

Wissenschaftliche Begleitung des Einsatzes eines Wasserrades zur Stromerzeugung in der Abwasserableitung



Kurzbericht

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

Kurzbericht

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
 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	Dr.-Ing. R. Haußmann
 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	Dr.-Ing. F.-W. Bolle Dipl.-Biol. K. Billmaier Dipl.-Ing. R. Grebbin Dipl.-Ing. B. Wienert TAng J. Schunicht

Inhalt

Verzeichnis der Bilder

Verzeichnis der Tabellen

Verzeichnis der Abkürzungen

	Seite
1 Zusammenfassung	1
2 Veranlassung	3
3 Kenntnisstand	4
3.1 Techniken und Ressourcen zur Wasserkraftnutzung	4
3.2 Auslegung überschlächtiger Wasserräder	5
3.3 Bauwerke im Abwasserbereich zur Integration von Kleinstwasserkraftanlagen	8
3.4 Wasserkraftnutzung in der Abwasserableitung	8
3.5 Nutzbarkeit der (Ab)Wasserkraft in Nordrhein-Westfalen	10
4 Planerische Ausgangsvariante des Absturzbauwerkes und Integration des Wasserrades	11
5 Untersuchungen zur energetischen Leistung des Wasserrades sowie zur Optimierung	13
6 Ergebnisse	15
7 Wirtschaftlichkeit von Wasserkraftanlagen in der Kanalisation	17
8 Ausblick und Empfehlungen	21
9 Literaturverzeichnis	22

Verzeichnis der Bilder

Bild 3.1:	Durchströmturbine (OSSBERGER GMBH) und Wasserkraftschnecke (Firma REHART GmbH)	4
Bild 3.2:	Schema eines ober- und mittel- bis unterschlächtigen Wasserrades	4
Bild 3.3:	Idealisierte Schaufelform für linksgerichteten overschlächtigen Betrieb	7
Bild 3.4:	Seitenansicht eines Absturzbauwerks mit innen liegendem Untersturz sowie einer Steilstrecke (ATV, 1996)	8
Bild 3.5:	Abflussganglinie und Abflussdauerkurve	9
Bild 3.6:	Ableitung der Ausbauwassermengen unter Anwendung der Abflussdauerkurve für den Parallel- und Inselbetrieb	9
Bild 4.1:	Längsschnitt des Absturzbauwerkes Hohenzollernplatz ohne Wasserrad	11
Bild 4.2:	Längsschnitt des Absturzbauwerkes Hohenzollernplatz mit Wasserrad	12
Bild 5.1:	Leistungsdurchflusskurve des Wasserrades vom Freitag, 05.05.2006	13
Bild 5.2:	Leistungsdurchflusskurve des Wasserrades vom Wochenende, 06. – 07.05.2006	14
Bild 5.3:	Hauptschott des Stauraumkanals und Zulaufgerinne zum Wasserrad	14
Bild 6.1:	Generator-Getriebe-Einheit am Wasserrad nach Havarie sowie nach Instandsetzung	15
Bild 6.2:	Zulaufgerinne zum Wasserrad mit Wasserradkasten sowie Einblick in eine Wasserradtasche (24 Monate nach Inbetriebnahme ohne Reinigung)	16
Bild 7.1:	Bandbreite externer kalkulatorischer Kostenzuschläge regenerativer Energieträger (Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, 1999)	20
Bild 7.2:	Vergleich von Stromgestehungskosten verschiedener Energieträger unter Einbeziehung externer Kosten (Voß, 2001)	20

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 7.1:	Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	19
---------------------	--	-----------

Verzeichnis der Abkürzungen

Mathematische Operanten und allgemeine Interpunktionen

ρ	Dichte der Förderflüssigkeit
η	Wirkungsgrad
π	Mathematische Konstante, Kreiszahl
λ	Wärmeleitfähigkeit
Δ	Differenz
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz
Δz	Höhenunterschied
$\varnothing_{\text{Rad}}$	Durchmesser des Wasserrads
ε	Füllungskoeffizient der Wasserradschaufel

Abkürzungsverzeichnis

a	Anno (Jahr), Radkranztiefe
A	Arbeitsblatt
AFA	Abschreibung für Abnutzung
B	Radbreite
c_w	Spezifische Wärmekapazität
d	Tag
d_a	Außendurchmesser
d_i	Innendurchmesser
D	Durchmesser
E	Einwohner, jährliches Energiepotential
E°	Normalpotential
EGW	Einwohnergleichwert
EW	Einwohnerwert ($EW = E + EGW$)
EW	Einwohnerwert
g	Gramm, Newton'sche Gravitationskonstante
GWh	Gigawattstunde

h	Stunde
H	Höhe, Element Wasserstoff
J	Joule
k	Leistungskoeffizient
K	Kelvin
l	Liter
l_n	natürlicher Logarithmus
L	Länge
n	Drehzahl
NI	Normliter
NN	Normalnull
Nm ³	Normkubikmeter
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
s	Sekunde
SK	Stauraumkanal
t	Zeit
u	Umfangsgeschwindigkeit
USW	Unterschlächtiges Wasserrad
V	Volumenstrom, Volt
W	Watt
W _S	Täglicher Schmutzwasseranfall

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. $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ 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. 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.

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. Um die in den Nachtstunden verminderte Wassermenge vollständig zur Energieerzeugung über das Wasserrad zu führen, wurde in das Zulaufgerinne ein Leitblech eingebaut. Entsprechend erhöhte sich die elektrische Energieabgabe um 14 kWh auf ca. 80 kWh.

Der im Vorfeld der Untersuchungen unterstellte hohe Reinigungsaufwand zeigte sich im Betrieb nicht. Eine Ablagerung von groben Schmutzstoffen war nicht feststellbar. Eine Optimierung des Reinigungsaufwands war deshalb nicht notwendig.

Zur Erreichung einer hohen Betriebsdauer wurde das Wasserrad zum Teil über passive Maßnahmen gegen Korrosion geschützt. Wie der Praxisbetrieb zeigte, reichen diese korrosionsmindernden Maßnahmen für einen dauerhaften Anlagenschutz 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, wird das Anbringen von Opferanoden empfohlen.

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 Veranlassung

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 beinhaltet 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.

3 Kenntnisstand

3.1 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. Turbinen zählen zu den Strömungsmaschinen und decken alle Leistungsbereiche von ca. 10 kW bis in den mehrstelligen Megawattbereich ab. Für die Nutzung kleiner Wasserkräfte ist die Ossberger-Turbine (Bild 3.1) mit horizontalem und vertikalem Zufluss entwickelt worden.

Im kleinen Leistungsbereich bis 300 kW bietet die Wasserkraftschnecke eine weitere Möglichkeit zur Wasserkraftnutzung. Der Einsatz ist durch die Dimension der Maschine sowie der Notwendigkeit eines ungehinderten Abflusses des Abwassers auf offene Abläufe beschränkt.

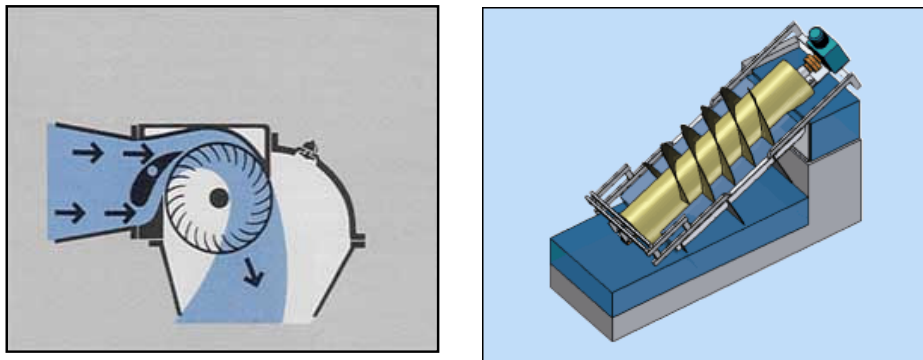


Bild 3.1: Durchströmturbine (OSSBERGER GMBH) und Wasserkraftschnecke (Firma REHART GmbH)

Wasserräder dienen zur Erzeugung elektrischer Energie im Leistungsbereich bis ca. 50 kW. Aufgrund der Betriebsweise bzw. der Art der Wasserzuführung unterscheidet man zwischen unter-, mittel- und oberflächtigen Wasserrädern.

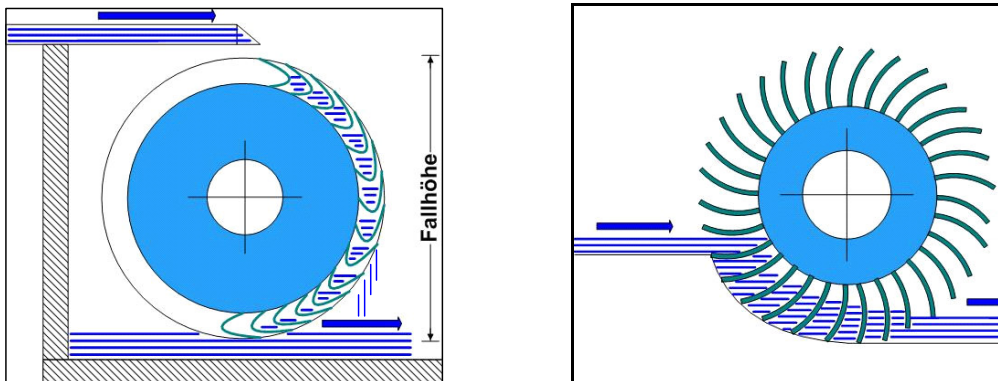


Bild 3.2: Schema eines ober- und mittel- bis unterschlächtigen Wasserrades

3.2 Auslegung überschlächtiger Wasserräder

Das Wasserrad besitzt aufgrund der geringen hydrodynamischen Verluste, des hohen Drehmomentes, der einfachen Technik sowie der robusten Bauweise gegenüber anderen Wasserkraftmaschinen deutliche Systemvorteile. Entsprechend den im Absturzbauwerk herrschenden Systemvoraussetzungen wurde im vorliegenden Beispiel für die Nutzung der Energie des Abwassers ein überschlächtiges Wasserrad gewählt. Das überschlächtige Wasserrad nutzt ausschließlich die Schwerkraft des Wassers. 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)

Die Kennwerte für ein Wasserrad sind gegeben durch die Ausbauwassermenge Q , die Fallhöhe H und den Raddurchmesser D . Wie in Kapitel 3.4 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 [m/s] idealerweise 1,3 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 [m³/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 überschlächtigen 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 überschlächtigen 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 3.3 zeigt beispielhaft die Profile der gebogenen Schaufeln, wobei in grün der Halbkreis und in rot der Bogen angedeutet sind.

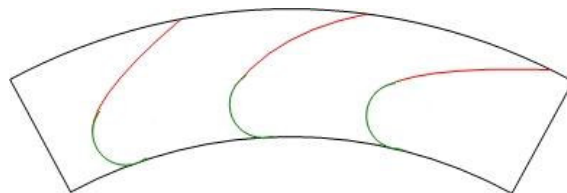


Bild 3.3: Idealisierte Schaufelform für linksgerichteten überschlächtigen Betrieb

3.3 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 Maschinentechnik 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, Steilstrecken und in Ausnahmefällen Kläranlagenabläufe.

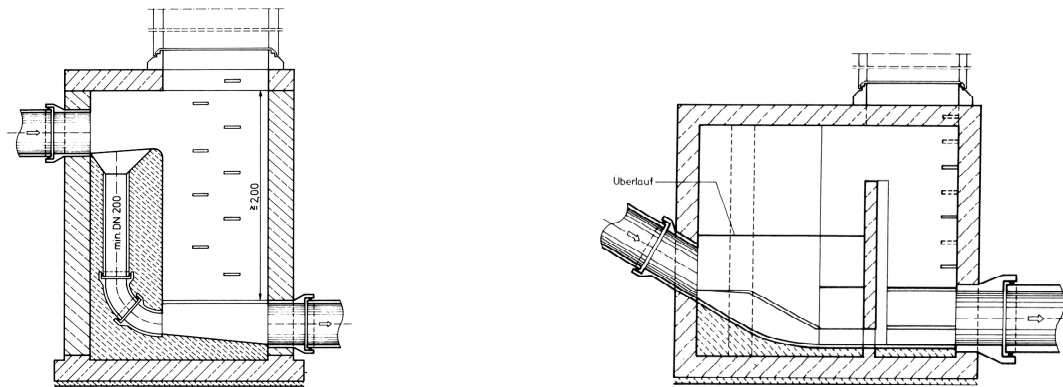


Bild 3.4: Seitenansicht eines Absturzbauwerks mit innen liegendem Untersturz sowie einer Steilstrecke (ATV, 1996)

3.4 Wasserkraftnutzung in der Abwasserableitung

Für die Realisierung einer (Kleinst)Wasserkraftanlage sind das verfügbare Energiepotential sowie die baulichen Erschließungsmöglichkeiten zu ermitteln. Die zur Verfügung stehende Wassermenge für den relevanten Trockenwetterfall lässt sich rechnerisch aus den Einleitungen ermitteln oder dem Generalentwässerungsplan (GEP) entnommen werden. In der wasserbaulichen Praxis werden Daten von einer täglichen Messung über mindestens ein Jahr für die Bildung der Abflussganglinie herangezogen (VON KÖNIG, JEHLE, 1997). Durch Aufsummieren der Einzelwerte wird eine Abflussganglinie erstellt und die Abflussdauerkurve gebildet.

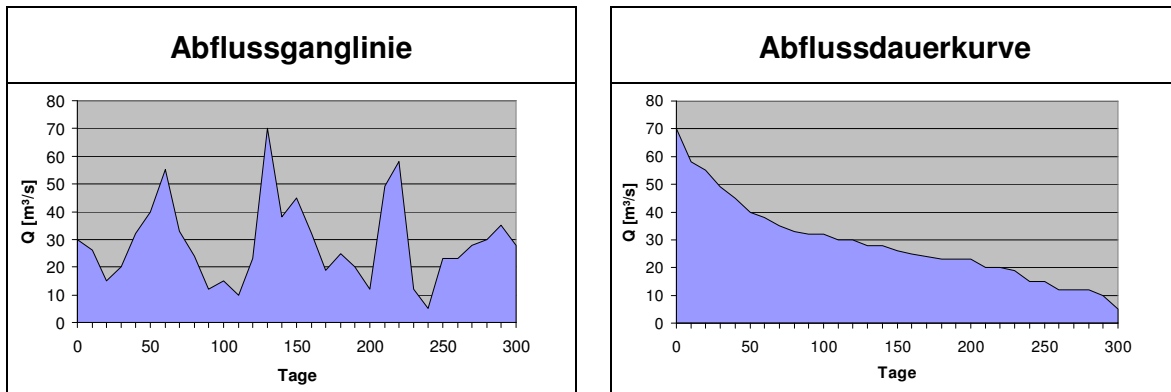


Bild 3.5: Abflussganglinie und Abflussdauerkurve

Um aus der nun bekannten Wassermenge die Auslegung der Wasserkraftanlage vorzunehmen, ist die Betriebsart festzulegen. Ein Kleinstwasserkraftanlage kann im Insel- oder Parallelbetrieb gefahren werden (PACER, 1993). Im Inselbetrieb soll die Anlage über einen langen Zeitraum Strom produzieren. Im Parallelbetrieb steht die maximierte Stromproduktion im Mittelpunkt. Für den Inselbetrieb liegt die Ausbauwassermenge nach Erfahrungswerte aus dem Wasserkraftanlagenbau bei etwa 250 Tagen, für den Parallelbetrieb zwischen 50 und 90 Tagen. Diese Werte und können den Erfordernissen angepasst werden (VON KÖNIG, JEHLE, 1997).

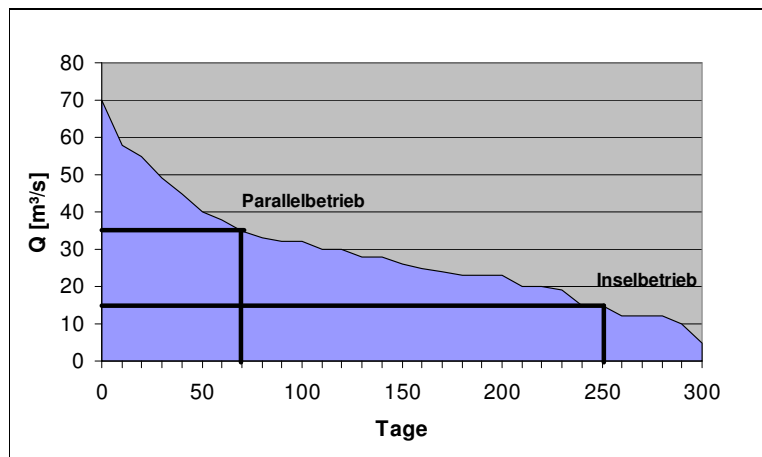


Bild 3.6: Ableitung der Ausbauwassermengen unter Anwendung der Abflussdauerkurve für den Parallel- und Inselbetrieb

3.5 Nutzbarkeit der (Ab)Wasserkraft in Nordrhein-Westfalen

Wie eingangs erwähnt, beschränkt sich die Nutzung der (Ab)Wasserkraft innerhalb der Abwasserableitung auf Absturzbauwerke, Teilstrecken und Fallschächte. Aus energetischen Gründen ist für einen wirtschaftlichen Betrieb eine Fallhöhe von mindestens 2 m und ein minimaler Trockenwetterabfluss von 80 l/s notwendig.

Die Anzahl der Bauwerke in NRW, die diese Bedingungen erfüllen, wurde anhand vorliegender strukturspezifischer Kenndaten (Einwohnerzahl, Topographie, Gebietsfläche, Abwasservolumenströme) abgeschätzt und daraus das energetische Potential berechnet. Für Nordrhein-Westfalen steht theoretisch ein energetisches Potential von ca. 430 bis 3.040 MW zur Verfügung.

Im Fall der Kläranlagen ist das Wasserkraftpotential vom Bemessungsabfluss sowie vom hydraulischen Gefälle zwischen Kläranlagenablauf und Vorfluter abhängig. Insgesamt gibt es in NRW ca. 683 kommunale Abwasserbehandlungsanlagen (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 nutzbare Fallhöhe > 2 Meter aufweisen, gering ist.

Vereinzelt wurden bereits Projekte zur Erzeugung elektrischer Energie aus Abwasser in Deutschland realisiert. Im Auslauf der Kläranlage Karlsruhe wird ein unterschlächtiges Wasserrad betrieben. Weitere Wasserräder sind in den Abläufen der Kläranlagen Warendorf und Biggetal in Betrieb. Im Auslauf der Kläranlage Rottenburg/Neckar versieht eine Wasserkraftschnecke ihren Dienst (HAFNER). Die Abwasserwerke der Stadt Emmerich betreiben seit Juni 2000 an ihrem Kläranlagenauslauf eine Durchströmturbine.

4 Planerische Ausgangsvariante des Absturzbauwerkes und Integration des Wasserrades

In den Tiefsammler Süd-Ost in Aachen wurden zur Überwindung der Höhendifferenzen im Rahmen der Gesamtmaßnahme zwei Absturzbauwerke integriert. Das Absturzbauwerk am Hohenzollernplatz war aufgrund einer Höhendifferenz von 12,5 Metern für die Aufnahme eines Wasserrades prädestiniert.

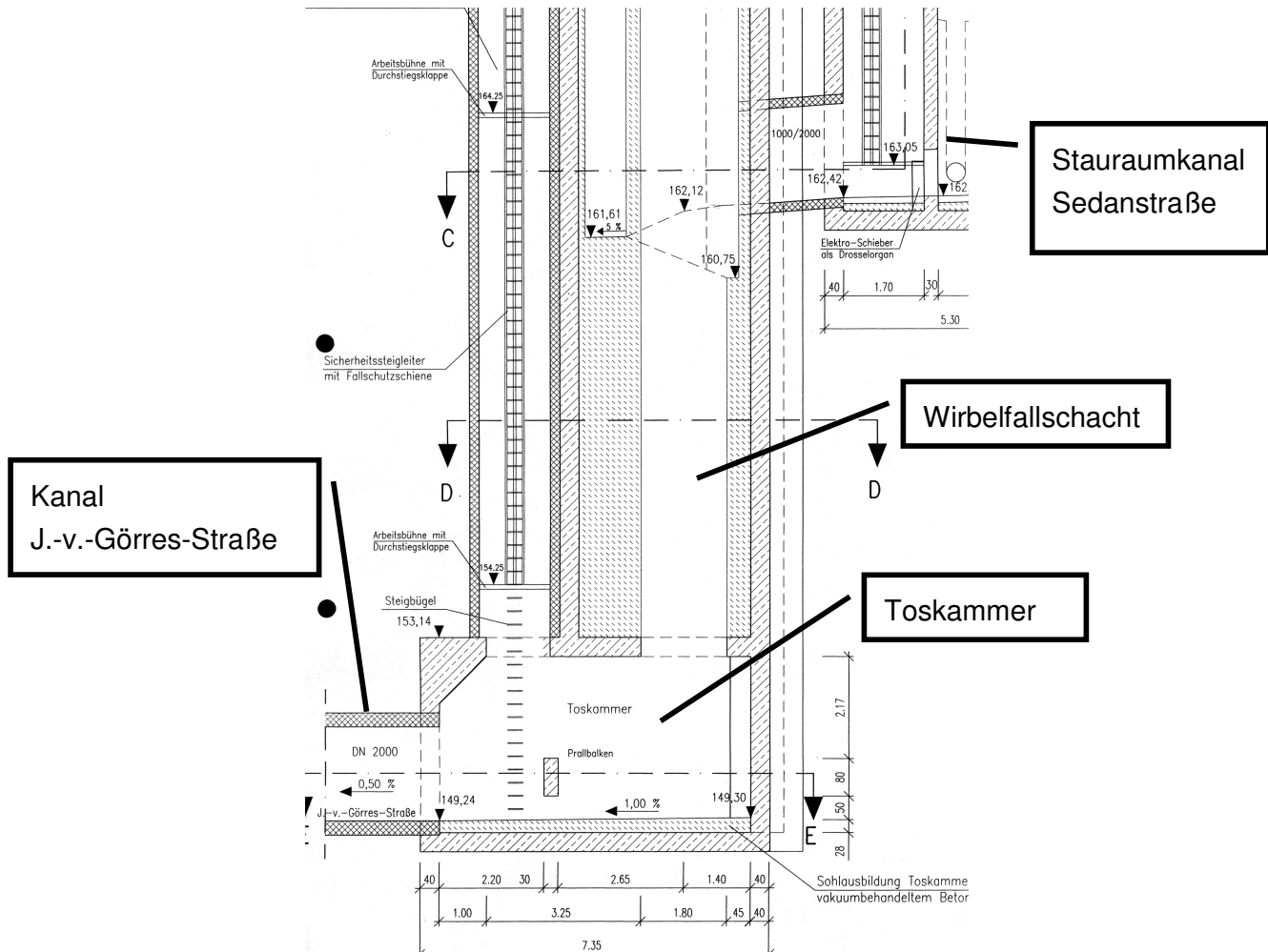


Bild 4.1: Längsschnitt des Absturzbauwerkes Hohenzollernplatz ohne Wasserrad

In der ursprünglichen Planung ohne Wasserrad war hinter dem Wirbelfallschacht die Aufnahme des Be- und Entlüftungsschachtes für die Toskammer vorgesehen. Hier bot sich ausreichender Raum für die Erweiterung des Bauwerkes zur Aufnahme eines Wasserrades.

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 konnte.

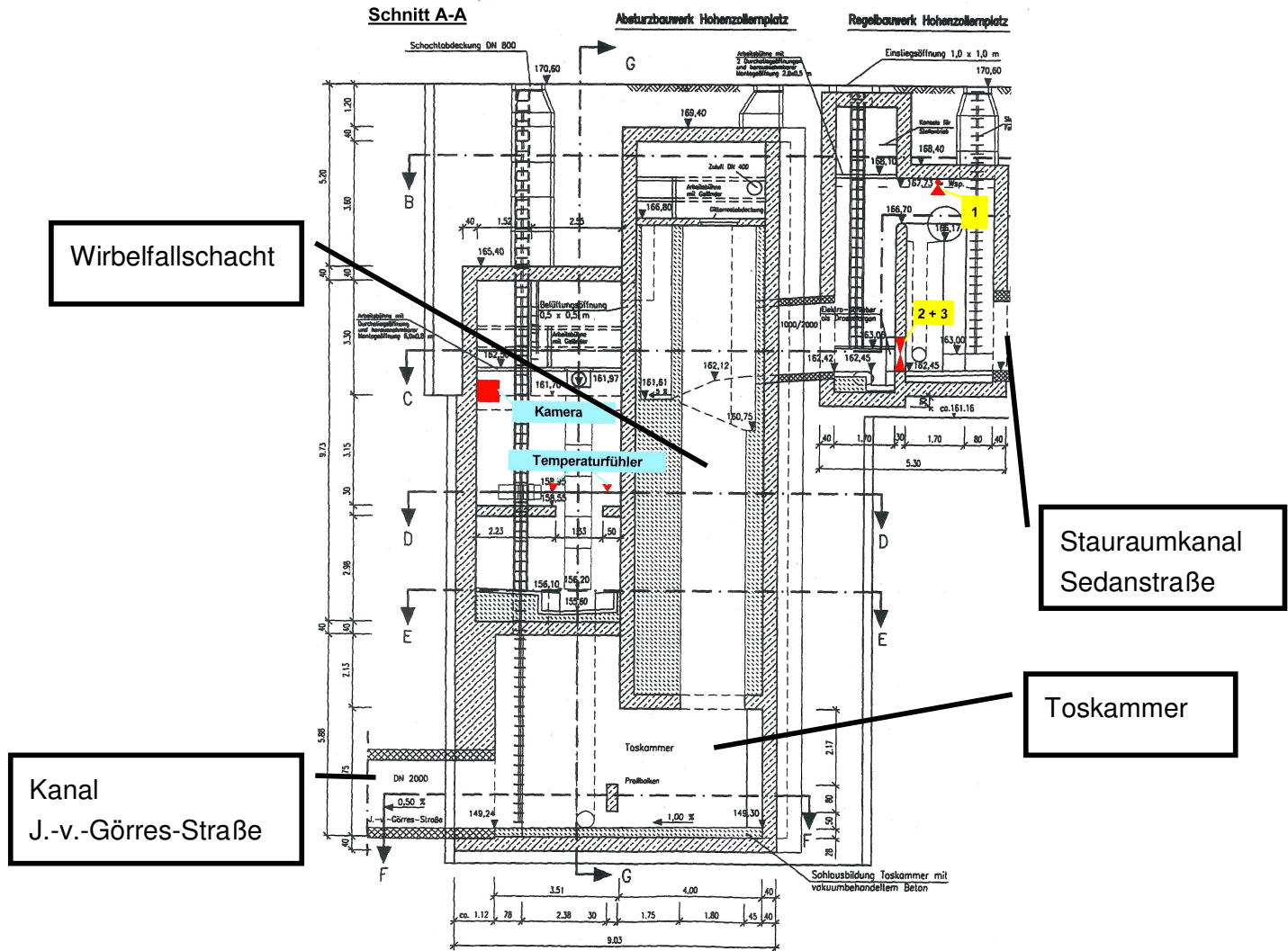


Bild 4.2: Längsschnitt des Absturzbauwerkes Hohenzollernplatz mit Wasserrad

Aufgrund der räumlichen Möglichkeiten wurde die Anordnung eines Wasserrads mit einem Durchmesser von ca. 5,5 m gewählt. Aus energetischen Erwägungen wäre die Anordnung zweier Räder übereinander zweckmäßig gewesen. Der Charakter eines Pilotvorhabens veranlasste den Bauherrn zur Wahl eines Rades unter Verzicht der energetischen Nutzung eines Teiles der Fallhöhe. Zur Nutzung von Abflussspitzen wurde das Wasserrad für einen Trockenwetterabfluss von max. 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.

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.

5 Untersuchungen zur energetischen Leistung des Wasserrades sowie zur Optimierung

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. Bild 5.1 zeigt für einen Werktag eine Leistungsdurchflusskurve mit zwei Regenereignissen.

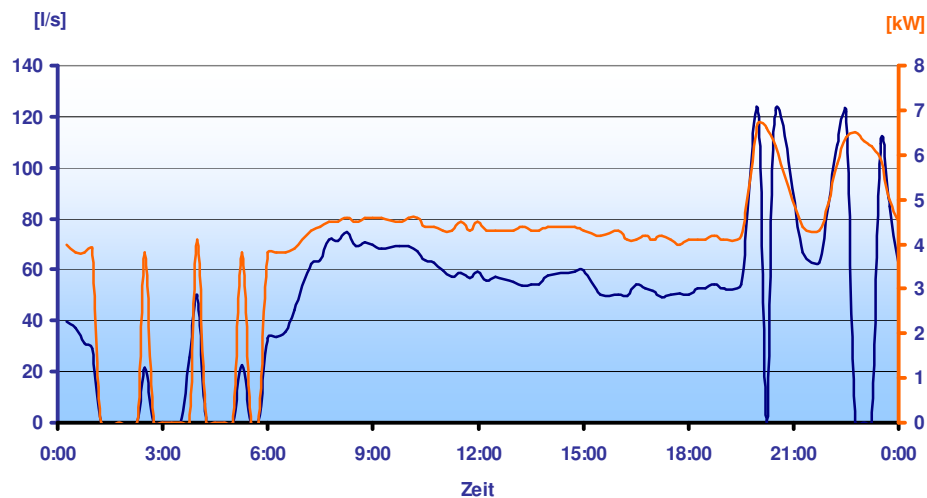


Bild 5.1: Leistungsdurchflusskurve des Wasserrades vom Freitag, 05.05.2006

An den Wochenenden (Bild 5.2) schlägt sich die Veränderung des Tagesablaufes der Menschen erkennbar in der Ganglinie des zufließenden Abwassers nieder.

Innerhalb der Betriebsphasen sollten die Kleinstwasserkraftanlage zur Energieerzeugung optimiert werden. Zu diesem Zweck wurde ein Leitblech eingebaut, um in den abflussschwachen Nachtstunden das zur Verfügung stehende Abwasser zur Energieerzeugung über das Wasserrad zu führen (Bild 5.3). In Bild 5.3 ist das Hauptschott des Stauraumkanals mit dem nachträglich eingebauten Leitblech zu sehen und das nach neun Uhr geführte Zulaufgerinne zum Wasserrad.

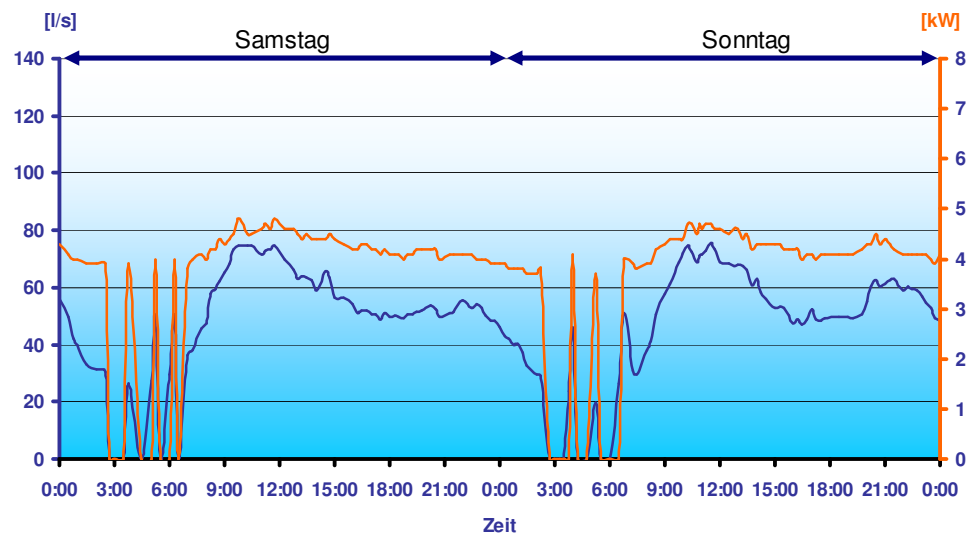


Bild 5.2: Leistungsdurchflusskurve des Wasserrades vom Wochenende, 06. – 07.05.2006



Bild 5.3: Hauptschott des Stauraumkanals und Zulaufgerinne zum Wasserrad

6 Ergebnisse

Kurz nach Beginn der Untersuchungsphase führte ein Montagefehler an der Wasserkraftanlage zur Zerstörung der Getriebe-Generatoreinheit. Für eine Instandsetzung waren unter anderem der Einbau einer neuen Getriebe-Generatoreinheit, die Erneuerung der Elektrotechnik, etc. notwendig (Bild 6.1).

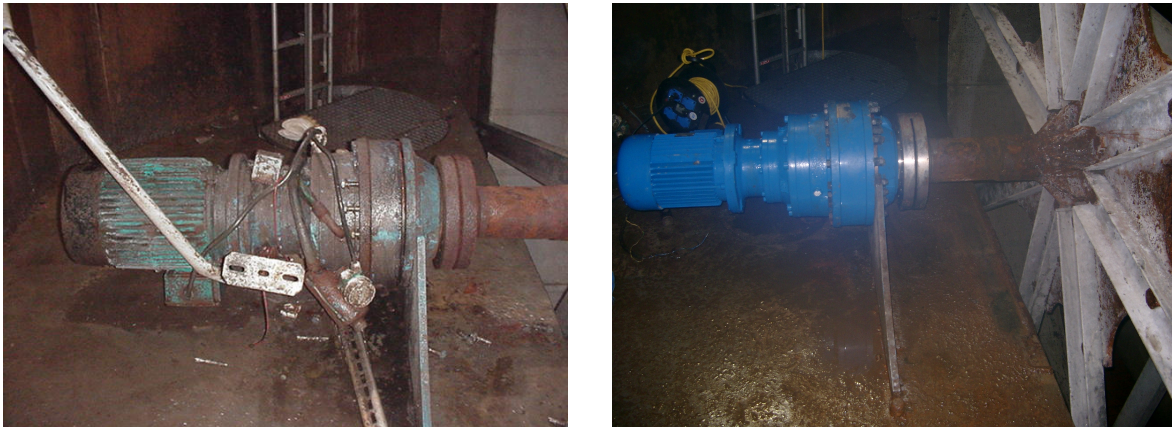


Bild 6.1: Generator-Getriebe-Einheit am Wasserrad nach Havarie sowie nach Instandsetzung

Nach der Wiederinbetriebnahme der Wasserkraftanlage kam es aufgrund eines fehlerhaften Anschlusses zur Aufzeichnung nicht verwertbarer Betriebsdaten sowie durch undichte Kabelabzweigkästen zu erneuten Betriebsausfällen. Nach Fehlerkorrektur lief das Wasserrad störungsfrei. Aufgrund eines nachfolgenden Fehlers in der Steuerung musste die Anlage erneut aus dem Netz genommen werden.

Im Mittel ergab die über das Wasserrad geführte Wassermenge eine Energieabgabe von etwa 65 kWh pro Tag. Durch die Optimierung des Zulaufes wurde diese auf 80 kWh pro Tag gesteigert.

Durch die Installation des Wasserrades in den Bereich der Kanalisation wurde bei der Konzeption des Projektes unterstellt, dass hieraus ein erhöhter Wartungsaufwand resultiert. Wie sich in den Begehungen zeigte, konnten weder am Wasserrad noch im Spritzwasserbereich Ablagerungen von groben Feststoffen festgestellt werden. Im Ergebnis war der Einsatz automatischer Reinigungseinrichtungen nicht notwendig (Bild 6.2).



Bild 6.2: Zulaufgerinne zum Wasserrad mit Wasserradkasten sowie Einblick in eine Wasserradtasche (24 Monate nach Inbetriebnahme ohne Reinigung)

Am Wasserrad selbst traten z. T. massive Korrosionsschäden auf (Bild 6.1). 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. Mit zunehmender Standzeit verstärkte sich die Korrosion massiv.

Zur Erfüllung des Ex-Schutzes waren die Vorschriften für Zone 1 einzuhalten. Da nicht alle Geräte mit einer entsprechenden Zulassung beschafft werden konnten, mussten die Lager des Wasserrades mit Temperatursensoren sowie das Getriebe mit einer elektronischen Ölstandskontrolle zusätzlich ausgerüstet werden. Technische Nachteile aus den Vorgaben ergaben sich an den Kabelabzweigkästen, welche durch die gasdiffusionsoffene Bauweise im Innern starke Kondenswasserbildung zeigten, was zu ständigen Anlagenausfällen aufgrund auftretender Kurzschlussströme führte. Abhilfe brachte hier das Ausgießen mit Kunstharz.

7 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 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 Investitionen für die Kosten der Maschinen- und MSR-Technik sowie die Baukosten. Der in die Kapitaldienstberechnung einfließende aktuelle Zinssatz (4,8 %) wurde über die Amortisationszeit gleichbleibend angesetzt.

Als Grundlage für die Festlegung der Amortisationszeiten dienten die in den KVR-Leitlinien festgelegten Nutzungszeiten für Kleinstwasserkraftanlagen. 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 Abschreibungszeiten für das fiktive Vergleichsbeispiel an den Amortisationszeiten ohne Einschränkung.

Für die Investitionskosten sind die Baukosten zur Abänderung von Bauwerken und die Schaffung von Zulauf- und Ablaufgerinnen maßgebend.

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 war. 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. Tabelle 7.1 zeigt das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

Die auf Basis der Kosten-Ertragsrechnung ermittelten Stromgestehungskosten für Kleinstwasserkraftanlagen im Bereich der Abwasserableitung liegen für die gemachten Rechenbeispiele, zwischen etwa 8 und 35 ct/kWh.

Erweitert man die wirtschaftliche Kostenbetrachtung um betriebswirtschaftliche Faktoren und addiert zu den Stromgestehungskosten die externen Kosten (Bild 7.1) für eine Strombereitstellung hinzu, so relativiert sich die Stromgestehungskosten im Vergleich zu anderen Energieträgern (Bild 7.2). Dies hätte aufgrund der Energiepreiszuschläge, einen deutlichen Preisanstieg zur Folge.

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

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 externer Kostenzuschläge können die Stromgestehungskosten deutlich unterhalb konventioneller Kraftwerke liegen.

Wirtschaftlichkeitsberechnung																																													
Wasserkraftanlage Hohenzollernplatz	Fiktives Vergleichsbeispiel einer Wasserkraftanlage im Kläranlagenablauf																																												
Leistungspotential und Ausbaugröße Leistungspotential <table> <tr><td>Mittlerer Volumenstrom</td><td>0,11 m³/s</td></tr> <tr><td>Höhen-Abfluss-Differenz</td><td>5,75 m</td></tr> <tr><td>Erdbeschleunigung</td><td>9,81 m/s²</td></tr> <tr><td>Dichte des Wassers</td><td>998 kg/m³</td></tr> <tr><td>Betriebsstunden pro Jahr</td><td>6307 h</td></tr> <tr><td>Wirkungsgrade $\eta_{WK-Maschine}$</td><td>0,85</td></tr> <tr><td>$\eta_{Generator}$</td><td>0,95</td></tr> <tr><td>$\eta_{Reibung}$</td><td>0,95</td></tr> <tr><td>Rechn. Gesamtwirkungsgrad</td><td>0,77</td></tr> <tr><td></td><td>4,76 kW</td></tr> </table> Ausbaugröße <table> <tr><td>Generatorleistung</td><td>6,50 kW</td></tr> </table>	Mittlerer Volumenstrom	0,11 m³/s	Höhen-Abfluss-Differenz	5,75 m	Erdbeschleunigung	9,81 m/s²	Dichte des Wassers	998 kg/m³	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	Generatorleistung	6,50 kW	Leistungspotential und Ausbaugröße Leistungspotential <table> <tr><td>Mittlerer Volumenstrom</td><td>1,00 m³/s</td></tr> <tr><td>Höhen-Abfluss-Differenz</td><td>2,00 m</td></tr> <tr><td>Erdbeschleunigung</td><td>9,81 m/s²</td></tr> <tr><td>Dichte des Wassers</td><td>998 kg/m³</td></tr> <tr><td>Betriebsstunden pro Jahr</td><td>7884 h</td></tr> <tr><td>Wirkungsgrade $\eta_{WK-Maschine}$</td><td>0,85</td></tr> <tr><td>$\eta_{Generator}$</td><td>0,95</td></tr> <tr><td>$\eta_{Reibung}$</td><td>0,95</td></tr> <tr><td>Rechn. Gesamtwirkungsgrad</td><td>0,77</td></tr> <tr><td></td><td>15,05 kW</td></tr> </table> Ausbaugröße <table> <tr><td>Generatorleistung</td><td>20,00 kW</td></tr> </table>	Mittlerer Volumenstrom	1,00 m³/s	Höhen-Abfluss-Differenz	2,00 m	Erdbeschleunigung	9,81 m/s²	Dichte des Wassers	998 kg/m³	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	Generatorleistung	20,00 kW
Mittlerer Volumenstrom	0,11 m³/s																																												
Höhen-Abfluss-Differenz	5,75 m																																												
Erdbeschleunigung	9,81 m/s²																																												
Dichte des Wassers	998 kg/m³																																												
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																																												
Generatorleistung	6,50 kW																																												
Mittlerer Volumenstrom	1,00 m³/s																																												
Höhen-Abfluss-Differenz	2,00 m																																												
Erdbeschleunigung	9,81 m/s²																																												
Dichte des Wassers	998 kg/m³																																												
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																																												
Generatorleistung	20,00 kW																																												
Investitionen <table> <tr><td>Maschinelle und elektrische Anlagen</td><td>74.000 €</td></tr> <tr><td>Bauliche Anlagenteile</td><td>51.000 €</td></tr> <tr><td>Summe Investitionen</td><td>125.000 €</td></tr> </table> Spezifische Investitionen auf Basis der Generatorleistung 19.231 €/kW	Maschinelle und elektrische Anlagen	74.000 €	Bauliche Anlagenteile	51.000 €	Summe Investitionen	125.000 €	Investitionen <table> <tr><td>Maschinelle und elektrische Anlagen</td><td>110.000 €</td></tr> <tr><td>Bauliche Anlagenteile</td><td>38.000 €</td></tr> <tr><td>Summe</td><td>148.000 €</td></tr> </table> Spezifische Investitionen auf Basis der Generatorleistung 7.400 €/kW	Maschinelle und elektrische Anlagen	110.000 €	Bauliche Anlagenteile	38.000 €	Summe	148.000 €																																
Maschinelle und elektrische Anlagen	74.000 €																																												
Bauliche Anlagenteile	51.000 €																																												
Summe Investitionen	125.000 €																																												
Maschinelle und elektrische Anlagen	110.000 €																																												
Bauliche Anlagenteile	38.000 €																																												
Summe	148.000 €																																												
Kostenberechnung Kapitaldienst: Maschinelle und elektrische Anlagen <table> <tr><td>Annuitätsfaktor</td><td>0,084</td></tr> <tr><td>Laufzeit</td><td>18 a</td></tr> <tr><td>Zinssatz</td><td>4,8 %</td></tr> <tr><td></td><td>6.232 € /a</td></tr> </table> Kapitaldienst: Bauliche Anlagenteile <table> <tr><td>Annuitätsfaktor</td><td>0,053</td></tr> <tr><td>Laufzeit</td><td>50 a</td></tr> <tr><td>Zinssatz</td><td>4,8 %</td></tr> <tr><td></td><td>2.708 € /a</td></tr> </table> Betrieb <table> <tr><td>7 % vom spez. Invest</td><td>1.346 € /a</td></tr> <tr><td></td><td>10.286 € /a</td></tr> </table>	Annuitätsfaktor	0,084	Laufzeit	18 a	Zinssatz	4,8 %		6.232 € /a	Annuitätsfaktor	0,053	Laufzeit	50 a	Zinssatz	4,8 %		2.708 € /a	7 % vom spez. Invest	1.346 € /a		10.286 € /a	Kostenberechnung Kapitaldienst: Maschinelle und elektrische Anlagen <table> <tr><td>Annuitätsfaktor</td><td>0,064</td></tr> <tr><td>Laufzeit</td><td>30 a</td></tr> <tr><td>Zinssatz</td><td>4,8 %</td></tr> <tr><td></td><td>6.993 € /a</td></tr> </table> Kapitaldienst: Bauliche Anlagenteile <table> <tr><td>Annuitätsfaktor</td><td>0,053</td></tr> <tr><td>Laufzeit</td><td>50 a</td></tr> <tr><td>Zinssatz</td><td>4,8 %</td></tr> <tr><td></td><td>2.018 €</td></tr> </table> Betrieb <table> <tr><td>5 % vom spez. Invest</td><td>370 € /a</td></tr> <tr><td></td><td>9.381 € /a</td></tr> </table>	Annuitätsfaktor	0,064	Laufzeit	30 a	Zinssatz	4,8 %		6.993 € /a	Annuitätsfaktor	0,053	Laufzeit	50 a	Zinssatz	4,8 %		2.018 €	5 % vom spez. Invest	370 € /a		9.381 € /a				
Annuitätsfaktor	0,084																																												
Laufzeit	18 a																																												
Zinssatz	4,8 %																																												
	6.232 € /a																																												
Annuitätsfaktor	0,053																																												
Laufzeit	50 a																																												
Zinssatz	4,8 %																																												
	2.708 € /a																																												
7 % vom spez. Invest	1.346 € /a																																												
	10.286 € /a																																												
Annuitätsfaktor	0,064																																												
Laufzeit	30 a																																												
Zinssatz	4,8 %																																												
	6.993 € /a																																												
Annuitätsfaktor	0,053																																												
Laufzeit	50 a																																												
Zinssatz	4,8 %																																												
	2.018 €																																												
5 % vom spez. Invest	370 € /a																																												
	9.381 € /a																																												
Ertragsberechnung Einnahmen aus Stromproduktion <table> <tr><td>Jährliche Stromproduktion</td><td>30.021 kWh</td></tr> <tr><td>Einspeisevergütung</td><td>0,0967 €/kW</td></tr> <tr><td></td><td>2.903 € /a</td></tr> </table> Ertragsbereinigte Kosten -7.383 € /a Kosten pro erzeugte kW auf Basis der jährlichen Kosten 0,343 €/kWh	Jährliche Stromproduktion	30.021 kWh	Einspeisevergütung	0,0967 €/kW		2.903 € /a	Ertragsberechnung Einnahmen aus Stromproduktion <table> <tr><td>Jährliche Stromproduktion</td><td>118.662 kWh</td></tr> <tr><td>Einspeisevergütung</td><td>0,0967 €/kW</td></tr> <tr><td></td><td>11.475 € /a</td></tr> </table> Ertragsbereinigte Kosten 2.094 € /a Kosten pro erzeugte kW auf Basis der jährlichen Kosten 0,079 €/kWh	Jährliche Stromproduktion	118.662 kWh	Einspeisevergütung	0,0967 €/kW		11.475 € /a																																
Jährliche Stromproduktion	30.021 kWh																																												
Einspeisevergütung	0,0967 €/kW																																												
	2.903 € /a																																												
Jährliche Stromproduktion	118.662 kWh																																												
Einspeisevergütung	0,0967 €/kW																																												
	11.475 € /a																																												

Tabelle 7.1: Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für das Wasserrad und ein Vergleichsbeispiel

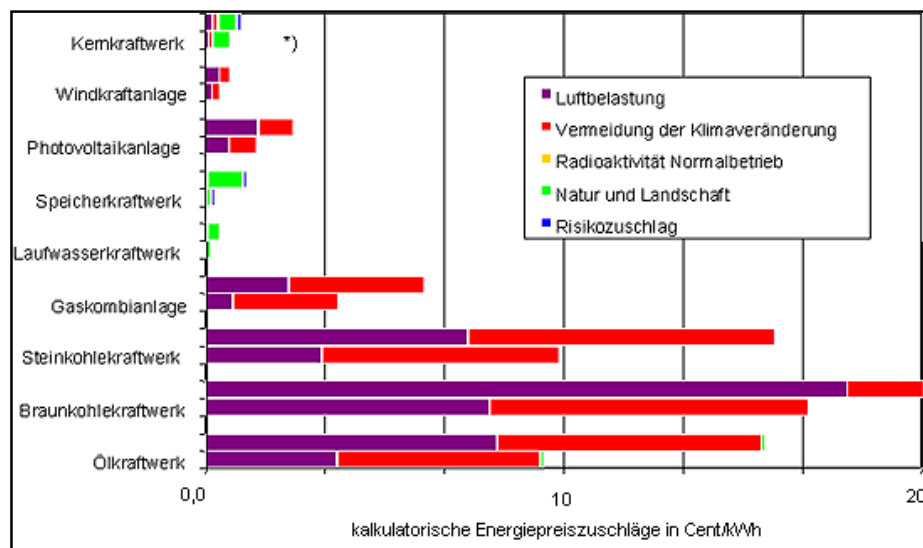


Bild 7.1: Bandbreite externer kalkulatorischer Kostenzuschläge regenerativer Energieträger (Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, 1999)

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

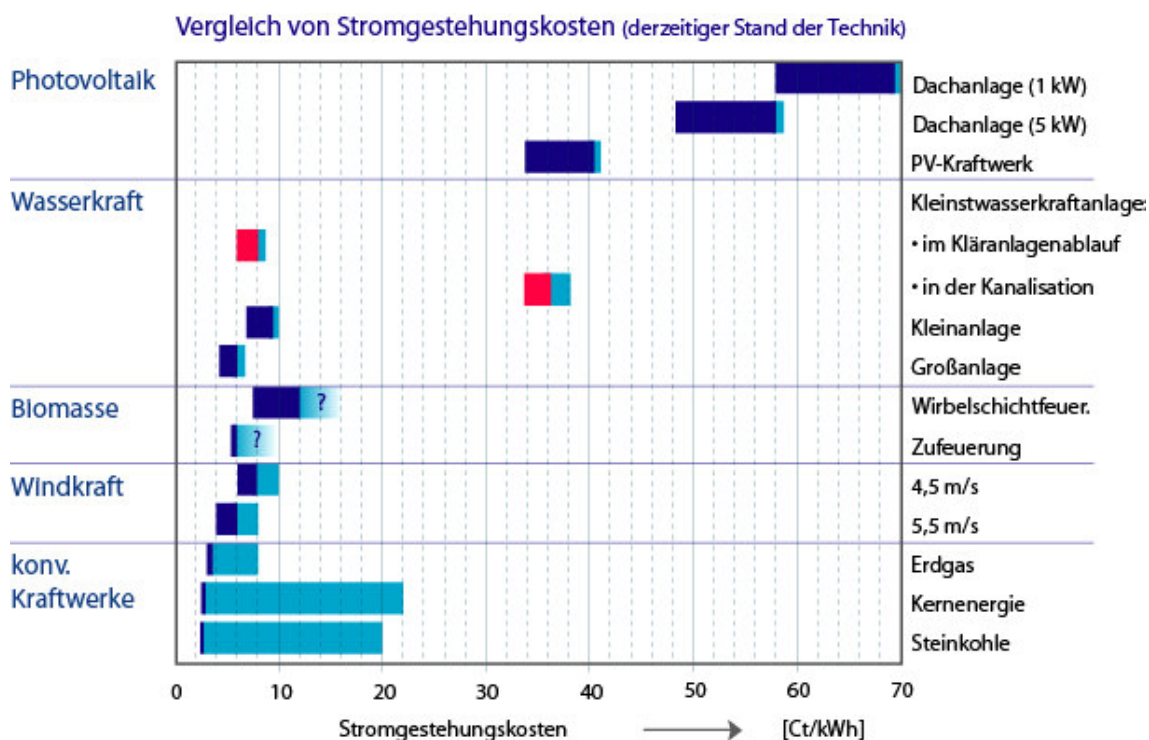


Bild 7.2: Vergleich von Stromgestehungskosten verschiedener Energieträger unter Einbeziehung externer Kosten (Voß, 2001)

8 Ausblick und Empfehlungen

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist eine Energieproduktion aus Abwasser in der Kanalisation nach derzeitigem Kenntnisstand defizitär. Die Stromgestehungskosten liegen hier bei etwa 35 ct/kWh. Gründe hierfür liegen in den hohen Baukosten sowie Ausrüstungskosten.

Im Gegensatz dazu bietet die Stromgewinnung aus Abwasser an Kläranlagenabläufen je nach Standort Potential für einen wirtschaftlichen Betrieb. Dort können die Stromgestehungskosten unter den Stromvergütungssätzen des EEG liegen.

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

- 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.

9 Literaturverzeichnis

- ATV (HRSG.) Bauwerke in Entwässerungsanlagen, ATV-Regelwerk Arbeitsblatt A 241, Juni 1996
- BEITZ, W.
KÜTTNER, K.-H. Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 16 Auflage, 1987, Springer-Verlag, ISBN 3-540-18009-5
- 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
- FiW „Energieverbrauch und Energienutzungspotentiale bei der Abwasserableitung,“ MUNLV
- HAFNER, PROF. DR. Ingenieurbüro, Bilsteinstraße 11, 58313 Herdecke, Vortrag: Strom aus Trinkwasser und Abwasser – Ein Überblick
- KÖNIG, F. VON,
JEHLE, C. Bau von Wasserkraftanlagen – Praxisbezogene Planungsgrundlagen, 3. Auflage, C. F. Müller Verlag Heidelberg, 1997, ISBN 3-7880-7584-8
- 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
- REHART GMBH REHART GMBH, Industriestr. 1, 91725 Ehingen
- 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.
- 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