zeigen beim Baujahr 1920 eine Steigerung des Jahresarbeitsvermögens zwischen 25 und 30 Prozent und

weisen beim Baujahr 1996 eine Steigerung zwischen 10 und 15 Prozent auf, nur durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage.

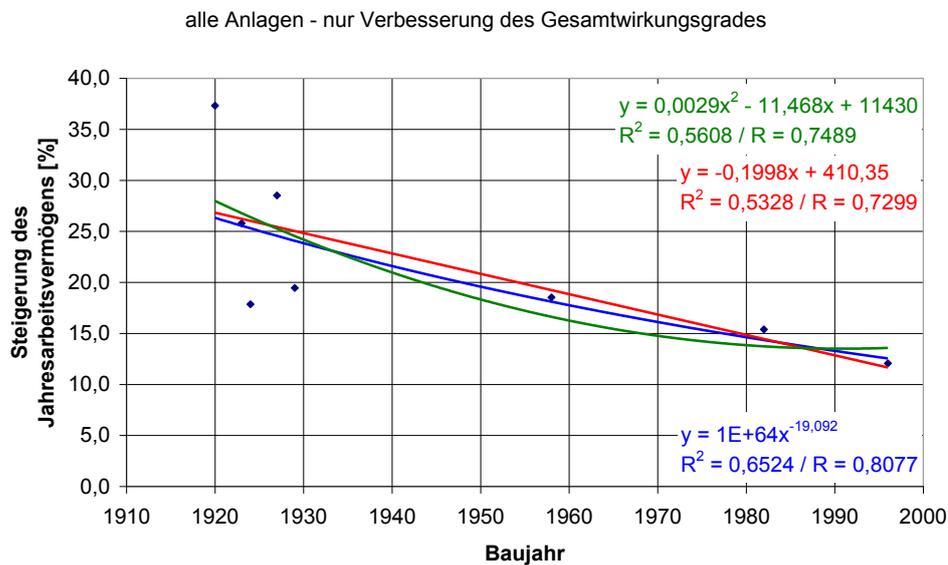


Abbildung 17: Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei allen Anlagen durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades

Im Streudiagrammen, in dem die 12 Anlagen, dargestellt sind, bei denen nur der Durchfluss erhöht wurde, bei gleich bleibendem Gesamtwirkungsgrad und gleich bleibender Fallhöhe, so zeigt die lineare Regressionsgerade keinen Zusammenhang zwischen dem Alter und dem Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens.

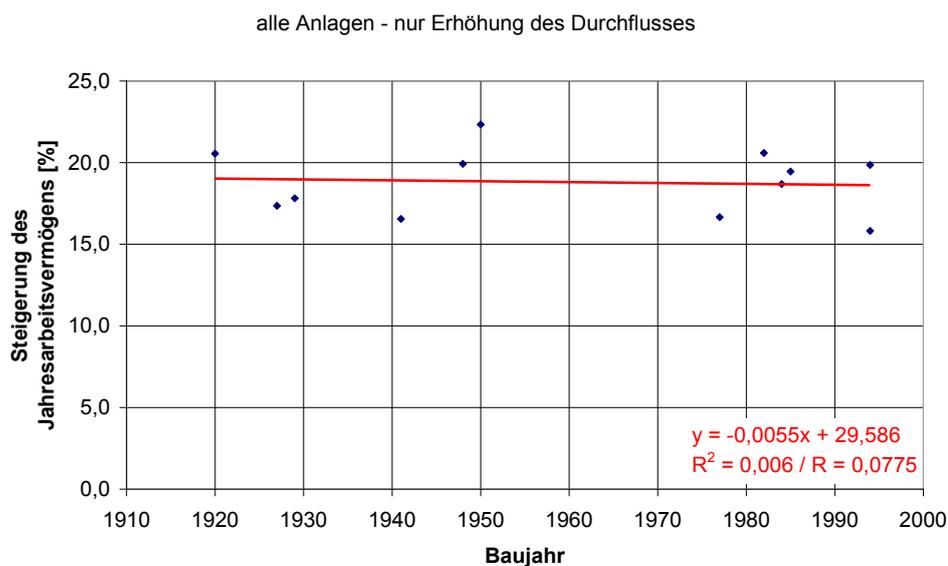


Abbildung 18: Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei allen Anlagen durch Erhöhung des Durchflusses

Betrachtet man jene 7 Anlagen, bei denen der Gesamtwirkungsgrad der Anlage verbessert und der Durchfluss erhöht wurde, bei gleich bleibender Fallhöhe, so zeigt die lineare Regressionsgerade keinen Zusammenhang zwischen dem Alter und dem Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens.

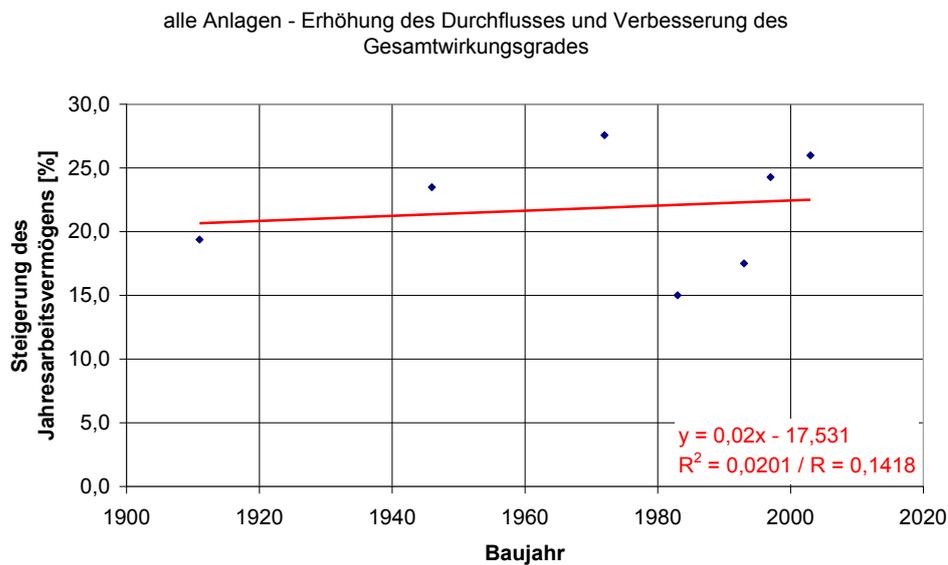


Abbildung 19: Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei allen Anlagen durch Erhöhung des Durchflusses und Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades

Die anderen möglichen Kombinationen der Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades, der Erhöhung des Durchflusses und der Erhöhung der Fallhöhe treffen nur bei weniger als 5 Anlagen zu. Diese Anzahl von Datensätzen ist nicht ausreichend für statistische Auswertungen und es wird daher nicht näher auf diese Kombinationen von Revitalisierungsmaßnahmen eingegangen.

Anlagen mit Francisturbinen

Im Streudiagramm, in dem nur die 28 Anlagen, in denen eine Francisturbine verbaut ist, dargestellt werden, lässt sich kein Zusammenhang zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung des Jahresarbeitsvermögens erkennen.

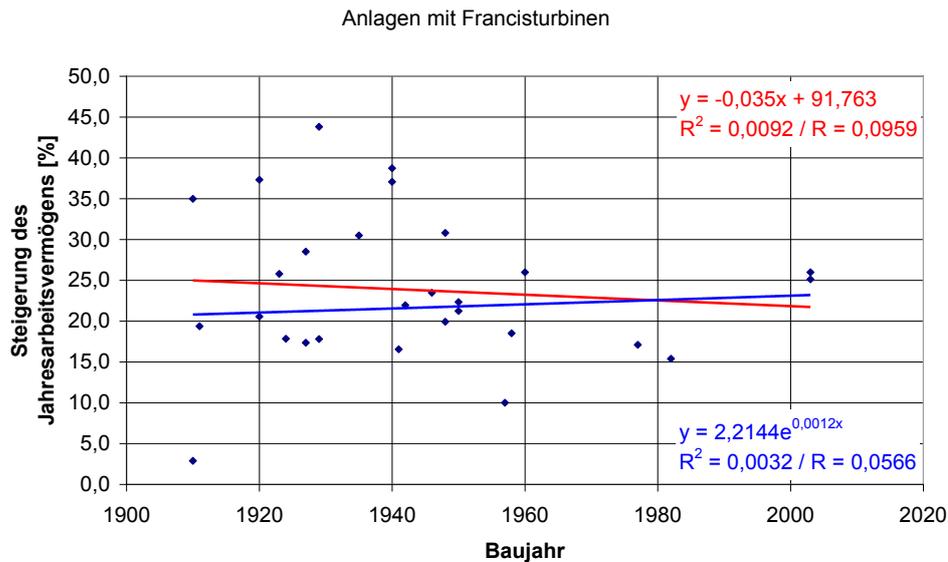


Abbildung 20: Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Francisturbinen

Betrachtet man jene 6 Anlagen, die mit einer Francisturbine ausgerüstet sind, bei denen nur der Gesamtwirkungsgrad der Anlage verbessert wurde, bei gleich bleibendem Durchfluss und gleich bleibender Fallhöhe, so zeigen die lineare und die polynomische Regressionsgerade deutliche Zusammenhänge zwischen dem Alter und dem Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens. Die Kurven zeigen beim Baujahr 1920 eine Steigerung des Jahresarbeitsvermögens zwischen 25 und 30 Prozent und weisen beim Baujahr 1982 und einer Steigerung von rund 15 Prozent auf, nur durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage.

Anlagen mit Francisturbinen - nur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades

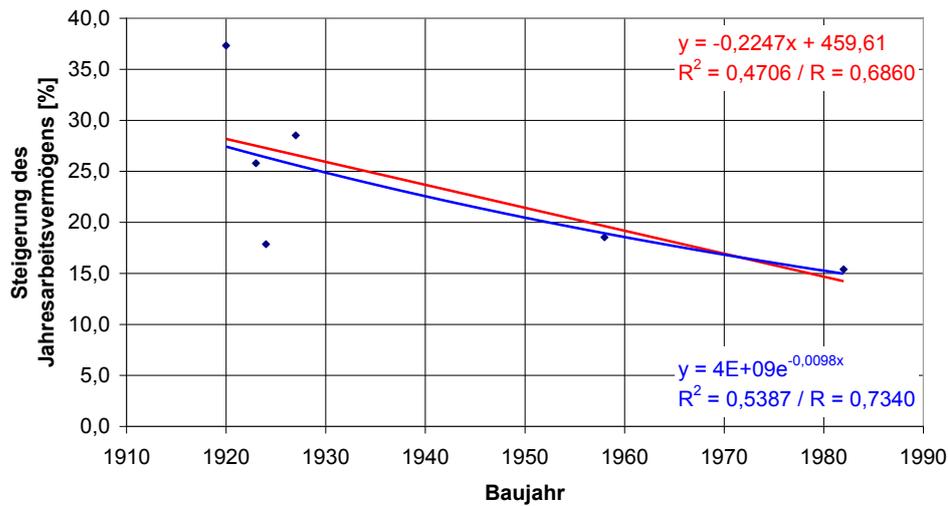


Abbildung 21: Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Francisturbinen durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades

Im Streudiagrammen, in dem die 6 Anlagen, dargestellt sind, bei denen nur der Durchfluss erhöht wurde, bei gleich bleibendem Gesamtwirkungsgrad und gleich bleibender Fallhöhe, so zeigt die polynomische Regressionsgerade fast einen gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen dem Alter und dem Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens. Die Kurve fällt ausgehend vom Baujahr 1920, wo sie ein Steigerungspotential von ca. 21 Prozent aufweist, zunächst ab, erreicht beim Baujahr 1935 ihr Minimum mit ca. 17 Prozent und steigt danach bis zum Baujahr 1950 an, wo sie bei einer Steigerung von ca. 22 Prozent endet.

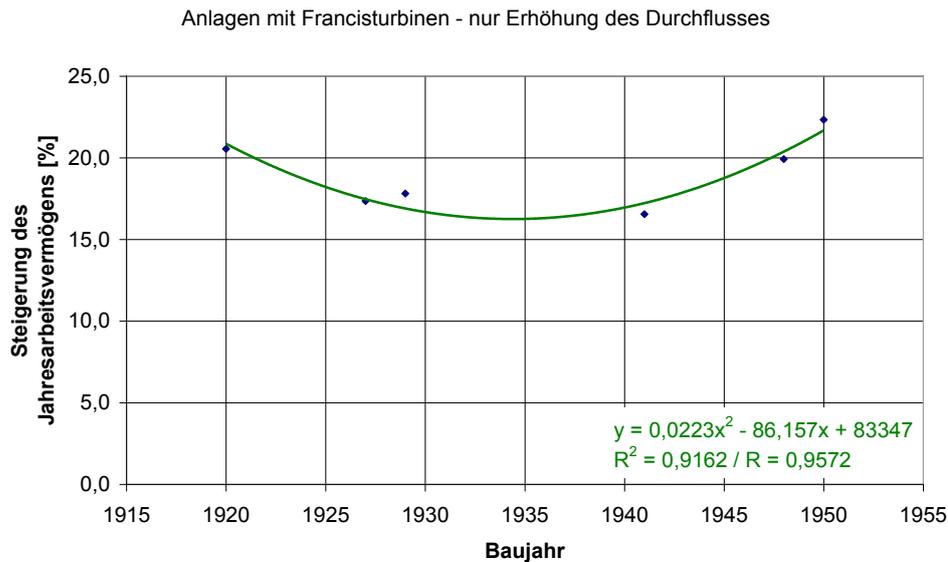


Abbildung 22: Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Francisturbinen durch Erhöhung des Durchflusses

Im Streudiagrammen, in dem die 6 Anlagen, dargestellt sind, bei denen der Gesamtwirkungsgrad verbessert, der Durchfluss und die Fallhöhe erhöht wurden, zeigt die polynomische Regressionsgerade einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Alter und dem Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens. Die Kurve zeigt beim Baujahr 1910 eine Steigerung des Jahresarbeitsvermögens von rund 35 Prozent und weist beim Baujahr 2002 und einer Steigerung von rund 25 Prozent auf, durch Verbesserung mehrerer wesentlicher Faktoren der Anlage. Allerdings ist hier die Datenmenge für statistische Auswertungen hier sehr gering bzw. an der Grenze der Zulässigkeit.

Anlagen mit Francisturbinen - Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades und Erhöhung des Durchflusses und der Fallhöhe

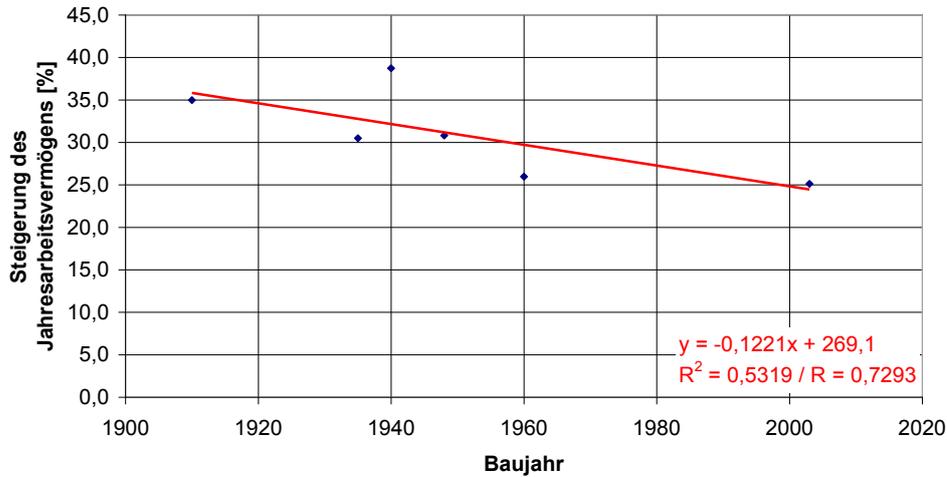


Abbildung 23: Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Francisturbinen durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades, Erhöhung des Durchflusses und der Fallhöhe

Anlagen mit Kaplan turbinen

Bei den 13 Kleinwasserkraftwerken, die mit einer Kaplan turbine ausgerüstet sind, zeigen die Regressionsgeraden keine nennenswerten Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung des Jahresarbeitsvermögens.

Anlagen mit Kaplan turbinen

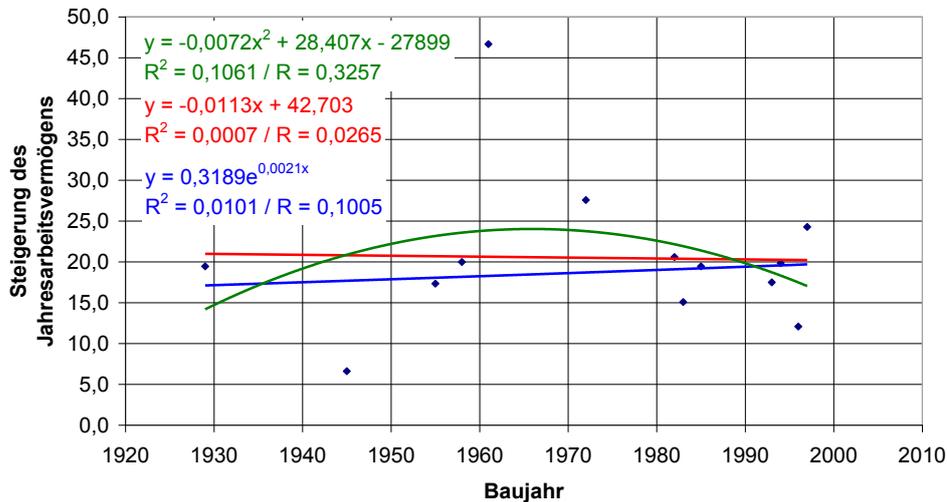


Abbildung 24: Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Kaplan turbinen

Bei den Anlagen in denen eine Kaplan turbine verbaut ist gibt es zu allen Kombinationsmöglichkeiten der Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades, der Erhöhung des Durchflusses und der Erhöhung der Fallhöhe weniger als 5 Anlagen.

Diese Anzahl von Datensätzen ist nicht ausreichend für statistische Auswertungen und es wird daher nicht näher auf diese Kombinationen von Revitalisierungsmaßnahmen eingegangen.

Weiters wird überprüft ob ein signifikanter Unterschied ermittelbar ist zwischen den Anlagen bei denen der Gesamtwirkungsgrad verbessert wurde und den Anlagen bei denen die elektromaschinelle Ausrüstung nicht revitalisiert wurde.

Bei 6 der 13 Kleinwasserkraftwerke, in denen eine Kaplan turbine verbaut ist, wurde bei der Revitalisierung die Turbine saniert und andere Teile der elektromaschinellen Ausrüstung mit erneuert und bei 7 Anlagen wurde die Turbine, der Generator und das Getriebe im Ursprungszustand belassen. Im Streuungsdiagramm in dem die 6 Datensätze der Kraftwerke mit sanierter elektromaschineller Ausrüstung dargestellt sind, zeigen die Regressionsgeraden keine Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und dem Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens.

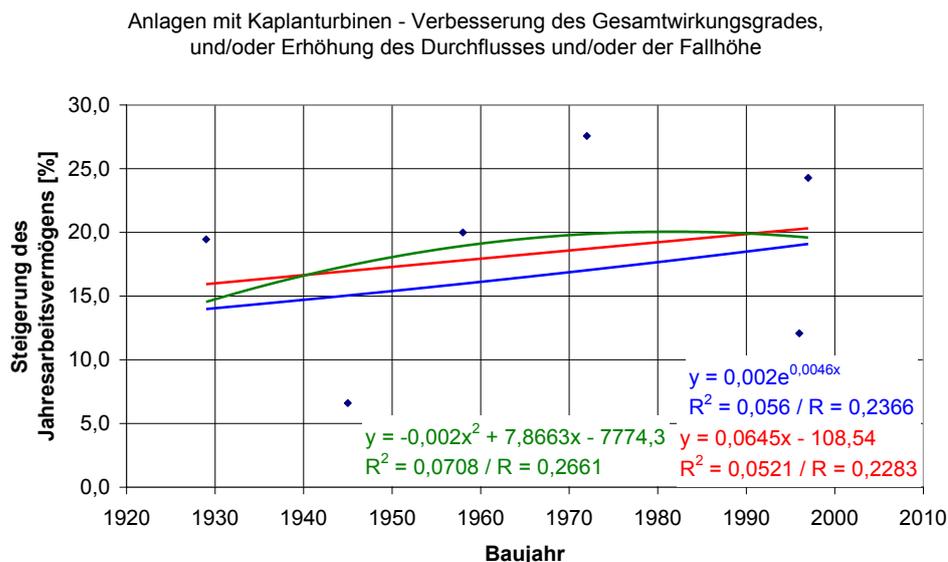


Abbildung 25: Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Kaplan turbinen durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades, und/oder Erhöhung des Durchflusses und/oder der Fallhöhe

Im Streuungsdiagramm in dem die 7 Anlagen dargestellt sind, deren elektromaschinelle Ausrüstung unverändert geblieben ist, zeigen die Regressionsgeraden schwache Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und dem Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens. Die drei Kurven zeigen beim Baujahr 1955 eine Steigerung des Jahresarbeitsvermögens zwischen 27 und 31

Prozent und weisen beim Baujahr 1994 und einer Steigerung zwischen 15 und 18 Prozent auf.

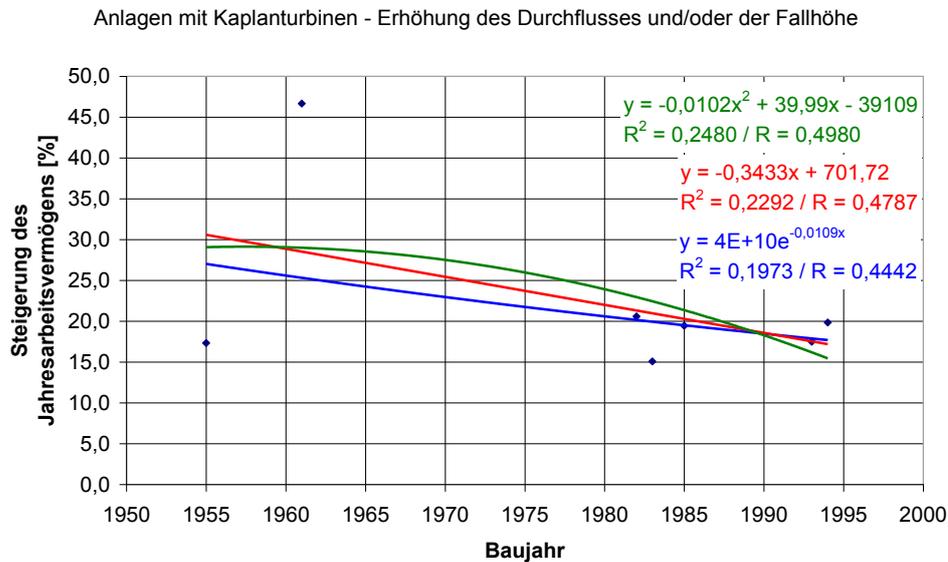


Abbildung 26: Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Kaplan-turbinen durch Erhöhung des Durchflusses und/oder der Fallhöhe

Weiters wird die Anlage 41 (Baujahr 1961, Steigerung des Jahresarbeitsvermögens um 46,7%) entfernt da hier nur die Betriebsführung verändert wurde, durch eine Erhöhung der Volllaststundenzahl. Ohne dieses Wertepaar lässt die lineare Regressionsgerade keinen Zusammenhang zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung des Jahresarbeitsvermögens erkennen.

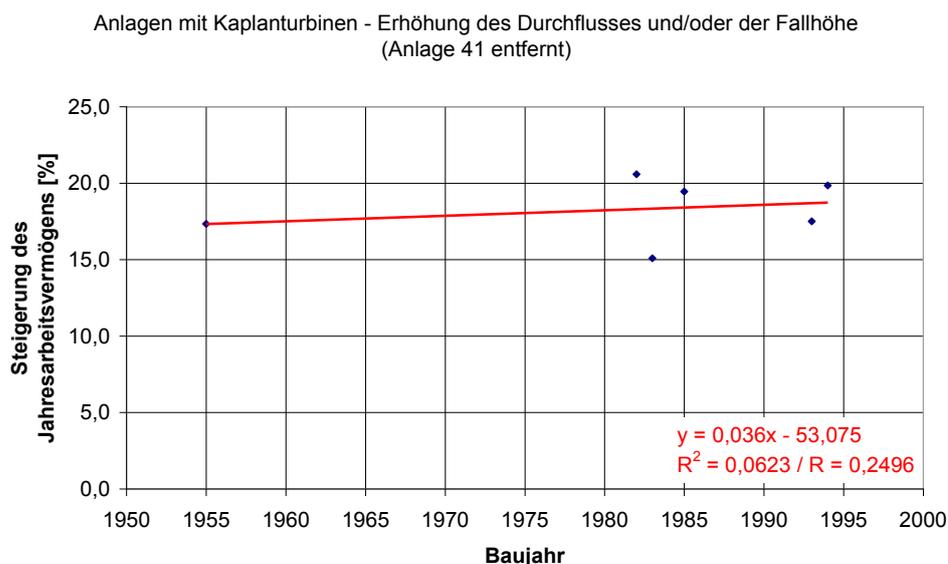


Abbildung 27: Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Kaplan-turbinen durch Erhöhung des Durchflusses und/oder der Fallhöhe (Anlage 41 entfernt)

Anlagen mit Peltonturbinen

Bei jenen 6 Kraftwerken in denen eine Peltonturbine verbaut ist, liegt bei 4 Anlagen die Steigerung des Jahresarbeitsvermögens über 50 Prozent. Die zwei Datensätze, deren Steigerung unter 50 Prozent liegt, sind nicht ausreichend für statistische Betrachtungen. Im Folgenden wird daher nicht näher auf die Anlagen, die mit einer Peltonturbinen ausgerüstet ist, eingegangen.

Anlagen mit Ossbergerturbinen

Bei jenen 7 Anlagen in denen eine Ossbergerturbine verbaut ist, weisen drei Datensätze eine Steigerung des Jahresarbeitsvermögens über 50 Prozent auf. Die 4 Anlagen, deren Steigerung unter 50 Prozent liegt, sind nicht ausreichend für statistische Betrachtungen. Im Folgenden wird daher nicht näher auf die Kraftwerke, die mit einer Ossbergerturbine ausgerüstet ist, eingegangen.

4.2 Steigerung der Leistung

Bei 80 der 136 Anlagen ist eine Steigerung der Leistung errechenbar. Bei 48 dieser 80 Anlagen gibt es Angaben zum Alter der Anlage vor der Revitalisierung. Im Folgenden sind die Ergebnisse angeführt die aus der Betrachtung dieser 48 Datensätze gewonnen werden können.

Alle Anlagen

Im Streudiagramm in dem alle 48 Anlagen dargestellt sind, zeigen die Regressionsgeraden keine nennenswerten Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung der Leistung der Anlage.

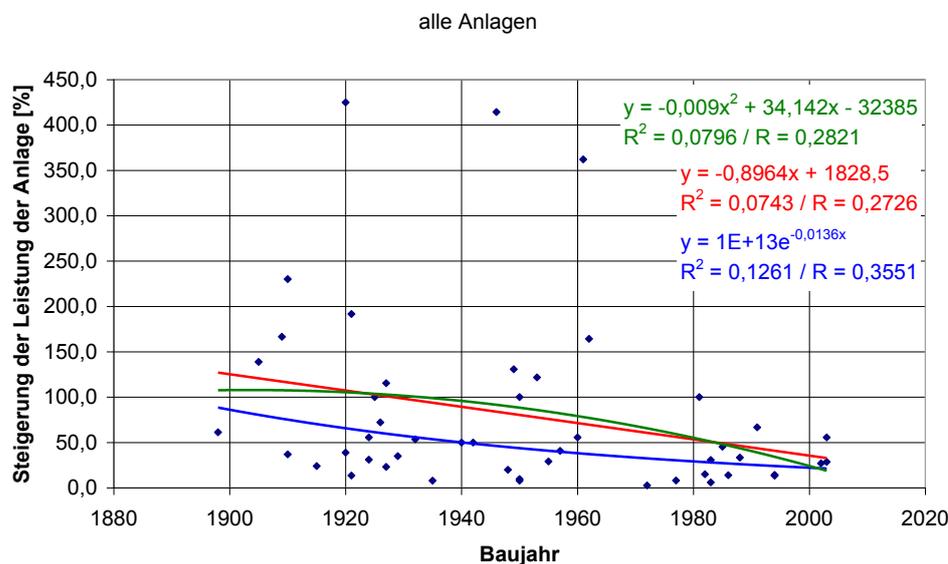


Abbildung 28: Steigerung der Leistung bei allen Anlagen

Bei 23 dieser 48 Anlagen wurden Leistungssteigerungen bis 420 Prozent durch erhebliche Veränderungen und Erneuerungen der elektromaschinellen Ausrüstung erzielt. Solche Umbaumaßnahmen stellen eine nicht repräsentative Steigerung der Leistung dar.

Im Streudiagramm, in dem jene 25 Anlagen dargestellt sind, deren Leistung um weniger als 50 Prozent gesteigert wurde, zeigen die Regressionsgeraden keine nennenswerten Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und dem Steigerungspotential der Leistung der Anlage.

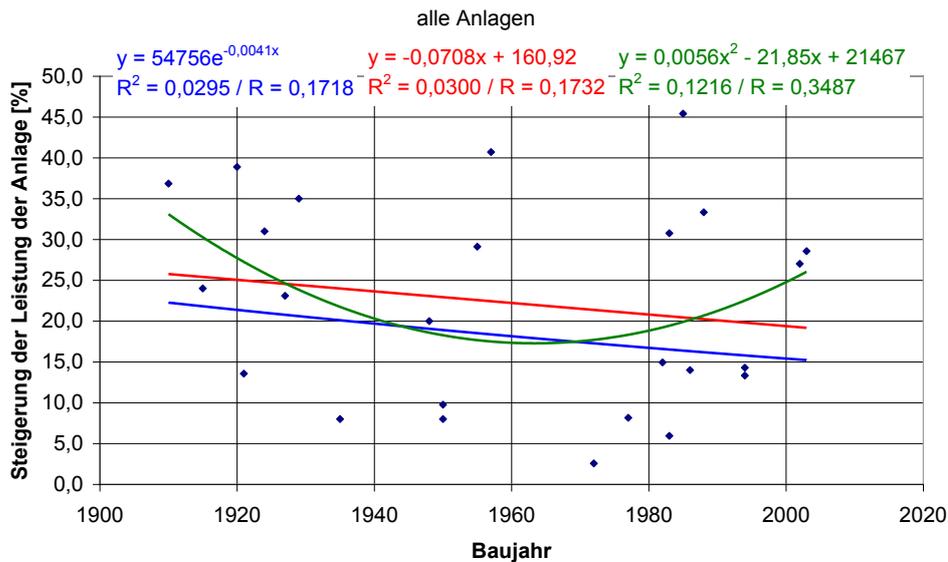


Abbildung 29: Steigerung der Leistung unter 50 Prozent bei allen Anlagen

Im Folgenden werden nur die Anlagen, die eine Steigerung der Leistung der Anlage von unter 50 Prozent aufweisen, betrachtet.

Weiters erfolgt für diese Kraftwerke eine genauere statistische Auswertung entsprechend der Art der durchgeführten Verbesserungsmaßnahmen und dem eingebauten Turbinentyp, da hier statistische Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und dem Steigerungspotential der Leistung der Anlage erwartet werden.

Betrachtet man jene 5 Anlagen, bei denen nur der Durchfluss der Anlage erhöht wurde, bei gleich bleibendem Gesamtwirkungsgrad und gleich bleibender Fallhöhe, so zeigt die lineare Regressionsgerade einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Alter der Anlage und dem Steigerungspotential der Leistung der Anlage. Die Kurve zeigt beim Baujahr 1950 eine Steigerung der Leistung der Anlage von rund 8 Prozent und weist beim Baujahr 1994 eine Steigerung von rund 14 Prozent auf, nur durch Erhöhung des Durchflusses der Anlage.

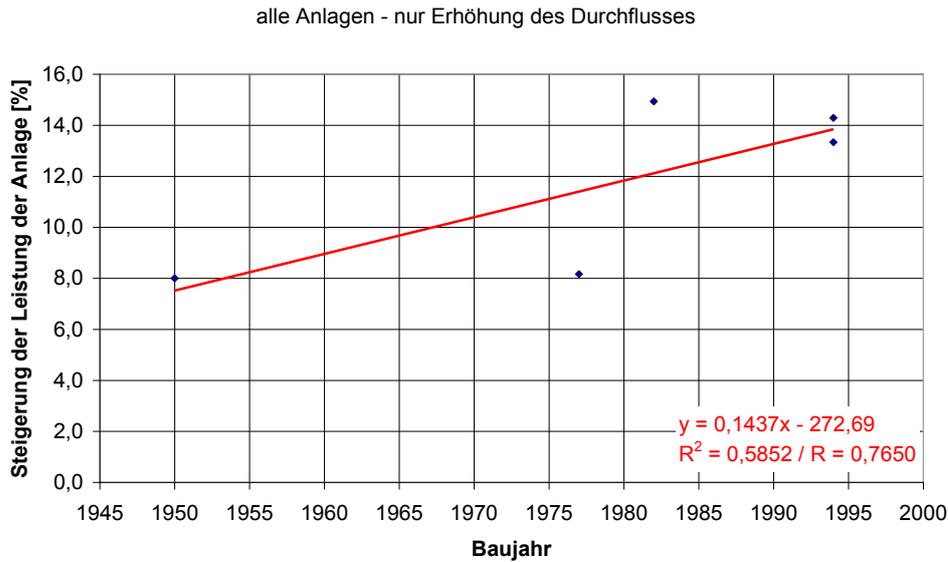


Abbildung 30: Steigerung der Leistung der Anlage bei allen Anlagen durch Erhöhung des Durchflusses

Betrachtet man jene 5 Anlagen, bei denen der Gesamtwirkungsgrad der Anlage verbessert und der Durchfluss erhöht wurde, bei gleich bleibender Fallhöhe, so zeigt die lineare und die exponentielle Regressionsgerade keinen Zusammenhang zwischen dem Alter und dem Steigerungspotential der Leistung der Anlage.

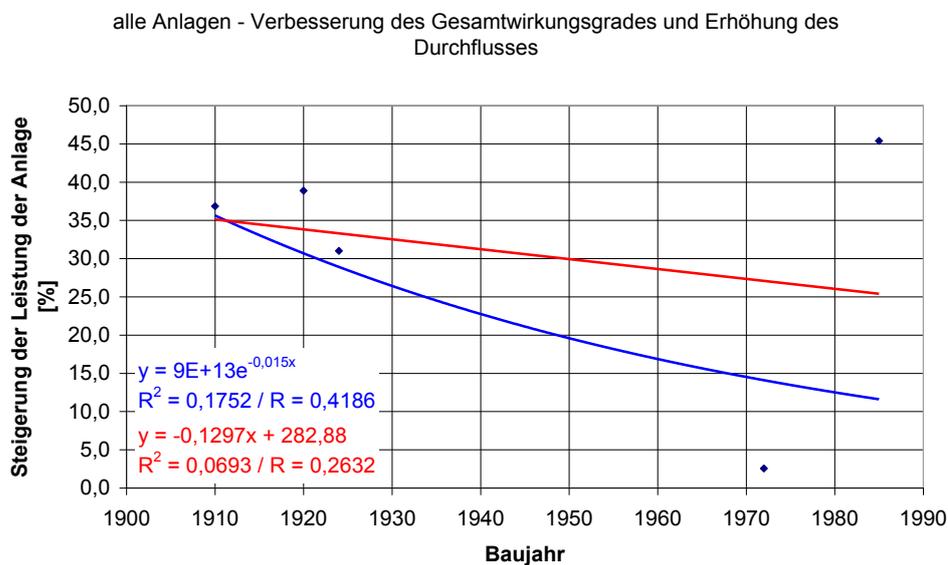


Abbildung 31: Steigerung der Leistung der Anlage bei allen Anlagen durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades und Erhöhung des Durchflusses

Die anderen möglichen Kombinationen der Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades, der Erhöhung des Durchflusses und der Erhöhung der Fallhöhe treffen nur bei

weniger als 5 Anlagen zu. Diese Anzahl von Datensätzen ist nicht ausreichend für statistische Auswertungen und es wird daher nicht näher auf diese Kombinationen von Revitalisierungsmaßnahmen eingegangen.

Anlagen mit Francisturbinen

Bei jenen 14 Anlagen in denen eine Francisturbine verbaut ist, zeigen alle drei Regressionsgeraden keinen Zusammenhang zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung der Leistung der Anlage.

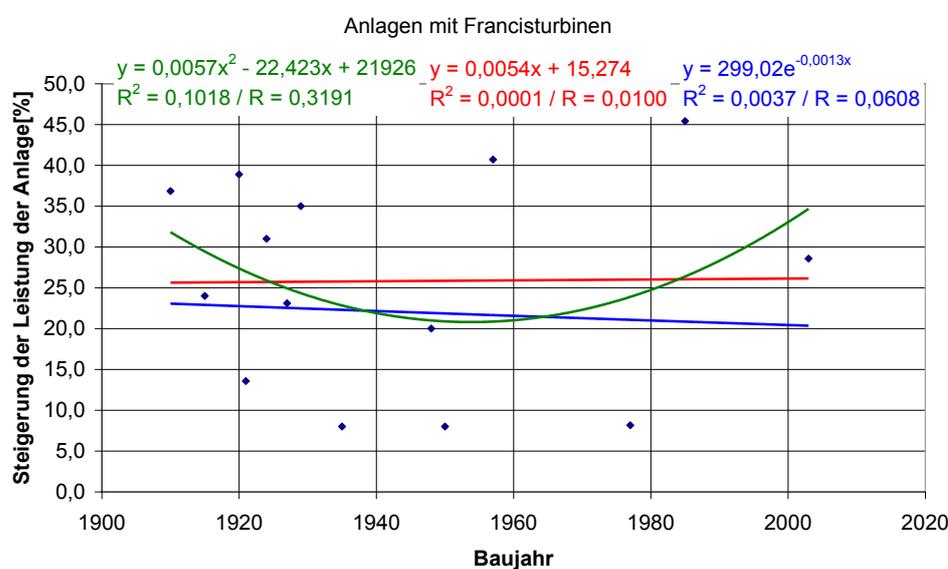


Abbildung 32: Steigerung der Leistung bei Anlagen mit Francisturbinen

Bei den Anlagen in denen eine Francisturbine verbaut ist gibt es zu allen Kombinationsmöglichkeiten der Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades, der Erhöhung des Durchflusses und der Erhöhung der Fallhöhe weniger als 5 Anlagen. Diese Anzahl von Datensätzen ist nicht ausreichend für statistische Auswertungen und es wird daher nicht näher auf diese Kombinationen von Revitalisierungsmaßnahmen eingegangen.

Weiters wird überprüft ob ein signifikanter Unterschied ermittelbar ist zwischen den Anlagen bei denen der Gesamtwirkungsgrad verbessert wurde und den Anlagen bei denen die elektromaschinelle Ausrüstung nicht revitalisiert wurde.

Bei 8 der 14 Kleinwasserkraftwerke, in denen eine Francisturbine verbaut ist, wurde bei der Revitalisierung die Turbine saniert oder ausgetauscht und andere Teile der elektromaschinellen Ausrüstung mit erneuert und bei 6 Anlagen wurde die Turbine, der Generator und das Getriebe im Ursprungszustand belassen. Im Streuungsdiagramm in dem die 8 Datensätze der Kraftwerke mit sanierten oder erneuerten Francisturbinen dargestellt sind, zeigen die lineare und die polynomische Regressionsgerade keine Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung der Leistung.

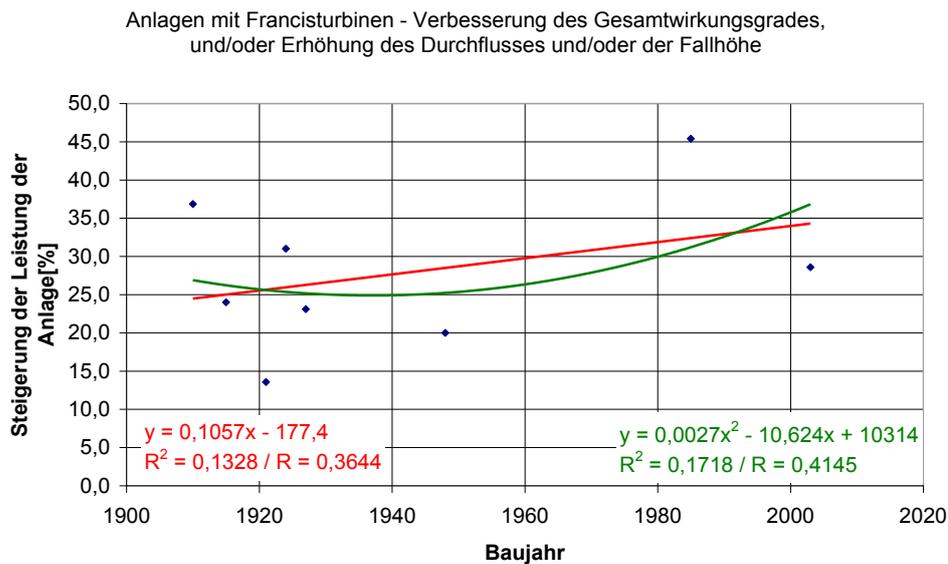


Abbildung 33: Steigerung der Leistung der Anlage bei Anlagen mit Francisturbinen durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades, und/oder Erhöhung des Durchflusses und/oder der Fallhöhe

Im Streuungsdiagramm in dem die 7 Anlagen dargestellt sind, deren elektromaschinelle Ausrüstung unverändert geblieben ist, zeigen die Regressionsgeraden schwache Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und dem Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens. Die drei Kurven zeigen beim Baujahr 1955 eine Steigerung des Jahresarbeitsvermögens zwischen 27 und 31 Prozent und weisen beim Baujahr 1994 auf einer Steigerung zwischen 15 und 18 Prozent auf.

Anlagen mit Francisturbinen - Erhöhung des Durchflusses und/oder der Fallhöhe

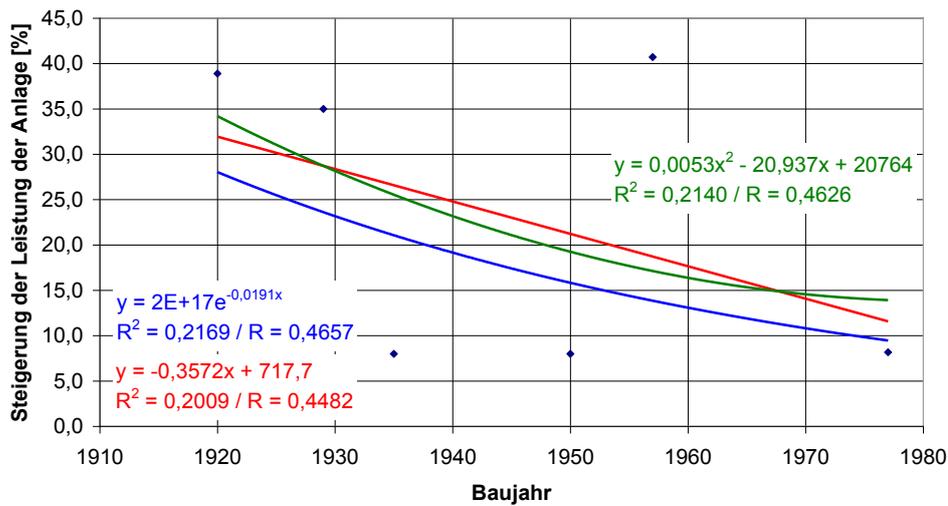


Abbildung 34: Steigerung der Leistung der Anlage bei Anlagen mit Francisturbinen durch Erhöhung des Durchflusses und/oder der Fallhöhe

Anlagen mit Kaplan turbinen

Im Streudiagramm in dem die 7 Anlagen dargestellt sind, in denen eine Kaplan turbine verbaut ist, zeigen die lineare und die exponentielle Regressionsgerade keine Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und dem Leistungssteigerungspotential. Die polynomische Regressionsgerade zeigt schwache bis deutliche Zusammenhänge.

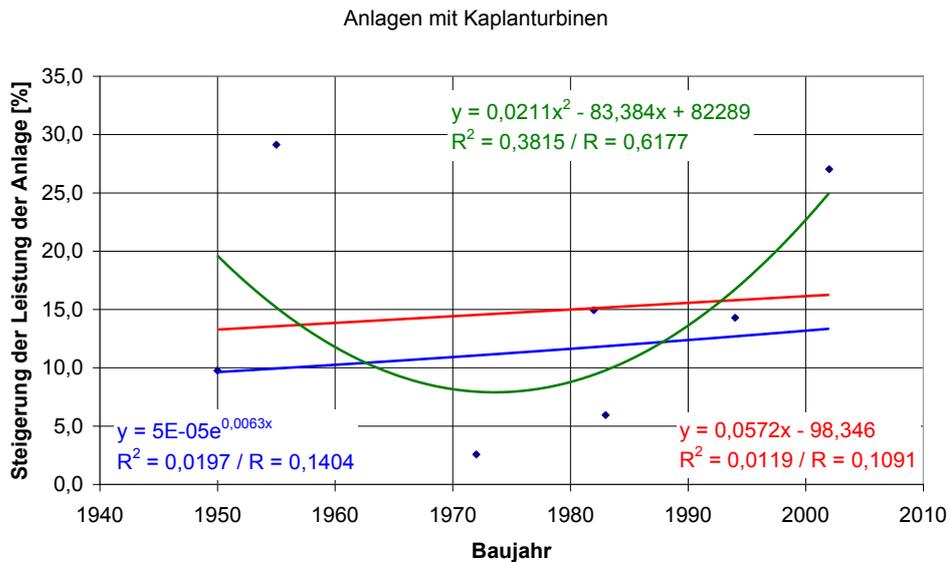


Abbildung 35: Steigerung der Leistung bei Anlagen mit Kaplan turbinen

Bei der Anlage 101 (Baujahr 2002, Steigerung der Leistung um 27,0%) und einem zweiten der 7 Kleinwasserkraftwerke, in denen eine Kaplan turbine verbaut ist, wurde bei der Revitalisierung die Turbine saniert und bei 5 Anlagen wurde die elektromaschinelle Ausrüstung im Ursprungszustand belassen. Die 2 Datensätze, bei denen die Kaplan turbine saniert wurde und deren Steigerung unter 50 Prozent liegt, sind nicht ausreichend für statistische Betrachtungen. Im Folgenden wird daher nicht näher auf die Anlagen, bei denen die Kaplan turbine saniert wurde, eingegangen.

Bei den 5 Kraftwerken, bei denen die elektromaschinelle Ausrüstung nicht revitalisiert wurde, zeigt die lineare Regressionsgeraden keine bis schwache Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung der Leistung der Anlage.

Anlagen mit Kaplan-turbinen - Erhöhung des Durchflusses und/oder der Fallhöhe

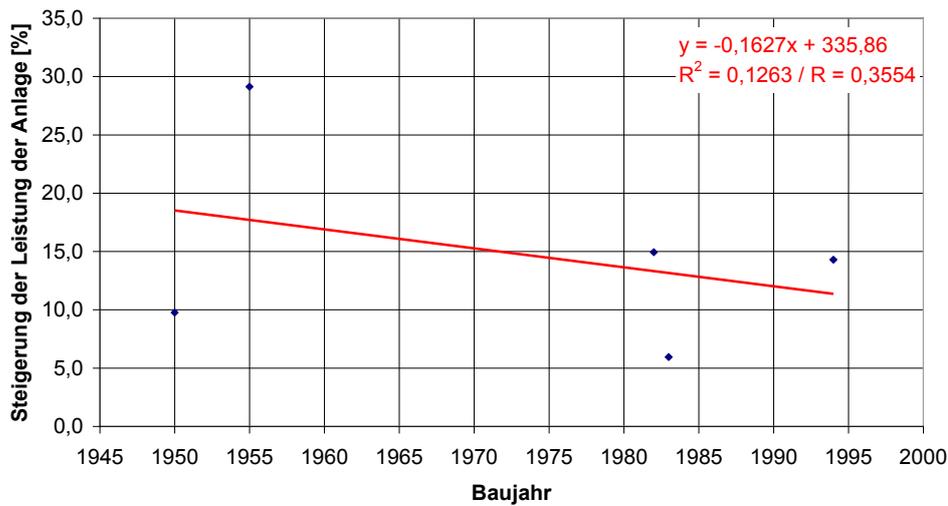


Abbildung 36: Steigerung der Leistung der Anlage bei Anlagen mit Kaplan-turbinen durch Erhöhung des Durchflusses und/oder der Fallhöhe

Anlagen mit Peltonturbinen

Bei allen 5 Anlagen in denen eine Peltonturbine verbaut ist liegt die Steigerung der Leistung über 50%. Solche Umbaumaßnahmen stellen eine nicht repräsentative Steigerung der Leistung dar und es wird daher nicht näher auf jene Anlagen eingegangen in denen eine Peltonturbine installiert ist.

Anlagen mit Ossbergerturbinen

Bei jenen 5 Anlagen in denen eine Ossbergerturbine verbaut ist, liegt bei zwei Kraftwerken die Steigerung der Leistung über 50 Prozent. Die 3 Datensätze, deren Steigerung unter 50 Prozent liegt, sind nicht ausreichend für statistische Betrachtungen. Im Folgenden wird daher nicht näher auf die Anlagen, die mit einer Ossbergerturbine ausgerüstet ist, eingegangen.

4.3 Steigerung des Gesamtwirkungsgrades

Bei 23 der 136 Anlagen ist eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage errechenbar. Bei 12 dieser 23 Anlagen gibt es Angaben zum Alter der Anlage vor der Revitalisierung. In allen 12 Kraftwerken wurde entweder die Turbine im Zuge der Revitalisierungsmaßnahmen saniert oder ausgetauscht.

Alle Anlagen

Im Streudiagramm in dem alle 12 Anlagen dargestellt sind zeigen alle drei Regressionsgeraden schwache bis deutliche Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage. Die Kurven zeigen dass je älter eine Anlage ist umso höher ist die mögliche Steigerung des Wirkungsgrades.

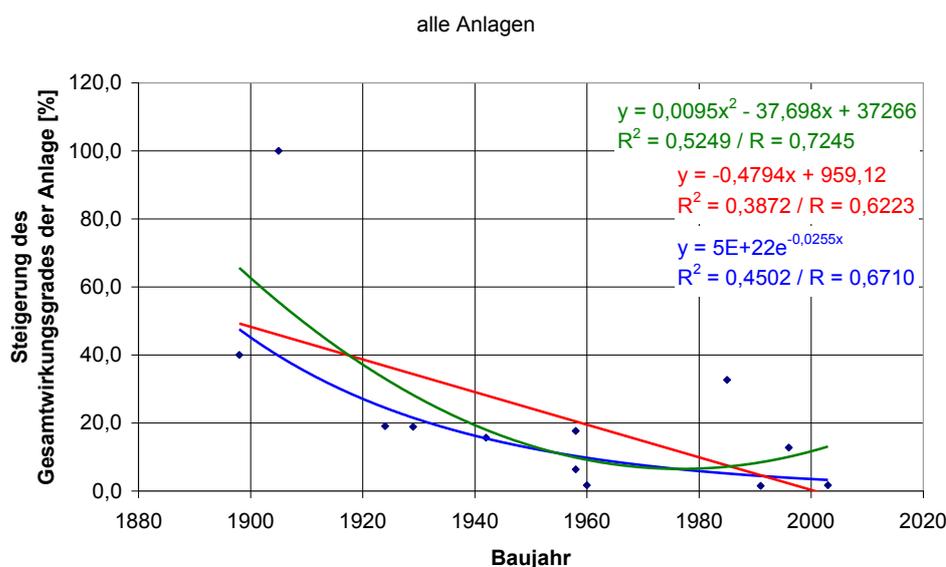


Abbildung 37: Steigerung des Gesamtwirkungsgrades bei allen Anlagen

Allerdings werden die Regressionsgeraden von der Anlage 44 (Baujahr 1905, Steigerung des Wirkungsgrades um 100 Prozent), die komplett neu errichtet wurde, beeinflusst. Ohne dieses Wertepaar zeigen alle drei Regressionsgeraden einen geringeren Zusammenhang zwischen dem Baujahr der Anlage und dem Steigerungspotential des Wirkungsgrades.

Die drei Kurven weisen beim Baujahr 1898 eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage zwischen 28 und 37 Prozent auf und zeigen beim Baujahr 2003 eine Steigerung zwischen 4 und 11 Prozent.

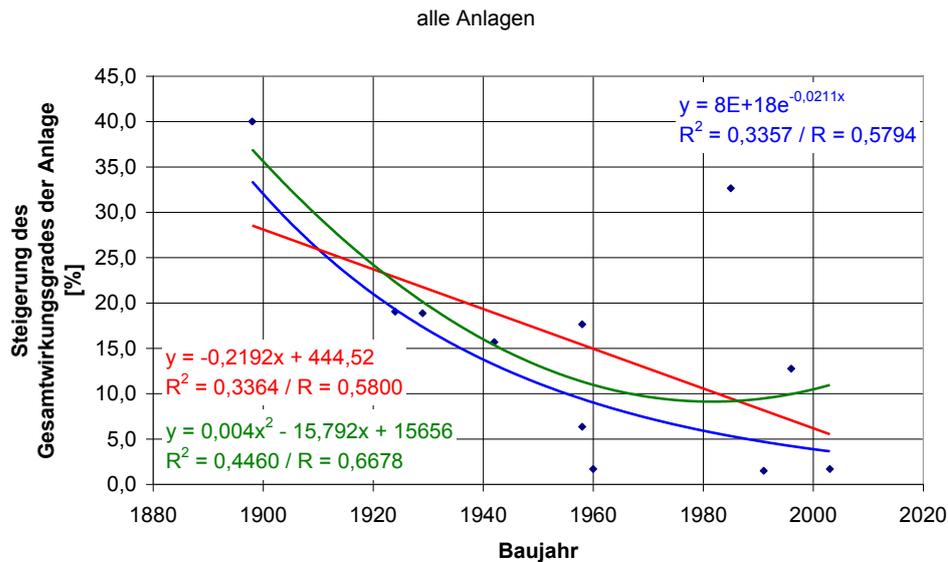


Abbildung 38: Steigerung des Gesamtwirkungsgrades bei allen Anlagen (Anlage 44 entfernt)

Bei 9 der 12 Kleinwasserkraftwerke wurde bei der Revitalisierung die Turbine saniert, bei den anderen drei Anlagen wurde die Turbine ausgetauscht. Im Streudiagramm in dem die 9 Datensätze der Kraftwerke mit sanierten Turbinen dargestellt sind, zeigen die drei Regressionsgeraden schwache bis deutliche Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage. Die Kurven zeigen beim Baujahr 1924 eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage zwischen 17 und 21 Prozent auf und weisen beim Baujahr 2003 eine Steigerung zwischen 5 und 2 Prozent auf.

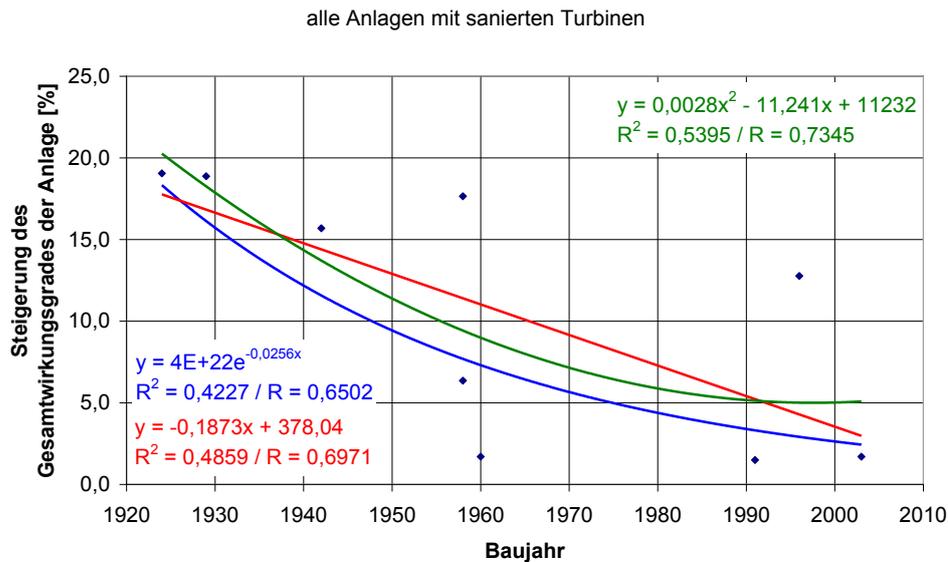


Abbildung 39: Steigerung des Gesamtwirkungsgrades bei Anlagen mit sanierten Turbinen

Die 3 Datensätze, bei denen die Turbine ausgetauscht wurde, sind nicht ausreichend für statistische Betrachtungen. Im Folgenden wird daher nicht näher auf die Anlagen, bei denen die Turbine ausgetauscht wurde, eingegangen.

Anlagen mit Francisturbinen

Im Streudiagramm in dem jene 8 Anlagen, in denen eine Francisturbine verbaut ist, dargestellt sind, zeigen die Regressionsgeraden schwache bis deutliche Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung des Wirkungsgrades.

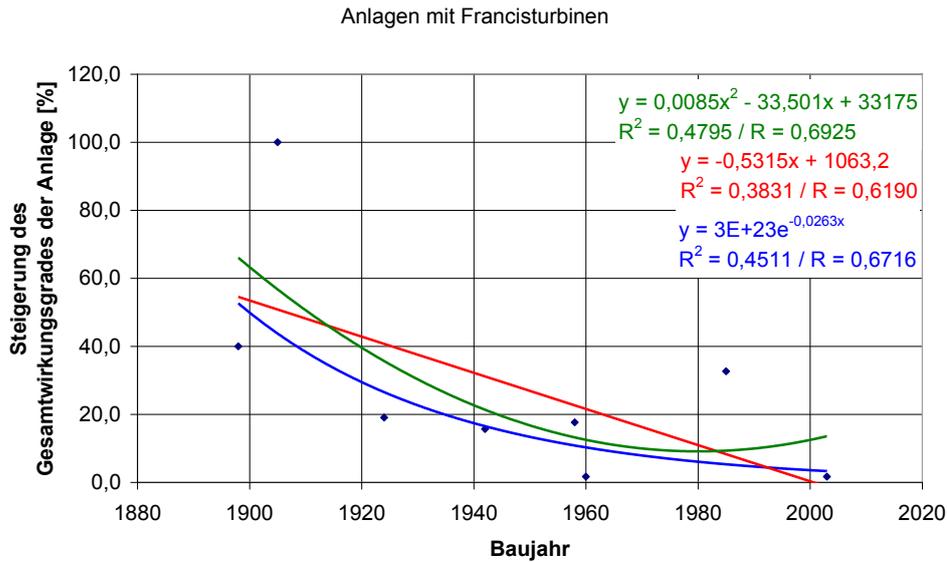


Abbildung 40: Steigerung des Gesamtwirkungsgrades bei Anlagen mit Francisturbinen

Allerdings werden die Regressionsgeraden von der Anlage 44 (Baujahr 1905, Steigerung des Wirkungsgrades um 100 Prozent), die komplett neu errichtet wurde, beeinflusst. Ohne dieses Wertepaar zeigen alle drei Regressionsgeraden einen geringeren Zusammenhang zwischen dem Baujahr der Anlage und dem Steigerungspotential des Wirkungsgrades.

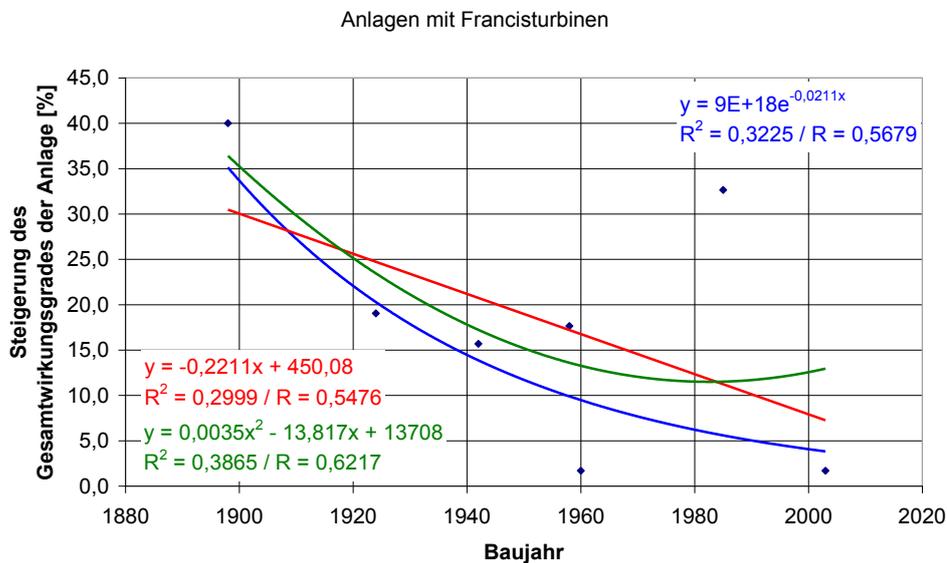


Abbildung 41: Steigerung des Gesamtwirkungsgrades bei Anlagen mit Francisturbinen (Anlage 44 entfernt)

Bei 4 der 8 Anlagen in denen eine Francisturbine verbaut ist, wurde bei der Revitalisierung die Turbine saniert, bei den anderen 4 wurde die Turbine ausgetauscht.

4 Datensätze sind nicht ausreichend für statistische Betrachtungen. Es folgt daher keine weitere Eingrenzung der Datensätze.

Anlagen mit Kaplan turbinen

Bei jenen Anlagen in denen eine Kaplan turbine verbaut ist gibt es drei Datensätze bei denen das Baujahr der Anlage und eine mögliche Steigerung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage ermittelbar sind. Drei Datensätze sind nicht ausreichend für statistische Betrachtungen. Im Folgenden wird daher nicht näher auf jene Anlagen in denen eine Kaplan turbine installiert ist eingegangen.

Anlagen mit Peltonturbinen

Bei jenen Anlagen in denen eine Peltonturbine verbaut ist existiert nur ein Datensatz bei dem eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage ermittelbar ist. Im Folgenden wird daher nicht näher auf die Anlagen, die mit einer Peltonturbinen ausgerüstet ist, eingegangen.

Anlagen mit Ossbergerturbinen

Bei den erfassten Ossbergerturbinen gibt es keinen Datensatz bei dem das Baujahr der Anlage und eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage bekannt sind. Es gibt daher hier keine darstellbaren Kurven oder Ergebnisse.

4.4 Steigerung des Durchflusses

Bei 38 der 136 Anlagen ist eine Steigerung des Durchflusses errechenbar. Bei 30 dieser 38 Kraftwerke gibt es Angaben zum Alter der Anlage vor der Revitalisierung. Im Folgenden sind die Ergebnisse dargestellt, die aus der Betrachtung dieser 30 Datensätze gewonnen werden können.

Alle Anlagen

Im Streudiagramm, in dem alle 30 Anlagen dargestellt sind, zeigen die Regressionsgeraden keine nennenswerten Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung des Durchflusses.

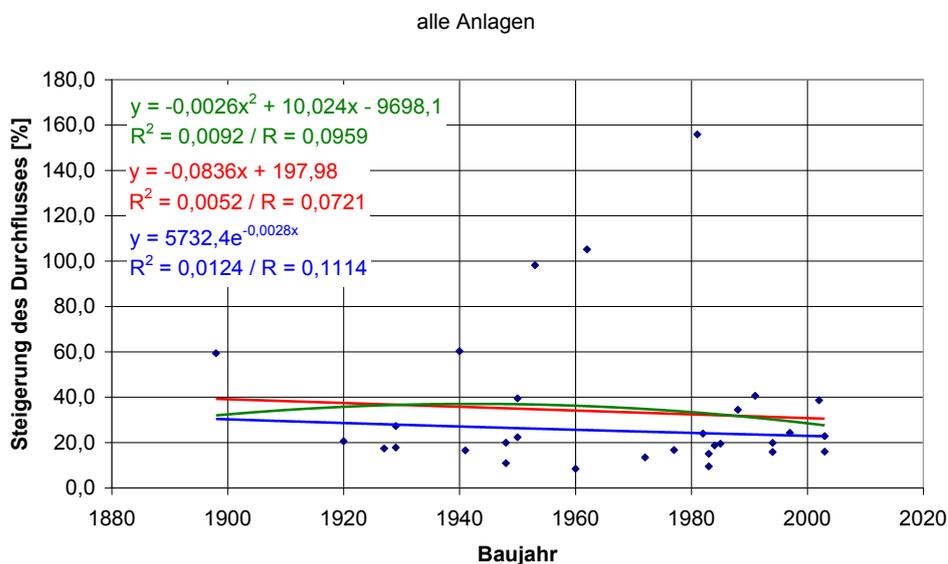


Abbildung 42: Steigerung des Durchflusses bei allen Anlagen

Anlagen mit Francisturbinen

Im Streudiagramm in dem jene 12 Anlagen, in denen eine Francisturbine verbaut ist, dargestellt sind, zeigen die lineare und die exponentielle Regressionsgeraden keine Zusammenhänge und die polynomische Regressionsgerade zeigt einen deutlichen Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung des Durchflusses.

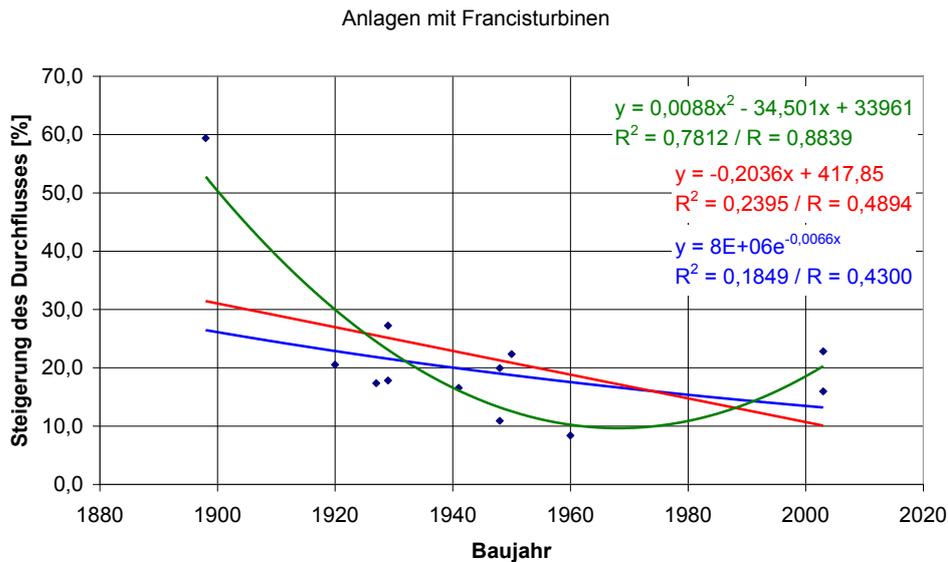


Abbildung 43: Steigerung des Durchflusses bei Anlagen mit Francisturbinen

Allerdings werden die Regressionsgeraden von der Anlage 18 (Baujahr 1905, Steigerung des Durchflusses um 59,4 Prozent), die komplett neu errichtet wurde, beeinflusst. Ohne dieses Wertepaar zeigen die lineare und die polynomische Regressionsgerade einen geringeren Zusammenhang zwischen dem Baujahr der Anlage und dem Steigerungspotential des Durchflusses. Die exponentielle Regressionsgerade zeigt denselben Zusammenhang wie die lineare und wird daher nicht dargestellt.

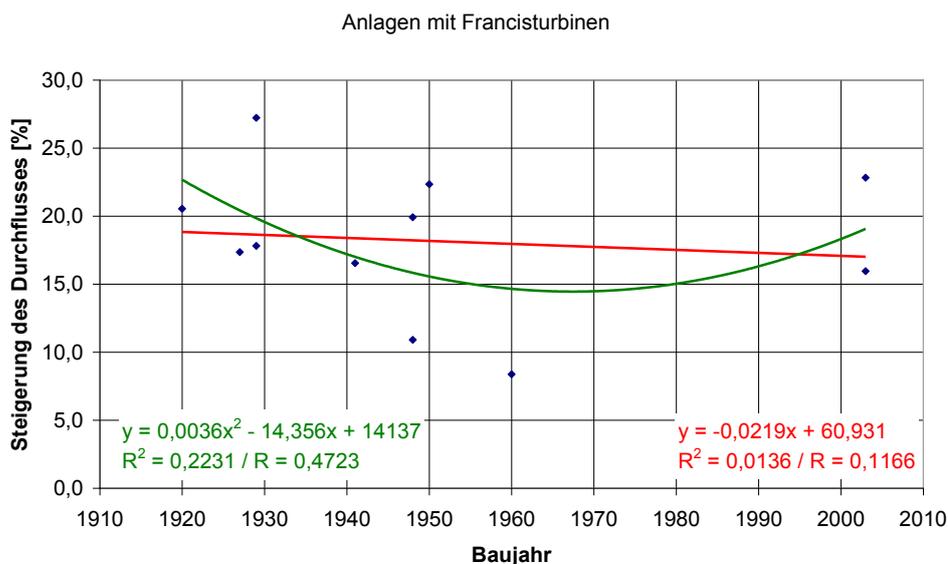


Abbildung 44: Steigerung des Durchflusses bei Anlagen mit Francisturbinen (Anlage 18 entfernt)

Anlagen mit Kaplan-turbinen

Bei jenen 7 Anlagen in denen eine Kaplan-turbine installiert ist, zeigen die lineare und die exponentielle Regressionsgeraden deutliche Zusammenhänge und die polynomische Regressionsgerade zeigt deutliche bis gesetzmäßige Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung des Durchflusses. Die drei Kurven weisen beim Baujahr 1972 eine Steigerung des Durchflusses zwischen 10 und 16 Prozent auf und zeigen beim Baujahr 2002 eine Steigerung zwischen 30 und 35 Prozent.

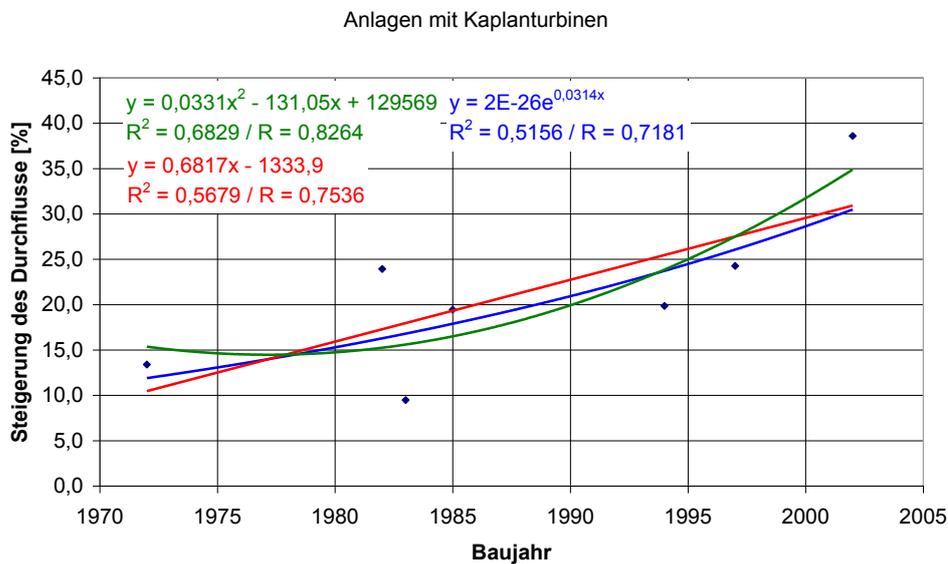


Abbildung 45: Steigerung des Durchflusses bei Anlagen mit Kaplan-turbinen

Anlagen mit Peltonturbinen

Im Streudiagramm in dem die 5 Anlagen, in denen eine Peltonturbine verbaut ist, dargestellt sind zeigen die lineare und die exponentielle Regressionsgerade schwache Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung des Durchflusses. Die beiden Kurven zeigen beim Baujahr 1945 eine Steigerung des Durchflusses zwischen 70 und 80 Prozent und weisen beim Baujahr 1990 eine Steigerung zwischen 25 und 35 Prozent auf.

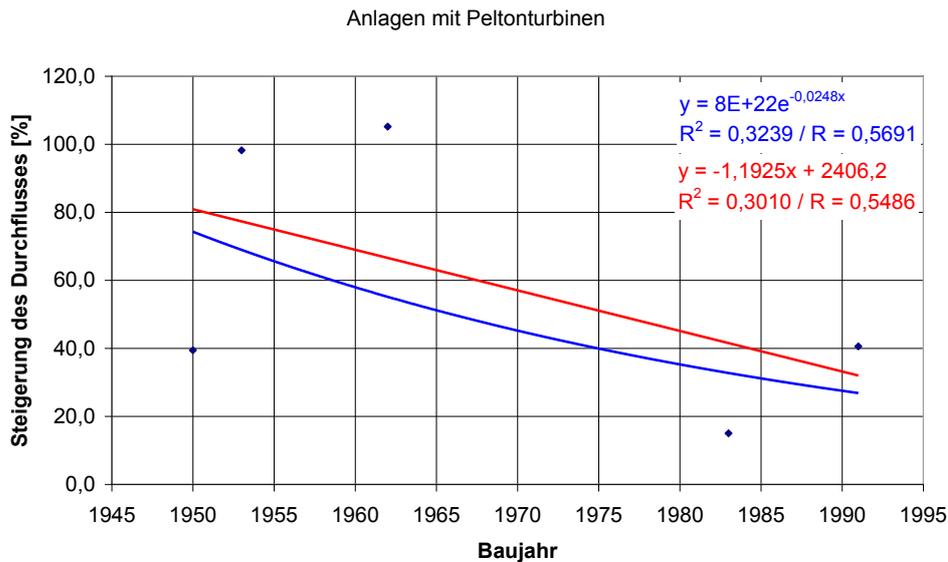


Abbildung 46: Steigerung des Durchflusses bei Anlagen mit Pelton-turbinen

Anlagen mit Ossbergerturbinen

Bei jenen 6 Kraftwerken in denen eine Ossbergerturbine verbaut ist zeigen die lineare und die exponentielle Regressionsgerade keine Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung des Durchflusses.

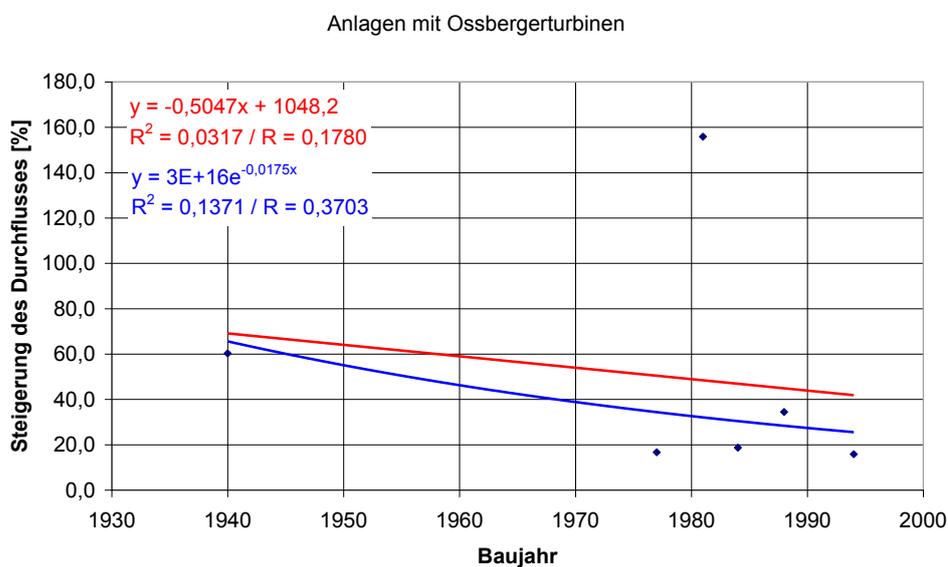


Abbildung 47: Steigerung des Durchflusses bei Anlagen mit Ossbergerturbinen

Allerdings werden die Regressionsgeraden von der Anlage 114 (Baujahr 1981, Steigerung des Durchflusses um 155,8 Prozent), deren Betriebsführung geändert

wurde, beeinflusst. Ohne dieses Wertepaar zeigen die lineare und die polynomische Regressionsgerade einen deutlichen bis gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen dem Baujahr der Anlage und dem Steigerungspotential des Durchflusses. Die Kurven weisen beim Baujahr 1940 eine Steigerung des Durchflusses zwischen 50 und 60 Prozent auf und zeigen beim Baujahr 2002 eine Steigerung zwischen 15 und 20 Prozent.

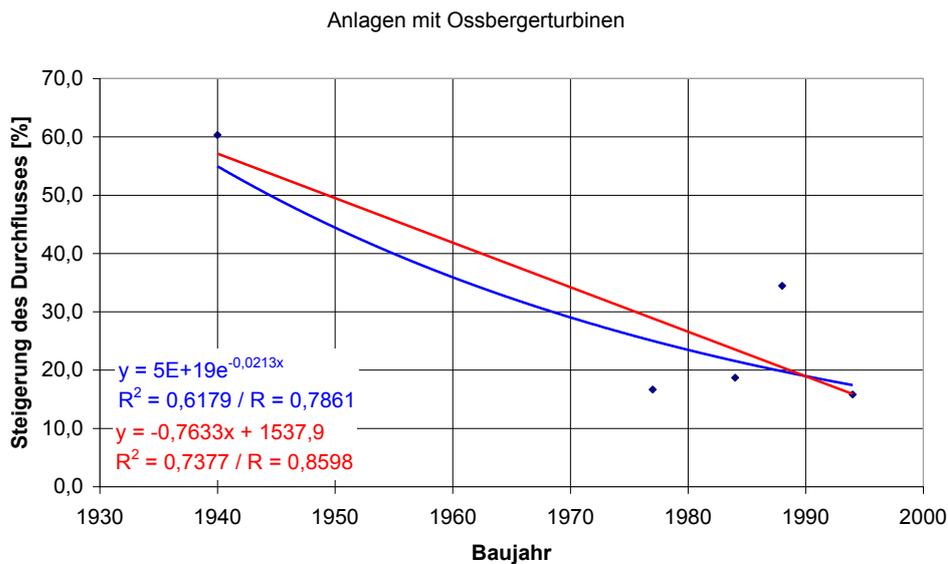


Abbildung 48: Steigerung des Durchflusses bei Anlagen mit Ossbergerturbinen (Anlage 114 entfernt)

4.5 Steigerung der Fallhöhe

Bei 47 der 136 Anlagen ist eine Steigerung des Durchflusses errechenbar. Bei 23 dieser 47 Kraftwerke gibt es Angaben zum Alter der Anlage vor der Revitalisierung. Im Folgenden sind die Ergebnisse angeführt die aus der Betrachtung dieser 23 Datensätze gewonnen werden können.

Alle Anlagen

Im Streudiagramm in dem alle 23 Anlagen dargestellt sind, zeigen die Regressionsgeraden keine Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung der Fallhöhe.

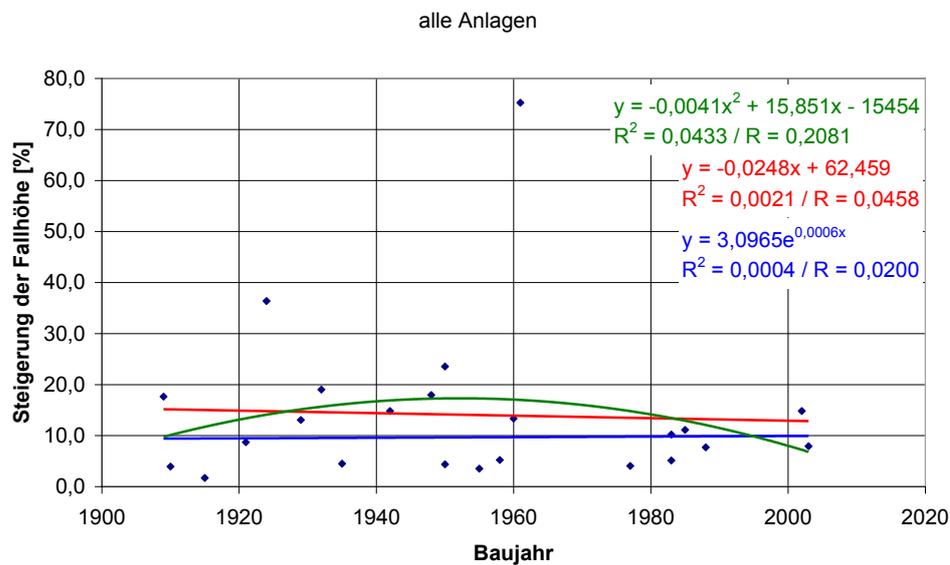


Abbildung 49: Steigerung der Fallhöhe bei allen Anlagen

Allerdings werden die Regressionsgeraden von der Anlage 73 (Baujahr 1961, Steigerung der Fallhöhe um 75,2 Prozent), die komplett neu errichtet wurde, beeinflusst. Ohne dieses Wertepaar zeigen die Regressionsgeraden keine nennenswerten Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung der Fallhöhe. Die polynomische Regressionsgerade zeigt denselben Zusammenhang wie die lineare Regressionsgerade und wird daher nicht dargestellt.

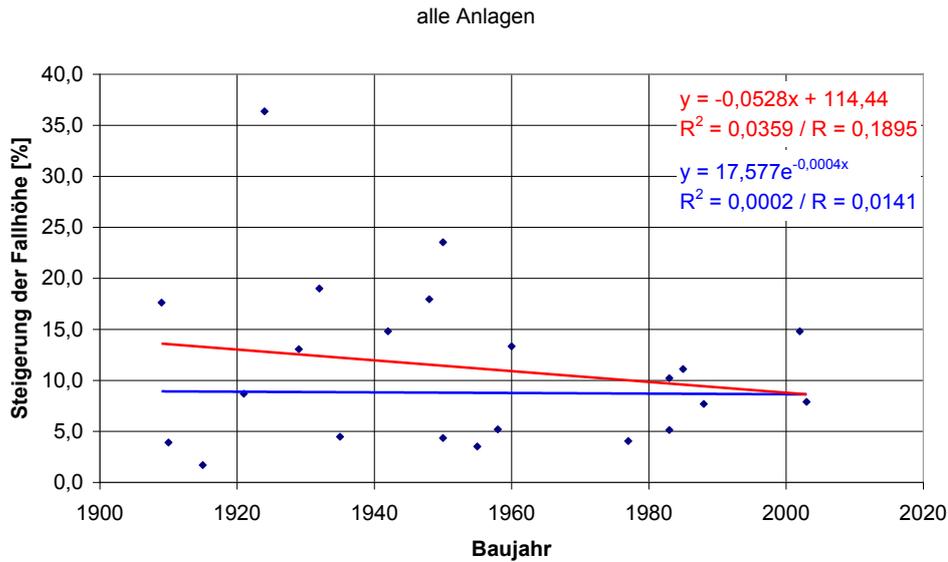


Abbildung 50: Steigerung der Fallhöhe bei allen Anlagen (Anlage 73 entfernt)

Anlagen mit Francisturbinen

Im Streudiagramm in dem jene 14 Anlagen dargestellt sind die mit einer Francisturbine ausgerüstet sind zeigen die Regressionsgeraden keine Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung der Fallhöhe.

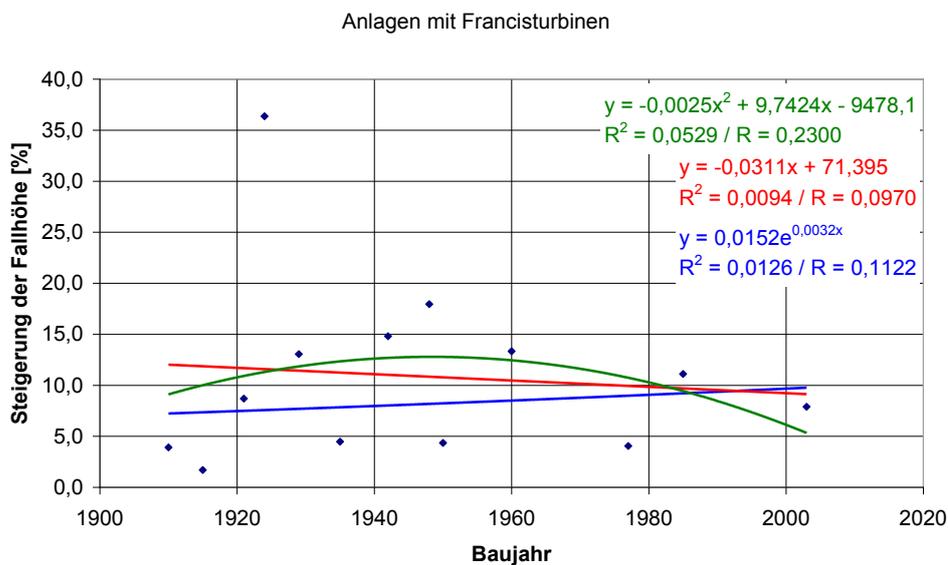


Abbildung 51: Steigerung der Fallhöhe bei Anlagen mit Francisturbinen

Allerdings werden die Regressionsgeraden von der Anlage 70 (Baujahr 1924, Steigerung der Fallhöhe um 36,4 Prozent), die komplett neu errichtet wurde,

beeinflusst. Ohne dieses Wertepaar zeigen die Regressionsgeraden keine nennenswerten Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung der Fallhöhe.

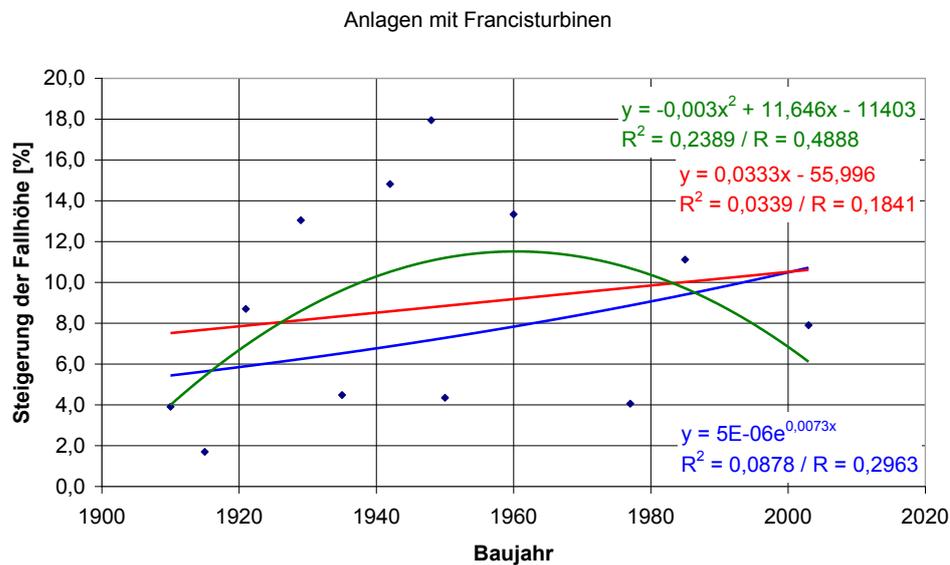


Abbildung 52: Steigerung der Fallhöhe bei Anlagen mit Francisturbinen (Anlage 70 entfernt)

Anlagen mit Kaplan turbinen

Im Streudiagramm in dem nur die 5 Anlagen, in denen eine Kaplan turbine verbaut ist, dargestellt werden zeigen die lineare und die exponentielle Regressionsgerade keinen Zusammenhang und die polynomische Regressionsgerade zeigt einen gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung der Fallhöhe.

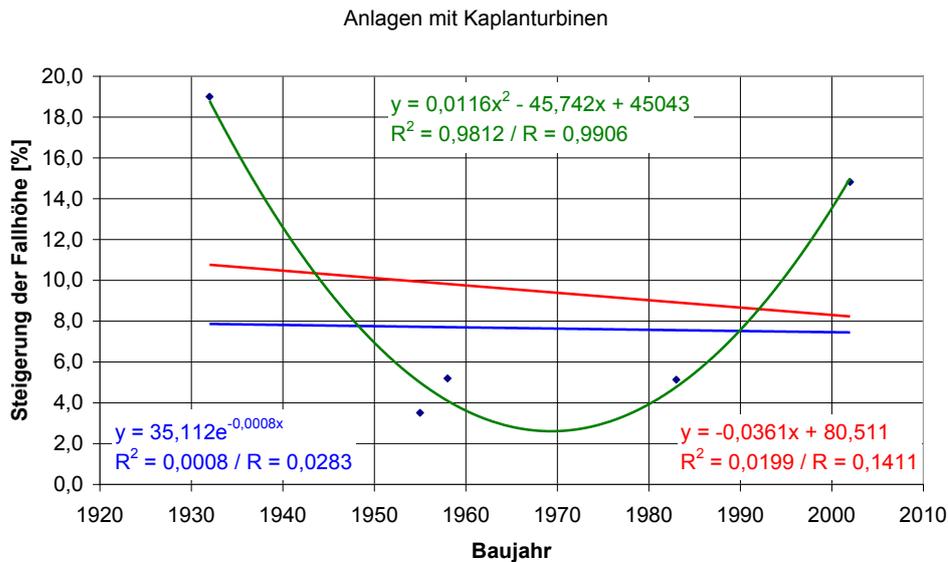


Abbildung 53: Steigerung der Fallhöhe Anlagen mit Kaplan turbinen

Die Regressionsgeraden werden von der Anlage 101 (Baujahr 2002, Steigerung der Fallhöhe um 14,8 Prozent) und der Anlage 24 (Baujahr 1932, Steigerung der Fallhöhe um 19,0 Prozent) beeinflusst. Ohne diese Wertepaare bleiben 3 Datensätze über welche nicht ausreichend sind für statistische Betrachtungen.

Anlagen mit Peltonturbinen

Bei jenen Anlagen in denen eine Peltonturbine verbaut ist, existieren zwei Datensätze bei denen das Baujahr der Anlage und eine mögliche Steigerung der Fallhöhe ermittelbar sind. Zwei Datensätze sind nicht ausreichend für statistische Betrachtungen. Im Folgenden wird daher nicht näher auf die Anlagen, die mit einer Peltonturbinen ausgerüstet ist, eingegangen.

Anlagen mit Ossbergerturbinen

Bei jenen Anlagen in denen eine Ossbergerturbine verbaut ist existiert ein Datensatz bei dem das Baujahr der Anlage und eine mögliche Steigerung der Fallhöhe ermittelbar sind. Im Folgenden wird daher nicht näher auf die Anlagen, die mit einer Ossbergerturbinen ausgerüstet ist, eingegangen.

5 DISKUSSION DER ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Aus Sicht des Verfassers dieser Arbeit ist die Anzahl der vorhandenen Datensätze sowohl in Hinsicht auf komplexe als auch in Hinsicht auf einfache Fragestellungen zu gering um tatsächlich aussagekräftige Ergebnisse zu bekommen.

Unter Berücksichtigung dass bei den untersuchten Anlagen das Segment der Kleinwasserkraftwerke mit einer Fallhöhe von unter 15 Metern überproportional vertreten ist, rund 83 Prozent der erfassten Anlagen fällt in diesen Bereich, kann zumindest ansatzweise von einer qualifizierten Stichprobe ausgegangen werden. Ungeachtet dieser statistischen Unzulänglichkeiten wurde versucht zumindest bei den vorliegenden Daten Gesetzmäßigkeiten zu finden.

Bei der Analyse der Datensätze aller Turbinentypen in einem Streudiagramm lassen sich Zusammenhänge bei der Steigerung des Jahresarbeitsvermögens nur durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage erkennen. Die mögliche Steigerung des Jahresarbeitsvermögens, nur durch teilweise oder komplette Erneuerung der elektromaschinellen Ausrüstung, liegt bei Anlagen die zu Beginn des 20. Jahrhunderts errichtet wurden, zwischen 25 und 30 Prozent und bei Anlagen die Ende des 20. Jahrhunderts errichtet wurden, zwischen 10 und 15 Prozent.

Zum Vergleich liegt die mögliche Steigerung des Jahresarbeitsvermögens, durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades sowie Erhöhung des Durchflusses und der Fallhöhe, bei Anlagen die zu Beginn des 20. Jahrhunderts errichtet wurden, bei rund 35 Prozent und bei Anlagen die Ende des 20. Jahrhunderts errichtet wurden, bei rund 25 Prozent.

Weitere Zusammenhänge, bei der Analyse aller Datensätze, ergeben sich bei der Steigerung der Leistung einer Anlage. Betrachtet man nur jene 5 Anlagen, bei denen die Steigerung der Leistung nur durch Erhöhung des Anlagendurchflusses realisiert wurde, so zeigt sich eine Steigerung der Leistung der von rund 8 Prozent beim Baujahr um 1950 und rund 14 Prozent beim Baujahr um 1995.

Bei jenen 15 Anlagen in denen eine Pelton turbine verbaut war, war bei 7 Anlagen das Alter der Anlage bekannt. Bei diesen 7 Datensätzen sind statistische Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung des Jahresdurchflusses der Anlage erkennbar. Die Steigerung des Durchflusses durch die

Anlage liegt in der Mitte des 20. Jahrhunderts zwischen 70 und 80 Prozent und am Ende des 20. Jahrhunderts zwischen 25 und 35 Prozent.

Bei jenen 9 Anlagen in denen eine Ossbergerturbine verbaut war, war ebenfalls bei 7 Anlagen das Alter der Anlage bekannt. Bei diesen 7 Datensätzen lassen sich ebenfalls statistische Zusammenhänge zwischen dem Baujahr der Anlage und der möglichen Steigerung des Jahresdurchflusses der Anlage erkennen. Die Steigerung des Durchflusses durch die Anlage liegt in der Mitte des 20. Jahrhunderts zwischen 60 und 70 Prozent und am Ende des 20. Jahrhunderts zwischen 25 und 45 Prozent.

Bei jenen 30 Anlagen in denen eine Kaplan turbine verbaut war, können mögliche statistische Zusammenhänge zwischen dem Baujahr und dem Steigerungspotential des Anlagendurchflusses dargestellt werden. Die mögliche Steigerung des Anlagendurchflusses pro Jahr liegt bei Kraftwerken die Anfang der 1970er Jahre errichtet wurden zwischen 10 und 16 Prozent und bei Anlagen die Ende des 20. Jahrhunderts in Betrieb genommen wurden zwischen 30 und 35 Prozent. Eine Einschränkung, auf welche Verbesserungsmaßnahmen dieser Umstand zurückzuführen ist, ist nicht möglich. Da es sich bei den 7 Anlagen die dieses Ergebnis zeigen, nur um weniger als ein Viertel aller betrachteten Anlagen in denen eine Kaplan turbine verbaut ist, handelt, ist dieses Ergebnis als nicht repräsentativ zu betrachten. Dieses Ergebnis ist als statistisches Zufallsprodukt zu werten, da Steigerungen des Anlagendurchflusses um über 30 Prozent nur durch unwirtschaftlichen Betrieb vor der Revitalisierung, Fehlplanung oder ähnliche Umstände erklärbar sind.

Eine Aufteilung, ob das ermittelte Steigerungspotential auf die Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades, die Steigerung des Anlagendurchflusses, die Steigerung der Fallhöhe oder eine Kombination aus zwei der Faktoren zurückzuführen ist, bringt keine genaueren Erkenntnisse. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, dass 19 Anlagen, in denen eine Francisturbine verbaut ist und das Alter der Anlage bekannt ist, nicht geeignet sind für statistische Analysen.

Bei jenen 82 Anlagen, in denen eine Francisturbine verbaut war, können statistische Zusammenhänge zwischen dem Baujahr und dem Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens und der möglichen Steigerung des Gesamtwirkungsgrades aufgezeigt werden.

Das Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Francisturbinen liegt bei Anlagen mit Baujahr um 1920 bei rund 28 Prozent und bei Kraftwerken die

um 1980 errichtet wurden bei rund 15 Prozent, nur durch teilweise oder komplette Erneuerung der elektromaschinellen Ausrüstung. Bei jenen Anlagen, bei denen nur der Anlagendurchfluss gesteigert wurde, liegt das Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens beim Baujahr 1920 bei rund 20 Prozent, fällt dann ab, bis zum Baujahr 1935, wo das Minimum bei rund 17 Prozent liegt und steigt danach bis zum Baujahr 1950 an, wo die Steigerung bei rund 22 Prozent liegt. Betrachtet man jene Anlagen, bei denen der Gesamtwirkungsgrad verbessert, der Durchfluss und die Fallhöhe erhöht wurde fällt das Steigerungspotential des Jahresarbeitsvermögens am Größten aus. Das Steigerungspotential liegt beim Baujahr 1910 bei rund 35 Prozent und fällt bis zum Ende des 20. Jahrhunderts, wo es bei rund 25 Prozent liegt. Das Steigerungspotential des Gesamtwirkungsgrades, einer Anlage in der eine Francisturbinen verbaut ist, liegt bei Anlagen, die zu Beginn des 20. Jahrhunderts gebaut wurden, zwischen 30 und 40 Prozent und bei Kraftwerken, die am Ende des 20. Jahrhunderts errichtet wurden, zwischen 5 und 15 Prozent, Alle dargestellten Ergebnisse sind zwar statistische Zusammenhänge, aufgrund der geringen Datenmengen aber vorsichtig zu bewerten. Zur Verbesserung der statistischen Aussagekraft wäre es für zukünftige Untersuchungen notwendig, eine wesentlich größere Datenmenge zu behandeln. Weiters ist bei zukünftigen Betrachtungen zu unterscheiden, welche Effizienzsteigerungen auf Wartungsarbeiten und welche Effizienzsteigerungen auf Anpassungen an den Stand der Technik zurückzuführen sind. Die relevanten Steigerungen sind aus Sicht des Verfassers die Steigerungen die durch Anpassungen an den Stand der Technik und durch Veränderung der Betriebsführung erzielt werden können. Trotzdem sind bei jeder Revitalisierung auch Effizienzsteigerungen durch Wartungsarbeiten zu erwarten. Dieses Effizienzsteigerungspotential durch Servicearbeiten ist abhängig vom Anlagenzustand vor der Revitalisierung. Betrachtet man diese beiden Anteile am Effizienzsteigerungspotential gemeinsam, Effizienzsteigerungen durch Anpassung an den Stand der Technik und Effizienzsteigerungen durch Wartungsarbeiten, verfälscht das die Ergebnisse.

Es müssen zukünftige Recherchen zur Geschichte jedes einzelnen Kleinwasserkraftwerks, das statistisch ausgewertet werden soll, geführt werden um eine Beantwortung der offenen Fragen zu ermöglichen. Jedoch bleibt die Frage offen wie viele der benötigten Daten ermittelbar sind und wie viele im Lauf der Zeit verloren gegangen sind.

6 LITERATURVERZEICHNIS

PAREY, P. (1982): Taschenbuch der Wasserwirtschaft (6. Auflage)

ZIEGLER, B. (2007): Statistische Methodenlehre, Ein Lehr- und Arbeitsbuch + moderne Datenanalyse (4. Auflage)

7 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Turbinenwirkungsgrade Pelton, Francis und Kaplan	12
Abbildung 2	Turbinenwirkungsgrad Ossberger	12
Abbildung 3	Turbinenwirkungsgrad Francisturbine	14
Abbildung 4	Turbinenwirkungsgrad Pelton-turbine	14
Abbildung 5	Turbinenwirkungsgrad Kaplan-turbine	15
Abbildung 6	Turbinenwirkungsgrad Ossbergerturbine	15
Abbildung 7	Wirkungsgradverlauf Francis $\eta = 0,65$	16
Abbildung 8	Wirkungsgradverlauf Francis $\eta = 0,80$	17
Abbildung 9	Anteile der einzelnen Turbinenarten	18
Abbildung 10	Anteile des Turbinenalters	18
Abbildung 11	Anteile des Durchflusses	19
Abbildung 12	Anteile der Fallhöhen	19
Abbildung 13	Anteile der Leistung – Erfasste Kraftwerke	20
Abbildung 14	Anteile der Leistung – Österreichweit	20
Abbildung 15	Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei allen Anlagen	24
Abbildung 16	Steigerung des Jahresarbeitsvermögens unter 50 Prozent bei allen Anlagen	25
Abbildung 17	Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei allen Anlagen durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades	26
Abbildung 18	Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei allen Anlagen durch Erhöhung des Durchflusses	27
Abbildung 19	Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei allen Anlagen durch Erhöhung des Durchflusses und Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades	27
Abbildung 20	Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Francisturbinen	28
Abbildung 21	Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Francisturbinen durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades	29
Abbildung 22	Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Francisturbinen durch Erhöhung des Durchflusses	30

Abbildung 23	Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Francisturbinen durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades Erhöhung des Durchflusses und der Fallhöhe	31
Abbildung 24	Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Kaplan- turbinen	31
Abbildung 25	Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Kaplan- turbinen durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades, und/oder Erhöhung des Durchflusses und/oder der Fallhöhe	32
Abbildung 26	Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Kaplan- turbinen durch Erhöhung des Durchflusses und/oder der Fallhöhe	33
Abbildung 27	Steigerung des Jahresarbeitsvermögens bei Anlagen mit Kaplan- turbinen durch Erhöhung des Durchflusses und/oder der Fallhöhe (Anlage 41 entfernt)	34
Abbildung 28	Steigerung der Leistung bei allen Anlagen	35
Abbildung 29	Steigerung der Leistung unter 50 Prozent bei allen Anlagen	36
Abbildung 30	Steigerung der Leistung der Anlage bei allen Anlagen durch Erhöhung des Durchflusses	37
Abbildung 31	Steigerung der Leistung der Anlage bei allen Anlagen durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades und Erhöhung des Durchflusses	37
Abbildung 32	Steigerung der Leistung bei Anlagen mit Francisturbinen	38
Abbildung 33	Steigerung der Leistung der Anlage bei Anlagen mit Francisturbinen durch Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades, und/oder Erhöhung des Durchflusses und/oder der Fallhöhe	39
Abbildung 34	Steigerung der Leistung der Anlage bei Anlagen mit Francisturbinen durch Erhöhung des Durchflusses und/oder der Fallhöhe	40
Abbildung 35	Steigerung der Leistung bei Anlagen mit Kaplan- turbinen	41
Abbildung 36	Steigerung der Leistung der Anlage bei Anlagen mit Kaplan- turbinen durch Erhöhung des Durchflusses und/oder der Fallhöhe	42
Abbildung 37	Steigerung des Gesamtwirkungsgrades bei allen Anlagen	43

Abbildung 38	Steigerung des Gesamtwirkungsgrades bei allen Anlagen (Anlage 44 entfernt)	44
Abbildung 39	Steigerung des Gesamtwirkungsgrades bei Anlagen mit sanierten Turbinen	45
Abbildung 40	Steigerung des Gesamtwirkungsgrades bei Anlagen mit Francisturbinen	46
Abbildung 41	Steigerung des Gesamtwirkungsgrades bei Anlagen mit Francisturbinen (Anlage 44 entfernt)	46
Abbildung 42	Steigerung des Durchflusses bei allen Anlagen	48
Abbildung 43	Steigerung des Durchflusses bei Anlagen mit Francisturbinen	49
Abbildung 44	Steigerung des Durchflusses bei Anlagen mit Francisturbinen (Anlage 18 entfernt)	49
Abbildung 45	Steigerung des Durchflusses bei Anlagen mit Kaplan turbinen	50
Abbildung 46	Steigerung des Durchflusses bei Anlagen mit Peltonturbinen	51
Abbildung 47	Steigerung des Durchflusses bei Anlagen mit Ossbergerturbinen	51
Abbildung 48	Steigerung des Durchflusses bei Anlagen mit Ossbergerturbinen (Anlage 114 entfernt)	52
Abbildung 49	Steigerung der Fallhöhe bei allen Anlagen	53
Abbildung 50	Steigerung der Fallhöhe bei allen Anlagen (Anlage 73 entfernt)	54
Abbildung 51	Steigerung der Fallhöhe bei Anlagen mit Francisturbinen	54
Abbildung 52	Steigerung der Fallhöhe bei Anlagen mit Francisturbinen (Anlage 70 entfernt)	55
Abbildung 53	Steigerung der Fallhöhe bei Anlagen mit Kaplan turbinen	56

8 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Wirkungsgradverläufe	13
Tabelle 2	Wirkungsgradverläufe und Verhältnisse zum Maximalwirkungsgrad	13
Tabelle 3	Anteile der einzelnen Turbinenarten	18
Tabelle 4	Anteile des Turbinenalters	18
Tabelle 5	Anteile des Durchflusses	19
Tabelle 6	Anteile der Fallhöhen	19
Tabelle 7	Anteile der Leistung – Gegenüberstellung angeführte Anlagen und österreichweiter Vergleich	20