



Stefan Koch, BSc BSc

Konzeptionelle Planung einer Kleinwasserkraftanlage in der Weststeiermark

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Masterstudium – Geotechnical and Hydraulic Engineering

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Knoblauch

Institut für
Wasserbau und Wasserwirtschaft

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

Graz, März 2019

**„Das Wasser ist ein freundliches Element für den, der damit bekannt ist und
es zu behandeln weiß“**

Johann Wolfgang von Goethe (1749 - 1832),
gilt als einer der bedeutendsten Repräsentanten deutschsprachiger Dichtung

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

* An dieser Stelle wird angemerkt, dass in der vorliegenden Masterarbeit zum besseren Verständnis und zur leichteren Lesbarkeit auf geschlechtsneutrale Formulierungen verzichtet wurde.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Herrn Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Knoblauch bedanken, der zunächst meinen herangetragenen Themenvorschlag befürwortet hat und im Verlauf meiner Masterarbeit stets durch konstruktive Kritik und Einbringung seines umfassenden Fachwissens hervorragende Betreuungsarbeit geleistet hat. Seine zahlreichen Ratschläge, Ideen und Anregungen haben wesentlich zur Motivation und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Außerdem zeichnet Herr Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Knoblauch in seiner Funktion als Studiendekan der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften auch verantwortlich für die Vergabe von Förderungsstipendien. Ich möchte hiermit ein großes Dankeschön für den Erhalt eines Förderungsstipendiums im Zusammenhang mit der Durchführung meiner Masterarbeit aussprechen.

Im Verlauf meiner Studienzeit wurde durch den Besuch von einschlägigen Vorlesungen, bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz, mein Interesse am umfangreichen Themengebiet des konstruktiven Wasserbaus geweckt – dadurch wurde der Grundstein zu meiner Entscheidung für dieses Masterstudium gelegt. Vielen Dank für die stets motivierenden und lehrreichen Vorlesungsstunden.

In diesem Zusammenhang ergeht mein Dank selbstverständlich auch an all jene Mitarbeiter des Institutes für Wasserbau und Wasserwirtschaft mit denen ich aufgrund von Lehrveranstaltungen oder der Durchführung meiner Masterarbeit in Austausch war.

In positiver Erinnerung behalte ich auch die Unterstützung und Zusammenarbeit seitens externer Behörden und Firmen. Im Konkreten bedanke ich mich bei Herrn Josef Kogler – Sachbearbeiter an der BH Deutschlandsberg, bei Herrn Mag. Gerhard Probst und Herrn Thomas Jobst – JR-AquaConSol GmbH sowie bei Herrn Andreas Bischofer – Elektro Bischofer GesmbH&CoKG.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern, Helene und Erich Koch, bedanken, die mir die Chance eröffneten dieses Studium zu absolvieren sowie ein unvergessliches und prägendes Auslandsstudienjahr in Trondheim ermöglichten. Danke für die finanzielle Unterstützung, aber insbesondere auch für den mentalen Rückhalt und das entgegengebrachte Vertrauen während meiner gesamten Studienzeit!

Kurzfassung

In der vorliegenden Masterarbeit wird ein konzeptioneller Lösungsvorschlag für ein Kleinwasserkraftwerk zur Strom-Eigenversorgung erarbeitet. Als Veranlassung zu dieser Themenwahl ist die gegebene Situation am elterlichen Bergbauernhof in der Weststeiermark zu nennen, dessen Stromversorgung durch Witterungseinflüsse (Wind/Schneebruch etc.) jährlich im Schnitt 2 bis 3-mal für mehrere Tage ausfällt. Bei der Ausarbeitung einer möglichen Ausführungsvariante stehen die technische Auslegung und die wirtschaftliche Beurteilung der Anlage im Fokus. Die erforderlichen Berechnungen werden mittels *MS-Excel* durchgeführt, wobei die Druckstoßsimulation unter Zuhilfenahme der Software *WANDA 4.5* erfolgt.

Um die Zielsetzungen dieser Masterarbeit zu erfüllen, werden in den einleitenden Kapiteln relevante Inhalte zur Hydrologie sowie zu den Bereichen der Gerinne- und Rohrhydraulik dargestellt. Ebenso werden die speziellen bautechnischen und elektromechanischen Anlagenteile von Kleinwasserkraftwerken behandelt. Des Weiteren wird ein Überblick über Gesetze, Verordnungen und Förderungsmöglichkeiten, die im Zusammenhang mit einem Genehmigungsverfahren beim Bau von Kleinwasserkraftwerken stehen, gegeben. Der allgemeine Teil wird mit der Darstellung von Rechenverfahren zur wirtschaftliche Betrachtung von Kleinwasserkraftwerken, wie beispielsweise die Berechnung des internen Zinsfußes oder der dynamischen Amortisationszeit, abgeschlossen.

Aufbauend auf den Inhalten der vorangehenden Kapitel wird ein Anlagenkonzept für eine Kleinwasserkraftanlage am benannten Standort in der Weststeiermark erarbeitet. Aus technischer Sicht handelt es sich dabei um eine Hochdruck-Mikroanlage mit einer Rohfallhöhe von 180,0 m und einer Ausbauleistung von 10,0 kW. Bei der technischen Ausführung des Konzeptes wird im Detail auf bautechnische Anlagenteile wie der Wasserfassung, den Triebwasserspeicher, die Druckrohrleitung, die elektromechanische Ausrüstung und das Krafthaus eingegangen. Für die Durchführung der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde vom Autor ein aussagekräftiges Angebot für die elektromechanische Ausrüstung der Anlage eingeholt.

Eine Diskussion der erarbeiteten Ergebnisse sowie ein Ausblick auf mögliche Verbesserungspotentiale des vorgeschlagenen Anlagenkonzeptes schließen die Arbeit ab.

Abstract

The aim of this master's thesis is a proposal of a conceptual solution for a small hydroelectric self-supply power plant. The reason for this choice of topic is the present situation at the parental mountain farm in Western Styria, whose power supply fails on average 2 to 3 times a year for several days due to weather influences (wind, snow etc.). When developing a possible solution, the focus is on the technical design and the economic evaluation of the project. The required calculations are carried out by using *MS-Excel*, whereas the simulations concerning the water hammer phenomenon is carried out with the aid of software *WANDA 4.5*.

In order to fulfil the objectives of this master's thesis, relevant contents on hydrology and on the fields of channel and pipe hydraulics are presented in the introductory chapters. The special structural and electromechanical plant components of small hydropower plants are also treated in this part. Also an overview of laws, ordinances and subsidies which are related to the approval procedure of small hydropower plants are provided. The general part concludes with the presentation of calculation methods for the financial assessment of small hydropower plants, such as the calculation of the internal rate of return or the dynamic amortisation period.

Based on the contents of the previous chapters, a plant concept for a small hydropower plant at the given site in Western Styria is developed. From a technical point of view, this is a high pressure micro-plant with 180,0 m of hydraulic head and an installed capacity of 10,0 kW. In detail the technical execution of the concept deals with plant components such as the intake, the storage tank, the penstock, the electromechanical equipment and the power house. In addition the author obtained a reasonable offer concerning the electromechanical equipment of the plant in order to carry out the financial analysis of the project.

A discussion of the results as well as future prospects on possible improvement potentials of the proposed plant concept are provided as a conclusion of this thesis.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Anlass und Zielsetzung	1
1.2	Aufbau und Methodik der Arbeit	4
1.3	Einführung zur Wasserkraftnutzung in Österreich	5
1.3.1	Geschichtlicher Abriss	5
1.3.2	Status quo der Energieerzeugung	6
1.3.3	Potenzial der Kleinwasserkraft	7
2	Wasserkraft – Grundlagen	9
2.1	Hydrologische und hydraulische Grundlagen	9
2.1.1	Hydrologie	9
2.1.2	Rohrhydraulik	13
2.1.3	Druckstoßberechnung	16
2.1.4	Gerinnehydraulik	17
2.2	Kraftwerkstypen	20
2.2.1	Laufkraftwerke	21
2.2.2	Speicherkraftwerke	22
2.2.3	Pumpspeicherkraftwerke	23
2.2.4	Kleinwasserkraftwerke	23
3	Spezielle Anlagenkomponenten bei Kleinwasserkraftwerken	24
3.1	Wasserbauliche Komponenten	24
3.1.1	Ausleitungsbauwerk	24
3.1.2	Sandfang	30
3.1.3	Triebwasserweg	31
3.1.4	Krafthaus	32
3.1.5	Rückgabebauwerk	32
3.2	Elektromechanische Ausrüstung	33
3.2.1	Turbinen	33
3.2.2	Periphere Anlagen	42
3.2.3	Netzanschluss	43

4	Rechtliche und wirtschaftliche Betrachtung von Kleinwasserkraftwerken	44
4.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	44
4.1.1	Europarecht	44
4.1.2	Bundesrecht	45
4.1.3	Steiermärkisches Landesrecht	50
4.2	Wirtschaftlichkeitsanalyse	51
4.2.1	Energieproduktion	51
4.2.2	Erlöse	54
4.2.3	Aufwendungen	57
4.2.4	Abschätzung der Wirtschaftlichkeit	58
5	Konzeptionelle Planung einer Kleinwasserkraftanlage	64
5.1	Allgemeines	64
5.2	Anwendungsbeispiel „ <i>KWK-Schrottbauerhof</i> “	65
5.2.1	Topographie des Standortes	65
5.2.2	Hydrologische Daten	66
5.2.3	Jahresarbeitsvermögen	71
5.2.4	Zuleitungsgerinne	72
5.2.5	Triebwasserspeicher	75
5.2.6	Druckrohrleitung	80
5.2.7	Elektromechanische Ausstattung	90
5.2.8	Krafthaus	92
5.3	Wirtschaftlichkeitsanalyse „ <i>KWK-Schrottbauerhof</i> “	93
5.3.1	Investitionskosten	93
5.3.2	Betriebs- und Wartungskosten	95
5.3.3	Erlöse	96
5.3.4	Abschätzung der Wirtschaftlichkeit	97
6	Zusammenfassung und Ausblick	99
6.1	Zusammenfassung	99
6.2	Ausblick	101
	Abbildungsverzeichnis	102
	Tabellenverzeichnis	104
	Literaturverzeichnis	105
	Anhang	113

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Anlass und Zielsetzung

Die vorliegende Masterarbeit ist geprägt durch die persönliche Begeisterung des Autors für die klimafreundliche Stromerzeugung aus Wasserkraft. Insbesondere besteht die Motivation sich näher mit Planungskonzepten im Bereich der Kleinwasserkraft auseinanderzusetzen. Als weitere Veranlassung zu dieser Themenwahl ist die gegebene Situation am elterlichen Bergbauernhof (im Weiteren als „*Schrottbauerhof*“) in der Weststeiermark zu nennen, dessen Stromversorgung, trotz der seit 1972 vorhandenen Anbindung an das regionale Stromnetz, durch Witterungseinflüsse (Windbruch etc.) jährlich im Schnitt 2 bis 3-mal für mehrere Tage ausfällt. Um die Grundversorgung des Hofes vor allem in der kalten Jahreszeit (Heizungsbetrieb, Kommunikation) durchgehend aufrecht zu erhalten, soll nun anhand dieser Arbeit ein konzeptioneller Lösungsansatz zur Eigenversorgung mittels einer Kleinwasserkraftanlage erarbeitet werden. Die Ausarbeitung einer möglichen Ausführungsvariante soll mittels *MS-Excel* erfolgen, wobei die technische Auslegung und die wirtschaftliche Beurteilung dabei im Fokus stehen.

Bei der Neuentwicklung dieses Projektes soll auch die historische Wasserkraftnutzung am „*Schrottbauerhof*“ Berücksichtigung finden. Im Jahr 1953 wurde eine Kleinwasserkraftanlage am Hof in Betrieb genommen, welche das Anwesen rd. 20 Jahre lang mit Gleichstrom versorgte. Die *Bezirkshauptmannschaft Deutschlandsberg* hat dem Autor dankenswerter Weise den Zugang zu einschlägigen Bescheiden sowie Plandarstellungen und technischen Beschreibungen zur betreffenden Altanlage ermöglicht. Im nachfolgenden Unterabschnitt wird die Altanlage näher dargestellt.

Altanlage

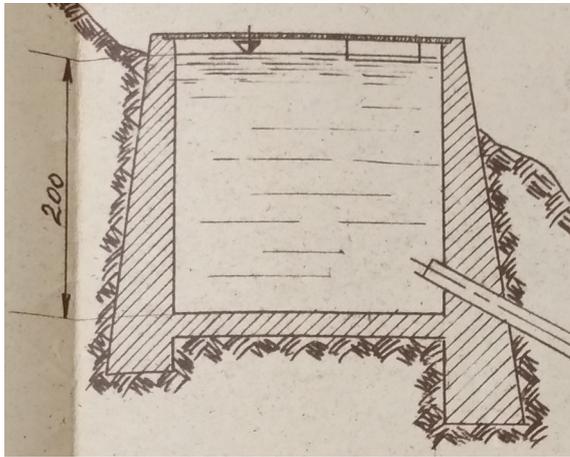
Die Altanlage wurde in vollem Umfang am Grundstück des *Schrottbauerhofes* errichtet (siehe Abb. 1.1). Als Triebwasser für die Anlage diente die Schüttung einiger Quellen mit einer mittleren Wasserführung von 3,6 l/s. Diese Quellen liegen etwa 400 m entfernt vom Hof und wurden mittels eines offenen Erdgerinnes in ein betoniertes Wasserschloss von 33 m³ Fassungsvermögen geleitet. Die Ausstattung des Wasserschlosses umfasste einen Einlaufsaugkorb für die Druckrohrleitung, einen Überlauf sowie einen Grundablass. Vom Wasserschloss ausgehend führte eine 110 m lange Druckrohrleitung (120 mm Innendurchmesser) aus Stahlrohren über rd. 60 m Rohfallhöhe zu einer Pelton-Turbine der Firma *Brüder Proske, Steyr*. Der Ausbaudurchfluss wurde mit 10 l/s angesetzt, wodurch der Gleichstromgenerator eine Leistung von 5 kW erbrachte. Die Regelung der Leistung erfolgte über die Nadeldüse der Pelton-Turbine, welche mittels Seilzug vom Wohnhaus aus betätigt werden konnte. Die erzeugte elektrische Energie wurde über eine auf Holzmasten geführten Freileitung zum Wohnhaus und Wirtschaftsgebäude übertragen. Dort wurden 20 Lampen und ein in der Landwirtschaft genutzter Motor mit 4 PS betrieben. [6]



Abb. 1.1: Lageplan aus dem Jahr 1951 [6]

Der heutige Bestand der Altanlage umfasst das Wasserschloss (Abb. 1.2) und das zur Wasserführung angelegte Erdgerinne. Die Turbine sowie die Druckrohrleitung wurden nach der Stilllegung der Anlage im Jahr 1972 verkauft. Das Wasserschloss wird derzeit zur Haltung von Fischen für den Eigenbedarf genutzt, deshalb liegen keine Aufnahmen im entleerten Zustand vor. Das gesamte Fassungsvermögen des Wasserschlosses beträgt 33 m³, wobei das aktive Speichervolumen mit 25 m³ angegeben wird. Erfahrungen in der Praxis

haben gezeigt, dass die abgesetzten Feinsedimente einmal jährlich über den Grundablass aus dem Wasserschloss gespült werden müssen.



(a) Querschnittdarstellung aus dem Jahr 1951 [6]



(b) Fotoaufnahme im Jahr 2018

Abb. 1.2: Wasserschloss

1.2 Aufbau und Methodik der Arbeit

Um die Zielsetzungen dieser Masterarbeit zu erfüllen, werden im Kapitel 2 wesentliche Inhalte zur Hydrologie und Hydraulik, die im Zusammenhang mit Wasserkraftanlagen stehen, behandelt. Es werden Verfahren zur Messung und Aufzeichnung von Wasserführungen dargestellt und auf die Bereiche Gerinne- und Rohrhydraulik eingegangen.

Die speziellen Anlagenteile von Kleinwasserkraftwerken werden in Kapitel 3 behandelt. Zu diesen Komponenten zählen das Ausleitungsbauwerk, der Sandfang, der Triebwasserweg, das Krafthaus, Sicherheitseinrichtungen und das Rückgabebauwerk. Turbinentypen, periphere Anlagen und der Netzanschluss werden unter dem Punkt elektromechanische Ausrüstung behandelt.

Im Kapitel 4 werden rechtliche Rahmenbedingungen, die im Zusammenhang mit einem Genehmigungsverfahren beim Bau von Kleinwasserkraftwerken stehen, dargestellt. Im Wesentlichen werden Gesetze, Verordnungen und Förderungsmöglichkeiten auf den drei Ebenen Europarecht, Bundesrecht und steiermärkisches Landesrecht skizziert. Den Abschluss des vierten Kapitels bildet die wirtschaftliche Betrachtung von Kleinwasserkraftwerken. Es sollen sämtliche Grundlagen dargelegt werden, welche im Bereich der finanziellen Analyse angesiedelt sind, wie beispielsweise die Berechnung des internen Zinsfußes oder der dynamischen Amortisationszeit.

Nach Abschluss der oben genannten Punkte wird darauf aufbauend in Kapitel 5 die Entwicklung eines Lösungsvorschlages für eine Kleinwasserkraftanlage am benannten Standort „Schrottbauerhof“ vorgenommen. Im Konkreten werden technische und wirtschaftliche Berechnungen unter Verwendung von *MS-Excel* durchgeführt, wobei die Druckstoßberechnung unter Zuhilfenahme der Software *WANDA 4.5* erfolgt. Die folgenden Inhalte werden dabei abgedeckt:

- Hydrologische Eingangswerte
- Hydraulische Verluste
- Elektromechanisches Equipment
- Leistung und Arbeitsvermögen
- Wirtschaftlichkeitsanalyse

Im abschließenden Kapitel 6 werden die erarbeiteten Ergebnisse hinterfragt und diskutiert. Es sollen auch Empfehlungen hinsichtlich einer möglichen Realisierung des Konzeptes am „Schrottbauerhof“ gegeben werden.

1.3 Einführung zur Wasserkraftnutzung in Österreich

1.3.1 Geschichtlicher Abriss

Die Erzeugung von elektrischem Strom mittels Wasserkraft ist im Wesentlichen zwei Forschern und deren revolutionären Erfindungen zu verdanken. 1849 gelang dem amerikanischen Ingenieur *James B. Francis* die Entwicklung der ersten leistungsfähigen Turbine und 1866 vollendete der deutsche Erfinder *Werner von Siemens* die Entwicklung des elektrischen Generators. [70]

In Österreich sprechen die vorteilhaften Standortbedingungen, wie ausreichend große Niederschlagsmengen in Kombination mit adäquater Reliefenergie, eindeutig für die Nutzung von Wasserkraft. Somit nahm die Erzeugung von hydroelektrischem Strom in Österreich zum Zwecke der Beleuchtung vor rund 130 Jahren in Vorarlberg und Oberösterreich ihren Anfang. Die Stadt Steyr galt 1884 als die erste Stadt Europas, welche mittels Wasserkraft beleuchtet wurde. Nach dem Zerfall der Monarchie 1918, herrschte in Österreich nicht nur Kohlemangel, sondern vor allem auch Arbeitslosigkeit der Bevölkerung vor. Diese Zustände führten dazu, dass 1919 unter Karl Renner der Grundstein zur umfangreichen Nutzung der Wasserkraft gelegt wurde. Seinen Hochpunkt erlangte der Ausbau der österreichischen Wasserkraft in den drei Jahrzehnten nach dem Zweiten Weltkrieg. In der sogenannten Nachkriegs- und Wiederaufbauzeit entstand beispielsweise die Kraftwerksgruppe Kaprun (1955) und das Donaukraftwerk Ybbs-Persenbeug (1959). Die Öffentlichkeit anerkannte das Engagement beim Ausbau der Wasserkraft zur Stromversorgung des Landes als volkswirtschaftlichen Mehrwert in Form von neuen Arbeitsplätzen und Sicherung von Zukunftsperspektiven der nächsten Generation. Wie die in Abb. 1.3 dargestellte Entwicklung des Regelarbeitsvermögens zeigt, wechselten sich stets Phasen vermehrten Ausbaus mit Degenerationsperioden ab. Das durchschnittliche Wachstum des Regelarbeitsvermögens von Wasserkraftanlagen betrug bis Mitte der 1980er-Jahre 1000 GWh pro Jahr. [58, 70, 71]

Ab dem Jahr 1985 ist ein deutlich verlangsamtes Wachstum des Regelarbeitsvermögens zu verzeichnen. Die Einführung der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) und der Beitritt Österreichs zum Europäischen Wirtschaftsraum im Jahr 1994 bewirkten, dass zahlreiche bereits geplante Projekte nicht weiter verfolgt wurden, da sich Genehmigungsverfahren dadurch wesentlich komplexer gestalteten und um Jahre verlängerten. Somit gingen über längere Zeit nur wenig neue Großwasserkraftwerke ans Netz, wie zum Beispiel das Donaukraftwerk Freudenua im Jahr 1998. Diese Entwicklung führte dazu, dass Österreich seit dem Jahr 2001 seinen Strombedarf nicht mehr mittels heimischen Erzeugungskapazitäten abdecken kann und auf Stromimporte aus dem Ausland angewiesen ist. [58]

Die zukünftige Funktion der österreichischen Wasserkraft liegt in der Bereitstellung von Ausgleichs- und Regelenenergie. Darauf begründet sich der derzeitige Trend zur Leistungs-

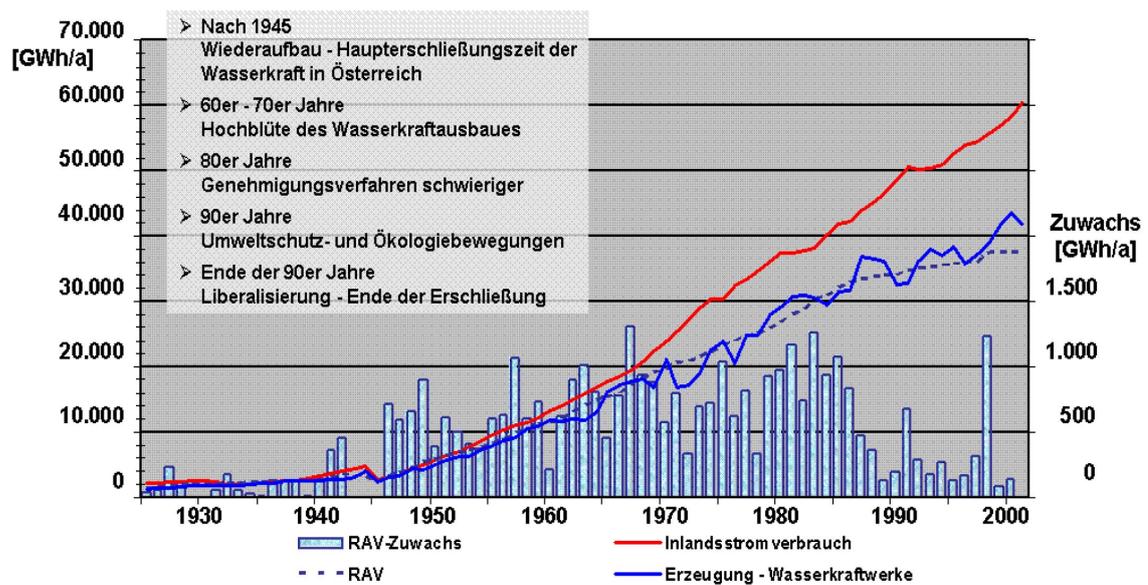


Abb. 1.3: Entwicklung des Regelarbeitsvermögens der österreichischen Wasserkraft [72]

steigerung und Bemühung um Neubauprojekte von Pumpspeicherwerken in den Alpen. Diese Anlagen gelten heute als wichtige Stabilisatoren zur Integration der volatilen und schwer planbaren Energie aus Wind und Sonne. [58, 70]

1.3.2 Status quo der Energieerzeugung

Die aktuelle österreichische Stromproduktion von 70,8 TWh (Stand 2017) ist sehr stark von erneuerbaren Energieträgern geprägt. Mit einem Anteil von rd. 70 % erneuerbarer Energie an der Stromerzeugung befindet sich Österreich innerhalb der Europäischen Union auf Platz eins. Zum Vergleich liegt der benannte Anteil an erneuerbarer Energie in den 28-EU Staaten durchschnittlich bei 29,6 % (Stand 2016). Besonders großen Anteil an der Stromproduktion in Österreich hat die Wasserkraft mit 59,4 %, den zweitgrößten Anteil stellen thermische Kraftwerke mit 30,0 % dar. Wind, Photovoltaik und Geothermie leisten 10,4 % der österreichischen Stromerzeugung. [27, 31, 53]

Der Beitrag der Wasserkraft an der Stromerzeugung kann weiter unterteilt werden in die beiden Anteile aus Groß- und Kleinwasserkraft. Laut *Ökostromgesetz* zählen in Österreich Wasserkraftwerke mit einer Engpassleistung bis einschließlich 10 MW als Kleinwasserkraftanlagen. Solch scheinbar kleine Anlagen leisten aber in Summe einen durchaus beachtlichen Beitrag zur Stromproduktion. Denn derzeit speisen Kleinwasserkraftwerke rd. 5,8 TWh Strom ein und decken damit 8,2 % des österreichischen Strombedarfs. Diese Strommenge entspricht dem Bedarf von rd. 1,66 Mio. Haushalten (über 50 % der Haushalte in Österreich), bei einer Berechnungsgrundlage je Haushalt von durchschnittlich 3500 kWh/a. [25, 49, 56]

Die österreichische Bundesregierung hat mit der *Klima- und Energiestrategie* (im Weiteren als *#mission2030*) umfassende Ziele definiert, um internationale Verträge, wie das *Pariser Klimaschutzübereinkommen* und daraus abgeleitete EU-weite Ziele, auf nationaler Ebene zu erfüllen. Die *#mission2030* dient als Grundlage zum Entwurf des *Erneuerbaren Ausbau Gesetzes* (EAG), welches ab dem Jahr 2020 in Kraft treten soll. Im Bereich der Stromerzeugung wurde in der *#mission2030* das Ziel definiert, bis zum Jahr 2030 den nationalen Gesamtstromverbrauch zu 100 % mittels erneuerbaren Energiequellen im Inland abzudecken. Im Zusammenhang damit steht der Ausbau aller erneuerbaren Energieträger, unter anderem auch jener der Kleinwasserkraft. Auf das Ausbaupotenzial der Kleinwasserkraft wird nachfolgend speziell eingegangen. [17]

1.3.3 Potenzial der Kleinwasserkraft

Welchen Beitrag die österreichische Kleinwasserkraft zur Erreichung der definierten Ziele in der *#mission2030* leisten kann, beschreibt die aktualisierte Wasserkraftpotenzialstudie, welche von *PÖYRY* 2018 durchgeführt wurde. Die Aktualisierung baut auf einer Potenzialstudie aus dem Jahr 2008 auf, welche ebenfalls von *PÖYRY* durchgeführt wurde. Diese wiederum basiert auf einer Studie von *Schiller* aus dem Jahr 1982. Der Fokus dieser Aktualisierung liegt auf der Ermittlung des technisch-wirtschaftlichen Restpotenzials in Österreich. [45]

Nach einer konservativen Schätzung nach Schiller 1982, liegt die Obergrenze des theoretisch nutzbaren Gesamtpotenzials Österreichs bei 75 TWh/a. Das unter den gegebenen technischen und mittleren wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sinnvoll erschließbare Potenzial wird als das technisch-wirtschaftliche Wasserkraftpotenzial bezeichnet und beträgt rd. 56 TWh/a. Der österreichische Kraftwerksbestand der Groß- und Kleinwasserkraft weist ein bereits ausgebautes Potenzial von rd. 40 TWh/a auf, woraus sich ein verbleibendes technisch-wirtschaftliches Restpotenzial von 16 TWh/a errechnet. Dieses setzt sich aus dem Optimierungspotenzial von rd. 1 TWh/a und dem Neuerschließungspotenzial von rd. 15 TWh/a zusammen (vgl. Abb. 1.4 - Säulen 1 bis 4). Hinsichtlich der geographischen Verteilung des Restpotenzials sind in erster Linie die westlichen alpinen Bundesländern sowie Gebiete entlang der Donau in Ober- und Niederösterreich zu nennen. [34]

Das verbleibende Neuerschließungspotenzial darf allerdings nicht nur unter energiewirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet werden. Unter Berücksichtigung diverser Einschränkungen hinsichtlich Kriterien der ökologischen Verträglichkeit, reduziert sich das Neuerschließungspotenzial weiter auf rd. 10 TWh/a (vgl. Abb. 1.4 - Säule 5) und konzentriert sich überwiegend auf Westösterreich. Zu den ökologischen Kriterien, welche den Ausbau der Wasserkraft drosseln, sind folgende Aspekte zu nennen: [34]

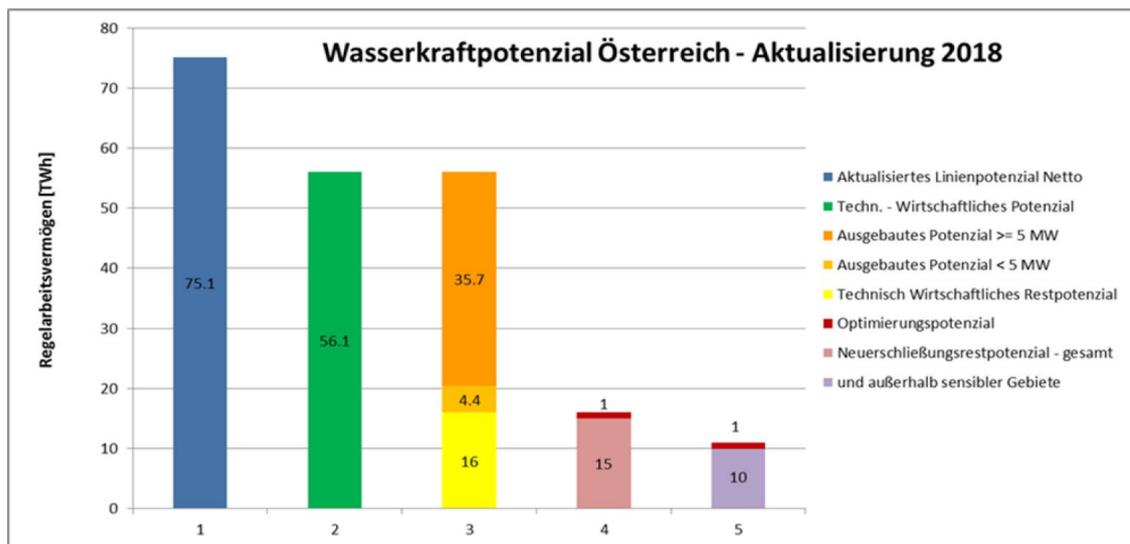


Abb. 1.4: Potenzial der österreichischen Wasserkraft [45]

- UNESCO Welterbestätten
- EU-Wasserrahmenrichtlinie
- Naturschutzgebiete
- Natura 2000 Gebiete
- Regionalprogramme der Bundesländer

Insbesondere das in der EU-Wasserrahmenrichtlinie enthaltene Verschlechterungsverbot sieht den Schutz und die Verbesserung der aquatischen Ökosysteme in Fließgewässerstrecken vor. Damit begründet sich die Reduktion des Neuerschließungspotenzials, da sich viele mögliche Standorte von Wasserkraftanlagen in Gewässerstrecken mit sehr gutem ökologischen Zustand befinden. Weitere hochsensible Gebiete sind beispielsweise Nationalparks (z.B. Gesäuse, Hohe Tauern, Kalkalpen) und UNESCO Welterbestätten wie etwa die Wachau entlang der Donau. [34]

Da der Druck auf verbleibende Restpotenziale zunehmen wird, ist bei der Planung und Genehmigung von neuen Wasserkraftanlagen ein hohes Augenmerk auf die Erfüllung von ökologischen Ansprüchen zu legen. Denn von den oben genannten 10 TWh/a an Neuerschließungspotenzial werden immerhin 2 bis 3 TWh/a als realisierbares Restpotenzial im Kleinwasserkraft-Bereich angegeben. Ein weiterer Fokus im Bereich der Kleinwasserkraft wird die Revitalisierung stillgelegter Anlagen, sowie die Modernisierung und Leistungsoptimierung bestehender Kraftwerke sein. [4, 34, 47]

Kapitel 2

Wasserkraft – Grundlagen

2.1 Hydrologische und hydraulische Grundlagen

2.1.1 Hydrologie

Messung des Wasserdargebotes

Da die Wasserkraftnutzung bekanntermaßen der standortabhängigen Wasserführung unterliegt, ist als erster unerlässlicher Schritt die Aufzeichnung des Wasserdargebotes am gewählten Standort durchzuführen. Für die Planung einer Wasserkraftanlage müssen die Abflussschwankungen im Jahresverlauf in Form von **Jahresganglinien**, im Idealfall über die Dauer von mehreren Jahren, bekannt sein. Hydrologische Aufzeichnungen sind für manche Standorte vom *Hydrographischen Dienst Österreich* dokumentiert. Jedoch sind in den meisten Fällen keine solchen Aufzeichnungen verfügbar, wodurch vom Projektwerber selbst eine kontinuierliche Abflussbeobachtung durchzuführen ist. Zur Abflussmessung bieten sich mehrere Feldmethoden an. [54]

Zielführend für mittlere bis große Flüsse ist die Anwendung der **Fließgeschwindigkeits-Querschnittsfächen-Methode**. Um den Fließquerschnitt zu definieren, wird ein Messprofil in einer geraden, möglichst unbeeinflussten Fließstrecke festgelegt. In diesem definierten Querschnittprofil wird die Fließgeschwindigkeit als Durchschnittsgeschwindigkeit gemessen. Messinstrumente zur indirekten Durchflussmessung sind beispielsweise elektromagnetische Induktionsmessgeräte, hydrometrische Flügel oder Staurohre. Die Flächen- und Durchflussmessungen müssen für mehrere Wasserführungen durchgeführt werden, ehe eine graphische Korrelation zwischen Wasserspiegel und Abfluss, ein sogenannter Pegelschlüssel, erstellt werden kann. Anhand des Pegelschlüssels wird in weiterer Folge eine mathematische Funktion in folgender Form entwickelt: [54]

$$Q = a \cdot (H + B)^n \quad (2.1)$$

wobei:

- Q ... Abfluss [m^3/s]
 $a; n$... Konstante [-]
 H ... Wasserstand [m]
 B ... Korrekturfaktor [-]

Mit Hilfe dieser Funktion kann der Abfluss aus kontinuierlich gemessenen und automatisch aufgezeichneten Wasserständen berechnet werden. Durch den Einfluss diverser Störgrößen kommt es im Laufe der Zeit zu Abweichungen vom aufgestellten Pegelschlüssel. Beispielsweise kann sich der Fließquerschnitt durch Erosion oder Anlandung verändern. Auch kann die Sohl- und Flussbettraugigkeit durch saisonbedingte Verkräutung fluktuieren. Werden durch Kontrollmessungen zu große Abweichungen vom Pegelschlüssel festgestellt, muss eine neue Abflusskurve erstellt werden. [51]

Bei kleinen Gerinnen (bis etwa $4 \text{ m}^3/\text{s}$) empfiehlt sich zur Durchflussmessung die Installation eines **temporären Messwehres**. Die Geometrie des Überfalls ist standardisiert und kann als V-förmiger, rechteckiger oder trapezförmiger Ausschnitt ausgeführt werden. Besonders V-förmige Überfälle liefern sehr exakte Messergebnisse bei sehr kleinen Abflussmengen. Gemessen wird die Höhe des Wasserspiegels in Bezug auf den Fußpunkt des Wehrüberfalls (Wehrkrone). Über eine bekannte Wasserstand-Durchfluss-Beziehung kann die aktuelle Wasserführung bestimmt werden. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgt automatisiert mittels Drucksonde. Ein elektronischer Datensammler speichert die Messwerte im zweckmäßigen Zeitintervall. [51, 54]

Zur Messung von äußerst geringen Abflüssen (bis etwa 50 l/s), kommt die **volumetrische Messung** zur Anwendung. Dabei wird der Abfluss für eine kurze Zeitdauer in einem Gefäß aufgefangen. Der Durchfluss berechnet sich mittels einer Division des Flüssigkeitsvolumens durch die gemessene Zeitdauer. Während der Messung muss allerdings sichergestellt sein, dass ein möglichst konstanter Abfluss vorherrscht. [54]

Neben den direkten und indirekten Messverfahren ist es auch möglich auf Aufzeichnungen von anderen Messstellen im selben Fließgewässer oder eines ähnlichen, nahe gelegenen Flusses zurückzugreifen. Anhand dieser fremden Daten kann einer Zeitreihe für den betreffenden Flussabschnitt extrapoliert werden. [54]

Abflusscharakteristika

Die von Messstationen chronologisch aufgezeichneten, standortspezifischen Datensätze müssen zur weiteren Verwendung der Größe nach sortiert und dargestellt werden. Diese Darstellung wird als **Abflussdauerlinie** (Abb. 2.1) bezeichnet und beschreibt die Dauer in welcher der Abfluss einen bestimmten Wert erreicht oder überschreitet. [54]

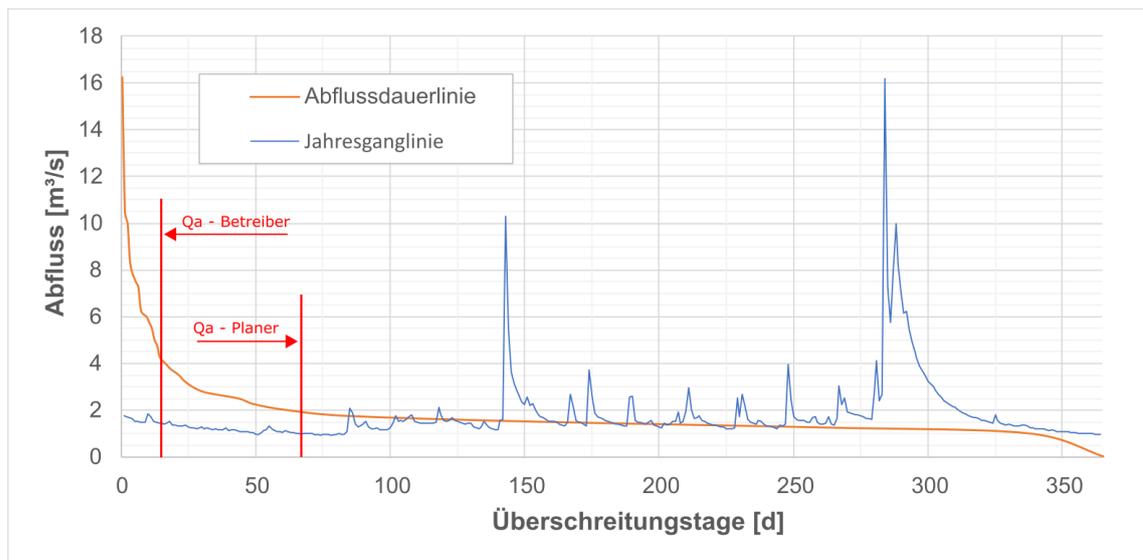


Abb. 2.1: Abflussdauerlinie mit zugehöriger Jahresganglinie der „Schwarzen Sulm“, Pegel Schwanberg – Weststeiermark, Jahr 2015 (erstellt mit Daten aus [40])

Die Ausbauleistung und der Turbinentyp einer Wasserkraftanlage wird anhand einer solchen Abflussdauerlinie ausgelegt. Die Festlegung des Ausbaudurchflusses ist das Ergebnis eines Optimierungsprozesses, bei welchem unterschiedliche Kombinationen von Ausbaudurchflüssen und Turbinentypen untersucht werden. Typische Werte für die Ausbaumassermenge in der Kleinwasserkraft liegen zwischen der 2,0 bis 2,5-fachen Menge des Mittelwasserabflusses. Naturgemäß möchten Anlagenbetreiber den Ausbaudurchfluss möglichst hoch ansetzen, um das Wasserdargebot des Fließgewässers im größtmöglichen Umfang nutzen zu können (Abb. 2.1). Dies erfordert allerdings einen Turbinentyp mit gutem Wirkungsgradverlauf im Teillastbereich. Zusätzlich wirkt sich eine hohe Ausbauleistung auch entsprechend auf die Investitionssumme aus. Im Gegensatz dazu, setzen Planer den Ausbaudurchfluss niedriger an. Dies begründet sich dadurch, dass vorhandene Abflussaufzeichnungen stets Unsicherheiten (Nassjahre, Trockenjahre) enthalten. Außerdem müssen auch die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels mit einbezogen werden, die sich aber nur anhand von Simulationsmodellen abschätzen lassen. [54]

Ausbaugrad

Ist der Ausbaudurchfluss festgelegt, lässt sich der Ausbaugrad einer Anlage berechnen. Bei Laufwasserkraftwerken beschreibt der Ausbaugrad das Verhältnis zwischen Ausbaudurchfluss Q_a und Mittelwasserabfluss MQ : [35]

$$f_a = \frac{Q_a}{MQ} \quad [-] \quad (2.2)$$

Der Ausbaugrad eines Speicherkraftwerkes ist durch das Verhältnis zwischen Speichervolumen V_{Sp} und Jahreswasserfracht des Zuflusses V_{Zu} definiert: [35]

$$f_a = \frac{V_{Sp}}{V_{Zu}} \quad [-] \quad (2.3)$$

wobei:

f_a ... Ausbaugrad [-]

Q_a ... Ausbaudurchfluss [m^3/s]

MQ ... Mittelwasserabfluss [m^3/s]

V_{Sp} ... Speichervolumen [m^3]

V_{Zu} ... Jahresfracht des Zuflusses [m^3]

Pflichtwasserabgabe

Durch die Wasserentnahme aus einem Fließgewässer kommt es entlang der Ausleitungsstrecke zu einer starken Veränderung der natürlichen Abflussverhältnisse, wodurch die ökologische Funktionsfähigkeit des betroffenen Fließabschnittes beeinträchtigt wird. Aus diesem Grund wird in Österreich für diese sogenannten Restwasserstrecken anhand der *Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer* [9] (siehe auch Abschnitt 4.1.2) der ökologische Zustand von Fließgewässern beurteilt und daraus eine Mindestdotationswassermenge abgeleitet. Aus ökologischer Sicht ist eine dynamische Pflichtwasserabgabe einer gestaffelten oder konstanten Abgabe vorzuziehen, denn diese gibt die Dynamik eines Fließgewässers im Jahresverlauf wieder (Abb. 2.2). Durch eine dynamische Dotierung der Restwasserstrecke bleiben kleinräumige morphologische Prozesse erhalten. Für die Aquafauna hat dies den großen Vorteil, dass Hochwässer durch einen langsamen Anstieg des Abflusses angekündigt werden. [13, 35, 50]

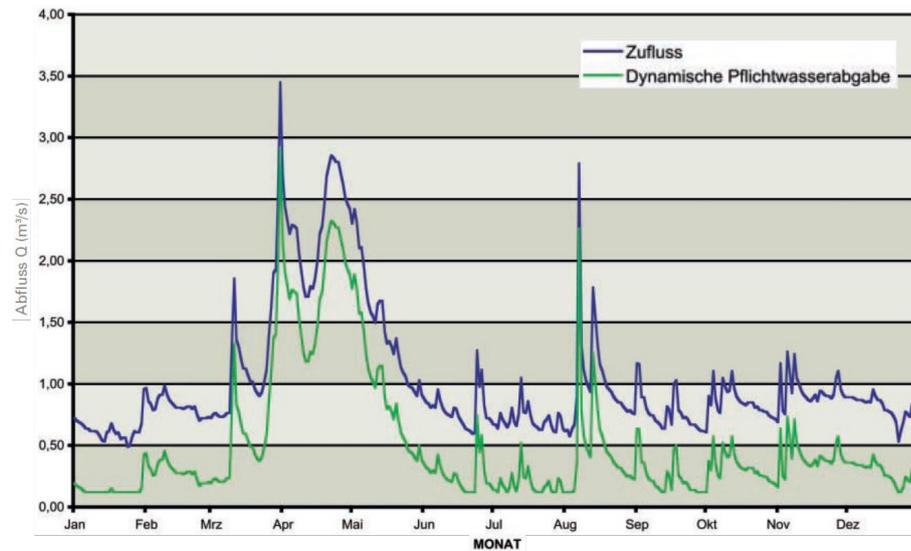


Abb. 2.2: Exemplarischer Verlauf einer dynamischen Pflichtwasserabgabe [50]

2.1.2 Rohrhydraulik

Im Allgemeinen kann mittels der **Bernoulligleichung** für reale, reibungsbehaftete Strömung das Fließverhalten einer Flüssigkeit zwischen zwei Querschnitten 1 und 2 in einer Druckrohrleitung beschrieben werden: [18]

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_v \quad (2.4)$$

wobei:

$z_1; z_2$... geodätische Höhen

$\frac{p_1}{\rho \cdot g}; \frac{p_2}{\rho \cdot g}$... Druckhöhen an den beiden Schnitten

$\frac{v^2}{2g}$... Geschwindigkeitshöhe, wobei: $v_1 = v_2$

v ... mittlere Fließgeschwindigkeit aus: $v = Q/A$

h_v ... Energieverlusthöhe

Die zentrale Fragestellung der Druckrohrberechnung ist die Ermittlung der Energieverlusthöhe h_v . Diese setzt sich aus den beiden Anteilen der Reibungsverlusthöhe $h_{v,r}$ und der lokalen Verlusthöhen $h_{v,i}$ zusammen. Im Folgenden werden diese beiden Anteile näher beschrieben. [18]

Reibungsverluste

Die auftretenden Reibungsverluste resultieren aus der Reibung zwischen der Flüssigkeit und der Rohrwand (äußere Reibung) und der wirkenden Schubspannungen im Flüssigkeitsmedium (innere Reibung). Einflussgrößen auf die Reibungsverluste sind die Wandbeschaffenheit (rau, glatt) und der Strömungszustand (laminar, turbulent). Nach *Darcy* und *Weisbach* berechnet sich die Reibungsverlusthöhe zu: [18]

$$h_{v,r} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad [m] \quad (2.5)$$

wobei:

$h_{v,r}$... Verlusthöhe zufolge Rohrreibung [m]

λ ... Widerstandsbeiwert [-]

L ... Rohrlänge [m]

d ... Rohrdurchmesser [m]

v ... Fließgeschwindigkeit [m/s]

g ... Erdbeschleunigung [m/s²]

Zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes λ kann die Gleichung nach *Colebrook* und *White* (Glg. 2.6) herangezogen werden (Auswertung siehe Abb. 2.3). Diese Gleichung ist für den Übergangsbereich zwischen hydraulisch glattem und hydraulisch rauem Strömungsverhalten konzipiert, jedoch ist sie unter den Bedingungen $k \rightarrow 0$ (glatt) und $Re \rightarrow \infty$ (rau) auch für hydraulisch glattes bzw. raueres Verhalten in vollem Umfang gültig: [18]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,0 \cdot \lg \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k/d}{3,71} \right) \quad (2.6)$$

wobei:

Re ... Reynoldszahl [-]

k/d ... relative Rauheit [-]

k ... äquivalente Sandrauigkeit [mm]

Die Reynoldszahl beschreibt dabei den Einfluss der Fließgeschwindigkeit, des Rohrdurchmessers und der Zähigkeit der Flüssigkeit auf das hydraulische Strömungsverhalten: [54]

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad [-] \quad (2.7)$$

wobei:

ν ... kinematische Viskosität; bei 10° C: $1,31 \cdot 10^{-6}$ [m²/s]

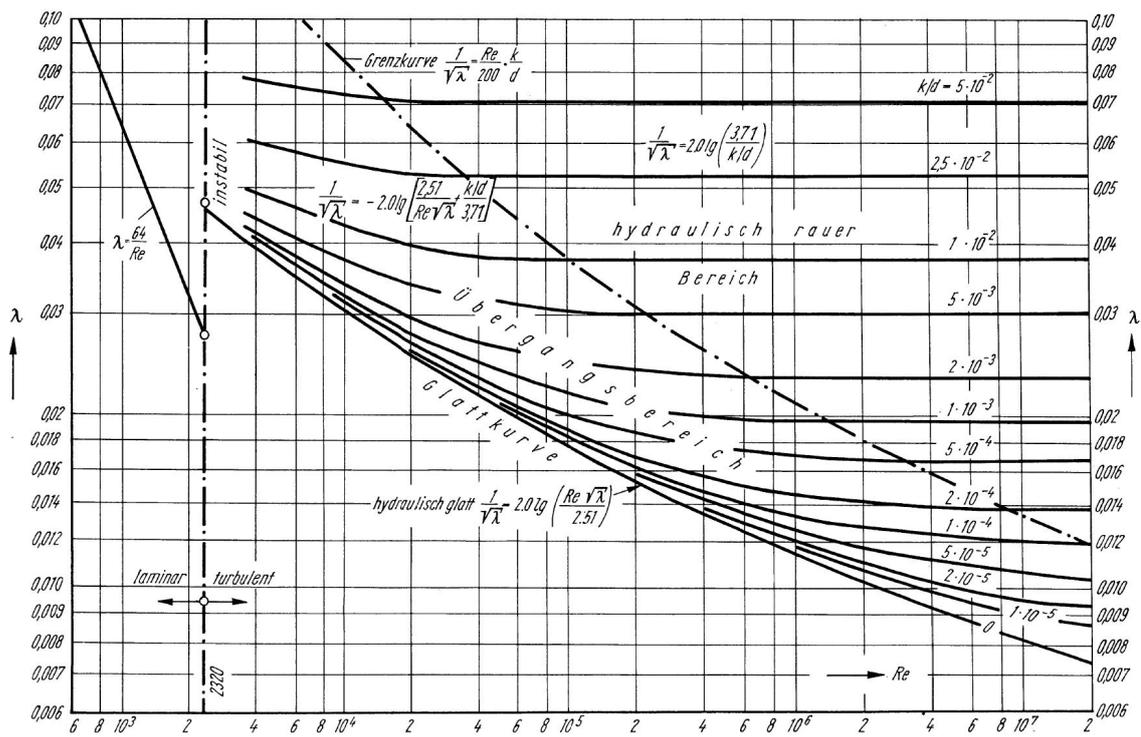


Abb. 2.3: Diagramm nach Moody, zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes λ [18]

Lokale Verluste

Lokale Verluste, verursacht durch Rechen, Formstücke (Bögen, Abzweiger) oder Armaturen (Ventile, Hähne, Schieber), sind abhängig von deren geometrischer Ausbildung. Daher werden für Armaturen und dergleichen empirisch ermittelte Verlustbeiwerte (ζ_i), beispielsweise nach [18], angegeben. Die Berechnung der Verlusthöhe erfolgt zu:

$$h_{v,i} = \zeta_i \cdot \frac{v_i^2}{2g} \quad [m] \quad (2.8)$$

wobei:

$h_{v,i}$... Verlusthöhe zufolge lokaler Widerstände [m]

ζ_i ... Verlustbeiwert [-]

v_i ... Fließgeschwindigkeit an der Stelle i [m/s]

g ... Erdbeschleunigung [m/s²]

2.1.3 Druckstoßberechnung

In Druckrohrleitungen kommt es durch das Schließen/Öffnen von Armaturen zu instationären Fließvorgängen (Verzögerung/Beschleunigung der Fließgeschwindigkeit), wodurch die Bewegungsenergie des Triebwassers in Druckenergie umgewandelt wird. Dieser Vorgang wird als *Druckstoß* bezeichnet und muss bei der Bemessung von Druckrohrleitungen berücksichtigt werden. [35]

Als Berechnungsgrundlage für die Höhe des Druckstoßes dient der Extremfall eines plötzlichen Schließvorganges einer Absperrarmatur unmittelbar vor der Turbine. In diesem Fall breitet sich die Überdruckwelle vom Absperrorgan ausgehend, entlang der Rohrleitung bis zur nächsten freien Wasseroberfläche aus und wird dort reflektiert. Die Zeitdauer bis zur Reflexion an der freien Wasseroberfläche wird als **Laufzeit** T_L bezeichnet und berechnet sich zu: [35]

$$T_L = l/a \quad [s] \quad (2.9)$$

wobei:

l ... Rohrlänge [m]

a ... Druckwellengeschwindigkeit [m/s]

Die Zeitdauer, welche die Druckwelle benötigt, um zum Absperrorgan zurückzukehren wird als **Reflexionszeit** T_R bezeichnet und beträgt:

$$T_R = 2 \cdot T_L = 2 \cdot l/a \quad [s] \quad (2.10)$$

Wird das Verschlussorgan schlagartig geschlossen, sodass dessen Schließzeit kürzer ist als die Reflexionszeit ($t_S \leq T_R$), kommt es zu keiner Entlastung durch die reflektierte Unterdruckwelle an der Armatur. In diesem Fall bildet sich der Druckstoß mit maximaler Höhe aus, dies ist der sogenannte **volle Joukowsky-Stoß**: [35]

$$\max h_{a,jou} = \pm \frac{a \cdot \Delta v}{g} \quad [m] \quad (2.11)$$

wobei:

Δv ... Geschwindigkeitsänderung [m/s]

Für den Fall $t_S > T_R$ wird der Joukowsky-Stoß durch die vorzeitige Überlagerung mit der reflektierten Unterdruckwelle an der Stelle der Absperrarmatur abgemindert. Unter Annahme eines linearisierten Schließzeitgesetzes berechnet sich der **reduzierte Joukowsky-Stoß** zu: [35]

$$\max h_a \approx \frac{a \cdot \Delta v}{g} \cdot \frac{T_R}{t_S} \quad [m] \quad (2.12)$$

Neben der Schließzeit hat auch die Steifigkeit des Rohrmaterials einen erheblichen Einfluss auf die Höhe des Druckstoßes. Die mechanischen Eigenschaften des Materials finden Eingang in der Berechnung der **Druckwellengeschwindigkeit** a : [35]

$$a = \frac{\sqrt{E_F / \varrho_F}}{\sqrt{\frac{E_F}{E_R} \cdot \frac{d_i}{s} \cdot k_q + 1}} \quad [m/s] \quad (2.13)$$

wobei:

E_F ... Elastizitätsmodul der Flüssigkeit [N/m²]

ϱ_F ... Dichte der Flüssigkeit [kg/m³]

E_R ... Elastizitätsmodul des Rohrmaterials [N/m²]

d_i ... Innendurchmesser [mm]

s ... Wanddicke [mm]

k_q ... Faktor infolge Querdehnungseinfluss [-]

2.1.4 Gerinnehydraulik

Der Abfluss in einem offenen Gerinne kann mittels einer sogenannten *Fließformel* bestimmt werden. Diese beruht entweder auf der Übertragung von wissenschaftlichen Erkenntnissen aus der Rohrhydraulik oder auf empirischen Ansätzen und Versuchsergebnissen. Beide beschreiben den mathematischen Zusammenhang zwischen der mittleren Fließgeschwindigkeit v und den geometrischen Parametern des Gerinnes wie der Wassertiefe h , der Querschnittsform und -größe A , dem benetzten Umfang l_u , dem Sohlgefälle I und der Rauheit der Gerinnewand. Des Weiteren muss für die Berechnung vorausgesetzt werden, dass eine stationäre, gleichförmige Fließbewegung innerhalb des betrachteten Abschnittes vorherrscht. Das bedeutet, dass das Sohlgefälle I_0 , das Wasserspiegelgefälle I_W und das Energiegefälle I_E gleich groß sind und daher parallel zueinander verlaufen. [18]

Universelle Fließformel

Für die *Universelle Fließformel für offene Gerinne* gelten dieselben Prinzipien wie bereits in der Rohrhydraulik erläutert. Die Energieverluste setzen sich aus der inneren Reibung (ausgedrückt durch die *Reynolds Zahl*) und der Wandreibung (ausgedrückt durch die relative Rauheit k/d_{hy}) zusammen. Somit ist Gleichung 2.6 sinngemäß auf Gerinneströmungen anwendbar. Allerdings gilt es das unterschiedliche Widerstandsverhalten, bedingt durch die Abweichung des Gerinnequerschnittes vom Kreisprofil, zu berücksichtigen. Dies geschieht durch Formbeiwerte f_g (glatt) und f_r (rau), wodurch sich die **Universelle Fließformel für offene Gerinne** wie folgt ergibt: [18]

$$v = -4,0 \cdot \lg \left(\frac{f_g \cdot \nu}{8 \cdot r_{hy} \cdot \sqrt{2g \cdot r_{hy} \cdot I}} + \frac{k/r_{hy}}{4 \cdot f_g} \right) \cdot \sqrt{2g \cdot r_{hy} \cdot I} \quad (2.14)$$

wobei:

v ... mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

$f_g; f_r$... Formbeiwerte siehe Tab. 2.1

r_{hy} ... hydraulischer Radius; $r_{hy} = \frac{F}{U}$ [-]

I ... Energiegefälle [-]

g ... Erdbeschleunigung [m/s²]

k ... absolute hydraulische Rauheit [mm]

Die *universelle Fließformel* lässt sich vereinfachen, da sehr häufig der Einfluss der Wandreibung bei der hydraulischen Bemessung von offenen Gerinnen überwiegt. Der erste Summand im Argument des Logarithmus in Gleichung 2.14 kann entfallen, wenn das Verhältnis $k/r_{hy} \geq 10^{-4}$ beträgt. Mit der Einführung des Beiwertes C_r gelangt man schließlich zur **vereinfachten universellen Fließformel**: [18]

$$v = \left(C_r + 17,71 \cdot \lg \frac{r_{hy}}{k} \right) \sqrt{r_{hy} \cdot I} \quad (2.15)$$

wobei:

C_r ... Beiwert siehe Tab. 2.1

Tab. 2.1: Formbeiwerte und C_r -Wert [18]

Gerinneform	f_g	f_r	C_r
Rechteck $b = h$	2,80	3,45	20,19
Rechteck $b = 2h$	2,90	3,30	19,85
Rechteck $b \rightarrow \infty$	3,05	3,05	19,24
Rechteck Mittelwert	2,90	3,20	19,61
Halbkreis $h = d/2$	2,60	3,60	20,52
Trapez Mittelwert	2,90	3,16	19,52
Kreisrohr	2,51	3,71	20,75

Empirische Fließformel

Da sich die Anwendung der *universellen Fließformel* relativ aufwendig gestaltet, hat sich für erste Näherungen die empirische Fließformel nach **Gauckler-Manning-Strickler** durchgesetzt. Diese erfordert eine möglichst genaue Kenntnis über den Rauheitsbeiwert k_{St} der Gerinnebegrenzungen, welche zumeist aber nur abgeschätzt werden können. Dieser Ansatz ist somit als Überschlagsformel zu verstehen, der sich gut für Querschnitte mit einfacher Geometrie wie Rechteck, Trapez oder Kreis eignet: [18]

$$v = k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (2.16)$$

wobei:

v ... mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

k_{St} ... Stricklerbeiwert [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]

r_{hy} ... hydraulischer Radius [m]

I ... Energiegefälle [-]

Hydraulisch günstige Fließquerschnitte

Bei offenen Gerinnen kann die Querschnittform so entworfen werden, dass entweder der Fließquerschnitt und das Energiegefälle ein Minimum annehmen oder der Abfluss ein Maximum annimmt. Somit kann eine Querschnittoptimierung folgende Aspekte zum Ziel haben: Aushubmasse reduzieren, Oberfläche der Gerinnewandung minimieren oder hydraulische Energieausbeute maximieren.

Der **Halbkreis** als Querschnittprofil gilt als die hydraulisch günstigste Variante. Beim Vergleich mit anderen Profilen mit gleicher Fließfläche, hat der Halbkreis den geringsten benetzten Umfang und weist daher den kleinsten Widerstand zufolge Wandreibung auf. Alle weiteren Querschnittformen (Rechteck, Trapez, Dreieck) gelten dann als hydraulisch günstig, wenn sie bestmöglich dem Halbkreis nachempfunden werden (Abb. 2.4). [18]

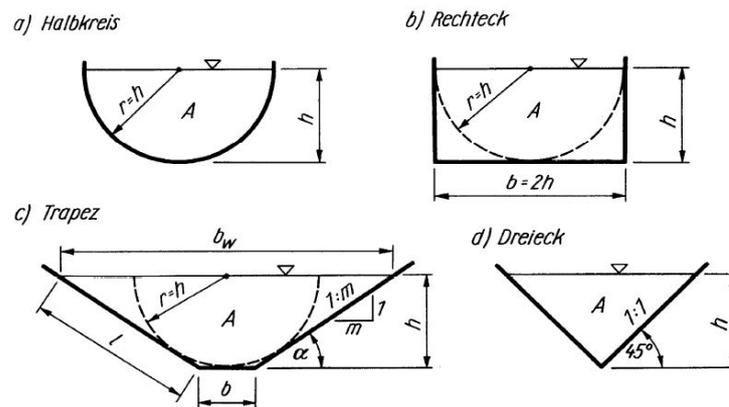


Abb. 2.4: Hydraulisch günstige Gerinnequerschnitte [18]

2.2 Kraftwerkstypen

Eine Gliederung von Wasserkraftanlagen lässt sich hinsichtlich vieler Eigenschaften und Kriterien, wie z.B. der Nutzfallhöhe, der installierten Leistung oder der Betriebsweise, durchführen [35]. In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Gruppierung in Kraftwerkstypen nach dem technischen Anlagenkonzept wie folgt:

1. Laufkraftwerke
 - a) Flusskraftwerke
 - b) Ausleitungskraftwerke
2. Speicherkraftwerke
3. Pumpspeicherkraftwerke

Für alle Anlagentypen gilt dasselbe physikalische Grundprinzip der Energieumwandlung, welches auf dem Potenzialunterschied zwischen zwei freien Wasseroberflächen beruht. Das Wasser wird durch ein künstlich angelegtes Triebwasserleitungssystem einer Turbine zugeführt, diese wandelt das Energiepotenzial des fließenden Wassers in mechanische Energie um. Das dabei entstehende Drehmoment treibt den Generator an, in welchem schlussendlich die Umwandlung in elektrische Energie stattfindet. Das Entwurfsziel ist die größtmögliche elektrische Energieausbeute unter Minimierung der hydraulischen Verluste und der Konstruktionskosten. [54]

Die oben gelisteten Kraftwerkstypen sind in Abb. 2.5 prinzipiell dargestellt und werden im Folgenden näher erörtert. Auf deren Relevanz sowie Anwendung und Funktionsweise in der Kleinwasserkraft, wird im Abschnitt 2.2.4 eingegangen.

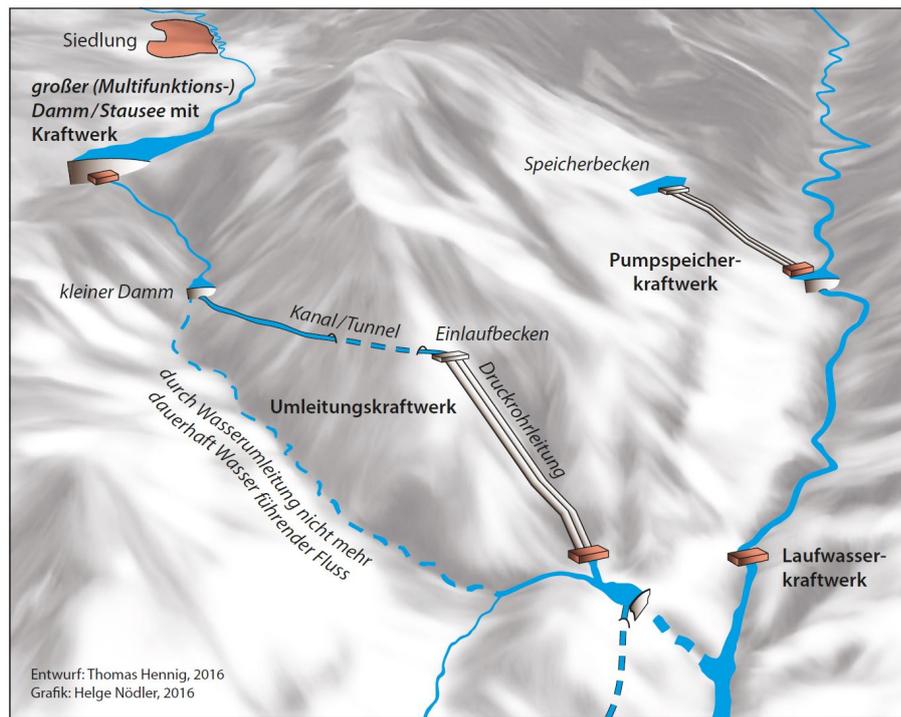


Abb. 2.5: Darstellung der Kraftwerkstypen [39]

2.2.1 Laufkraftwerke

Laufkraftwerke produzieren permanent elektrischen Strom, sogenannte Grundlastenergie, indem das natürliche Wasserdargebot eines Fließgewässers, ohne dessen Speicherung, abgearbeitet wird. Zu beachten ist die schwankende Wasserführung im Jahresverlauf, welche sich auf die produzierbare Energiemenge auswirkt. Charakteristisch für Laufkraftwerke sind geringe Fallhöhen bis etwa 15 m, häufig eingesetzte Turbinen-Typen sind vor allem Kaplan-, Rohr-, Straflo- und Durchstömturbinen. [35, 48]

Flusskraftwerke

Ein Flusskraftwerk wird direkt als Querbauwerk in den Flusslauf gebaut. Hauptbestandteile sind Stauwehr, Spülschütz, Krafthaus sowie eine Fischwanderhilfe. Dieser Kraftwerkstyp ist besonders für Flüsse mit großem Durchflussvolumen bei geringem Sohlgefälle ($I_S < 2 ‰$) geeignet und daher überwiegend im Feld der Großwasserkraftanlagen anzutreffen. [35]

Ausleitungskraftwerke

Bei dieser Bauweise dient eine Stauanlage im Fließgewässer, in Kombination mit einer Wasserfassung, zur Ausleitung des Triebwassers. Eine Ausleitung ist auch ohne Aufstau möglich (siehe auch Abschnitt 3.1.1). Der Triebwasserweg kann je nach topographischen Gegebenheiten eine Länge von wenigen Metern bis hin zu etlichen Kilometern aufweisen und aus hydraulischer Sicht kann das Triebwasser im Freispiegel- oder unter Druckabfluss geführt werden. Um eine Verlandung des Triebwasserweges zu verhindern und Turbinenabrasion zu verringern ist in häufigen Fällen ein Entsanderbauwerk im Anschluss an die Wasserfassung angeordnet. Im Krafthaus sind meist Francis-Turbinen anzutreffen, aber auch die unter Laufkraftwerke genannten Turbinentypen, sowie auch Pelton-Turbinen, finden Anwendung. Im Hinblick auf die Bauausführung ist die Errichtung des Krafthauses in einer trockenen Baugrube sehr vorteilhaft. Hingegen stellen zum Teil umfangreiche Erdarbeiten für die Zu- und Ableitungskanäle zum Kraftwerk erhebliche Zusatzkosten dar. Ein weiterer Problempunkt dieser Bauweise stellt die sogenannte Restwasserstrecke zwischen der Stauanlage und dem Rückgabebauwerk dar. Für diesen Fließabschnitt muss eine Mindestwasserabgabe sichergestellt werden, um ökologischen Ansprüchen gerecht zu werden (siehe Abschnitt 2.1.1). [35]

2.2.2 Speicherkraftwerke

Je nach Größe des Speicherbeckens wird die unregelmäßige Wasserführung des Zuflusses über den Zeitraum eines Tages, einer Woche, eines Monats oder eines Jahres gesammelt. Dies bietet den betrieblichen Vorteil, dass Triebwasser in kontrollierter Menge und bedarfsorientiert zu Verbrauchsspitzenzeiten der Stromproduktion zugeführt werden kann. Typische Spitzenlastkraftwerke in den Alpen können ihre Leistung binnen weniger Minuten abrufen und auch in einem weiten Bereich flexibel regeln. [35, 48]

Vom Speicherbecken führt eine in der Regel möglichst kurz geführte Druckrohrleitung zum Krafthaus. Die Fallhöhe kann dabei nur wenige Meter oder mehrere hundert Meter betragen, wodurch wieder die ganze Bandbreite an hydraulischen Maschinen eingesetzt werden kann. Im klassischen Fall wird bei Hochdruckanlagen die Pelton-Turbine eingesetzt, bis zu ca. 600 m Fallhöhe auch die Francis-Turbine. Zu beachten ist die Rückgabe des Triebwassers in das Unterwasser. Hier gilt es Schwallwellen durch die Errichtung von Ausgleichsbecken zu vermeiden. [35, 57]

2.2.3 Pumpspeicherkraftwerke

Pumpspeicherkraftwerke haben ausschließlich Relevanz in der Großwasserkraft. Diese leistungsstarken Anlagen produzieren keinen zusätzlichen Strom, sondern haben aufgrund ihrer extrem kurzen Anlaufzeiten eine wichtige Regelfunktion um Lastschwankungen im Verbundnetz auszugleichen. Zudem bieten sie derzeit die einzige großtechnische Möglichkeit zur Energiespeicherung, wodurch im letzten Jahrzehnt der Ausbau von Pumpspeicherkraftwerken fokussiert wurde. Der Strom für den Pumpbetrieb wird heute überwiegend aus volatilen, erneuerbaren Energiequellen wie Sonne und Wind gewonnen. Das bedeutet, dass die leistungsstarke Pumpspeichertechnologie die Integration erneuerbarer Energie in das Verbundnetz ermöglicht. [35, 82]

2.2.4 Kleinwasserkraftwerke

In Österreich werden Anlagen mit einer installierten Leistung von weniger als 10 MW in die Kategorie *Kleinwasserkraftwerke* eingestuft, Anlagen unter 100 kW werden auch als Piko-Kraftwerke bezeichnet. So gibt es in Österreich etwa 5800 Kleinwasserkraftanlagen, wobei der überwiegende Anteil (rd. 5200 Anlagen) als Laufkraftwerke und rd. 550 Anlagen als Speicherkraftwerke ausgeführt sind. In Summe versorgen die österreichischen Kleinwasserkraftwerke etwa 1,7 Mio. Haushalte und leisten somit einen relevanten Beitrag zur Stromversorgung mittels erneuerbarer Energie. [26, 35]

Bei der Planung von Kraftwerkskomponenten bei Kleinwasserkraftwerken gilt es dieselben Entwurfsprinzipien zu verfolgen wie bei Großanlagen, jedoch können zahlreiche Vereinfachungen durch das verminderte Sicherheitsrisiko getroffen werden. Ein speziell zu berücksichtigendes Merkmal beim Entwurf von Kleinwasserkraftwerken ist das örtlich gegebene Wasserdargebot. Da überwiegend mit relativ geringen Wassermenge gearbeitet werden muss, ist die Auswahl einer geeigneten Turbine besonders wichtig im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage. Das Spektrum an einsetzbaren Turbinentypen ist sehr breit - vermehrt wird Ausrüstung auch in standardisierter Modulbauweise angeboten, wodurch sich kostengünstige Lösungen realisieren lassen.

Kleinwasserkraftwerke tragen durch ihre oftmals verbrauchsorientierte, dezentrale Lage wesentlich zur Versorgungssicherheit im ländlichen Raum bei. Zudem ist die Verwendung der erzeugten Energie ohne größere Übertragungsverluste möglich. [26, 35]

Kapitel 3

Spezielle Anlagenkomponenten bei Kleinwasserkraftwerken

3.1 Wasserbauliche Komponenten

3.1.1 Ausleitungsbauwerk

Ein Ausleitungsbauwerk an sich besteht bereits aus mehreren Komponenten wie der Wehranlage, dem eigentlichen Entnahmebauwerk, einem Rechen, diversen Verschluss- und Regelorganen sowie einer Fischwanderhilfe. Im Nachfolgenden werden die einzelnen Komponenten genauer erläutert.

Wehranlage

Die grundlegende Funktion einer Wehranlage ist es, den notwendigen Kraftwerksdurchfluss aus einem Fließgewässer auszuleiten und dem Triebwasserweg zuzuführen. Zusätzlich müssen über dieses Bauwerk im Hochwasserfall größere Abflussmengen schadlos abgeführt werden können. Somit zählt auch ein Energieumwandlungsbauwerk unterwasserseitig des Wehrüberfalls (häufig als Tosbecken ausgeführt) zu den Bestandteilen einer Wehranlage. Die Errichtung erfolgt meist als niedriges Wehrbauwerk im Flussbett, welches dazu dient den Wasserspiegel anzuheben, um den Zufluss zum Entnahmebauwerk zu garantieren. Weiter wird zwischen festen (unregulierten) und beweglichen (regulierten) Wehrüberfällen unterschieden. Erstere bringen Vorteile in den Bereichen Betriebssicherheit, einfache Konstruktion und Ausführung, erleichterte Instandhaltung und Kosteneffizienz mit sich. Jedoch führt ein nicht regulierbares Wasserniveau dazu, dass das Energiepotential des natürlichen Zuflusses nicht optimal genutzt werden kann. Hingegen ermöglichen regulierbare Wehranlagen (Abb. 3.1) das Stauziel annähernd konstant zu halten und dadurch die Abflussverhältnisse zu kontrollieren. Dies schlägt sich allerdings in höheren Errichtungs- und Wartungskosten nieder. Zusätzlich besteht das Risiko, dass der Verschluss bei Hochwasser beschädigt und somit funktionsunfähig wird. [54]



(a) Fischbauchklappe [67]



(b) Schlauchwehr

Abb. 3.1: Regulierbare Wehrtypen**Entnahmebauwerk**

Über das Entnahmebauwerk wird Wasser in das Triebwassergerinne (Freispiegelentnahme aus Fließgewässern) oder eine Druckrohrleitung (Tiefenentnahme aus Seen oder Speicherbecken) geleitet. Das Bauwerk ist dabei so auszubilden, dass der Fallhöhenverlust so gering wie möglich gehalten wird und Geschiebe oder Schwebstoffe nicht eingezogen werden. Auch gilt es, ökologische Kriterien wie z.B. Fischablenkungssysteme und Fischpässe zu berücksichtigen. Eine Ausrichtung der Einlaufebene normal zur Überfallkrone ist als ideale Lösung anzusehen, um Treibgutansammlungen direkt vor dem Rechen zu verhindern. Zusätzlich ist zur Entfernung von Partikeln größer als 0,2 mm ein Sandfang vorzusehen. Bei Kleinwasserkraftwerken stellt die Freispiegelentnahme aus Fließgewässern die häufigste Variante von Entnahmebauwerken dar. Hierbei wird zwischen der *Seitenentnahme* und der *Sohlentnahmen* unterschieden. [54]

Die **Seitenentnahme** ist an der Krümmungsaußenseite eines Flussbogens situiert (Abb. 3.2). Um Geschiebeeintrag zu verhindern, wird häufig eine Geschiebeschwelle in Kombination mit einer Spüleinrichtung (Spülkanal und Spülschütz) vor dem Einlaufbauwerk angeordnet. Eine vorgesetzte Tauchwand dient zur Abweisung von Schwimmstoffen und Schwemmgut, wodurch eine Blockierung des Einlaufrechens im Hochwasserfall vermieden wird. [54]

Die **Sohlentnahme** ist im Alpenraum besser bekannt als das *Tiroler Wehr* (Abb. 3.3). Es handelt sich dabei um einen Kanal im Flussbett, der mit einem Rechen (Stäbe in Fließrichtung ausgerichtet) überdeckt ist. Ob nach dem Einlaufbauwerk ein Sandfang angeordnet werden muss, richtet sich danach, ob eine Geschiebeschwelle inklusive Spüleinrichtung vor dem Rechen ausgebildet wird oder nicht. Zusätzlich beeinflusst auch der gewählte

Stababstand des Rechens (3-10 cm) und der eingesetzte Turbinentyp die Erfordernis eines Sandfanges. Ein eigenes Bauwerk zur Energieumwandlung nach einer Sohlentnahme ist in den meisten Fällen nicht erforderlich, da das natürliche Sohlgefälle und somit die Fließgeschwindigkeit nicht wesentlich verändert wird. Ein solches Entnahmebauwerk eignet sich speziell für sehr steile und schwer zugängliche Wildbäche. Auch durch die Kosteneffizienz ist dieser Typ prädestiniert für den Einsatz bei Ausleitungskraftwerken in der Kleinwasserkraft oder als Wasserfassung von Beileitungen zu großen Speicherkraftwerken. Nachteilig stellt sich der Einlaufverlust eines *Tiroler Wehres* dar - dieser kann bis zu 1 m betragen. [54]

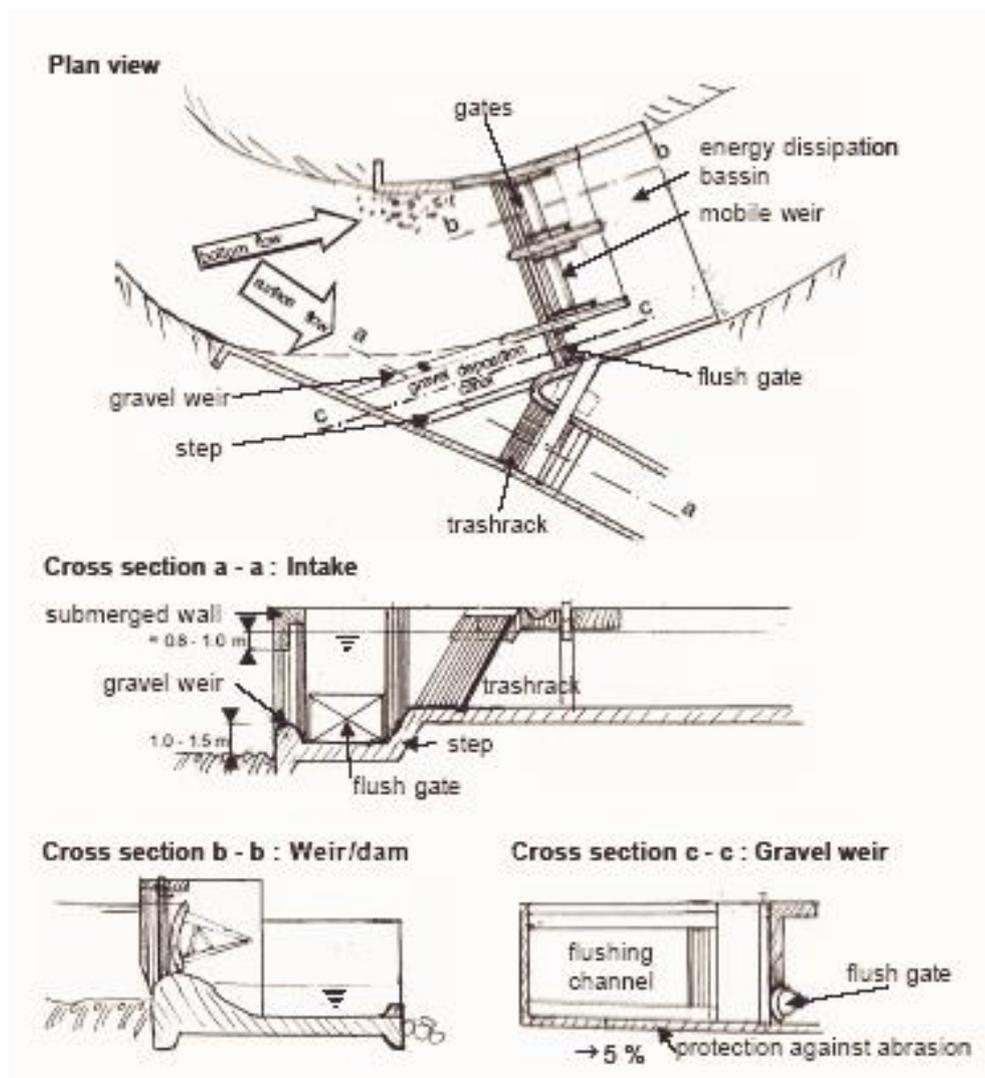


Abb. 3.2: Prinzip einer Seitenentnahme [54]

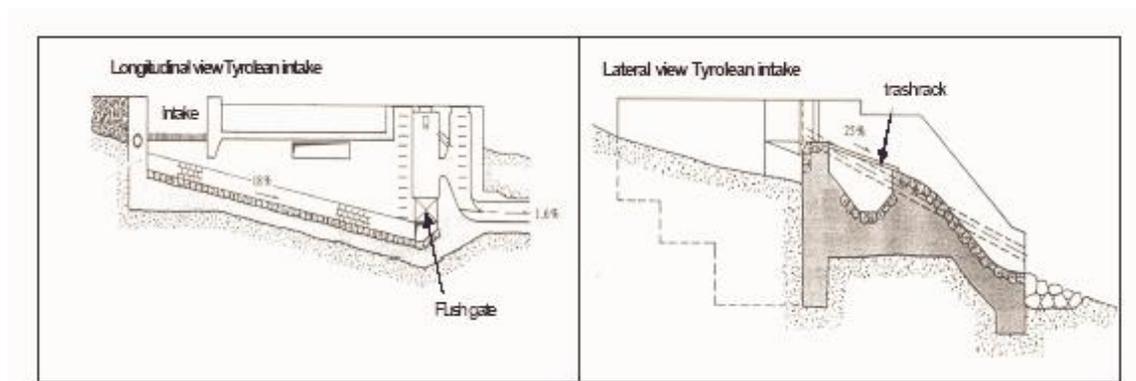


Abb. 3.3: Prinzip eines *Tiroler Wehres* [54]

Eine Weiterentwicklung zum *Tiroler Wehr* stellt der *Coanda-Rechen* dar (Abb. 3.4), welcher seit rund 15 Jahren im Alpenraum erfolgreich Anwendung findet. Dieser besteht aus einem Wehrhöcker mit integriertem Rechen am Wehrrücken (Stäbe quer zur Fließrichtung ausgerichtet). Durch spezielle Stabgeometrie wird an jedem Stab eine dünne Wasserschicht abgesichert und in den darunterliegenden Sammelkanal geleitet. Da der Stababstand zwischen 0,2–3 mm beträgt, erfolgt die Reinigung des Triebwassers bereits allein durch das Entnahmebauwerk in sehr gutem Ausmaß. Fische und Geschiebe, bis zu einem Korndurchmesser von rund 0,5 mm, werden abgewiesen, wodurch in weiterer Folge häufig kein Sandfang oder Spülsystem benötigt wird. Jedoch beträgt das Schluckvermögen eines *Coanda-Rechens* nur rund $\frac{1}{4}$ im Vergleich zu jenem eines *Tiroler Wehres* – eine wesentlich größere Gesamtrechenbreite wird daher benötigt. Außerdem bleibt ein *Coanda-Rechen* bei Temperaturen bis zu -30°C funktionsfähig. [37, 73]

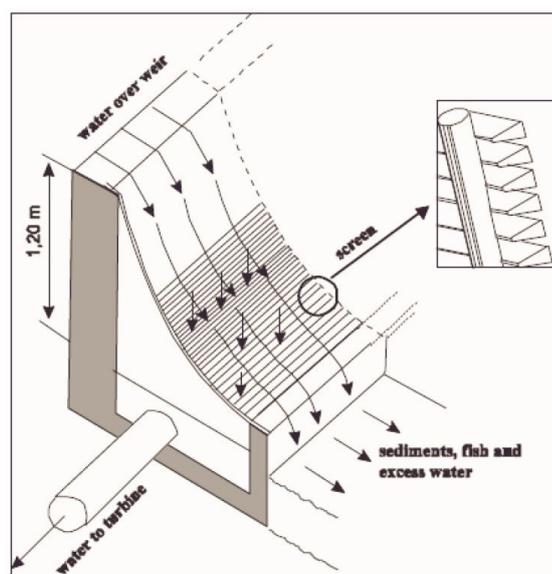


Abb. 3.4: Prinzip eines *Coanda-Rechens* [54]

Rechen

Ein Rechen (Feinrechen) erfüllt die Funktion Schwimmstoff- und Sedimentfracht des Triebwassers, bei geringst möglichem Fallhöhenverlust und Turbulenz, zu reduzieren. Der zu erzielende Reinigungsgrad ist dabei abhängig vom installierten Turbinentyp. Daher wird der maximale Stababstand eines Rechens in der Regel vom Turbinenhersteller empfohlen. Als Richtwerte gelten: [54]

- 20–30 mm bei Peltonturbinen
- 40–50 mm bei Francisturbinen
- 80–100 mm bei Kaplan turbinen

Um den Fallhöhenverlust möglichst gering zu halten, sollte die Anströmgeschwindigkeit eines Rechens 0,6 m/s bei kleinen Entnahmen und 1,5 m/s bei großen Entnahmen, bezogen auf die Nettofläche (offener Fließquerschnitt durch den Rechen), nicht überschreiten. Zudem empfiehlt es sich Stäbe mit stromlinienförmiger Querschnittsgeometrie zu verwenden (Abb. 3.5), da diese den geringsten hydraulischen Widerstand verursachen. Zusätzlich empfiehlt es sich eine automatisch über Spiegelhöhendifferenz gesteuerte Rechenreinigungseinrichtung zu installieren.

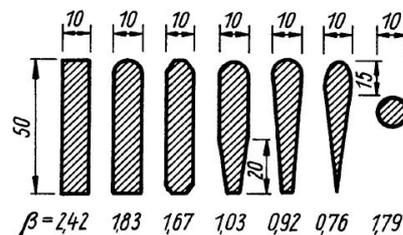


Abb. 3.5: Verlustbeiwerte bei unterschiedlicher Querschnittsgeometrie (Maße in mm) [18]

Ventile und Verschlüsse

Bei Kleinwasserkraftwerken muss zumindest ein Regelorgan als Sicherheitssystem oberwasserseitig der Turbine angeordnet sein. Es dient dazu, den Triebwasserweg für Instandhaltungsarbeiten oder Reparatur trocken zu legen, aber auch um bei einem Turbinenausfall das Erreichen der Durchgangsdrehzahl zu verhindern. Aus diesem Grund muss das Schließen des Regelorgans bei vollem Ausbaudurchfluss möglich sein – umgekehrt muss ein schrittweises Öffnen des Organs durchführbar sein. Folgende Verschlussarten werden bei Einlaufbauwerken angeordnet, deren hydraulische Verlustbeiwerte können aus [18] entnommen werden: [54]

- Dammbalken
- Schützen (Rollschütz, Gleitschütz, Keilschieber)
- Drosselklappe
- Kugelschieber

Fischwanderhilfen

In fast allen Altersstadien führen Fische flussauf- und flussabwärts gerichtete Wanderungen aus Gründen der Nahrungssuche, der Fortpflanzung oder der Schutzsuche durch. Dahingehend stellen Querbauwerke in Fließgewässern für Fische häufig unüberwindbare Hindernisse dar. Es gilt sogenannte Wanderkorridore rundum Querbauwerke zu errichten, um einen guten ökologischen Zustand bzw. ein gutes ökologisches Potential des Fließgewässers ganzjährig zu gewährleisten. Bei Fischwanderhilfen wird differenziert zwischen Fischaufstiegshilfen (FAHs) und Fischabstiegshilfen (FABs), beide Wanderhilfen müssen auf die gewässertypspezifische Fischfauna bemessen werden. Während zur Dimensionierung von FAHs an dieser Stelle auf den *Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen* [8] verwiesen werden kann, gibt es bei der Problematik des Fischabstieges noch Wissensdefizite. Lösungsansätze für FABs werden aktuell mittels nationalen Forschungsprojekten erarbeitet, Quelle [19] liefert hierfür einen Überblick über den derzeitigen Kenntnisstand.

Für FAHs gibt es eine Vielzahl an konstruktiven Ausführungsmöglichkeiten, die sich in drei Kategorien einteilen lassen: [83]

1. Naturnahe Typen
 - a) Umgehungsgerinne
 - b) Naturnaher Beckenpass
 - c) Aufgelöste Sohlrampe
2. Technische Typen
 - a) Schlitzpass („Vertical slot“)
 - b) Borstenfischpass
 - c) Treppen
3. Sondertypen
 - a) Fischlifte
 - b) Fischschleusen

3.1.2 Sandfang

Die Aufgabe eines Sandfanges ist es, feine Feststoffe aus dem Triebwasser durch das Prinzip der Sedimentation zu entfernen. Dies ist erforderlich, um den Verschleiß an wasserführenden Bau- und Maschinenteilen zu verringern. Das Funktionsprinzip beruht darauf, durch Querschnittserweiterung die Fließgeschwindigkeit zu reduzieren und die Strömung zu beruhigen, wodurch sich Feststoffe absetzen. Wird für die Bemessung ein Grenzkorndurchmesser d_{Gr} festgelegt (alle Partikel größer d_{Gr} werden abgesetzt), folgt daraus die Bedingung für das Absetzen zu: [35]

$$t_h = t_v \quad (3.1)$$

wobei:

t_h ... Durchflusszeit durch den Entsander

t_v ... Absinkzeit des Korns

Abb. 3.6 zeigt die idealisierte, lineare Absinkbahn des Grenzkorns. Darin ist u die horizontale Fließgeschwindigkeit, w die Sinkgeschwindigkeit des Grenzkorns, H die Wassertiefe, L die Sandfanglänge und B die Sandfangbreite. Mit der oben genannten Bedingung für das Absetzen und mithilfe der Kontinuitätsgleichung kann die Länge des Sandfanges L wie folgt abgeschätzt werden: [52]

$$L = \frac{Q}{w \cdot B} \quad (3.2)$$

wobei:

Q ... Bemessungsdurchfluss

Aus Glg. 3.2 geht hervor, dass die Sandfanglänge indirekt proportional mit der Sinkgeschwindigkeit des Grenzkorns w steigt. Der Grenzkorndurchmesser d_{Gr} wird abhängig von Faktoren wie der Fallhöhe, dem Turbinentyp, den Baukosten eines Entsanders, den Energieverlusten und den entstehenden Reparaturkosten der Turbine gewählt. [54]

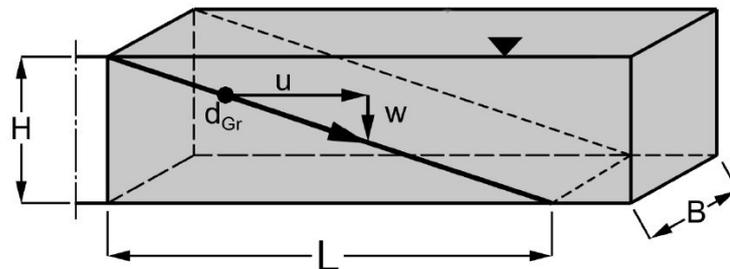


Abb. 3.6: Sedimentation im Sandfang [52]

3.1.3 Triebwasserweg

Bei Druckrohrleitungen unterscheidet man zwei **Verlegearten**. Zum einen oberirdisch entlang dem Geländeverlauf, allerdings möglichst geradlinig der Fallrichtung folgend. Bei dieser Variante ist die Anordnung von Fundamentblöcken bzw. Ankerpunkten bei jeder Krümmung der Rohrachse erforderlich. Bei offener Bauweise sind zusätzlich Dilatationsstücke zwischen zwei festen Widerlagern notwendig. Zum anderen gibt es die erdverlegte Variante, bei welcher die Stahlrohre gegen Korrosion geschützt werden müssen und beim Aushub ist aus Kostengründen darauf zu achten, dass Felsuntergrund weitgehend gemieden wird. [54]

Das **Materialsortiment** für Druckrohrleitungen ist breit gefächert. Der Materialwahl liegen Faktoren wie Untergrundverhältnisse, Verfügbarkeit, Gewicht, Verbindungstechnik und Kosten zugrunde. Im Wesentlichen stehen dem Planer folgende Materialien zur Auswahl: [54]

- **Stahlrohre:** Sie eignen sich für den Einsatz bei großen Fallhöhen sowie großen Durchmessern. Besonders zu beachten ist die innere und die äußere Korrosionsschutzschicht und das hohe Gewicht bei Transport und Einbau.
- **Gussrohre:** Ihr Einsatzgebiet liegt bei großen Fallhöhen. Nachteilig ist ihr hohes Gewicht bei Transport und Einbau.
- **GFK-Rohre:** Sie finden Anwendung bei mittleren bis geringen Fallhöhen und großen Durchmessern. Bei glasfaserverstärktem Kunststoff stellt Korrosion kein Problem dar, allerdings kann bei entleerten, erdverlegten Rohrleitungen ein Stabilitätsproblem zufolge Aussendruck auftreten.
- **PE-Rohre:** Sie kommen bei mittleren bis geringen Fallhöhen und kleinen Durchmessern zum Einsatz. Ihr geringes Eigengewicht ermöglicht ein leichtes Handling auch im unwegsamen Gelände. Sie können allerdings aufgrund ihrer geringen UV-Beständigkeit nicht frei verlegt werden.

Aus konstruktiver Sicht gilt es bei Rohrleitungen zwei **genormte Kenngrößen**, die Nennweite und den Nenndruck (Tab. 3.1), zu berücksichtigen. Diese sind wie folgt definiert: [33]

- **Nennweite:** Die Nennweite (Kurzzeichen DN) gilt als Anhaltspunkt für den lichten Durchmesser eines Rohres in *mm*, darf allerdings nicht als Maßzahl verstanden werden.
- **Nenndruck:** Der Nenndruck in *bar* (Kurzzeichen PN) ist jener Druck, der bei 20° C ertragen wird.

Tab. 3.1: DN- und PN-Stufen [33]

DN-Stufen			PN-Stufen		
DN 10	DN 100	DN 1400 (100) DN 1600 (200) DN 4000	PN 1	PN 10	PN 100
DN 15	DN 125		PN 2,5	PN 16	PN 160
DN 20	DN 150 (50) DN 500 (100) DN 1200		PN 6	PN 25	PN 250
DN 25			PN 40	PN 320	
DN 32			PN 63	PN 400	
DN 40					
DN 50					
DN 60					
DN 65					
DN 80					

3.1.4 Krafthaus

Bei Wasserkraftanlagen ist das Krafthaus jener Ort, in welchem die elektrische Stromerzeugung stattfindet. Im Wesentlichen beherbergt das Krafthaus die folgenden drei Bereiche der Anlagentechnik: Mechanik, elektrotechnische Ausrüstung sowie Regelungs- und Leittechnik. Das Krafthaus hat die Aufgabe die eben genannten Anlagenteile vor Witterungseinflüssen zu schützen und sämtliche statischen, dynamischen und hydraulischen Kräfte in den Baugrund abzuleiten. Die Größe des Gebäudes ist in erster Linie von Anzahl, Typ und Leistung der Maschinensätze abhängig. Anhand der Abmessungen des Krafthauses ist in weiterer Folge meist eine ausreichend genaue Massen- und Kostenschätzung möglich. Zu den grundlegenden Ausrüstungsgegenständen im Krafthaus zählen: [35, 54]

- Einlaufverschlussorgan
- Turbine
- Generator
- Steuerungstechnik
- Kühlung und Schaltanlage
- Transformator

3.1.5 Rückgabebauwerk

Nachdem das Triebwasser die Turbine passiert hat, muss es wieder in das Fließgewässer eingeleitet werden - diese Funktion übernimmt das Rückgabebauwerk. Die Ausführung ist abgestimmt auf den eingesetzten Turbinentyp. Bei Freistrahlturbinen wird meist ein aus Beton oder mittels Steinwurf hergestellter Freispiegelkanal angelegt. Dabei ist darauf zu

achten, dass bei Hochwasser das Turbinenlaufrad nicht vom Unterwasserspiegel eingestaut wird. Gegebenenfalls sind, speziell bei Pelton-turbinen, auch Maßnahmen zur Minderung der Schallimmissionen erforderlich. Bei Überdruckturbinen ist einerseits stets auf eine ausreichende Überdeckung des Saugrohres zu achten, um Kavitationserscheinungen zu vermeiden. Andererseits muss berücksichtigt werden, dass der Unterwasserspiegel die verfügbare Nettofallhöhe und somit das wirtschaftliche Ergebnis beeinflusst. [54]

3.2 Elektromechanische Ausrüstung

3.2.1 Turbinen

Wasserturbinen werden nach zwei Wirkungsprinzipien unterschieden. Einerseits Gleichdruckturbinen, welche ausschließlich die kinetische Energie des Wassers unter Atmosphärendruck nutzen. Zu den **Gleichdruckturbinen** zählen:

- Pelton-Turbine
- Turgo-Turbine
- Durchströmturbine

Andererseits gibt es Überdruckturbinen, welche die potenzielle Energie der Wassersäule über das Turbinenlaufrad in Bewegungsenergie umwandeln. Zu den **Überdruckturbinen** zählen:

- Francis-Turbine
- Kaplan-Turbine
- Diagonalturbine
- Rohrturbine

Diese Anzahl an verschiedenen Turbinenbauarten sind weiter hinsichtlich der beiden Parameter Fallhöhe und Durchflussmenge für spezielle Einsatzgebiete optimiert. Der jeweilige Einsatzbereich eines Turbinentyps ist in Abb. 3.7, die dazugehörigen Wirkungsgradverläufe in Abhängigkeit des Durchflusses sind in Abb. 3.8 dargestellt. [57]

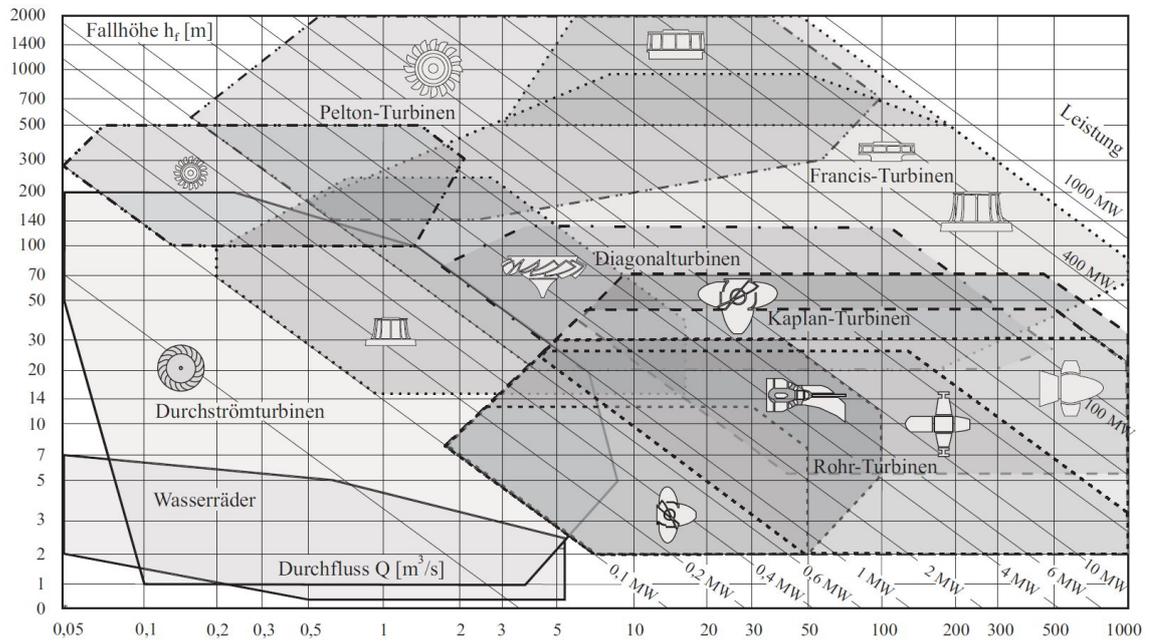


Abb. 3.7: Einsatzgebiete für Wasserturbinen in Abhängigkeit von Fallhöhe und Durchfluss [35]

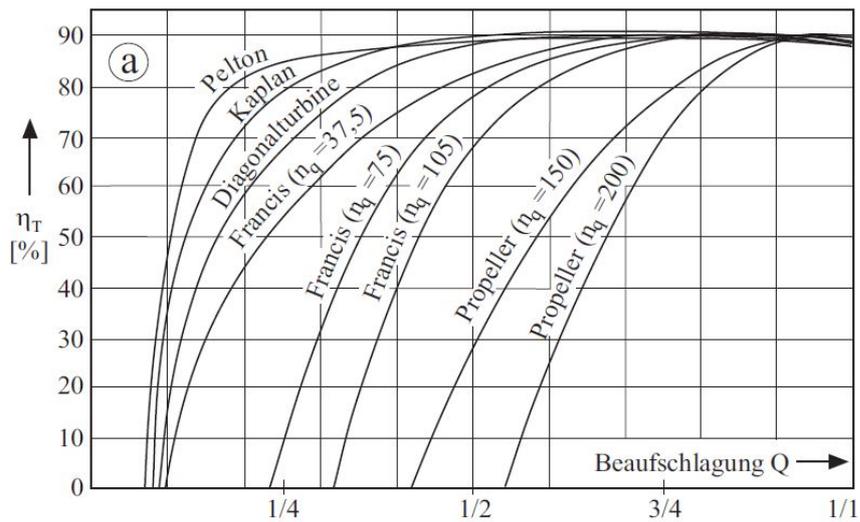


Abb. 3.8: Wirkungsgradverläufe von Turbinen [35]

Pelton-Turbine

Bei der Pelton-Turbine handelt es sich um eine Freistrahlturbine, die um 1880 vom Amerikaner *Lester Pelton* entwickelt wurde. Das Triebwasser strömt aus der Druckrohrleitung über ein Verteilrohr zu den Düsen. Mittels Düsennadel erfolgt die Durchflussregulierung und die Formung eines dünnen Wasserstrahls, der auf ein mit Becher besetztes Laufrad gelenkt wird. Die Düse ermöglicht auch die Ausrichtung des Freistrahls zur optimalen Anströmung der Schaufelbecher. Durch die Umlenkung des Wasserstrahls im Becher erfolgt die Übertragung der Impulskraft auf das Laufrad, wodurch das Drehmoment für den Antrieb des Generators erzeugt wird. Damit das Laufrad nicht im Unterwasser watet, ist auf ausreichend Freihang, bezogen auf den höchsten Unterwasserstand, zu achten, auch muss das Turbinengehäuse angemessen belüftet werden.

Pelton-Turbinen werden in zwei Bauarten kategorisiert. Dabei unterscheidet man zwischen Freistrahlturbinen mit horizontal gelagerter Welle und vertikal gelagerter Welle. Erstere weisen maximal drei Düsen auf, zweitere bieten hingegen Platz für bis zu sechs Düsen, dementsprechend höher ist auch deren Leistungsniveau. Für den Anwendungsbereich bei Kleinwasserkraftwerken bis 10 MW, stellen standardisierte Bausätze für beide Bauarten den Stand der Technik dar.

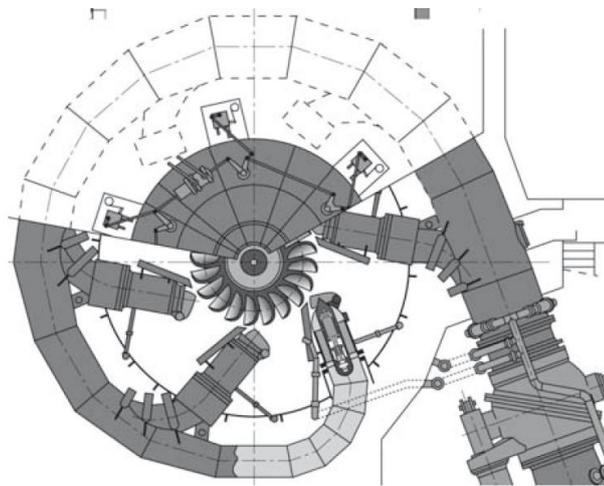


Abb. 3.9: Draufsicht auf eine sechsdüsige vertikale Pelton-Turbine [35]

Der maximale Wirkungsgrad einer Pelton-Turbine kann bis zu 95 % erreichen. Durch die besonders gute Regelbarkeit, weist der Wirkungsgradverlauf ein ausgeprägtes Hochplateau über einen breiten Durchfluss-Bereich auf (Abb. 3.8). Dadurch ist der Einsatz dieser Turbine bei häufig wechselnder Beaufschlagung oder bei Teilbeaufschlagung sehr vorteilhaft. Generell sind Pelton-Turbinen für eher geringe Durchflüsse bei sehr großen Fallhöhen ausgelegt. Wird das Triebwasser nicht ausreichend von Feianteilen gereinigt, ist bei großen Fallhöhen mit erheblichen Abrasionsschäden am Turbinenlaufrad zu rechnen. [35, 46, 57]

Turgo-Turbine

Die Turgo-Turbine ist eine Sonderbauform der Pelton-Turbine und findet speziell in der Kleinwasserkraft Anwendung. Die Konstruktionsform kann als Mischform aus Pelton- und Francis-Turbine angesehen werden. Das Triebwasser strömt wie bei der Pelton-Turbine als Freistrahл aus einer Düse und trifft anschließend unter einem Winkel von rd. 30–40° auf das Laufrad, welches jenem der Francis-Turbine ähnlich ist.

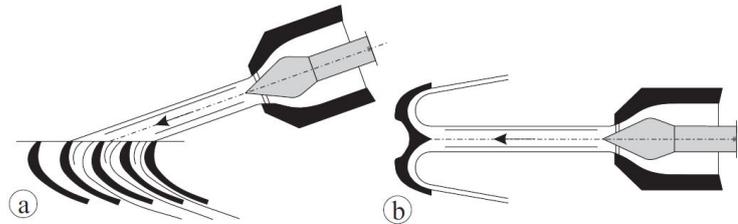


Abb. 3.10: Vergleich zwischen (a) Turgo-Turbine und (b) Pelton-Turbine [35]

Ihr Einsatzgebiet liegt im Übergangsbereich zwischen der Francis- und Pelton-Turbine. Dabei liegt der Fallhöhenbereich bei 30 bis 250 m. Anders als bei der Pelton-Turbine lässt sich die Turgo-Turbine vollkommen problemlos auch mit stark sandhaltigem Triebwasser betreiben. [35, 57]

Durchströmturbine (Ossberger-Turbine)

Diese radial durchströmte Gleichdruckturbine wurde erstmals im Jahr 1922 vom Deutschen *Fritz Ossberger* patentiert. Bevor das Triebwasser auf das Laufrad trifft, nimmt es seinen Weg durch Profileitschaufeln, welche zur Strömungsführung und Durchflusssteuerung dienen. Das horizontal gelagerte, walzenförmige Laufrad wird vom Triebwasser zweifach durchströmt bevor es über ein Saugrohr ins Unterwasser gelangt (Abb. 3.11 a+b). Da eine Durchströmturbine nur geringe Drehzahlen erreicht, kann der Generator entweder direkt oder mittels Getriebe angeschlossen sein. [35, 46]

Ein spezieller Vorteil der Durchströmturbine ist ihr gutes Teillastverhalten. Dies wird durch eine Unterteilung des Laufrades in zwei Zellen im Verhältnis 1:2 erreicht. Bei geringen Wassermengen wird nur die kleine, bei mittleren nur die große und bei Volllast beide Zellen mit Wasser beaufschlagt. Durch dieses Prinzip können Durchflüsse zwischen 15 bis 100 % vom Ausbaudurchfluss bei sehr hohen Wirkungsgraden verarbeitet werden (vgl. Abb. 3.11 c). Der maximale Wirkungsgrad dieser Turbine liegt bei etwa 87 %. [57]

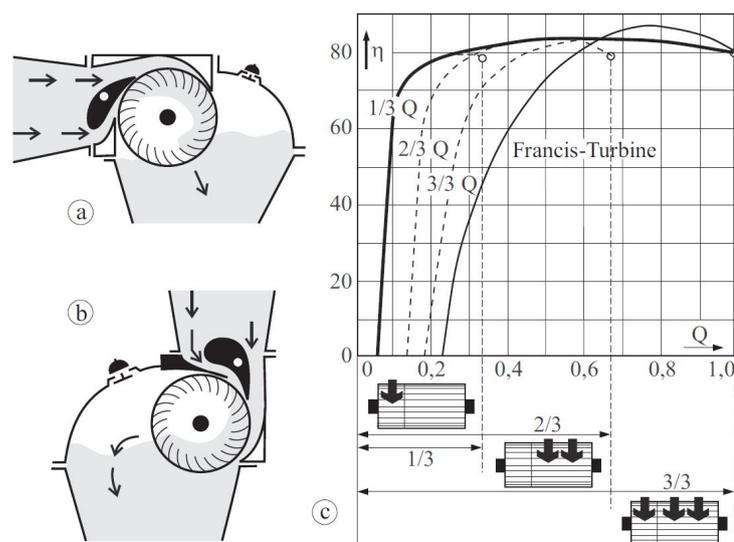


Abb. 3.11: Durchströmturbine: Strömungsverlauf bei a) horizontalem und b) vertikalem Zufluss; c) Wirkungsgradkennlinie bei einer 1:2-Unterteilung von Leitapparat und Laufrad im Vergleich zur Francis-Turbine [35]

Generell ist die Ossberger-Turbine für Durchflüsse von etwa $0,025\text{--}13\text{ m}^3/\text{s}$ und Fallhöhen zwischen 2–200 m geeignet. Häufig wird sie aber in der Kleinwasserkraft bei Nieder- und Mitteldruckanlagen mit stark schwankenden Wassermengen eingesetzt. Diese Turbinenart ist aufgrund ihrer Konstruktionsweise weitgehend selbstreinigend von kleinem Treibgut und Laub, wodurch sie sich durch besonders geringen Wartungsaufwand auszeichnet. [35, 46]

Francis-Turbine

Die weltweit am häufigsten eingesetzte Überdruckturbine ist die Francis-Turbine, welche im Jahr 1849 vom britischen Ingenieur *James Francis* entwickelt wurde. Das Triebwasser wird durch ein schneckenförmiges Spiralgehäuse eingeleitet (Abb. 3.12 b). Unmittelbar vor dem Turbineneinlauf sind verstellbare Leitschaufeln angeordnet, die das Wasser tangential gerichtet auf das Laufrad lenken. Das Laufrad selbst besteht aus gegenläufig gekrümmten Laufradschaufeln, welche nicht verstellbar sind. Das Triebwasser verlässt die Turbine in axialer Richtung und gelangt in das Saugrohr. Dieses dient zur Energierückgewinnung aus der Austrittsgeschwindigkeit des Triebwassers nach dem Durchströmen der Turbine.

Francis-Turbinen sind für den Teillastbetrieb nicht geeignet, da der Wirkungsgrad im Teillastbereich besonders stark abfällt. Es gilt einen Betrieb im Bereich des Ausbaudurchflusses anzustreben.

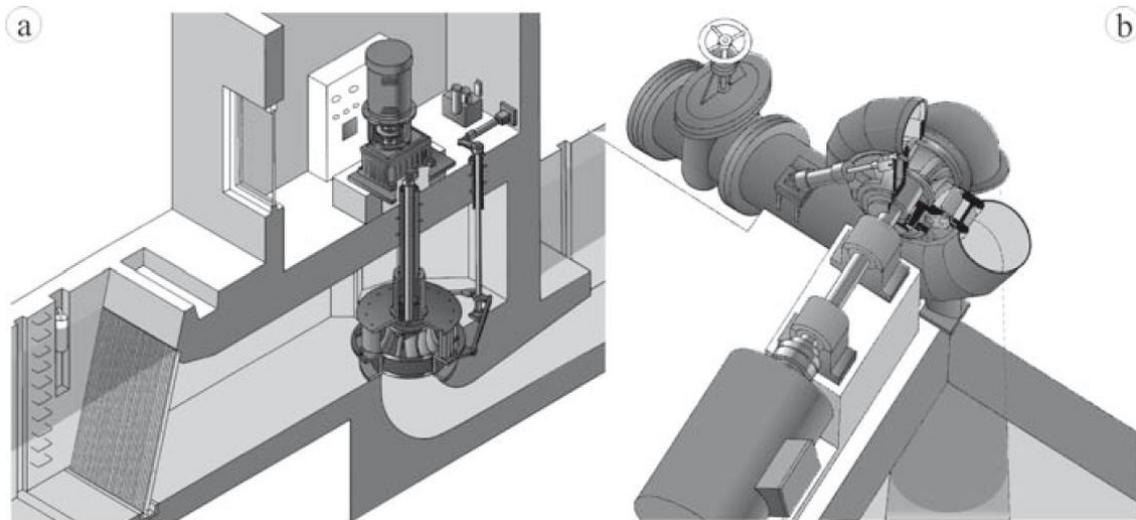


Abb. 3.12: a) Francis-Schachtturbine; b) Francis-Spiralturbine [35]

Im Bereich der Kleinwasserkraft kann bei sehr geringen Fallhöhen mit niedriger Turbinenleistung auf das Spiralgehäuse verzichtet werden und durch eine einfache Turbinenkammer ersetzt werden. Diese Einbauvariante wird als Schacht-Turbine bezeichnet (Abb. 3.12 a). Auch sind bei kleinen Anlagen häufig vorgefertigte Maschinen mit horizontaler Welle in Kompaktbauweise anzutreffen. Im Niederdruckbereich sind neben der Francis-Turbine zunehmend auch Kaplan- und Propeller-Turbinen im Einsatz. [35, 46, 74]

Kaplan-Turbine

Die Kaplan-Turbine wurde im Jahr 1912 vom österreichischen Ingenieur *Viktor Kaplan* für den Nieder- und Mitteldruckbereich entwickelt. Das Triebwasser wird durch eine Einlaufspirale drallbehaftet dem Laufrad zugeführt. Der Durchfluss wird vor dem Turbineneinlauf über verstellbare Leitschaufeln geregelt. In weiterer Folge durchströmt das Triebwasser das Laufrad in axialer Richtung. Dabei kommt es zur Impulsübertragung, wodurch die Rotationsbewegung der Turbinenwelle erzeugt wird. Das Drehmoment wird schlussendlich auf den Generator übertragen. Hierbei kann es notwendig sein, über ein zwischengeschaltetes Getriebe die Generatordrehzahl zu steigern. Bevor das Triebwasser in das Unterwasser gelang, durchströmt es ein Saugrohr. Dieses entzieht dem noch energiebehafteten Triebwasser die statische (Höhenunterschied zwischen Laufradaustritt und Unterwasserspiegel) und die dynamische Saughöhe (teilweise Rückgewinnung der Geschwindigkeitshöhe nach dem Laufradaustritt).

Eine Besonderheit der Kaplan-Turbine sind die radial drehbar gelagerten Laufradschaufeln, wodurch der Anstellwinkel der Flügel dem Durchfluss angepasst werden kann. Dies bewirkt erheblich bessere Wirkungsgrade im Teillastbereich. Generell liegt der maximal erreichbare Wirkungsgrad von Kaplan-Turbinen bei 95 %.

Dieser Turbinentyp benötigt neben dem üblichen Notverschluss kein weiteres Verschlussorgan. Diese Schließ- und Öffnungsfunktion übernehmen die Leitschaufeln des Leitapparates oder bei sehr kleinen Anlagen auch die Flügel des Laufrades.

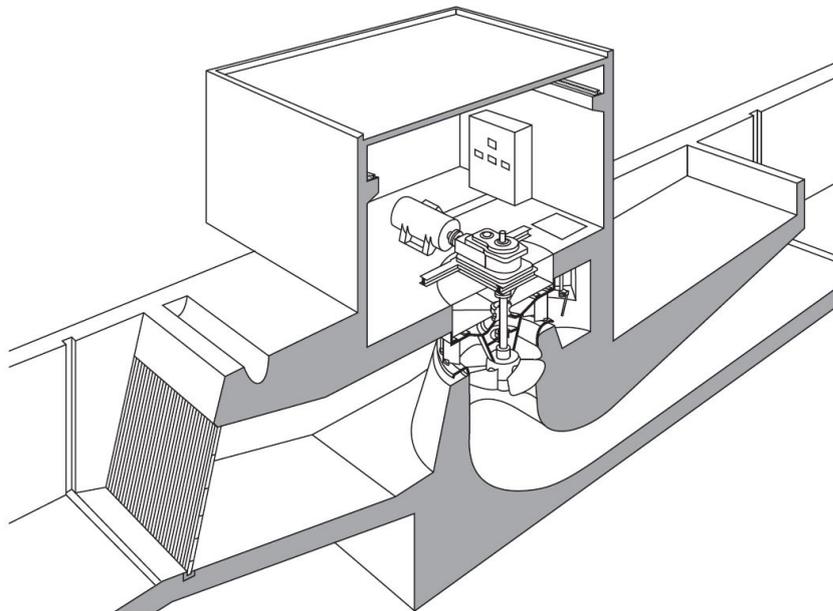


Abb. 3.13: Kaplan-Turbine in Kompaktbauweise für Kleinwasserkraftanlagen [35]

Im Kleinwasserkraftbereich kommen häufig Sonderformen der Kaplan-Rohrturbine zum Einsatz. Dies sind beispielsweise S-Rohrturbinen, Kegelrad- und Getriebe-Rohrturbinen. Zwei weitere gängige Sonderformen in der Kleinwasserkraft sind die Straflo-Turbine und die Diagonalturbine. [35, 46, 74]

Diagonalturbine

Die Diagonalturbine stellt eine bisher selten eingesetzte Sonderform der Kaplan-Turbine dar. Diese Bauweise gilt als Übergangsform von der Kaplan- zur Francis-Turbine für Fallhöhen bis rd. 150 m und Durchflüsse bis rd. 100 m³/s. Aufgrund der Regulierbarkeit von Leitschaufeln und Laufradschaufeln ist dieser Turbinentyp besonders für Standorte mit stark variierenden Abflussverhältnissen geeignet.

Wie in Abb. 3.14 ersichtlich, strömt das Triebwasser über eine Einlaufspirale und den Leitapparat in das Laufrad, dessen bewegliche Schaufeln diagonal angeordnet auf einer halb-kugelförmigen Laufradnarbe sitzen.

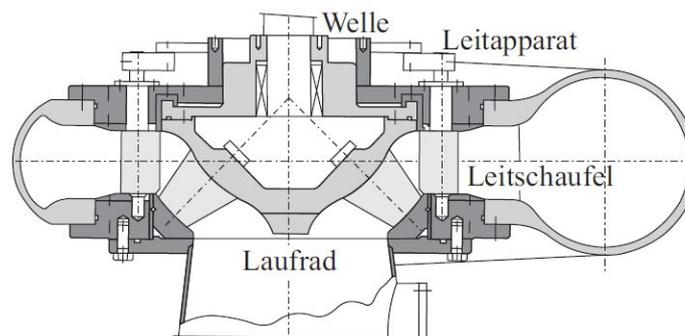


Abb. 3.14: Schnitt durch eine Diagonalturbine [35]

Seit rd. 30 Jahren ist es gängige Praxis, dass bei Revitalisierungsmaßnahmen von Kleinwasserkraftanlagen mit bestehenden Francis-Maschinen die Laufräder gegen Diagonallaufäder getauscht werden. Dies ist aufgrund von baugleichen Komponenten der beiden Turbinentypen möglich und bewirkt eine Ertragssteigerung, da der Wirkungsgrad im Teillastbereich erheblich gesteigert werden kann. [35]

Rohrturbine

Bei der Rohrturbine handelt es sich im Wesentlichen um eine Kaplan-Turbine mit horizontaler Wellenausrichtung. Dies ermöglicht eine strömungsoptimierte Anordnung von Einlaufschafft, Turbine und Saugschlauch in einer Linie. Dadurch wird eine verbesserte Energieausbeute sowie eine besonders flache Gesamtbauhöhe ermöglicht. Die klassische Rohrturbine findet ausschließlich im Bereich der Großwasserkraft bei Flusskraftwerken Ein-

satz. In der Kleinwasserkraft werden zahlreiche abgewandelte Varianten von Rohrturbinen eingesetzt. [35]

Besonders häufig kommt die **S-Rohrturbine** mit einfach oder doppelt regulierter Turbine zur Ausführung. Wie in Abb. 3.15 ersichtlich, ist das S-förmig gekrümmte Saugrohr namensgebend. Diese Geometriewahl ermöglicht es den Generator im trockenen Bereich des Krafthauses zu situieren. Er wird direkt über eine Verlängerung der Turbinenwelle angetrieben. Bei dieser Bauart ist die Ausrichtung der Wellenachse zwischen horizontal bis vertikal, je nach Einbausituation, frei wählbar. Gleiches gilt für die Anordnung des Saugrohres, welches frei um die Rohrachse drehbar ist. Es ergeben sich daraus eine große Anzahl flexibler Geometrievarianten, die ohne merkbaren Wirkungsgradverlust ausgeführt werden können. [35]

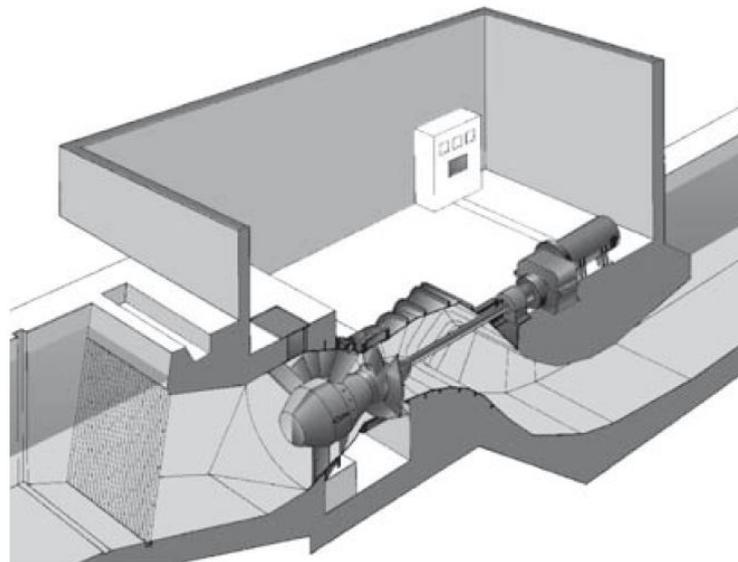


Abb. 3.15: S-Rohrturbine mit horizontaler Welle [35]

Kegelrad- und Getriebe-Rohrturbinen sind meist doppelt reguliert und bilden die zweite Variante von Rohrturbinen, die ihren Einsatz in der Kleinwasserkraft finden. Die Übertragung des Drehmomentes der Turbinenwelle auf den Generator erfolgt bei dieser Bauart über ein Umlenkgetriebe, sodass der Generator außerhalb des durchströmten Bereiches angeordnet werden kann (3.16 a + b). Für beide genannten Bauweisen werden von Turbinenherstellern meist komplett werkseitig vorgefertigte Kompaktanlagen, bestehend aus Turbine, Generator und Regeleinrichtungen angeboten. [35]

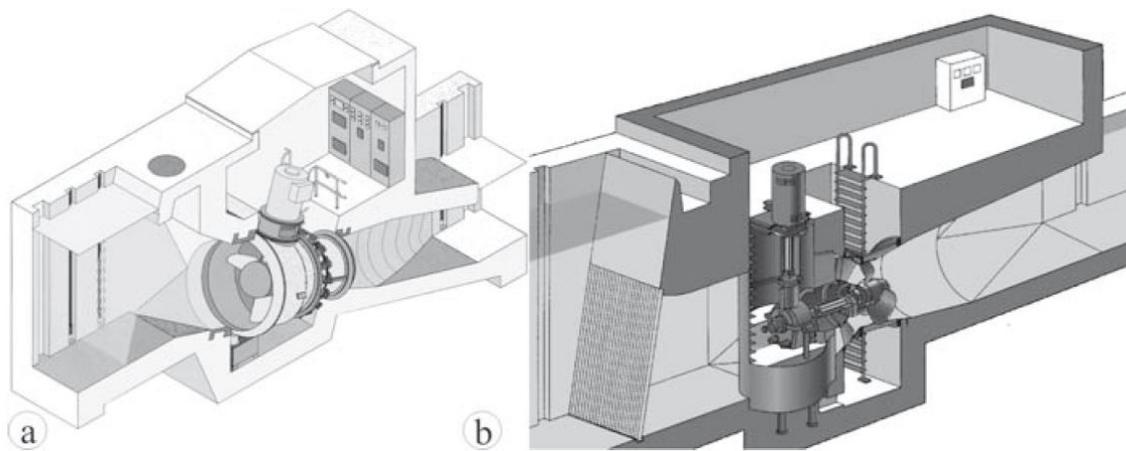


Abb. 3.16: a) Kegelrad-Rohrturbine; b) Getriebe-Rohrturbine [35]

Eine untergeordnete Rolle spielt die **Straight-Flow-Turbine** (auch **Straflo-Turbine** genannt), welche eine weitere sehr kompakte Sonderform der Rohrturbine ist. Dieser Turbinentyp besitzt einen sogenannten Außenkranzgenerator, der das Strömungsrohr konzentrisch umfasst. Dabei befinden sich die Generatorpole auf dem Außenkranz des Laufrades, wodurch ausschließlich Laufräder mit festen Laufradschaufeln (Propellerlaufrad) infrage kommen. Nachteilig im Wartungsaufwand sind die Verschleißerscheinungen der Außenkranzdichtung zwischen dem Generatorkranz und dem Strömungskanal des Triebwassers. Bei großen Turbinenabmessungen bereitet außerdem das Lagerspiel eine technische Herausforderung. Dieses muss sehr klein gehalten werden, um den Luftspalt zwischen Rotor und Stator konstant zu halten. [35]

3.2.2 Periphere Anlagen

Ausrüstung der Schaltanlage

Um die Sicherheit und die Qualität der Stromerzeugung zu garantieren, ist die Installation einer Schaltanlage zur Überwachung des Generators erforderlich. Im Wesentlichen besteht eine Schaltanlage aus einem **Generatorunterbrecher**, welcher zur Verbindung oder Trennung des Generators mit bzw. vom Netz dient. Zusätzlich ist eine **Generatorkontrollausrüstung** zur Überwachung der Generatorspannung, des Leistungsfaktors und des Unterbrechers erforderlich. Ein **Instrumententransformator** wird benötigt, um Energie für Einlaufschütze, Absperrorgane, Servomotoren und Ölkompressoren zur Verfügung zu stellen. [54]

Automatische Überwachung

Der Automatisierungsgrad von Kleinwasserkraftanlagen ist äußerst unterschiedlich. Aus Kostengründen empfiehlt sich jedoch die Verwendung eines standardisierten, modularen Systems. Dadurch reduziert sich auch der Aufwand für die Instandhaltung des Systems, bei gleichzeitiger Erhöhung der Verlässlichkeit des Betriebes. Einige grundlegende Anforderungen an ein automatisches Kontrollsystem sind wie folgt: [54]

1. Es ermöglicht die Anlage unbesetzt zu betreiben.
2. Es muss auch von außen zugreifbar sein und automatisch getroffene Entscheidungen müssen revidierbar sein.
3. Zur Absicherung bei Fehlfunktionen muss es mittels Relais möglich sein, die gesamte Anlage außer Betrieb zu nehmen.
4. Zur Betriebsanalyse der Anlage muss es das Sammeln von relevanten Betriebsdaten ermöglichen.

3.2.3 Netzanschluss

Eine Anbindung zum regionalen Stromnetz ist für Wasserkraftwerke, die nicht als Inselanlage konzipiert sind, stets eine Notwendigkeit um die produzierte elektrische Energie abzuleiten. Da Kleinwasserkraftwerke häufig an dezentralen Standorten errichtet werden, liegt der Einspeisepunkt häufig in weiter Entfernung vom Erzeugungsort. In diesem Fall hat der Kraftwerksbetreiber die Kosten für die Verbindungsleitung zu tragen, wodurch sich die Investitionskosten erheblich steigern können und die Wirtschaftlichkeit des Kraftwerkprojektes geschmälert oder sogar von der Realisierung des Vorhabens abgesehen wird. Es sei aber angemerkt, dass die dezentrale Elektrizitätserzeugung einen wichtigen Teil für den Erhalt der Qualitätsstandards und den Ausbau der Netzinfrastruktur darstellt.

Die praktische Umsetzung von Energieableitungen hängt vom jeweiligen spezifischen Standort ab. Einerseits gibt es die Möglichkeit einer oberirdisch geführten Stromleitung. Diese ist zwar kostengünstig in der Errichtung, ist allerdings störungsanfällig gegenüber Witterungseinflüssen und steht in sensiblen Regionen auch häufig in Konflikt mit dem Landschaftsbild. Andererseits kann die Energieableitung auch über ein erdverlegtes Kabel erfolgen, wodurch die eben genannten negativen Aspekte von oberirdischen Leitungen beseitigt werden, wenngleich sich die Verlegung von Erdkabeln wesentlich kostenintensiver gestaltet. [54]

Kapitel 4

Rechtliche und wirtschaftliche Betrachtung von Kleinwasserkraftwerken

4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

4.1.1 Europarecht

Wasserrahmenrichtlinie

Im Bereich der europäischen Wasserpolitik ist seit Dezember 2002 die *Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG* in Kraft. Diese sieht eine flussgebietsbezogene Betrachtung mit dem übergeordneten Ziel der Vermeidung einer weiteren Verschlechterung sowie dem Schutz und der Verbesserung des Zustandes der aquatischen Ökosysteme und der direkt von ihnen abhängigen Landökosysteme vor. [14]

Als Teilziel ist die Rückführung aller Gewässer zumindest in einen „guten Zustand“ (guter ökologischer und guter chemischer Zustand) zu nennen. Neben den definierten Zielen wird in der Richtlinie auch ein sogenanntes *Verschlechterungsverbot* genannt. Dies bedeutet, dass der aktuelle Zustand von Oberflächengewässern und jener des Grundwassers nach derzeitigem Kenntnisstand durch gewässerrelevante Aktivitäten nicht negativ beeinflusst werden darf. Befindet sich also ein Gewässer in einem „guten Zustand“, ist dieser Zustand aufrechtzuerhalten. Ausnahmen vom *Verschlechterungsverbot* müssen mit einem „übergeordneten öffentlichen Interesse“ begründet werden. [14, 22]

Aarhus Konvention

Die *Aarhus Konvention* ist ein völkerrechtlicher Vertrag, den 47 Vertragsparteien (Stand 2015), darunter auch die Europäische Union unterzeichnet haben. Diese Konvention ist deshalb erwähnenswert, da sie jeder Person Rechte im Umweltschutz zuschreibt. Der Vertrag wurde im Jahr 1998 von der Wirtschaftskommission für Europa (UNECE) ins Leben gerufen und ist seit Oktober 2001 in Kraft. In Österreich wurde die Aarhus-Konvention im Jahr 2005 ratifiziert. Ihr Inhalt wird in groben Zügen anhand der folgenden drei Säulen dargestellt:

1. Zugang der Öffentlichkeit zu Informationen über die Umwelt.
2. Öffentlichkeitsbeteiligung an bestimmten umweltbezogenen Entscheidungen.
3. Zugang zu Gerichten und Tribunalen in Umweltangelegenheiten.

Bezugnehmend auf Bewilligungsverfahren und Aktualisierungen von bestehenden Genehmigungen von Wasserkraftanlagen (unter der Bedingung, dass diese eine erhebliche Auswirkung auf die Umwelt haben können) bedeutet dies, dass der betroffenen Öffentlichkeit (Personen und Nichtregierungsorganisationen - NGOs) der Rechtsanspruch zugesprochen wird, Verstöße gegen nationales Umweltrecht durch Privatpersonen oder Behörden anzufechten. [10]

Umwelt- und Energiebeihilfeleitlinien 2014-2020

Die Umwelt- und Energiebeihilfeleitlinien (UEBLL) sind als konkretisierende Regelungen ähnlich einer Verwaltungsvorschrift zu verstehen. Geregelt werden Vorgaben für Förderinstrumente im Bereich der erneuerbaren Energiequellen bis zum Jahr 2020. Beihilfen für Strom aus erneuerbaren Energiequellen sollen grundsätzlich als Anreizsystem zur Marktintegration dienen. Als solche Förderinstrumente sind Investitionsbeihilfen und Betriebsbeihilfen zu nennen. Eine Kombination aus beiden Beihilfen ist bis zum Erreichen von festgelegten Beihilfeobergrenzen erlaubt. Für weitere Details wird auf Quelle [30] verwiesen. Die konkrete Umsetzung bzw. Anwendung der UEBLL in Österreich wird in Kapitel 4.1.2 Bundesrecht dargestellt. [1, 42]

4.1.2 Bundesrecht

Wasserrechtsgesetz

Das österreichische *Wasserrechtsgesetz 1959* (WRG 1959) ist ein sogenanntes Ressourcenbewirtschaftungsrecht. Zuletzt wurde das WRG 1959 im Jahr 2018 novelliert und beinhaltet im Wesentlichen die folgenden drei Hauptthemen: [16]

- Benutzung der Gewässer
- Schutz und Reinhaltung der Gewässer
- Schutz vor den Gefahren des Wassers

Die *Ausnutzung von Wasserkraft* gilt als bewilligungspflichtiges Vorhaben und ist unter Einhaltung der Gesetze jedermann gestattet. Nachfolgend wird der Ablauf einer **wasserrechtlichen Bewilligung** skizziert:

Grundsätzlich dürfen durch die geplante Anlage keine öffentlichen Interessen und auch keine bestehenden fremden Rechte beeinträchtigt werden. Zudem muss die Planung und Ausführung dem Stand der Technik entsprechen.

Als zuständige Wasserrechtsbehörde erster Instanz ist die Bezirksverwaltungsbehörde zu nennen. Die Zuständigkeitsbereiche anderer Wasserrechtsbehörden (z.B. Landeshauptmann oder Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) betrifft Wasserbenutzungsanlagen größeren Ausmaßes und sind gesondert im *WRG 1959* definiert.

Ein schriftlicher Antrag auf Erteilung einer wasserrechtlichen Bewilligung muss vom Grundstückseigentümer bei der zuständigen Stelle eingebracht werden. Dieser Antrag muss Angaben über Art, Zweck, Umfang und Dauer des Vorhabens und das betroffene Gewässer enthalten. Betroffenen Grundeigentümern, Wasser-, Fischerei- und Einforstungsberechtigten ist Gelegenheit zur Kenntnisnahme des Vorhabens zu geben. Erforderliche Pläne, Zeichnungen und erläuternde Bemerkungen sind von einem Fachkundigen zu erstellen und dem Antrag beizufügen. Bei Wasserbenutzungsanlagen ist die beanspruchte Wassermenge je Sekunde, Tag und Jahr anzugeben, sowie auch die damit verbundenen Auswirkungen auf das Gewässer. Bei Wasserkraftanlagen muss die Maschinenleistung, das Jahresarbeitsvermögen und die vorgesehenen Restwassermengen angeführt werden.

Alle Punkte des eingebrachten Antrages werden von der Wasserrechtsbehörde zunächst geprüft. Wird der Antrag für zulässig befunden, kommt es zu einer mündlichen Verhandlung zu der alle betroffenen Parteien geladen sind. Ist der Antrag nach Beendigung aller erforderlichen Erhebungen und Verhandlungen nicht als unzulässig abzuweisen, wird von der Behörde ein positiver Bewilligungsbescheid erteilt. Dieser Bescheid beinhaltet eine Beschreibung aller wasserführenden Vorrichtungen und maßgebenden Teile der Anlage. Bei Wasserkraftanlagen wird zudem die benutzte Wassermenge, die Rohfallhöhe, die Stationsfallhöhe, die einzubauende Leistung sowie auch das Jahresarbeitsvermögen angegeben. Mit dem Bescheid wird auch eine Fertigstellungsfrist für den Bau des Vorhabens vorgeschrieben. Die fristgerechte Fertigstellung ist der Wasserrechtsbehörde mitzuteilen, worauf eine Überprüfung der Ausführung durch eine örtliche Erhebung durchgeführt wird.

Die Bewilligung zur Benutzung eines Gewässers wird für maximal 90 Jahre befristet ausgesprochen. Meist ist die tatsächliche Bewilligungsdauer deutlich geringer, da diese unter Bedachtnahme wasserwirtschaftlicher und technischer Entwicklungen befristet werden.

Abschließend ist vom Landeshauptmann das neu verliehene Wasserrecht im *Wasserbuch* zur öffentlichen Einsichtnahme einzutragen. [15]

Ein weiterer Abschnitt des *WRG 1959* befasst sich mit dem **Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplan (NGP)**. Durch die Novellierung des Wasserrechtsgesetzes im Jahr 2003 erfolgte die Übertragung der im Jahr 2000 in Kraft getretenen *EU-Wasserrahmenrichtlinie* (WRRL) in nationales Recht. Die Umsetzung der Inhalte der

WRRL erfolgte in Österreich in Form des 1. nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans im Jahr 2010. Der NGP besteht aus sogenannten einzugsgebietbezogenen Bewirtschaftungsplänen, welche folgende Ziele beinhalten:

- Allgemeine Beschreibung der Merkmale der Flussgebietseinheit
- Bestandsaufnahme der signifikanten Belastungen und anthropogenen Einwirkungen auf den Gewässerzustand
- Zusammenfassung der Überwachungsergebnisse
- Maßnahmenprogramme zur Erreichung der Umweltziele
- Angabe von Ausnahmefällen bezüglich Umweltzielen

Die oben genannten Ziele sollen schrittweise bis zum Jahr 2027 in drei Planungsperioden erreicht werden. Daher erfolgt eine Überprüfung und Aktualisierung des NGPs im Zeitintervall von 6 Jahren. Aktuell ist der 2. Nationale Gewässerbewirtschaftungsplan (NPG 2015) in Kraft und kann unter [12] im Detail eingesehen werden. [22]

Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz

Mit dem Bundesgesetz über die Prüfung der Umweltverträglichkeit (Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000 – UVP-G 2000) wird sichergestellt, dass die Auswirkungen von großen, umweltrelevanten Vorhaben möglichst gering gehalten werden. Dies geschieht unter besonderer Einbindung der öffentlichen Interessen. [62]

Eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) ist im Bereich der Kleinwasserkraft verpflichtend durchzuführen, wenn es sich um Kraftwerksketten handelt. Konkret ist eine Kraftwerkskette definiert als eine Aneinanderreihung von zwei oder mehreren Wasserkraftwerken mit einer Engpassleistung von je mindestens 2 MW. [61]

Um eindeutig zu klären, ob ein Projekt UVP-pflichtig ist oder nicht, kann vom Projektinteressenten um ein sogenanntes Vorverfahren bei der Wasserrechtsbehörde angesucht werden. [2]

Ökostromgesetz

Das *Ökostromgesetz 2012* regelt im Wesentlichen die Herkunftsnachweise von elektrischer Energie aus erneuerbaren Energieträgern sowie die Voraussetzungen für die Förderung von Ökostromanlagen in Form von Einspeisetarifen und Investitionszuschüssen, insbesondere auch für die Kleinwasserkraft. Im Interesse des Klima- und Umweltschutzes beinhaltet das *Ökostromgesetz 2012* auch Ausbauziele für die jeweiligen Ökostromtechnologien Wasserkraft, Windkraft, Biomasse & Biogas sowie Photovoltaik. Für den Zeitraum 2010 bis 2020 wird

für die Sparte Wasserkraft ein Ausbauziel von 1000 MW (entspricht rd. 4 TWh/a an zusätzlicher Ökostromerzeugung) angegeben.[65]

Seit der Kundmachung dieses Bundesgesetzes im Jahr 2012, erfolgten bereits mehrere Novellierungen. Die derzeit geltende Fassung wurde im Juli 2017 kundgemacht und ist im allgemeinen Sprachgebrauch als „kleine Novelle 2017“ bekannt. Unter anderem wurde mit dieser Novelle für die Kleinwasserkraft ein zusätzliches Unterstützungsvolumen in der Höhe von 2 Millionen Euro für das Jahr 2017 und 1,5 Millionen Euro für das Jahr 2018 bereitgestellt. [43, 63]

Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2018

In der *Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2018* sind die aktuellen Einspeisetarife für alle Ökostromanlagen, die auf Basis erneuerbarer Energieträger betrieben werden, festgesetzt. So auch für Kleinwasserkraftanlagen mit einer Engpassleistung von maximal 2 MW, die in zwei weitere Kategorien unterteilt sind. Die erste Kategorie umfasst Tarife für neu errichtete oder revitalisierte Kleinwasserkraftanlagen, deren Engpassleistung oder Regelarbeitsvermögen im Zuge der Revitalisierung um mindestens 50 % erhöht wurde, jedoch darf die Engpassleistung maximal 2 MW betragen. Die zweite Kategorie beinhaltet Tarife für revitalisierte Kleinwasserkraftanlagen, deren Engpassleistung oder Regelarbeitsvermögen um mindestens 15 % erhöht wurde und deren Engpassleistung 2 MW nicht überschreitet. Die Gültigkeitsdauer der in der Verordnung angegebenen Einspeisetarife beträgt für Kleinwasserkraftwerke 13 Jahre ab Beginn der Abnahme durch die *OeMAG Abwicklungsstelle für Ökostrom AG* und endet spätestens mit Ablauf des 20. Betriebsjahres der Anlage. [55] Für eine genaue Auflistung der Einspeisetarife wird an dieser Stelle auf Quelle [64] bzw. auf Abschnitt 4.2.2 verwiesen.

Ökostromförderung

Wie unter dem Punkt *Ökostromgesetz 2012* bereits erwähnt, werden für Kleinwasserkraftanlagen Investitionszuschüsse gewährt. Die Abwicklung der Förderung erfolgt über die *OeMAG Abwicklungsstelle für Ökostrom AG*. Grundsätzlich werden eingehende Anträge nach dem Zeitpunkt des Einlangens gereiht. Die Bearbeitung und Vergabe erfolgt ebenso in dieser Reihenfolge, allerdings hat sich durch die hohe Nachfrage an Investitionszuschüssen eine Warteliste, die bis in das Jahr 2023 reicht, aufgebaut. Die Höhe der Zuschüsse wird nach der Engpassleistung wie folgt kategorisiert: [55]

- Bis 500 kW → 35 % des Investitionsvolumens; max. 1750 €/kW
- Bis 2 MW → 25 % des Investitionsvolumens; max. 1250 €/kW
- Bis 10 MW → 15 % des Investitionsvolumens; max. 650 €/kW

Weitere relevante Bundesgesetze/Verordnungen

- **Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer:** Diese Verordnung legt fest, wie der ökologische Zustand eines Oberflächengewässers erhoben wird und wie mit den Qualitätszielen in wasserrechtlichen Bewilligungsverfahren umgegangen wird. [13]
- **Umweltförderungsgesetz:** Zur Gewährung von Förderungen in Form von Finanzierungs- und Investitionszuschüssen im Bereich der Wasserwirtschaft, der Umwelt und der Altlastensanierung. Es beinhaltet auch Maßnahmen zum Schutz der Umwelt und des Klimas. [43]
- **Wasserbautenförderungsgesetz:** Regelt die Vergabe von Bundesmitteln für die Verbesserung des Wasserhaushaltes, den Hochwasserschutz und die Verbesserung der Gewässerökologie. [11]
- **Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz:** Regelt die elektrizitätswirtschaftliche Organisation wie beispielsweise jene der Grundversorgung oder der freien Lieferantenwahl. [7]
- **Energie-Control-Gesetz:** Definiert die Aufgaben der Regulierungsbehörde, der *E-Control Austria*, hinsichtlich der Umsetzung der Liberalisierung der Märkte für leitungsgebundene Energien (Elektrizität und Erdgas). [29]
- **Elektrizitätsabgabegesetz:** Regelt die Bestimmungen zur Besteuerung von elektrischer Energie (Elektrizitätsabgabe). Enthalten ist neben der Bemessungsgrundlage auch die Höhe der Abgabe sowie Angaben zu Steuerbefreiungen. [78]
- **Umsatzsteuergesetz:** Dieses Gesetz enthält sämtliche Steuersätze und deren Anwendung sowie Steuerbefreiungen und Regelungen für Kleinunternehmer. [81]
- **Körperschaftsteuergesetz:** Da Kleinwasserkraftanlagen häufig als Körperschaften (beispielsweise GmbH, Genossenschaft) betrieben werden, kommt das Körperschaftsteuergesetz zur Anwendung. Als Bemessungsgrundlage dient der erzielte Gewinn. Wie der Gewinn ermittelt und wie die Steuer zu entrichten ist, wird wiederum im Einkommensteuergesetz geregelt. [80]

4.1.3 Steiermärkisches Landesrecht

Steiermärkisches Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz

Mit diesem Landesgesetz wird die Erzeugung, Übertragung und Verteilung von elektrischer Energie geregelt. Das *Steiermärkische ElWOG 2005* beinhaltet das Ziel, den Anteil erneuerbarer Energieträger zur Stromerzeugung weiter zu erhöhen und die Versorgungssicherheit langfristig sicherzustellen. [59]

Steiermärkisches Naturschutzgesetz

Das *NschG 1976* regelt den Schutz der Natur zur Erhaltung der Umwelt als Lebensraum für Menschen, Pflanzen und Tiere. Unter die Bestimmungen dieses Gesetzes fallen neben Naturschutzgebieten beispielsweise auch Gewässer- und Uferschutzgebiete, Naturdenkmale und Europaschutzgebiete, letztere sind auch bekannt als „NATURA 2000“ Gebiete. Bei der Bewilligung von Vorhaben in solchen Gebieten ist mit strengen Auflagen betreffend der Einhaltung von Schutzziele zu rechnen. [60]

Gewässerschutzverordnung

Diese Verordnung auf Landesebene aus dem Jahr 2015 dient dem Schutz von ausgewählten Gewässerabschnitten. Im Speziellen sind diese Gewässerstrecken der Wahrung ökologischer Funktionen und dem Schutz der hydromorphologischen Eigenschaften der in Quelle [21] genannten Oberflächengewässer gewidmet. [44]

Förderungsmöglichkeit

Das Land Steiermark bietet durch die *Beratungsaktion Kleinwasserkraft Steiermark* den Anreiz für Kleinwasserkraftwerksbetreiber ihre bestehenden Anlagen im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie zu revitalisieren oder hinsichtlich einer höheren Stromproduktion zu optimieren. [44] Die anfallenden Beratungskosten werden mit bis zu 90 % (max. 1600 €) gefördert. Es kommen allerdings nur Anlagen mit einer Engpassleistung von bis zu 2 MW für den Erhalt einer Förderung in Frage. [3]

4.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse

4.2.1 Energieproduktion

Fallhöhe

Um die Leistung eines Wasserkraftwerkes zu berechnen, ist die Nettofallhöhe zu ermitteln. Diese berechnet sich aus der Bruttofallhöhe abzüglich der Summe aller hydraulischen Verluste, welche im Triebwasserweg auftreten.

Die Bruttofallhöhe bei Überdruckturbinen ist definiert durch die geodätische Höhendifferenz zwischen Oberwasser- und Unterwasserspiegel. Gleichdruckturbinen benötigen ein gewisses Maß an Freihang über dem Unterwasserspiegel, daher ist für die Bruttofallhöhe die geodätische Höhendifferenz zwischen Oberwasserspiegel und der Turbinenachse anzusetzen.

Der gesamte Fallhöhenverlust setzen sich aus den beiden Anteilen aus Rohrreibungsverlusten und lokalen Verlusthöhen zusammen. Eine Gemeinsamkeit dieser beiden Anteile ist deren Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit – die Zunahme des Widerstandes steigt mit dem Quadrat der Fließgeschwindigkeit. Auf die Berechnung der hydraulischen Verluste wurde bereits im Abschnitt 2.1.2 einschlägig eingegangen. Unter Berücksichtigung von Glg. 2.5 und Glg. 2.8, berechnet sich die **Nettofallhöhe** zu: [35]

$$h_{f,N} = h_{f,B} - \left(\sum h_{v,r} + \sum h_{v,i} \right) \quad [m] \quad (4.1)$$

wobei:

$h_{f,B}$... Bruttofallhöhe [m]

$h_{v,r}$... Reibungsverluste [m]

$h_{v,i}$... lokale Verluste [m]

Als Richtwert soll die Summe der Fallhöhenverluste nicht mehr als 4 % von der Bruttofallhöhe betragen. Wird diese Beschränkung eingehalten kann der Entwurf als ökonomisch sinnvoll bewertet werden. [54]

Anlagenleistung

Nach [35] kann zunächst die elektrische Leistung für Vorbemessungszwecke nach folgender **Überschlagsformel** ermittelt werden:

$$P = c_p \cdot Q \cdot h_{f,B} \quad [kW] \quad (4.2)$$

wobei:

P ... elektrische Leistung [kW]

c_p ... Überschlagsbeiwert $c_p \approx 8.0$ für Kleinwasserkraftanlagen [$\text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{m}^2)$]

Q ... Durchfluss [m^3/s]

$h_{f,B}$... Bruttofallhöhe [m]

Bei der exakten Berechnung der **elektrischen Leistung** werden sämtliche Energieverluste infolge Rohrreibung und lokaler Verluste berücksichtigt. Auch fließt der Gesamtwirkungsgrad des Maschinensatzes mit ein: [54]

$$P_{el} = \eta_{tot,M} \cdot \frac{\rho_w \cdot g}{10^3} \cdot Q \cdot h_{f,N} \quad [kW] \quad (4.3)$$

wobei:

P_{el} ... elektrische Leistung [kW]

$\eta_{tot,M}$... Gesamtwirkungsgrad Maschinensatz: $\eta_{tot,M} = 0.82 - 0.92$ [-]

ρ_w ... Dichte des Wassers bei 4° C: $\rho = 1000$ [kg/m^3]

g ... Erdbeschleunigung: $g = 9,81$ [m/s^2]

Q ... Durchfluss [m^3/s]

$h_{f,N}$... Nettofallhöhe [m]

Wobei sich der Gesamtwirkungsgrad des Maschinensatzes wie folgt zusammensetzt: [35]

$$\eta_{tot,M} = \eta_T \cdot \eta_{Getriebe} \cdot \eta_G \cdot \eta_{Trafo} \cdot \eta_{Eig} \quad [-] \quad (4.4)$$

wobei:

η_T ... Wirkungsgrad der Turbine [-]

$\eta_{Getriebe}$... Wirkungsgrad des Getriebes [-]

η_G ... Wirkungsgrad der Generators [-]

η_{Trafo} ... Umspannanlage, Leitungen [-]

η_{Eig} ... Eigenversorgung der Wasserkraftanlage [-]

Jahresarbeitsvermögen

Das Arbeits- bzw. Regelarbeitsvermögen E_a ist die durchschnittlich erzeugbare Energiemenge einer Wasserkraftanlage über die Zeitdauer von einem Jahr. Die Erzeugung an elektrischer Energie kann aus den mittleren Dauerzahlen des Abflusses berechnet werden. Dabei definiert sich die Nettofallhöhe sowie der Maschinenwirkungsgrad als eine Funktion der Beaufschlagung. Gegebenenfalls muss zusätzlich die Verfügbarkeit der Anlage Berücksichtigung finden, wie beispielsweise durch ungeplante Ausfallzeiten oder Reparaturen. [35, 54]

$$E_a = g \cdot \eta_{tot,M}(Q) \cdot h_{f,N}(Q) \cdot \int_0^t Q(t) dt \quad [kWh] \quad (4.5)$$

wobei:

E_a ... Jahresarbeitsvermögen [kWh]

$h_{f,N}$... Nettofallhöhe [m]

t ... Zeit [h]

4.2.2 Erlöse

Stromvergütung

Wie bereits in Abschnitt 4.1.2 erwähnt, ist die aktuelle **gesetzliche Einspeisevergütung** für Ökostromanlagen in der *Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2018* geregelt. Die dort angegebenen Tarife haben eine Gültigkeit von 13 Jahren ab Beginn der Abnahme durch die Ökostromabwicklungsstelle. Es gilt zu berücksichtigen, dass sich innerhalb der Vertragslaufzeit der Einspeisetarif jährlich um 1 % verringert. Laut [64] sind bei Antragstellung im Jahr 2019 für Kleinwasserkraftanlagen folgende Einspeisetarife gültig:

1. Neu errichtete oder revitalisierte Kleinwasserkraftanlagen, deren Engpassleistung oder Regelarbeitsvermögen im Zuge der Revitalisierung um mindestens 50 % erhöht wurde, jedoch mit einer maximalen Engpassleistung von 2 MW:
 - a) für die ersten 500 000 kWh → 10,20 Cent/kWh
 - b) für die nächsten 500 000 kWh → 8,36 Cent/kWh
 - c) für die nächsten 1 500 000 kWh → 7,25 Cent/kWh
 - d) für die nächsten 2 500 000 kWh → 4,42 Cent/kWh
 - e) für die nächsten 2 500 000 kWh → 4,05 Cent/kWh
 - f) über 7 500 000 kWh hinaus → 3,20 Cent/kWh
2. Revitalisierte Kleinwasserkraftanlagen, deren Engpassleistung oder Regelarbeitsvermögen um mindestens 15 % erhöht wurde und deren Engpassleistung 2 MW nicht überschreitet:
 - a) für die ersten 500 000 kWh → 8,51 Cent/kWh
 - b) für die nächsten 500 000 kWh → 6,76 Cent/kWh
 - c) für die nächsten 1 500 000 kWh → 5,77 Cent/kWh
 - d) für die nächsten 2 500 000 kWh → 3,55 Cent/kWh
 - e) für die nächsten 2 500 000 kWh → 3,28 Cent/kWh
 - f) über 7 500 000 kWh hinaus → 2,51 Cent/kWh

Kann für eine Kleinwasserkraftanlage keine gesetzliche Einspeisevergütung erzielt werden, so gilt es für den Anlagenbetreiber am **freien Markt** einen entsprechenden Vergütungstarif auszuhandeln. Als Richtwert wird hier der Großhandelspreis für elektrischen Strom in Österreich mit 5,76 Cent/kWh angegeben (Datenstand: 4. Quartal 2018). [24, 35]

Ist die Stromvergütung bekannt, so kann der **jährliche Ertrag** aus dem Verkauf von elektrischer Energie durch Multiplikation der erzeugten Jahresarbeit mit dem jeweils gültigen Einspeisetarif berechnet werden:

$$\text{Ertrag} = \text{Vergütung} * \text{RAV} \quad [\text{€/a}] \quad (4.6)$$

wobei:

RAV ... Jahresarbeitsvermögen [kWh/a]

Steuer auf Einkommen und Ertrag

Die Berechnung der Steuern und Abgaben ist abhängig von der Rechtsform des Unternehmens mit der eine Kleinwasserkraftanlage betrieben wird. Wie bereits in Abschnitt 4.1.2 angeführt, ist die *Gesellschaft mit bedingter Haftung* (GmbH) als häufige Rechtsform anzutreffen. In diesem Fall ist auf das steuerpflichtige Einkommen (Gewinn) eine **Körperschaftsteuer** in der Höhe von 25 % zu entrichten. Dabei sind die Gewinnermittlungsvorschriften nach dem Einkommenssteuergesetz einzuhalten. Es gilt allerdings die Mindestkörperschaftsteuer laut Tab. 4.1 zu beachten. [80]

Werden Kleinwasserkraftanlagen von natürlichen Personen (Einzelunternehmer oder Gesellschafter von Personengesellschaften) betrieben, so ist die **Einkommensteuer** nach dem Einkommensteuergesetz (EStG) auf Basis des Jahreseinkommens zu entrichten. Der aktuelle Einkommensteuertarif ist gestaffelt in Tab. 4.2 angegeben. [77]

Tab. 4.1: Mindestkörperschaftsteuer [76]

Mindestkörperschaftsteuer	pro Jahr	pro Quartal
GmbH*)	€ 1.750,-	€ 437,50,-
AG	€ 3.500,-	€ 875,-
Kreditinstitute und Versicherungen	€ 5.452,-	€ 1.363,-

Tab. 4.2: Einkommensteuertarif [76]

Jahres-Einkommen in €	Einkommen-Steuer in €	Durchschnitt-Steuersatz in %	Grenz-Steuersatz in %
< 11.000	0	0	0
> 11.000 bis 18.000	$(\text{Einkommen} - 11.000) \times 25 \%$	0 – 9,72	25
> 18.000 bis 31.000	$(\text{Einkommen} - 18.000) \times 35 \% + 1.750$	9,72 – 20,32	35
> 31.000 bis 60.000	$(\text{Einkommen} - 31.000) \times 42 \% + 6.300$	20,32 – 30,80	42
> 60.000 bis 90.000	$(\text{Einkommen} - 60.000) \times 48 \% + 18.480$	30,80 – 36,53	48
> 90.000 bis 1 Mio.	$(\text{Einkommen} - 90.000) \times 50 \% + 32.880$	36,53 – 48,79	50
> 1 Mio. (befristet 2016 bis 2020)	$(\text{Einkommen} - 1.000.000) \times 55 \% + 487.880$	> 48,79	55

Gewinnermittlung [79]

Die steuerliche Gewinnermittlung ist an die Rechtsform sowie an die Höhe des Umsatzes gebunden. Es ergeben sich daher drei Arten für die Gewinnermittlung:

- **Betriebsvermögensvergleich (doppelte Buchführung):** Die doppelte Buchführung ist für Kapitalgesellschaften wie die GmbH verpflichtend. Ebenso für Unternehmen, deren Jahresumsatz größer ist als 700 000 €. Der steuerpflichtige Gewinn wird mittels Gewinn- und Verlustrechnung festgestellt.
- **Einnahmen-Ausgaben-Rechnung:** Bei dieser Methode werden die Einnahmen den Ausgaben gegenübergestellt, wodurch sich der Gewinn oder Verlust ergibt. Die Abschreibung (Absetzung für Abnutzung) von länger genutzten Gütern ist als Besonderheit bei dieser Methode zu berücksichtigen. Die Abschreibung findet jährlich auf der Ausgabenseite Berücksichtigung, bis die kalkulatorische Nutzungsdauer erreicht ist.
- **Pauschalierung:** Als Basispauschalierung sind 12 % auf den Jahresumsatz anzusetzen, sofern dieser unter 220 000 € liegt. Für bestimmte Unternehmensgruppen gibt es spezielle Branchenpauschalierungen.

4.2.3 Aufwendungen

Investitionskosten

Als solide Grundlage zur Ermittlung der Planungs- und Baukosten dient ein ausgearbeiteter Vorentwurf über alle prinzipiellen Bauteile des Kraftwerkes – Wehranlage, Einlaufbauwerk, Triebwasserweg, Krafthaus, Turbine, Generator, Transformator und Energieableitung. Darauf aufbauend werden bauteilbezogene Angebote von Lieferanten eingeholt. *DIN 276 - Kosten im Hochbau* bietet hierfür ein übersichtliches Kostengliederungssystem für die spezielle Anwendung bei Wasserkraftanlagen (Tab. 4.3). Dieses beinhaltet sämtliche Kostengruppen mit Zuordnung in fünf Funktionsbereiche, wodurch die Entstehungsstellen der Kosten übersichtlich dargestellt werden. Zudem bietet dieses Kostenschema eine zuverlässige Entscheidungsgrundlage bei der Durchführung von Variantenvergleichen. Aus der Summe der ermittelten Investitionskosten können in weiterer Folge die spezifischen Investitionskosten (Abschnitt 4.2.4) berechnet werden. [35, 54]

Tab. 4.3: Kostengliederungssystem für die Anwendung bei Wasserkraftanlagen [35]

Funktionsbereiche Kostengruppen	Krafthaus- Hochbau	Krafthaus- Tiefbau	Wehranlage, Verbindungs- gew. etc.	Wasser- fassung	Wasser- führung
100 Grundstück					
200 Herrichten und Erschließen					
300 Bauwerk - Baukonstruktion Krafthaus					
400 Technische Anlagen Krafthaus					
500 Außenanlagen					
600 Ausstattung und Kunstwerke					
700 Baunebenkosten					
800 Baukonstruktion - Wasserführung					
900 Anlagentechnische Ausrüstung Stahlwasserbau/Maschinen-/Elektrotechnik					

Betrieb und Unterhalt

Die jährlichen Aufwendungen für den Betrieb und Unterhalt einer Kleinwasserkraftanlage werden nach [35] mit etwa 4 % des Investitionsvolumens angegeben. Alternativ können die Bewirtschaftungskosten auch auf die jährlichen Erträge bezogen werden – in diesem Fall sind 15–20 % anzusetzen.

Die jährlichen Personalaufwendungen sollten nach derselben Quelle für sehr kleine Anlagen mit etwa 0.8 % des Investitionsvolumens oder 8–12 % des jährlichen Ertrages berücksichtigt werden.

4.2.4 Abschätzung der Wirtschaftlichkeit

Das Ziel einer Wirtschaftlichkeitsanalyse liegt in der begründeten Entscheidungsfindung bei der Auswahl von Investitionsmöglichkeiten. Eine Vielzahl an statischen und dynamischen Investitionsrechenverfahren (Abb. 4.1) werden hierfür als Werkzeuge zur Durchführung der Analyse verwendet. [38]

Da Wasserkraftanlagen eine Nutzungsdauer von mehreren Jahrzehnten aufweisen, wird im Folgenden zunächst das Augenmerk auf dynamische Investitionsrechenverfahren gelegt. Statische Methoden werden für diesen Anwendungszweck als nicht relevant erachtet und daher in der vorliegenden Masterarbeit nicht behandelt. Am Ende dieses Kapitels wird noch auf das Nutzen-Kosten-Verhältnis und auf spezifische Bewertungskriterien für Wasserkraftanlagen eingegangen.

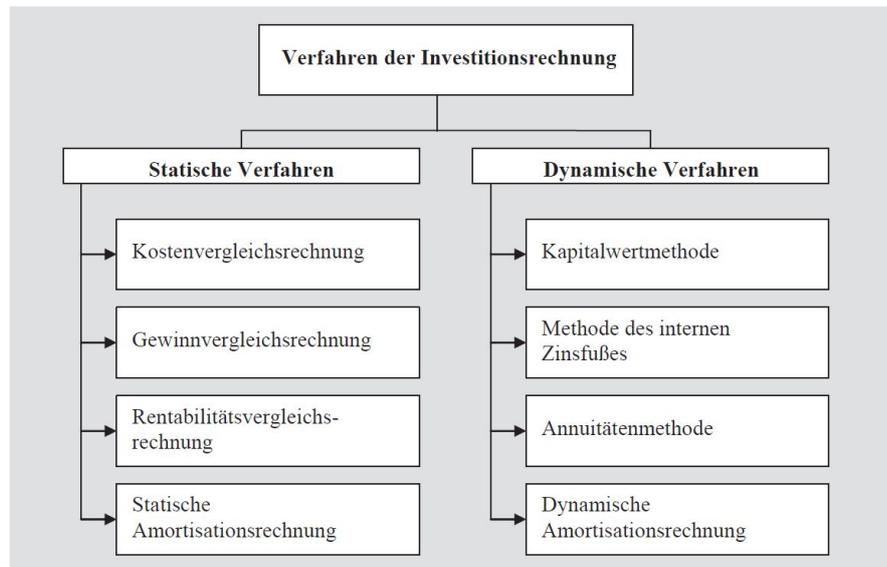


Abb. 4.1: Investitionsrechenverfahren [38]

Dynamische Investitionsrechenverfahren berücksichtigen den Zeitpunkt des Zahlungsflusses bezogen auf einen festgelegten Bezugszeitpunkt. Für diesen wird häufig das Jahr der Inbetriebnahme herangezogen. Die Vergleichbarkeit von Zahlungen, die vor dem Bezugszeitpunkt erfolgen, wird durch Aufzinsung (Akkumulierung) und Zahlungen die nach dem Bezugszeitpunkt erfolgen, wird durch Abzinsung (Diskontierung) hergestellt. Die Berechnung der Aufzinsung erfolgt zu: [35]

$$W = Z \cdot (1 + i)^n \quad [€] \quad (4.7)$$

Die Abzinsung berechnet sich zu:

$$W = Z \cdot \frac{1}{(1 + i)^n} \quad [€] \quad (4.8)$$

wobei:

W ... End- oder Barwert [€]

Z ... einmalige Zahlung [€]

i ... kalkulatorischer Zinssatz [-]

n ... Zahlungszeitpunkt [a]

Kapitalwertmethode

Das Ziel dieser Methode ist es, Investitionsvorschläge zu reihen. Es werden die Ein- und Auszahlungen nach Größe, Zeitpunkt und Dauer über die gesamte Projektlebensdauer erfasst. Um eine Vergleichbarkeit dieser Zahlungen auf einen konkreten Bezugszeitpunkt (Jahr der Inbetriebnahme) herzustellen, müssen bereits vergangene Zahlungen/Erträge aufgezinst und zukünftig bevorstehende Zahlungen/Erträge abgezinst werden. Der Kapitalwert ist somit die Differenz zwischen den Einnahmen und Ausgaben über die Projektlebensdauer, beide diskontiert auf den Betrachtungszeitpunkt. Er berechnet sich nach folgender Formel zu: [35, 38]

$$W_G = -I + \sum_{t=1}^T (N_t - K_t) \cdot q^{-t} + R \cdot q^{-T} \quad [€] \quad (4.9)$$

wobei:

- W_G ... Kapital- bzw. Gegenwartswert [€]
- I ... Investition aufgezinst [€]
- N_t ... Nutzen (Einkommen) im n-ten Jahr, auf Jahresende bezogen [€]
- K_t ... Kosten (Ausgaben) im n-ten Jahr, auf Jahresende bezogen [€]
- T ... kalkulatorische Lebenszeit [a]
- t ... zeitliche Laufvariable [a]
- q ... Zinsfaktor [-]
- R ... Restwert der Anlage am Abschreibungsende [€]

Als Zinssatz sollte ein Kalkulationszinssatz (weighted average cost of capital, WACC) angewandt werden. Dieser berücksichtigt das Verhältnis von Eigen- und Fremdkapital am Gesamtkapital. Bei Anwendung des Kalkulationszinssatz wird dieser vereinfachend als konstant über die Laufzeit angenommen, da Inflationsraten für lange Investitionszeiträume nicht zuverlässig prognostiziert werden können. [35, 38, 54]

Für die Entscheidungsfindung ist grundsätzlich nur ein positiver Kapitalwert akzeptabel. Der Betrag des Kapitalwertes kann als zusätzliche Rendite betrachtet werden, die sich über die Verzinsung hinausgehend ergibt. Ein negativer Kapitalwert bedeutet, dass der diskontierte Gewinn über die Lebenszeit der Anlage die Investitionskosten nicht decken kann - die Investition amortisiert sich nicht. Im Vergleich mit anderen Projekten, ist jene Variante mit dem höchsten Kapitalwert zu bevorzugen. Bei dieser Methode spielt die Höhe der Investitionssumme keine Rolle, auch bleibt eine bestimmte Ertragsersparnis unberücksichtigt. [38, 54]

Methode des internen Zinsfußes

Der interne Zinsfuß p_0 ist jener Zinssatz, bei dem der Gegenwartswert gleich null ist. Es ist ein Parameter der eine Aussage über die Rentabilität eines Projektes liefert und daher dem Vergleich mit alternativen Investitionen dient. Die Berechnung erfolgt analog zum oben beschriebenen Kapitalwert, allerdings unter Einhaltung folgender Bedingung: [35, 54]

$$W_G = 0 \quad [-] \quad (4.10)$$

Jenes Projekt mit dem höchsten internen Zinsfuß gilt es zu favorisieren. Zudem soll der interne Zinsfuß, zur Kompensation des Investitionsrisikos, einige Prozentpunkte über den Kosten der Fremdfinanzierung liegen. [38]

Dynamische Amortisationsrechnung

Mit der Amortisationsrechnung wird jene Zeitspanne berechnet, die es benötigt, um das investierte Kapital unter Berücksichtigung der Verzinsung wieder zu erwirtschaften. Die Berechnung erfolgt indem vom kumulierten Barwert der betrachteten Zeitspanne die Investitionssumme abgezogen wird, wodurch sich für jedes Jahr der Kapitalwert ergibt. Sobald der Kapitalwert den Betrag null annimmt, ist der Amortisationszeitpunkt erreicht. Als Auswahlkriterium gilt es die Variante mit der kürzesten Amortisationszeit zu bevorzugen. [38]

Nutzen-Kosten-Analyse

Diese Analyse beschreibt das Verhältnis zwischen dem Einkommensfluss und dem Ausgabefluss. Bei Vernachlässigung des Restwertes erfolgt die Berechnung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses für die volle kalkulatorische Lebenszeit der Anlage, bezogen auf das Jahr der Inbetriebnahme, zu: [35, 54]

$$R = \left(\sum_{t=1}^T N_t / q^t \right) / \left(\sum_{t=1}^T K_t / q^t \right) \quad [-] \quad (4.11)$$

wobei:

R ... Nutzen-Kosten-Verhältnis [-]

Nimmt bei einem Projekt diese Verhältniszahl einen Wert unter 1 an, so sollte dieses nicht mehr weiter verfolgt werden. Der Grenzfall $R = 1$ stellt den internen Zinsfuß dar. Folglich ist die Rentabilität eines Projektes durch $R > 1$ gegeben. [35]

Spezifische Bewertungskriterien

Um Investitionen in unterschiedliche Projekte oder um Projektvarianten zu vergleichen, werden häufig die **spezifischen Kosten der Leistung (€/kW)**, auch als spezifische Investition bezeichnet, herangezogen. Das Verhältnis der Investition zur Ausbauleistung kann nur dann als charakteristische Kenngröße betrachtet werden, wenn die verglichenen Projekte eine annähernd gleich lange Nutzungsdauer aufweisen. Die Berechnung erfolgt zu: [35]

$$I_0 = I/P \quad [\text{€/kW}] \quad (4.12)$$

wobei:

I_0 ... spezifische Investition [€/kW]

I ... Investition [€]

P ... Ausbauleistung [kW]

Zur Orientierung ist in Abb. 4.2 eine statistische Auswertung von spezifischen Investitionskosten der OeMAG (Abwicklungsstelle für Ökostrom AG) aus dem Jahr 2015 dargestellt. Die Grafik und die darin angegebene Funktion legen klar, dass die Investitionskosten bei geringer werdender Kraftwerksgröße deutlich ansteigen. [54, 56]

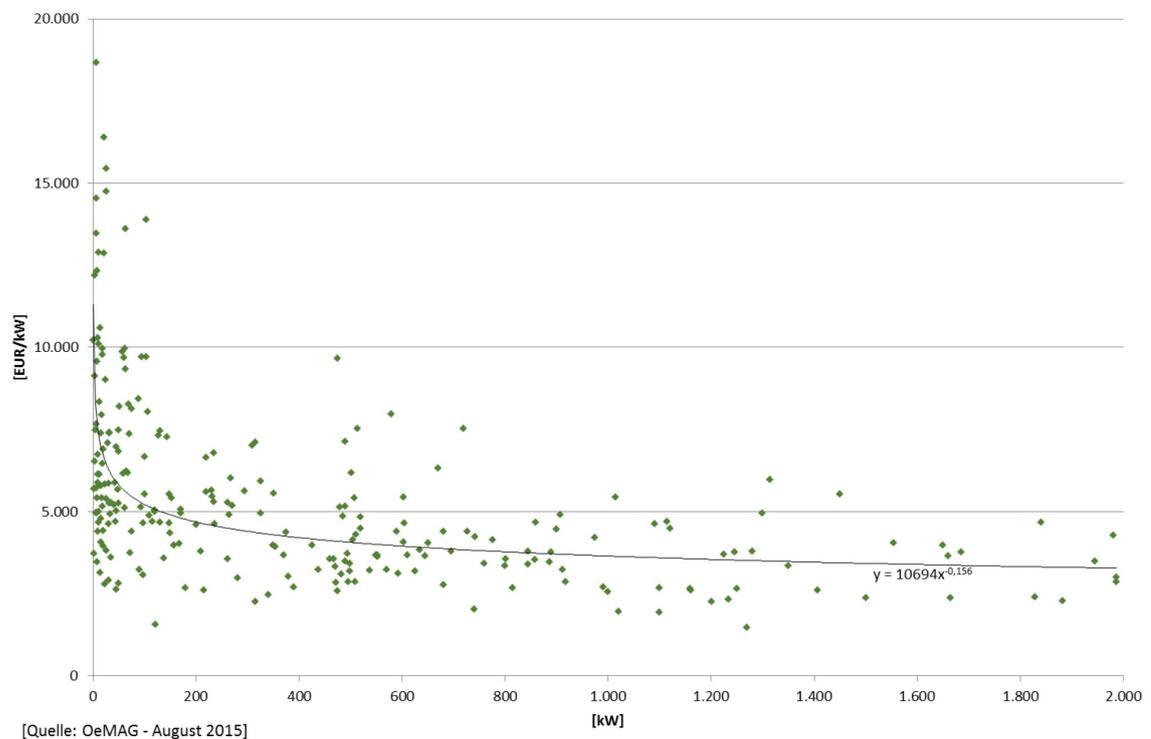


Abb. 4.2: Spezifische Investitionskosten der Leistung für KWK-Anlagen bis 2 MW [56]

Mehr Aussagekraft im Variantenvergleich haben die **spezifischen Kosten der Arbeit (€/kWh)**, sofern zur Berechnung Daten eines charakteristischen Jahres herangezogen werden. Die spezifischen Energieerzeugungskosten berechnen sich aus dem Verhältnis der Jahreskosten zum Jahresarbeitsvermögen: [35]

$$c = K_J / E_a \quad [\text{€/kWh}] \quad (4.13)$$

wobei:

c ... spezifische Energieerzeugungskosten [€/kWh]

K_J ... Jahreskosten [€]

E_a ... Jahresarbeitsvermögen [kWh]

Kapitel 5

Konzeptionelle Planung einer Kleinwasserkraftanlage

5.1 Allgemeines

Das Anlagenkonzept des Projektes „KWK – Schrottbauerhof“ soll darauf ausgerichtet sein, dass sowohl ein isolierter Inselbetrieb, als auch ein Netz-Parallelbetrieb zur Einspeisung von Überschussenergie ermöglicht werden kann. In Abschnitt 1.1 wurde bereits erläutert, dass in das neue Anlagenkonzept, Teile einer bestehenden Altanlage bestmöglich integriert werden sollen.

Zur Festlegung der Ausbauleistung wird die aktuell vorhandene Anschlussleistung des *Schrottbauerhofes* am öffentlichen Netz herangezogen, welche 11,0 kW beträgt. Die neue Anlage wird daher auf eine Ausbauleistung von 10,0 kW bemessen. Somit handelt es sich beim vorliegenden Projekt um ein sogenanntes Mikro-Wasserkraftwerk.

Des Weiteren zeigt Abb. 5.1 die Entwicklung des jährlichen Stromverbrauchs am *Schrottbauerhof* über den Zeitraum der vergangenen acht Jahre (durchschnittlich 8000 kWh/a). Ebenso sind die zugehörigen Stromkosten dargestellt (durchschnittlich 700 €/a). Die angegebenen Stromkosten beziffern ausschließlich die Energieentgelte inklusive Mehrwertsteuer. Netzentgelte werden in dieser Darstellung nicht berücksichtigt. Aufbauend auf diesen Angaben erfolgen sämtliche weiterführenden Berechnungen und Analysen.

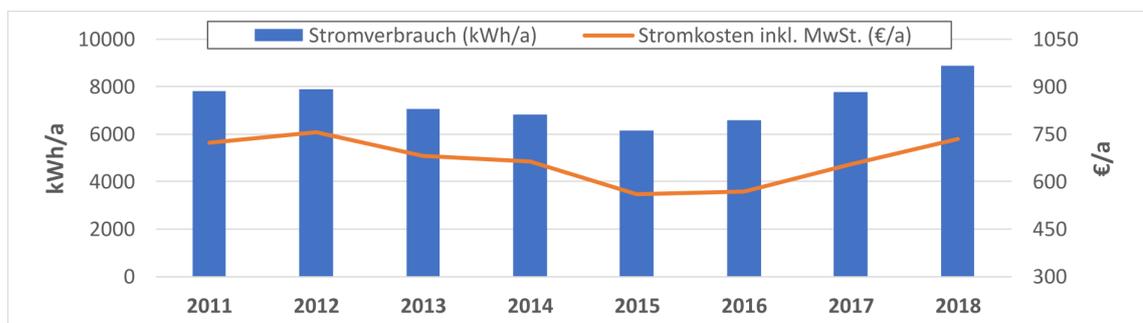


Abb. 5.1: Jährlicher Stromverbrauch und Stromkosten am *Schrottbauerhof* (2011–2018)

5.2 Anwendungsbeispiel „KWK–Schrottbauerhof“

5.2.1 Topographie des Standortes

Sämtliche Anlagenteile des Projektes „KWK – Schrottbauerhof“ erstrecken sich auf der Liegenschaft des Bergbauernhofes in der Gemeinde Schwanberg in der Weststeiermark (politischer Bezirk Deutschlandsberg).

In Abb. 5.2 ist die Topographie des Projekt-Standortes abgebildet. Dargestellt ist der Schrottbauerhof auf 790 müA sowie das Quellgebiet auf rd. 840 müA, von welchem ein offenes Erdgerinne (Altbestand) über eine Länge von 400 m zum Triebwasserspeicher (Altbestand) auf 780 müA führt und diesen speist. Zusätzlich sind die Standorte der geplanten Anlagenteile wie der Wasserfassung (810 müA), Zuleitung ($L = 250\text{ m}$), Druckrohrleitung ($L = 350\text{ m}$), Krafthaus (600 müA) und Energieableitung ($L = 400\text{ m}$) im Übersichtsplan eingetragen.

In Abb. 5.2 ist auch das etwa 65 m lange Rückleitungsgerinne dargestellt. Es verbindet den Triebwasserauslass des Krafthauses mit dem „Schrottbauerbach“, welcher im weiteren Verlauf in die „Schwarze Sulm“ einmündet. Durch die Errichtung des Rückleitungsgerinnes wird in das Flora-Fauna-Habitat „Schwarze und Weiße Sulm“ eingegriffen. Da dieses Gerinne als offenes Erdgerinne, ohne Einbringung von ortsfremden Baumaterialien, hergestellt wird, bewirkt dieser Eingriff keine Verschlechterung des Habitats.

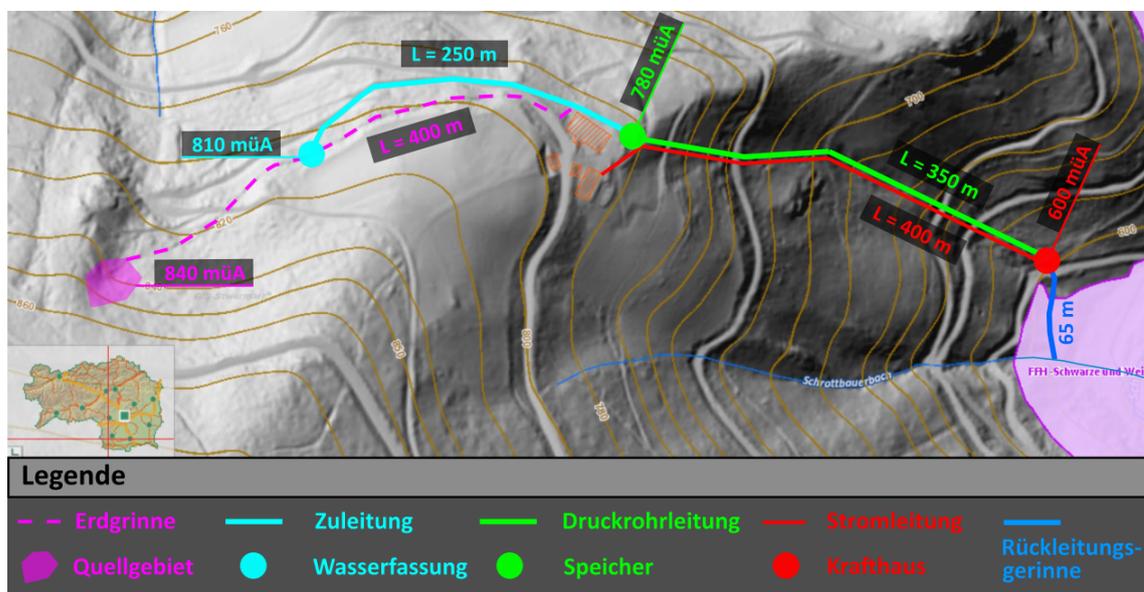


Abb. 5.2: Anlagenkonzept – Übersichtsplan, nicht maßstäblich [36]

5.2.2 Hydrologische Daten

Vom Autor wurde ein **Messkonzept** für das bestehende, rd. 400 m lange, Zuflussgerinne zum Speicher erarbeitet, womit zwei konkrete Fragestellungen beantwortet werden sollen. Einerseits soll eine Abschätzung des natürlichen Zuflusses ermöglicht werden, andererseits soll ein vorteilhafter Standort für eine mögliche Wasserfassung bestimmt werden.

Wie in Abb. 5.3 ersichtlich, wurden drei Messpunkte (A, B und C) festgelegt, an denen die Wasserführung zu definierten Zeitpunkten gemessen wurde. Um einen Eindruck über die Schwankungsbreite der Wasserführung an allen drei Messpunkten zu bekommen, wurde der Beobachtungszeitraum mit drei Monaten (Mitte August bis Mitte November des Jahres 2018) festgelegt. Innerhalb von diesem Zeitfenster wurden die Messungen zu den folgenden drei Ereignissen durchgeführt:

1. Am Ende von Trockenperioden
2. Nach Regenereignissen
3. Zusätzlich im Intervall von 7 Tagen

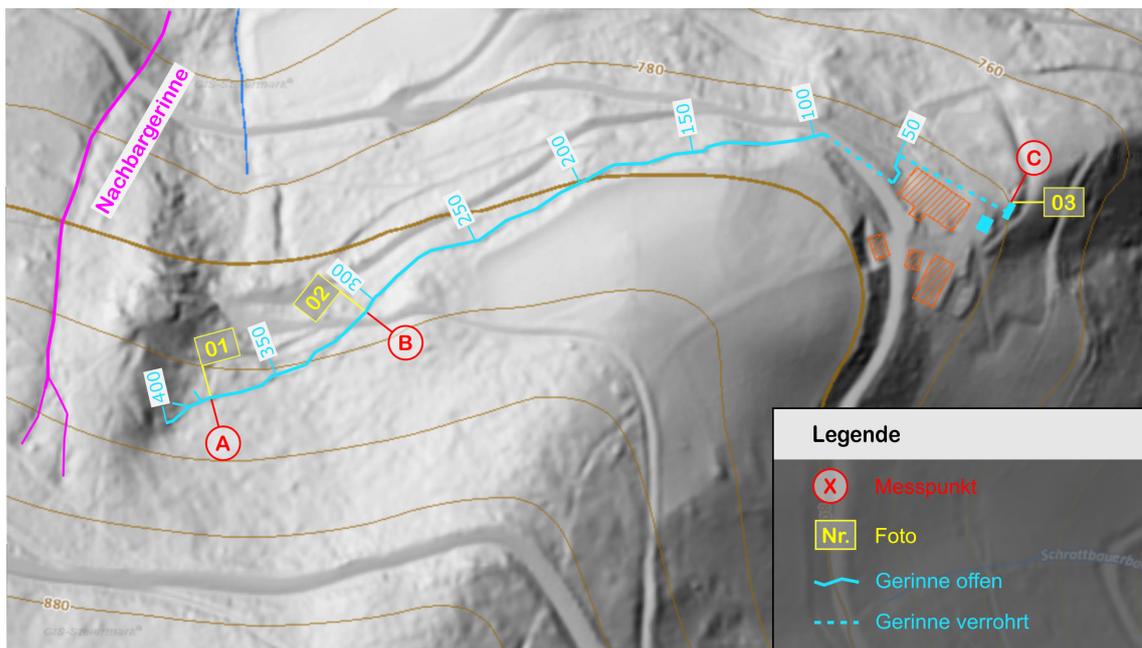


Abb. 5.3: Messkonzept – Übersichtsplan, nicht maßstäblich [36]

Um dem Leser einen Eindruck über die lokalen Gegebenheiten vermitteln zu können, sind in Abb. 5.4 Fotoaufnahmen von den drei Messpunkten dargestellt. Messpunkt A befindet sich auf rd. 825 müA, unmittelbar dort, wo sich mehrere Quellen zu einem Gerinne vereinen. Messpunkt B liegt auf rd. 815 müA, etwa 90 m entfernt von Messpunkt A. Innerhalb der Teilstrecke zwischen Messpunkt A und Messpunkt B sammelt sich bei Regenereignissen

zusätzlich Oberflächenwasser im Gerinne, außerdem fließt eine weitere Quelle dem Gerinne zu, wodurch sich an Messstelle B ein vorteilhafter Standort für eine mögliche Wasserfassung bieten könnte. Messpunkt C befindet sich am Überlauf des Speicherbeckens, auf 780 müA. Diese Stelle ist für Vergleichszwecke mit Messpunkt A und B von Interesse.



Abb. 5.4: Von links: Messpunkt A, B, C

Methodik

An allen drei Messstellen wurde die Methode der **volumetrischen Messung** angewandt. Hierfür wurde der Abfluss für 5 Sekunden in einem Messgefäß aufgefangen und danach das Volumen mittels Messskala, welche sich am Gefäß befindet, bestimmt. Das Volumen dividiert durch die Zeit, ergibt den Abfluss in [l/s]. Aus jeweils fünf Einzelmessungen wurde ein Messwert als Durchschnittswert ermittelt und dokumentiert.

Abb. 5.6 zeigt den Verlauf der dokumentierten Messreihe. Es ist deutlich ersichtlich, dass der Abfluss bei Messpunkt C am stärksten schwankt. Dies begründet sich dadurch, dass bei Starkregenereignissen an dieser Stelle große Mengen an Oberflächenwasser zuffießen. Bei Trockenwetter zeigt sich, dass der Abfluss an Messpunkt C unter jenen der beiden anderen Messpunkte liegt. Dies erklärt sich dadurch, dass sich Verluste durch Verdunstung und Versickerung, über die Gerinnelänge von 400 m, bemerkbar machen.

Des Weiteren wird seit 2013 am Messpunkt C, aufgrund des Koralmtunnel-Projektes der ÖBB, von der *JR-AquaConSol GmbH* ein Abflussmonitoring betrieben. Diese Datenreihe wurde dem Autor zur Verfügung gestellt und ist in Abb. 5.5 dargestellt. Es handelt sich dabei um punktuelle Messungen eines instationären Abflusses im Zeitintervall von einem Monat (2013 und 2014) bzw. im Zeitintervall von zwei Monaten (2015 – 2018). Der durchschnittliche Abfluss für den Zeitraum der letzten 5,5 Jahre wird mit 1,24 l/s angegeben. Die Einzelmesswerte dieser Messreihe werden vom Autor allerdings für nicht aussagekräftig

bewertet, da die Messungen ausschließlich nach einem festen Zeitintervall erfolgten und die den Abfluss stark beeinflussenden Wettergeschehnisse nicht dokumentiert wurden. Allgemein zeigt Abb. 5.5, dass ein Abflussminimum stets im Herbst und Abflussspitzen häufig im Frühjahr auftreten.

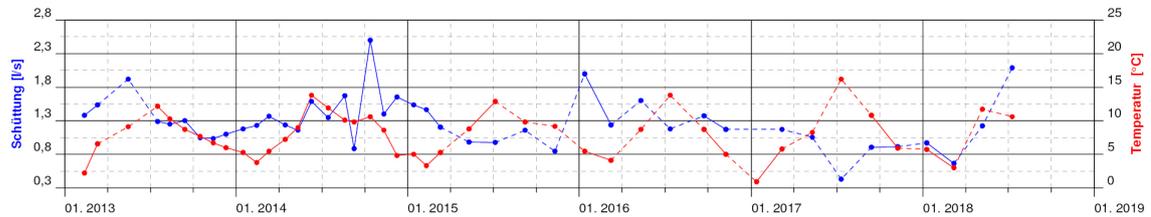


Abb. 5.5: Abflussreihe für Messpunkt C [41]

Anhand der vom Autor selbst durchgeführten Abflussmessungen bestätigt sich Messpunkt B als ein sehr geeigneter Standort für die Wasserfassung. Der Abfluss dieser Messstelle liegt innerhalb des Betrachtungszeitraumes überwiegend über jenen von Messpunkt A und C (Abb. 5.6). Der durchschnittliche Abfluss an der Messstelle B beträgt 1,85 l/s. Da die Aufzeichnungen allerdings nur über eine Dauer von drei Monaten durchgeführt wurden, muss für die weitere Berechnung der Jahreswasserfracht folgende Annahme für das Sommer- und Winterhalbjahr (zu je 6 Monaten) getroffen werden:

- Sommer: 1,6 l/s
- Winter: 1,3 l/s

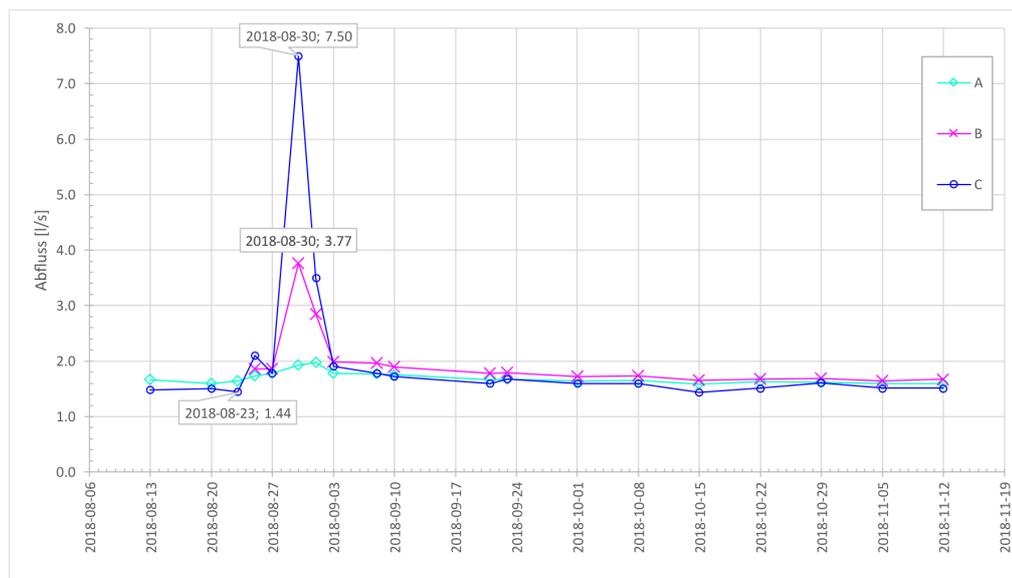


Abb. 5.6: Abflussreihe für Messpunkt A, B, C

Der Autor weist an dieser Stelle ausdrücklich darauf hin, dass die obige Annahme zur Wasserführung konservativ getroffen wurde und ausschließlich als Grundlage zur konzeptionellen Ausarbeitung dieser Masterarbeit dient. Um eine aussagekräftige Datengrundlage für detaillierte Planungsmaßnahmen zu schaffen, muss die Wasserführung über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr beobachtet und dokumentiert werden. Dieser Zeitrahmen liegt allerdings nicht in den Möglichkeiten dieser Masterarbeit.

Bestimmung des Abflusses mittels Messwehr

Mit dem Ziel den Abfluss an Messpunkt B kontinuierlich aufzuzeichnen, wurde ein Messwehr mit Dreiecküberfall (Thomson-Wehr) im Gerinne installiert (Abb. 5.8b). Das Messwehr wurde dem Autor vom Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, der Technischen Universität Graz, zur Verfügung gestellt. Die erforderliche Wasserstand-Durchfluss-Beziehung (Abb. 5.7) für das eingesetzte Thomson-Wehr wurde im hydraulischen Labor, am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, vom Autor versuchstechnisch ermittelt. Der Überfallbeiwert μ wurde in weiterer Folge anhand von Glg. 5.1 (nach [18], Geometrie siehe Abb. 5.8a) bestimmt, woraus sich ein Wert von $\mu = 0.68$ berechnet.

$$Q = \frac{8}{15} \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan(\alpha) \cdot h^{\frac{5}{2}} \quad (5.1)$$

wobei:

Q ... Durchfluss [m^3/s]

μ ... Überfallbeiwert [-]

g ... Erdbeschleunigung $g = 9,81$ [m/s^2]

α ... halber Öffnungswinkel des Dreiecküberfalls [$\alpha = 15^\circ$]

h ... Überfallhöhe [m]

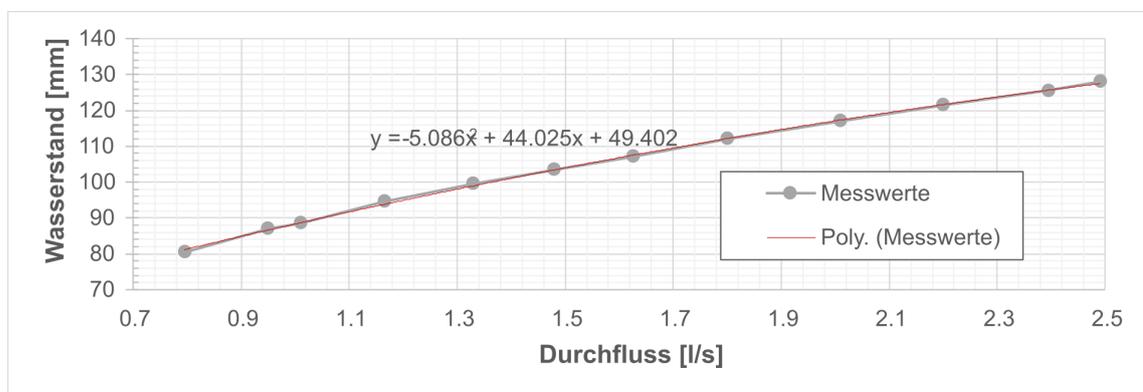
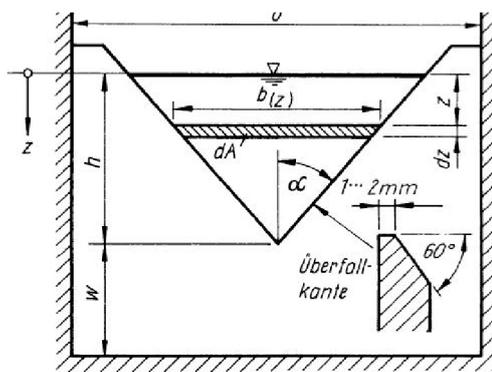


Abb. 5.7: Wasserstand-Durchfluss-Beziehung des Messwehres

Der Laborversuch hat gezeigt, dass das Messwehr auf einen maximalen Durchfluss von 2,5 l/s ausgelegt ist. Das bedeutet, dass der Einbau des Messwehres in das Gerinne nicht zweckmäßig ist, da bei Starkregenereignissen rund die doppelte Wassermenge erwartet wird. Der Einbau in das Gerinne an Messpunkt B (Abb. 5.8b) erfolgte trotzdem für einen kurzen Zeitraum, um die Ergebnisse der volumetrischen Messmethode zu validieren. Der Methodik-Vergleich hat eine gut Übereinstimmung der Messergebnisse gezeigt. Daher wurde die volumetrische Methode als ausreichend genau eingestuft.

Für eine längerfristige Abflussbeobachtung mittels Messwehr, wäre die Einrichtung einer Stromquelle an der Messstelle empfehlenswert. Dies würde die Installation und den Betrieb einer Drucksonde zur Messung des Wasserstandes ermöglichen. In Kombination mit einem Datenlogger, welcher den Wasserstand im Intervall von 15 Minuten speichert, könnte eine kontinuierliche Abflusszeitreihe dokumentiert werden.



(a) Dreiecküberfall nach Thomson [18]



(b) Einbausituation

Abb. 5.8: Angaben zum Messwehr

5.2.3 Jahresarbeitsvermögen

Die Berechnung des Jahresarbeitsvermögens der Anlage stützt sich auf den unter Abschnitt 5.2.2 getroffenen Abfluss-Annahmen von 1,6 l/s für das Sommerhalbjahr und 1,3 l/s für das Winterhalbjahr. Daraus berechnet sich zunächst die **Tageswasserfracht** V_d zu:

Sommer:

$$V_{d,Sommer} [m^3] = Q_{Sommer} [m^3/s] \cdot 3600 [s] \cdot 24 [h] \quad (5.2)$$

$$V_{d,Sommer} = 0,0016 \cdot 3600 \cdot 24 \approx 138 [m^3]$$

Winter:

$$V_{d,Winter} [m^3] = Q_{Winter} [m^3/s] \cdot 3600 [s] \cdot 24 [h] \quad (5.3)$$

$$V_{d,Winter} = 0,0013 \cdot 3600 \cdot 24 \approx 112 [m^3]$$

Die **Jahreswasserfracht** V_a berechnet sich in weiterer Folge zu:

$$V_a [m^3] = V_{d,Sommer} \cdot 182,5 [d] + V_{d,Winter} \cdot 182,5 [d] \quad (5.4)$$

$$V_a = 138 \cdot 182,5 + 112 \cdot 182,5 = 45\,625 [m^3]$$

Auf Basis der Jahreswasserfracht und der bekannten Bruttofallhöhe von 180 m kann nun das **Jahresarbeitsvermögen** E_a der Anlage ermittelt werden:

$$E_a [kWh] = \eta_{tot} \cdot \rho \cdot V_a \cdot h_{f,B} \cdot 3,6e^{-6} \quad (5.5)$$

wobei:

η_{tot} ... Gesamtwirkungsgrad (Annahme): $\eta_{tot} = 0.8 [-]$

ρ ... Dichte des Wassers: $\rho = 1000 [kg/m^3]$

$$E_a = 0,8 \cdot 1000 \cdot 45\,625 \cdot 180 \cdot 3,6e^{-6} \approx 23\,600 [kWh]$$

Anhand dieser Berechnung wird gezeigt, dass der jährliche Eigenstrombedarf am *Schrottbauerhof* von rd. 8000 kWh/a, annähernd dreimal abgedeckt werden kann. Somit ist die Relevanz einer Weiterverfolgung des Projektes bestätigt.

5.2.4 Zuleitungsgerinne

Als erste bauliche Komponente der geplanten Anlage wird das Zuleitungsgerinne als verrohrte Freispiegelleitung inklusive Wasserfassung konzipiert.

Trassierung und Materialwahl

Wie bereits in Abb. 5.2 ersichtlich, erstreckt sich das geplante Zuleitungsgerinne von der Wasserfassung, über eine Länge von 250 m und einer geodätischen Höhendifferenz von 30 m, bis zum Triebwasserspeicher. Das zugehörige Höhenprofil der Trassierung ist in Abb. 5.9 dargestellt, wobei sich im Mittelabschnitt der Trassierung das geringste Sohlgefälle mit 5,1 % ergibt.

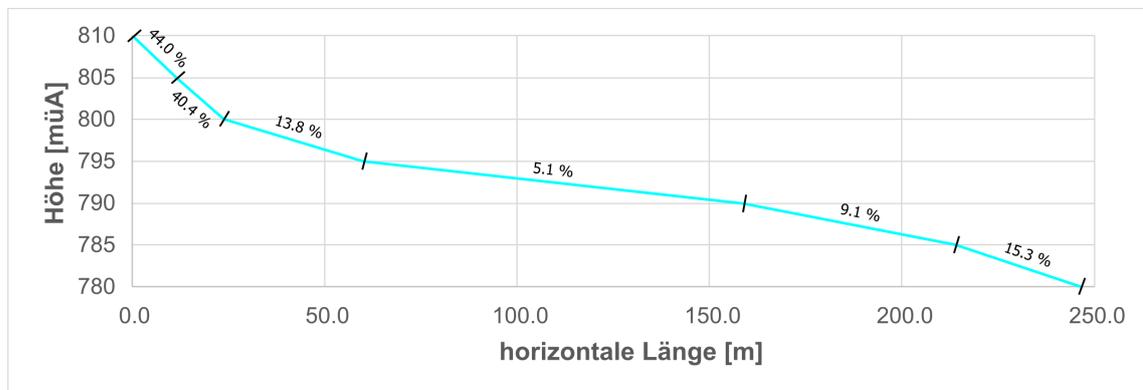
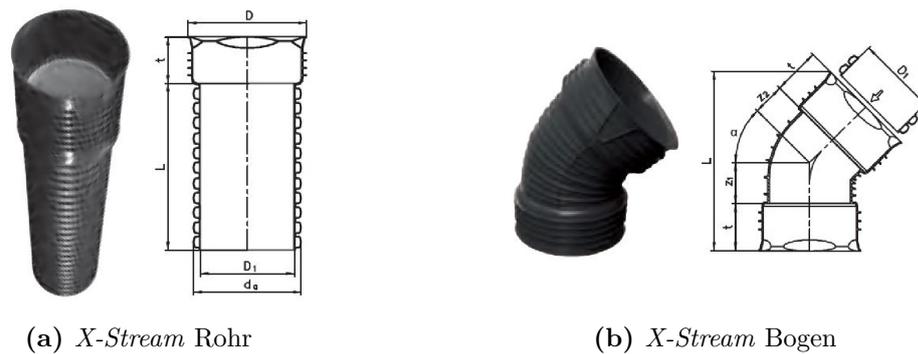


Abb. 5.9: Höhenprofil der Zuleitung DN200

Aufgrund der geringen technischen Anforderungen einer drucklosen Freispiegelleitung fällt die Materialwahl auf kostengünstige *X-Stream Rohre* aus Polypropylen (PP) der Firma *Wavin GmbH*, welche bei professionellen Regenwassersystemen zur Anwendung kommen.

Dieses System besteht aus 6 m langen Rohren mit profiliertem Außenwand und glatter Rohrinnefläche (Abb. 5.10a). Die angearbeitete Muffe mit eingelegtem Profildichtring ermöglicht eine schnelle und kostensparende Verlegung. Dabei können Richtungsänderungen mittels separaten Bogenstücken ausgeführt werden (Abb. 5.10b).



(a) X-Stream Rohr

(b) X-Stream Bogen

Abb. 5.10: Rohrsystem X-Stream [75]

Hydraulische Dimensionierung

Die hydraulische Dimensionierung der Zuleitung basiert auf Angaben laut technischem Handbuch des Herstellers. Zuzufolge Tab. 5.1 ist für einen DN200 Querschnitt, bei einem Teilfüllungsverhältnis von $h/d_i = 0,7$ und einem Sohlgefälle von 5 ‰, eine hydraulische Förderfähigkeit von 69,08 l/s anzusetzen.

Da aus den bisherigen Messbeobachtungen ein maximaler Abfluss von 3,77 l/s an Messpunkt B festgestellt wurde, erscheint die hydraulische Auslegung auf DN200 überdimensioniert. Allerdings spricht die Leitungslänge von 250 m sowie die zahlreichen Gefälleänderungen in der Trassierung für eine Auslegung auf DN200, um für eine ausreichende Belüftung der Freispiegelleitung zu sorgen. Zusätzlich sind bei signifikanten Richtungs- oder Gefälleänderungen Revisionschächte vorgesehen.

Tab. 5.1: Abflussvermögen bei $h/d_i = 0,7$; $k = 0,5 \text{ mm}$ [75]

Gefälle [cm/m]	DN/ID 200 di=196		DN/ID 250 di=245		DN/ID 300 di=295		DN/ID 400 di=392		DN/ID 500 di=499		DN/ID 600 di=593		DN/ID 800 di=787	
	[l/s]	[m/s]												
0,2	13,47	0,60	24,35	0,69	39,81	0,78	84,36	0,93	159,35	1,09	250,93	1,22	527,71	1,45
0,3	16,59	0,74	29,96	0,85	48,97	0,96	103,70	1,15	195,80	1,34	308,23	1,49	647,93	1,78
0,4	19,22	0,85	34,70	0,98	56,70	1,11	120,02	1,33	226,54	1,55	356,56	1,73	749,31	2,06
0,5	21,54	0,95	38,88	1,10	63,51	1,24	134,39	1,49	253,62	1,73	399,13	1,93	898,63	2,31
0,6	23,63	1,05	42,65	1,21	69,66	1,36	147,39	1,63	278,11	1,90	437,63	2,12	919,38	2,53
0,7	25,56	1,13	46,13	1,31	75,33	1,47	159,35	1,77	300,63	2,06	473,03	2,29	993,65	2,73
0,8	27,36	1,21	49,36	1,40	80,60	1,58	170,48	1,89	321,60	2,20	505,99	2,45	1062,78	2,92
0,9	29,04	1,29	52,40	1,49	85,55	1,67	180,93	2,01	341,29	2,33	536,94	2,60	1127,71	3,10
1,0	30,64	1,36	55,27	1,57	90,23	1,77	190,82	2,11	359,91	2,46	566,22	2,74	1189,13	3,27
1,1	32,15	1,43	58,00	1,65	94,69	1,85	200,22	2,22	377,63	2,58	594,06	2,88	1247,54	3,43
1,2	33,60	1,49	60,61	1,72	98,95	1,94	209,21	2,32	394,55	2,70	620,67	3,01	1303,35	3,58
1,3	35,00	1,55	63,12	1,79	103,03	2,02	217,83	2,41	410,79	2,81	646,19	3,13	1356,89	3,73
1,4	36,33	1,61	65,53	1,86	106,96	2,09	226,12	2,51	426,41	2,92	670,75	3,25	1408,40	3,87
1,5	37,62	1,67	67,85	1,93	110,75	2,17	234,12	2,59	441,49	3,02	694,44	3,36	1458,10	4,01
2,0	43,52	1,93	78,46	2,23	128,04	2,51	270,63	3,00	510,26	3,49	802,55	3,89	1684,87	4,63
2,5	48,71	2,16	87,81	2,49	143,28	2,80	302,80	3,36	570,85	3,90	897,80	4,35	1884,66	5,18
3,0	53,40	2,37	96,26	2,73	157,06	3,07	331,88	3,68	625,64	4,28	983,91	4,77	2065,28	5,68
4,0	61,74	2,74	111,27	3,16	181,53	3,55	383,52	4,25	722,90	4,94	1136,81	5,51	2386,00	6,56
5,0	69,08	3,06	124,49	3,53	203,08	3,97	429,02	4,76	808,60	5,53	1271,51	6,16	2668,55	7,34
8,0	87,51	3,88	157,66	4,47	257,17	5,03	543,19	6,02	1023,65	7,00	1609,53	7,80	3377,58	9,29
10,0	97,89	4,34	176,36	5,00	287,65	5,63	607,53	6,73	1144,85	7,83	1800,04	8,72	3777,18	10,39

Wasserfassung

Die Wasserfassung wird als Coanda-Rechen konzipiert (Abb. 5.11), begründet darauf, dass diese Ausführungsvariante bereits die Aufgabe der Triebwasserreinigung und -entsandung erfüllt und zudem vollkommen ohne Mess- und Steuerungstechnik betrieben werden kann. Zusätzlich erweist sich ein Coanda-Rechen aufgrund seines Selbstreinigungseffektes als äußerst wartungsarm, etwa zwei Sicht- bzw. Funktionskontrollen pro Jahr sind ausreichend. Zudem ist die Betriebssicherheit, auch bei extrem winterlichen Verhältnissen von bis zu -30°C , gewährleistet.

Platziert wird die Wasserfassung an einer Gefällestufe im Erdgerinne auf 810 müA (Abb. 5.2), in rd. 50 m Entfernung von Messpunkt B (815 müA). Laut Auskunft des Herstellers *Stocker-Technik GmbH*, kann der Coanda-Rechen mit einer Breite von 45 cm, einer Höhe von 80 cm und einem Spaltmaß von 1,0 mm bemessen werden, um ein maximales Schluckvolumen von 25 l/s zu erreichen. Die seitliche Begrenzung des Rechens sowie der darunterliegende Sammelkanal werden mittels einem Bauwerk aus Ortbeton bewerkstelligt (Abb. 5.11).

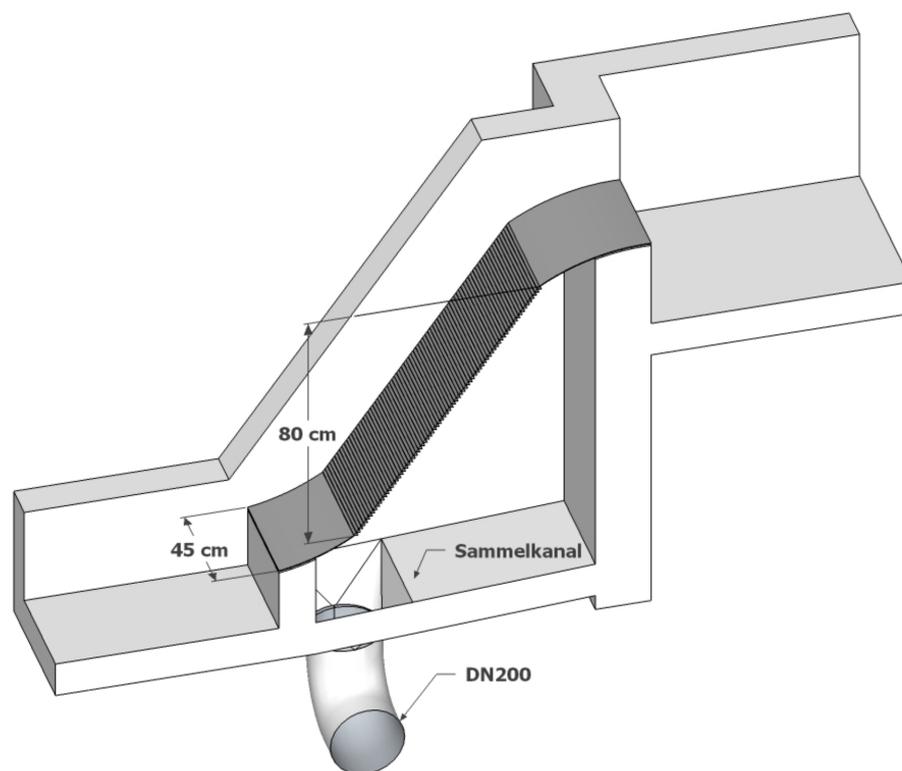


Abb. 5.11: Coanda-Rechen, Schluckvolumen 25 l/s

5.2.5 Triebwasserspeicher

Der vorhandene Triebwasserspeicher der ehemaligen Altanlage ist aus Stahlbeton ausgeführt und wird als Bestandbauwerk auch in das neue Anlagenkonzept integriert. Die Abmessungen des Speichers betragen in der Länge 7,4 m, in der Breite 2,25 m und in der Tiefe 2,0 m, wobei der Betriebsauslass etwa 20 cm über dem Grund liegt. Wird eine Überdeckung des Betriebsauslasses von 30 cm berücksichtigt, ergibt sich ein aktives Speichervolumen von 25 m^3 (Abb. 5.12).

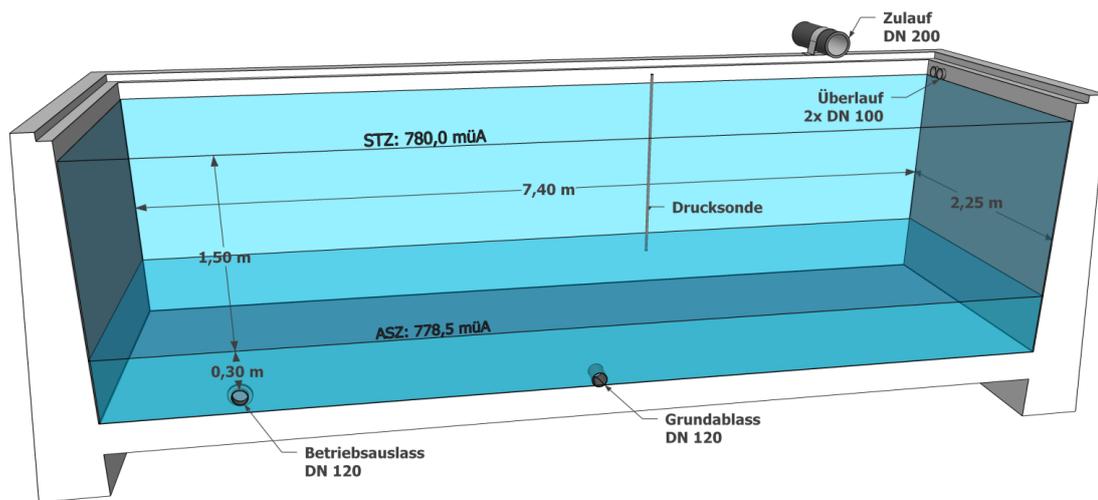


Abb. 5.12: Übersicht-Triebwasserspeicher, aktives Speichervolumen 25 m^3

Wie in Abb. 5.12 eingetragen, liegt das Stauziel im Triebwasserspeicher bei 780,0 müA, das Absenkeziel wird bei 778,5 müA festgelegt. Daraus ergibt sich eine mögliche Schwankung des Wasserstandes von 1,5 m – dies entspricht 0,8 % der Bruttofallhöhe. Die Überwachung des Wasserstandes im Triebwasserspeicher erfolgt mittels Drucksonde, welche in einem Schutzrohr installiert wird und über eine zweiadrigte Leitung mit der Turbinensteuerung im Krafthaus verbunden ist.

Da das Triebwasser bereits durch den vorinstallierten Coanda-Rechen größtenteils von Sedimenten und Geschwemmsel gereinigt wird, können die noch enthaltenen Feinsedimente im Triebwasserspeicher abgesetzt und einmal jährlich über den Grundablass aus dem Speicher gespült werden. Somit wird sichergestellt, dass Abrasionsschäden an der hydraulischen Maschine minimiert werden und die technische Lebensdauer der Turbine ausgeschöpft werden kann.

Tagesspeicher-Simulation

Anhand einer Speicher-Simulation soll geklärt werden, ob das vorhandene aktive Speichervolumen von $25,0 \text{ m}^3$ unter Berücksichtigung eines gegebenen Zuflusses ausreichend ist, um den Strombedarf am *Schrottbauerhof* an einem verbrauchsreichen Tag zu decken, ohne dabei das Absenkziel im Speicher zu unterschreiten. Konkret wird angenommen, dass die Simulation einen Wintertag bei Inselbetrieb der Anlage beschreibt. Für die Durchführung dieser Simulation müssen zahlreiche **Randbedingungen** definiert werden, die im Folgenden näher beschrieben werden:

- **Zufluss:**

Wie unter Abschnitt 5.2.2 bereits festgelegt, wird ein konstanter Zufluss von $1,3 \text{ l/s}$ für das Winterhalbjahr berücksichtigt. Der Wasserstand im Speicher liegt zu Beginn der Simulation bei $778,5 \text{ müA}$ (Absenkziel), womit der ungünstigste Fall beschrieben wird.

- **Lastprofil:**

Das Lastprofil definiert den Leistungsbedarf über eine Zeitdauer von 24 Stunden. Für die Erstellung eines aussagekräftigen Lastprofils für einen Einzelhaushalt wird Quelle [66] herangezogen. Es handelt sich dabei um ein Tool der Loughborough University (UK) basierend auf MS-Excel, mit welchem Tageslastprofile für Haushalte erstellt werden können. Berücksichtigt werden dabei die Anzahl der im Haushalt lebenden Personen, die vorhandenen Elektrogeräte, der Jahresstromverbrauch und die Einflüsse durch Wochentag und Jahreszeit. Das generierte Tages-Lastprofil für einen verbrauchsreichen Wintertag, mit einem Zeitintervall von einer Minute, ist in Abb. 5.13 dargestellt. Der Verlauf dieses Profils zeigt eine typisch ausgeprägte Lastspitze um die Mittagszeit mit einem Maximum von $9,0 \text{ kW}$ und eine zweite Lastspitze in den Abendstunden.

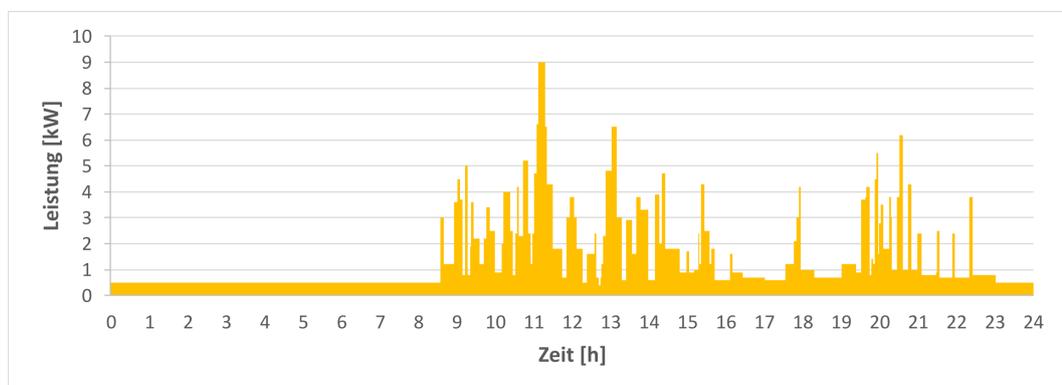


Abb. 5.13: Generiertes Tages-Lastprofil ($33,0 \text{ kWh}$) [66]

Der Tagesstrombedarf des in Abb. 5.13 dargestellten Lastprofils berechnet sich zu 33,0 kWh. Als Vergleich, gibt die E-Control Austria [28] für den verbrauchreichsten Tag im Jahr 2018 einen Strombedarf von 29 kWh an (Lastprofil 2018, *Haushalt H0* [5]). Somit kann der für die Simulation angenommene Wert von 33,0 kWh als repräsentativ eingestuft werden.

- **Methodik:**

Der Simulation liegt ein Zeitintervall von einer Minute zugrunde, wodurch sich für eine Simulationszeit von 24 Stunden in Summe 1440 Zeitschritte ergeben. Die Durchführung erfolgt mithilfe von *MS-Excel*.

Das Speichervolumen kann mittels einem Quader beschrieben werden, daher erfolgt die Berechnung des **Wasserstandes** h im Triebwasserspeicher wie folgt:

$$h = \frac{V_{akt.}}{A} \quad [m] \quad (5.6)$$

wobei:

h ... Wasserstand [m]

$V_{akt.}$... aktueller Speicherinhalt [m³]

A ... Grundfläche des Speichers: konst. 16,65 [m²]

Der **aktuelle Speicherinhalt** $V_{akt.}$ berechnet sich zu:

$$V_{akt.} = V_{alt} + V_{in} - V_{out} - V_{spill} \quad [m^3] \quad (5.7)$$

wobei:

V_{alt} ... Speicherinhalt zum vorherigen Zeitschritt [m³]

V_{in} ... zufließendes Volumen [m³]

V_{out} ... abfließender Turbinendurchfluss [m³]

V_{spill} ... Verlustvolumen, wenn Wasserstand > STZ [m³]

Übersteigt der Wasserstand im Triebwasserspeicher das Stauziel von 780 müA, so muss im Inselbetrieb die überschüssige Wassermenge als **Verlustvolumen** V_{spill} über den Überlauf abgeführt werden. Dieses Ereignis bedarf der Festlegung folgender Randbedingungen:

$$V_{spill} = 0 \quad \text{wenn : } h < 780 \text{ müA}$$

$$V_{spill} = V_{in} - V_{out} \quad \text{wenn : } h \geq 780 \text{ müA}$$

Die Berechnung des abfließenden **Turbinendurchflusses** V_{out} erfolgt vereinfacht durch Rückrechnung aus der Überschlagsformel für die elektrische Leistung (Glg. 4.2), unter der Annahme eines konstanten Gesamtwirkungsgrades der Anlage von $\eta_{tot} = 0,8$. Ebenso bleibt die Schwankung der Fallhöhe unberücksichtigt, diese fließt mit einem konstanten Wert von $h_{f,B} = 180 \text{ m}$ in die Berechnung ein:

$$V_{out} [m^3] = \frac{P [kW]}{\eta_{tot} \cdot h_{f,B} [m]} \cdot 10^{-1} \quad (5.8)$$

Ergebnis der Simulation

Abb. 5.14 zeigt das Ergebnis der Simulation des Wasserstandes im Triebwasserspeicher. Der Verlauf des Füllstandes zeigt, dass aufgrund des niedrigen Strombedarfs in den Nachtstunden von 0:00–7:00 Uhr der Speicher vom Absenkziel ausgehend vollständig befüllt wird und danach der Überlauf für ca. zwei Stunden anspringt. Zwischen 9:00 und 11:00 Uhr sinkt der Wasserstand im Speicher kontinuierlich. Um 11:15 Uhr tritt die größte Lastspitze auf, wodurch ein sprunghaftes Absinken des Wasserstandes ausgelöst wird. Danach bleibt der Wasserstand für etwa 1,5 Stunden annähernd auf konstantem Niveau, bis schließlich um 14:30 Uhr der Tagestiefstand bei 779,15 müA erreicht wird.

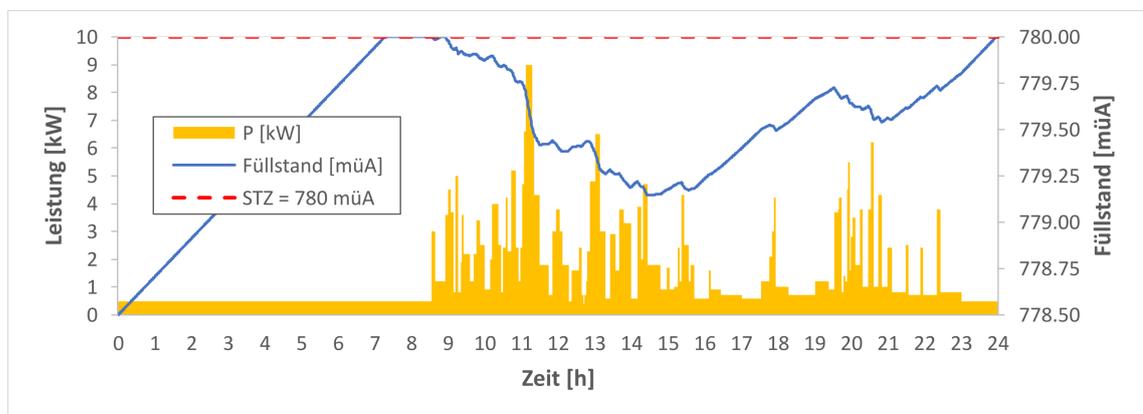


Abb. 5.14: Simulationsergebnis bei $Q_{in} = 1,30 \text{ l/s}$

Im weiteren Tagesverlauf steigt der Wasserspiegel im Speicher erneut an, bis zum Erreichen der Abendlastspitze um ca. 19:30 Uhr – diese lässt den Wasserstand neuerlich abfallen. Ab 21:00 Uhr reduziert sich der Lastbedarf, wodurch der Speicher wieder befüllt wird. Bei Simulationseende um 24:00 Uhr, ist der Speicher bis zum Stauziel bei 780,0 müA befüllt.

Dieses Resultat demonstriert, dass an einem verbrauchsreichen Wintertag, der Wasserstand im Treibwasserspeicher zu keinem Zeitpunkt unter das Absenkziel sinkt. Es kann daraus abgeleitet werden, dass der Speicher für das zugrunde gelegte Lastprofil ausreichend groß dimensioniert ist und sogar noch Reserven für eine intensivere Beanspruchung verfügbar sind.

Weiterführende Simulationsvariante

Anhand einer weiteren Simulation soll unter Verwendung desselben Lastprofils überprüft werden, auf welchen Wert sich der Zufluss reduzieren darf, damit das Absenkziel im Triebwasserspeicher über den Tagesverlauf gerade nicht unterschritten wird.

In Abb. 5.15 ist das Ergebnis der zweiten Simulation dargestellt. Um das Absenkziel gerade nicht zu unterschreiten, ist ein minimaler Zufluss von 1,02 l/s erforderlich. Es ist auch ersichtlich, dass das Stauziel von 780,0 müA im Tagesverlauf nicht erreicht wird und am Simulationsende der Wasserstand im Speicher 0,34 m über dem Absenkziel liegt.

Die Ermittlung des minimalen Zuflusses stellt eine relevante Information hinsichtlich der Versorgungssicherheit im Inselbetrieb dar. Werden weiterführende Beobachtungen der Wasserführung durchgeführt, sollte ein Abfluss von 1,0 l/s als Richtwert für den minimalen Abfluss während den Wintermonaten herangezogen werden. Wird dieser Wert über längere Zeiträume unterschritten, sollte von einer Ausführung des Projektes abgesehen werden.

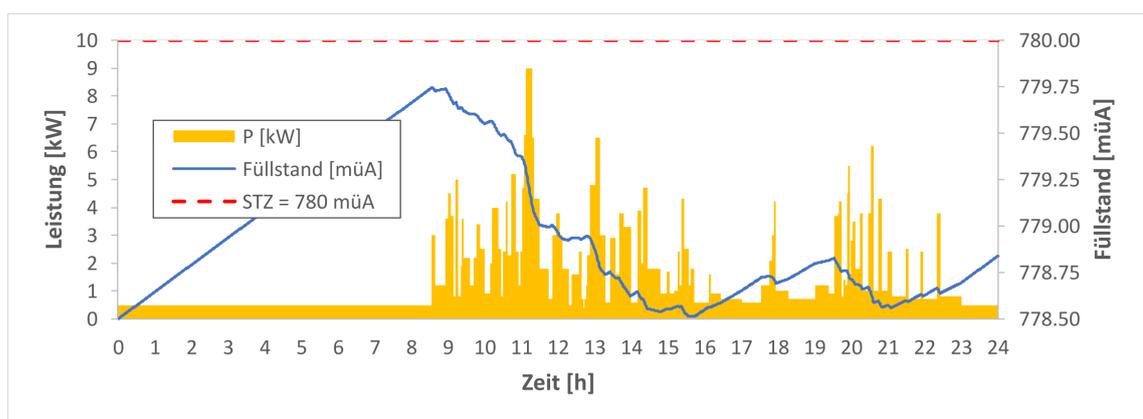


Abb. 5.15: Simulationsergebnis bei $Q_{in} = 1,02 \text{ l/s}$

5.2.6 Druckrohrleitung

Trassierung und Materialwahl

Der Trassierungsvorschlag der Druckrohrleitung nach Abb. 5.16, wurde durch eine örtliche Begehung des Geländes vom Autor sorgfältig erarbeitet. Die Trassierung startet ausgehend vom bestehenden Triebwasserspeicher auf 780,0 müA und wird, der Falllinie des Geländes folgend, bis zu einem Forstweg auf 600,0 müA geführt. Dieser Endpunkt wird bewusst im Hinblick auf die Erreichbarkeit des Krafthauses während der Errichtung und dem Betrieb gewählt. Durch die vorgeschlagene Trassierung wird eine Bruttofallhöhe $h_{f,B}$ von 180,0 m über eine Leitungslänge von 345,0 m generiert.

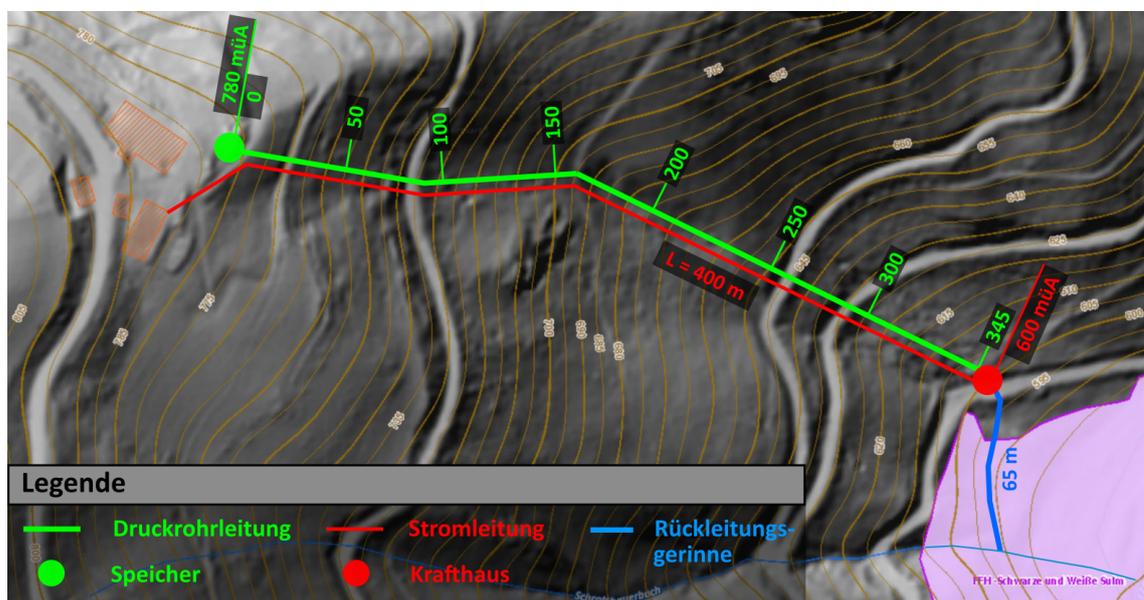
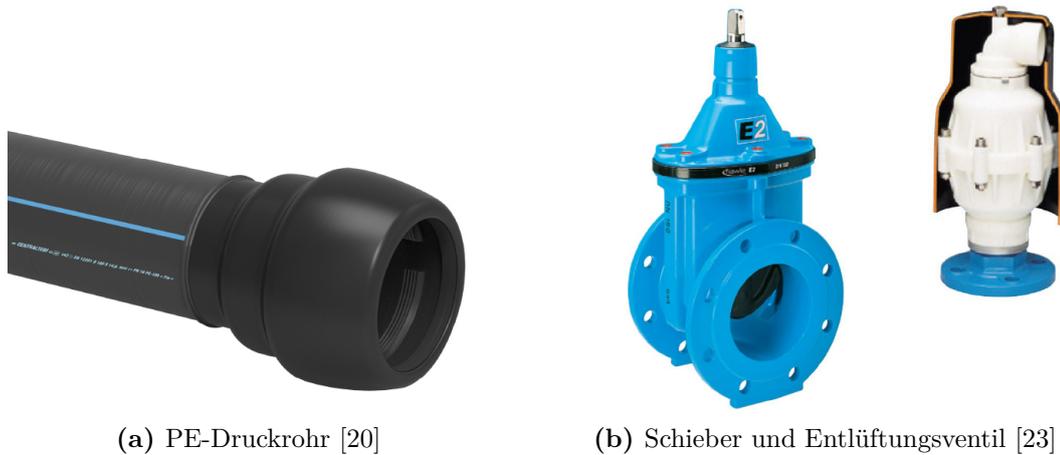


Abb. 5.16: Trassierung der Druckrohrleitung, $h_{f,B} = 180,0 \text{ m}$ (nicht maßstäblich) [36]

Da die Rohrverlegearbeit in besonders steilem Gelände erfolgen, wird ein Druckrohr aus hochverdichtetem Polyethylen PE100 vom Hersteller *CENTRALTUBI s.p.a.* vorgeschlagen (Abb. 5.17a), welches über die gesamte Länge erdverlegt wird. Gegenüber Stahl- oder Gussrohren ermöglicht diese Materialwahl, durch dessen geringes Eigengewicht, einen erleichterten Transport zum Verlegeort sowie eine einfache Verlegung durch die standardisierte Rohrverbindungstechnik. Zudem bieten Kunststoffrohre Vorteile beim Korrosionsschutz und einen eindeutigen Kostenvorteil.

Am Beginn der Druckrohrleitung (780,0 müA) wird ein manuell verstellbarer Absperrschieber und ein automatisch arbeitendes Be- und Entlüftungsventil angeordnet (Abb. 5.17b). Am Leitungsende (600,0 müA) wird ebenso ein manuell verstellbarer Absperrschieber platziert.

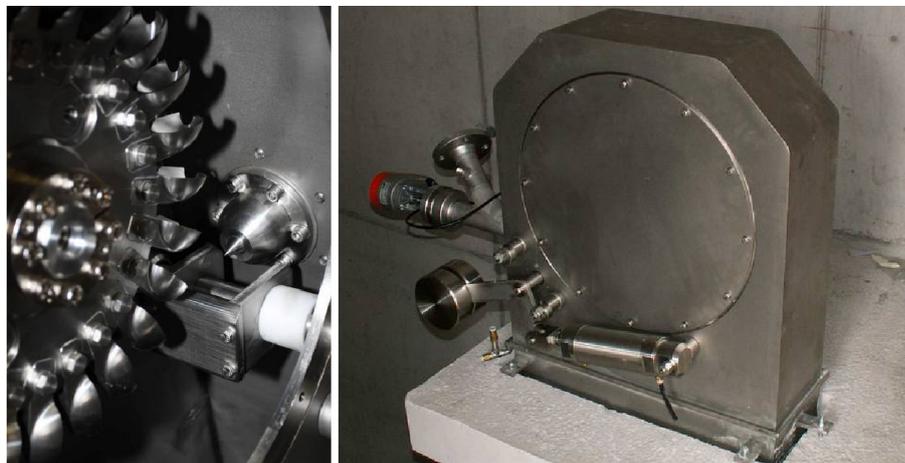


(a) PE-Druckrohr [20]

(b) Schieber und Entlüftungsventil [23]

Abb. 5.17: Druckrohrleitung und Armaturen

Diese Anordnung der Verschlussorgane ermöglicht für Wartungszwecke an diversen Anlageteilen eine gänzliche, hydraulische Entkoppelung der Druckrohrleitung vom Rest der Anlage. Kommt es zu einem plötzlichen Lastabfall, dient der Strahlablenker der Peltonturbine, ausgestattet mit einem Fallgewicht, als Notschlussorgan (Abb. 5.18). Der Durchfluss wird in weiterer Folge mithilfe der Düsenadel über eine adäquate Schließzeit von 15,0 s reduziert.

**Abb. 5.18:** Strahlablenker mit Fallgewicht – Innen- und Außenansicht [69]

Wirtschaftliche Fließgeschwindigkeit

Die Auswahl der wirtschaftlichen Fließgeschwindigkeit in der Druckrohrleitung erfolgt auf Basis von Literaturwerten (Tab. 5.2). Demnach soll bei einem Nenndurchmesser von DN100 die Fließgeschwindigkeit bei Ausbaudurchfluss 0,80 m/s betragen, bei einem Nenndurchmesser von DN150 wird eine maximale Fließgeschwindigkeit von 0,85 m/s angegeben.

Tab. 5.2: Wirtschaftliche Fließgeschwindigkeit und wirtschaftlicher Durchfluss für verschiedene DN [18]

DN [mm]	A [m ²]	v _{wirtsch} [m/s]	Q _{wirtsch} [l/s]
80	0,005027	0,80	4,0
100	0,007854	0,80	6,3
125	0,01227	0,80	9,8
150	0,01787	0,85	15,0
200	0,03142	0,90	28,3
250	0,04909	0,95	46,6
300	0,07069	1,00	70,7

In Anlehnung an Tab. 5.2 werden für die Projektierung drei Nenndurchmesser (DN110, DN125, DN140) gewählt und weiter untersucht. Die maximale Fließgeschwindigkeit wird mit $v = 1,0 \text{ m/s}$ etwas über den empfohlenen Literaturwerten festgelegt. Dies begründet sich darauf, dass die höchste Fließgeschwindigkeit nur beim Auftreten des Ausbaudurchflusses erreicht wird. Im Regelbetrieb der Anlage werden allerdings überwiegend Durchflüsse, die kleiner als der Ausbaudurchfluss sind, erwartet.

Unter Anwendung der Kontinuitätsgleichung (Glg. 5.9) erfolgt die Berechnung der Fließgeschwindigkeiten v für die drei gewählten Nenndurchmesser, bei einem Ausbaudurchfluss von $Q_a = 7,0 \text{ l/s}$.

$$v = \frac{Q_a}{A_{DN,i}} \quad (5.9)$$

wobei:

v ... Fließgeschwindigkeit [m/s]

Q_a ... Ausbaudurchfluss [m³/s]

$A_{DN,i}$... Querschnittfläche des jeweiligen Nenndurchmessers [m²]

Die Ergebnisse sind in Tab. 5.3 gesammelt dargestellt, wobei die farbliche Kennzeichnung andeutet, dass DN125 und DN140 das Kriterium von $v_{max} \leq 1,0 \text{ m/s}$ zufriedenstellend erfüllen. DN110 erfüllt dieses Kriterium nur unzureichend, wird aber dennoch bei allen weiteren Berechnungen berücksichtigt.

Tab. 5.3: Berechnete Fließgeschwindigkeiten für die ausgewählten Nenndurchmesser bei $Q_a = 7,0 \text{ l/s}$

	DN110				DN125				DN140			
	PN10	PN16	PN20	PN25	PN10	PN16	PN20	PN25	PN10	PN16	PN20	PN25
s [mm]	6,6	10,0	12,3	15,1	7,4	11,4	14,0	17,1	8,3	12,7	15,7	19,2
d [mm]	96,8	90,0	85,4	79,8	110,2	102,2	97,0	90,8	123,4	114,6	108,6	101,6
v [m/s]	0,95	1,10	1,22	1,40	0,73	0,85	0,95	1,08	0,59	0,68	0,76	0,86

Joukowsky-Druckstoß

Die Druckstoßhöhe nach Joukowsky wird für alle drei Nenndurchmesser ermittelt, mit dem Ziel, eine Unterteilung der Rohrleitung in Nenndruckstufen vornehmen zu können. Der Joukowsky-Stoß wird vereinfacht für jeden Nenndurchmesser, unter der Annahme eines Rohres der Druckstufe PN25, über die gesamte Rohrlänge berechnet.

Für die Durchführung der Berechnung wird zunächst die Druckwellengeschwindigkeit a , unter Anwendung von Glg. 2.13, für jeden Nenndurchmesser ermittelt. Die dafür benötigten Materialkennwerte werden laut Hersteller *CENTRALTUBI s.p.a.* berücksichtigt und sind in Tab. 5.4 angegeben. In dieser Tabelle sind auch die berechneten Ergebnisse zur Druckwellengeschwindigkeit gelistet, welche mit Quelle [18] verglichen und für plausibel befunden wurden. Eine Erhöhung der Ergebnisse um rd. 20 % wird dennoch vorgeschlagen, damit in weiterer Folge die Berechnung des Joukowsky-Stoßes konservativ ausgelegt ist.

Der Joukowsky-Stoß wird unter Verwendung von Glg. 2.10 und Glg. 2.11 ermittelt, die Ergebnisse sind in Tab. 5.4 eingetragen. Dabei ist ersichtlich, dass für DN110 die maximale Druckhöhe 255,60 m beträgt und somit die Druckstufe PN25 geringfügig (um 2 %) überschritten wird. Dies lässt sich auf die eingangs getroffene Erhöhung der Druckwellengeschwindigkeit zurückführen – DN110 wird auch in den weiteren Betrachtungen berücksichtigt.

Auf Basis dieser Ergebnisse wird die Druckrohrleitung entlang ihrer Länge in Druckstufen unterteilt. Dieses Prozedere erfolgt graphisch und ist in Abb. 5.19 exemplarisch für DN125 dargestellt. Die Unterteilung erfolgt unter der Annahme, dass sich die Druckwelle, vom Abschlussorgan ausgehend, ohne Abschwächung bis zur freien Wasseroberfläche ausbreitet. Die auf diese Weise ermittelten Rohrlängen sind in Tab. 5.5 für alle drei Nenndurchmesser angegeben.

Tab. 5.4: Eingangsparameter und Ergebnisse zur Druckstoßberechnung (Joukowsky)

Kennwerte - Wasser				
Elastizitätsmodul der Flüssigkeit	E_f [N/m ²]	2,10e+09		
Dichte der Flüssigkeit	ρ_f [kg/m ³]	1 000		
Kennwerte - Rohr		DN110	DN125	DN140
Wanddicke	s [mm]	15,1	17,1	19,2
Innendurchmesser	d_i [mm]	79,8	90,8	101,6
Elastizitätsmodul des Rohrmaterials	E_R [N/m ²]	1,10e+09	} gültig für alle DN	
Faktor infolge Querdehnungseinfluss	k_q [kg/m ³]	0,91		
Ergebnisse		DN110	DN125	DN140
berechnete Druckwellengeschwindigkeit	(Glg. 2.13) a [m/s]	454	453	454
erhöhte Druckwellengeschwindigkeit	a [m/s]	530	530	530
Reflexionszeit	(Glg. 2.10) T_R [s]	1,3	1,3	1,3
Joukowsky-Stoß (inkl. $h_{fg} = 180,0$ m)	(Glg. 2.11) $\max h_s$ [m]	255,60	238,40	226,65

Tab. 5.5: Berechnete Rohrlängen für ausgewählte Nenn-Druckstufen

	DN110				DN125				DN140			
	PN10	PN16	PN20	PN25	PN10	PN16	PN20	PN25	PN10	PN16	PN20	PN25
Länge [m]	54,90	103,65	82,35	104,07	71,09	105,41	83,93	84,54	89,34	108,02	80,56	67,04

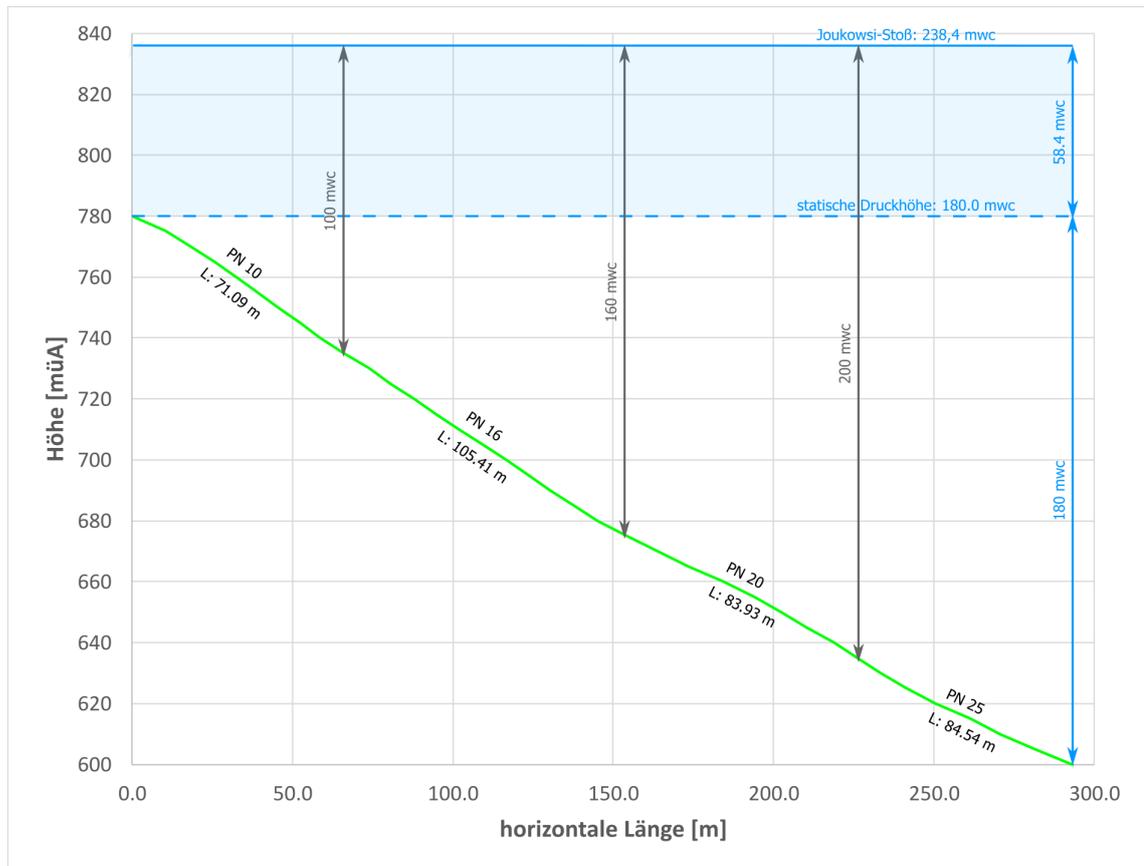


Abb. 5.19: Unterteilung der Rohrleitung DN125 in Druckstufen

Software-gestützte Druckstoßberechnung

Die oben berechneten Rohrlängen zu den jeweiligen Nenn-Druckstufen finden nun weiterführend Eingang in eine Druckstoß-Simulation unter Verwendung der Software *WANDA 4.5*. Es soll geklärt werden, ob die oben berechneten Druckhöhen nach Joukowsky plausibel sind und in welchem Maß sich die Anwendung einer Schließzeit von $T_S = 15,0 \text{ s}$ auf die Höhe des Druckstoßes auswirkt. Zudem soll auch überprüft werden, ob beim Anfahren der Turbine aus dem Stillstand Kavitationserscheinungen in der Druckrohrleitung auftreten.

Die Modellierung ist exemplarisch für DN125 in Abb. 5.20 dargestellt. Als Eingangsparmeter für das Material und die Flüssigkeit dienen jene, die bereits in Tab. 5.4 angegeben wurden. Die Druckwellengeschwindigkeit für den jeweiligen Rohrabschnitt wird wie zuvor unter Anwendung von Glg. 2.13 berechnet und um rd. 20 % erhöht.

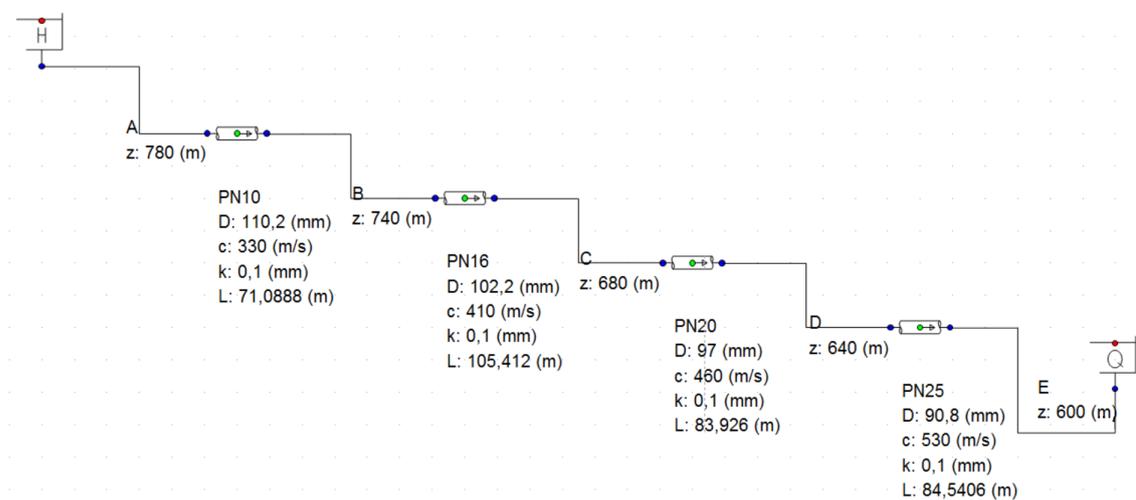


Abb. 5.20: Modellierung mit Software *WANDA 4.5* – exemplarisch für DN125

In Abb. 5.20 besitzt Behälter *H* die Aufgabe, den Wasserstand über die gesamte Simulationsdauer konstant auf 780,0 müA zu halten, während über Behälter *Q* der Durchfluss im Modell durch Angabe von Randbedingungen bestimmt wird. Die verwendeten Randbedingungen (Durchflussgesetze) sind in Abb. 5.21 dargestellt. Untersucht wurde der Öffnungs- und Schließvorgang mit $T_S = 1,0 \text{ s}$ sowie ein weiterer Schließvorgang mit $T_S = 15,0 \text{ s}$. Des Weiteren wurde die Simulationszeit mit 180,0 s, bei einer Unterteilung in einem Zeitintervall von 0,025 s, definiert.

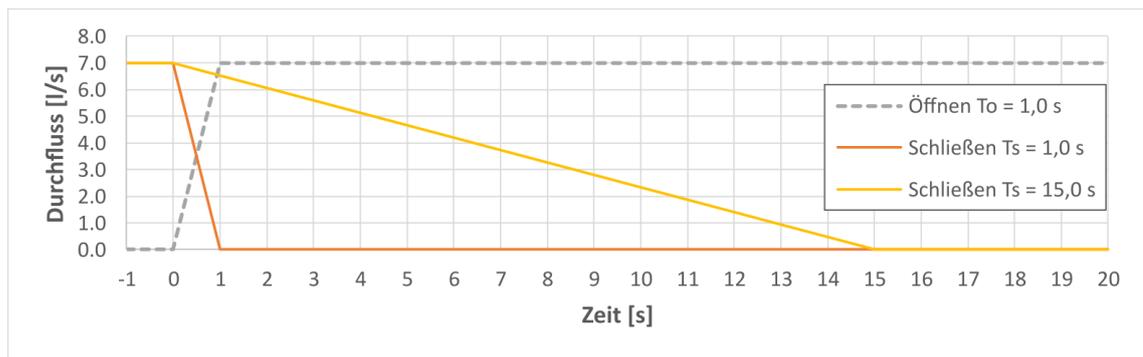


Abb. 5.21: Untersuchte Durchflussgesetze

Die damit erzielten Simulationsergebnisse sind in Abb. 5.22 gesammelt dargestellt und der vorangegangenen Berechnung nach Joukowsky gegenübergestellt. Werden die Ergebnisse für den Schließvorgang mit $T_S = 1,0 \text{ s}$ in den direkten Vergleich zum Joukowsky-Stoß gestellt, so wird deutlich, dass die Simulationsergebnisse um etwa 6–7 % niedriger ausfallen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass sich durch die Modellierung in *WANDA 4.5* die unterschiedlichen Rohrsteifigkeiten (Druckstufen) entlang der Rohrleitung auf die Druckwellengeschwindigkeit auswirken und daher die Höhe des Druckstoßes verringert wird. Die Anwendung des Durchflussgesetzes mit einer Schließzeit von $T_S = 15,0 \text{ s}$ bewirkt, dass der Druckstoß im Durchschnitt über alle Nenndurchmesser nochmals um rd. 18 % gesenkt werden kann. Die Abminderung tritt deshalb auf, da innerhalb der Schließzeit die reflektierte Unterdruckwelle am Abschlussorgan eintrifft. Der Einfluss der Unterdruckwelle während dem Schließvorgang auf den Druckverlauf an der Stelle des Absperrorgans ist in Abb. 5.23 dargestellt. Hingegen zeigt Abb. 5.24, dass sich beim schnellen Schließvorgang eine höhere Druckspitze ausbildet.

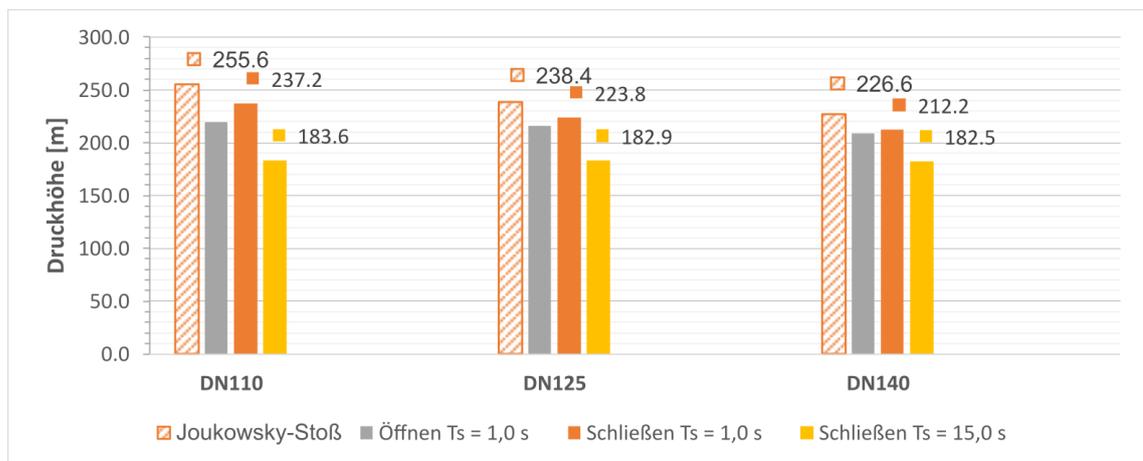


Abb. 5.22: Vergleich der Druckstoß-Simulationsergebnisse

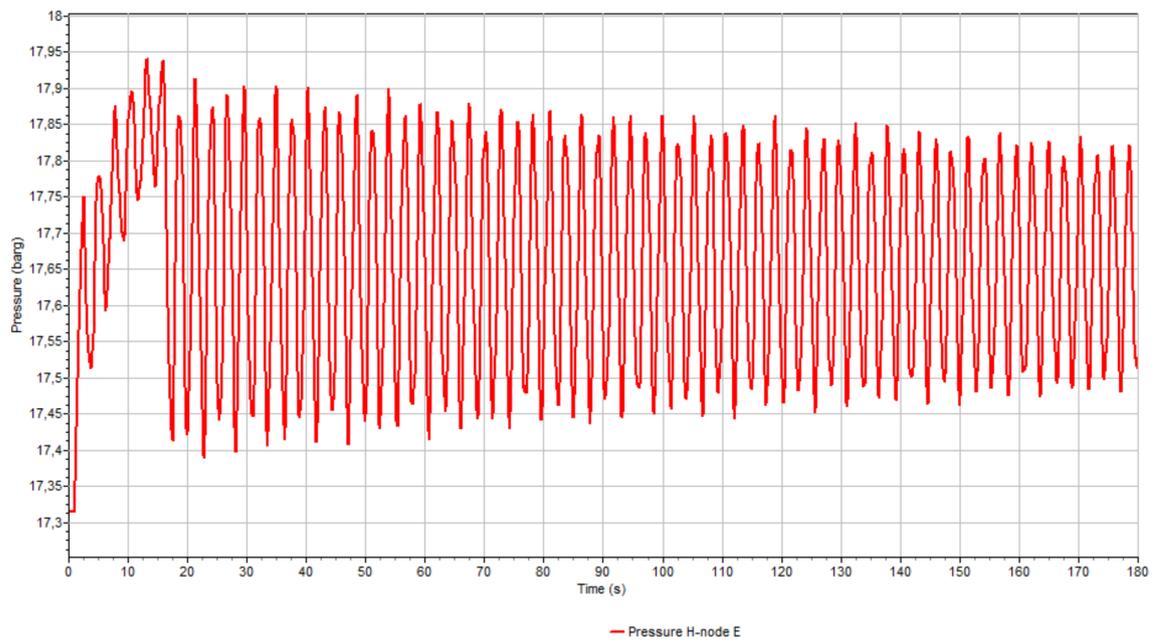


Abb. 5.23: Druckwelle für DN125 bei $T_S = 15,0$ [s]

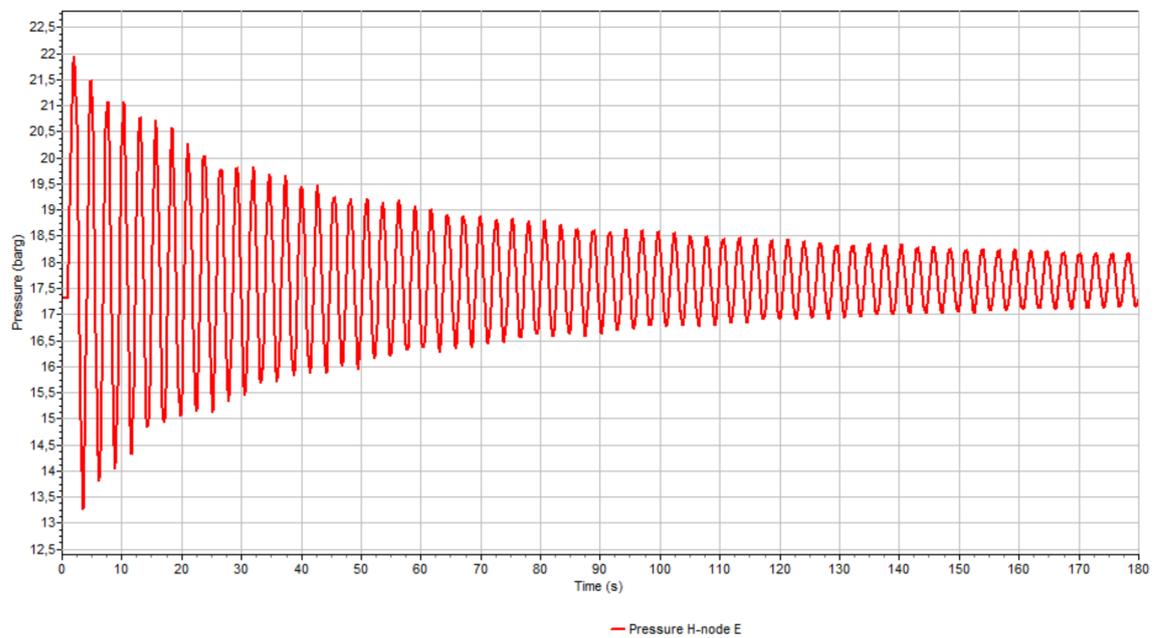


Abb. 5.24: Druckwelle für DN125 bei $T_S = 1,0$ [s]

In Abb. 5.22 ist auch ersichtlich, dass die Simulationsergebnisse des Öffnungsvorganges innerhalb einer Sekunde unter jenen des Schließvorganges liegen. Dass beim Öffnen keine Kavitationserscheinungen auftreten, wird in Abb. 5.25 für DN110 gezeigt – die Einhüllende der Druckhöhen fällt zu keinem Zeitpunkt unter die Rohrachse.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass als maßgebender Lastfall für die Dimensionierung der Druckrohrleitung der Schließvorgang mit $T_S = 1,0$ s definiert wird. Daraus resultiert, dass ein PE-Druckrohr der Nenndruckklasse PN25 verwendet werden muss.

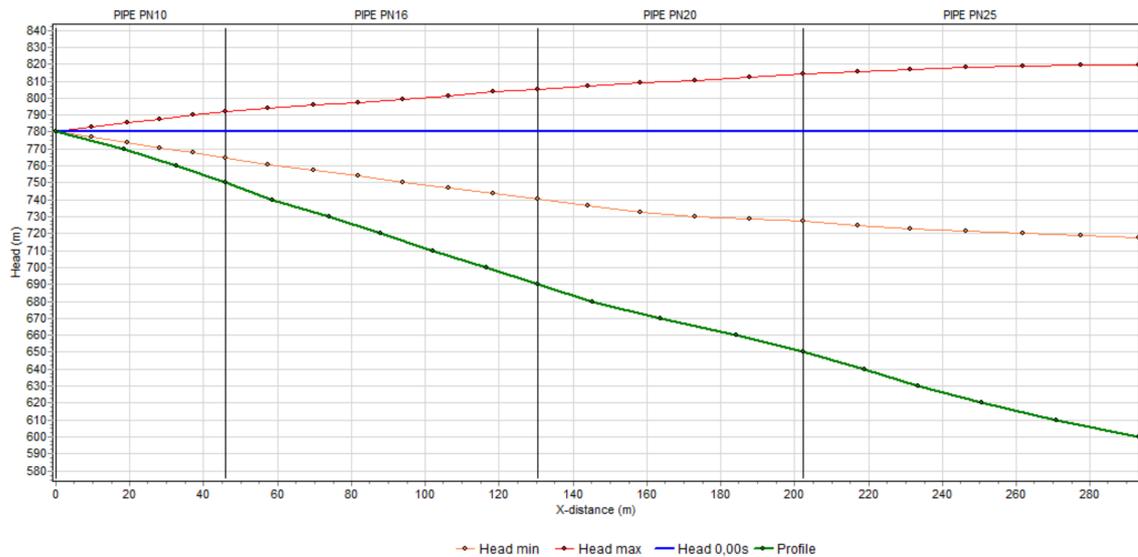


Abb. 5.25: Einhüllende der Druckhöhen beim Öffnungsvorgang ($T_O = 1,0$ s) für DN110

Dynamische Druckhöhe

Um festzustellen, wie groß der Einfluss der Durchmesserwahl auf den Fallhöhenverlust ist, wird mithilfe der Software *WANDA 4.5* der stationäre Betrieb der Anlage für ausgewählte Durchflüsse simuliert. Zusätzlich werden die Berechnungen anhand der Ggl. 2.5 bis 2.7 durchgeführt, um einen Ergebnisvergleich zwischen den unterschiedlichen Berechnungsmethoden darzustellen. Es wird angemerkt, dass in beiden Berechnungsvarianten die Wandrauigkeit als betriebliche Rauigkeit mit $k = 0,1 \text{ mm}$ angenommen wird, wodurch lokale Verluste pauschal Berücksichtigung finden.

Abb. 5.26 verdeutlicht, dass die von Hand erzielten Berechnungsergebnisse generell unter jenen liegen, die per Software berechnet wurden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass softwaretechnisch Einflüsse wie beispielsweise Krümmungen infolge der Trassierung detaillierter erfasst werden. Allgemein zeigt sich auch die Abhängigkeit der Verlusthöhe vom Durchfluss (resp. Fließgeschwindigkeit) – die Verlusthöhe steigt mit dem Quadrat der Fließgeschwindigkeit. Bezogen auf die Bruttofallhöhe ergeben sich folgende relative Verlusthöhen für die jeweiligen Nenndurchmesser bei Ausbaudurchfluss:

- 3,8 % Verlust bei DN110
- 1,9 % Verlust bei DN125
- 1,0 % Verlust bei DN140

Diese Auflistung zeigt, dass sich das Ergebnis für den Nenndurchmesser DN110 deutlich von den beiden anderen absetzt – beim Erreichen des Ausbaudurchflusses ist bei DN110 mit einem Fallhöhenverlust von $6,82 \text{ m}$ zu rechnen. Es wird daher die Ausführung der Druckrohrleitung in DN125 vorgeschlagen – die Verlusthöhe beträgt hier lediglich $3,39 \text{ m}$.

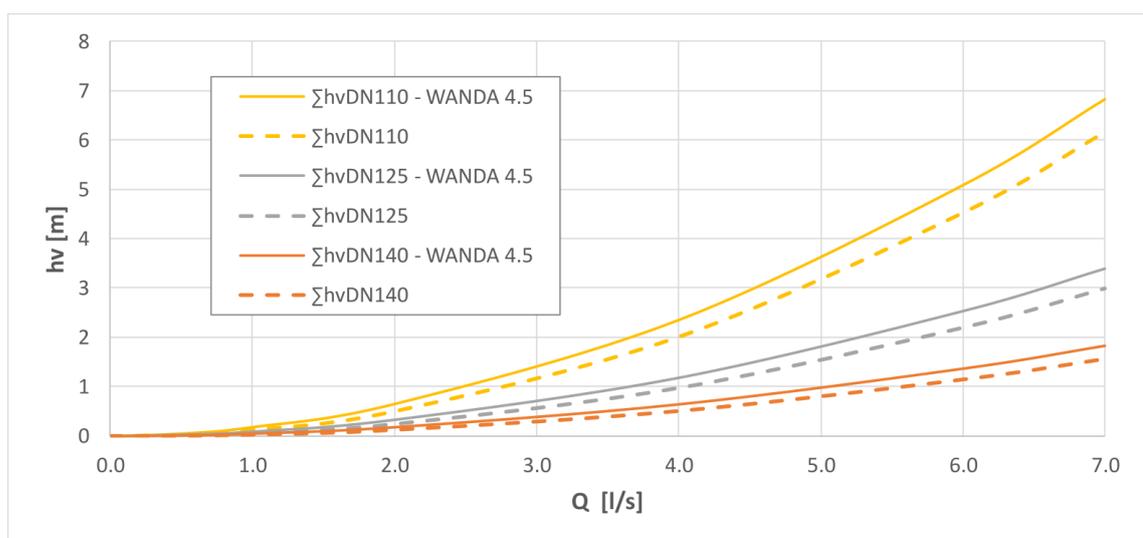


Abb. 5.26: Vergleich der Fallhöhenverluste

5.2.7 Elektromechanische Ausstattung

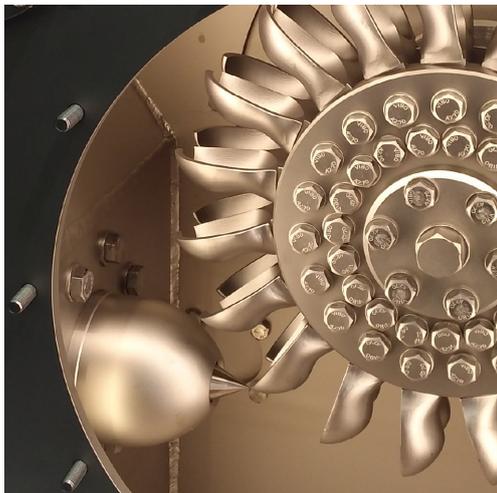
Die nachfolgenden Ausführungen zum elektromechanischen Equipment sind einem Angebot der Firma *Elektro Bischofer Alpinstrom* entommen. Das Angebot wurde vom Autor zur adäquaten Bearbeitung der Fragestellungen in der vorliegenden Masterarbeit eingeholt und kann im **Anhang** eingesehen werden.

Angefragt wurde eine Konfiguration für eine Wasserkraftanlage, die sowohl im Inselbetrieb als auch im Netz-Parallelbetrieb eingesetzt werden kann. Die Engpassleistung der Anlage beträgt 10,0 kW, bei einer Ausbauwassermenge von 7,0 l/s und einer Rohfallhöhe von 180 m.

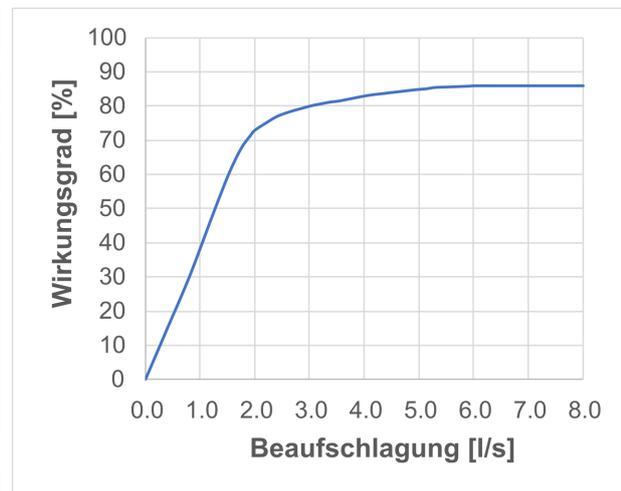
Peltonturbine

Aufgrund der Anlagenkonfiguration (geringer Durchfluss bei großer Fallhöhe) wird eine horizontal gelagerte, eindüsige Peltonturbine vorgeschlagen. Die Düse sowie die Düsennadel sind aus Edelstahl gefertigt, die Verstellmechanik der Düsennadel wird mittels Elektroantrieb betätigt. Als Notabstelleinrichtung für die Turbine ist ein Strahlablenker vorgesehen.

Das Laufrad besteht aus CNC-gefrästen Bechern, die mit dem Laufradträger verschraubt sind (Abb. 5.27a). Die Bechergeometrie ist hinsichtlich dem Erreichen eines hohen Wirkungsgrades bei schwankendem Turbinendurchfluss optimiert. Der zugehörige Wirkungsgradverlauf der Turbine bei unterschiedlicher Beaufschlagung ist in Abb. 5.27b dargestellt.



(a) Peltonlaufrad und Düse



(b) Wirkungsgradverlauf

Abb. 5.27: Angaben zur Peltonturbine

Generator

Für den Einsatz der Anlage im Netzparallel- und Inselbetrieb wird ein vierpoliger Drehstrom-Synchrongenerator eingesetzt. Dieser wird in Kompaktbauweise als eine Einheit mit der Turbine geliefert und mit dem Maschinenfundament verschraubt. Der Generator weist eine Nennleistung von 12 kW auf und erzeugt, bei einer Drehzahl von 1500 min^{-1} und einer Frequenz von 50 Hz, eine Spannung von 400 V. Der Wirkungsgrad wird für den gesamten Leistungsbereich mit 90 % angegeben.

Turbinensteuerung

Sämtliche Steuerungselemente werden im Krafthaus in einem Wandschrank untergebracht. Mittels einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) erfolgt die Überwachung und Regelung der Betriebsparameter wie dem Wasserstand, dem Turbinendurchfluss, der Düsenregelung, der Generatordrehzahl, der Generatorspannung und der Eigenstromversorgung der Anlage. Dadurch wird ein vollautomatischer Betrieb der Wasserkraftanlage sowie die Synchronisierung, zur Einspeisung der Überschussenergie in das öffentliche Stromnetz, ermöglicht. Das SPS-Modul erlaubt auch die Erfassung und Speicherung von Betriebs- und Produktionsdaten, Trends und Alarmereignissen. Diese Daten können in weiterer Folge über eine Schnittstelle ausgelesen und mittels einem PC analysiert werden.

Energieableitung

Vom Krafthaus erfolgt die Energieableitung mittels Erdkabel, welches parallel zur Druckrohrleitung verlegt wird. Der Leiterquerschnitt wird auf Basis von Glg. 5.10 dimensioniert: [68]

$$A = \frac{1,732 \cdot L \cdot I \cdot \cos}{\gamma \cdot U_a} \quad (5.10)$$

$$A = \frac{1,732 \cdot 400 \cdot 25 \cdot 0,97}{56 \cdot 12} = 25,0 \text{ [mm}^2\text{]}$$

wobei:

A ... Leiterquerschnitt [mm²]

L ... Leiterlänge = 400 [m]

I ... Stromstärke = 25 [A]

\cos ... Wirkungsgrad = 0,97 [-]

γ ... el. Leitfähigkeit Kupfer = $56 \left[\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$

U_a ... 3 % Spannungsverlust = 12 [V]

Die durchgeführte Berechnung liefert einen erforderlichen Leiterquerschnitt von $25,0 \text{ mm}^2$. Gewählt wird ein Starkstromkabel zur Verlegung im Erdreich mit $30,0 \text{ mm}^2$ Querschnittsfläche

5.2.8 Krafthaus

Abb. 5.28 zeigt die Einbausituation der einzelnen Komponenten im Krafthaus. Ein manuell bedienbarer Keilschieber ist unmittelbar nach der Wanddurchführung der Druckrohrleitung angeordnet. Nach dem Absperrorgan verjüngt sich die Druckrohrleitung von DN125 auf DN80 und wird in S-förmig gekrümmtem Verlauf der Düse zugeführt. Im Turbinengehäuse befindet sich das Pelton-Laufrad sowie der Strahlableiter. Der Strahlableiter wird mittels Hydraulikzylinder in offener Position gehalten. Ein Fallgewicht sorgt bei Ausfall des Öldruckes für ein automatisches Ablenken des Düsenstrahls. Das Pelton-Laufrad ist über eine horizontale Welle mit dem Synchrongenerator verbunden. Das abgearbeitete Triebwasser wird über einen Sammelschacht und eine Freispiegelleitung in das Rückleitungsgerinne abgegeben.

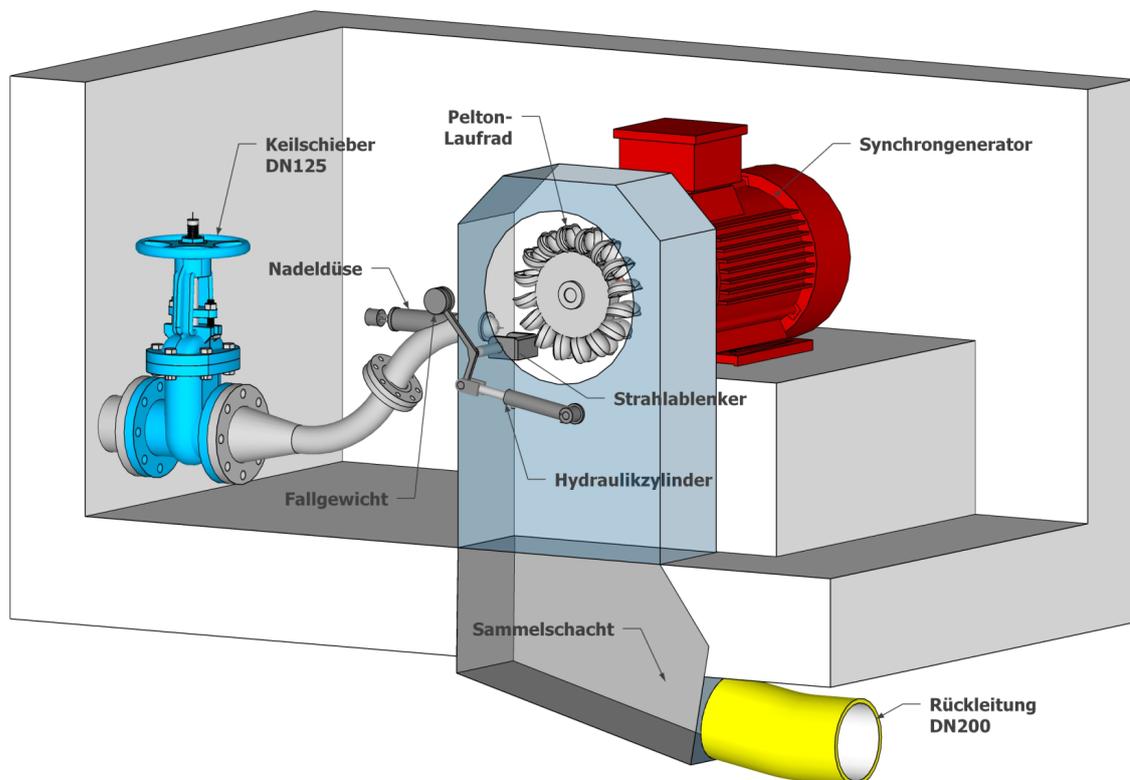


Abb. 5.28: Anlagenkonzept im Krafthaus

5.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse „KWK–Schrottbauerhof“

5.3.1 Investitionskosten

Im vorliegenden Fall der konzipierten Anlage „KWK–Schrottbauerhof“ bestehen die Investitionskosten im Wesentlichen aus den Kosten für die Errichtung der Wasserfassung, der Zuleitung, der Druckrohrleitung, des Krafthauses sowie dem Aufwand für die elektromechanische Ausrüstung. Grundstückablösekosten entfallen, da die Anlage zur Gänze auf der eigenen Liegenschaft errichtet wird. Es wird angemerkt, dass die im Rahmen dieser Masterarbeit ermittelten Investitionskosten allein zur ersten Abschätzung der Wirtschaftlichkeit dienen und somit durchaus einer gewissen Schwankungsbreite unterliegen. Aus diesem Grund werden die Kosten für die Planung und das Genehmigungsverfahren nicht gesondert berücksichtigt.

Materialkosten, beispielsweise für Rohre und Armaturen, werden auf Basis von aktuellen Preislisten der in Tab. 5.6 und 5.7 angegebenen Hersteller ermittelt. Zur Abschätzung von Stundensätzen und Kosten für diverse Positionen im Erd- und Betonbau werden Angaben aus einer statistischen Baupreistabelle (*BKI [32]) herangezogen. Erbrachte Eigenleistungen werden bei der Ermittlung der Investitionskosten nicht als Kostenfaktoren berücksichtigt. Den Kosten für die elektromechanische Ausrüstung liegt ein vom Autor eingeholtes Angebot der Firma *Elektro Bischofer Alpinstrom* zugrunde (**Anhang**).

Am Ende der Tab. 5.7 ist die Summe der Netto-Investitionskosten sowie die Mehrwertsteuer in der Höhe von 20 % angegeben. Die Investitionssumme beläuft sich demnach auf 57 661,53 €. Daran trägt die elektromechanische Ausrüstung den größten Kostenanteil mit 57,6 %, gefolgt von der Druckrohrleitung mit 23,8 %.

Tab. 5.6: Kostenaufstellung – Teil 1

Einlaufbauwerk				
Position	Hersteller	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis [€]
Erdarbeiten, Schalung	Eigenleistung			-
Ortbeton, bewehrt, C25/30	*BKI	0,75 m ³	300,00 €/m ³	225,00
Coanda-Rechen, B = 45cm	Stocker Technik GmbH	1 Stk	2 000,00 €/Stk	2 000,00
Kosten exkl. MwSt.				2 225,00
Zuleitung				
Position	Hersteller	Menge	Einzelpreis	Gesamtpreis [€]
Rohr, DN200	Wavin GmbH	250 m	8,50 €/m	2 125,00
Formstücke, DN200	"	10 Stk	14,25 €/Stk	242,50
Rohrgrabenaushub/-verfüllung	Eigenleistung			-
Helfer Erdbau, Verlegearbeit	"			-
Kosten exkl. MwSt.				2 367,50

Tab. 5.7: Kostenaufstellung – Teil 2

Druckrohrleitung				
Position	Hersteller	Menge	Einzelpreis	Gesamtpreis [€]
PE Rohr, DN125, PN10	Centraltubi s.p.a	72 m	12,50 €/m	900,00
PE Rohr, DN125, PN16	"	108 m	16,81 €/m	1 815,48
PE Rohr, DN125, PN20	"	84 m	22,48 €/m	1 888,32
PE Rohr, DN125, PN25	"	84 m	25,27 €/m	2 122,68
Formstück PE, DN125, PN10	"	1 Stk	44,60 €/Stk	44,60
Formstück PE, DN125, PN16	"	1 Stk	49,10 €/Stk	49,10
Formstück PE, DN125, PN20	"	1 Stk	150,80 €/Stk	150,80
Flansch für PE, DN125, PN25	"	1 Stk	80,60 €/Stk	80,60
Einlaufseiher, Edelstahl, DN125	E. Hawle Armaturenwerke GmbH	1 Stk	199,60 €/Stk	199,60
Absperrschieber, DN125, PN16	"	1 Stk	546,30 €/Stk	546,30
Flansch T-Stück, DN125/80, PN16	"	1 Stk	305,85 €/Stk	305,85
Be/Entlüftungsventil, DN80, PN16	"	1 Stk	428,00 €/Stk	428,00
Flansch für PE, DN125, PN16	"	1 Stk	134,30 €/Stk	134,30
Wanddurchführung, PN25	E. Hawle Armaturenwerke GmbH	1 Stk	387,60 €/Stk	387,60
Absperrschieber, PN25	"	1 Stk	680,80 €/Stk	680,80
Rohrgrabenaushub, GK1, bis 1,25m, seitlich lagern	*BKI	155 m ³	15,00 €/m ³	2 325,00
Rohrgraben verfüllen/verdichten, Lagermaterial	"	155 m ³	10,60 €/m ³	1 643,00
Helfer Erdbau, Verlegearbeit	Eigenleistung	30 h	33,00 €/h	-
Kosten exkl. MwSt.				13 702,03
Elektromechanische Ausrüstung				
Position	Hersteller	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis [€]
Turbine, Generator, Steuerung	Elektro Bischofer Alpinstrom	1 Stk	31 540,00 €/m ³	31 540,00
Montage/Inbetriebnahme	"	30 h	55,00 €/m ³	1 650,00
Kosten exkl. MwSt.				33 190,00
Krafthaus				
Position	Hersteller	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis [€]
Fundamentaushub, GK1, bis 1,25m, lagern	*BKI	5 m ³	19,00 €/m ³	95,00
Bodenplatte, Stahlbeton C25/30, bis 30cm, Randschalung	"	16 m ²	44,00 €/m ²	704,00
Maschinenfundament, Beton C25/30	"	2 m ²	66,00 €/m ²	132,00
Wand, Stahlbeton C25/30, bis 20cm, Schalung	"	28 m ²	90,00 €/m ²	2 520,00
Decke, Stahlbeton C25/30, bis 24cm	"	4 m ³	133,00 €/m ³	532,00
Facharbeiter Betonbau	"	10 h	45,00 €/h	450,00
Helfer Betonbau	Eigenleistung			-
Facharbeiter Holzbau	"			-
Helfer Erdbau, Rückleitungsgerinne	"			-
Erdkabel, NYCWY 3x10 RE/10 S	Mercateo Austria GmbH	400 m	4,36 €/m	1 744,00
Kosten exkl. MwSt.				6 177,00
Investitionskosten exkl. MwSt.				57 661,53
MwSt. 20%				11 532,31

Investitionsförderung

Wie unter Abschnitt 4.1.2 behandelt, wird laut *Ökostromgesetz 2012* ein Investitionszuschuss für Kleinwasserkraftanlagen gewährt. Für Anlagen bis zu einer Engpassleistung von 500 kW beträgt dieser Zuschuss 35 % des Investitionsvolumens, jedoch höchstens 1750 €/kW.

Als Bemessungsgrundlage für den Investitionszuschuss wird die Investitionssumme exkl. MwSt. von 57 661,53 € herangezogen. Im Fall der vorliegenden Anlage „*KWK-Schrottbauerhof*“ wird die Limitierung von 1750 €/kW maßgebend. Bei einer Engpassleistung von 10 kW berechnet sich die Höhe des Investitionszuschusses somit zu 17 500 €. Wird dieser Betrag von den angeschlagenen Investitionskosten abgezogen, ergibt sich eine geförderte Investitionssumme von 51 693,84 € (Tab. 5.8). Diese Summe dient in weiterer Folge als Basis für die Wirtschaftlichkeitsanalyse im Abschnitt 5.3.4.

Tab. 5.8: Berechnung der geförderten Investitionskosten (Beträge in €)

Investitionskosten exkl. MwSt.	57 661,53
+ MwSt. 20%	11 532,31
- Investitionsförderung 1 750 €/kW	17 500,00
Investitionskosten gefördert	51 693,84

5.3.2 Betriebs- und Wartungskosten

Der Aufwand für die laufenden Betriebskosten der Anlage wird in der Wirtschaftlichkeitsanalyse jährlich mit einer Pauschale in der Höhe von 200 € berücksichtigt. Damit sollen Kosten für Schmierstoffe und sonstige Kleinteile abgedeckt werden. Ein Personalaufwand wird nicht berücksichtigt, da die Anlage vom Eigentümer selbst betreut wird.

Nach 20 Betriebsjahren der Anlage werden einmalige Wartungskosten in der Höhe von 5000 € für umfangreiche Inspektions- und Instandhaltungsarbeiten angesetzt. Dieser Betrag entspricht rd. 10 % der Investitionskosten.

5.3.3 Erlöse

Die konzipierte Anlage wird sowohl zur Produktion von Eigenstrom, als auch zur Einspeisung der Überschussenergie eingesetzt. Aus diesem Grund muss zur Ermittlung der Erlöse einerseits ein Tarifmodell zur Stromeinspeisung berücksichtigt werden, andererseits muss eine Kostenbewertung des Eigenstrombedarfs festgelegt werden.

Unter Abschnitt 5.1 wurde bereits dargestellt, dass der Eigenstrombedarf am *Schrottbauerhof* bei 8000 kWh/a liegt und im Abschnitt 5.2 wurde das Jahresarbeitsvermögen der Wasserkraftanlage zu 23 600 kWh/a berechnet. Die Differenz aus diesen beiden Werten, 15 600 kWh/a, steht somit zur Einspeisung in das öffentliche Netz zur Verfügung.

Tarifmodell

Für die Überschussenergie wird angenommen, dass diese im Zeitraum der ersten 13 Betriebsjahre zum Ökostromtarif (aktuell 10,2 Cent/kWh) vergütet wird. Über die verbleibende Projektlebenszeit wird angenommen, dass die Überschussenergie zum aktuellen Marktpreis, auf konstant bleibendem Niveau, abgegeben wird. Die Berechnung der Erlöse infolge Stromverkauf erfolgt nach Glg. 4.6 – die Ergebnisse sind in Tab. 5.9 dargestellt. Ein Abzug der Elektrizitätsabgabe (Steuer) kann entfallen, da laut *Elektrizitätsabgabegesetz*, produzierte elektrische Energie aus erneuerbaren Primärenergiequellen, bis zu einer Grenze von 25 000 kWh/a, als steuerfrei gilt.

Tab. 5.9: Jährliche Erlöse infolge Stromverkauf

	Energiemenge	Vergütung	jährl. Erlös
Betriebsjahr 1 bis 13	15 600 kWh/a	10,20 Cent/kWh	1 591,20 €/a
Betriebsjahr 14 bis 30	15 600 kWh/a	5,76 Cent/kWh	898,56 €/a

Bewertung des Eigenstrombedarfs

Der jährliche Eigenstrombedarf wird zum Einkaufspreis bewertet. Als Basis dafür dient die Auswertung der jährlichen Ausgaben für elektrische Energie am *Schrottbauerhof* (5.1). Diese belaufen sich derzeit auf rd. 700 € pro Jahr. Folglich wird dieser Betrag als Erlös für die 8000 kWh/a an Eigenstrombedarf angesetzt. In der Wirtschaftlichkeitsanalyse wird eine jährliche Anhebung um 1,0 % berücksichtigt.

5.3.4 Abschätzung der Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse beruht auf den in Abschnitt 5.3.1 und Abschnitt 5.3.3 ermittelten Eingangswerten. Des Weiteren wird der Analyse eine kalkulatorische Projektlebenszeit von 30 Jahren zugrunde gelegt. Diese Annahme begründet sich darauf, dass seitens der Behörde derzeit wasserrechtliche Bewilligungsbescheide für einen Zeitraum von 30–40 Jahren verliehen werden.

Ermittlung des internen Zinsfußes

Die Ermittlung des Internen Zinsfußes erfolgt unter Anwendung von Glg. 4.8 und Glg. 4.10. Abb. 5.29 verdeutlicht, dass bei einer kalkulatorischen Projektlebenszeit von 30 Jahren der interne Zinsfuß einen negativen Wert von $p_0 = -0,3 \%$ annimmt. Auch der Kapitalwert nimmt bei einer Laufzeit von 30 Jahren und einem Zinsfaktor von $q = 0,0 \%$ einen negativen Wert von -1983 € an. Daraus resultiert, dass das vorliegende Projekt unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht rentabel dargestellt werden kann. Anhand einer weiterführenden Sensitivitätsanalyse soll geklärt werden, wie sich eine Ausdehnung der kalkulatorischen Projektlebenszeit auf 40 Jahre, hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit auswirkt.

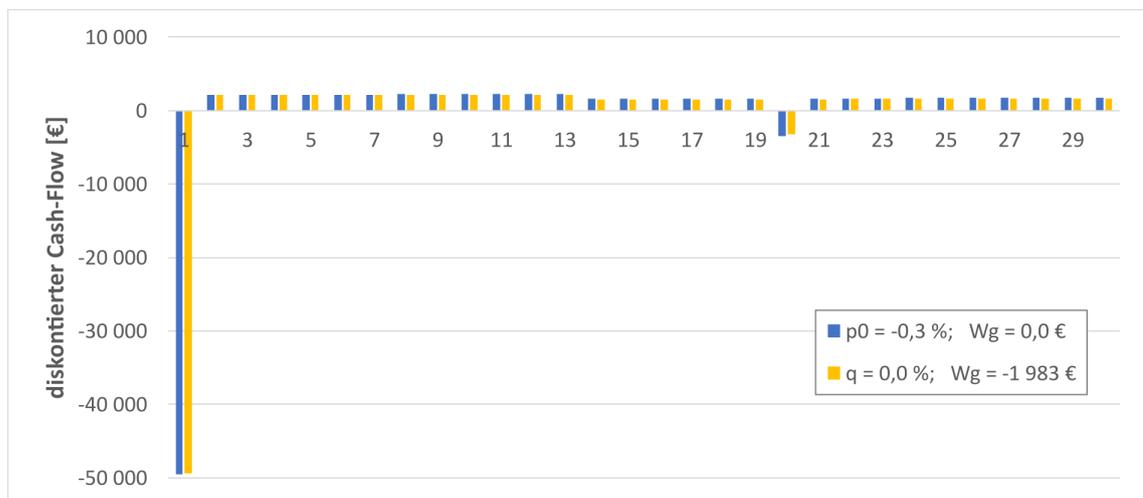


Abb. 5.29: Diskontierter Cash-Flow bei kalk. Projektlebenszeit von 30 Jahren

Sensitivitätsanalyse

Der Sensitivitätsanalyse wird eine kalkulatorische Projektlebenszeit von 40 Jahren zugrunde gelegt. Erneut wird der interne Zinsfuß und der Kapitalwert, bei einem Zinsfaktor von $q = 0,0 \%$, ermittelt. Wie Abb. 5.30 zeigt, ergibt sich der interne Zinsfuß zu $p_0 = 1,48 \%$ und der Kapitalwert zu $14\,873 \text{ €}$.

Zusätzlich lässt sich nun auch die dynamische Amortisationszeit berechnen. Diese Untersuchung ergibt, dass sich das „KWK-Schrottbauerhof“, unter Annahme eines Zinsfaktors von $q = 0,0 \%$, im Laufe des 33-sten Betriebsjahres amortisiert.

Im Unterschied zu den vorangegangenen Ergebnissen, lässt sich nun das Projekt unter den neu gewählten Rahmenbedingungen als rentabel darstellen. Ein Vergleich mit möglichen Investitionsalternativen stellt allerdings klar, dass der niedrige interne Zinsfuß von $1,48 \%$ nicht attraktiv erscheint.



Abb. 5.30: Diskontierter Cash-Flow bei kalk. Projektlebenszeit von 40 Jahren

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Masterarbeit wurde ein konzeptioneller Lösungsvorschlag einer Kleinwasserkraftanlage zur Strom-Eigenversorgung an einem Bergbauernhof in der Weststeiermark erarbeitet.

Um die grundlegenden Voraussetzungen für die Fragestellung im Feld der Kraftwerksplanung zu schaffen, wurden in den Kapiteln 2 bis 4 theoretische Grundlagen betreffend Anlagenkomponenten in der Kleinwasserkraft sowie rechtliche und wirtschaftliche Aspekte bei Planung und Bau von Kleinwasserkraftwerken aufbereitet. Wie die Inhalte der einleitenden Kapitel 2 und 3 verdeutlichen, muss bei der Planung von Kleinwasserkraftwerken stets auf die individuellen Standortbedingungen eingegangen werden, um ein technisch sinnvolles und wirtschaftlich erfolgreiches Ergebnis zu erzielen. Kapitel 4 zeigt den Umfang der rechtlichen Rahmenbedingungen bei der Planung von Kleinwasserkraftwerken auf und behandelt ebenso die benötigten Methoden zur Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsanalyse.

Aufbauend auf den vorangegangenen Inhalten, wurde in Kapitel 5 ein Anlagenkonzept für eine Kleinwasserkraftanlage am Standort *Schrottbauerhof* erarbeitet. Dieses Konzept umfasst im Wesentlichen die konstruktive Auslegung und die wirtschaftliche Analyse des Kraftwerkes. Die technischen Eckdaten der Anlage sind in Tab. 6.1 zusammengefasst.

Tab. 6.1: Technische Eckdaten zum Anlagenkonzept

KWK - "Schrottbauerhof"		
Höhe Wasserfassung	810,0	müA
Länge Zuleitung	250,0	m
Wasserspiegel Triebwasserspeicher	780,0	müA
Turbinenachse	600,0	müA
Bruttofallhöhe	180,0	m
Ausbauwassermenge	7,0	l/s
Nettofallhöhe	176,6	m
Ausbauleistung	10,0	kW
Regeljahresarbeitsvermögen	23 600	kWh

Um ein aussagekräftiges Ergebnis über die Wirtschaftlichkeit der Anlage zu erzielen, wurde vom Autor für die elektromechanische Ausrüstung der Anlage ein Angebot der Firma *Elektro Bischofer Alpinstrom* (**Anhang**) eingeholt. Unter Berücksichtigung eines Investitionszuschusses in der Höhe von 1750 €/kW, können daraus die spezifischen Kosten der Leistung mit 5170 €/kW für die Anlage „*KWK-Schrottbauerhof*“ angegeben werden. In weiterer Folge ergibt die Wirtschaftlichkeitsanalyse, bei einer gewählten kalkulatorischen Projektlebenszeit von 40 Jahren, einen internen Zinsfuß von 1,48 % und eine Amortisationszeit von 33 Jahren. Diese Resultate verdeutlichen, dass aus wirtschaftlicher Sicht eine Investition in das konzipierte Kleinkraftwerk nicht attraktiv erscheint.

Resümee

Hinsichtlich der technischen Auslegung zeigen die Ergebnisse aus Kapitel 5, dass die definierten Anforderungen mit dem gewählten technischen Anlagenkonzept einwandfrei erfüllt werden können. Hingegen liefert die abschließende Wirtschaftlichkeitsanalyse keine aussichtsreichen Ergebnisse. Die Investition in die Errichtung des „*KWK-Schrottbauerhof*“ wäre, aufgrund der niedrigen Rentabilität, mit Liebhaberei zu betiteln. Es wird daraus der Schluss gezogen, dass das vorliegende, projektierte Konzept nicht zur Ausführung kommt.

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass sowohl die Projektierung als auch die Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Basis von zahlreichen Annahmen und Vereinfachungen umgesetzt wurden, wodurch die Aussagekraft der Ergebnisse limitiert ist.

Bezüglich der getroffenen Annahmen ist in erster Linie die mangelhafte Qualität der hydrologischen Datengrundlage zu nennen. Aufbauend auf diesen Daten berechnet sich das Jahresarbeitsvermögen der Anlage, wodurch in weiterer Folge die Berechnungen der Wirtschaftlichkeitsanalyse mit Unsicherheiten behaftet werden. Die wirtschaftliche Beurteilung wird auch durch das eingeholte Angebot, bezüglich der elektromechanischen Ausrüstung, beeinflusst. Dem Autor liegt für dieses Angebot keine Vergleichsgrundlage vor, wodurch eine plausible Bewertung der angeführten Summe nicht durchführbar ist.

Zu einer weiteren Ergebnisverzerrung führen die Vereinfachungen, welche der Tagesspeicher-Simulation in Abschnitt 5.2.5 zugrunde liegen. Die Simulation wurde mit konstantem Gesamtwirkungsgrad der Anlage sowie konstanter Fallhöhe durchgeführt. Außerdem dient der Simulation als Basis ein mithilfe der angegebenen Quelle [66] generiertes Tageslastprofil (Abb. 5.13), wodurch das Verbrauchsmuster am Standort *Schrottbauerhof* wiederum nur angenähert wird.

6.2 Ausblick

Sollte auf Basis der vorliegenden Masterarbeit eine Ausführung des „*KWK-Schrottbauerhof*“ fokussiert werden, so gilt es in erster Linie Planungssicherheit durch **weiterführende Aufzeichnungen des Zuflusses** herzustellen. Diese Messungen könnten in Zusammenarbeit mit dem unter Abschnitt 5.2.4 (Wasserfassung) erwähnten Anlagenbauer, *Stocker-Technik GmbH*, realisiert werden. Dieser Hersteller bietet Messwehr-Stationen, ausgestattet mit Datenlogger oder Funkübertragung, zur Vermietung an. Um eine aussagekräftige Datengrundlage zu erzielen, wird empfohlen, die Beobachtung des Abflusses zumindest über eine Dauer von 18 Monaten durchzuführen.

Des Weiteren stellt der Autor in Aussicht, gegenüber dem ausgearbeiteten Konzept eine mögliche **alternative Ausführungsvariante** zu untersuchen. Um die Rentabilität der Anlage zu erhöhen, müssen offensichtlich die Investitionskosten gesenkt werden. Wie in Abb. 6.1 ersichtlich, stellt das elektromechanische Equipment mit 57,6 % den größten Anteil an den Investitionskosten dar. Um diesen Anteil zu senken, wird vorgeschlagen, eine den Anforderungen entsprechende Ausrüstung am Gebrauchtmarkt anzuschaffen und diese einer Generalüberholung zu unterziehen. Die Engpassleistung der Turbine sollte mit 10,0 kW dem ausgearbeitetem Konzept entsprechen, wobei die Fallhöhe und der Ausbaudurchfluss abweichen können. Somit muss eine Anpassung der Druckrohrleitung und des Triebwasser-Speichervolumens erfolgen.

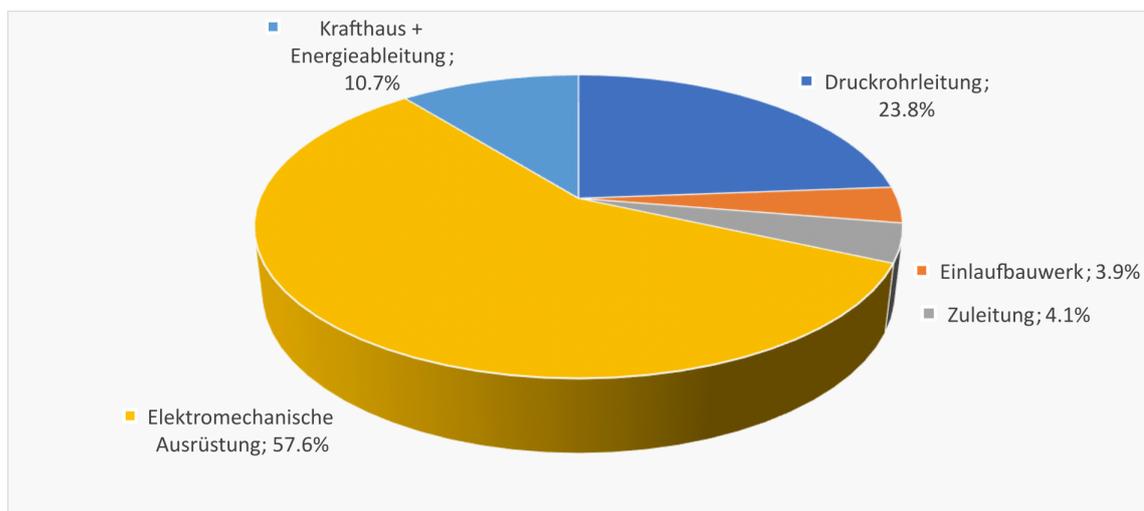


Abb. 6.1: Aufteilung der Investitionskosten nach Abschnitt 5.3.1

Abbildungsverzeichnis

1.1	Lageplan aus dem Jahr 1951 [6]	2
1.2	Wasserschloss	3
a	Querschnittsdarstellung aus dem Jahr 1951 [6]	3
b	Fotoaufnahme im Jahr 2018	3
1.3	Entwicklung des Regelarbeitsvermögens der österreichischen Wasserkraft [72]	6
1.4	Potenzial der österreichischen Wasserkraft [45]	8
2.1	Abflussdauerlinie mit zugehöriger Jahresganglinie der „Schwarzen Sulm“, Pegel Schwanberg – Weststeiermark, Jahr 2015 (erstellt mit Daten aus [40])	11
2.2	Exemplarischer Verlauf einer dynamischen Pflichtwasserabgabe [50]	13
2.3	Diagramm nach Moody, zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes λ [18]	15
2.4	Hydraulisch günstige Gerinnequerschnitte [18]	20
2.5	Darstellung der Kraftwerkstypen [39]	21
3.1	Regulierbare Wehrtypen	25
a	Fischbauchklappe [67]	25
b	Schlauchwehr	25
3.2	Prinzip einer Seitenentnahme [54]	26
3.3	Prinzip eines <i>Tiroler Wehres</i> [54]	27
3.4	Prinzip eines <i>Coanda-Rechens</i> [54]	27
3.5	Verlustbeiwerte bei unterschiedlicher Querschnittsgeometrie (Maße in mm) [18]	28
3.6	Sedimentation im Sandfang [52]	30
3.7	Einsatzgebiete für Wasserturbinen in Abhängigkeit von Fallhöhe und Durch- fluss [35]	34
3.8	Wirkungsgradverläufe von Turbinen [35]	34
3.9	Draufsicht auf eine sechsdüsige vertikale Pelton-Turbine [35]	35
3.10	Vergleich zwischen (a) Turgo-Turbine und (b) Pelton-Turbine [35]	36
3.11	Durchströmturbine: Strömungsverlauf bei a) horizontalem und b) vertikalem Zufluss; c) Wirkungsgradkennlinie bei einer 1:2-Unterteilung von Leitapparat und Laufrad im Vergleich zur Francis-Turbine [35]	37
3.12	a) Francis-Schachtturbine; b) Francis-Spiralturbine [35]	38

3.13	Kaplan-Turbine in Kompaktbauweise für Kleinwasserkraftanlagen [35]	39
3.14	Schnitt durch eine Diagonalturbine [35]	40
3.15	S-Rohrturbine mit horizontaler Welle [35]	41
3.16	a) Kegelrad-Rohrturbine; b) Getriebe-Rohrturbine [35]	42
4.1	Investitionsrechenverfahren [38]	59
4.2	Spezifische Investitionskosten der Leistung für KWK-Anlagen bis 2 MW [56]	62
5.1	Jährlicher Stromverbrauch und Stromkosten am <i>Schrottbauerhof</i> (2011–2018)	64
5.2	Anlagenkonzept – Übersichtsplan, nicht maßstäblich [36]	65
5.3	Messkonzept – Übersichtsplan, nicht maßstäblich [36]	66
5.4	Von links: Messpunkt A, B, C	67
5.5	Abflussreihe für Messpunkt C [41]	68
5.6	Abflussreihe für Messpunkt A, B, C	68
5.7	Wasserstand-Durchfluss-Beziehung des Messwehres	69
5.8	Angaben zum Messwehr	70
	a Dreiecküberfall nach Thomson [18]	70
	b Einbausituation	70
5.9	Höhenprofil der Zuleitung DN200	72
5.10	Rohrsystem <i>X-Stream</i> [75]	73
	a <i>X-Stream</i> Rohr	73
	b <i>X-Stream</i> Bogen	73
5.11	Coanda-Rechen, Schluckvolumen 25 l/s	74
5.12	Übersicht-Triebwasserspeicher, aktives Speichervolumen 25 m ³	75
5.13	Generiertes Tages-Lastprofil (33,0 kWh) [66]	76
5.14	Simulationsergebnis bei $Q_{in} = 1,30 \text{ l/s}$	78
5.15	Simulationsergebnis bei $Q_{in} = 1,02 \text{ l/s}$	79
5.16	Trassierung der Druckrohrleitung, $h_f, B = 180,0 \text{ m}$ (nicht maßstäblich) [36]	80
5.17	Druckrohrleitung und Armaturen	81
	a PE-Druckrohr [20]	81
	b Schieber und Entlüftungsventil [23]	81
5.18	Strahlablenker mit Fallgewicht – Innen- und Außenansicht [69]	81
5.19	Unterteilung der Rohrleitung DN125 in Druckstufen	84
5.20	Modellierung mit Software <i>WANDA 4.5</i> – exemplarisch für DN125	85
5.21	Untersuchte Durchflussgesetze	86
5.22	Vergleich der Druckstoß-Simulationsergebnisse	86
5.23	Druckwelle für DN125 bei $T_S = 15,0 \text{ [s]}$	87
5.24	Druckwelle für DN125 bei $T_S = 1,0 \text{ [s]}$	87

5.25	Einhüllende der Druckhöhen beim Öffnungsvorgang ($T_O = 1,0 \text{ s}$) für DN110	88
5.26	Vergleich der Fallhöhenverluste	89
5.27	Angaben zur Peltonmaschine	90
a	Peltonlaufrad und Düse	90
b	Wirkungsgradverlauf	90
5.28	Anlagenkonzept im Krafthaus	92
5.29	Diskontierter Cash-Flow bei kalk. Projektlebenszeit von 30 Jahren	97
5.30	Diskontierter Cash-Flow bei kalk. Projektlebenszeit von 40 Jahren	98
6.1	Aufteilung der Investitionskosten nach Abschnitt 5.3.1	101

Tabellenverzeichnis

2.1	Formbeiwerte und C_r -Wert [18]	19
3.1	DN- und PN-Stufen [33]	32
4.1	Mindestkörperschaftsteuer [76]	56
4.2	Einkommensteuertarif [76]	56
4.3	Kostengliederungssystem für die Anwendung bei Wasserkraftanlagen [35]	58
5.1	Abflussvermögen bei $h/d_i = 0,7$; $k = 0,5 \text{ mm}$ [75]	73
5.2	Wirtschaftliche Fließgeschwindigkeit und wirtschaftlicher Durchfluss für verschiedene DN [18]	82
5.3	Berechnete Fließgeschwindigkeiten für die ausgewählten Nenndurchmesser bei $Q_a = 7,0 \text{ l/s}$	83
5.4	Eingangsparameter und Ergebnisse zur Druckstoßberechnung (Joukowsky)	84
5.5	Berechnete Rohrlängen für ausgewählte Nenn-Druckstufen	84
5.6	Kostenaufstellung – Teil 1	93
5.7	Kostenaufstellung – Teil 2	94
5.8	Berechnung der geförderten Investitionskosten (Beträge in €)	95
5.9	Jährliche Erlöse infolge Stromverkauf	96
6.1	Technische Eckdaten zum Anlagenkonzept	99

Literaturverzeichnis

- [1] **Ablinger, P.** *Europarecht, ZF-Leitlinien*. 2015. URL: https://www.kleinwasserkraft.at/fileadmin/PDF/Europarecht/ZF_Leitlinien.pdf (Zugriff am 10.11.2018).
- [2] **Antoniazzi, M. et al.** *Kleinwasserkraftwerke in Europa. Handbuch der erforderlichen Verwaltungsverfahren*. Heidenreichstein, Austria: Janetschek, 2010. ISBN: 978-953-6313-76-1.
- [3] **APA-OTS.** *Steiermark setzt weiter auf Revitalisierung und Ökologisierung bei der Kleinwasserkraft!* 2018. URL: https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20170302_OTS0208/steiermark-setzt-weiter-auf-revitalisierung-und-oekologisierung-bei-der-kleinwasserkraft (Zugriff am 12.11.2018).
- [4] **APA.** *Ökostrom-Projekte für neun Milliarden Euro in der Schublade*. 2017. URL: <https://diepresse.com/home/wirtschaft/energie/5179578/OekostromProjekte-fuer-neun-Milliarden-Euro-in-der-Schublade> (Zugriff am 07.11.2018).
- [5] **APCS Power Clearing and Settlement AG.** *Synthetische Lastprofile*. 2018. URL: <https://www.apcs.at/de/clearing/technisches-clearing/lastprofile> (Zugriff am 18.12.2018).
- [6] **Bezirkshauptmannschaft Deutschlandsberg.** *Wasserrechtlicher Bewilligungsbescheid*. Franz Koch vlg. Schrottbauer 3/326, 1951.
- [7] **BM für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort.** *Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetzes 2010 – beschlossene Änderungen*. 2010. URL: <https://www.help.gv.at/Portal.Node/hlpd/public/content/171/Seite.1710211.html> (Zugriff am 12.11.2018).
- [8] **BM für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.** *Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen*. Wien. 2012. 102 S.
- [9] **BM für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.** *Österreichischer Wasserkatalog Wasser schützen – Wasser nutzen; Kriterien zur Beurteilung einer nachhaltigen Wasserkraftnutzung*. Erlass. Wien, 2012. 69 S.

- [10] **BM für Nachhaltigkeit und Tourismus.** *Die Aarhus-Konvention und ihre 3 Säulen.* 2015. URL: https://www.bmnt.gv.at/umwelt/eu-international/umweltpolitik_internat/aarhus-konvention/aarhus_3_saeulen.html (Zugriff am 07.11.2018).
- [11] **BM für Nachhaltigkeit und Tourismus.** *Förderungen.* 2018. URL: <https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/foerderungen.html> (Zugriff am 12.11.2018).
- [12] **BM für Nachhaltigkeit und Tourismus.** *Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan (NPG).* 2017. URL: https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserrecht_national/planung/NGP-2015.html (Zugriff am 07.11.2018).
- [13] **BM für Nachhaltigkeit und Tourismus.** *Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer - QZV Ökologie OG.* 2014. URL: https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserrecht_national/planung/QZV0ekologieOG.html (Zugriff am 27.11.2018).
- [14] **BM für Nachhaltigkeit und Tourismus.** *Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG).* 2018. URL: https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-eu-international/eu_wasserrecht/Wasserrahmen-RL.html (Zugriff am 07.11.2018).
- [15] **BM für Nachhaltigkeit und Tourismus.** *Wasserrechtsgesetz 1959. idf BGBl. I Nr. 61/2018.* Wien: BM für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2018.
- [16] **BM für Nachhaltigkeit und Tourismus.** *Wasserrechtsgesetz 1959 (WRG 1959).* 2018. URL: https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserrecht_national/wasserrechtsgesetz/WRG1959.html (Zugriff am 10.11.2018).
- [17] **BM für Nachhaltigkeit und Tourismus und BM für Verkehr, Innovation und Technologie.** *#mission2030.* 2018. URL: <https://mission2030.info/> (Zugriff am 16.10.2018).
- [18] **Bollrich, G.** *Technische Hydromechanik 1. Grundlagen.* Berlin, Wien, Zürich: Beuth, 2013. ISBN: 978-3-410-23482-1.
- [19] **Böttcher, H. et al.** „Fischschutz und Fischabstieg – Kenntnisstand und aktuelle Forschungsprojekte in Österreich“. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 67 (2015), S. 299–306.
- [20] **Centraltubi s.p.a.** *Plug and Play System.* 2018. URL: <https://tubi.net/en/prodotto/plugplay-system/> (Zugriff am 09.01.2019).
- [21] **Das Land Steiermark.** *40. Verordnung. Gewässerschutzverordnung.* Landesgesetzblatt, 2015.

- [22] **Das Land Steiermark.** *Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan.* 2018. URL: <http://www.wasserwirtschaft.steiermark.at/cms/ziel/4578774/DE/> (Zugriff am 07.11.2018).
- [23] **E. Hawle Armaturenwerke GmbH.** *Produkte.* 2019. URL: <https://www.hawle.at/produkte.html> (Zugriff am 09.01.2019).
- [24] **Energie-Control Austria.** *Aktueller Marktpreis gemäß § 41 Ökostromgesetz 2012.* 2018. URL: <https://www.e-control.at/statistik/oeko-energie/aktueller-marktpreis-gem-par-20-oekostromgesetz> (Zugriff am 31.10.2018).
- [25] **Energie-Control Austria.** *Bestandsstatistik.* 2017. URL: <https://www.e-control.at/statistik/strom/bestandsstatistik> (Zugriff am 31.10.2018).
- [26] **Energie-Control Austria.** *Bestandsstatistik.* 2018. URL: <https://www.e-control.at/statistik/strom/bestandsstatistik> (Zugriff am 31.10.2018).
- [27] **Energie-Control Austria.** *Betriebsstatistik – Jahresreihen.* 2018. URL: <https://www.e-control.at/statistik/strom/betriebsstatistik/jahresreihen> (Zugriff am 31.10.2018).
- [28] **Energie-Control Austria.** *Sonstige Marktregeln Strom.* Kapitel 6. Zählwerte, Datenformate und standardisierte Lastprofile Version 3.6, 2018. 70 S.
- [29] **Energie-Control Austria.** *Unser Auftrag.* 2018. URL: <https://www.e-control.at/econtrol/unternehmen/unser-auftrag> (Zugriff am 12.11.2018).
- [30] **Europäische Kommission.** *Leitlinien für staatliche Umweltschutz- und Energiebeihilfen 2014-2020.* 2014. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A52014XC0628%2801%29> (Zugriff am 10.11.2018).
- [31] **eurostat.** *Statistik der erneuerbaren Energien.* 2018. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics/de#Anteil_erneuerbarer_Energiequellen_.E2.80.93_Strom (Zugriff am 31.10.2018).
- [32] **Fetzer, R. et al.** *BKI Baupreise kompakt 2017 - Neubau. Statistische Baupreise für Positionen mit Kurztexen.* Stuttgart: BKI Baukosteninformationszentrum (Hrsg.), 2016. ISBN: 978-3-945-649-21-3.
- [33] **Franke, W. und Platzner, B.** *Rohrleitungen. Grundlagen – Planung – Montage.* München: Carl Hanser Verlag, 2014. ISBN: 978-3-446-42999-4.
- [34] **Fuchs, M. et al.** „Das Wasserkraftpotenzial Österreichs im Spannungsfeld von Umweltpolitik und Klimawandel“. In: *Wasserkraftprojekte. Ausgewählte Beiträge aus der Fachzeitschrift WasserWirtschaft.* Hrsg. von S. Heimerl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, S. 98–105. ISBN: 978-3-658-00996-0.

- [35] **Giesecke, J. et al.** *Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb*. 6. aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-642-53871-1.
- [36] **GIS-Steiermark.** *Digitaler Atlas Steiermark: Gewässer und Wasserinformation*. 2018. URL: <http://gis2.stmk.gv.at> (Zugriff am 05.12.2018).
- [37] **Gruber, R. (Chefredakteur).** „Coanda-Rechen – Eine US-Erfindung behauptet sich im Alpenraum“. In: *zek HYDRO* 16. Jahrgang (2018), S. 84–86.
- [38] **Guserl, R. und Pernsteiner, H.** *Finanzmanagement. Grundlagen – Konzepte – Umsetzung*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015. ISBN: 978-3-8349-4683-6.
- [39] **Holstenkamp, L. und Radtke, J.** *Handbuch Energiewende und Partizipation*. Wiesbaden: Springer VS, 2018. ISBN: 978-3-658-09416-4.
- [40] **Hydrographischer Dienst Österreich.** *Messstellen und Daten*. 2018. URL: <https://ehyd.gv.at/> (Zugriff am 07.12.2018).
- [41] **JR-AquaConSol.** *Dauermessprogramm Steiermark Bereich Koralmtunnel*. Auszug Messstelle JR 681. 2018. 4 S.
- [42] **Kahles, M.** *Beihilferechtliche Vorgaben zur Förderung von Strom aus erneuerbaren Energien*. 2018. URL: https://www.kleinwasserkraft.at/fileadmin/PDF/Europarecht/EE%C3%96_Workshop_UEBLL_Ausschreibungen_Stiftung_Umweltenergierecht__Kahles_...pdf (Zugriff am 10.11.2018).
- [43] **Kleinwasserkraft Österreich.** *Bundesrecht*. 2018. URL: <https://www.kleinwasserkraft.at/recht/bundesrecht/> (Zugriff am 05.11.2018).
- [44] **Kleinwasserkraft Österreich.** *Kleinwasserkraft in der Steiermark*. 2018. URL: <https://www.kleinwasserkraft.at/bundeslaender/steiermark/#c862> (Zugriff am 05.11.2018).
- [45] **Kleinwasserkraft Österreich.** *Präsentationen*. 2018. URL: <https://www.kleinwasserkraft.at/jt18-online/downloads.php> (Zugriff am 31.10.2018).
- [46] **Kleinwasserkraft Österreich.** *Turbinentypen*. 2018. URL: <http://www.kleinwasserkraft.at/turbinentypen> (Zugriff am 11.10.2018).
- [47] **Kleinwasserkraft Österreich.** *Wasserkraft-Steiermark*. 2018. URL: <http://www.kleinwasserkraft.at/wasserkraft-steiermark> (Zugriff am 11.10.2018).
- [48] **Kleinwasserkraft Österreich.** *Wasserkraftwerksarten*. 2018. URL: <http://www.kleinwasserkraft.at/faq/wasserkraftwerksarten> (Zugriff am 11.10.2018).
- [49] **Kleinwasserkraft Österreich.** *Zahlen und Fakten*. 2018. URL: <http://www.kleinwasserkraft.at/wasserkraft> (Zugriff am 11.10.2018).

- [50] **Kofler, H.** *Der Pflichtwasser-Leitfaden*. Dr. Hugo Kofler, Ziviltechnikkanzlei, 2004. 20 S.
- [51] **Maniak, U.** *Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure*. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016. ISBN: 978-3-662-49087-7.
- [52] **Ortmanns, C.** *Entsander von Wasserkraftanlagen*. Zürich: Dissertation ETH Nr.: 16324, 2006.
- [53] **Österreichs Energie.** *Daten und Fakten zur Stromerzeugung*. 2017. URL: <https://oesterreichsenergie.at/daten-fakten-zur-stromerzeugung.html> (Zugriff am 30.10.2018).
- [54] **Penche, C. et al.** *Layman's Guidebook on how to develop a small hydro site. übersetzt von Bernhard Pelikan*. Rue du Trône: EUROPEAN SMALL HYDROPOWER ASSOCIATION, 2004.
- [55] **Proidl, H. und Sorger, M.** *Einspeisetarife für Ökostromanlagen für die Jahre 2018 und 2019*. Gutachten. Energie-Control Austria, 2017. 66 S.
- [56] **Proidl, H. und Sorger, M.** *Einspeisetarife Ökostrom – Neufestsetzung für alle Bereiche für die Jahre 2016 und 2017*. Gutachten. Energie-Control Austria, 2015. 48 S.
- [57] **Quaschnig, V.** *Regenerative Energiesysteme. Technologie – Berechnung – Simulation*. 8. aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser, 2013. ISBN: 978-3-446-43571-1.
- [58] **Rathkolb, O. et al.** *Wasserkraft.Elektrizität.Gesellschaft. Kraftwerksprojekte ab 1880 im Spannungsfeld*. Wien: Kremayr & Scheriau KG, 2012. ISBN: 978-3-218-00834-1.
- [59] **Rechtsinformationssystem des Bundes.** *Gesamte Rechtsvorschrift für Steiermärkisches Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz 2005*. 2018. URL: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrStmk&Gesetzesnummer=20000343> (Zugriff am 12.11.2018).
- [60] **Rechtsinformationssystem des Bundes.** *Gesamte Rechtsvorschrift für Steiermärkisches Naturschutzgesetz 1976*. 2018. URL: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrStmk&Gesetzesnummer=20000835&FassungVom=2017-07-31> (Zugriff am 12.11.2018).
- [61] **Rechtsinformationssystem des Bundes.** *Gesamte Rechtsvorschrift für Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000*. 2018. URL: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010767> (Zugriff am 11.11.2018).

- [62] **Republik Österreich Parlament.** *Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000, Änderung.* 2018. URL: https://www.parlament.gv.at/PAKT/VHG/XXVI/ME/ME_00059/index.shtml (Zugriff am 11. 11. 2018).
- [63] **Republik Österreich.** *108. Bundesgesetz. Änderung des Ökostromgesetzes 2012, des Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetzes 2010, des Gaswirtschaftsgesetzes 2011, des KWK-Punkte-Gesetzes und des Energie-Control-Gesetzes sowie Bundesgesetz, mit dem zusätzliche Mittel aus von der Energie-Control Austria verwalteten Sondervermögen bereit gestellt werden.* Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, 2017.
- [64] **Republik Österreich.** *408. Verordnung. Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2018 – ÖSET-VO 2018.* Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, 2017.
- [65] **Republik Österreich.** *75. Bundesgesetz. Ökostromgesetz 2012 - ÖSG 2012.* Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, 2011.
- [66] **Richardson, I.** und **Thomson, M.** *Domestic electricity demand model - simulation example.* 2010. URL: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/5786> (Zugriff am 18. 12. 2018).
- [67] **S.K.M GmbH.** 2018. URL: <http://www.s-k-m.at/images/ref15.jpg> (Zugriff am 27. 11. 2018).
- [68] **Steffen, H.** und **Bausch, H.** *Elektrotechnik. Grundlagen.* 6. Auflage. Wiesbaden: Teubner Verlag, 2007. ISBN: 978-3-8351-0014-5.
- [69] **Stocker Technik GmbH.** *Trinkwasserkraftwerk.* 2019. URL: <https://wasserkraft.hpage.de/trinkwasserkraftwerk.html> (Zugriff am 04. 01. 2019).
- [70] **Tirol Atlas.** *Geschichte der Wasserkraftnutzung im Alpenraum.* 2018. URL: <http://tirolatlas.uibk.ac.at/maps/thema/query.py/text?lang=de;id=1502> (Zugriff am 29. 10. 2018).
- [71] **Verbund AG.** *Faszination Wasserkraft.* 2012. URL: <https://www.verbund.com/de-at/blog/blog-artikel/2012/06/19/kuchler-geschichte-buch-interview> (Zugriff am 29. 10. 2018).
- [72] **Verbund AG.** *Neue Rahmenbedingungen für die Entwicklung der österreichischen Wasserkraft.* 2010. URL: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2010/files/pr/PR_Pirker.pdf (Zugriff am 29. 10. 2018).
- [73] **Vogel, B.** „Wasserkraft: Auf der Suche nach dem optimalen Rechen“. In: *Bundesamt für Energie BFE* (2017), S. 5.

- [74] **Watter, H.** *Regenerative Energiesysteme. Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme.* 4. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ISBN: 978-3-658-09638-0.
- [75] **Wavin GmbH.** *Drucklose Rohr- und Schachtsysteme.* Technisches Handbuch. 2018. 284 S.
- [76] **Wirtschaftskammer Österreich.** *Aktuelle Werte: Einkommen-/Körperschaftsteuer ab 2016.* 2018. URL: <https://www.wko.at/service/steuern/Aktuelle-Werte:-Einkommen--Koerperschaftsteuer-ab-2016.html> (Zugriff am 22. 11. 2018).
- [77] **Wirtschaftskammer Österreich.** *Einkommensteuer und Körperschaftsteuer.* 2018. URL: <https://www.wko.at/service/steuern/einkommensteuer-koerperschaftsteuer.html> (Zugriff am 22. 11. 2018).
- [78] **Wirtschaftskammer Österreich.** *Energiebesteuerung - Die Elektrizitätsabgabe.* 2017. URL: https://www.wko.at/service/steuern/Energiebesteuerung_-_Die_Elektrizitaetsabgabe.html (Zugriff am 22. 11. 2018).
- [79] **Wirtschaftskammer Österreich.** *Gewinnermittlung für Unternehmer.* 2018. URL: <https://www.wko.at/service/steuern/gewinnermittlung-unternehmer.html> (Zugriff am 22. 11. 2018).
- [80] **Wirtschaftskammer Österreich.** *Körperschaftsteuer (KÖSt).* 2018. URL: [https://www.wko.at/service/steuern/Koerperschaftsteuer_\(K0eSt\).html](https://www.wko.at/service/steuern/Koerperschaftsteuer_(K0eSt).html) (Zugriff am 22. 11. 2018).
- [81] **Wirtschaftskammer Österreich.** *Umsatzsteuer – Basisinfos für Betriebe.* 2018. URL: <https://www.wko.at/service/steuern/umsatzsteuer-basisinfo-betriebe.html> (Zugriff am 22. 11. 2018).
- [82] **Zenz, G. et al.** *PUMPED STORAGE HYDROPOWER IN AUSTRIA.* Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2018. ISBN: 978-3-85125-602-4.
- [83] **Zenz, G. et al.** *VU 213.352 KWB GL. Konstruktiver Wasserbau Grundlagen, Lernbehelf SS 2012.* Graz: Technischen Universität Graz, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 2012.

Anhang



Kleinwasserkraftanlagen

A-6235 Reith i.A * Neudorf 9 * Tel 05337-63329 * Fax -30

Herr
Koch Stefan

Reith, am 04.01.2019

Sehr geehrte Damen und Herren. Wir bedanken uns für die Einladung und erlauben uns das Konzept für den Neubau des Kleinkraftwerkes wie folgt anzubieten.

Hauptdaten der Anlage:

ALPINSTROM Wasserkraftanlage mit 1 Düse
Fallhöhe Netto :180m
Ausbauwassermenge: 8lt/sek
Engpassleistung: ca. 10,5W

Synchron Generator für Netzparallel und Inselbetrieb
Wicklungstemperaturüberwachung mittels Kaltleiter

Pelton Laufrad
Wirkungsgrad optimierte Schaufelform
Schaufeln einzeln CNC gefräst
Laufrad dynamisch gewuchtet
Antriebsenergie Düse: Elektromotorisch

Strahlableiter für Notabstellung
Antriebsenergie Strahlableiter: Händisches Wiedereinschalten



Kleinwasserkraftanlagen

A-6235 Reith i.A * Neudorf 9 * Tel 05337-63329 * Fax -30

1. Peltonturbine:

Konstruktion:

Becherbreite Innen ca. 55mm
Schaufeln auf Laufradträger verschraubt
Turbinenleistung 11,5kW

Gehäuse:

Turbinen Gehäuse aus Stahlblech
Wandstärke ca 10mm
Laufrad nach vorne ausbaubar
Service Öffnung oben ca 150x150mm
Gehäuse Sandgestrahlt
Dreifach Lackierung
Decklackierung: Ral 5010

Wirkungsgrad Turbine bei gefräster Ausführung

Beaufschlagung	Wirkungsgrad
100%	86%
75%	86%
50%	83%
25%	73%

Montagerahmen:

Kompaktbauweise. Turbine und Generator werden als eine Einheit geliefert und auf dem Fundament verschraubt.
Turbinenwelle: horizontal

Düsenstock:

Düsenstock aus Stahlguss. Düse und Düsennadel sind aus Edelstahl. Elektroantrieb direkt auf Düsenstock aufgebaut.
Düse auch händisch verstellbar.



Kleinwasserkraftanlagen

A-6235 Reith i.A * Neudorf 9 * Tel 05337-63329 * Fax -30

Generator:

Drehstrom Synchrongenerator, 4 polig
Fabrikat Marelli oder gleichwertig
Nennleistung: 12kW
Spannung: 400V
Frequenz: 50Hz
Drehzahl: 1500min-1
Bauform: k.A
Baugröße: k.A
Schutzart: IP21
Wärmeklasse: F
Kaltleiter: 1 Stück pro Wicklung
Verstärkte Lagerung AS
Lager Dauergeschmiert
Wirkungsgrad bei 100% ca 90%

Notabstelleinrichtung:

Als Notabstelleinrichtung dient der Strahlablenker.
Das Wiedereinschalten geschieht händisch



Kleinwasserkraftanlagen

A-6235 Reith i.A * Neudorf 9 * Tel 05337-63329 * Fax -30

2. Turbinensteuerung für Netzparallel und Inselbetrieb:

Steuerschrank Wandschrank

Höhe 1000mm x Breite 800mm x Tiefe 300mm
Ral 7035 oder Ral 7032 (alle Ral Farben erhältlich)
Schutzart IP56
Material: Grundrahmen aus 1,5mm Fe
Tür aus 1,5mm Fe
Kabel Einführung von unten

Montageeinsatz

Montageplatte 3mm Fe feuerverzinkt

Generator Schutzschalter

Merlin Gerin
Grundscharter Synchronisier tauglich mit analoger Generator Schutzfunktion
Magnetantrieb, Meldekontakten und MN Auslöser

Universalmeßgerät

Anzeige aller wichtigen elektrischen Größen
Integrierter Datenspeicher über PC Auslese fähig

SPS System

Modulare SPS Steuerung
Eingesetztes System: Mitsubishi FX3U
Analog Eingänge für Pegelsonde
Externe Analog Eingänge werden über Überspannungsschutz eingelesen
Drehzahlerfassung Generator



Kleinwasserkraftanlagen

A-6235 Reith i.A * Neudorf 9 * Tel 05337-63329 * Fax -30

Bediengerät

Display E1022 monochrom, 4 Zeilen

Durch das Bedienterminal können Betriebszustände, Wasserstand etc erfasst und dargestellt werden. Weiters können Trends und Alarmereignisse erfasst und abgespeichert werden.

Wasserstandsregelung

Realisierung mittels SPS Steuerung.

Eingabe Soll Wert.

Ausgabe Ist Wert in Momentananzeige sowie Trend Aufzeichnung

Pegel Messung nach dem Rechen. Für die Pegelmessung muss ein Zweiadrige Leitung vom Krafthaus zur Fassung verlegt sein.

Blindleistungsregelung

Realisierung mittels SPS Steuerung

Eingabe Soll Wert.

Ausgabe Ist Wert in Momentananzeige sowie Trend Aufzeichnung

Ansteuerung Spannungsregler Generator.

Rückleistungsüberwachung

Kommt es zum motorischen Betrieb des Generators wird die Anlage von Netz getrennt und abgestellt. Realisierung mittels SPS

Synchronisierung

Automatik Betrieb oder Halb Automatik Betrieb möglich

Netzüberwachungsrelais

Spannungs- und Frequenzüberwachung der Netzzuleitung
EVU konform



Kleinwasserkraftanlagen

A-6235 Reith i.A * Neudorf 9 * Tel 05337-63329 * Fax -30

Pegelsonde

Drucksonde frei programmierbar zum Einbau in Schutzrohr
Digital kompensiert, Analog Ausgang 4-20mA
Innen Durchmesser Schutzrohr 25mm
Pegelmessung nach Rechen

Überspannungsschutz

Für Netzzuleitung: C-Schutz
Abgang Pegelmessung: Speziell für 4-20mA Signale entwickelter
dreifacher Überspannungsschutz

Handbedienung

Bedienung über Schalttafel Einbau Taster und Schalter:
E-Werk Ein
Not Aus
Düse Hand Auto
Öffnen Schließen

Notschluss Organ

Ansteuerung eines Notschluss Organs.
Im angebotenen Fall Strahlablenker

Abgänge

Abgang für Licht Installation Krafthaus LSS 1x13A Typ C 2polig
Verteiler Einbau Steckdose für Laptop Anschluss mit LSSFi 13A 30mA

**Summe Turbine und Steuerungstechnik ohne Turbineneinlauf
und ohne Montage**

31540€



Kleinwasserkraftanlagen

A-6235 Reith i.A * Neudorf 9 * Tel 05337-63329 * Fax -30

3.)UMTS Anbindung

SSL VPN Zugang über eine Breitband Internet Verbindung

Über diese Verbindung ist es möglich über einen Pc mit entsprechender Software und Internet Zugang direkt auf das Steuerungssystem zuzugreifen.

Zum zweiten können über diese Verbindung per E-Mail Status- und Alarmmeldungen versendet werden.

Auch kann diese Verbindung von uns verwendet werden um die Anlage Fernzuwarten.

Provider Kosten sind im Preis nicht enthalten.

1	Umts Modem	
1	Modem Kabel und Magnetfuss Antenne	
1	Freischaltung und Einrichtung Dienste	
	Summe UMTS Anbindung	1522€



Kleinwasserkraftanlagen

A-6235 Reith i.A * Neudorf 9 * Tel 05337-63329 * Fax -30

Zahlungskonditionen:

30% bei Bestellung

30% bei Anzeige der Lieferbereitschaft

30% 30 Tage nach erfolgter Lieferung

10% spätestens 60 Tage nach ordnungsgemäßer Lieferung und Abnahme der Anlage

Alle Preise ohne 20% MwSt.

Liefertermin:nach Vereinbarung

Stundensatz Monteur:55€

Fahrt: 0,55€ pro km

Alle Preise ab Werk Reith im Alpbachtal.

Düseneinlauf, Beton, Schweißarbeiten, Montage, Inbetriebnahme, Kost und Logis sind nicht im Angebot enthalten.

Eine ausreichende Belüftung des Kraftwerk Gebäudes ist bauseit's sicher zu stellen.

Wir danken für die Anfrage und würden uns freuen den Auftrag für Sie durchführen zu dürfen

Andreas Bischofer
Elektro Bischofer

Auftraggeber