

Wissenschaftliche Begleitung des Einsatzes eines Wasserrades zur Stromerzeugung in der Abwasserableitung



Abschlussbericht

für das



Ministerium für Umwelt und
Naturschutz, Landwirtschaft und
Verbraucherschutz des Landes
Nordrhein-Westfalen

Förderkennzeichen: AZ IV – 9 – 042 3C7

Projektpartner:

Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft
an der RWTH Aachen e. V.



Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Str. 1 • 52074 Aachen
Tel: 0241 80 25207 • Fax: 0241 80 22285 • isa@isa.rwth-aachen.de



Abschlussbericht

zum Forschungsvorhaben:

„Einsatz eines Wasserrades zur Stromerzeugung in der Abwasserableitung“

AZ IV - 9 - 042 3C7

für das



Aachen, den

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp
(Projektleiter)

Projektpartner

Partner	Bearbeiter
 <p>Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp Mies-van-der-Rohe-Str. 1 52074 Aachen Tel.: 0241 80 25207 Fax: 0241 80 22285 Email: isa@isa.rwth-aachen.de www.isa.rwth-aachen.de</p>	<p>Dr.-Ing. R. Haußmann</p>
 <p>Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen e. V. Mies-van-der-Rohe-Str. 17 D - 52056 Aachen Tel.: 0241 80 26825 Fax: 0241 870924 Email: fiw@fiw.rwth-aachen.de www.fiw.rwth-aachen.de</p>	<p>Dr.-Ing. F.-W. Bolle Dipl.-Biol. K. Billmaier Dipl.-Ing. R. Grebbin Dipl.-Ing. B. Wienert TAng J. Schunicht</p>

Inhalt

Verzeichnis der Bilder

Verzeichnis der Tabellen

Verzeichnis der Abkürzungen

	Seite
1 Zusammenfassung	1
2 Einleitung	4
2.1 Zielsetzung	4
2.2 Beteiligte Firmen	5
2.3 Zeitlicher Ablauf	6
3 Techniken und Ressourcen zur Wasserkraftnutzung	7
3.1 Techniken	7
3.1.1 Turbinen	7
3.1.2 Wasserkraftschnecken	8
3.1.3 Wasserräder	9
3.1.3.1 Überblick	9
3.1.3.2 Oberschlächtige Wasserräder	10
3.1.4 Auslegung obereschlächtiger Wasserräder	11
3.2 Bauwerke im Abwasserbereich zur Integration von Kleinstwasserkraftanlagen	17
3.2.1 Bauwerke zur Überwindung von Höhenunterschieden	17
3.2.2 Kläranlagenabläufe	22
3.3 Wasserkraftnutzung in der Abwasserableitung	23
3.3.1 Machbarkeitsüberlegungen	23

3.3.2	Nutzbarkeit der Wasserkraft in Nordrhein-Westfalen	26
3.4	Praxisbeispiele	29
4	Wasserrechtliche, förderpolitische und sicherheitstechnische Randbedingungen	32
4.1	Wasserrechtliche Rahmenbedingungen	32
4.2	Förderpolitische Rahmenbedingungen	34
4.3	Sicherheitstechnische Rahmenbedingungen	36
4.3.1	Korrosion im Stahlwasserbau	36
4.3.2	Allgemeine Betriebssicherheit	39
5	Pilotprojekt Aachen	41
5.1	Planungs-, Bau- und Installationsphase	41
5.1.1	Beschreibung der Baustelle	41
5.1.2	Planerische Ausgangsvariante des Absturzbauwerkes	42
5.2	Planerische Variante des Absturzbauwerkes mit Wasserrad	44
6	Untersuchungen	49
6.1	Leistung des Wasserrades	49
6.2	Optimierung der Energieerzeugung und Anlagenwartung	51
7	Erfahrungen im Betrieb und Wartung	53
8	Wirtschaftlichkeit von Wasserkraftanlagen in der Kanalisation	58
9	Bewertung	66
10	Literaturverzeichnis	68

Verzeichnis der Bilder

Bild 3.1:	Durchströmturbine (OSSBERGER GMBH)	7
Bild 3.2:	Wasserkraftschnecke (Firma REHART GmbH)	8
Bild 3.3:	Schema eines ober- und mittel- bis unterschlächtigen Wasserrades	9
Bild 3.4:	Übliche Einsatzbereiche ober- und unterschlächtiger Wasserräder	10
Bild 3.5:	Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Beaufschlagung eines ober- und unterschlächtigen Wasserrades (MÜLLER, KAUPPERT, 2003)	11
Bild 3.6:	Idealisierte Schaufelform für linksgerichteten ober- und unterschlächtigen Betrieb	15
Bild 3.7:	Exemplarische Berechnung mithilfe eines Excel-Sheets	16
Bild 3.8:	Seitenansicht eines Absturzbauwerks mit innen liegendem Untersturz ATV, 1996)	18
Bild 3.9:	Seitenansicht eines Absturzbauwerks mit Schusssrinne (ATV, 1996)	18
Bild 3.10:	Seitenansicht eines Absturzbauwerks mit Kaskaden und Rinne (ATV, 1996)	19
Bild 3.11:	Grundriss eines Fallschachts mit Prallplatte (ATV, 1996)	20
Bild 3.12:	Grundriss eines Wirbelfallschacht (ATV, 1996)	21
Bild 3.13:	Mögliche Gefällennutzung (ATV, 1996)	21
Bild 3.14:	Abflussganglinie	24
Bild 3.15:	Abflussdauerkurve	24
Bild 3.16:	Ableitung der Ausbauwassermengen unter Anwendung der Abflussdauerkurve für den Parallel- und Inselbetrieb	25
Bild 3.17:	Topographische Karte von Nordrhein Westfalen	26
Bild 3.18:	Unterschlächtiges Wasserrad im Auslauf der Kläranlage Karlsruhe	30
Bild 3.19:	Schnecke in Rottenburg/Neckar (RITZ ATRO GMBH)	31
Bild 3.20:	Durchströmturbine mit Generator	31

Bild 4.1:	Korrosionsreaktion an einem Eisenmetall	37
Bild 4.2:	Galvanische Opferanode (MILLER, DÜCKER, 2002)	38
Bild 4.3:	Prinzip der Fremdstrom-Schutzanlage (MILLER, DÜCKER, 2002)	39
Bild 4.4:	Kennzeichnung von Bereichen mit explosionsfähigen Atmosphären (BetrSichV, 2002)	39
Bild 5.1:	Lageplan des Absturzbauwerkes Hohenzollernplatz in Aachen	42
Bild 5.2:	Lageplan zur planerischen Ausgangsvariante des Absturzbauwerkes Hohenzollernplatz ohne Wasserrad	43
Bild 5.3:	Längsschnitt des Absturzbauwerkes Hohenzollernplatz	44
Bild 5.4:	Grundriss des Absturzbauwerkes Hohenzollernplatz mit Wasserrad	45
Bild 5.5:	Längsschnitt des Absturzbauwerkes Hohenzollernplatz	46
Bild 5.6:	Ansicht des Wasserrades beim Einbau	47
Bild 5.7:	Das Wasserrad nach dem Einbau	47
Bild 6.1:	Leistungsdurchflusskurve des Wasserrades vom Freitag, 05.05.2006	49
Bild 6.2:	Leistungsdurchflusskurve des Wasserrades vom Wochenende, 06. – 07.05.2006	50
Bild 6.3:	Diskrepanz zwischen der gemessenen und theoretisch erreichbaren Leistung in Abhängigkeit des Volumenstroms	51
Bild 6.4:	Zulaufgerinne zum Wasserrad	52
Bild 6.5:	Hauptschott des Stauraumkanals und Zulaufgerinne zum Wasserrad	52
Bild 7.1:	Generator-Getriebe-Einheit am Wasserrad nach dem Schadensfall	53
Bild 7.2:	Wasserrad mit neuer Getriebe-Generatoreinheit	54
Bild 7.3:	Zulaufgerinne zum Wasserrad mit Wasserradkasten sowie Einblick in eine Wasserradtasche (24 Monate nach Inbetriebnahme ohne Reinigung)	55

Bild 7.4:	Beginnende Korrosion der Anlagenteile des Wasserrades nach dem Einbau – von links nach rechts – Generator-Getriebeeinheit, Wasserradachse mit Tragarmen, Wasserradtaschen	56
Bild 7.5:	Fortgeschrittene Korrosion am Wasserrad nach 14 Monaten in Kanalatmosphäre – von links nach rechts – Tragarm des Wasserrades mit Weißrost, Schweißnaht des Wasserradkastens mit Rostansatz	56
Bild 7.6:	Wasserradteile mit starkem Rostbefall nach insgesamt 30 Monaten in Kanalatmosphäre – von links nach rechts – Achse mit Flansch und Tragarmen, Achse mit Tragarmen, Achsen-Getriebeflansch	56
Bild 8.1:	Vergleich der Stromgestehungskosten verschiedener Energieträger	63
Bild 8.2:	Bandbreite externer kalkulatorischer Kostenzuschläge regenerativer Energieträger (Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, 1999)	64
Bild 8.3:	Vergleich von Stromgestehungskosten verschiedener Energieträger unter Einbeziehung externer Kosten	65

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1.1:	Beteiligte Ingenieurbüros	5
Tabelle 3.1:	Erzielbare Leistungen pro m Fallhöhe in Abhängigkeit des Abwasservolumenstroms Q und des Wirkungsgrades η	12
Tabelle 3.2:	Flächen- und Bevölkerungsanteile von Gebiet 1 und Gebiet 2	27
Tabelle 3.3:	Verteilung kommunaler Kläranlagen in NRW nach Größenklassen*	29
Tabelle 4.1:	Vergütungssätze nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)	35
Tabelle 4.2:	Elektrochemische Spannungsreihe (Auszug) (RIEDEL, 1982)	38
Tabelle 8.1:	Investitionskosten für Kleinstwasserkraftanlagen im Abwasserbereich	60
Tabelle 8.2:	Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für das Wasserrad und ein Vergleichsbeispiel	61

Verzeichnis der Abkürzungen

Mathematische Operanten und allgemeine Interpunktationen

%	Prozent
‰	Promille
°C	Grad Celsius
ρ	Dichte der Förderflüssigkeit
η	Wirkungsgrad
π	Mathematische Konstante, Kreiszahl
λ	Wärmeleitfähigkeit
Δ	Differenz
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz
Δz	Höhenunterschied
€	Währungszeichen Euro
\varnothing_{Rad}	Durchmesser des Wasserrads
§	Paragraph
ε	Füllungskoeffizient der Wasserradschaufel
$\sqrt{\quad}$	Formelzeichen Wurzel
°	Grad, Winkel

Abkürzungsverzeichnis

a	Anno (Jahr), Radkranztiefe
A	Arbeitsblatt
ABl.	Amtsblatt
Abs.	Absatz
AFA	Abschreibung für Abnutzung
AG	Aktiengesellschaft
ARA	Abwasserreinigungsanlage
ATV	Abwassertechnische Vereinigung
ATV-DVWK	Abwassertechnische Vereinigung – Deutsche Vereinigung für

	Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
B	Radbreite
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BHKW	Blockheizkraftwerk
BioAbfV	Bioabfallverordnung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
c_w	Spezifische Wärmekapazität
CO ₂	Kohlendioxid
d	Tag
d_a	Außendurchmesser
d_i	Innendurchmesser
D	Durchmesser
DB	Durchlaufbecken
D.h.	Das heißt
DIN	Norm des Deutschen Instituts für Normung
DIN-EN	Europanorm
DN	Normdurchmesser
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall - vormals ATV-DVWK
E	Einwohner, jährliches Energiepotential
E°	Normalpotential
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EG	Vorläufer und Teil der Europäischen Union
EGW	Einwohnergleichwert
EW	Einwohnerwert (EW = E + EGW)
e^-	Elektron
el	elektrisch
EMSR-Technik	Elektro-, Mess-, Steuer- und Regeltechnik

EU	Europäische Union
EVU	Energieversorgungsunternehmen
EW	Einwohnerwert
Fe	Element Eisen
Fe ⁺⁺	Eisenion
g	Gramm, Newton'sche Gravitationskonstante
GbR	Gesellschaft bürgerlichen Rechts
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GWh	Gigawattstunde
h	Stunde
H	Höhe, Element Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
inst.	installiert
J	Joule
k	Leistungskoeffizient
K	Kelvin
kg	Kilogramm
km ²	Quadratkilometer
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
ln	natürlicher Logarithmus
L	Länge
LWG	Landeswassergesetz
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
Mg	Megagramm

min	Minute
Mio.	Million
MJ	Megajoule
mm	Millimeter
Mrd.	Milliarde
MUNLV	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
n	Drehzahl
NI	Normliter
NN	Normalnull
Nm ³	Normkubikmeter
NRW	Nordrhein-Westfalen
Nr.	Nummer
O	Element Sauerstoff
OH ⁻	Hydroxidion
OSW	Oberschlächtiges Wasserrad
P	Leistung
Q	Abfluss, Förderstrom, Abwasservolumenstrom, Wärmestrom
Q _G	Gewerblicher und industrieller Schmutzwasserabfluss
Q _F	Fremdwasser
Q _R	Regenabfluss
Q _T	Trockenwetterabfluss
REN	Förderprogramm zur „Rationellen Energieverwendung und Nutzung unerschöpflicher Energiequellen“
RRB	Regenrückhaltebecken
RÜ	Regenüberlauf
RÜB	Regenüberlaufbecken

s	Sekunde
SK	Stauraumkanal
S.	Seite
t	Zeit
TWh	Terawattstunden
u	Umfangsgeschwindigkeit
ü	über
UBA	Umweltbundesamt
USW	Unterschlächtiges Wasserrad
UVV	Unfallverhütungsvorschriften
V	Volumenstrom, Volt
VB	Verbundbecken
Vol.-%	Volumenprozent
W	Watt
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
W _s	Täglicher Schmutzwasseranfall
z.B.	Zum Beispiel

1 Zusammenfassung

Das öffentliche Kanalnetz in Deutschland hat nach Angaben des Statistischen Bundesamtes eine Länge von über 500.000 km. Pro Jahr fließen den Kläranlagen hierüber bundesweit ca. 10×10^6 m³ Abwasser zu. Diese gewaltige Menge an Abwasser hat bisher als „Energieträger“ wenig Beachtung gefunden.

Energiepotentiale, die im Abwasser selbst vorhanden sind oder im Zusammenhang mit dessen Ableitung im Kanalnetz entstehen, sollten identifiziert und, wenn möglich, auch genutzt werden. Dieses als „künstlich“ zu bezeichnende Wasserkraftpotential besteht vielerorts z.B. an Kläranlagenabläufen oder im Netz der Abwasserableitung.

Zur Nutzung der Wasserkraft können neben Turbinen und Wasserkraftschnecken Wasserräder zum Einsatz kommen, welche aufgrund der robusten Technik gerade in der Abwasserableitung deutliche Vorteile besitzen. Das durch Wasserkraftanlagen nutzbare (Ab)Wasserkraftpotential innerhalb der Abwasserableitung beschränkt sich aus wirtschaftlichen Gründen auf Absturzbauwerke und Fallschächte, die eine Fallhöhe von mindestens 2 m und einen minimalen Trockenwetterabfluss von 80 l/s aufweisen. Für den Betrieb sowie die Anlagenauslegung wird der mittlere Trockenwetterabfluss zugrunde gelegt, da auf diese Weise die maximale Laufzeit des Wasserrades erreicht werden kann. Sofern bei Regenereignissen die maximale Betriebswassermenge überschritten wird, nimmt das Steuerprogramm die Anlage aus sicherheitstechnischen Gründen außer Betrieb. Die Anzahl der Bauwerke in NRW, die diese Bedingungen erfüllen, wurde anhand vorliegender Daten für Nordrhein-Westfalen abgeschätzt. Damit steht in NRW ein durch Wasserräder theoretisch nutzbares Energiepotential von 430 bis 3.040 MW zur Verfügung (FiW, 2000).

Da bislang keine Erfahrungen und Erkenntnisse zum Einsatz von Wasserkraftanlagen im Kanal zur Stromerzeugung und insbesondere von Wasserrädern vorlagen, sollte an einer großtechnischen Demonstrationsanlage die Einsatzfähigkeit unter betriebstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten untersucht werden.

Für das Vorhaben beauftragte das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV) das Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA). Die Untersuchungen wurden gemeinsam mit dem Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen durchgeführt.

Im Vorhaben wurden durch detaillierte Untersuchungen die technischen Aspekte der Projektierung sowie der Ausführung eines Wasserrades als Teil einer Kleinstwasserkraftanlage in der Abwasserableitung behandelt.

Das Vorhaben beinhaltete einen betriebstechnischen sowie einen wirtschaftlichen Schwerpunkt. Die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse zum Betrieb des Wasserrades ergänzen den Bericht.

Als günstiger Standort für den Einbau eines Wasserrades wurde das Absturzbauwerk im Mischwasserkanal am Hohenzollernplatz in Aachen identifiziert. Einerseits befand sich das Bauwerk gerade im Bau, so dass die erforderlichen Baumaßnahmen für die Aufnahme des Wasserrades noch vorgenommen werden konnten. Andererseits war mit einer nutzbaren Fallhöhe von 12,50 Meter sowie dem vorhandenen Trockenwetterabfluss zwischen 30 l/s (Nachtminimum) und ca. 150 l/s (Tagesmaximum) ausreichend großes Potential für die Energiegewinnung gegeben. Da es sich um eine Pilotanlage handelt, wurde das Absturzbauwerk entsprechend der Planung erstellt. Das Wasserrad wurde in einer ergänzten Umhausung angesiedelt. Die vorhandene Baugrube gab den maximalen Durchmesser des Wasserrades vor, so dass nur ein Bruchteil der potentiellen Energie genutzt werden kann. Das Schluckvermögen des Wasserrades wurde lediglich für den Trockenwetterabfluss bemessen. Nach Einbau des Wasserrades wurde nach Erreichen eines stabilen Betriebszustandes das Wasserrad getestet und optimiert.

Innerhalb der stabilen Betriebsphase flossen gemittelt über alle Stundenwerte ca. 70 l/s Abwasser über das Wasserrad. Die durchschnittliche tägliche elektrische Energieproduktion betrug 65 kWh.

Für eine weitergehende Ausnutzung der vorhandenen Abwassermengen wurde in das Zulaufgerinne ein Leitblech eingebaut, um die in den Nachtstunden verminderte Wassermenge vollständig zur Energieerzeugung über das Wasserrad zu führen. Da diese Optimierungsmaßnahme durch einen Anlagenausfall begleitet war, liegen keine Leistungsdaten hierzu vor. Eine Erhöhung der Gesamtleistung lässt sich plausibel quantifizieren, da in den sieben leistungsverminderten Nachtstunden durch die Aufrechterhaltung des Betriebes des Wasserrades aus 30 l Abwasser/s zusätzlich etwa 2 kW produziert würden. Entsprechend hätte sich die elektrische Energieabgabe um 14 kWh auf ca. 80 kWh erhöht.

Als eine weitere Maßnahme zur Steigerung der Energieproduktion könnte der im Zustrombereich des Wasserrades gelegene zwei Kilometer lange Stauraumkanal mit seinem Fassungsvermögen von 6.280 m³ als Energiespeicher einbezogen werden.

Mit Blick auf die Wartung der Kleinstwasserkraftanlage in der Kanalisation ist hier zwischen dem Aufwand zur Reinigung der Kleinstwasserkraftanlage einschließlich des Maschinenraums und der technischen Wartung zu unterscheiden.

Der im Vorfeld der Untersuchungen unterstellte hohe Reinigungsaufwand zeigte sich im Betrieb nicht. Eine Ablagerung von groben Schmutzstoffen war nicht feststellbar. Anhaftende Feinschmutzpartikel zeigten sich lediglich als dünne Auflage des Wasserrades. Eine Optimierung des Reinigungsaufwands war deshalb nicht notwendig.

Zur Erreichung einer hohen Betriebsdauer wurde das Wasserrad zum Teil über passive Maßnahmen gegen Korrosion geschützt. Der Wasserradkasten bestand aus Edelstahl (V4A). Die Radarme waren aus Stahl (U160St37) gefertigt, verzinkt und mit einer Zweikomponentenlackierung versehen. Die Radachse mit Flansch blieb ungeschützt. Wie der Praxisbetrieb zeigte, reichen diese korrosionsmindernden Maßnahmen für einen dauerhaften Anlagenschutz allerdings nicht aus. Dies kann nur durch die Verwendung homogener, chemisch widerstandsfähiger Materialien wie beispielsweise rostfreiem Stahl gewährleistet werden. Um das Wasserrad vor weiteren Schäden durch die bereits massive Korrosion zu schützen bzw. den Bestand zu sichern, wird das Anbringen von Opferanoden empfohlen.

Da die Kleinstwasserkraftanlage im vorliegenden Projekt in der Kanalisation und damit in einer Ex-Schutzzone eingebaut wurde, mussten alle elektrotechnischen Geräte und Anlagenbestandteile der entsprechenden Schutzklasse genügen. Um das Innere der eingebauten Kabelabzweiggästen vor Feuchtigkeit zu schützen und damit Anlagenausfällen vorzubeugen, wurden diese mit Kunstharz ausgegossen.

Theoretisch besteht in NRW ein hohes Energiepotential in der Abwasserableitung. Die Nutzung dieses Potentials ist jedoch durch die hohen Stromgestehungskosten stark eingeschränkt. Für die Gewinnung von elektrischer Energie durch Wasserräder in der Kanalisation liegen die Stromgestehungskosten aufgrund der Investitionskosten bei 35 ct/kWh und lassen sich unter den derzeitigen Förderbedingungen durch die Einspeiserückvergütung nach EEG nicht kompensieren. Ein wirtschaftlicher Betrieb und eine Amortisation der Anlage sind damit nicht gegeben.

Im Gegensatz dazu bietet die Stromgewinnung aus Abwasser an Kläranlagenabläufen durch Wasserräder aufgrund der erheblich geringeren Investitionskosten und hier im Speziellen der Kosten für die zu leistenden Einbaumaßnahmen hinreichendes Potential für einen wirtschaftlichen Betrieb. Hier liegen die Stromgestehungskosten je kWh unter der geltenden Einspeiserückvergütung.

2 Einleitung

2.1 Zielsetzung

Die Studie „Energieverbrauch und Energienutzungspotentiale bei der Abwasserableitung“, welche das Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV) im Jahre 2000 erstellte, zeigte im Ergebnis beachtenswerte Energiepotentiale von 430 bis 3.040 MWh/a auf, deren Nutzung bisher unbeachtet blieb.

Die Energie des Abwassers im Kanal, die bei der Überwindung großer Fallhöhen in Fallschächten frei wird, kann mit Hilfe von Kraftmaschinen in elektrischen Strom umgewandelt werden. Üblicherweise kommen zur Nutzung der Wasserkraft Turbinen zum Einsatz. Aufgrund des hohen Feststoffgehaltes im Abwasser und der stark schwankenden Zulaufmengen sind Wasserräder in diesem Betriebsbereich jedoch deutlich effizienter als Turbinen.

Da bislang keine Erfahrungen und Erkenntnisse zum Einsatz von Wasserrädern im Kanal zur Stromerzeugung vorlagen, sollte an einer großtechnischen Demonstrationsanlage die Einsatzfähigkeit unter betriebstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten untersucht werden.

Daher wurde zunächst eine Pilotanlage in ein neu zu bauendes Absturzbauwerk in Aachen integriert. Bauherr war die Stadt Aachen. Für die Planung und den Bau der Anlage wurden Zuwendungen aus dem Aufkommen der Abwasserabgabe gewährt und gemeinsam mit Eigenmitteln der Stadt Aachen sowie der am Projekt beteiligten Firmen eingesetzt.

Ziel der im Anschluss an den Bau des Absturzbauwerkes sowie der Montage des Wasserrades vom MUNLV geförderten wissenschaftlichen Begleitung war es, Rahmenbedingungen für den ökonomischen und ökologischen Einsatz eines Wasserrades in der Kanalisation zu definieren.

Im Vorhaben wurden durch detaillierte Untersuchungen die technischen Aspekte der Projektierung sowie der Ausführung von Kleinstwasserkraftanlagen in der Abwasserableitung behandelt. Das Vorhaben wies einen betriebstechnischen sowie einen wirtschaftlichen Schwerpunkt auf.

Der betriebstechnische Arbeitsschwerpunkt beinhaltete

- die Optimierung der Kleinstwasserkraftanlage,
- die Optimierung der Unterhaltungsmaßnahmen sowie
- die Sicherstellung der Fernüberwachung.

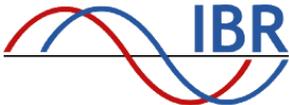
Neben der Bearbeitung technischer Fragestellungen war die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit ein zweiter Schwerpunkt des Vorhabens.

Die Erfahrungen mit den technischen und wirtschaftlichen Problemen, die während des Betriebs der Kleinstwasserkraftanlage auftraten, ergänzen den Bericht. Darüber hinaus gibt der Abschlussbericht einen Ausblick auf den Einsatz von Wasserrädern innerhalb der Kanalisation sowie auf die Nutzung der Energie des Abwassers.

2.2 Beteiligte Firmen

Die Pilotanlage wurde zu 70 % vom MUNLV gefördert. Der Eigenanteil in Höhe von 30 % wurde von der Stadt Aachen sowie von den nachfolgend genannten beteiligten Ingenieurbüros und Firmen erbracht.

Tabelle 1.1: Beteiligte Ingenieurbüros

	<p><u>Planungsleistungen</u> Kisters AG 52068 Aachen</p>
	<p><u>Objektplanung und Bauüberwachung</u> Ingenieurbüro Gell & Partner GbR 52080 Aachen</p>
	<p><u>Planung der E + MSR Technik</u> Ingenieurbüro Redlich und Partner GmbH 65388 Schlangenbad</p>
	<p><u>Konstruktion und Bau des Wasserrades</u> Bega Wasserkraftanlagen GmbH 44791 Bochum</p>

2.3 Zeitlicher Ablauf

Die Planung für das Projekt begann im März 2001. Zeitgleich erfolgte die Antragstellung zur Förderung des Pilotprojektes „Einsatz eines Wasserrades zur Stromerzeugung in der Abwasserableitung“ durch die Stadt Aachen. Da der Zeitplan der Baumaßnahme keine Verzögerungen durch das Pilotprojekt zuließ, konnte in Abstimmung mit der Bezirksregierung Köln ein förderunschädlicher Baubeginn erreicht werden. Der Förderantrag zum Bau der Anlage wurde mit Schreiben vom 25.07.2001 bewilligt. Der Rohbau des Absturzbauwerkes Hohenzollernplatz einschließlich des Einbaus des Wasserrades wurde bis Dezember 2001 fertig gestellt.

Die Installation der E-MSR-Technik erfolgte im Jahr 2002. Die offizielle Inbetriebnahme der Kleinstwasserkraftanlage im Absturzbauwerk Hohenzollernplatz in Aachen fand am 26.11.2003 statt.

Mit der wissenschaftlichen Begleitung wurde das Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen am 19.05.2004 durch das MUNLV beauftragt.

Aufgrund eines Montagefehlers kam es am 30.06.2004 zu einem Totalausfall des Wasserrades. Die Anlage wurde nach dem Abschluss der Instandsetzungsmaßnahmen am 21.02.2006 wieder in Betrieb genommen. Weitere Störungen und Ausfälle verzögerten die Arbeiten zur wissenschaftlichen Begleitung immer wieder, so dass die Arbeiten erst im November 2006 abgeschlossen werden konnten.

3 Techniken und Ressourcen zur Wasserkraftnutzung

Wasserkraftmaschinen wandeln die potentielle Energie der Lage und die kinetische Energie der Bewegung des Wassers in elektrischen Strom um. Für diese Aufgabe stehen heute drei unterschiedliche Typen von Maschinen zur Verfügung: die Turbine, die Wasserkraftschnecke sowie das Wasserrad. Diese werden nachfolgend vorgestellt. Aufgrund des Projektbezuges wird anschließend das überschlächtige Wasserrad vertieft besprochen.

3.1 Techniken

3.1.1 Turbinen

Turbinen zählen zu den Strömungsmaschinen und wandeln kinetische und potentielle Energie eines strömenden Mediums in Rotationsenergie um.

Turbinen werden über Druckleitungen mit Wasser beschickt. Je nach Volumenstrom und Fallhöhe werden Kaplan-, Pelton- oder Francisturbinen eingesetzt, die sich in Funktionsprinzip, Schaufelform, Drehzahl und Wirkungsgrad unterscheiden. Ihnen gemein ist eine hohe Drehzahl bei geringem Drehmoment. Bauartbedingt muss das Wasser für den Betrieb frei von Fest- und Störstoffen sein. Turbinen decken alle Leistungsbereiche von ca. 10 kW bis in den mehrstelligen Megawattbereich ab.

Sind für den wirtschaftlichen Betrieb von Turbinen üblicherweise große Fallhöhen und Wassermengen notwendig, so ist zur Nutzung kleiner Wasserkräfte eine Durchströmturbine mit horizontalem und vertikalem Zufluss entwickelt worden. Die Ossberger-Turbine (Bild 3.1) ist für den Einsatz mit geringen Fallhöhen, beginnend bei 1 Meter und geringen Volumenströmen von 25 Liter pro Sekunde, geeignet.

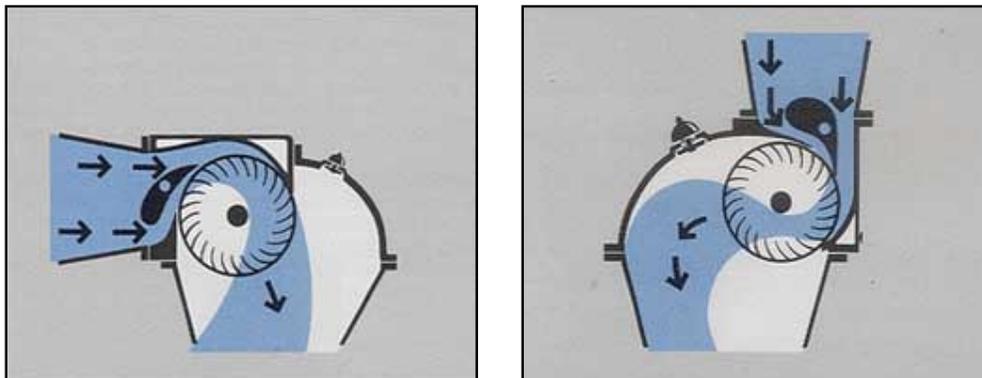


Bild 3.1: Durchströmturbine (OSSBERGER GMBH)

3.1.2 Wasserkraftschnecken

Eine neue Möglichkeit zur Wasserkraftnutzung im kleinen Leistungsbereich bietet die Wasserkraftschnecke, die nach dem umgekehrten archimedischen Prinzip arbeitet. Ein spiralförmiges Gewinde auf einer Welle wird über die Gewichtskraft des hindurch fließenden Wassers in Rotation versetzt. Diese variiert je nach der einfließenden Wassermenge und muss nicht aufwändig geregelt werden.

Die Wasserkraftschnecke zeichnet sich besonders durch ihre Robustheit und einfache Bauweise aus. Da die Schnecke offen gestaltet ist, stellen Störstoffe kein Problem für den Betrieb dar. Die langsame Drehbewegung wird für den Generator über ein Getriebe übersetzt.

Bei Volumenströmen von 0,1 bis 5,5 m³/s und Höhenunterschieden von bis zu 10 m ist ihr wirtschaftlicher Einsatzbereich besonders bei kleinen Wasserkraften zu finden. Der Anstellwinkel der Schnecke darf 30° nicht überschreiten, ansonsten fließt das Wasser ohne Energiewandlung über sie hinweg. Der sich aus dem maximalen Anstellwinkel ergebende Platzbedarf limitiert den Einsatz. Zusätzlich ist der Einsatz durch die Dimension der Maschine in der Abwasserableitung auf offene Abläufe beschränkt, da ein ungehinderter Abfluss des Abwassers gewährleistet sein muss.

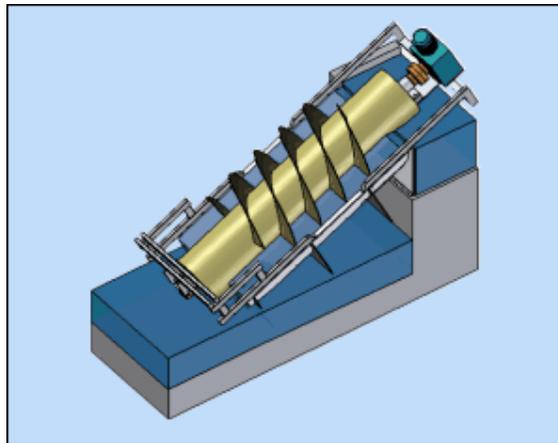


Bild 3.2: Wasserkraftschnecke (Firma REHART GmbH)

3.1.3 Wasserräder

3.1.3.1 Überblick

Wasserräder gehören zu den ältesten bekannten Anlagen zur Energiegewinnung. Schon um das Jahr 1200 v. Chr. wurden Wasserschöpfräder genutzt, um Felder zu bewässern. Heute dienen Wasserräder zur Nutzung der Wasserkraft im Leistungsbe- reich bis ca. 50 kW.

Aufgrund der Betriebsweise bzw. der Art der Wasserzuführung werden Wasserräder in drei Kategorien eingeteilt:

- Unterschlächtinge Wasserräder
- Mittelschlächtinge Wasserräder
- Oberschlächtinge Wasserräder

Bild 3.3 zeigt die Funktionsskizzen eines ober- und eines mittelschlächtingen Was- serrades.

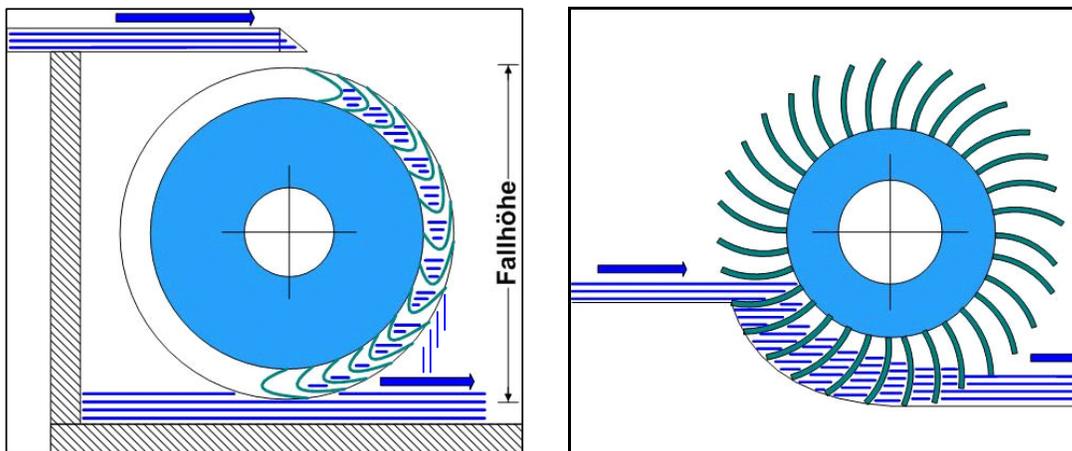


Bild 3.3: Schema eines ober- und mittel- bis unterschlächtingen Wasserrades

Das Wasserrad besitzt bei geringen Fallhöhen und stark schwankendem Zufluss ge- genüber anderen Wasserkraftmaschinen auch heute noch deutliche Systemvorteile. Da durch Wasserräder hauptsächlich die Schwerkraft des Wassers genutzt wird, tre- ten nur geringe hydrodynamische Verluste auf. Hinzu kommt aufgrund der großen Trägheit des Wasserrades das hohe Drehmoment. Weitere Vorteile von Wasserrä- dern sind die einfache Technik sowie die robuste Bauweise.

Wie in Bild 3.4 zu erkennen ist, sind die Einsatzbereiche ober- und unterschlächtiger Wasserräder verschieden.

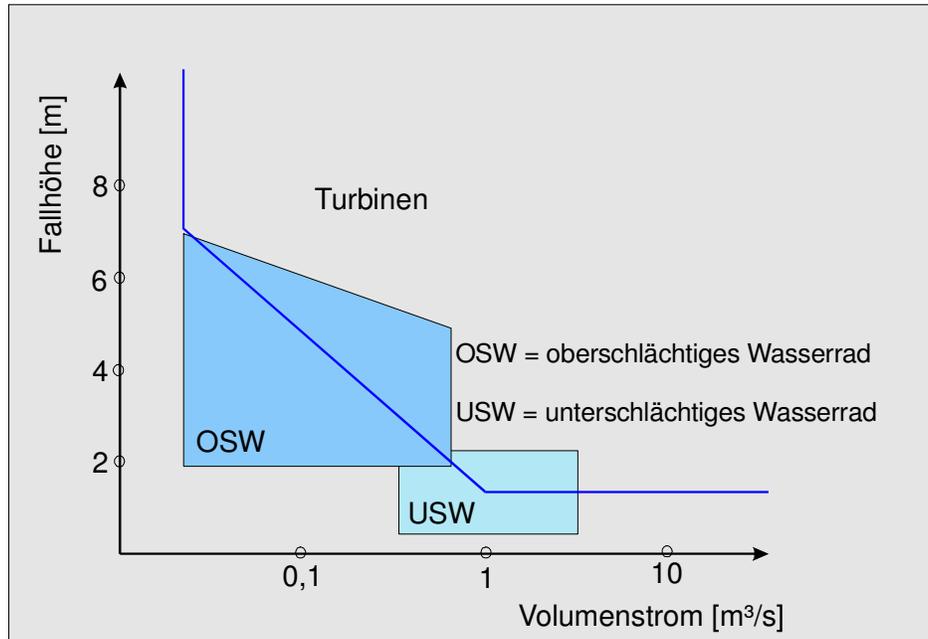


Bild 3.4: Übliche Einsatzbereiche ober- und unterschlächtiger Wasserräder

Wie Erfahrungen aus dem Wasserkraftanlagenbau zeigen, liegt der optimale Betriebsbereich für ober- und unterschlächtige Wasserräder bei einer Fallhöhe von 2 bis 7 Metern sowie einem Wasserzufluss Q von $\sim 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Hierbei kann der Wasserzufluss stark schwanken. Allerdings sind Fallhöhen von ca. 3 - 5 m und Wasservolumina ab ca. $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ üblich.

Unter- bis mittelschlächtige Wasserräder kommen bei Fallhöhen von 0,2 bis 2 Metern sowie einem Wasserzufluss Q von $\sim 0,5$ bis $5 \text{ m}^3/\text{s}$ zum Einsatz.

3.1.3.2 Oberschlächtige Wasserräder

Entsprechend den im Absturzbauwerk vorliegenden Systemvoraussetzungen wurde für die Nutzung der Energie des Abwassers im vorliegenden Beispiel ein ober- und unterschlächtiges Wasserrad gewählt.

Das ober- und unterschlächtige Wasserrad nutzt ausschließlich die Schwerkraft des Wassers. Die Umsetzung der potentiellen Energie der Lage in kinetische Energie der Bewegung beruht ausschließlich auf dem (Galileischen) Gesetz des freien Falls. Bewegt sich eine Masse in einer Zeiteinheit entgegen der Erdanziehung, so wird eine Leistung P frei.

Diese Leistung (kg m/s) wird der Radachse durch das Drehmoment übertragen. Wäre es hierbei möglich, die gesamte Fallenergie des Wassers umzusetzen, läge der Wirkungsgrad bei 100 %.

Dieser Nutzeffekt wird durch die mechanischen Reibungsverluste aller sich drehenden Teile, der verminderten Befüllung der Radtaschen im oberen Scheitelpunkt sowie der beginnenden Entleerung vor dem unteren Scheitelpunkt herabgesetzt.

Konstruktionsbedingt erreicht das überschlächtige Wasserrad bereits bei einer 20%igen Beaufschlagung seinen maximalen Wirkungsgrad und behält diesen fast verlustfrei bis zum maximal bemessenen Volumenstrom bei. Die anstehende Wasserkraft wird damit in einem weiten Bereich optimal ausgenutzt. Bild 3.5 verdeutlicht diesen Zusammenhang zwischen Beaufschlagung und Wirkungsgrad grafisch.

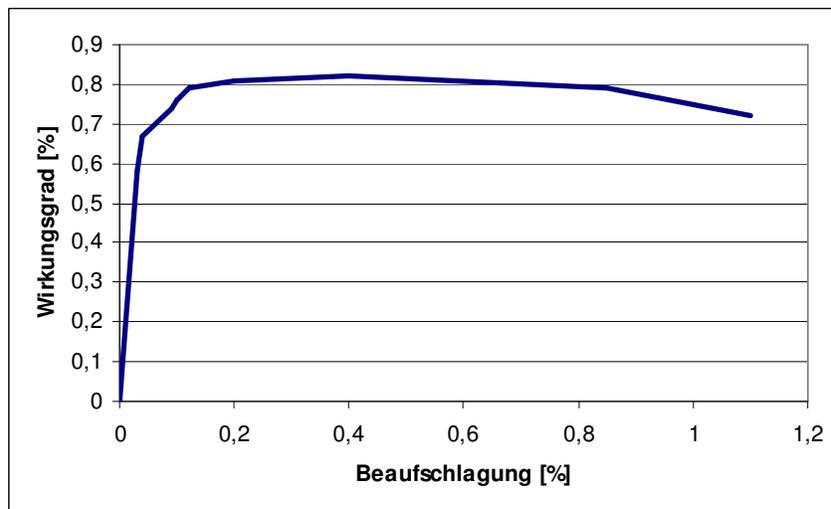


Bild 3.5: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Beaufschlagung eines überschlächtigen Wasserrades (MÜLLER, KAUPPERT, 2003)

Bei geringer Beaufschlagung hat das Wasserrad den besten Wirkungsgrad aller Wasserkraftmaschinen.

3.1.4 Auslegung überschlächtiger Wasserräder

Für die Energiegewinnung aus Wasserkraft muss die hydromechanische Energie des Wassers in Elektrizität umgewandelt werden. Dies geschieht über eine Wasserkraftmaschine und einen Generator.

Leistung

Die Leistung P , die durch das Wasserrad bzw. durch den Generator erzeugt wird, ist abhängig vom Wasserdurchfluss Q , der Fallhöhe H und vom Wirkungsgrad η des

Gesamtsystems Wasserrad-Generator und kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$P = \frac{\rho \cdot Q \cdot H \cdot g \cdot \eta}{1000} \quad [\text{kW}]$$

mit:

P = Leistung

ρ = Dichte der Förderflüssigkeit in kg/m^3

Q = Abwasserstrom in m^3/s

H = Förderhöhe in m

g = $9,81 \text{ m/s}^2$

η = Wirkungsgrad des Aggregats (Turbine/Wasserrad)

Hieraus lassen sich die in Tabelle 3.1 dargestellten Leistungen in Abhängigkeit des Abwasservolumenstroms Q und des Wirkungsgrades η errechnen.

Tabelle 3.1: Erzielbare Leistungen pro m Fallhöhe in Abhängigkeit des Abwasservolumenstroms Q und des Wirkungsgrades η

Abwasservolumen Q [m^3/s]	Leistung P pro m Fallhöhe [kW/m]							
	$\eta = 0,3$	$\eta = 0,4$	$\eta = 0,5$	$\eta = 0,6$	$\eta = 0,7$	$\eta = 0,8$	$\eta = 0,9$	$\eta = 1,0$
0,05	0,15	0,20	0,25	0,29	0,34	0,39	0,44	0,49
0,10	0,29	0,39	0,49	0,59	0,69	0,78	0,88	0,98
0,15	0,44	0,59	0,74	0,88	1,03	1,18	1,32	1,47
0,20	0,59	0,78	0,98	1,18	1,37	1,57	1,77	1,96
0,25	0,74	0,98	1,23	1,47	1,72	1,96	2,21	2,45
0,30	0,88	1,18	1,47	1,77	2,06	2,35	2,65	2,94
0,35	1,03	1,37	1,72	2,06	2,40	2,75	3,09	3,43
0,40	1,18	1,57	1,96	2,35	2,75	3,14	3,53	3,92
0,45	1,32	1,77	2,21	2,65	3,09	3,53	3,97	4,41
0,50	1,47	1,96	2,45	2,94	3,43	3,92	4,41	4,91
0,55	1,62	2,16	2,70	3,24	3,78	4,32	4,86	5,40
0,60	1,77	2,35	2,94	3,53	4,12	4,71	5,30	5,89
0,65	1,91	2,55	3,19	3,83	4,46	5,10	5,74	6,38
0,70	2,06	2,75	3,43	4,12	4,81	5,49	6,18	6,87
0,75	2,21	2,94	3,68	4,41	5,15	5,89	6,62	7,36
0,80	2,35	3,14	3,92	4,71	5,49	6,28	7,06	7,85
0,85	2,50	3,34	4,17	5,00	5,84	6,67	7,50	8,34
0,90	2,65	3,53	4,41	5,30	6,18	7,06	7,95	8,83
0,95	2,80	3,73	4,66	5,59	6,52	7,46	8,39	9,32
1,00	2,94	3,92	4,91	5,89	6,87	7,85	8,83	9,81

Die obige Tabelle kann als Hilfe zur Abschätzung des Leistungspotentials dienen.

Beispielsweise ergibt sich bei einem Abwasservolumen $Q = 0,1 \text{ [m}^3/\text{s]}$ und einem Wirkungsgrad $\eta = 0,7$ ein Leistungspotential von $0,69 \text{ [kW/m]}$. Bezogen auf eine Fallhöhe von $h = 4 \text{ [m]}$ ist die erzielbare Leistung $P = 4 \times 0,69 = 2,76 \text{ [kW]}$.

Leistung kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt gemessen werden, während Energie über eine bestimmte Zeitspanne gemessen wird, z.B. eine Sekunde, eine Stunde oder ein Jahr. Elektrische Leistung wird normalerweise in Watt (W), Kilowatt (kW), Megawatt (MW) etc. gemessen. Die Energie wird in Kilowattstunden (kWh) für einen bestimmten Zeitraum angegeben, z.B. pro Stunde. Leistung ist Energie pro Zeiteinheit.

Die Kennwerte für ein Wasserrad sind gegeben durch die Ausbauwassermenge Q , die Fallhöhe H und den Raddurchmesser D .

Wie in Kapitel 3.3.1 noch beschrieben wird, ist die Ausbauwassermenge Q aus der ermittelten Wassermengendauerlinie ableitbar oder kann dem GEP entnommen werden.

Neben der Ausbauwassermenge ist für die Auslegung die vorhandene Fallhöhe von Bedeutung. Diese ist definiert als Abstand zwischen der Oberen und Unteren Wasserhöhe.

Für die weitere Auslegung eines betriebsgerechten Wasserrades wird als erstes der Durchmesser D bestimmt.

Durchmesser

Nach MÜLLER (1939) kann für überschlächtige Wasserräder 9-12 % der Fallhöhe H abgezogen werden, um einen ersten Wert für den Durchmesser zu erlangen. Genauer macht es MÜLLER (1939) über die Formel

$$2) \quad D = \left(H - \frac{4u^2}{2g} \right)$$

wobei die Umfangsgeschwindigkeit $u \text{ [m/s]}$ idealerweise $1,3 \text{ m/s}$ oder leicht darüber beträgt. (MÜLLER, 1939; MEERWARTH, 1934)

Der Raddurchmesser ist im Hinblick auf eine optimale Nutzung des Potentials möglichst groß zu wählen, da sich das Wasser sowohl im Eintritt als auch Austritt strömungstechnisch günstiger verhält als bei kleineren Rädern. Dem gegenüber steht der höhere Preis für ein größeres Rad.

Geometrische Größen

Die Beaufschlagung Q [m^3/s], die Radbreite B [m] die Radkranztiefe a [m] und die Umfangsgeschwindigkeit im Schaufelschwerpunkt u_1 [m/s] sind folgendermaßen verknüpft:

$$3) \quad Q = u_1 \cdot a \cdot B \cdot \varepsilon$$

ε ist der Füllungskoeffizient der Schaufeln, der zumeist im Bereich von 0,3-0,6 liegt. Die Geschwindigkeit im Schwerpunkt der Schaufelfüllung u_1 ergibt sich in erster Näherung aus:

$$4) \quad u_1 = \frac{\pi(D-a)n}{60}$$

Nach BACH (in: MÜLLER, 1939) ist für die radiale Radkranztiefe im Mittel folgendes anzusetzen:

$$5) \quad a = \frac{1}{5} \sqrt[3]{H}$$

Hierbei ist darauf zu achten, dass die Radkranztiefe nicht mehr als unbedingt nötig betragen sollte, da dies insgesamt einen wirkungsgradmindernden Effekt hat. Über diese Beziehungen lässt sich nun auch die Radbreite B bestimmen, die natürlich im Einklang mit den lokalen Gegebenheiten stehen muss.

Drehzahl

Die Drehzahl ist gegeben durch

$$6) \quad n = \frac{60u}{D\pi}$$

und liegt meist deutlich unter 15 Umdrehungen pro Minute. Die Wahl der richtigen Drehzahl ist bei oberflächigen Wasserrädern zusammen mit der Güte der Energiewandlungskette Wasserrad-Generator entscheidend für einen optimalen Betrieb. Dreht sich das Rad zu schnell, werden die Wassertaschen nicht optimal gefüllt und der Wirkungsgrad sinkt. Dreht es sich zu langsam, laufen die Zellen über. (MÜLLER, KAUPPERT, 2003; MÜLLER, 1939]

Schaufelform, Schaufelteilung und Schaufelzahl

Bei der Konstruktion der Schaufeln eines oberflächigen Wasserrades stehen die drei zu erfüllenden Aufgaben im Vordergrund: die Aufnahme, der Transport und die Abgabe des Wassers.

Die Aufnahme sollte möglichst „weich“ sein, damit nur wenig Wasser verspritzt wird und keine Rückstoßeffekte auftreten. Beim Transport sollte das Wasser beruhigt werden, um dann möglichst spät erst wieder abgegeben zu werden (MÜLLER, 1939). Die besten Ergebnisse erzielt man mit gebogenen Schaufeln mit einer Überdeckung der Wasseraufnahmefähigkeit von etwa 25 %.

MÜLLER (1939) gibt eine allgemeine zeichnerische Konstruktion vor, bei der die Schaufel aus einem Halbkreis und einem schwachen Bogen besteht. Der Durchmesser des Halbkreises ist abhängig von der Radkranztiefe:

$$7) \quad d = \frac{11}{20} a$$

Auch hier ist eine Anpassung an die gegebenen Verhältnisse und Anforderungen unerlässlich. Bild 3.6 zeigt beispielhaft die Profile der gebogenen Schaufeln, wobei in grün der Halbkreis und in rot der Bogen angedeutet sind.

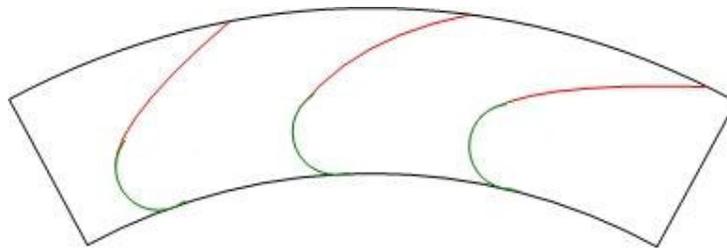


Bild 3.6: Idealisierte Schaufelform für linksgerichteten oberflächigen Betrieb

Exemplarisch wurde zur Berechnung der geometrischen Größen eines oberflächigen Wasserrades eine Berechnungsmatrix mit fiktiven Werten angelegt, welches in Bild 3.7 dargestellt ist.

Dimensionierung eines unterschlächtigen Wasserrades		
Wasserstromverhältnisse		
Volumenstrom	Q = 0,15	[m³/s]
Freifallende Höhe	H = 5,75	[m]
Umfangsgeschwindigkeit	u = 5,31	[m/s]
Füllungsgrad Schaufeln	ε = 0,5	
Gesamtwirkungsgrad	η = 0,8	[%]
Dimensionierung		
<u>Raddurchmesser</u>	D= 5,50	[m]
$D = \left(H - 4 \frac{u^2}{2g} \right)$		
<u>Drehzahl</u>	n= 18,44	[1/min]
$n = \frac{60u}{D\pi}$		
<u>Radkranztiefe (nach Bach)</u>	a= 0,36	[m]
$a = \frac{1}{5} \sqrt[3]{H}$		
<u>Umfangsgeschw. Schwerpunkt</u>	u ₁ = 4,96	[m/s]
$u_1 = \frac{\pi(D - a)n}{60}$		
<u>Radbreite</u>	B= 0,60	[m]
$B = \frac{Q}{\varepsilon a u_1}$		
<u>Anzahl der Radarme</u>	A= 7	
$A = \frac{\pi D}{1,5 + (0,2D)}$		
<u>Maximale Eintauchtiefe UW</u>	T _{uw} = 0,55	[m]
$T_{UW} = 0,1D$		
Theoretische Leistung	8,46	[kW]
Wirkungsgradbereinigte Leistung	6,77	[kW]

Bild 3.7: Exemplarische Berechnung mithilfe eines Excel-Sheets

3.2 Bauwerke im Abwasserbereich zur Integration von Kleinstwasserkraftanlagen

Die Nutzung der zur Verfügung stehenden Wasserenergie setzt Anforderungen an die Kanalstrecke sowie an die hydraulischen Bauwerke voraus.

Neben einem ausreichenden Platzangebot zur Integration der Maschinenteknik sind eine ausreichende Wassermenge sowie eine nutzungswürdige Höhendifferenz zwingende Voraussetzungen für die Integration einer Kleinstwasserkraftanlage in die Abwasserableitung.

Bauwerke, bei denen diese Voraussetzungen vorliegen, sind Absturzbauwerke und in Ausnahmefällen Kläranlagenabläufe. Die verschiedenen zu diesem Zweck potentiell nutzungswürdigen Bauwerke werden im Folgenden vorgestellt.

3.2.1 Bauwerke zur Überwindung von Höhenunterschieden

Die maximal zulässige Fließgeschwindigkeit in der Kanalisation kann, bei entsprechender Wahl des Rohrmaterials, 6 m/s, in Ausnahmefällen auch 8 m/s betragen (HOSANG, BISCHOF, 1998). Leitungsgefälle, die darüber hinausgehende Fließgeschwindigkeiten verursachen würden, sind zu vermeiden. Die Verringerung des Leitungsgefälles wird durch die Anordnung von Bauwerken zur Überwindung von Höhenunterschieden erreicht, in denen das Leitungsgefälle auf das Bauwerk konzentriert und die vorhandene potentielle Energie hauptsächlich in Schall- und Wärmeenergie umgewandelt wird.

Absturzbauwerk mit Untersturz

Das Abwasser wird hier durch eine Falleitung (Untersturz) dem abgehenden Kanal zugeführt. Der Kanaleinlauf wird gerade bis zur Schachtwand weitergeführt, da eine zusätzliche Reinigungsöffnung notwendig ist.

Die Falleitung kann außen oder innen liegend ausgeführt werden, wobei das Absturzbauwerk mit innen liegendem Untersturz bevorzugt wird, da es eine bessere Reinigungsmöglichkeit bietet.

Angewandt werden Absturzbauwerke mit Untersturz bei Kanälen mit Nennweiten von DN 200 bis DN 800. Die minimale Nennweite DN 200 sollte aufgrund von Verstopfungsgefahr nicht unterschritten werden, die maximale Nennweite DN 800 wird aus Gründen der Unfallsicherheit genannt (ATV, 1982).

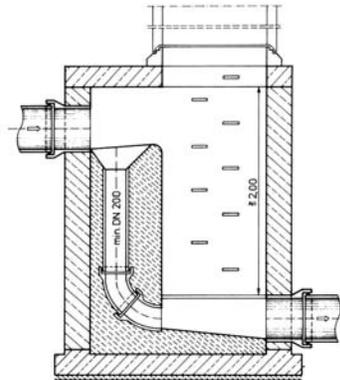


Bild 3.8: Seitenansicht eines Absturzbauwerks mit innen liegendem Untersturz (ATV, 1996)

Absturzbauwerk mit Schussrinne

Ist der Einsatz eines Untersturzes nicht möglich, werden Absturzbauwerke mit Schussrinne angewandt. Die Schussrinne wird so bemessen, dass sich der Wasserstrahl bis zum erhöhten Trockenwetterabfluss ($2 Q_S + Q_F$) nicht ablöst. Erfolgt dies nicht, löst sich der Wasserstrahl bei Q_{max} ab, d.h. die dem Prallstrahl ausgesetzte Schachtwand ist als Prallwand auszuführen. In diesem Fall findet eine Energieumwandlung statt. Wird die Schussrinne jedoch auf Q_{max} bemessen, erreicht man weder eine Energieumwandlung, noch wird die Fließgeschwindigkeit verringert, da der Abwasserstrom ohne Ablösung in der Schussrinne abgeleitet wird.

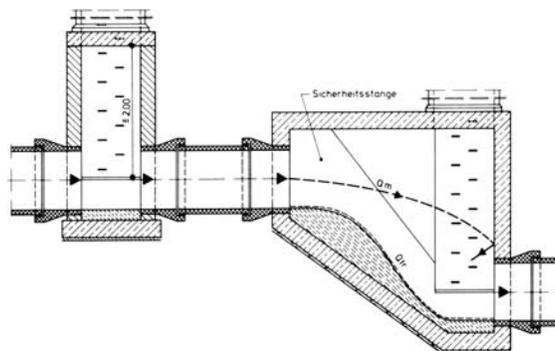


Bild 3.9: Seitenansicht eines Absturzbauwerks mit Schussrinne (ATV, 1996)

Absturzbauwerk mit Kaskaden

Absturzbauwerke mit Kaskaden werden zur Ableitung des zweifachen Trockenwetterabflusses mit Rinne oder mit Unterlauf ausgestattet. Sie kommen bei größeren begehbaren Kanälen mit einer lichten Höhe ab 1,80 m zum Einsatz. Der über $2 Q_t$ hinausgehende Abfluss wird über die Stufen abgeführt, wo dessen Energie durch Reibung auf ein unschädliches Maß umgewandelt wird (ATV, 1995).

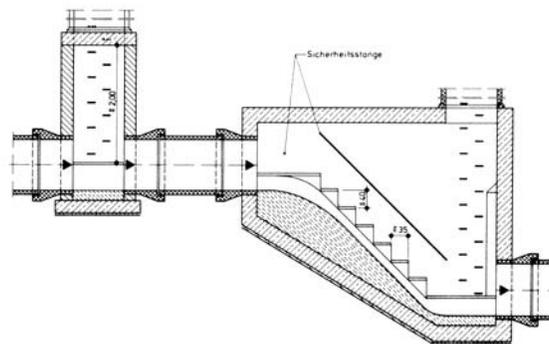


Bild 3.10: Seitenansicht eines Absturzbauwerks mit Kaskaden und Rinne (ATV, 1996)

Fallschacht mit Prallplatte

Anwendungsgebiete des Fallschachtes sind Leitungen, in denen nicht mit ständiger Schmutzwasserführung zu rechnen ist, z.B. Regenwasserkanäle im Trennsystem oder Entlastungskanäle im Mischsystem. Bei kleineren Zuflüssen und geringen Höhenunterschieden sind einfache Fallschächte ausreichend. Liegen dagegen große Zuflüsse oder große Höhenunterschiede vor, ist ein Fallschacht so zu gestalten, dass die vorhandene Energie umgewandelt wird. (ATV, 1996)

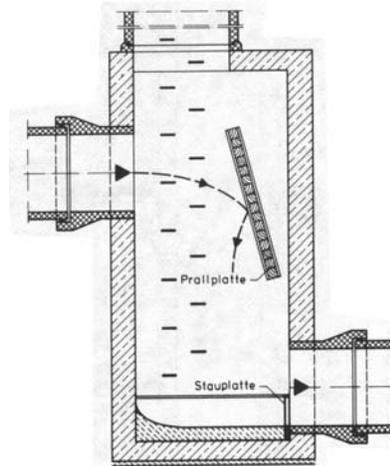


Bild 3.11: Grundriss eines Fallschachts mit Prallplatte (ATV, 1996)

Wirbelfallschacht

Ein Wirbelfallschacht besteht aus einer Drallkammer mit anschließendem kreisförmigem Fallschacht und einem Auslaufbauwerk, das in der Regel als Toskammer ausgebildet wird. Die Form der Drallkammer ist von der im Zufluss vorliegenden Fließart abhängig. Grundsätzlich ist die Drallkammer spiralförmig ausgebildet, um so eine Drehbewegung des Wassers zu erzielen. Durch diese spiralförmige Fließbewegung des Wassers entlang des Fallschachtes wird erreicht, dass in der vertikalen Achse des Fallschachtes ein Luftkern entsteht, der einen durchgehenden Luftstrom vom Schacht in den Unterwasserstollen zulässt.

Der Wirbelfallschacht bietet einige Vorteile gegenüber den anderen Schachtbauwerken. Er wird vor allem dann angewandt, wenn große Höhendifferenzen bei geringem Raumangebot überwunden werden müssen. Ein anderer Vorteil ist die geringe Geräusentwicklung. Fehlende Querschnittsverengungen und eine entsprechende Ausbildung des Auslaufbauwerkes ermöglichen zudem eine problemlose Ableitung der im Abwasser enthaltenen Schwimmstoffe und Sedimente. Schwierigkeiten ergeben sich erfahrungsgemäß bei der Gestaltung des Auslaufbauwerkes. Hier werden keine allgemeingültigen Vorgaben gemacht. Es ist dafür zu sorgen, dass das Abwasser von der Fallbewegung in eine horizontale Fließrichtung umgeleitet wird, ohne dass am Schachtfuß größere Ablagerungen entstehen. Vollständig sind diese Ablagerungen jedoch nicht zu vermeiden, da zur Erzeugung eines Wasserpolsters, das die Sohle des Auslaufbauwerkes schützen soll, meist eine Querschwelle oder Ähnliches angebracht wird. (ATV, 1996)

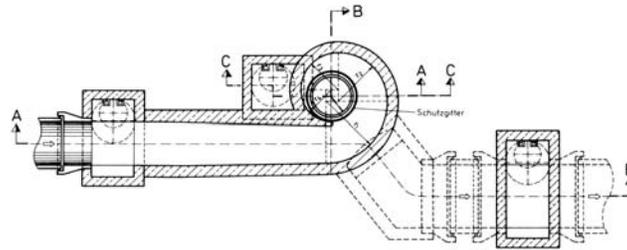


Bild 3.12: Grundriss eines Wirbelfallschacht (ATV, 1996)

Steilstrecken

Steilstrecken sind Leitungsabschnitte mit Fließgeschwindigkeiten größer als 10 m/s. Durch die hohe Fließgeschwindigkeit und das größere Gefälle von Steilstrecken sind unerwünschte hydraulische und mechanische Erscheinungen wie Abrieb, Schwallwellen und Unterdruck möglich und müssen bei der Gestaltung der Steilstrecke sowie der Übergangsbauwerke berücksichtigt werden. So ist zum Beispiel der Schacht am Einlauf der Steilstrecke zur Vermeidung eines Rückstaus im ankommenden Kanal als Absturzbauwerk mit Schussrinne (Schwanenhals) zu gestalten. Eine andere Möglichkeit ist die Ausbildung der ersten Haltung der Steilstrecke als Übergangsstrecke.

Innerhalb der Steilstrecke werden Schächte mit einer geschlossenen Rohrdurchführung angeordnet. Das Übergangsbauwerk am Ende der Steilstrecke ist so zu gestalten, dass der Drosselabfluss schnell abgeleitet werden kann und die Energieumwandlung bei einem den Drosselabfluss überschreitenden Abfluss gewährleistet ist (ATV, 1996).

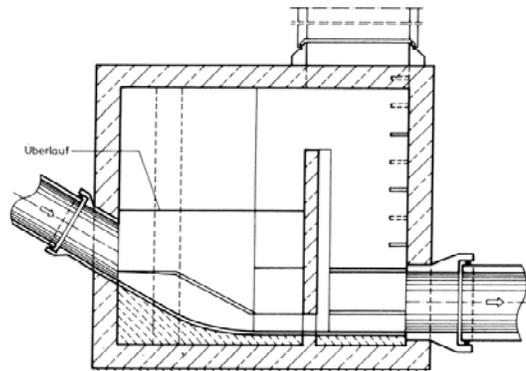


Bild 3.13 Mögliche Gefällennutzung (ATV, 1996)

3.2.2 Kläranlagenabläufe

Fasst man alle Wasserabläufe aus Kläranlagen zusammen, so ergibt sich theoretisch ein beträchtliches Potential zur Nutzung der Strömungsenergie. Jedoch ist zu beachten, dass Kläranlagenabläufe meist einen geringen Höhenunterschied zum Gewässer aufweisen und somit die wirtschaftliche Nutzungsmöglichkeit deutlich eingeschränkt ist oder gar nicht besteht.

3.3 Wasserkraftnutzung in der Abwasserableitung

Das Abwasser in der Abwasserableitung besitzt drei Energieformen – die kinetische, die potentielle sowie die thermische Energie. Da die Nutzung der thermischen Energie nicht Gegenstand der Untersuchung war und die kinetische Energie des Abwassers innerhalb der Abwasserableitung aufgrund des geringen Gefälles eine zu vernachlässigende Rolle spielt, werden sich die nachfolgenden Ausführungen ausschließlich auf die Nutzung der potentiellen Energieform des Abwassers beziehen.

3.3.1 Machbarkeitsüberlegungen

Für die Realisierung einer (Kleinst)Wasserkraftanlage sind im Vorfeld Grundlagen zur Machbarkeit zu erheben und eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit durchzuführen.

Eine Beurteilung der Machbarkeit erfolgt aufgrund des verfügbaren Energiepotentials sowie der baulichen Erschließungsmöglichkeiten.

Für die Ermittlung des Energiepotentials sind örtliche Gegebenheiten wie die Wassermenge und die nutzbare Absturzhöhe zu erfassen, um die Dimensionierung der Anlage sowie die Bestimmung der unterschiedlichen Anlagenteile vornehmen zu können.

Um die zur Verfügung stehende Wassermenge zu erfassen, wird üblicherweise im Wasserkraftanlagenbau durch die Einzelwerte eine Abflussganglinie gebildet. Durch Aufsummieren der Ganglinie wird die Abflussdauerkurve gebildet. Die Flächen unter den Kurven sind gleich groß und entsprechen den abgeflossenen Wasservolumina im Beobachtungszeitraum. Bild 3.14 und Bild 3.15 zeigen beispielhaft den qualitativen Verlauf beider Kurven.

In der Praxis werden Daten von einer täglichen Messung über mindestens ein Jahr für die Bildung der Abflussganglinie herangezogen (VON KÖNIG, JEHLE, 1997). Alternativ geht die Ausbauwassermenge für Projekte innerhalb der Abwasserableitung aus dem Generalentwässerungsplan (GEP) hervor.

Die innerhalb der Abwasserableitung zur Verfügung stehende Wassermenge für den relevanten Trockenwetterfall lässt sich rechnerisch unter Berücksichtigung der täglichen Schwankungen aus den Einleitungen der Einwohner, der Industrie- und Gewerbebetriebe sowie dem Fremdwasseranfall in einer Abflussganglinie abbilden.

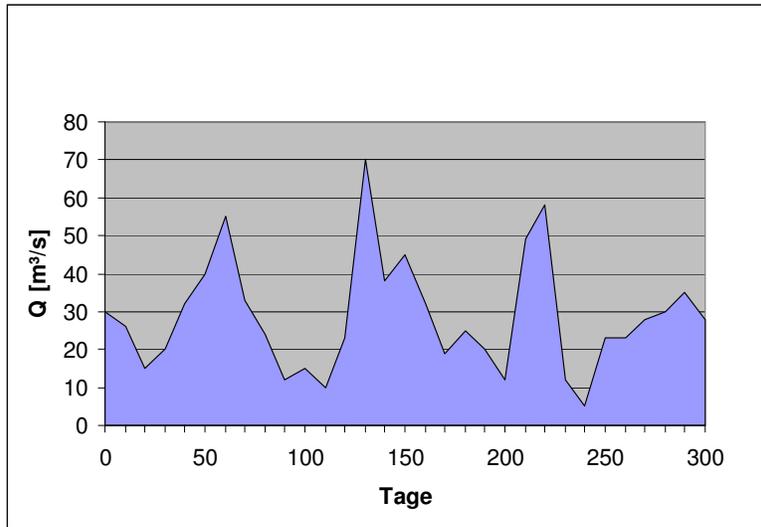


Bild 3.14: Abflussganglinie

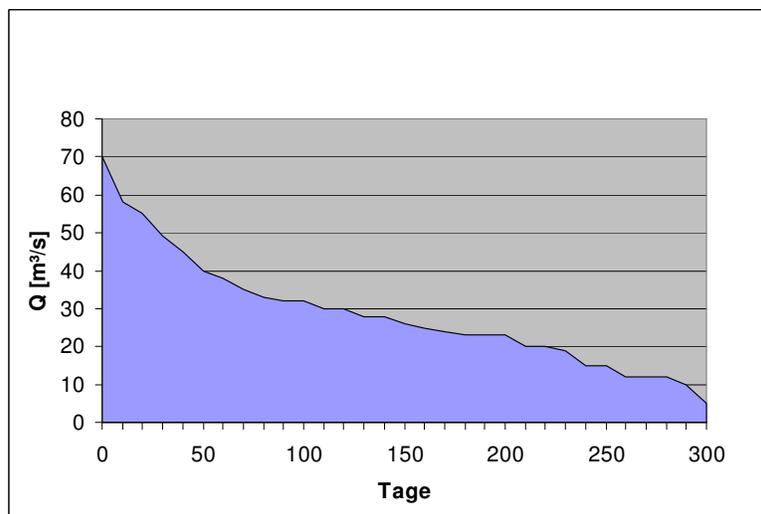


Bild 3.15: Abflussdauerkurve

Um aus der nun bekannten zur Verfügung stehenden Wassermenge die Auslegung der Wasserkraftanlage vornehmen zu können, ist die Betriebsart festzulegen. Ein Wasserrad oder eine andere Kleinstwasserkraftanlage kann grundsätzlich im Insel- oder Parallelbetrieb gefahren werden.

Im Parallelbetrieb fließt der produzierte Strom direkt in das öffentliche Netz. Bei einem Inselbetrieb dient der produzierte Strom der Versorgung einer nicht an das öffentliche Netz angeschlossenen Einheit.

Im Allgemeinen werden für den Parallelbetrieb Asynchrongeneratoren und für den Inselbetrieb Synchrongeneratoren empfohlen (PACER, 1993).

Werden bei Asynchrongeneratoren Spannung und Frequenz vom öffentlichen Netz vorgegeben, geschieht dies im Inselbetrieb durch die Kleinstwasserkraftanlage selbst.

Im Inselbetrieb soll das Rad über einen möglichst langen Zeitraum Strom produzieren, so dass durch die Wahl der Betriebs- oder Ausbauwassermenge der Zeitraum der Verfügbarkeit hoch ist und die Wassermenge deutlich unterhalb des maximalen Abflusses liegt. Im Parallelbetrieb steht die maximierte Stromproduktion im Mittelpunkt, hier ist die Wassermenge hoch und die Verfügbarkeit niedriger.

Für den Inselbetrieb liegt die Ausbauwassermenge im Allgemeinen bei etwa 250 Tagen, für den Parallelbetrieb im Allgemeinen zwischen 50 und 90 Tagen. Diese Werte repräsentieren Erfahrungswerte aus dem Wasserkraftanlagenbau und können vom Planer nach eingehender Prüfung der Messwerte eines Wasserstromes angepasst werden (VON KÖNIG, JEHLE, 1997).

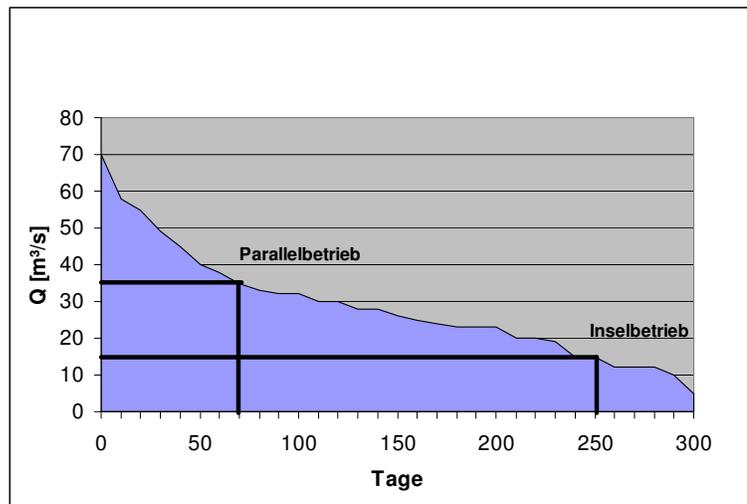


Bild 3.16: Ableitung der Ausbauwassermengen unter Anwendung der Abflussdauerkurve für den Parallel- und Inselbetrieb

3.3.2 Nutzbarkeit der Wasserkraft in Nordrhein-Westfalen

Neben einem „natürlichen“ Wasserkraftpotential besteht vielerorts auch ein als „künstlich“ zu bezeichnendes Wasserkraftpotential.

Das durch Wasserräder nutzbare (Ab)Wasserkraftpotential innerhalb der Abwasserableitung beschränkt sich auf Absturzbauwerke und Fallschächte, die eine Fallhöhe von mindestens 2 m und einen minimalen Trockenwetterabfluss von 80 l/s aufweisen. Die Anzahl der Bauwerke in NRW, die diese Bedingungen erfüllen, wurde anhand vorliegender Daten abgeschätzt.

Dazu wurde, bezogen auf die Einwohnerzahl, eine Extrapolation durchgeführt (siehe Tabelle 3.2) und das Gebiet Nordrhein-Westfalens gemäß Bild 3.8 in zwei etwa gleich große Einheiten gegliedert.

Die nordwestliche Hälfte, in Bild 3.8 als Gebiet 1 gekennzeichnet, ist als Flachland einzustufen (< 200 m ü. NN). Gebiet 2 ist Hügelland (200 bis 800 m ü. NN).

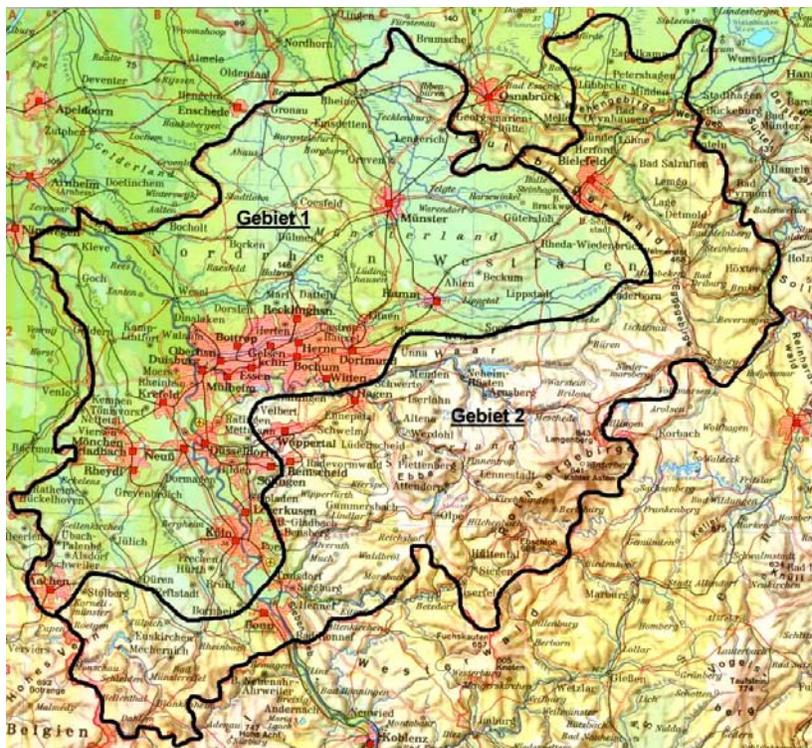


Bild 3.17: Topographische Karte von Nordrhein Westfalen

Aus dieser Gliederung ergeben sich folgende Flächen- und Bevölkerungsanteile:

Tabelle 3.2: Flächen- und Bevölkerungsanteile von Gebiet 1 und Gebiet 2

	Regierungsbezirk	Fläche [km ²]	Einwohnerzahl (Stand 30.06.06)
Gebiet 1	Münster	6.900	2.620.592
	Düsseldorf	4.960	4.645.688
	Arnsberg	1.246	1.704.279
	Köln	1.494	986.168
	Detmold	967	368.292
	Summe	15.567	10.325.019
Gebiet 2	Detmold	5.533	1.699.000
	Arnsberg	6.754	2.046.000
	Köln	5.866	3.394.101
	Düsseldorf	340	575.727
	Summe	18.493	7.714.828
	Kontrolle (NRW ges.)	34.060	18.039.847

Abschätzung für Gebiet 1

Fallschächte oder Absturzbauwerke, die die oben genannten Kriterien ($Q_t \geq 80$ l/s; $h \geq 2$ m) erfüllen sind dort zu erwarten, wo einerseits die Topographie die Überwindung von Höhendifferenzen größer als 2 m innerhalb der Kanalisation erforderlich macht und andererseits durch die Bevölkerungsdichte Abwasservolumenströme größer als 80 l/s möglich sind. Die nordwestliche Hälfte Nordrhein-Westfalens ist überwiegend Flachland, d.h. große Fallhöhen sind hier nur in Ausnahmefällen zu erwarten. Beispielsweise sind in Aachen, das topographisch als Flachland gilt, 3 solcher Fallschächte vorhanden. Bei einem geschätzten durchschnittlichen Abwasservolumenstrom von 0,1 m³/s und Fallhöhen zwischen 3 und 7 m entspricht das einem energetischen Potential von ca. 36 bis 120 MW.

In Mönchengladbach wird in 1-2 Jahren ein derartiges Bauwerk fertig gestellt und in Bochum ist keines vorhanden. Bezogen auf die Bevölkerungsanzahl ergibt dieses 4 Fallschächte pro 900.000 Einwohner. Wird berücksichtigt, dass Aachen topographisch nicht als Maßstab für Gebiet 1 herangezogen werden kann, ist eine Annahme von 2 Fallschächten pro 900.000 Einwohner sinnvoll.

Demnach ergäbe sich für Gebiet 1 bei insgesamt ca. 10.325.019 Einwohnern eine Anzahl von ca. 23 Fallschächten, die zur Stromerzeugung mittels Wasserrädern potentiell in Frage kommen. Dies entspricht einem energetischen Potential von ca. 300 bis 1.840 MW für Gebiet 1.

Abschätzung für Gebiet 2

Der südöstliche Teil Nordrhein-Westfalens besteht überwiegend aus Hügelland. Bezüglich der Topografie ist demnach ein großes energetisches Potential zu erwarten. Allerdings ist die Besiedlungsdichte wesentlich geringer und gleichmäßiger verteilt als in Gebiet 1. Dies bedeutet, dass zwar vielerorts große Höhendifferenzen überwunden werden müssen, jedoch geringere Abwasservolumenströme (< 80 l/s) zu erwarten sind.

In Wuppertal sind 101 Fallschächte mit einer Höhendifferenz größer als 2 m vorhanden, deren Trockenwetterabflüsse allerdings nicht bekannt sind. Wird davon ausgegangen, dass ca. 2 % dieser Absturzbauwerke einen Trockenwetterabfluss größer als 80 l/s haben, ergibt sich eine Anzahl von 2 Absturzbauwerken, die zur Stromerzeugung genutzt werden können. In Gummersbach gibt es dagegen kein Absturzbauwerk, das die erforderlichen Kriterien erfüllt.

Bezogen auf die Einwohnerzahl ergibt dies 2 Absturzbauwerke pro 430.000 Einwohner. Daraus resultiert eine Anzahl von 36 möglichen Absturzbauwerken für Gebiet 2.

Aufgrund der geringen Bevölkerungsdichte in Gebiet 2 scheint allerdings eine Korrektur dieser Zahl auf 10-15 Absturzbauwerke sinnvoll, so dass für Gebiet 2 ein energetisches (Ab-)Wasserkraftpotential von ca. 130 bis 1.200 MW angenommen werden kann.

Für Nordrhein-Westfalen ist somit rein theoretisch ein durch Wasserräder nutzbares energetisches Potential von ca. 430 bis 3.040 MW vorhanden.

Im Fall der Kläranlagen ist das verfügbare Wasserkraftpotential vom Bemessungsabfluss sowie vom hydraulischen Gefälle zwischen Kläranlagenablauf und Vorfluter abhängig. Vereinzelt sind Kläranlagenabläufe in Deutschland bereits mit Wasserkraftanlagen ausgerüstet. Zum Einsatz kommen hier Peltonturbinen, Durchströmturbinen, Wasserräder, Wasserkraftschnecken und Tauchpumpenturbinen (GESSLER, 2002).

Insgesamt gibt es in NRW ca. 683 kommunale Abwasserbehandlungsanlagen (Stand 2003/4).

Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die kommunalen nordrhein-westfälischen Kläranlagen, gruppiert in Größenklassen nach EW.

Tabelle 3.3: Verteilung kommunaler Kläranlagen in NRW nach Größenklassen*

Ausbaugröße	Anzahl der Anlagen	EW
> 100 000 EW	69	23.000.000
< 100 000	312	11.555.000
< 10 000	177	956.000
< 2000	124	102.000
Summe	683	35.613.000

* Stand:2005

Eine Abschätzung des Energiepotentials sämtlicher kommunaler Kläranlagen anzustellen ist aktuell nicht darstellbar, denn dazu müssten alle Anlagen hinsichtlich der Möglichkeit einer Wasserkraftnutzung untersucht werden.

Beispielsweise würde sich unter der Annahme einer mittleren Fallhöhe von 1,0 m und eines Gesamtjahresabflusses aller Kläranlagen von ca. 2.967 Mio. m³ (Entwicklung und Stand der Abwasserableitung in Nordrhein-Westfalen, 12. Auflage) rechnerisch eine Leistung von ca. 16.500 TWh/a ergeben.

Dass von diesem Energiepotential nur ein Bruchteil zur Nutzung ansteht, liegt darin begründet, dass bei dieser Abschätzung sämtliche kleine Kläranlagen mit sehr niedrigen Abflüssen eingeschlossen sind und die Anzahl der Kläranlagen, die am Ablauf eine nutzbaren Fallhöhe > 2 Meter aufweisen, gering ist.

3.4 Praxisbeispiele

Vereinzelt wurden bereits Projekte zur Nutzung des energetischen Potentials aus Abwasser innerhalb der Abwasserableitung realisiert. Dabei wurde der Einsatz von Wasserkraftanlagen bisher selten in Betracht gezogen. Diesbezüglich hat die Schweiz innerhalb Europas eine Vorreiterrolle eingenommen. Zweifellos liegt der Grund dafür in den topographischen Gegebenheiten der Schweiz, die große Höhenunterschiede bietet.

Allerdings wird die Nutzung der (Ab-)Wasserkraft in der Schweiz zusätzlich durch ein Förderprogramm (Energie 2000) des Bundesamtes für Energiewirtschaft gezielt gefördert.

Einige in Deutschland bereits umgesetzten Kleinstwasserkraftanlagen innerhalb der Abwasserableitung werden im Folgenden erläutert.

Im Auslauf der Kläranlage Karlsruhe wird ein unterschlächtiges Wasserrad betrieben. Die Lagehöhendifferenz beläuft sich auf 1,0 Meter, der mittlere Volumenstrom auf 1,4 m³/s. Abzüglich der Verluste ist ein Potential von ca. 9 kW vorhanden. Bei Projektkosten von 110.000 € ist laut Planungsbüro eine Amortisation der Anlage nach ca. 15 Jahren zu erwarten. Bild 3.18 zeigt das unterschlächtige Wasserrad am Kläranlagenauslauf der Kläranlage Karlsruhe. (IFMW, o.J.)

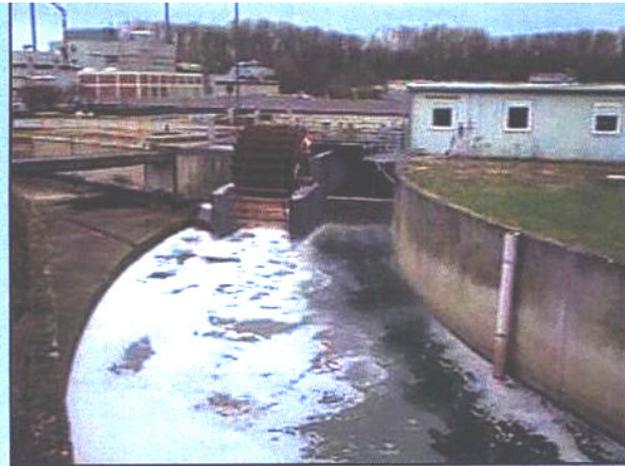


Bild 3.18: Unterschlächtiges Wasserrad im Auslauf der Kläranlage Karlsruhe

Weitere Wasserräder sind in den Abläufen der Kläranlagen Warendorf und Biggetal in Betrieb.

Im Auslauf der Kläranlage Rottenburg/Neckar (Bild 3.19) versieht seit geraumer Zeit eine Wasserkraftschnecke ihren Dienst (HAFNER).



Bild 3.19: Schnecke in Rottenburg/Neckar (RITZ ATRO GMBH)

Die Abwasserwerke der niederrheinischen Stadt Emmerich betreiben seit Juni 2000 an ihrem Kläranlagenauslauf eine Durchströmturbine (Bild 3.20) mit einer Leistung von 13 kW. Die Fallhöhe zum Vorfluter beträgt zwischen 3,60 und 3,80 Meter, der mittlere Volumenstrom 400 Liter pro Sekunde (HAFNER).



Bild 3.20: Durchströmturbine mit Generator

4 Wasserrechtliche, förderpolitische und sicherheitstechnische Randbedingungen

4.1 Wasserrechtliche Rahmenbedingungen

Da es im vorliegenden Fall nicht um die Nutzung von natürlichen Gewässern zur Erzeugung elektrischer Energie geht, sondern Abwasser als Energiequelle eingesetzt wird, werden die Ausführungen zu den rechtlichen Rahmenbedingungen für den Bau, Betrieb und die Genehmigung von Wasserkraftanlagen auf den Bereich der Abwasserableitung bzw. der Siedlungsentwässerung beschränkt.

Sind bei der rechtlichen Beurteilung von Wasserkraftanlagen die natürlichen Gewässer die Energiequelle zur Energieerzeugung, so sind drei Rechtsebenen zu beachten: europa-, bundes- und landesrechtliche Vorschriften. Vor der Realisierung einer Maßnahme sind bau- und wasserrechtliche Genehmigungen einzuholen. Im Fall der Erzeugung regenerativer Energie in der Abwasserableitung besteht jedoch eine Situation, für die es bisher keinen speziellen Regelungsbedarf gab. Entsprechend gering ist die vorhandene Regelungstiefe und -dichte, so dass für die Nutzung von Abwasser zur Erzeugung von regenerativem Strom lediglich allgemeine Anforderungen an die Abwasserableitung zu beachten sind, die in Bundes- und Landesrecht unterteilt sind.

Gemäß Wasserhaushaltsgesetz (WHG, 2002) umfasst die Abwasserbeseitigung das Sammeln, Fortleiten, Behandeln, Einleiten, Versickern, Verregnen und Verrieseln von Abwasser sowie das Entwässern von Klärschlamm. Hierbei ist sicherzustellen, dass das Abwasser so beseitigt wird, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird (§ 18a (1) WHG).

Mit Blick auf den Bau und Betrieb von Abwasseranlagen (§ 18b WHG) gelten für die Errichtung und den Betrieb von Abwasseranlagen die allgemein anerkannten Regeln der Technik.

Entsprechende Forderungen werden über die Landeswassergesetze auf die Kommunen bzw. Gemeinden übertragen. Hier greift der § 53 (1) LWG NRW (LWG NRW, 2005) die Pflicht zur Abwasserbeseitigung in Verbindung zu § 18a WHG auf: „...die Gemeinden haben das auf ihrem Gebiet anfallende Abwasser so zu beseitigen und die dazu notwendigen Anlagen so zu betreiben...“, dass:

- a. eine Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit, insbesondere eine Gewässerverunreinigung, vermieden oder verringert oder
- b. die Abwasserbeseitigung insgesamt wirtschaftlicher gestaltet werden kann.

In Ergänzung dazu wird in § 57 des LWG NRW auf den Bau und Betrieb von Abwasseranlagen eingegangen. Entsprechend heißt es hier:

„(1) Die gemäß § 18b Abs. 1 des Wasserhaushaltsgesetzes für die Errichtung und den Betrieb von Abwasseranlagen jeweils in Betracht kommenden Regeln der Technik sind insbesondere die technischen Bestimmungen für den Bau, den Betrieb und die Unterhaltung von Abwasseranlagen, die vom Ministerium durch Bekanntgabe im Ministerialblatt eingeführt werden.“

Der Neubau und die wesentliche Veränderung einer Abwasseranlage (also auch der Kanalisation und ihrer Bauwerke) bedürfen nach § 58 LWG NRW ebenso wie deren Betrieb einer Genehmigung. Da Anlagen zur Nutzung von Abwasserenergie vorrangig in Sonderbauwerken untergebracht werden, müssen die jeweiligen Genehmigungsbehörden ihre Zustimmung erteilen. Jedoch könnte es hier zu Ausnahmeregelungen kommen, da nach § 58 Abs. 2 S. 1 die Genehmigungspflicht bei Anlagen entfällt, die „nicht zu erwartende negative Auswirkungen auf die Abwasserableitung“ haben.

Für die Umsetzung und zum Vollzug sind die Ortssatzungen zur Entwässerung sowie die einschlägigen technischen Arbeitsblätter, Hinweise und Merkblätter der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) sowie entsprechende DIN-Normen des Abwasserwesens zu beachten.

Eine wichtige Arbeitsgrundlage sind die Arbeitsblätter der ATV-DVWK A 157 zu „Bauwerken in der Kanalisation“ (ATV.DVWK, 2000) sowie A 241 zu „Bauwerken der Entwässerungsanlagen“ (ATV-DVWK, 1996).

In Ergänzung sind die publizierten normativen Vorgaben DIN EN 752-2 - DIN EN 752-3 des Deutschen Instituts für Normung e. V. zu beachten. Die dort formulierten Anforderungen an Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden gelten für das gesamte Entwässerungssystem einschließlich der Regenentlastungsbauwerke und der Pumpenanlagen (DIN EN 752-2).

Die grundsätzlichen Anforderungen an den Betrieb von Entwässerungssystemen sind demnach folgende:

- Verstopfungsfreier Betrieb
- Begrenzung der Überflutungshäufigkeit
- Schutz von Gesundheit und Leben des Betriebspersonals
- Schutz der Vorfluter vor Verschmutzungen im Rahmen festgelegter Grenzen

- Ausschluss der Gefährdung angrenzender Bauten und Ver- und Entsorgungseinrichtungen durch Abwasserkanäle und Leitungen
- Erreichung der geforderten Nutzungsdauer und des Erhalts des baulichen Bestandes
- Wasserdichtheit der Abwasserkanäle und Leitungen
- Vermeidung von Geruchsbelästigung und Toxizität

Diese Anforderungen stehen im Allgemeinen nicht im Widerspruch zu einer energetischen Nutzung des Abwassers.

4.2 Förderpolitische Rahmenbedingungen

Mit der Verabschiedung der Richtlinie zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt (Richtlinie 2001/77/EG, 2001) hat der Rat der Europäischen Union für alle Mitgliedsstaaten Richtziele für den Anteil der erneuerbaren Energien am Stromverbrauch festgelegt. Für Deutschland besteht das Richtziel, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Gesamtstromproduktion bis zum Jahr 2010 auf 12,5 % zu steigern. Mit dem Übertrag der Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien in deutsches Recht durch die Veröffentlichung im Bundesanzeiger sowie der Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich (EEG, 2004) wurden Grundlagen zur Erreichung des vorgegebenen Zieles geschaffen.

Für Strom aus Wasserkraftanlagen mit einer Leistung bis einschließlich 5 Megawatt beträgt die Vergütung nach EEG:

- bis einschließlich einer Leistung von 500 Kilowatt mindestens 9,67 Cent pro Kilowattstunde und
- bis einschließlich einer Leistung von 5 Megawatt mindestens 6,65 Cent pro Kilowattstunde (§ 6 Abs. 1 EEG).

Im EEG wird nicht ausdrücklich auf eine Energieerzeugung von Abwasser eingegangen, so dass hier davon ausgegangen wird, dass Strom aus Abwasserkraftanlagen wie Strom aus Wasserkraftanlagen vergütet wird.

Die Vergütung für Strom aus kleinen Wasserkraftanlagen wurde verbessert und im Gegenzug mit zusätzlichen Naturschutzverpflichtungen belegt. Ab 2008 erhalten kleine Neuanlagen mit einer Leistung bis 500 Kilowatt eine EEG-Vergütung nur noch dann, wenn sie

- im räumlichen Zusammenhang mit einer ganz oder teilweise bereits bestehenden oder vorrangig zu anderen Zwecken als der Erzeugung von Strom aus Wasserkraft neu errichteten Staustufe oder Wehranlage oder
- ohne durchgehende Querverbauung

errichtet worden sind und dadurch nachweislich ein guter ökologischer Zustand erreicht oder der ökologische Zustand gegenüber dem vorherigen Zustand wesentlich verbessert worden ist (§ 6 Abs. 1 EEG).

Für Strom aus Wasserkraftanlagen mit einer Leistung ab 5 Megawatt bis einschließlich 150 Megawatt erfolgt ausschließlich die Vergütung der Leistungserhöhung bzw. die Leistungserhöhung, die der Erneuerung zuzurechnen ist.

Auch hier ist die Vergütung wie bei kleinen und mittleren Wasserkraftwerken an die Erfüllung bestimmter Vorgaben geknüpft.

Strom aus großen Wasserkraftanlagen wird nur vergütet, wenn die Anlage zwischen dem Tag des Inkrafttretens des Gesetzes und dem 31. Dezember 2012 erneuert worden ist, die Erneuerung zu einer Erhöhung des elektrischen Arbeitsvermögens um mindestens 15 Prozent geführt hat sowie nach der Erneuerung nachweislich ein guter ökologischer Zustand erreicht oder der ökologische Zustand gegenüber dem vorherigen Zustand wesentlich verbessert worden ist. Tabelle 4.1 fasst die Vergütung nach den Vorgaben des EEG für alle Wasserkraftanlagen zusammen.

Tabelle 4.1: Vergütungssätze nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Anlagenleistung	Vergütungsregeln	Vergütungshöhe (€/kWh)	Leistungsbereich	Laufzeit (Jahre)	Degression ¹	Bemerkungen
Bis 5 MW	§ 6 Absatz 1	9,67 6,65	≤ 500 kW ≤ 5 MW	30	-	ab 2008 bestimmte Standortbeschränkungen
Ab 5 MW bis 150 MW	§ 6 Absatz 2	7,67 6,65 6,10 4,56 3,70	≤ 500 kW ≤ 10 MW ≤ 20 MW ≤ 50 MW ≤ 150 MW	15	1 %	nur bei Erneuerungen und nur Vergütung der Leistungserhöhung

Neben der Vergütung der Leistung erfolgt eine Förderung von kleinen Anlagen zur Wasserkraftnutzung durch das in der Richtlinie zur Förderung von erneuerbaren Energien verankerte Marktanzreizprogramm durch die KfW.

Förderfähig sind die Erweiterung und Reaktivierung von Wasserkraftanlagen sowie deren Sanierung zur ökologischen Verbesserung bis zu einer installierten elektrischen Nennleistung von 500 kW (Bundesanzeiger Nr. 234).

In Nordrhein-Westfalen werden Wasserkraftanlagen auch durch das Breitenförderprogramm REN (Rationelle Energieverwendung und Nutzung unerschöpflicher Energiequellen, 2006) gefördert. Ausgehend von der vorher gültigen Richtlinie werden bei Investitionskosten von nicht mehr als 500.000 € für Wasserkraftanlagen bis einschließlich 1.000 kW 25 % der Investitionskosten als Zuschuss gewährt. Antragsteller können natürliche oder juristische Personen oder kleine und mittlere Unternehmen nach Definition der EU sein. Auch hier wird eine Gleichbehandlung von Abwasser- und Wasserkraftanlagen vorausgesetzt.

4.3 Sicherheitstechnische Rahmenbedingungen

Wenn es um die Betriebssicherheit von Kleinstwasserkraftanlagen im Bereich der Abwasserableitung geht, sind Faktoren wie Explosionsschutz und Korrosionsschutz wesentliche Elemente, die bei der Bauausführung zu beachten sind. Gerade die in der Kanalisation auftretenden Abwasserinhaltsstoffe sind Ursache umfassender Schäden. Gegenmaßnahmen, die den Bestand der Bauwerke und der dort installierten Anlagen sichern, sind für einen wirtschaftlichen Betrieb notwendig.

4.3.1 Korrosion im Stahlwasserbau

Mit Korrosion bezeichnet man nach DIN 50900 Teil 1 (MILLER, DÜCKER, 2002) die „Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines metallischen Bauteils oder eines ganzen Systems führen kann“.

Korrosionsvorgänge beruhen auf Phasengrenzflächenreaktionen zwischen Metalloberflächen und festen, flüssigen oder gasförmigen Medien. Es formen sich anodische und kathodische Bereiche auf der Metalloberfläche aus, die mit einem vorhandenen Elektrolyten (Wasser, Abwasser) ein galvanisches Element bilden.

Nur in den anodischen Bereichen kommt es zu einem Materialabtrag, denn dort reagieren die Eisenatome mit dem Sauerstoff des Elektrolyten. Die Elektronen wandern zur Kathode ab und schwächen das Material. Bild 4.1 zeigt schematisch die Abläufe einer Korrosionsreaktion an einem Eisenmetall. (MILLER, DÜCKER, 2002)

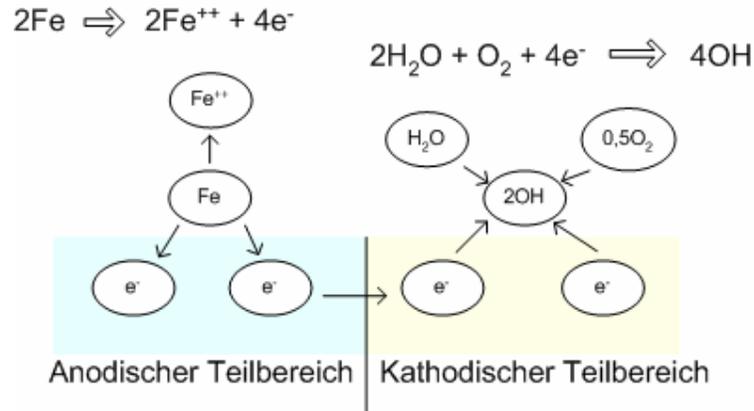


Bild 4.1: Korrosionsreaktion an einem Eisenmetall

Zur Vermeidung von Korrosion lassen sich passive und aktive Maßnahmen formulieren.

Passiver Korrosionsschutz

Zum Schutz vor Korrosion können Schutzschichten über die zu schützenden Metalloberflächen gelegt werden. Metallische Schutzschichten können edler oder unedler als der Grundwerkstoff sein. Weitere Schutzschichten stellen Lacke, Email oder Zement dar. Die Schutzschichten isolieren den Grundwerkstoff vom Elektrolyten und verhindern dadurch korrosive Reaktionen.

Das Verzinken ist eine übliche passive Methode zum Schutz von Stahl vor Korrosion. Sowohl im Automobilbau (Karosserie) als auch im Brücken- und Hochbau werden Bauteile verzinkt. Wird die Zinkschicht beschädigt, entsteht mit dem darunter befindlichen Stahl und einem Elektrolyten ein galvanisches Element. Die freigelegte Stahlfläche wird zur Kathode, die schützende Zinkschicht wird wie bei einer Opferanode abgetragen. Der passive Schutz wird also bei Vorhandensein einer kleinen Beschädigung kontinuierlich zerstört. (BEITZ, KÜTTNER, 1987)

Eine weitere Möglichkeit, Metalle passiv vor Korrosion zu schützen, gelingt mittels einer Opferanode. Zum Schutz eines Metalls mittels einer Opferanode kann nur ein Metall mit einem geringeren Normalpotential als das zu schützende Metall verwendet werden.

Tabelle 4.2: Elektrochemische Spannungsreihe (Auszug) (RIEDEL, 1982)

Metall	Ion	Normalpotential E° [V]
Mg	Mg^{2+}	-2,38
Al	Al^{3+}	-1,68
Mn	Mn^{2+}	-1,19
Zn	Zn^{2+}	-0,76
Fe	Fe^{2+}	-0,41
Ni	Ni^{2+}	-0,23
H ₂	$2H^+$	0,00
Cu	Cu^{2+}	+0,34

Aktiver Korrosionsschutz

An Bauwerken, die nicht mit einer passiven Schutzschicht ausgerüstet werden können, wird das gesamte Bauteil zu einer einheitlichen Kathode umfunktioniert. Dies geschieht entweder über den Einsatz so genannter Opferanoden in einer galvanischen Schutzzelle oder über das Einleiten von Fremdstrom.

Bei der galvanischen Schutzzelle wird ein Metall mit einer größeren Korrosionstriebkraft als das zu schützende Bauteil mit diesem verbunden. Das Metall löst sich unter Elektronenabgabe auf und verhindert, dass das zu schützende Bauteil korrodiert. (MILLER, DÜCKER, 2002)

**Bild 4.2: Galvanische Opferanode (MILLER, DÜCKER, 2002)**

Beim Korrosionsschutz mit Fremdstrom werden über das Einleiten von Strom in eine vom Bauwerk isolierte Anode Elektronen freigesetzt. Diese werden über ein Stromkabel in das Bauwerk eingeleitet. Das Bauwerk wird so zur Kathode gemacht.

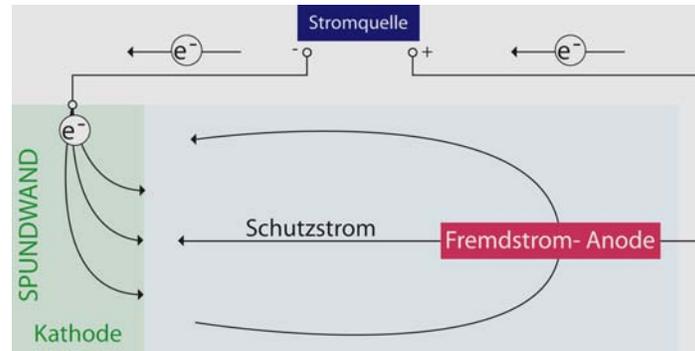


Bild 4.3: Prinzip der Fremdstrom-Schutzanlage (MILLER, DÜCKER, 2002)

4.3.2 Allgemeine Betriebssicherheit

Nach der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) sind Bereiche, in denen explosionsfähige Atmosphären auftreten können, spezifisch zu kennzeichnen.



Warnzeichen W 21

Explosionsfähige Atmosphäre



Verbotsschild P 02

Feuer, offenes Licht und Rauchen verboten

Bild 4.4: Kennzeichnung von Bereichen mit explosionsfähigen Atmosphären (BetrSichV, 2002)

Von dieser Regelung sind im Bereich der Abwasserbehandlung und Abwasserableitung insbesondere Kläranlagen, Pumpwerke, Absturzbauwerke usw. als Betriebsstätten betroffen.

Für die genannten Bereiche ist ein Explosionsschutzdokument mit Angaben zu den dort installierten elektrischen Geräten notwendig. Die in den ausgewiesenen Ex-Schutzbereichen eingesetzten Geräte müssen eine Zulassung für diese Bereiche besitzen. Zusätzlich sind Ex-Zonenpläne, welche organisatorische und technische Schutzmaßnahmen (Betriebsanweisungen) enthalten, zu erstellen. Im Vorfeld sind hierzu eine Beurteilung des Gefährdungspotentials und die daraus resultierende Deklaration von Ex-Zonen gefordert.

5 Pilotprojekt Aachen

5.1 Planungs-, Bau- und Installationsphase

Neben den innerhalb der wissenschaftlichen Begleitung durchzuführenden Aufgaben sind bereits in der Planungs- und Bauphase des Pilotprojektes umfassende Leistungen erbracht worden, die nachfolgend kurz dargestellt werden.

Adaptive Planung der Schachtkonstruktion

Die vorhandene Planung für das Schachtbauwerk musste an die veränderten Bedingungen für den Einsatz eines Wasserrades angepasst werden. Es wurden verschiedene Varianten erarbeitet, um eine optimale Einbindung des Wasserrades in das Absturzbauwerk zu finden.

Planung der Zu- und Ablaufkonstruktion

Bei der Planung der Zu- und Ablaufkonstruktion des Wasserrads galt es, verschiedene Randbedingungen zu beachten:

- Eine optimale Anströmung des Wasserrades muss gewährleistet sein.
- Eine optimale Abströmung des Abwassers ohne Ablagerung von Feststoffen muss erreicht werden.
- Eine Behinderung des ursprünglich genehmigten Abwasserweges ist nicht erlaubt.

Koordination des Wasserradprojektes

Zur Entlastung aller Projektteilnehmer und zur Gewährleistung eines reibungslosen Ablaufs fielen in der Bauphase umfangreiche Koordinationsaufgaben an. Gerade im Hinblick auf eine spätere wissenschaftliche Begleitung des Pilotprojektes während der Betriebsphase war eine intensive Mitarbeit der RWTH unabdingbar.

5.1.1 Beschreibung der Baustelle

In den Tiefsammler Süd-Ost in Aachen wurden zur Überwindung der Höhendifferenzen im Rahmen der Gesamtmaßnahme zwei Absturzbauwerke integriert.

Das für dieses Projekt gewählte Absturzbauwerk für den Einbau eines Wasserrades liegt am Hohenzollernplatz in Aachen.

Der Hohenzollernplatz selbst ist eine stark befahrene Kreuzung mit Ampelanlage. Die kreuzenden Straßen besitzen je zwei Fahrspuren pro Richtung; teilweise existieren in Kreuzungsnähe zusätzlich Busspuren. Die genaue Lage der Baugrube ist in Bild 5.1 zu erkennen.

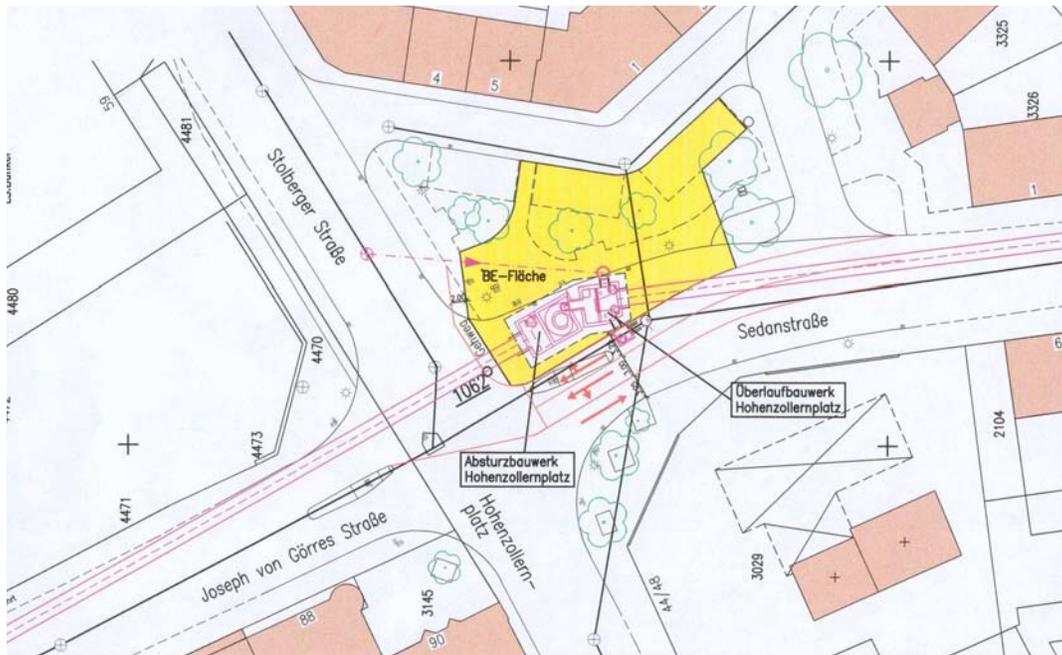


Bild 5.1: Lageplan des Absturzbauwerkes Hohenzollernplatz in Aachen

In dem Wirbelfallschacht muss eine Fließsohlendifferenz von ca. 12,50 m überbrückt werden. Das Bauwerk wurde für einen Maximalabfluss von 8.250 l/s ausgelegt. Die Trockenwetterabflüsse schwanken gemäß dem GEP der Stadt Aachen zwischen ca. 30 l/s (Nachtminimum) und ca. 150 l/s (Tagesmaximum).

5.1.2 Planerische Ausgangsvariante des Absturzbauwerkes

In der ursprünglichen Planung ohne Wasserrad war hinter dem Wirbelfallschacht innerhalb der Baugrube Raum vorhanden, der lediglich der Aufnahme des Be- und Entlüftungsschachtes für die Toskammer dienen sollte. Nach der Fertigstellung des Absturzbauwerkes war vorgesehen, diesen Freiraum mit Kies zu füllen.

Die ursprünglich geplante Baumaßnahme wies verschiedene Eigenschaften und Randbedingungen auf, die sie besonders für ein solches Demonstrationsvorhaben prädestiniert hat:

- Hinter dem Wirbelfallschacht (in Fließrichtung gesehen) war ausreichend Platz für ein oder mehrere Wasserräder vorhanden.
- Der Trockenwetterabfluss ist mit maximal 150 l/s ausreichend groß, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen.
- Die Fallhöhe beträgt ca. 12,5 m.

- Der vorgeschaltete Stauraumkanal kann als Energiespeicher dienen.
- Durch die bereits bestehende Baugrube werden erhebliche Kosten eingespart.

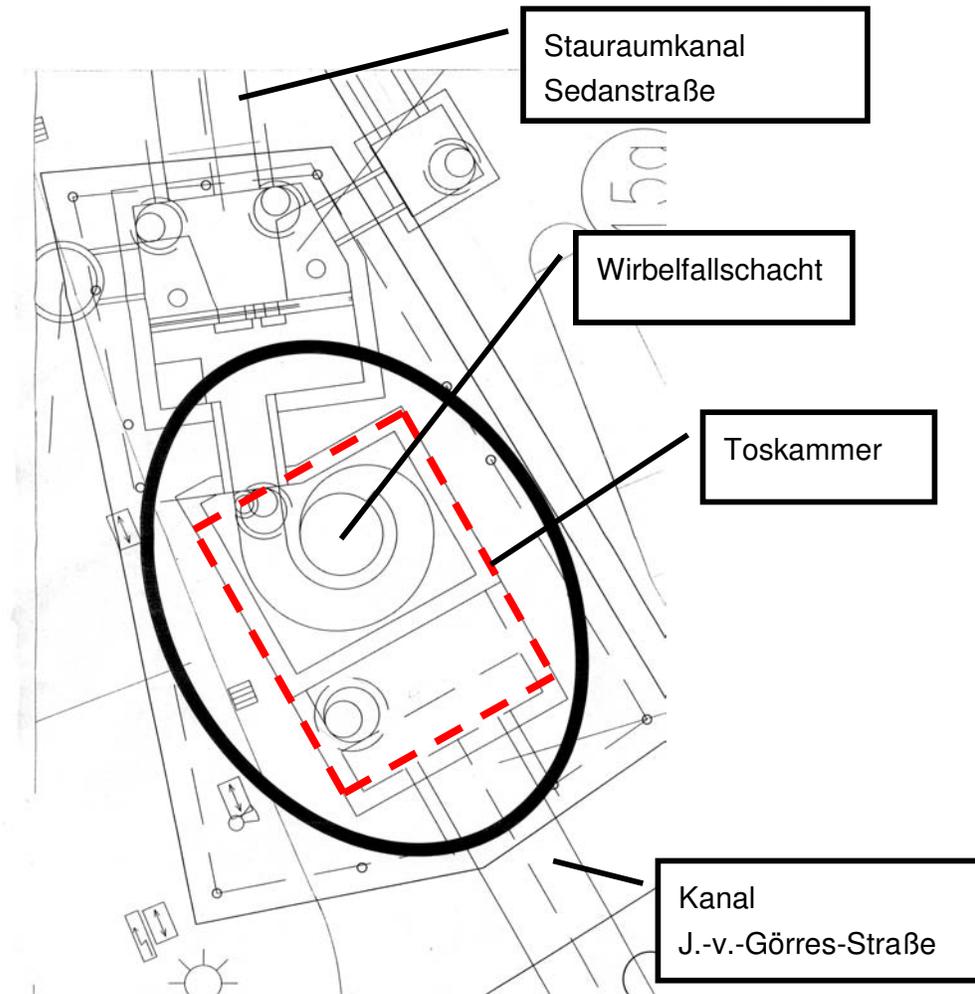


Bild 5.2: Lageplan zur planerischen Ausgangsvariante des Absturzbauwerkes Hohenzollernplatz ohne Wasserrad

Eine Erweiterung der Baugrube im Grundriss war aufgrund des dadurch entstehenden finanziellen und baulichen Aufwandes nicht vertretbar.

Denkbar war jedoch eine seitliche Verlegung des Einstiegsschachtes der Toskammer, um so im Bedarfsfall mehr Raum für die Wasserradkonstruktion zu gewinnen.

Der Höhenunterschied von ca. 12,50 m muss im Regenwetterfall durch den geplanten Wirbelfallschacht überwunden werden. Der Trockenwetterabfluss von maximal 150 l/s kann durch ein zusätzliches Fallrohr dem Wasserrad zugeführt werden. Die Rückführung des Wassers in das geplante System erfolgt in der Toskammer.

Die Funktionalität des Wirbelfallschachtes durfte durch die Umplanungen nicht beeinträchtigt werden und wurde sorgfältig geprüft (z.B. Be- und Entlüftung).

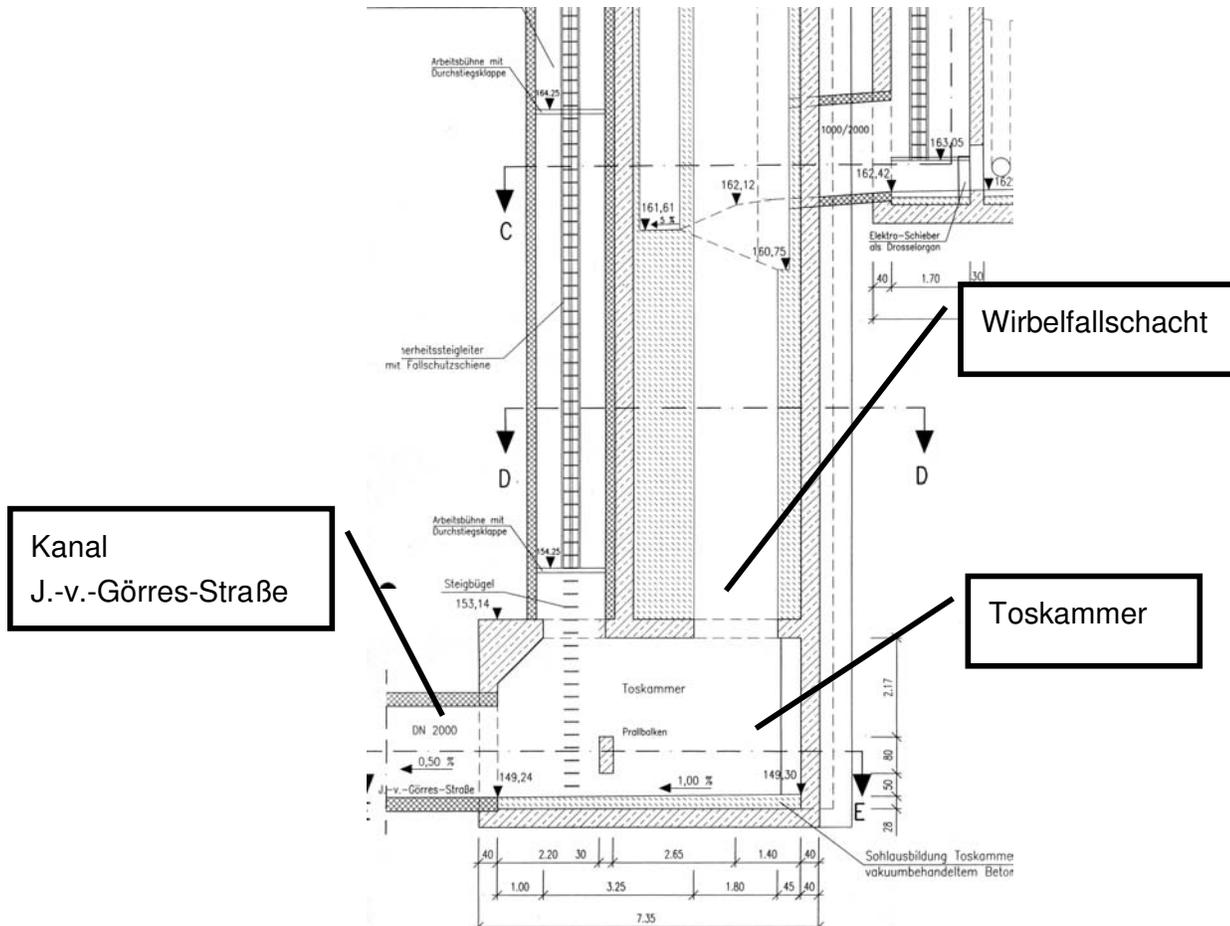


Bild 5.3: Längsschnitt des Absturzbauwerkes Hohenzollernplatz

5.2 Planerische Variante des Absturzbauwerkes mit Wasserrad

Für eine Integration des Wasserrades in das Absturzbauwerk wurde ein Teil der Decke der Toskammer ca. 2 m höher angeordnet als ursprünglich vorgesehen, da so das unterhalb des Wasserrades abfließende Abwasser kontrolliert abgeleitet werden kann. Für den Einbau des Wasserrades wurde eine Zwischendecke konstruiert. Oberhalb des Wasserrades ist eine Arbeitsbühne mit Geländer als Gitterrost eingebaut worden. Es wurde die Anordnung eines Wasserrades mit einem Durchmesser von ca. 5,5 m gewählt.

Aus energetischen Erwägungen wäre die Anordnung zweier Räder übereinander zweckmäßig. Der Charakter eines Pilotvorhabens und die Unwägbarkeiten in Wartung und Betrieb veranlasste den Bauherrn jedoch zur Wahl eines Rades unter Verzicht der energetischen Nutzung eines Teiles der Fallhöhe.

Zur Nutzung von Abflussspitzen wurde das Wasserrad für einen Trockenwetterabfluss von maximal 150 l/s bemessen. Das Nachtminimum von ca. 30 l/s wurde als unterer Betriebspunkt gewählt, um auch die verminderten Nachtabflüsse für die Stromproduktion auszunutzen.

Aus Platzgründen wurde das Wasserrad quer zur Fließrichtung montiert. Die nachfolgenden Bilder zeigen die gewählte Variante im Grundriss sowie im Längsschnitt. Die gestrichelt eingetragene Ellipse im Grundriss stellt die ehemalige Baugrube für den unterirdischen Vortrieb dar.

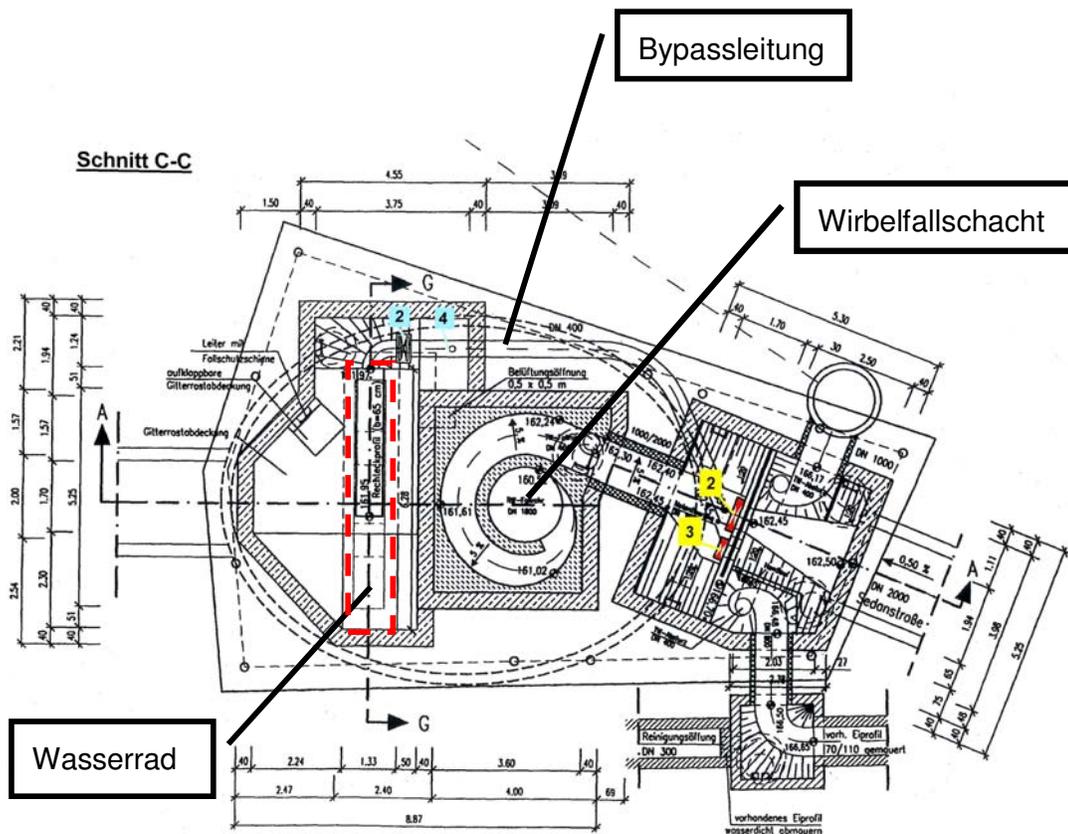


Bild 5.4: Grundriss des Absturzbauwerkes Hohenzollernplatz mit Wasserrad

Wie Bild 5.4 zeigt, wird der Abwasservolumenstrom unmittelbar hinter der Drossel des Stauraumkanals (Ziffer **3**), der vor dem Absturzbauwerk angeordnet ist, durch ein seitlich im 45°-Winkel abgehendes Rohr mit einer Nennweite von DN 400 am

Absturzbauwerk (Ziffer **2**) vorbeigeführt. Der Teil der Zuleitung innerhalb des Schachtbauwerkes besteht aus Edelstahl. Hier sind ein magnetisch-induktiver Durchflussmesser (Ziffer **4**) sowie ein elektrischer Schieber (Ziffer **2**) installiert. Nachdem das Abwasser das Wasserrad passiert hat, wird es unterhalb des Wasserrades in einer Rinne gesammelt und über ein Fallrohr der Toskammer zugeführt (siehe Bild 5.5).

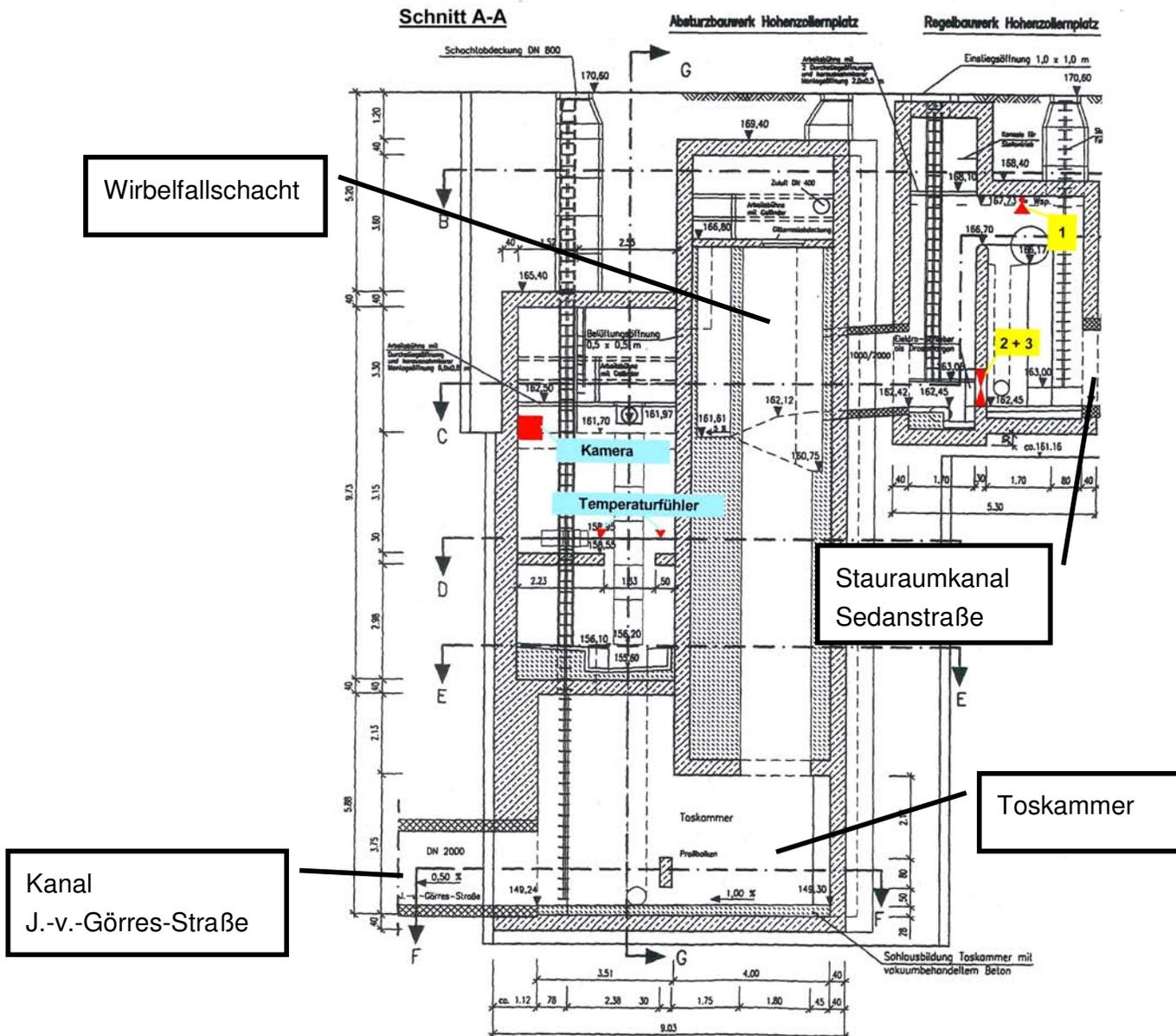


Bild 5.5: Längsschnitt des Absturzbauwerkes Hohenzollerplatz

Der Längsschnitt zeigt zusätzlich die neben MID und elektrischem Schieber installierte Kamera sowie die Temperaturfühler. Die Kamera wurde zusammen mit einer ferngesteuerten Beleuchtungseinheit für die wissenschaftliche Begleitung eingesetzt, um eine Fernüberwachung zu ermöglichen, damit der Verkehrsfluss nur selten eingeschränkt werden muss. Temperaturfühler wurden aus Gründen des Explosionsschutzes an den Lagern des Wasserrades angebracht. Über sie wird der elektrische Schieber angesteuert. Im Falle einer Überhitzung der Lager wird der Schieber der Bypassleitung geschlossen, worauf das Wasserrad zum Stillstand kommt. Der Einbau des Wasserrades erfolgte am 16. Oktober 2001. Die folgenden Fotos sind während des Einbaus entstanden.



Bild 5.6: Ansicht des Wasserrades beim Einbau



Bild 5.7: Das Wasserrad nach dem Einbau

Würde ein Wasserrad bei der Planung mittelbar berücksichtigt, so wären eine Anordnung in Fließrichtung und ein wesentlich größerer Durchmesser zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit möglich. Grundsätzlich wäre auch zu prüfen, ob auf den Wirbelfallschacht verzichtet werden könnte. Beides war im Pilotvorhaben nicht möglich.

Ursächlich waren Platzgründe sowie die Bedingungen der Genehmigungsbehörde, das Bauwerk dem Stand der Technik zu errichten und das Wasserrad so anzukoppeln, dass ein Wegfall der Kleinstwasserkraftanlage bei möglichen negativen Erkenntnissen aus dem Pilotvorhaben, keine Einschränkungen in der Funktionalität des Absturzbauwerkes verursachen würde.

6 Untersuchungen

6.1 Leistung des Wasserrades

Nach Inbetriebnahme des Wasserrades und der Erreichung eines stabilen Betriebszustandes wurde das Wasserrad getestet und optimiert. Hierzu wurden kontinuierlich der Wasserzufluss in l/s, die Leistung in kW sowie die Stromstärke in Ampere erfasst. Die Sicherung des Anlagenbetriebes erfolgte über die kontinuierliche Messung der Lagertemperatur sowie die Ölstandskontrolle. Per Datenlogger erfolgte die Speicherung der aufgezeichneten Messwerte. Die Anzahl der Anfahrzyklen nach einem Stillstand ergibt sich aus der Leistungskurve. Trotz der Häufigkeit der Ausfälle und Störungen konnten homogene Daten zum Betrieb des Wasserrades erfasst werden. Bild 6.1 zeigt für einen Werktag eine Leistungsdurchflusskurve mit zwei Regenereignissen.

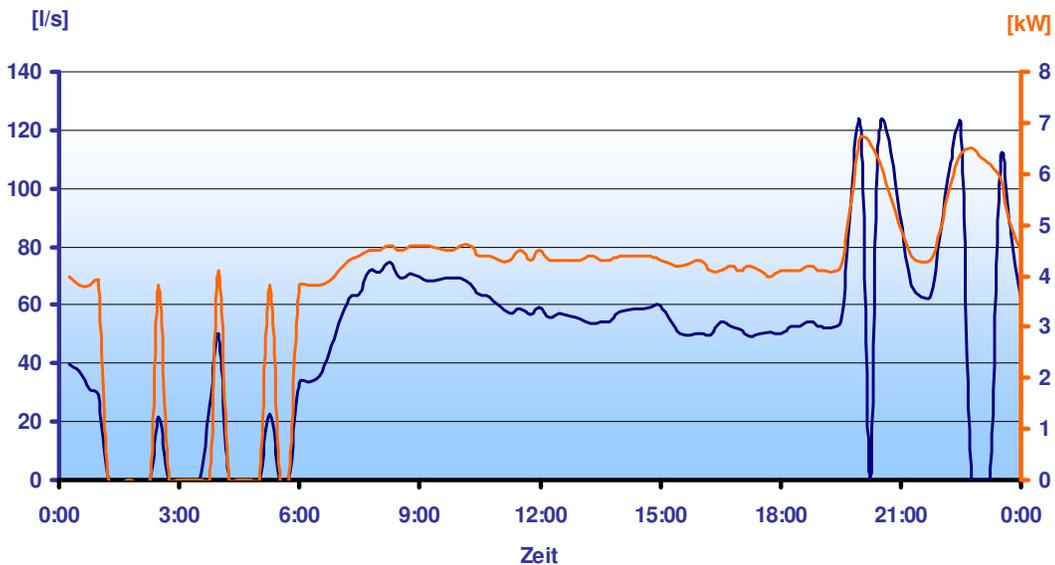


Bild 6.1: Leistungsdurchflusskurve des Wasserrades vom Freitag, 05.05.2006

Der Wasserzufluss sinkt nach Mitternacht bis um 1 Uhr kontinuierlich auf das vorgegebene Betriebsminimum von 30 l/s (blauer Graph) ab. Die Anlagensteuerung schaltet daraufhin das Wasserrad in den Stand-by-Betrieb. Zwischen 1 Uhr und etwa 5 Uhr 30 wechseln sich Anlaufphasen und Stillstandszeiten ab. In der Zeit zwischen 8 Uhr und 20 Uhr ist ein kontinuierlicher Betrieb zu beobachten. Im Mittel standen hier 70 Liter Abwasser pro Sekunde zur energetischen Umwandlung zur Verfügung. Hieraus resultierte eine Generatorleistung von etwa 4,4 kW (orangefarbener Graph).

Zwischen 20 Uhr und 24 Uhr führten zwei Regenereignisse zur Erreichung der maximalen Generatorleistung von 6,8 kW.

Im Mittel ergab die Wassermenge pro Werktag innerhalb der aufgezeichneten Laufzeit eine kumulierte Energieproduktion von 65 kWh.

An den Wochenenden (Bild 6.2) schlägt sich die Veränderung des Tagesablaufes der Menschen erkennbar in der Ganglinie des zufließenden Abwassers nieder. Eine durchschnittliche Abwassermenge von etwa 60 l/s steht zwischen 9 Uhr und etwa 23.30 Uhr und ein deutliches Maximum im Bereich um 12 Uhr zur energetischen Nutzung zur Verfügung. Zwischen 2 Uhr 30 und 7 Uhr 30 befindet sich das Wasserrad jeweils im Stand-by-Betrieb. Im Mittel ergab die über das Wasserrad geführte Wassermenge an den Wochenenden ca. 130 kW und entspricht damit der auch für die Werktage ermittelten durchschnittlichen Energieabgabe von etwa 65 kWh pro Tag.

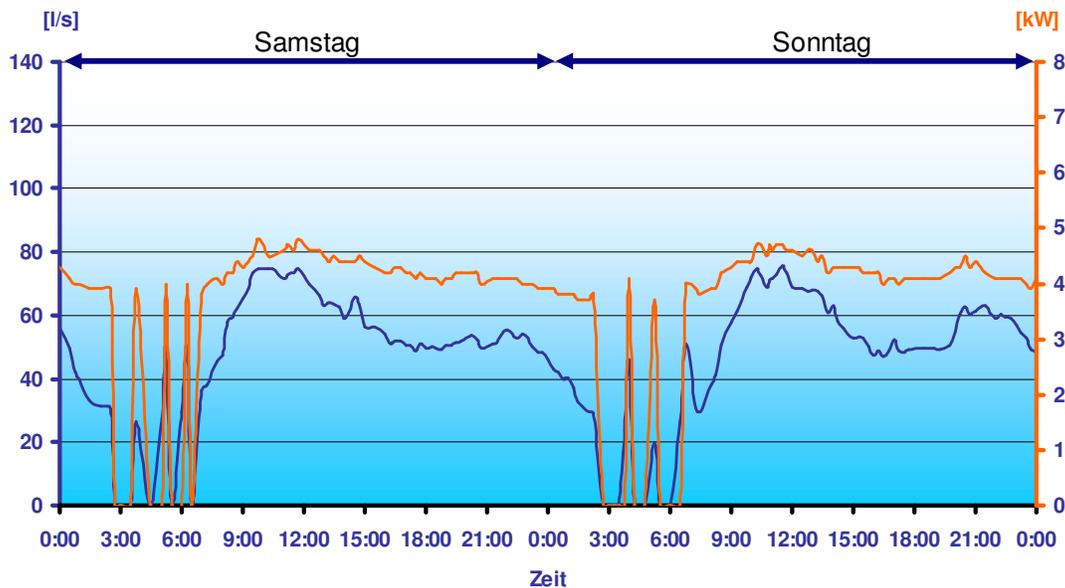


Bild 6.2: Leistungsdurchflusskurve des Wasserrades vom Wochenende, 06. – 07.05.2006

Um den Wirkungsgrad der Wasserkraftanlage zu bestimmen, wurde die abgegebene Leistung erfasst und mit der theoretisch erreichbaren Leistung verglichen (Tabelle 6.1). Hierbei zeigte sich, dass die Leistung des Wasserrades nicht mit der abgegebenen Leistung korrelierte. Bis zu einer Durchflussmenge (Q) von $0,12 \text{ m}^3/\text{s}$ lag die gemessene Leistung über der theoretisch erreichbaren Leistung. Erst bei einem Durchfluss von $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ stimmen die gemessenen und die wirkungsgradbereinigten Leistungen überein. Bild 6.3 veranschaulicht die Diskrepanz zwischen der gemessenen und theoretisch erreichbaren Leistung in Abhängigkeit des Volumenstroms.

Wie der rote Graph zur gemessenen Leistung zeigt, leistet das Wasserrad bei einem gemessenen Durchfluss von 30 l/s ca. 3,8 kW. Theoretisch kann bei dieser Wassermenge bei einem Gesamtwirkungsgrad von 0,8 eine Leistung von 1,4 kW erzeugt werden. Diese Diskrepanz ist nur durch einen Messfehler zu erklären. Ob die Durchflussmessung oder die Leistungsmessung fehlerhaft war, lässt sich nicht mehr zurückverfolgen.

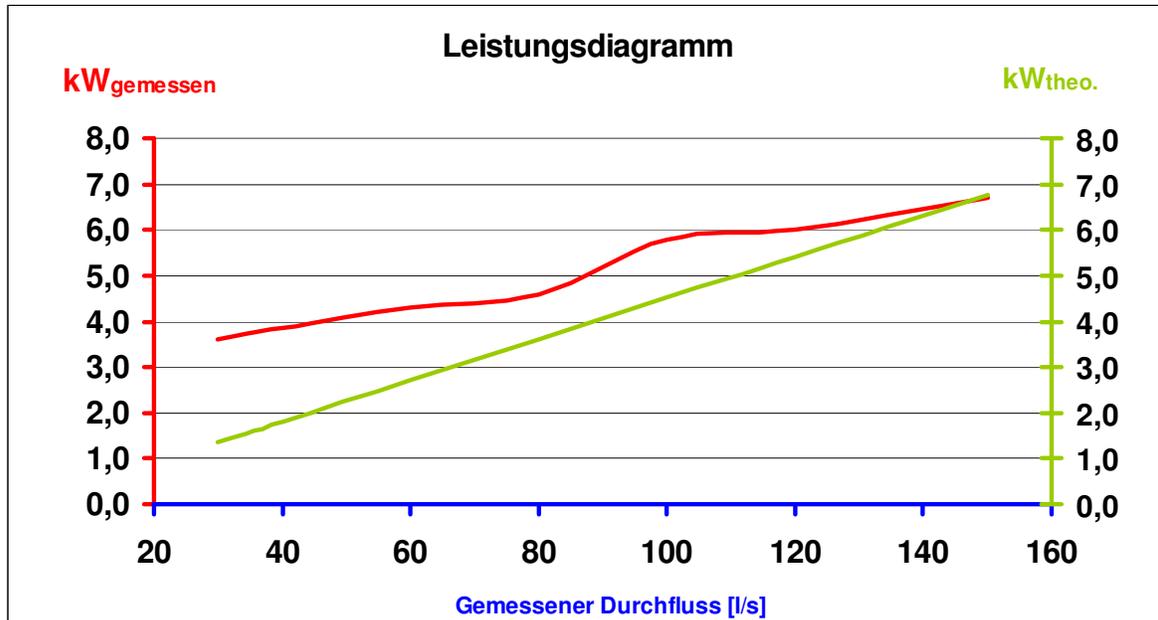


Bild 6.3: Diskrepanz zwischen der gemessenen und theoretisch erreichbaren Leistung in Abhängigkeit des Volumenstroms

6.2 Optimierung der Energieerzeugung und Anlagenwartung

Innerhalb der Betriebsphasen sollten die Kleinstwasserkraftanlage zur Energieerzeugung optimiert und die vorhandenen Potentiale ausgenutzt werden.

Im Einzelnen waren hier folgende Maßnahmen geplant:

- Optimierung der Wasserzuführung im Bereich der Bypassleitung
- Anbindung des Stauraumkanals zur weitergehenden Stromproduktion als Energiespeicher

Wie aus den Leistungsdurchflusskurven (Bild 6.1 und 6.2) zu erkennen ist, führte die verminderte Wassermenge zu anhaltenden Ausfällen des Wasserrades in den Nachtstunden. Bild 6.4 zeigt aus der Draufsicht das Ablaufgerinne des Stauraumkanals und das nach sechs Uhr abzweigende Zulaufgerinne zum Wasserrad.

Aufgrund der schießenden Strömung füllt sich das Zulaufgerinne nur unvollständig mit Abwasser. Zur Optimierung der Wasserzuführung wurde daraufhin ein Leitblech eingebaut (Bild 6.5)



Bild 6.4: Zulaufgerinne zum Wasserrad

In Bild 6.5 ist das Hauptschott des Stauraumkanals mit dem nachträglich eingebauten Leitblech zu sehen und das nach neun Uhr geführte Zulaufgerinne zum Wasserrad.



Bild 6.5: Hauptschott des Stauraumkanals und Zulaufgerinne zum Wasserrad

7 Erfahrungen im Betrieb und Wartung

Kurz nach Beginn der Untersuchungsphase führte ein Montagefehler an der Wasserkraftanlage zur Zerstörung der Getriebe-Generatoreinheit und damit zum Totalausfall. Auf dem nachfolgenden Bild sind die am Getriebeflansch verbliebenen Schrauben sowie die am Boden liegenden Schraubenbruchstücke zu sehen.

Die Haltevorrichtung sowie die Schutzummantelung der Elektroleitung und Teile des Getriebeölausgleichsbehälters sind um das Getriebegehäuse gewunden.



Bild 7.1: Generator-Getriebe-Einheit am Wasserrad nach dem Schadensfall

Das Getriebe sowie der Generator wurden in den darauffolgenden Tagen durch Mitarbeiter der Stadt Aachen von der Welle des Wasserrades abgetrennt und zur Beweissicherung geborgen.

Aufgrund der starken Korrosion ließ sich die Generator-Getriebeeinheit nur mit Hilfe eines Schweißgerätes von der Welle des Wasserrades abtrennen. Zu diesem Zeitpunkt befand sich das Wasserrad bereits etwa 18 Monate im Absturzbauwerk bzw. 13 Tage in Betrieb.

In den folgenden Monaten erfolgte die Instandsetzung der Kleinstwasserkraftanlage. Hier waren

- der Einbau einer neuen Getriebe-Generatoreinheit,
- die Erneuerung der Elektrotechnik sowie
- die Zentrierung der mit einem neuen Flansch versehenen Wasserradwelle

notwendig (Bild 7.2).



Bild 7.2: Wasserrad mit neuer Getriebe-Generatoreinheit

Nach der Wiederinbetriebnahme der Wasserkraftanlage kam es aufgrund eines fehlerhaften Anschlusses zur Aufzeichnung nicht verwertbarer Betriebsdaten sowie durch undichte Kabelabzweigkästen zu erneuten Betriebsausfällen des Wasserrades. Nach Fehlerkorrektur lief das Wasserrad mehrere Wochen störungsfrei. Hier konnten für eine Auswertung Betriebsdaten aufgezeichnet werden. Aufgrund eines nachfolgenden Fehlers in der Steuerung musste die Anlage aus dem Netz genommen werden. Eine Schadensbehebung erfolgte bisher nicht.

Durch die Installation des Wasserrades in den Bereich der Kanalisation wurde bei der Konzeption des Projektes unterstellt, dass hieraus ein erhöhter Wartungsaufwand resultiert. Um den Aufwand so gering als möglich zu gestalten und den Betriebszustand jederzeit kontrollieren zu können, wurde eine Kamera zur Fernüberwachung installiert.

In der späteren Betriebspraxis zeigte sich jedoch, dass die Fernüberwachung nur in Ausnahmefällen möglich gemacht werden konnte. Der Grund lag hier unter anderem in den nicht akzeptierten Zugangsberechtigungen zum Server des Betreibers, geänderten Konfigurationen der Serverzugänge, technischen Systemänderungen usw.

Dies hatte zur Konsequenz, dass bei anstehenden Fehlermeldungen zunächst das Wasserrad außer Betrieb genommen wurde und im Anschluss eine Inspektion durch das zuständige Personal erfolgen musste.

Da dies an die Verfügbarkeit der entsprechenden Kräfte des Betreibers gekoppelt war, entstanden hierdurch mitunter lange Stillstandszeiten. Aus sicherheitstechnischen Gründen war der Einstieg in das Absturzbauwerk nur mit einer Einstiegshilfe möglich. Vor dem Einstieg erfolgte die Bewetterung des Bauwerkes durch ein Sauggebläse und die messtechnische Überprüfung der Atmosphäre.

Wie sich in den Begehungen zeigte, konnten weder am Wasserrad noch im Spritzwasserbereich Ablagerungen von groben Feststoffen festgestellt werden. Anhaftende Feinschmutzpartikel waren als dünne Auflage an der Außenseite des Wasserradkastens sowie in den Taschen des Wasserrades sichtbar. Im Ergebnis waren innerhalb der Untersuchungsdauer keine notwendigen Reinigungsmaßnahmen durchzuführen, so dass der Einsatz automatischer Reinigungseinrichtungen nicht notwendig war.



Bild 7.3: Zulaufgerinne zum Wasserrad mit Wasserradkasten sowie Einblick in eine Wasserradtasche (24 Monate nach Inbetriebnahme ohne Reinigung)

Wenn es um die Beständigkeit der Anlagentechnik in der Abwasserableitung geht, sind die Bauwerkstechnik und die Maschinenteknik getrennt zu betrachten. An den Betonteilen des Absturzbauwerkes, in dem sich das Wasserrad befindet, waren bis zum Ende der Untersuchungsphase keine Zerstörungen erkennbar.

Am Wasserrad selbst traten z. T. massive Korrosionsschäden auf. Die nachfolgenden Bilder (7.4 – 7.6) dokumentieren den Grad der Korrosion an unterschiedlichen Bauteilen der Wasserkraftanlage über einen Zeitraum von etwa 30 Monaten. Schon zu Beginn der Betriebsphase war erkennbar, dass die Verzinkung und Lackierung der Tragarme als passive Maßnahme anders als vom Hersteller angekündigt nicht ausreicht, um die Anlage dauerhaft gegen Korrosion zu schützen. Zunächst trat so genannter Weißrost an den verzinkten und lackierten Radarmen des Wasserrades auf (Bild 7.5). Die Schweißnähte am Wasserradkasten zeigten ebenfalls Ansatz von Korrosion. Mit zunehmender Standzeit verstärkte sich die Korrosion massiv.



Bild 7.4: Beginnende Korrosion der Anlagenteile des Wasserrades nach dem Einbau – von links nach rechts – Generator-Getriebeeinheit, Wasserradachse mit Tragarmen, Wasserradtaschen



Bild 7.5: Fortgeschrittene Korrosion am Wasserrad nach 14 Monaten in Kanalatmosphäre – von links nach rechts – Tragarm des Wasserrades mit Weißrost, Schweißnaht des Wasserradkastens mit Rostansatz



Bild 7.6: Wasserradteile mit starkem Rostbefall nach insgesamt 30 Monaten in Kanalatmosphäre – von links nach rechts – Achse mit Flansch und Tragarmen, Achse mit Tragarmen, Achsen-Getriebeflansch

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig hat die notwendigen technischen Einzelheiten zur Erfüllung des Ex-Schutzes für den Betrieb einer Kleinstwasserkraftanlage in einem Absturzbauwerk vorgegeben.

Generell sind innerhalb des Wasserradschachtes die Ex-Schutz-Vorschriften für Zone 1 einzuhalten.

Die in den ausgewiesenen Ex-Schutzbereichen eingebauten Geräte wie beispielsweise der Generator, die Kabelabzweigdosen, die Überwachungskamera, die Leuchtmittel mussten eine Zulassung für diese Bereiche besitzen.

Im Projekt konnte der Generator als ex-geschützte Version geliefert werden. Das Getriebe und die Lager des Wasserrades waren laut Hersteller nicht als ex-geschützte Ausführung lieferbar.

Um eine Entzündung von Gas im Wasserradschacht durch überhitzte Lager oder ein überhitztes Getriebe zu verhindern, wurde diese mit Temperatursensoren ausgerüstet. Durch eine elektronische Überwachung (SPS) wird bei Überschreitung der Grenztemperatur der Zulaufschieber automatisch geschlossen, so dass das Wasserrad zum Stillstand kommt.

Ein weiteres Sicherheitssystem stellt die Höhenstandskontrolle im Ölvorratsbehälter dar. Durch die elektronische Überwachung des Ölvorrates wird ein Trockenlaufen der Lager verhindert bzw. bei einer Unterschreitung eines minimalen Füllstandes das Wasserrad durch Schließen des Zulaufschiebers automatisch zum Stillstand gebracht.

Die installierte Kamera zur Fernüberwachung musste ebenfalls den Anforderungen der Ex-Schutz-Vorschriften genügen und wurde in eine eigens dafür angefertigte ex-geschützte Box eingebaut.

Technische Nachteile der Vorgaben der Ex-Schutz-Vorschriften zeigten sich an den Kabelabzweiggästen. Durch eine gasdiffusionsoffene Bauweise bildete sich im Innern Kondenswasser, was zu ständigen Anlagenausfällen aufgrund auftretender Kurzschlussströme führte. Abhilfe brachte hier das Ausgießen mit Kunstharz.

8 Wirtschaftlichkeit von Wasserkraftanlagen in der Kanalisation

Zur Darstellung der Wirtschaftlichkeit wurde eine Kosten-Ertragsrechnung auf der Grundlage

- des Energiepotentials und der geleisteten (errechneten) Betriebsstunden,
- der Kapitaldienstberechnung auf Investitionsbasis sowie
- der Einnahmen aus der Stromproduktion

durchgeführt. Da als potentieller Einsatzort für Kleinstwasserkraftanlagen neben den geeigneten Bauwerken in der Kanalisation Kläranlagenabläufe in Frage kommen, erfolgte eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für das Wasserrad am Hohenzollernplatz in Aachen sowie für ein fiktives Vergleichsbeispiel einer Wasserkraftanlage in einem Kläranlagenablauf.

Da der reale Betrieb des Wasserrades im Absturzbauwerk Hohenzollernplatz innerhalb der Untersuchungsphase durch anhaltende Stillstandszeiten geprägt war, erfolgte die Festlegung der Jahreslaufleistung für die Wirtschaftlichkeit unter idealisierten Annahmen.

Störungen, so die Annahme, vermindern die Laufzeit um 10 %. Die schwachen Nachtabflüsse reduzierten mit den einhergehenden Anlagenstillständen die Laufzeit um weitere 18 %. Unter diesen Einschränkungen verbleiben ca. 6.300 Betriebsstunden, in denen das Wasserrad Strom in das Netz einspeisen könnte.

Für die fiktive Variante eines Wasserrades am Ablauf der Kläranlage wurde die Verfügbarkeit auf 90 % der Jahresstunden reduziert.

Die Errechnung des Kapitaldienstes basiert auf den tatsächlichen Investitionen für die Kosten der Maschinen- und MSR-Technik sowie die Baukosten. Der Kapitaldienst ist von folgenden Faktoren abhängig:

- Zinssatz
- Amortisationszeit
- Inflationsrate

Der in die Kapitaldienstberechnung einfließende Zinssatz (4,8 %) wurde über die Amortisationszeit gleichbleibend angesetzt und orientierte sich an den derzeitigen Kreditbedingungen. Eine Inflationsbereinigung über die Kreditlaufzeit erfolgte nicht.

Als Grundlage für die Festlegung der Amortisationszeiten dienten die in den KVR-Leitlinien festgelegten Nutzungszeiten für Kleinstwasserkraftanlagen:

Bauliche Anlagenteile:	50 – 60 Jahre
Maschinelle Anlagenteile:	30 – 40 Jahre
Elektrische Anlagen:	25 – 30 Jahre
Kurzlebige Geräte und Güter:	10 Jahre

Für die gewählten Berechnungsbeispiele wurden unterschiedliche Amortisationszeiten gewählt.

Für die Wasserkraftanlage Hohenzollernplatz wurde die Nutzungszeit für die maschinellen und elektrischen Anlagenteile aufgrund des sehr schlechten Allgemeinzustandes auf 18 Jahre reduziert. Hingegen orientieren sich die gewählten Abschreibungszeiten für das fiktive Vergleichsbeispiel an den Amortisationszeiten der KVR-Leitlinien ohne Einschränkung.

Werden elektrotechnische Anlagen im Bereich der Kanalisation installiert, müssen alle Ausführungen den Anforderungen des Explosionsschutzes genügen. Entsprechend erhöhen sich dadurch beachtlich die Investitionen für die Steuer- und Regeltechnik.

Für die Investitionskosten sind die Baukosten zur Abänderung von Bauwerken und die Schaffung von Zulauf- und Ablaufgerinnen maßgebend. Diese aufzuwendenden Kosten schlagen sich deutlich in den Stromgestehungskosten nieder.

Darüber hinaus sind die zu leistenden Bauwerkskosten in der Kanalisation für die Schaffung der Infrastruktur zur Aufnahme von Kleinstwasserkraftanlagen bedeutend höher als im Bereich des Kläranlagenablaufes.

Für die Kleinstwasserkraftanlage im Absturzbauwerk Hohenzollernplatz wurden nicht die bekannten Investitionskosten für den Anbau der Umhausung zur Aufnahme des Wasserrades sowie die Kosten für die Objektplanung angesetzt. Bei der Festlegung der Investitionskosten wurde davon ausgegangen, dass die Kosten zur Integration des Wasserrades bei direkter Einplanung innerhalb eines Folgeprojektes deutlich geringer zu veranschlagen wären, als dies hier der Fall ist. Entsprechend dieser Überlegung wurden für die Erweiterung des Absturzbauwerkes zur Aufnahme des Wasserrades 20 % der realen Baukosten des Absturzbauwerkes zum Ansatz gebracht.

Für das gewählte fiktive Vergleichsbeispiel erfolgte die Abschätzung der Investitionskosten anhand des zur Verfügung stehenden mittleren Volumenstromes, der vorhandenen Höhen-Abfluss-Differenz und der sich hieraus ableitenden Anlagengröße.

Für beide Anlagen fasst die nachfolgende Tabelle die Investitionen für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zusammen:

Investitionskosten Kleinstwasserkraftanlagen		
	Wasserkraftanlage Hohenzollernplatz	Fiktives Vergleichsbeispiel einer Wasserkraftanlage im Kläranlagenablauf
Bemessungsgröße		
Generatorleistung	6,5 kW	20,0 kW
Maschinelle und elektrische Anlagen		
Wasserrad	25.000 €	71.000 €
Getriebe	5.000 €	10.000 €
Generator	5.000 €	11.000 €
MSR-Technik incl. Fernüberwachung	39.000 €	18.000 €
Bauliche Anlagenteile		
Erweiterung Absturzbauwerk*	51.000 €	-
Erweiterung Ablaufgerinne Kläranlage	-	38.000 €
Summe	125.000 €	148.000 €

* 20% der Kosten für das Absturzbauwerk ohne Wasserrad von 251.000 Euro

Tabelle 8.1: Investitionskosten für Kleinstwasserkraftanlagen im Abwasserbereich

Der von dem Wasserrad unter dem Hohenzollernplatz erzeugte Strom wird von den Stadtwerken Aachen (STAWAG) nach den Maßgaben des Gesetzes zum Vorrang erneuerbarer Energien für aus Wasserkraft produzierten Strom vergütet. Der derzeitige Vergütungssatz beträgt 9,67 Cent/kWh.

Tabelle 8.2 zeigt das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für das Wasserrad am Hohenzollernplatz in Aachen und für das fiktive Vergleichsbeispiel für eine Wasserkraftanlage in einem Kläranlagenablauf unter Zugrundelegung der vorab erläuterten Annahmen und Bemessungsgrößen.

Einleitend erfolgt für die gewählten Fallbeispiele anhand der dort aufgezeigten Bedingungen die Berechnung der Energiepotentiale. Hieran knüpfen sich die Wahl der Generatoren sowie die Ausweisung der unterschiedlichen spezifischen Investitionen für die maschinellen, elektrischen sowie für die baulichen Anlagenteile der Kleinstwasserkraftanlagen an.

Wirtschaftlichkeitsberechnung	
Wasserkraftanlage Hohenzollernplatz	Fiktives Vergleichsbeispiel einer Wasserkraftanlage im Kläranlagenablauf
Leistungspotential und Ausbaugröße	
Leistungspotential	
Mittlerer Volumenstrom	0,11 m ³ /s
Höhen-Abfluss-Differenz	5,75 m
Erdbeschleunigung	9,81 m/s ²
Dichte des Wassers	998 kg/m ³
Betriebsstunden pro Jahr	6307 h
Wirkungsgrade $\eta_{WK-Maschine}$	0,85
$\eta_{Generator}$	0,95
$\eta_{Reibung}$	0,95
Rechn. Gesamtwirkungsgrad	0,77
	4,76 kW
Ausbaugröße	
Generatorleistung	6,50 kW
Investitionen	
Maschinelle und elektrische Anlagen	74.000 €
Bauliche Anlagenteile	51.000 €
Summe Investitionen	125.000 €
Spezifische Investitionen auf Basis der Generatorleistung	19.231 €/kW
Kostenberechnung	
Kapitaldienst: Maschinelle und elektrische Anlagen	
Annuitätsfaktor	0,084
Laufzeit	18 a
Zinssatz	4,8 %
	6.232 € /a
Kapitaldienst: Bauliche Anlagenteile	
Annuitätsfaktor	0,053
Laufzeit	50 a
Zinssatz	4,8 %
	2.708 € /a
Betrieb	
7 % vom spez. Invest	1.346 € /a
	10.286 € /a
Ertragsberechnung	
Einnahmen aus Stromproduktion	
Jährliche Stromproduktion	30.021 kWh
Einspeisevergütung	0,0967 €/kW
	2.903 € /a
Ertragsbereinigte Kosten	-7.383 € /a
Kosten pro erzeugte kW auf Basis der jährlichen Kosten	0,343 €/kWh
Leistungspotential und Ausbaugröße	
Leistungspotential	
Mittlerer Volumenstrom	1,00 m ³ /s
Höhen-Abfluss-Differenz	2,00 m
Erdbeschleunigung	9,81 m/s ²
Dichte des Wassers	998 kg/m ³
Betriebsstunden pro Jahr	7884 h
Wirkungsgrade $\eta_{WK-Maschine}$	0,85
$\eta_{Generator}$	0,95
$\eta_{Reibung}$	0,95
Rechn. Gesamtwirkungsgrad	0,77
	15,05 kW
Ausbaugröße	
Generatorleistung	20,00 kW
Investitionen	
Maschinelle und elektrische Anlagen	110.000 €
Bauliche Anlagenteile	38.000 €
Summe	148.000 €
Spezifische Investitionen auf Basis der Generatorleistung	7.400 €/kW
Kostenberechnung	
Kapitaldienst: Maschinelle und elektrische Anlagen	
Annuitätsfaktor	0,064
Laufzeit	30 a
Zinssatz	4,8 %
	6.993 € /a
Kapitaldienst: Bauliche Anlagenteile	
Annuitätsfaktor	0,053
Laufzeit	50 a
Zinssatz	4,8 %
	2.018 €
Betrieb	
5 % vom spez. Invest	370 € /a
	9.381 € /a
Ertragsberechnung	
Einnahmen aus Stromproduktion	
Jährliche Stromproduktion	118.662 kWh
Einspeisevergütung	0,0967 €/kW
	11.475 € /a
Ertragsbereinigte Kosten	2.094 € /a
Kosten pro erzeugte kW auf Basis der jährlichen Kosten	0,079 €/kWh

Tabelle 8.2: Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für das Wasserrad und ein Vergleichsbeispiel

In Abhängigkeit zum Einbauort, also ob in der Kanalisation oder im Bereich des Kläranlagenablaufes, variieren die Kosten für Installation und Einbau erheblich. Dies zeigen auch die Kostenberechnungen der jährlichen Ausgaben zur Deckung der Kapitaldienste. Nach Ertragsbereinigung ergibt sich für das Wasserrad am Hohenzollernplatz als Beispiel für eine Wasserkraftanlage in der Abwasserableitung ein stark defizitärer Betrieb.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen zeigen, dass der Einsatz von Wasserrädern in der Kanalisation als Kleinstwasserkraftanlagen selbst unter optimalen Voraussetzungen unwirtschaftlich ist.

Im Gegensatz dazu zeigt das Vergleichsbeispiel, dass Wasserkraftanlagen durchaus amortisationsfähig sein können. Dies liegt in den deutlich geringeren Baukosten begründet, so dass Stromgestehungskosten deutlich unterhalb des Vergütungssatzes nach EEG möglich sind. In dem gewählten fiktiven Beispiel ist ein wirtschaftlicher Betrieb auch dann noch als gesichert anzusehen, wenn unvorhergesehene Reparaturen oder nicht einkalkulierte Stillstandzeiten die Stromproduktion verringern. Somit sind hier ausreichende Pufferkapazitäten für die Erwirtschaftung von monetären Gewinnen gegeben.

Die auf Basis der Kosten-Ertragsrechnung ermittelten Stromgestehungskosten für Kleinstwasserkraftanlagen im Bereich der Abwasserableitung liegen, je nach Einsatzbereich, zwischen etwa 8 und 35 ct/kWh und zeigen somit eine beachtliche Spannweite auf.

Zur Relativierung zeigt Bild 8.1 (VOSS, 2001) die ca. Stromgestehungskosten für unterschiedlichen Energiequellen.

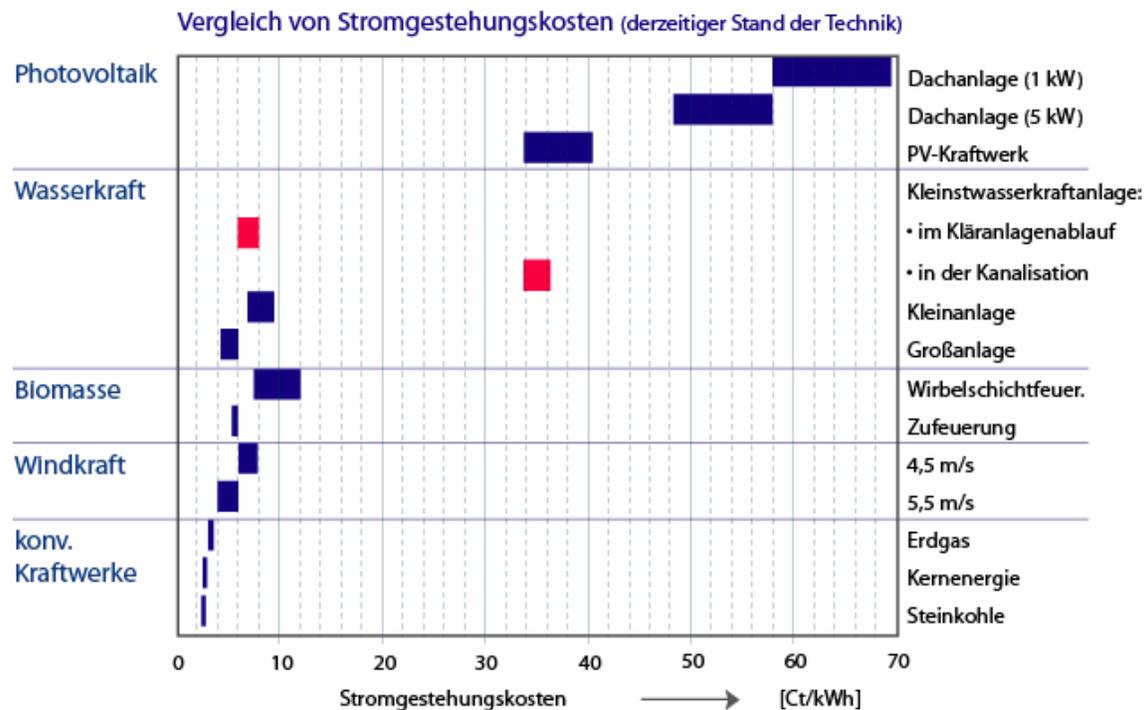


Bild 8.1: Vergleich der Stromgestehungskosten verschiedener Energieträger

Erweitert man die rein wirtschaftliche Kostenbetrachtung und addiert zu den Stromgestehungskosten die externen Kosten für eine Strombereitstellung hinzu, so relativiert sich das Bild des teuren regenerativen Stroms deutlich.

Externe Kosten entstehen als Auswirkung der Aktivität zur Strombereitstellung. Derzeit sind diese Kosten bei der Preisbildung noch nicht berücksichtigt und sind derzeit nicht vom Verursacher bzw. dem Stromproduzenten zu tragen.

Dieser Ansatz zur umfassenden Kostenbetrachtung im Hinblick auf die Energiebereitstellung wurde bereits vom Verband der schweizerischen Wasserwirtschaft beispielhaft für die Schweiz berechnet. Hieraus ergeben sich zum Teil erhebliche Energiepreiszuschläge pro kWh elektrische Energie, je nach deren Herkunft, wie in Bild 8.2 dargestellt (SCHWEIZER. WASSERWIRTSCHAFTSVERBAND, 1999).

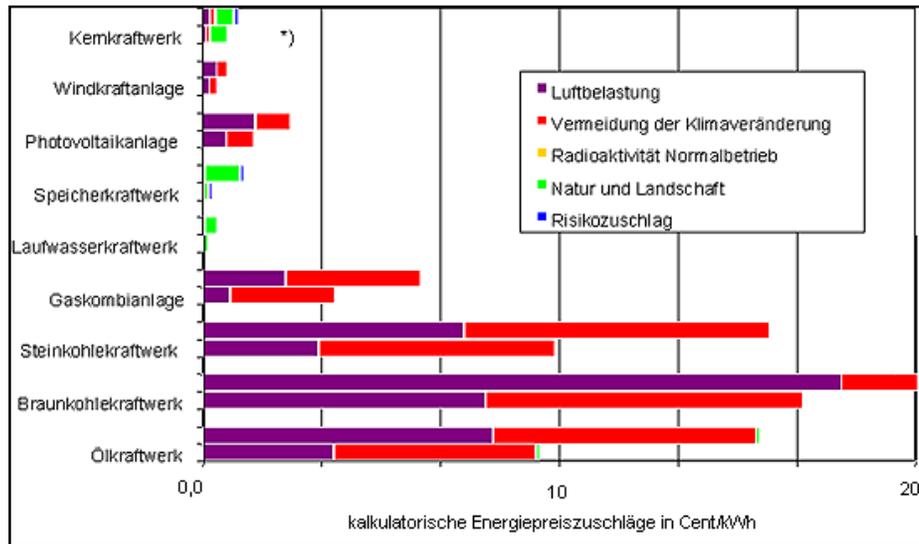


Bild 8.2: Bandbreite externer kalkulatorischer Kostenzuschläge regenerativer Energieträger (Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, 1999)

*) Kernenergie ohne Bandbreite der externen Kosten der Risikoverision von 1 - 20 Cent/kWh

Speicher- und Laufwasserkraftwerke bedeuten im Vergleich zu anderen Stromerzeugungsarten nur einen geringen Eingriff in Natur und Landschaft. Das Fehlen des Eingriffs in Natur und Landschaft bei den Kohlekraftwerken begründet sich in der Tatsache, dass die Schweiz zu 100 % ihre Kohle importiert und deshalb keine Tagebaue besitzt. Dies würde bei einer Anpassung an bundesdeutsche Verhältnisse deutlich anders darzustellen sein. Aus dieser Berechnung heraus ergäbe sich für unterschiedliche Kraftwerkstypen eine Bandbreite externer kalkulatorischer Kostenzuschläge (

Bild 8.3).

Durch die Einbeziehung der externen Kosten zur Strombereitstellung (hellblaue Zusatzbalken) ist die Stromproduktion aus Abwasser mit anderen Energieträgern konkurrenzfähig.

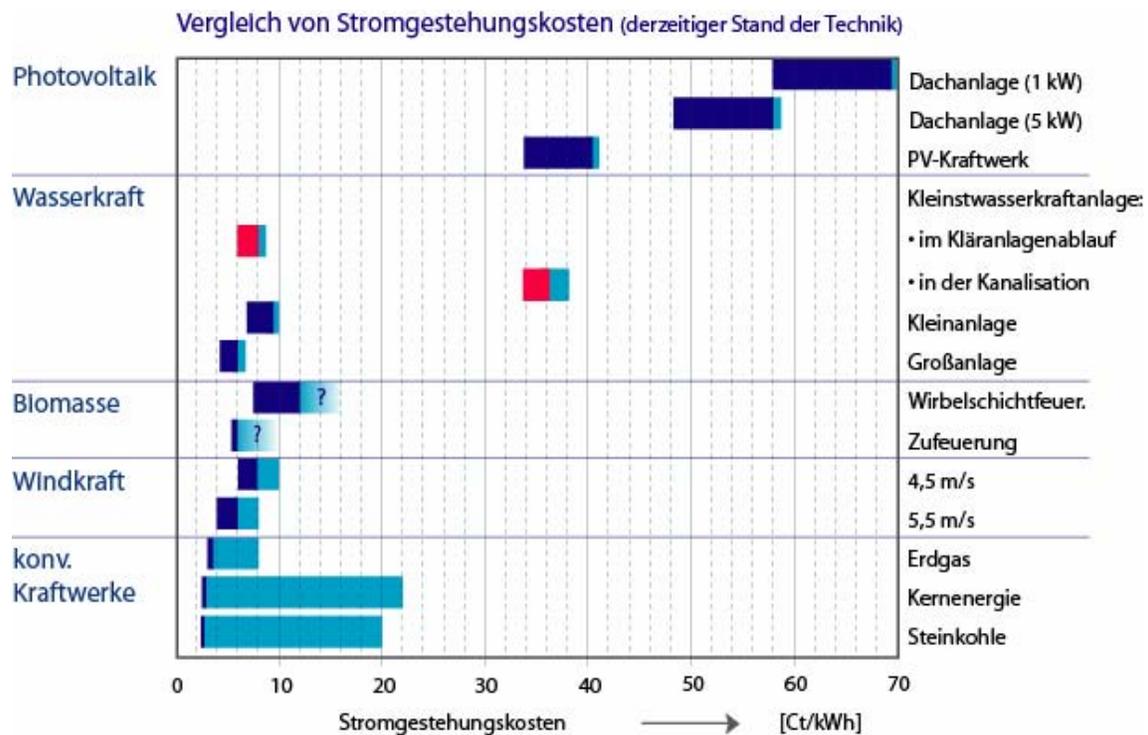


Bild 8.3: Vergleich von Stromgestehungskosten verschiedener Energieträger unter Einbeziehung externer Kosten

Unter einer rein wirtschaftlichen Betrachtungsweise ist die Stromerzeugung aus Wasserkraft im Kläranlagenablauf im Vergleich mit anderen regenerativen Energieträgern wie beispielsweise Biomasse und Windkraft ökonomisch vorteilhaft.

Unter Einbeziehung betriebswirtschaftlicher Aspekte wie der externen kalkulatorischen Kostenzuschläge können die Stromgestehungskosten deutlich unterhalb konventioneller Kraftwerke liegen.

9 Bewertung

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde die Einsatzfähigkeit eines Wasserrades zur Energiegewinnung in der Abwasserableitung unter betriebstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten untersucht. Die strukturellen Voraussetzungen für das Vorhaben waren optimal. Für die Integration der Kleinstwasserkraftanlage stand ein Absturzbauwerk mit einem vorgelagerten Stauraumkanal zur Verfügung.

Nach der Inbetriebnahme des Wasserrades führte ein gravierender Montagefehler zur Zerstörung der Generator-Getriebeeinheit einschließlich der dazugehörigen Elektroinstallationen. Nach Reparatur und erneuter Inbetriebnahme konnten nach weiteren Betriebsstörungen Daten zum Betrieb gewonnen werden. Während der Betriebsphase lag die Energieproduktion im Mittel bei 65 kWh/d. Durch die Verbesserung der Abwasserzuführung konnte die Energieproduktion um etwa 14 kWh auf etwa 80 kWh/d gesteigert werden.

Der im Vorfeld der Untersuchung unterstellte hohe Reinigungsaufwand trat innerhalb des Betriebes nicht auf. Ablagerungen von groben Schmutzstoffen waren nicht feststellbar. Anhaftende Feinschmutzpartikel zeigten sich lediglich als dünne Auflage des Wasserrades. Der Einsatz eines automatisierten Reinigungsgerätes war somit nicht notwendig.

Zur Erreichung einer hohen Betriebsdauer wurde das Wasserrad zum Teil über passive Maßnahmen gegen Korrosion geschützt. Wie der Praxisbetrieb zeigte, reichten die korrosionsmindernden Maßnahmen für einen dauerhaften Anlagenschutz nicht aus. Dies kann durch die Verwendung homogener, chemisch widerstandsfähiger Materialien wie beispielsweise von rostfreiem Stahl gewährleistet werden. Um das Wasserrad vor weiteren Schäden durch die bereits massive Korrosion zu schützen, könnten Opferanoden zum Einsatz kommen.

Da die Kleinstwasserkraftanlage im vorliegenden Projekt in der Kanalisation und damit in einer Ex-Schutzzone eingebaut wurde, mussten alle elektrotechnischen Geräte und Anlagenbestandteile der entsprechenden Schutzklasse genügen. Um das Innere der eingebauten Verteilerdosen, Anschlussklemmen etc. vor Feuchtigkeit zu schützen und damit Anlagenausfällen vorzubeugen, wurden diese mit Kunstharz ausgegossen.

Unter wirtschaftlichen sowie betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten ist eine Energieproduktion auf Abwasserbasis in der Kanalisation nach derzeitigem Kenntnisstand defizitär. Die Stromgestehungskosten liegen hier bei ca. 35 ct/kWh.

Im Gegensatz dazu bietet die Stromgewinnung aus Abwasser an Kläranlagenabläufen ein auskömmliches Potential für einen wirtschaftlichen Betrieb. Dort können die Stromgestehungskosten unter den Stromvergütungssätzen des EEG liegen. Die Konkurrenzfähigkeit gegenüber anderen Energieträgern steigt unter Einbeziehung betriebswirtschaftlicher Aspekte deutlich an.

Um die Energieproduktion durch das Wasserrad in Aachen, Hohenzollernplatz zu sichern, müssten

- müsste die Anlagensteuerung auf die geringen Nachtabflüsse angepasst,
- der Durchflussmengenmesser kalibriert,
- die Bildung von Kondenswasser in den diversen elektrotechnischen Anlagen-teilen durch geeignete Vermeidungsmaßnahmen ausgeschlossen,
- die Störmeldungen überprüft sowie
- die Ausführung notwendiger Reparaturmaßnahmen durch das zuständige Personal zeitnah angewiesen werden.

Eine weitergehende Steigerung der Energieproduktion wäre durch die Einbindung des vorgelagerten Stauraumkanals realisierbar.

10 Literaturverzeichnis

- ATV (HRSG.) Richtlinien für die hydraulische Berechnung von Schmutz-, Regen-, und Mischwasserkanälen, ATV-Regelwerk Arbeitsblatt A 118, Juni 1977
- ATV (HRSG.) Entwurf und Bau von Kanalisationen und Abwasserpumpwerken, Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik, Bd.2, 3. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1982
- ATV (HRSG.) Bau und Betrieb der Kanalisation, ATV-Handbuch, 4. Auflage, Ernst & Sohn Verlag Berlin 1995
- ATV (HRSG.) Bauwerke in Entwässerungsanlagen, ATV-Regelwerk Arbeitsblatt A 241, Juni 1996
- ATV-DVWK A 157, Bauwerke der Kanalisation; November 2000
- ATV-DVWK A 241, Bauwerke in Entwässerungsanlagen, 30. November 1996
- BALKE, K.D.
KLEY, W. Die Grundwassertemperaturen in Ballungsgebieten, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht T 81-028, Februar 1981
- BEITZ, W.
KÜTTNER, K.-H. Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 16 Auflage, 1987, Springer-Verlag, ISBN 3-540-18009-5
- BETR SICHV Richtlinie 1999/92/EG, Richtlinie über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können, (Fünfzehnte Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG), 16. Dezember 1999, Amtsblattnr. L 023 vom 28/01/2000 S. 0057 - 0064
- CHENAL, R.
VUILLERAT, C. A.
RODUIT, J. Elektrizität aus Abwassersystemen, Konzept, Realisation, Potential, Bundesamt für Energiewirtschaft in Bern unter Mitarbeit des Bundesamtes für Wasserwirtschaft in Biel und des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft in Bern, Bestellnr. 805.209 df, Bern 1995
- DIN 4045 Abwassertechnische Grundbegriffe, Ausgabe 2003 - 08
- DIN EN 752-2 Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, Teil 2: Anforderungen
- DIN EN 752-3 Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, Teil 3: Planung
- DRESCHMANN, P. ET AL. Einsatzgrenzen bei der Nutzung der Wärme aus kommunalem Abwasser mittels Wärmepumpen, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht T 85-

	074, August 1985
EEG	Gesetz zur Neuregelung des Rechtes der Erneuerbaren Energien im Strombereich, BGl. Nr. 40 vom 31. Juli 2004
FiW	„Energieverbrauch und Energienutzungspotentiale bei der Abwasserableitung,“ MUNLV
GESSLER, FLORIAN	Wasserkraftnutzung in Kläranlagen 2002
HAFNER, PROF. DR.	Ingenieurbüro, Bilsteinstraße 11, 58313 Herdecke, Vortrag: Strom aus Trinkwasser und Abwasser – Ein Überblick
HOSANG, W. BISCHOF, W.	Abwassertechnik, 2., Neubearb. und erw. Auflage, Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig 1998
IFMW	Firmenprospekt der Firma IFMW gGmbH, Nebeniusstraße 34, 76137 Karlsruhe
IKT	IKT Forschungsbericht, Wärmegewinnung aus Abwasserkanälen – Entwicklung eines Anforderungskatalogs für Kläranlagen- und Kanalnetzbetreiber gestützt auf Praxistests mit Wärmetauschern, Dezember 2004
IÖW	Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung: Umweltverträglichkeit kleiner Wasserkraftwerke - Zielkonflikte zwischen Klima- und Gewässerschutz, UBA-Texte 13/98, 1998
KÖNIG, F. VON, JEHLE, C.	Bau von Wasserkraftanlagen – Praxisbezogene Planungsgrundlagen, 3. Auflage, C. F. Müller Verlag Heidelberg, 1997, ISBN 3-7880-7584-8
LWG NRW	Wassergesetz für das Land Nordrhein-Westfalen LWG – Landeswassergesetz, 25. Juni 1995 (GV. NRW. S. 926; 2000 S. 439; 2001 S. 708; 29.4.2003 S. 254; 4.5.2004 S. 259 04; 3.5.2005 S. 463 05)
MEERWARTH, K. W.	Experimentelle und theoretische Untersuchungen am ober-schlächtigen Wasserrad, Dissertation, 28. Februar 1934
MILLER, C. DÜCKER H. P.	Korrosion im Stahlwasserbau, Vorlesungsskript, TU Hamburg-Harburg, Lehrstuhl für Geotechnik und Baubetrieb, 2002/2003
MÜLLER, W.	Die Wasserräder, 2. Auflage, Verlag Moritz Schäfer, Leipzig, 1939
MÜLLER, G. KAUPPERT, K.	Die Wasserräder als hydraulische Kraftmaschinen, Bau-technik 80 (2003), Heft 3
PACER	Einführung in Bau und Betrieb von Kleinstwasserkraftanlagen – Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern, Mai 1993, ISBN 3-905232-20-0

- RECKNAGEL, H.
SPRENGER, E.
SCHRAMEK, R. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 68. Auflage, Oldenbourg Verlag, München Wien 1997
- REN Rationelle Energieverwendung und Nutzung unerschöpflicher Energiequellen, RdErl. Des Ministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes NRW, 2006
- RICHTLINIE 2001/77/EG Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlaments und des Rates Abl. Nr. L 283 vom 27. September 2001 zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt
- RIEDEL, E. Allgemeine organische Chemie, 2. Auflage 1982, de Gryter, ISBN 3-11-008907-6
- REINHARD, W. Handbuch Wasserversorgungs- und Abwassertechnik, Kapitel 8, Bd.2 Abwassertechnik, 5. Ausgabe, Vulkan Verlag, Essen 1995
- REHART GmbH REHART GMBH, Industriestr. 1, 91725 Ehingen
- RITZ ATRO RITZ - ATRO GmbH, Max - Brod - Straße 2, D-90471 Nürnberg
- Schweizerischer Wasserwirtschaftsverbandes Externe Kosten der Wasserkraftnutzung, Verbandsschrift 60 des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes, 1999
- STAUS, A. Wasserradversuche, Die Mühle, 22. November 1928, 65. Jahrgang Nr. 47, S. 1419 ff.
- UMWELTBUNDESAMT (UBA) Wasserkraftanlagen als erneuerbare Energiequelle – rechtliche und ökologische Aspekte, UBA-Text 01/2001, ISSN 0722-186X
- VDEW Stromzahlen 1996, zitiert in: Umwelt 3/98, 1998
- VOß, A. Vortrag aus der Vortragsreihe „EnergieLos!“ an der Universität Dortmund am 11. Januar 2001, Thema: „Regenerative Energien – Nutzen ohne Verbrauch“, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart
- WHG Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts WHG – Wasserhaushaltsgesetz, 19. August 2002 (BGBl. I Nr. 59 vom 23.8.2002 S. 3245; 6.1.2004 S. 2 04; 3.5.2005 S. 1224 05; 21.6.2005 S. 1666 05a; 25.6.2005 S. 1746 05b) Gl.-Nr.: 753-1