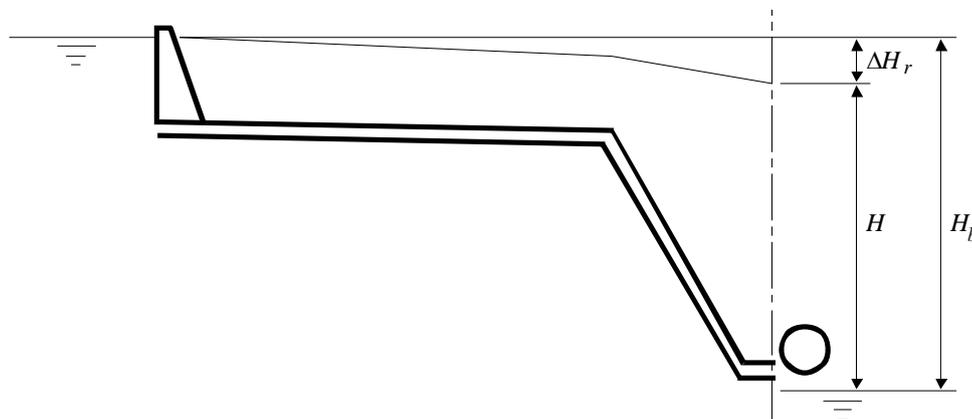


# Leitfaden zur Durchführung von Grobanalysen von Kleinwasserkraftwerken

M. Dubas, Y. Pigueron



© Alle Rechte vorbehalten

1. Auflage, Oktober 2009

MiniHydro V1

## Inhaltsverzeichnis

- \* Die mit einem Stern gekennzeichneten Abschnitte beziehen sich auf die Anwendung des Programms MiniHydro und können von den Lesern, die sich eher für die Grundlagen interessieren, übersprungen werden.

Einführung

Bezeichnungen

- 1    Verfügbare Durchflüsse
  - 1.1    Arten der turbinierbaren Wasser
  - 1.2    Durchflüsse im Jahresverlauf, Dauerkurven
  - 1.3    Wahl des Ausbaudurchflusses
  - 1.4    Fließgewässer: Wasserentnahmen und Restwassermengen
  - 1.5\*    Die Seite "Durchfluss" des Programms MiniHydro
  
- 2    Druckleitung, Druckverlust, Gefälle, andere hydraulische Bauwerke
  - 2.1    Energieverlust in einer Rohrleitung
  - 2.2    Bruttogefälle, Nettogefälle
  - 2.3    Rohrtypen, Aushub
  - 2.4    Wasserfassung, Entsander, Wasserkammer, Bypass
  - 2.5\*    Die Seite "Leitung" des Programms MiniHydro
  
- 3    Berechnung der produzierten Energie
  - 3.1    Gesamte jährliche Energieproduktion
  - 3.2\*    Die Seite "Energie" des Programms MiniHydro
  
- 4    Netzanschluss und Steuersignal
  - 4.1    Niederspannungsanschluss und notwendige Kabel
  - 4.2    Mittelspannungsanschluss und notwendige Kabel
  - 4.3    Zur Turbinensteuerung notwendiges Signal
  - 4.4\*    Die Seite "Anschluss" des Programms MiniHydro
  
- 5    Investitionen
  - 5.1    Gebäude, Wasserfassung, Reservoir
  - 5.2    Druckleitung
  - 5.3    Elektromechanische Ausrüstung
  - 5.4    Netzanschluss und Signalleitungen
  - 5.5    Verschiedenes
  - 5.6\*    Die Seite "Investitionskosten" des Programms MiniHydro
  
- 6    Rentabilität
  - 6.1    Jahreskosten, Stromgestehungspreis
  - 6.2    Einspeisevergütung
  - 6.3    Rentabilität
  - 6.4\*    Die Seite "Rentabilität" des Programms MiniHydro

Literatur, Internetseiten

## Einleitung

### Zielsetzung dieser Wegleitung

Dieses Dokument soll als Wegleitung zur Durchführung von *Grobanalysen* von geplanten Kleinwasserkraftwerken sein. Je nach Literatur und Autoren werden solche Analysen auch als Machbarkeitsstudien, Vorstudien oder Vorprojekte bezeichnet. Nachstehend werden alle Informationen, die für die mehr oder weniger grobe Einschätzung der Rentabilität eines geplanten Wasserkraftwerks notwendig sind, zusammen mit ihrer physikalischen Bedeutung, erklärt. Das Resultat der Analyse hängt nämlich stark von der Qualität dieser Informationen ab: Am Ende kann es sich zeigen, dass zusätzliche und zuverlässigere Daten nötig sind, oder im Idealfall können direkt Offerten eingeholt und es kann zur Realisierung übergegangen werden.

Das Wissen um das Vorgehen bei der Durchführung einer solchen Grobanalyse ermöglicht es dem Leser auch, Studien zu verstehen, die von anderen Personen erstellt wurden, und diesen gezielte Fragen zu stellen, diesen die notwendigen Informationen zu liefern und die erhaltenen Informationen kritisch zu beurteilen. Wenn er im Rahmen der darauf folgenden Realisierung die Rolle des *Bauherrn* übernehmen muss, ist er zudem in der Lage, sich an den Diskussionen zu beteiligen, die Offerten zu beurteilen, die ihm unterbreitet werden, und den Fortschritt der Arbeiten zu überwachen.

Die für die Durchführung einer Grobanalyse notwendigen Konzepte werden nachstehend kurz erklärt, ohne jedoch die theoretischen Grundlagen vollständig herzuleiten. Für ausführlichere Informationen, insbesondere zur Strömungsmechanik, zu den hydraulischen oder elektrischen Maschinen, verweisen wir den Leser auf die in der Literatur im Anhang aufgeführten Werke. Die auf dem Internet verfügbaren Broschüren [0.1] bis [0.4] bieten einen umfassenden Einblick in das Thema Kleinwasserkraftwerke. Die in diesem Dokument verwendeten Bezeichnungen beruhen auf der Norm ICE 60041 über die Abnahmeversuche von hydraulischen Maschinen (s. [5.1]).

### Definition eines Kleinwasserkraftwerks

Einleitend geben wir hier die Definition des Begriffs „Kleinwasserkraftanlage“ aus der Stromversorgungsverordnung (s. [9.5], Anhang 1.1 zur Revision der Energieverordnung [9.2]) wieder: Als Kleinwasserkraftanlage bezeichnet man „jede selbständige technische Einrichtung zur Erzeugung von Strom aus Wasserkraft an einem bestimmten Standort. Dazu gehören insbesondere Stauanlage, Wasserfassung, Druckleitungen, Turbinen, Generatoren, Einspeisestelle, Steuerung.“ Die Leistungsgrenze für Kleinwasserkraftwerke liegt bei 10 MW und bezieht sich auf die Bruttoleistung, d. h. die Verluste der Anlage werden nicht berücksichtigt (s. ebenfalls die Stromversorgungsverordnung [9.5], Änderung bisherigen Rechts im Anhang).

## Das Programm MiniHydro

Dieses Dokument ist ebenfalls ein Handbuch zum *Computer-Programm MiniHydro*, das mittels eines Tabellenkalkulationsprogramms (in unserem Fall EXCEL) die Vorgehensweise wiedergibt, die nachstehend beschrieben wird. Dieses Programm hat zum Ziel, die Durchführung einer Grobanalyse zu vereinfachen, zu beschleunigen und sicherer zu machen: Es führt Berechnungen aus und hilft, Fehler zu vermeiden. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass diese Software die Arbeit eines Ingenieurs, d. h. das Sammeln von Informationen, die Überprüfung ihrer Relevanz und ihrer Genauigkeit, die Konzeption einer Anlage und ihrer Varianten, die Bestimmung der Menge des turbinierbaren Wassers, die Berechnung der Kosten der Komponenten sowie die Beurteilung und Interpretation der Analyseergebnisse, nicht ersetzen kann. Die Erfahrung hat gezeigt, dass es sowohl bei Klein- als auch bei Grosswasserkraftwerken keine Standardlösungen gibt: Die Besonderheiten einer Anlage (Gelände, Wasser, Betriebsbedingungen, rechtliche Bedingungen usw.) müssen jeweils individuell berücksichtigt werden.

Um die für die Auslegung eines Kleinwasserkraftwerks erforderliche Flexibilität sowie die Nachvollziehbarkeit der Berechnungen für den Benutzer zu gewährleisten, wurde die MiniHydro-Software bewusst sehr einfach und ohne komplizierte Benutzer-Schnittstelle gestaltet. Benutzer mit Excel-Grundkenntnissen werden keine Probleme haben, die verschiedenen Schritte und Formeln zu verstehen und Änderungen anzubringen, falls die Vorgehensweise sich nicht für das jeweilige Projekt eignet. In den meisten Fällen reicht es, die Daten in die blauen Felder einzutragen. Die unveränderlichen Texte oder Zahlen sowie die Ergebnisse werden in den weissen Feldern angezeigt, die schreibgeschützt sind. Dieser Schutz kann jedoch (ohne Passwort) entfernt werden, wenn Änderungen angebracht werden müssen, und anschliessend wieder aktiviert werden. Die meisten Achsen der Diagramme können zudem durch einen rechten Mausklick angepasst werden.

Wie soeben gesagt, wurde das Programm MiniHydro als Hilfe bei der Durchführung einer Grobanalyse konzipiert, es befreit jedoch seine Anwender nicht von der Pflicht, die eigene Arbeit zu verstehen und das Zutreffen ihrer Daten zu überprüfen. Das Programm wurde so klar und so transparent gestaltet wie möglich; ausserdem lassen sich jede Änderung, jede Anpassung und jede Ergänzung, die sich Anwender wünschen können, ohne Schwierigkeit und ohne Grenze einbringen. Deshalb ist der Anwender einzig und allein für die Genauigkeit, die Fundiertheit und die Qualität der mit MiniHydro erhaltenen Ergebnisse *verantwortlich*.

## Notation *Bezeichnungen*

$A$	$m^2$	Aire, surface, section <i>Fläche, Querschnitt</i>
$a$	–	Facteur d'annuité <i>Annuitätsfaktor</i>
$C$	$m/s$	Vitesse absolue <i>Absolutgeschwindigkeit</i>
$D$	$m$	Diamètre <i>Durchmesser</i>
DN	$mm$	Diamètre nominal d'une conduite <i>Nenn Durchmesser eines Rohres</i>
$g$	$m/s^2$	$= 9,81 m/s^2$ Accélération de la pesanteur, gravité <i>Erdbeschleunigung</i>
$H$	$m$	Chute nette <i>Nettofallhöhe</i>
$H_b$	$m$	Hauteur de chute brute <i>Bruttofallhöhe</i>
$K$	$mm$	Rugosité de sable équivalente <i>Äquivalente Sandrauigkeit</i>
$L$	$m$	Longueur <i>Länge</i>
$m$	années	Durée d'un emprunt <i>Dauer einer Anleihe</i>
$n$	$1/s$	Vitesse de rotation <i>Drehzahl</i>
$n'$	$1/min$	Vitesse de rotation <i>Drehzahl</i>
$P$	$W$	Puissance mécanique <i>Mechanische Leistung</i>
$P_{el}$	$W$	Puissance électrique <i>Elektrische Leistung</i>
$P_h$	$W$	Puissance hydraulique <i>Hydraulische Leistung</i>
$p$	$N/m^2 = Pa$	Pression <i>Druck</i>
PN	$bar$	Pression nominale d'un tuyau <i>Nenn Druck eines Rohres</i>
$Q$	$m^3/s$	Débit volumique <i>Volumenstrom, Durchfluss</i> $Q \equiv \dot{V}$
$r$	–	Taux d'intérêt d'un emprunt <i>Zins einer Anleihe</i>
Re	–	Nombre de Reynolds <i>Reynolds-Zahl</i> $Re = \rho C L / \mu$
$T$	$^{\circ}C, K$	Température <i>Temperatur</i>
$t$	$s$	Temps <i>Zeit</i>

$U$	m	Périmètre mouillé <i>Benetzter Umfang</i>
$Z$	m	Coordonnée verticale, altitude <i>Vertikale Koordinate, Höhe</i>
$\Delta...$	...	Différence, accroissement <i>Differenz, Zuwachs</i>
$\Delta H_r$	m	Perte de charge <i>Energieverlust</i>
$\Delta t$	s	Intervalle de temps <i>Zeitintervall</i>
$\zeta$	–	Coefficient de perte de charge singulière <i>Widerstandszahl</i>
$\eta$	–	Rendement <i>Wirkungsgrad</i>
$\lambda$	–	Coefficient de perte de charge linéaire <i>Rohrreibungszahl</i>
$\mu$	N s / m <sup>2</sup>	Viscosité dynamique <i>Dynamische Viskosität bzw. Zähigkeit</i>
$\nu$	m <sup>2</sup> / s	Viscosité cinématique <i>Kinemat. Viskosität bzw. Zähigk. <math>\nu = \mu / \rho</math></i>
$v$	–	Vitesse spécifique, chiffre de vitesse <i>Spezifische Drehzahl, Laufzahl</i>
$\rho$	kg / m <sup>3</sup>	Masse spécifique <i>Dichte, spezifische Masse</i>
$\omega$	rad / s	Vitesse angulaire <i>Winkelgeschwindigkeit</i>

# 1 Verfügbare Durchflüsse

## 1.1 Arten der turbinierbaren Wasser

Es gibt verschiedene Arten von Wasser, das in einem Kleinkraftwerk turbinieren werden kann, um elektrische Energie zu erzeugen:

- 1) *Fließgewässer*. Das Wasser eines Flusses oder eines Wildbachs kann von seinem Bett zu einer Turbine umgeleitet werden. In diesem Fall hängt die Nutzwassermenge mehr oder weniger stark von den Jahreszeiten, den Niederschlägen und der Temperatur ab. Zudem müssen die Rechtsvorschriften, auf die wir im Abschnitt 1.4 zurückkommen, eingehalten werden.
- 2) *Trinkwasser*. Dies ist einer der vorteilhaftesten Fälle für ein Wasserkraftwerk, da der grösste Teil der Anlage – insbesondere das Auffangbecken, die Leitung und das Reservoir – in erster Linie für die Trinkwasserversorgung eingesetzt werden und auch dann gebaut werden müssen, wenn das Wasser nicht turbinieren wird. So muss die Wasserkraftanlage nur die von ihr erzeugten zusätzlichen Kosten übernehmen. Die Sicherheit der Trinkwasserversorgung muss jedoch garantiert werden, auch wenn das Stromnetz keinen Strom führt oder die Turbine ausfällt oder revidiert wird. Um kein Wasser zu verschwenden, ist es zudem oft nötig, die Anlage für den maximalen Durchfluss zu dimensionieren, der von den Quellen geliefert wird. Denn das Wasser der eigenen Quellen, das nicht genutzt wird, muss anderswo eingekauft oder aus dem Grundwasser gepumpt werden.
- 3) *Abwasser*. Auch in diesem Fall dient ein grosser Teil der Anlage noch zu anderen Zwecken als zur Turbinieren, wodurch die Kosten sinken. Je nach Situation kann sich die Turbine in der Kläranlage befinden, d. h. sie kommt zum Einsatz, bevor das Abwasser aufbereitet wird, oder weiter unten, nachdem das Abwasser gereinigt wurde und bevor es in den Wasserlauf zurückgeführt wird. Bleibt jedoch das Problem der stark variierenden Durchflüsse im Verlaufe eines Tages, die auf die fluktuierende Nachfrage oder auf Stürme zurückzuführen sind, wenn das sogenannte Sauberwasser, d. h. das von den Abwasserkanälen gesammelte Regenwasser, nicht vom Abwasser aus Wohngebieten oder der Industrie getrennt wird. Dieses Problem kann durch ein Ausgleichsbecken, in dem sich das Wasser während einer gewissen Zeit ansammelt, bevor es zur Turbine weitergeleitet wird, gelöst oder zumindest verringert werden. Falls das Wasser, das durch die Turbine läuft, noch nicht aufbereitet wurde, müssen mithilfe eines Filter- und Siebsystems alle festen Abfälle entfernt werden, die in den kleineren Teilen der Maschine stecken bleiben könnten. Zudem muss die Bildung von Fettschichten an den Leitungswänden verhindert werden.
- 4) *Bewässerungswasser*. Um Felder zu bewässern, werden manchmal Leitungen installiert, die Wasser aus höher gelegenen Gebieten beziehen. Diese Leitungen, die auf jeden Fall installiert und finanziert werden müssen, können ebenfalls an die Turbinieren angepasst werden. Wenn die Turbine oberhalb des Bewässerungssystems installiert wird, kann der überschüssige Druck genutzt werden, d. h. der Druck, der nicht für die Sprühdüsen verwendet wird. Wenn das Wasser während längerer Zeit nicht verwendet wird, aber trotzdem verfügbar

bleibt, kann die Turbine auch unterhalb der Anlage installiert werden, kurz bevor das Wasser wieder in einen Wasserlauf geleitet wird.

- 5) *Wasser aus Schneekanonen.* Um die Beschneigung der Piste auch bei unzureichendem Schneefall zu garantieren, werden immer öfters grosse Anlagen installiert, die Auffangbecken, Reservoirs und Verteilleitungen umfassen. Wenn das verfügbare Wasser nicht für die Schneeproduktion verwendet wird, können diese Anlagen für dessen Transport zu einer unterhalb gelegenen Turbine verwendet werden. Die Anlagen müssen natürlich entsprechend konzipiert werden.
- 6) *Dotierwasser.* Gemäss Gesetz dürfen Wehre Wasserläufe nicht austrocknen, sondern müssen eine Restwassermenge (Dotierwasser) durchfliessen lassen. Bei hohen Wehren verfügt das an ihrem Fuss herausgelassene Wasser über Energie, die für den Antrieb einer Turbine verwendet werden kann. Da auch hier ein Grossteil der Anlage andere Zwecke verfolgt als das Kleinwasserkraftwerk, sind die Kosten niedriger.
- 7) *Industriewasser.* In Industrieanlagen, insbesondere in verfahrenstechnischen Anlagen, werden nicht selten Wasser oder andere Flüssigkeiten unter Druck benötigt. Wenn der Druck des Wassers, das aus einer solchen Anlage austritt, immer noch hoch ist, jedoch nicht mehr benötigt wird, kann diese Energie statt in einem Druckeduzierventil vernichtet in einer Turbine verwertet werden.

In allen vorstehend aufgeführten Anlagen ist es wichtig, die verschiedenen Elemente unter Berücksichtigung der Turbinierung genau zu dimensionieren: Insbesondere die Leitungen müssen den Druck aushalten und dürfen keine grösseren Energieverluste verursachen. Diese Vorrichtungen wurden eigentlich zu anderen Zwecken als die Energieerzeugung konzipiert und können deshalb in den meisten Fällen nicht dazu verwendet werden, ohne vorher entsprechend angepasst zu werden.

## 1.2 Durchflüsse im Jahresverlauf, Dauerkurven

Die für die Turbinierung verfügbare Wassermenge hat einen direkten Einfluss auf die Energiemenge, die eine Anlage produzieren kann, und muss daher so genau wie möglich bestimmt werden. Diese Wassermenge ist natürlich von Tag zu Tag, von Monat zu Monat und von Jahr zu Jahr verschieden, und zwar je nach Niederschlägen, welche die Quellen und Fließgewässer speisen, in Funktion der Temperatur, welche die Schneeschmelze fördert, oder je nach Wasserbedarf der Nutzer. Es ist deshalb nicht möglich, die exakte Nutzwassermenge zu einem bestimmten Zeitpunkt vorherzusagen. Es ist auch nicht nötig, über die stundenweise Entwicklung Bescheid zu wissen; in der Regel sind *monatliche Durchschnittswerte* ausreichend, um die während eines Jahres produzierbare Energie zuverlässig zu berechnen.

Die Daten für die Bestimmung des monatlichen mittleren Abflusses können sich quantitativ und qualitativ stark unterscheiden. In den günstigsten Fällen verfügt man über regelmässig während mehrerer Jahre durchgeführte Messungen, z. B. täglich oder sogar alle 15 Minuten durchgeführte Messungen. In diesem Fall ist es einfach, die monatlichen Mittelwerte zu bestimmen (Fig. 1.1 und 1.2). Gegebenenfalls können zweifelhafte oder Extremwerte entfernt werden: Das Jahr 2003 zum Beispiel war sehr heiss und trocken und ist deshalb nicht reprä-

sentativ für ein typisches Jahr. Falls die Messungen nur während eines einzigen Jahres durchgeführt wurden oder lückenhaft sind, muss versucht werden, sie zu ergänzen, indem die verfügbaren Messungen vorsichtig extrapoliert werden. Wenn nur der Höchstwert  $Q_{\max}$  und der Mindestwert  $Q_{\min}$  der Durchflüsse bekannt sind, kann man sich von Quellen oder Fließgewässern inspirieren, die ein ähnliches Verhalten aufweisen, und die monatlichen Mittelwerte davon ableiten. Man kann zum Beispiel die Variationen aus den Abbildungen 1.1 und 1.2 übernehmen und diese im Verhältnis zu den bekannten Zahlen vergrößern oder verkleinern. Wenn keine andere Möglichkeit besteht, kann man sich auch damit begnügen, einen *jährlichen Mittelwert* anhand der folgenden Formel zu berechnen

$$Q_m = \frac{4Q_{\max} + 8Q_{\min}}{12} \quad (1.1)$$

Den Mindestwerten wird mehr Bedeutung beigemessen: Dadurch berücksichtigt man die Tatsache, dass diese öfters vorkommen als Höchstwerte.

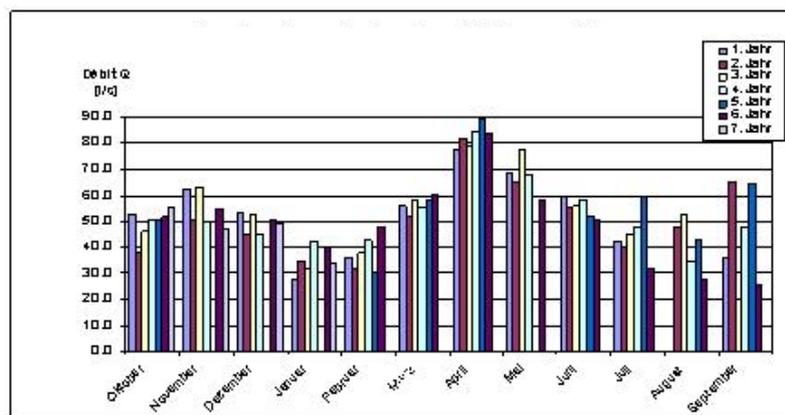


Fig. 1.1 Beispiel für während 7 Jahre gemessene monatliche Mittelwerte einer Quellschüttung (hier hydrologisches Jahr vom 1. Oktober bis 30. September)

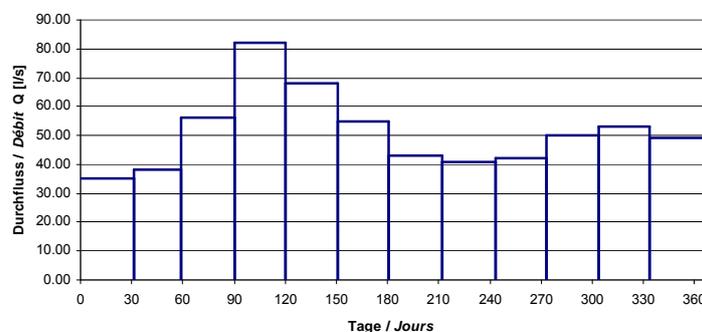


Fig. 1.2 Beispiel für monatliche Mittelwerte einer Quellschüttung während eines Jahres: Für jeden Monat wurde der Mittelwert der Werte aus der Fig. 1.1 berechnet

Für eine bessere Übersicht über die Abflüsse und deren Dauer können diese auch in Form von *Abflussdauerkurven* dargestellt werden. Man zeichnet dazu eine Kurve, welche die Zeit angibt, während der eine bestimmte Abflussmenge erreicht oder überschritten wird. Wenn der Abfluss durch eine stetige Funktion  $Q(t)$  gegeben ist, werden die Zeitintervalle  $\Delta t_i$ , für die eine Abflussmenge  $Q_i$  erreicht oder überschritten wird (Fig. 1.3), addiert und man erhält eine neue stetige Funktion. Wenn die Abflussmenge durch eine unstetige Funktion gegeben ist, können die Werte einfach in absteigender Reihenfolge und unter Berücksichtigung der Intervalle eingetragen werden (Fig. 1.4 und 1.5).

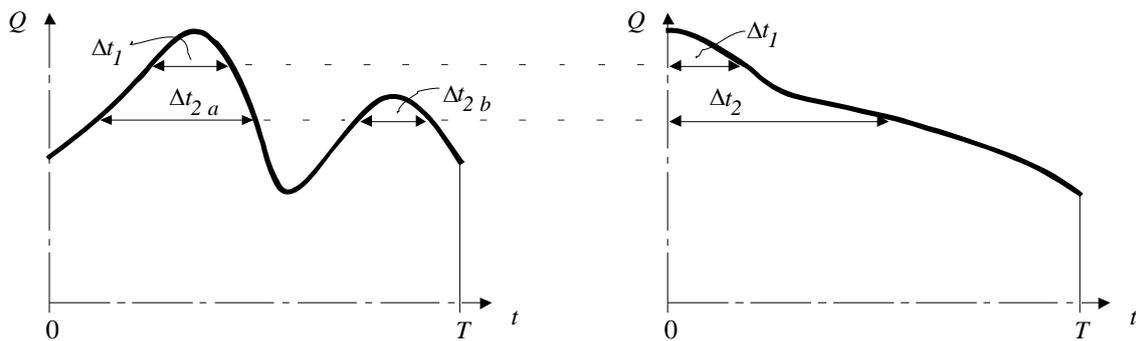


Fig. 1.3 Definition der Abflussdauerkurve für eine stetige Funktion  $Q(t)$ . Links: Abflussganglinie. Rechts: Abflussdauerkurve

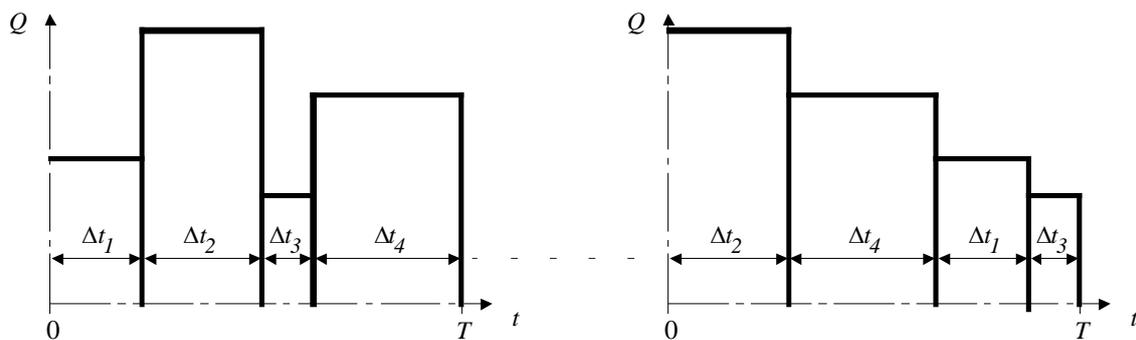


Fig. 1.4 Definition der Abflussdauerkurve für eine unstetige Funktion  $Q_i(\Delta t_i)$ . Links: Abflussganglinie. Rechts: Abflussdauerkurve

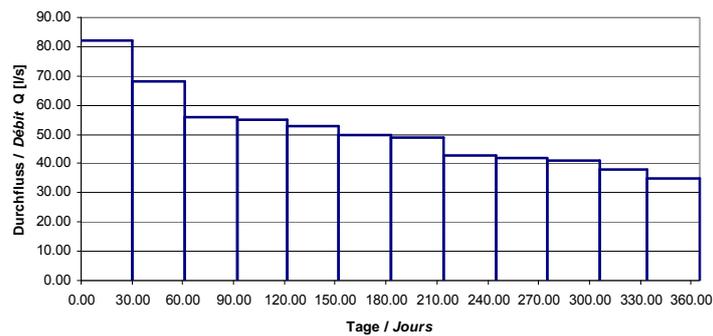


Fig. 1.5 Beispiel für monatliche Mittelwerte einer Quellschüttung während eines Jahres: Es handelt sich um die Dauerkurve der Durchflüsse aus Fig. 1.2

### 1.3 Wahl des Ausbaudurchflusses

Auf der Basis der vorherstehenden Kurven ist es möglich, den *Ausbaudurchfluss*, manchmal auch Nenndurchfluss genannt, der Anlage festzulegen. Es handelt sich dabei um den maximalen Durchfluss, der von der Anlage befördert werden kann, d. h. der durch die Leitung und im Prinzip auch durch die Turbine fließen kann, ohne unzulässige Energieverluste zu verursachen. Um diese Komponenten bestmöglich zu nutzen und gleichzeitig die getätigten Investitionen zu rentabilisieren, müssten sie durchgehend bei ihrer Höchstleistung genutzt werden. Wenn als Ausbaudurchfluss der Mindestdurchfluss gewählt wird, kann die Anlage rund um die Uhr bei Höchstleistung in Betrieb sein, doch der Wasserverlust – Wasser, das nicht durch die Leitung fließen kann und deshalb beim Leitungseingang abgeleitet werden muss – ist gross. Ein Teil der Energie, die hergestellt werden könnte, geht somit verloren. Wenn man sich hingegen für den maximalen Durchfluss entscheidet, ist es möglich, dass die Anlage während längerer Zeit mit im Vergleich zu ihren Kapazitäten geringen Durchflussmengen funktioniert. Es muss also ein Kompromiss zwischen diesen beiden Extremen gefunden werden. Im Fall der Abbildungen 1.5 und 1.2 könnte man als Ausbaudurchfluss zum Beispiel den Wert 60 l/s wählen, so dass während rund 1,5 Monaten nicht das gesamte zur Verfügung stehende Wasser turbinieren werden kann.

Oft müssen jedoch noch andere Bedingungen berücksichtigt werden, insbesondere bei Anlagen, deren Wasser noch zu anderen Zwecken als zur Stromerzeugung verwendet wird. Bei Trinkwasserkraftwerken zum Beispiel verlangen die Wasserwerke wahrscheinlich, dass das gesamte Wasser aus den Quellen befördert wird, damit nicht zusätzlich Wasser eingekauft oder zugepumpt werden muss. In Abwasserkraftwerken hingegen ist es nicht möglich, das Wasser beim Leitungseingang abfließen zu lassen. In solchen Situationen sind höhere Durchflüsse zwar rar, doch können diese auch durch die Leitung geleitet werden. Diese muss natürlich entsprechend überdimensioniert werden und das Wasser wird nicht durch die Turbine, sondern ein parallelgeschaltetes Reduzierventil geleitet. Auf diese Weise wird die Turbine optimal genutzt, ohne überdimensioniert zu sein. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass ein parallel zur Turbine geschalteter Druckminderer erforderlich ist, wenn die Wasserversorgung auch im Fall eines Ausfalls des Stromnetzes oder einer Turbinenpanne sichergestellt werden muss und wenn sie ungeachtet des maximalen Durchflusses der Turbine vorhanden ist.

In gewissen Trinkwassernetzen ist eine kleine Turbine vor der Filteranlage installiert, deren Produktion auf Grund der Kosten der Wasseraufbereitung stark auf die Bedürfnisse der Konsumenten abgestimmt ist. In diesem Fall kann nicht mehr die gesamte von den Quellen gelieferte Wassermenge verwendet werden, sondern die Turbine muss ebenfalls an den Verbrauch angepasst werden. Dieser variiert zwar im Jahresverlauf nur wenig, dafür am Tag und in der Nacht umso mehr (es muss mit Spitzenwerten gerechnet werden, die 15-25% über den monatlichen Mittelwerten liegen). In solchen Fällen muss auch die Entwicklung der durch die Filterungsanlage während der Lebensdauer der Turbine belieferten Gebiete berücksichtigt werden.

#### 1.4 Fließgewässer: Wasserentnahmen und Restwassermengen

Wenn das turbinierbare Wasser aus „Fließgewässern mit ständiger Wasserführung“ stammt, d.h. deren Abflussmenge während 347 Tagen pro Jahr nicht gleich Null ist, schreibt das Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer [9.6] eine Bewilligung für die Wasserentnahme vor und verbietet die Umleitung von Wassermengen, durch die natürliche Lebensräume beeinträchtigt oder andere Nutzungen von Fließgewässern nicht mehr sichergestellt werden können. Konkret legt Art. 31 die Restwassermenge fest, die im Fluss verbleiben muss, die sogenannte *Mindestrestwassermenge* (die *Dotierwassermenge* entspricht der Wassermenge, die nötig ist, um die Restwassermenge sicherzustellen). Diese hängt von der Abflussmenge  $Q_{347}$  ab, d. h. der „Abflussmenge, die, gemittelt über zehn Jahre, durchschnittlich während 347 Tagen des Jahres erreicht oder überschritten wird und die durch Stauung, Entnahme oder Zuleitung von Wasser nicht wesentlich beeinflusst ist“. Beispiel: Wenn  $Q_{347} \leq 60 \text{ l/s}$ , beträgt die Mindestrestwassermenge  $50 \text{ l/s}$  und wenn  $Q_{347} \geq 60 \text{ m}^3/\text{s}$ , beträgt sie  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die Restwassermenge muss zudem erhöht werden, wenn die Qualität der oberirdischen Gewässer nicht ausreichend ist, wenn die Trinkwasserversorgung unterhalb der Anlage nicht sicherstellt werden kann oder wenn Flora und Fauna gefährdet sind. Die Restwassermenge kann aber auch durch Kantonsbeschluss verringert werden, insbesondere „auf einer Strecke von 1'000 m unterhalb einer Wasserentnahme aus einem Gewässer, das höher als 1'700 müM. liegt und dessen Abflussmenge  $Q_{347}$  kleiner als  $50 \text{ l/s}$  ist“ oder „bei Wasserentnahmen aus Nichtfischgewässern bis zu einer Restwasserführung von 35 Prozent der Abflussmenge  $Q_{347}$ “.

#### 1.5\* Die Seite "Durchfluss" des Programms MiniHydro

Auf dieser Seite können (in den blauen Feldern) zwölf Werte für den turbinierten Durchfluss  $Q$  eingegeben werden, d. h. ein Mittelwert für jeden Monat des Jahres. Auf der Grundlage dieser Zahlen werden die Kurve der monatlichen Mittelwerte der Quellschüttungen (Beispiel in Fig. 1.2) und die Dauerkurve (Beispiel in Fig. 1.5) gezeichnet. Wenn die Nutzwassermenge mit einer anderen Abflussmenge verglichen werden soll, zum Beispiel einer Gesamtabflussmenge, von der ein Teil abgeleitet wird, kann diese andere Abflussmenge  $Q_2$  für jeden Monat des Jahres angegeben werden, und die beiden Abflüsse werden in einem zusätzlichen Diagramm dargestellt. Der Abfluss  $Q$  wird für die Berechnung der erzeugten elektrischen Energie verwendet, der Abfluss  $Q_2$  hingegen dient nur zu informativen Zwecken.

Die Dauer der Monate (in Tagen) ist schon im Programm eingegeben und wird auf die x-Achse übertragen. Um die y-Achse zu verändern, reicht es, mit einem rechten Mausklick in ihre Nähe zu klicken. Die Default-Werte können dann geändert werden.

## 2 Druckleitung, Druckverlust, Gefälle, andere hydraulische Bauwerke

### 2.1 Energieverlust in einer Rohrleitung

In einer Wasserleitung, wie übrigens auch in einer elektrischen Leitung, treten Energieverluste auf, die gar nicht vernachlässigbar sind und die deshalb genau bestimmt werden müssen, um die Energiemenge und somit auch den Gewinn zu kennen, die von einem Kleinwasserkraftwerk zu erwarten sind. Diese Verluste werden *Druckverluste* oder *Energieverluste* genannt. Sie werden einerseits von der Reibung des Fluides an der Rohrwand und andererseits von der Fluidviskosität verursacht.

Zuerst bemerken wir, dass die *Dichte*  $\rho$  des Wassers mit der Temperatur  $T$  leicht ändert, was zwischen 0 und 30 °C durch folgende Formel (aufgebaut aufgrund der in [5.5], S. 1.5 angegebenen Werte) beschrieben werden kann, in  $\text{kg/m}^3$  und mit  $T$  in °C

$$\rho = 999,87 + 0,0655 \cdot T - 8,46875 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 5,46875 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 \quad (2.1)$$

Die *dynamische Viskosität*  $\mu$  (z.B. mit der Einheit  $\text{N s} / \text{m}^2$ ) eines Fluides variiert ihrerseits ziemlich stark mit der Temperatur. Im Folgenden werden wir allerdings nicht diese dynamische Viskosität brauchen, welche eine primäre Eigenschaft eines Fluides darstellt, sondern die sogenannte *kinematische Viskosität*, welche durch das Verhältnis definiert wird

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.2)$$

und deren Änderung in Funktion der Temperatur gegeben wird, in  $\text{m}^2 / \text{s}$  und mit  $T$  in °C (nach [2.1], Glg. (1.23))

$$\nu = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,000221 \cdot T^2} \quad (2.3)$$

Neben diesen Eigenschaften des Wassers brauchen wir noch eine weitere Grösse, welche das Verhältnis zwischen den Trägheitskräften und den Viskositätskräften kennzeichnet. Diese dimensionslose Zahl erlaubt es, zwei Strömungen zu vergleichen, die untereinander in Bezug auf die physikalischen Phänomene ähnlich sind aber andere Massstäbe haben, und insbesondere Strömungen von verschiedenen Fluiden in verschiedenen Rohrleitungen. Es handelt sich dabei um die *Reynolds-Zahl*, deren Definition für Rohrleitungsströmungen lautet

$$\text{Re} = \frac{\rho C D_h}{\mu} = \frac{C D_h}{\nu} \quad (2.4)$$

wo  $C$  die *mittlere Strömungsgeschwindigkeit* in einem Querschnitt darstellt, d.h., indem der Durchfluss  $Q$  durch den Flächeninhalt  $A$  des Querschnittes dividiert wird,

$$C = Q / A \quad (2.5)$$

Ausserdem bezeichnet  $D_h$  der *hydraulische Durchmesser*, welcher identisch mit dem Innendurchmesser  $D$  einer Leitung mit Kreisquerschnitt ist, der aber auch bei einer Leitung mit beliebigem Querschnitt und auch bei einem geschlossenen oder offenen Gerinne mit freiem Spiegel verwendet werden kann; seine Definition ist

$$D_h = \frac{4A}{U} \quad (2.6)$$

mit dem Flächeninhalt  $A$  des vom Fluid besetzten Querschnittes und mit dem *benetzten Umfang*  $U$ , d.h. dem Teil des Umfanges, der mit dem Fluid im Kontakt steht (Fig. 2.1).

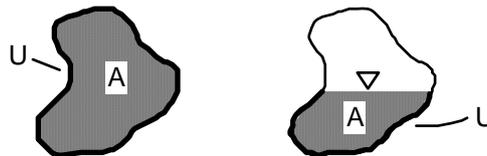


Fig. 2.1 Zur Definition des hydraulischen Durchmessers einer voll oder nur teilweise ausgefüllten Rohrleitung

Um den Druckverlust in einer Leitung der Länge  $L$  auszudrücken, wird oft der folgende Ausdruck verwendet, der hier und da *Formel von Darcy-Weisbach* genannt wird

$$\Delta H_r = \lambda \frac{L}{D_h} \frac{C^2}{2g} \quad (2.7)$$

worin  $g$  die *Erdbeschleunigung* ( $= 9,81 \text{ m/s}^2$ ) und  $\lambda$  die *Rohrreibungszahl* bezeichnen. Der Druckverlust  $\Delta H_r$  wird hier als Höhe einer Säule der im Rohr strömenden Flüssigkeit gemessen, d.h. insbesondere in Metern Wassersäule oder kurz in mWS. Die verlorene Energie ist also gleich derjenigen eines Kiloponds, das im Schwerfeld um die Höhe  $\Delta H_r$  nach unten verschoben wird. Der Faktor  $\lambda$  ist eine dimensionslose Grösse, welche von den Fluideigenschaften, d.h. von der soeben gesehenen Reynolds-Zahl, abhängig ist, sowie von der Rauigkeit  $K$  der Rohrwände. Letztere soll den Einfluss der Unebenheiten an der Innenwand, welche die Strömung bremsen, wiedergeben und hat die Dimension einer Länge; in der Tat ist sie aber kein direktes Mass dieser Unebenheiten sondern stellt aufgrund von Experimenten eine *äquivalente Sandrauigkeit* dar, d.h. die Höhe von Sandkörnern, die an einer glatten Wand geklebt wären und den gleichen Energieverlust wie die wirklichen Unebenheiten der Wand verursachen (Fig. 2.2). Definitionsgemäss kann diese Grösse nicht an einem Rohr gemessen werden,

sondern muss Tabellen wie derjenigen der Figur 2.3 oder den Unterlagen von Lieferanten entnommen werden.



Fig. 2.2 Definition der äquivalenten Sandrauigkeit  $K$  zur Angabe einer Wandrauigkeit

Rohr und Rohrart	Zustand	$K$ [mm]
gezogen oder gepresst, aus Kupfer, Messing, Bronze, Aluminium, Glas, Kunststoff	neu, technisch glatt	0,001 ... 0,0015
Gummi	neu, technisch glatt	~ 0,0016
Gusseisen	neu	0,25 ... 0,5
	angerostet	1,0 ... 1,5
	verkrustet	1,5 ... 5,0
Stahl	neu, nahtlos	0,02 ... 0,06
	neu, längsgeschweisst	0,04 ... 0,1
	angerostet	0,15 ... 0,4
	stark verkrustet	2,0 ... 4,0
	bitumiert	~ 0,05
	zementiert	~ 0,18
Beton	Glattstrich	0,3 ... 0,8
	mittelglatt	1,0 ... 2,0
	rau	2,0 ... 3,0

Fig. 2.3 Äquivalente Sandrauigkeit  $K$  für einige Rohrwerkstoffe (nach "Dubbel" [2.7], § B 6.2.2)

Wie soeben gesagt ist die Rohrreibungszahl  $\lambda$  eine Funktion der Reynolds-Zahl sowie der äquivalenten Sandrauigkeit. Aufgrund von Laborexperimenten von Nikuradse hat *Colebrook* die folgende Formel vorgeschlagen, die nach ihm benannt wird,

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + 0,27 \frac{K}{D_h} \right) \quad (2.8)$$

worin  $\log$  den Logarithmus mit der Basis 10 bezeichnet. Wie ersichtlich enthält diese etwas verzwickte Formel die Unbekannte  $\lambda$  auf beiden Seiten des Gleichheitszeichens und macht

zur Bestimmung eine Iteration nötig, bis die Glieder auf der linken und auf der rechten Seite gleich sind. Wird diese Funktion grafisch dargestellt, so erhält man die im rechten Teil der Figur 2.4 gezeigten Kurven, welcher dem sogenannten turbulenten Bereich entspricht. Die Formel (2.8) hat den grossen Vorteil, dass sie für alle Strömungsgeschwindigkeiten gültig ist (mit der Ausnahme der laminaren, sehr langsamen Strömungen, die mit Wasser sehr selten sind) und für alle Wandrauigkeiten, von Null bis zu den höchsten.

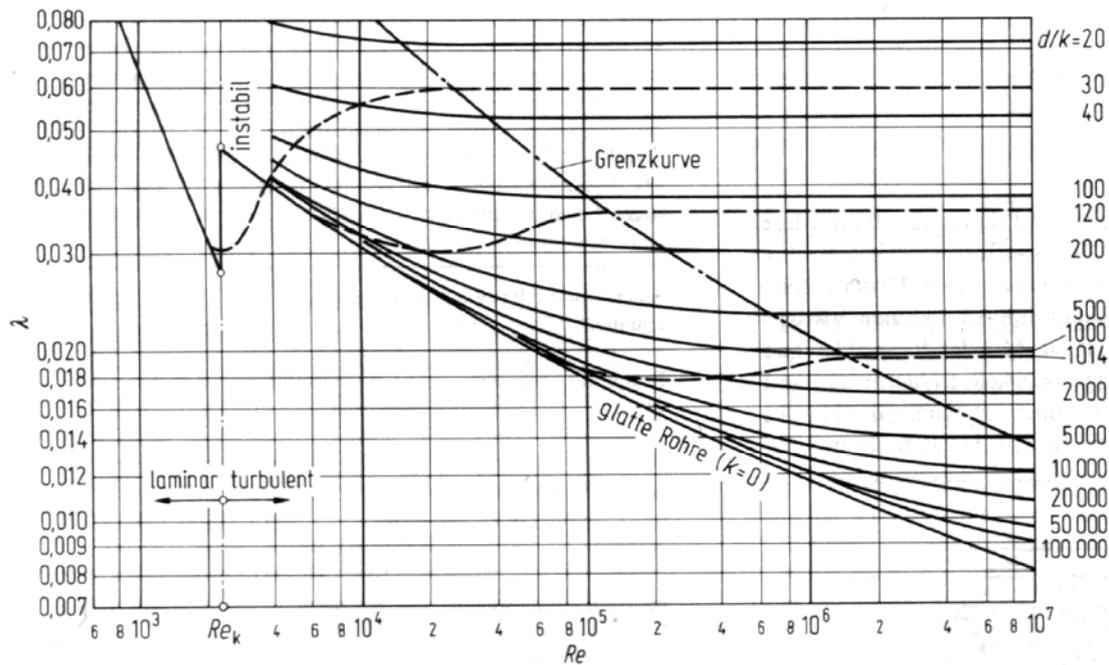


Fig. 2.4 Moody-Diagramm (oder Diagramm von Colebrook-Nikuradse) (nach "Dubbel", [2.7], § B 6.2.2). Im turbulenten Bereich entsprechen die vollen Linien der Formel von Colebrook (im gesamten Bereich gültig) und die gestrichelten Linien den Messungen von Nikuradse

Wenn die Beziehung (2.7) leicht umgeformt wird, kann eine sehr wichtige Tatsache sichtbar gemacht werden. Wird nämlich die mittlere Geschwindigkeit mittels des Durchflusses wie in (2.5) ausgedrückt, und wird eine Leitung mit Kreisquerschnitt angenommen, d.h. mit  $A = \pi D_h^2 / 4$ , so erhält man

$$\Delta H_r = \lambda \frac{L}{D_h^5} \frac{8Q^2}{\pi^2 g} \quad (2.9)$$

Wenn die Änderung von  $\lambda$  beiseitegelassen wird, zeigt dies, dass die Verluste einerseits proportional zum Durchfluss im Quadrat und andererseits umgekehrt proportional zur 5. Potenz des Durchmessers sind, was bedeutet, dass eine kleine Änderung von diesem eine starke Änderung der Verluste mit sich bringt.

Am Schluss dieses Abschnittes soll noch erwähnt werden, dass auch andere Formeln als die angegebene vorgeschlagen worden sind, um die Verluste in einer voll oder nur teilweise ausgefüllten Rohrleitung zu berechnen. Insbesondere gibt es Formeln, die im Bauingenieurwesen für offene Gerinne gebräuchlich sind; weil sie aber eher für raue Wände konzipiert sind, sind sie für heutige, recht glatte Rohre ungeeignet. Zu bemerken ist hier ferner, dass Druckverluste auch in sogenannten *Rohrleitungselementen* auftreten, wie z.B. in Krümmern, Rechen, Einläufen, Diffusoren, Abschlussorganen usw. Im Allgemeinen sind jedoch in einer Wasserkraftanlage solche Verluste im Vergleich zu den Verlusten in geraden Rohren vernachlässigbar, dies weil die geraden Strecken grosse Längen besitzen. Deshalb werden sie hier nicht behandelt und der Leser wird diesbezüglich falls nötig auf die einschlägige Literatur verwiesen.

## 2.2 Bruttogefälle, Nettogefälle

Die hydraulische Energie der Turbine, die sie in mechanische Energie an ihrer Welle umwandelt, entspricht der Energie, die ihr am Eingang 1 zugeführt wird minus der Energie, die sie am Ausgang 2 abgeben muss (Abb. 2.5). Die Energie an einem Punkt einer Strömung liegt in drei Formen vor: einer potentiellen Energie infolge der Höhe  $Z$  oberhalb eines gewissen Bezugspunkts, einer Energie infolge des Drucks  $p$ , der auf die Flüssigkeit wirkt, und einer kinetischen Energie infolge der Geschwindigkeit  $C$ . Die Gesamtenergie wird deshalb durch die Summe dieser drei Glieder gegeben, d. h. (wie in der Bernoulli-Gleichung)

$$H_t = Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{C^2}{2g} \quad (2.10)$$

In dieser Gleichung wird die Energie erneut als Höhe einer Wassersäule gemessen:  $H_t$  stellt die Höhe dar, auf der sich ein Kilopond Wasser befinden müsste, damit seine potentielle Energie bei Druck null und Geschwindigkeit null gleich der Gesamtenergie desselben Kiloponds Wasser beim Druck  $p$  und der Geschwindigkeit  $C$  ist. Wenn man nun den Unterschied zwischen der Gesamtenergie am Eingang und der Gesamtenergie am Ausgang der Turbine berechnet, erhält man das sogenannte *Nettogefälle*

$$H = \Delta H_t = H_{t1} - H_{t2} = \left( Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{C_1^2}{2g} \right) - \left( Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{C_2^2}{2g} \right) \quad (2.11)$$

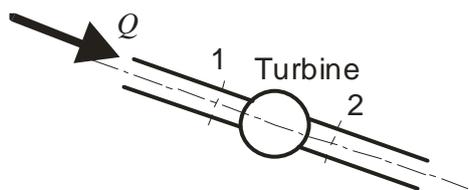


Fig. 2.5 Strömung eines Durchflusses  $Q$  vom Eingang 1 zum Ausgang 2 einer Turbine. Ein- und Ausgang entsprechen im Prinzip der physikalischen Grenze der von einem Konstrukteur gelieferten Maschine

Das Nettogefälle muss vom Bruttogefälle unterschieden werden, d. h. von der Energiedifferenz zwischen dem Hochpunkt und dem Tiefpunkt einer Anlage. Die in den Leitungen ober- oder unterhalb der Turbine verlorene Energie steht ihr für die Umwandlung in mechanische Energie nicht mehr zur Verfügung. Meistens werden diese beiden Punkte durch offene Becken gebildet, auf die der Atmosphärendruck wirkt und in denen die Geschwindigkeit vernachlässigt werden kann. Das *Bruttogefälle*  $H_b$  ist somit ganz einfach gegeben durch den Höhenunterschied der Wasserspiegel in diesen Becken (Abb. 2.6). Wenn das Wasser durch die Leitung fließt, verliert es insgesamt die Energie, die wir mit  $\Delta H_r$  bezeichnet haben, so dass bei der Turbine folgendes Nettogefälle bleibt

$$H = H_b - \Delta H_r \quad (2.12)$$

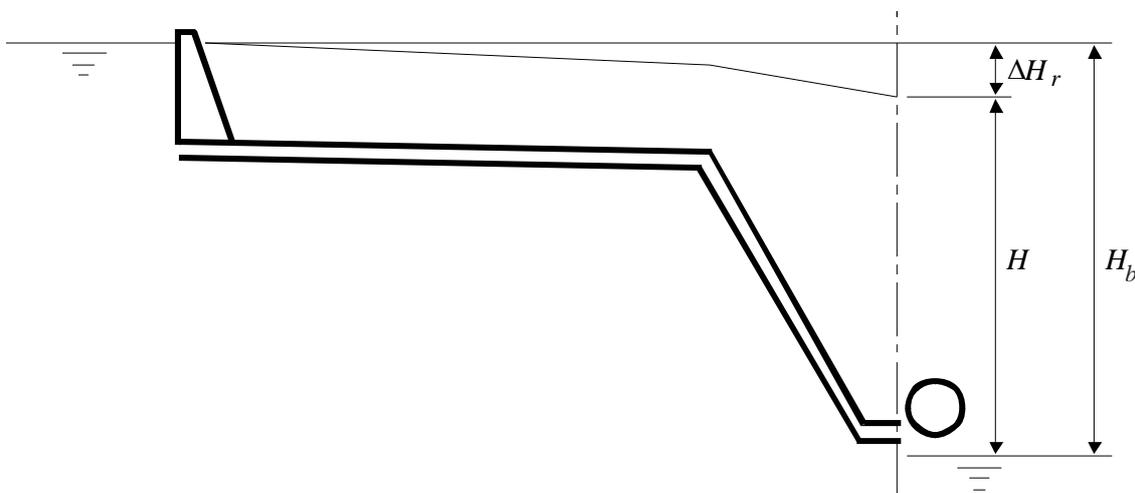


Fig. 2.6 Definition des Nettogefälles  $H$  und des Bruttogefälles  $H_b$  einer Anlage

Bezüglich der Verluste kann hier noch angefügt werden, dass es für die Turbinen ungünstig ist, wenn das Nettogefälle aufgrund der Änderung des Durchflusses zu stark variiert. Einfach ausgedrückt: Durch die Änderung des Nettogefälles variieren die Geschwindigkeiten am Eingang der Maschine und somit die Art und Weise, wie das Wasser auf die Laufräder trifft, wodurch sich die Leistung verringert. Je nach Turbinentyp wirkt sich dies mehr oder weniger stark aus und die Konsequenzen sind mehr oder weniger nachteilig. Für eine Pelton-Turbine zum Beispiel ist eine Abnahme des Nettogefälles um 20% aus dem Gesichtspunkt der Leistung sehr wohl zulässig, doch die Energie, die der Turbine zur Verfügung steht, nimmt dadurch natürlich ab.

## 2.3 Rohrtypen, Aushub

Die ersten Leitungen bestanden aus Holz-, Keramik- oder Bleirohren; später wurden Grauguss, Eternit oder Stahl verwendet. Heute werden nur noch Kunststoff, Duktulguss, Stahl und, seltener, glasfaserverstärktes Harz verwendet (s. die Richtlinien [4.6]). Die Abmessungen sind genormt, so dass Produkte verschiedener Hersteller kombiniert werden können. Es muss jedoch beachtet werden, dass für jeden dieser drei Werkstoffe eigene Normen bestehen und dass der Innendurchmesser keinesfalls dem *Nenndurchmesser* DN entspricht: Bei den Kunststoffrohren ist dieser kleiner, bei den anderen Rohren grösser und variiert je nach Art der Innenbeschichtung. Die Einteilung der Rohre erfolgt anhand des sogenannten *Nenndrucks* PN oder, genauer gesagt, des *zulässigen Bauteilbetriebsdrucks* (PFA), d. h. „des höchsten hydrostatischen Drucks, dem ein Rohrleitungsteil im Dauerbetrieb standhält“ (s. [4.6]). Es existiert auch ein *höchster zulässiger Bauteilbetriebsdruck* (PMA), d. h. „der höchste zeitweise auftretende Druck inklusive Druckstoss, dem ein Rohrleitungsteil standhält“, sowie ein *zulässiger Bauteilprüfdruck auf der Baustelle* (PEA), d. h. „der höchste hydrostatische Druck, dem ein neuinstalliertes Rohrleitungsteil für relativ kurze Zeit standhält, um die Unversehrtheit und Dichtheit der Rohrleitung sicherzustellen“. Diese Drücke sind in den Katalogen der Hersteller angegeben. Eine Leitung muss anhand des Nenndrucks konzipiert werden, d. h. dieser Nenndruck muss an jedem Punkt der Leitung grösser sein als der Druck, der vorherrscht, wenn die Abschlussorgane am unteren Ende der Leitung geschlossen sind. Bei einer stationären Strömung des Wassers ist der statische Druck aufgrund der Verluste kleiner als der Staudruck. Bei transienten Phänomenen kann der Druck während einer relativ kurzen Zeit diesen Wert überschreiten, was beim höchsten zulässigen Bauteilbetriebsdruck berücksichtigt wird. Für das Verlegen, Anschliessen und Dimensionieren der Rohre stellen die Lieferanten Broschüren mit nützlichen Ratschlägen zur Verfügung (siehe z. B. die Kataloge und Websites [4.1] bis [4.5]).

Nachstehend werden wir uns nun nacheinander mit den drei heutzutage am häufigsten benutzten Werkstoffe befassen:

- 1) *Kunststoffe*: Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP) für Druckleitungen, Polyvinylchlorid (PVC) für Leitungen mit freiem Spiegel. Diese Werkstoffe weisen verschiedene Vorteile auf: Druckfestigkeit, Unempfindlichkeit gegenüber Korrosion und vagabundierenden Strömen, geringes Gewicht, wodurch der Transport und das Verlegen vereinfacht werden. Ab einem gewissen Durchmesser sind die Wände jedoch so dick, dass ihre Verwendung in der Praxis schwierig wird. Für Werkstoffe des Typs PE 100 ist der genormte Nenndruck 10 bar (PN 10) oder 16 bar (PN 16). Als äquivalente Sandrauigkeit kann der Wert  $K = 0,1$  mm verwendet werden, um die Tatsache zu berücksichtigen, dass die Verbindungen nicht immer glatt sind. Diese Zahl wurde durch Messungen an einer gebrauchten Leitung bestätigt. Sie ist grösser als die 0,001 mm aus der Tabelle der Abbildung 2.3, aber auch kleiner als die 0,25 mm aus [4.1], die wahrscheinlich Krümmer oder eine Verkalkung berücksichtigen.
- 2) *Duktulguss oder Gusseisen mit Kugelgraphit* (GJS oder ehemals GGG). Es handelt dabei sich um Grauguss, d. h. um eine Legierung aus Eisen und mehr als 2% Kohlenstoff, die dank der Zugabe einer geringen Menge an Magnesium, wodurch der Graphit kleine Kugeln statt Lamellen bildet, duktiler gemacht wird. Um Rost zu verhindern, haben diese Rohre eine Innenbeschichtung aus Polyurethan (PUR), das besonders glatt ist (mit einer Rauigkeit  $K \leq 0,01$  mm gemäss [4.3]), oder aus Zementmörtel ( $K = 0,18$  mm gemäss "Dubbel", [2.7], § B 6.2.2, Fig. 2.3). Die Aussenwand ist in der Regel ebenfalls beschichtet und geschützt, zum Beispiel durch Zink, Zink und Bitumen, Polyurethan oder eine Zink-Aluminium-Legierung. Die

Nennrücke der Rohre selbst sind hoch, z.B. 85 bar für die kleinsten Durchmesser. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass sie durch die Art der Schubsicherung beschränkt werden: bei innenliegender Sicherung auf 25 bar und bei aussenliegender Sicherung auf 63 bar. Für diesen Werkstoff existieren ebenfalls Druckklassen, von denen die Wanddicke abhängt.

- 3) *Stahl*. Für grössere Drücke und Durchmesser werden Stahlrohre verwendet, die innen und aussen beschichtet sind (mit Zementmörtel oder Kunststoff).

Diese Leitungen werden meistens unterirdisch verlegt, ausser wenn sie sich an steilen Hängen befinden oder wenn es sich um Hochdruckleitungen handelt. Dazu muss mithilfe von mehr oder weniger grossen Maschinen ein *Aushub* gemacht werden. Nach dem Verlegen der Leitungen muss der Aushub wieder zugeschüttet und das Grundstück wieder instandgesetzt werden. Solche Aushübe erfordern grosse Bauarbeiten und sind deshalb teuer. Die Kosten werden beeinflusst durch das Gefälle des Grundstücks, die Bodenstärke (Stein oder Erde), die Zugangsmöglichkeiten (in Strassennähe oder in den Bergen) und Faktoren wie die Vegetation, Wiesen, Felder, Wälder usw. und Bauten (Wohnhäuser), welche eine Abweichung von der geplanten Linienführung erfordern können. Wenn die Leitung auf einer bestimmten Strecke als Leitung mit freiem Spiegel konzipiert wurde, muss natürlich auf die Neigung geachtet werden. Bei Druckleitungen kann die Leitung sowohl auf- als auch abwärts gehen. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass der Druck, auch unter Berücksichtigung der Verluste, nur wenig tiefer ist als der Atmosphärendruck, weil sonst Luft eingesaugt werden oder Wasser sich in Dampf (Kavitation) umwandeln könnte, wodurch die Strömung beeinträchtigt würde. Es kann sich auch als nötig erweisen, Lüftungen zu installieren, um beim Füllen der Leitung Luft auszulassen bzw. beim Leeren Luft einzulassen. Auch muss überlegt werden, wie die Leitung geleert werden kann.

## 2.4 Wasserfassung, Entsander, Wasserkammer, Bypass

Neben der Rohrleitung, die oft das wichtigste Element einer Anlage darstellt, können auch andere Konstruktionen nötig sein, um das Wasser zur Turbine zu bringen (siehe insbesondere [2.8] und [2.11]). Beim Austritt aus einer Quelle oder in einem Fluss muss das Wasser mithilfe einer *Wasserfassung* gefasst werden. Diese kann sich neben dem Wasserlauf befinden oder in der Mitte seines Betts, in Form eines Tirolerwehrs. Diese Bauten müssen so konzipiert sein, dass sie bei Hochwasser nicht verstopft werden. Wenn das Wasser Schlack, Sand, Kies oder andere Festkörper mit sich führt, muss ein *Rechen* mit Reinigungsvorrichtungen, ein *Entsander* oder ein *Entkieser* installiert werden. Damit die Leitung immer mit Wasser gefüllt ist, muss bei ihrem Eingang eine gewisse Wassermenge angesammelt werden, so dass der Wasserspiegel sich immer oberhalb der Rohröffnung befindet. Dieses nur einige Kubikmeter grosse Becken wird *Wasserkammer* (oder auch wieder Wasserfassung) genannt. In den Anlagen, in denen der Wasserdurchlauf auch bei ausgeschalteter Turbine sichergestellt werden muss, z.B. in Trinkwasserversorgungs- oder Abwassersystemen, muss parallel zur Turbine ein *Bypass* vorgesehen werden.

Bei einer Grobanalyse müssen diese Elemente nicht im Detail geplant werden, dürfen jedoch nicht vergessen werden, da sie einen Einfluss auf das Design der Anlage und die Anordnung ihrer Bestandteile haben. Ihre Kosten sind zudem sehr oft bei weitem nicht vernachlässigbar.

## 2.5\* Die Seite "Leitung" des Programms MiniHydro

Auf dieser Seite wird die sogenannte *Kennlinie der Leitung* berechnet, d. h. die Kurve, welche das Nettogefälle in Funktion des Durchflusses angibt (Fig. 2.7). Dazu werden die weiter oben erklärten Gleichungen für jeden der zwölf monatlichen Mittelwerte der Durchflüsse, die auf der Seite „Durchfluss“ eingegeben wurden, sowie für die zusätzlichen Durchflüsse, die auf der Seite „Leitung“ angegeben sind, berücksichtigt. Anhand dieser zusätzlichen Durchflüsse können bei geringen Durchflüssen oder bei Durchflüssen, die über dem maximalen monatlichen Durchfluss liegen, mehr Punkte der Kennlinie ermittelt werden.

Die Leitung sollte einen runden Querschnitt haben und mit Wasser gefüllt sein. Für jeden ihrer Abschnitte müssen die Länge, der Innendurchmesser, das Material (Angabe nur zur Information), die äquivalente Sandrauigkeit der Wände, das Bruttogefälle und die Wassertemperatur angegeben werden, dies für die Berechnung ihrer Dichte und ihrer Viskosität. Mittels eines rechten Mausklicks können übrigens die Default-Werte von Excel für die Achsen des Diagramms verändert werden.

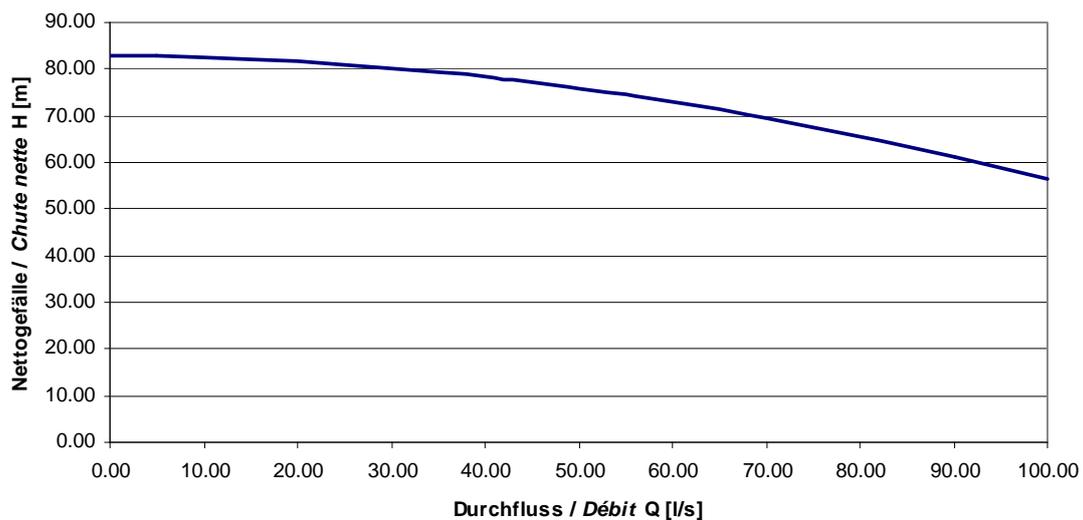


Fig. 2.7 Beispiel einer Kennlinie einer Leitung aus Polyethylen, Länge  $L = 650$  m, DN 250, Innendurchmesser  $D = 204,6$  mm, Rauigkeit  $K = 0,1$  mm. Wenn der Durchfluss gleich null ist, entspricht das Nettogefälle dem Bruttogefälle, in diesem Fall  $H_b = 83$  m, und bei zunehmenden Verlusten sinkt das Nettogefälle  $H$  näherungsweise mit dem Quadrat des Durchflusses

Um die Entnahmen oder Anschlüsse entlang einer Leitung zu berücksichtigen, kann für jeden Leitungsabschnitt in den blauen Feldern der letzten Zeile in der Tabelle ein *zusätzlicher Durchfluss* zum turbinierten Durchfluss hinzugefügt werden. Dieser zusätzliche Durchfluss wird als konstant angenommen, d. h. er hängt nicht vom turbinierten Durchfluss ab und wird in der Berechnung der hydraulischen Energieverluste berücksichtigt.

### 3 Berechnung der produzierten Energie

#### 3.1 Gesamte jährliche Energieproduktion

Wenn der Durchfluss durch die Anlage und das Nettogefälle bekannt sind, kann die Energie berechnet werden, die von dieser Anlage produziert werden kann. Definieren wir zuerst die hydraulische Leistung, d. h. die im Wasser enthaltene Energie, die von der Turbine in mechanische Leistung an ihrer Welle umgewandelt wird. Wie wir zuvor gesehen haben, stellt das Nettogefälle  $H$  die gesamte in einem Kilopond Wasser enthaltene Energie dar. Durch die Multiplikation dieser Grösse mit der Anzahl Kilopond, die pro Sekunde durchfliesst, erhält man die *hydraulische Leistung*

$$P_h = \rho Q g H \quad (3.1)$$

Wie vorher entspricht  $\rho = 1'000 \text{ kg/m}^3$  der Dichte des Wassers und  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  der Erdbeschleunigung. Moderner ausgedrückt ist  $\rho Q$  der Massenstrom durch die Maschine und  $g H$  die spezifische Energie, die in einem Kilogramm (Masse) Wasser enthalten ist.

Unter Berücksichtigung des Gesamtwirkungsgrades der Turbine  $\eta_t$  erhält man die *mechanische Leistung*, die an der Welle der hydraulischen Maschine verfügbar ist, nämlich

$$P = \eta_t P_h = \eta_t \rho Q g H \quad (3.2)$$

Der Wirkungsgrad einer guten Kleinturbine beträgt ca. 80-90 %, je nach Durchfluss- und Gefällebedingungen. Berücksichtigt man zudem den Wirkungsgrad  $\eta_g$  des elektrischen Generators, der 80-95 % erreicht, erhält man die *elektrische Leistung* an den Klemmen der elektrischen Maschine, nämlich

$$P_{el} = \eta_g P = \eta_g \eta_t P_h = \eta_g \eta_t \rho Q g H \quad (3.3)$$

oder mit dem Gesamtwirkungsgrad  $\eta$  beider Maschinen zusammen

$$P_{el} = \eta P_h = \eta \rho Q g H \quad (3.4)$$

Wenn man genaue Angaben zu den Wirkungsgraden  $\eta_t$  und  $\eta_g$  der beiden Maschinen an verschiedenen Betriebspunkten verfügt, d. h. in Funktion des Durchflusses und des Gefälles für die Turbine und in Funktion der Leistung für den Generator, kann man die elektrische Leistung für jeden Monat des Jahres genau berechnen. Da man bei einer Grobstudie meistens noch nicht über detaillierte Angaben zu den Maschinen verfügt und eventuelle Unterbrüche aufgrund von Stromausfällen, Revisionen, Pannen oder Reparaturen an den Rohrleitungen berücksichtigt werden müssen, kann man für den mittleren Wirkungsgrad den relativ pessimistischen Wert von  $\eta = 70 \%$  annehmen (wie in [0.2], SS. 17 und 81 vorgeschlagen) und als konstant voraussetzen. Man erhält so eine einfache und vorsichtige Schätzung.

Wenn die Anlage während des Zeitintervalls  $\Delta t$  mit der Leistung  $P_{el}$  funktioniert, produziert sie die *elektrische Energie*

$$E_{el} = P_{el} \Delta t \quad (3.5)$$

Die *gesamte jährliche Energieproduktion* der Anlage entspricht der Summe der monatlichen Energieproduktionen unter Berücksichtigung der verschiedenen monatlichen mittleren Durchflüsse und der entsprechenden Nettogefälle (deren Bestimmung haben wir in den Kapiteln 1 und 2 beschrieben).

Neben der in einem Jahr produzierten Energie, die wir zur Berechnung des durch den Verkauf des Stroms erzielten Gewinns verwenden, benötigen wir für die korrekte Dimensionierung des Anschlusses an das Stromnetz noch die *maximale elektrische Leistung*, die von der Anlage beim maximalen Durchfluss erzeugt wird. Diese wird anhand der Formeln (3.3) oder (3.4) berechnet, doch werden weniger pessimistische Werte für den Wirkungsgrad verwendet, um zu verhindern, dass die Kabel unterdimensioniert werden, zum Beispiel  $\eta = 75\%$  für eine kleine Maschine und  $\eta = 85\%$  oberhalb 200 kW.

Um die für den Erhalt der gesetzlich vorgesehenen Einspeisevergütungen notwendigen Angaben liefern zu können, wird noch die *jährliche mittlere Leistung* benötigt, die in der Stromversorgungsverordnung (vgl. [9.5], Anhang 1.1) „äquivalente Leistung“ genannt wird. Diese entspricht der elektrischen Leistung einer Maschine, welche das ganze Jahr, d.h. 8760 h, mit konstanter Leistung fahren würde und welche die oben erhaltene jährliche Energie produzieren würde, und wird wie folgt bestimmt, wenn  $E_{el}$  in kWh ausgedrückt ist,

$$P_m = \frac{E_{el}}{8760h} \quad [\text{kW}] \quad (3.6)$$

Schlussendlich benötigt man noch die *mittlere Bruttoleistung* oder mittlere mechanische Bruttoleistung, d. h. die Leistung, die man hätte „mit den wirklich zufließenden Mengen, soweit sie nicht die Aufnahmefähigkeit der ... Anlagen überschreiten“, wenn weder in den Leitungen noch in den Maschinen Verluste auftreten würden (vgl. Art. 51 des Bundesgesetzes über die Nutzbarmachung der Wasserkraft [9.1]); mit anderen Worten handelt es sich dabei um eine hydraulische Bruttoleistung, oder auch um die in der Natur verfügbare Leistung. Sie wird anhand des Bruttogefälles und ohne die oben erwähnten Wirkungsgrade berechnet. Für die augenblickliche Leistung erhält man zunächst

$$P_b = \rho Q g H_b \quad (3.7)$$

dann für die Energie während eines Zeitintervalls  $\Delta t$

$$E_b = P_b \Delta t = \rho Q g H_b \Delta t \quad (3.8)$$

und schliesslich, nach der Summation über die Monate eines Jahres, erhält man für die gesuchte mittlere Bruttoleistung

$$P_{b,m} = \frac{E_b \text{ jährlich}}{8760\text{h}} \quad [\text{kW}] \quad (3.9)$$

### 3.2\* Die Seite "Energie" des Programms MiniHydro

Auf dieser Seite wird die gesamte in einem Jahr produzierte elektrische Energie anhand der auf der Seite „Durchfluss“ angegebenen monatlichen mittleren turbinierten Durchflüsse berechnet. Für jeden monatlichen Durchfluss wird das entsprechende Nettogefälle berücksichtigt, und zwar unter Berücksichtigung der durch eventuelle zusätzliche Durchflüsse entstandenen Verluste (vgl. Seite „Leitung“).

Der vom Anwender angegebene Ausbaudurchfluss beeinflusst die Ergebnisse: Wenn er grösser ist als die maximal turbinierbare Wassermenge, erscheint eine Warnmeldung, doch die Energie wird dennoch anhand der mittleren Durchflüsse der Seite „Durchfluss“ berechnet. Dies kann in der Tabelle, in der der Durchfluss und das Nettogefälle für jeden Monat aufgeführt sind, überprüft werden. Wenn der Ausbaudurchfluss jedoch kleiner als einer der monatlichen mittleren Durchflüsse ist, wird dieser Ausbaudurchfluss als maximaler Durchfluss betrachtet, der durch die Leitung und die Turbine fliesst. Dies bewirkt eine Verringerung der betroffenen monatlichen Durchflüsse, eine Anpassung des Nettogefälles und somit eine Veränderung der produzierten Energie. Auch hier erscheint eine Warnmeldung. Wenn aus Gründen der Trinkwasserzuführung eine grössere Wassermenge als der maximal turbinierbare Durchfluss durch die Leitung geleitet und ein Teil davon durch den Bypass geleitet werden soll, muss der Benutzer „manuell“ eingreifen: Auf der Seite „Leitung“ muss das Nettogefälle für den Gesamtdurchfluss durch die Leitung berechnet werden. Dazu verwendet man den zusätzlichen Durchfluss (dieser variiert nicht jeden Monat). Anschliessend ersetzt man das in der Tabelle der Seite „Energie“ automatisch berechnete Nettogefälle durch dieses Nettogefälle. Diese Art von Situation tritt jedoch in der Regel höchstens ein- bis zweimal pro Jahr auf. Da die anderen Monate nicht von diesem zusätzlichen Durchfluss betroffen sind, darf man nicht vergessen, sie auf der Seite „Leitung“ anschliessend zu löschen.

Die verschiedenen Leistungen, die wir im vorhergehenden Abschnitt definiert haben, werden automatisch bestimmt. Der Anwender muss jedoch die für diese Berechnungen benötigten Wirkungsgrade eingeben.

## 4 Netzanschluss und Steuersignal

Um vom örtlichen Elektrizitätswerk oder einem anderen Netzbetreiber, der die von der Kleinwasserkraftanlage produzierte Energie übernimmt, vergütet zu werden, muss der produzierte Strom in das Netz eingespeist werden. Dazu kann die Anlage durch einen Nieder- oder einen Mittelspannungsanschluss an das Stromnetz angeschlossen werden, und zwar je nach der maximalen Leistung des Wechselstromgenerators, der Entfernung zwischen der Anlage und dem Stromnetz und dem günstigeren Preis des einen der beiden Anschlüsse. Obwohl der Anschluss des Kleinwasserkraftwerks an ein Mittelspannungsnetz unweigerlich einen Niederspannungsanschluss zwischen dem Generator und dem Transformator umfasst, werden wir diese beiden Anschlussarten trotzdem unterscheiden, da sich ihre Komponenten, ihre Dimensionierungen sowie die dafür notwendigen finanziellen Aufwendungen unterscheiden.

### 4.1 Niederspannungsanschluss und notwendige Kabel

Die Kleinwasserkraftanlage kann über ein erdverlegtes *Kabel* (es handelt sich genau gesagt um einen isolierten Leiter, der oft einfach Kabel genannt wird) oder über eine *Freileitung* (nicht isolierter Leiter in der Luft, oft einfach Leitung genannt) an das *Niederspannungsnetz* angeschlossen werden. Oberirdische Kabel werden hier und da benutzt, wenn Hindernisse wie Flüsse überwunden werden müssen und der Rest der Verbindung schon unterirdisch ist. Aus ästhetischen und Sicherheitsgründen werden jedoch erdverlegte Kabel bevorzugt. Zu bemerken ist hier, dass die Aushübe für die Wasserleitungen manchmal auch für das Verbindungskabel zum Stromnetz verwendet werden können.

Damit zwischen dem Wechselstromgenerator und dem Stromnetz ein Niederspannungsanschluss errichtet werden kann, der keine Installation eines Transformators in der Nähe oder in der Anlage selbst erfordert, müssen die durch den in den Leitern fließenden Strom erzeugten Verluste annehmbar sein. Diese drücken sich aus durch einen *Spannungsabfall*, der auf einen maximal zulässigen Wert beschränkt werden muss. Dieser Wert wird oft auf 5% der Nennspannung des Netzes festgelegt, wenn die Anlage bei voller Leistung läuft. Durch die Wahl des geeigneten Kabels kann dieser maximale Spannungsabfall zwischen dem Netz und der Kleinwasserkraftanlage eingehalten werden. Manchmal kann das Kabel der Anlage an ein bestehendes Kabel angeschlossen werden, das relativ weit vom Stromnetz entfernt ist. In diesem Fall muss die Aufeinanderfolge dieser beiden Kabel bei der Berechnung des gesamten maximalen Spannungsabfalls, der durch den eingespeisten Strom erzeugt wird, berücksichtigt werden. Da die elektrischen Leistungen meist über ca. 10 kW liegen, wird systematisch ein dreiphasiger Anschluss verwendet. Das Kabel hat drei Phasenstränge mit einem Querschnitt von je 10 bis 300 mm<sup>2</sup> sowie einen konzentrischen Leiter, der insbesondere dem Anschluss des Sternpunkts dient, der erforderlich ist, wenn nur eine einzige Phase zur Speisung der verschiedenen elektrischen Geräte der Anlage verwendet werden soll. Bei *Nennspannungen*  $U_N$  in V, die nicht grösser sind als 20 kV, kann der relative Spannungsabfall  $p_{AC3phas}$ , der durch den Transport einer *Wirkleistung*  $P_B$  in W erzeugt wird, die durch ein Drehstromkabel mit der Länge  $l_L$  in km fließt, mittels folgender Formel einfach berechnet werden (falls er gering bleibt):

$$P_{AC3phas} = \frac{\Delta U_{12}}{U_2} = \frac{1}{U_N^2} P_B l_L K_Q \quad (4.1)$$

wobei  $K_Q$ , ausgedrückt in  $\Omega/\text{km}$ , die für jede Kabelart typische *bezogene Längsimpedanz* darstellt. Dieser Parameter, der vom Spannungsniveau des Kabels, dem Material der Leiter, ihrem Querschnitt sowie dem Leistungsfaktor  $\cos \phi$  abhängt, kann einer allgemeinen Tabelle entnommen werden oder wird vom Hersteller zur Verfügung gestellt (z. B. [6.2]).  $\Delta U_{12}$  steht für den Spannungsabfall auf dem Kabel und  $U_2$  für die Spannung am Anschlusspunkt des Kabels an das Verbundnetzwerk. Bei einem Niederspannungsanschluss werden in der Regel die Längsimpedanz von 1 kV-Kabeln aus Kupfer mit einer Last, deren  $\cos \phi$  den eher pessimistischen Wert 0,8 hat, angenommen. Wenn man also die von einem Generator mit 400 V-Spannung produzierte Wirkleistung kennt, welche ja aus der Multiplikation des Generatorwirkungsgrades mit der von der Turbine erzeugten mechanischen Leistung (vgl. 3.3) gegeben wird, sowie die Entfernung zwischen der Anlage und dem Stromnetz, muss nur noch der geeignete Querschnitt des Niederspannungskabels gewählt werden, damit der Spannungsabfall auf dem gesamten Anschluss nicht über 5 % der Nennspannung liegt, d. h.  $p_{AC3phas} < 0,05$ .

Bei jedem elektrischen Kabel gibt es zudem einen zulässigen Strom: Wenn dieser überstiegen wird, entsteht eine *Erwärmung*, welche die Isolation der Leiter zerstören kann. Wenn man die Temperatur der Kupferleiter eines erdverlegten Kabels auf 60°C beschränken will, gibt der Hersteller einen Stromwert an (vgl. [6.2]), der für eine variable Industriellast von 100% bzw. 60% des zulässigen Stroms während 10 bzw. 14 Stunden gilt. Bei der Dauerlast des Anschlusses einer Kleinwasserkraftanlage kann dieser Wert einfach verändert werden: Der Korrekturfaktor für die Dauerlast, d. h. eine Belastung von 100% während 24 Stunden, beträgt 0,85 für ein Kabel in einem unterirdischen Rohr (vgl. [6.2]). Der erhaltene Stromwert berücksichtigt zudem eine Verlegetiefe von 0,7 bis 1 m, eine maximale Bodentemperatur von 20°C, einen maximalen spezifischen Wärmewiderstand des Bodens von 1°C m/W sowie eine maximale Lufttemperatur von 30°C. In der Regel ist es nicht nötig, diese Parameter, die nötigenfalls anhand von diversen Faktoren auch korrigiert werden können, anzupassen.

Ein Niederspannungsanschluss muss also dimensioniert werden, um einerseits den Spannungsabfall von langen Verbindungen innerhalb von zulässigen Grenzen zu halten und andererseits den vom Kabellieferanten angegebenen zulässigen Strom nicht zu überschreiten; dieser muss bei kurzen Anschlusslängen überprüft werden, auch wenn der Spannungsabfall gering ist. Bei einem erdverlegten Kabel mit einem maximalen Querschnitt von  $3 \times 300 / 300 \text{ mm}^2$ , dessen Leitertemperatur auf 60°C beschränkt werden soll, entspricht somit die maximal übertragbare Leistung einer Kleinwasserkraftanlage ca. 193 kW ( $\cos \phi = 0,8$ ). Wenn dieser Wert überschritten wird, wird auch der maximal zulässige Strom bei Dauerlast überschritten und das Kabel läuft Gefahr, beschädigt zu werden, dies wenn seine Leiter wärmer als 70°C (PVC-isoliert) bzw. 90°C (kunststoffisoliert) werden. Ausserdem kann diese Leistung über eine maximale Distanz von 330 m übertragen werden, wenn ein Spannungsabfall von 5 % der Nennspannung zugelassen wird. Bemerkenswert ist weiter, dass durch das Verlegen von zwei parallelen Kabeln die maximal übertragbare Leistung zwar verdoppelt werden kann; zu befürchten ist dabei jedoch, dass die Kosten viel höher als diejenigen eines Mittelspannungsanschlusses ausfallen.

Bei geringen Leistungen können grössere Distanzen zurückgelegt und der Spannungsabfall kann auf annehmbare Werte beschränkt werden. Zum Beispiel ermöglicht ein Kabel mit dem Querschnitt  $3 \times 150 / 150 \text{ mm}^2$  die Übertragung einer maximalen dreiphasigen Leistung von 20 kW über eine Entfernung von ca. 2 km. Ein solches Kabel könnte übrigens eventuell auch verwendet werden, um den öhydraulischen Antrieb einer Wasserfassung und deren Entsanders zu versorgen. Zur Versorgung des Gerätes zur Niveaumessung in einer Wasserkammer (einige Dutzend Watt mit einer einphasigen Spannung) ist ein noch kleinerer Querschnitt ausreichend.

Zu den für den Niederspannungsanschluss einer Kleinwasserkraftanlage notwendigen Geräten gehört neben den Leistungsschaltern, die den Maschinensatz und die internen elektrischen Installationen schützen (vgl. [6.4]), auch eine Schmelzsicherung, die am Eingang des Gebäudes montiert werden muss. Auch wenn die Verwendung von Kabeln mit grossen Durchmesser relativ kostspielig sein kann, bleibt der Niederspannungsanschluss dennoch eine einfach umzusetzende Möglichkeit.

## 4.2 Mittelspannungsanschluss und notwendige Kabel

Wenn die von einer Kleinwasserkraftanlage produzierte Leistung 200 kW übersteigt oder die Entfernung zwischen dem Generator und dem Stromnetz zu gross wird, um ein Niederspannungskabel zu verwenden, kann man auch auf einen *Mittelspannungsanschluss* zurückgreifen (je nach existierendem Netz 12, 16 oder 20 kV). Statt Niederspannungskabel mit grossen Querschnitten nebeneinanderzulegen, ist die Installation einer Transformatorenstation in der Nähe der Maschinengruppe vorzuziehen. Der Wechselstromgenerator und die Sekundärwicklungen des Transformators werden mit Niederspannungskabeln verbunden, die einpolig sein und bei hohen Leistungen über grosse Querschnitte verfügen können. Ein Mittelspannungskabel verbindet anschliessend die Klemmen der Primärwicklungen des Transformators mit dem Mittelspannungsnetz. Ein solches Kabel verfügt über einen Leiterquerschnitt von mindestens  $50 \text{ mm}^2$ , wodurch unter einer Spannung von 16 kV und unter denselben Verlege- und Betriebsbedingungen wie beim Niederspannungsanschluss schon eine maximale Wirkleistung von ca. 3,4 MW ( $\cos \phi = 0,8$ ) abgeleitet werden kann. Bei einer Entfernung von 6 km stellt man jedoch fest, dass dieses Kabel einen elektrischen Energieverlust verursacht, der in Wärmeenergie umgewandelt wird, der ca. 5,5 % der eingespeisten Energie, d. h. 186 kW, entspricht, auch wenn der Spannungsabfall unter 5 % der Nennspannung bleibt. Wenn man einen Leiterquerschnitt von zum Beispiel  $95 \text{ mm}^2$  wählen würde, könnte dieser Verlust um fast die Hälfte verringert werden.

Für einen Mittelspannungsanschluss sind neben den oben erwähnten *Kabeln* auch ein *Transformator* nötig, dessen Leistung in kVA der *Nennscheinleistung* entspricht, die man durch die Division der erzeugten Wirkleistung durch den Faktor  $\cos \phi$  erhält. Eine solche Leistung charakterisiert auch den Wechselstromgenerator einer Anlage. Erforderlich ist neben dem Niederspannungslasttrennschalter zwischen der Anlage und den Sekundärwicklungen des Transformators auch eine druckgasisolierte (SF 6) *Mittelspannungsschaltkapsel*, die zwischen den Primärwicklungen des Transformators und dem Mittelspannungsnetz installiert wird. Diese Vorrichtung dient als *Schalter* und als *Sicherung*: Sie kann sowohl die Leitung trennen als auch den Transformator schützen. Am anderen Ende des Niederspannungskabels kann der Anschluss in der Trafostation oder einer Anschlusskammer erfolgen. Auf jeden Fall muss ein

neuer *Schalter* neben der bestehenden Schaltanlage installiert werden. Es besteht auch die Möglichkeit des Anschlusses an ein Kabel in der Nähe des Kraftwerkes; doch dies erfordert den Bau eines Raums mit einer Schaltanlage, womit jedes angeschlossene Kabel (nun sind es deren drei) getrennt werden kann.

Der Anschluss eines Kleinwasserkraftwerkes an das Mittelspannungsnetz erfordert somit den Bau einer vollständigen Trafostation. Diese kann sich im Innern des Kraftwerkes befinden, wenn das für die Turbine vorgesehene Gebäude noch nicht gebaut wurde, wodurch dessen Kosten jedoch steigen. Die Trafoanlage kann auch separat gebaut werden, eventuell in einem vorgefertigten Unterstand in der Nähe der Anlage. Die Installation eines Transformators für die Anlage in einer Gegend, die noch nicht mit Strom versorgt wird, kann für andere Personen (Chalets, Alphütten usw.) von Vorteil sein. In diesem Fall kann gehofft werden, dass das Kraftwerk nicht die gesamten Kosten dafür tragen muss.

### 4.3 Zur Turbinensteuerung notwendiges Signal

Um den automatischen Betrieb der Kleinanlage zu ermöglichen, wirkt im Allgemeinen der Turbinenregler, der für die Steuerung der Düsen- oder der Leitapparatöffnung zuständig ist, in Anhängigkeit des Wasserstandes in einer Wasserkammer oder in einem Reservoir, die sich vor oder nach der Turbine befinden. Es kann auch sein, dass er direkt von einem Sollwert abhängt, der von einem schon auf dem Trinkwasserversorgungsnetz vorhandenen Überwachungssystem vorgegeben wird. Wir interessieren uns hier nicht für die kraftwerksinternen Signale (Temperaturen der Komponenten, Drehzahl, elektrische Spannungen usw.), sondern ausschliesslich für das Signal, das vom Kraftwerksbetreiber geliefert werden muss, um den Durchfluss zu steuern.

Wenn das Wasser direkt von Quellenfassungen stammt und ein grosser Teil der Schüttung dieser Quellen turbinieren soll, funktioniert die Turbine so, dass im (relativ kleinen) Einlaufbauwerk vor der Druckleitung ein *konstanter Wasserspiegel* aufrechterhalten wird. Falls der Ausbaudurchfluss der elektromechanischen Gruppe viel grösser als die Höchstwerte des Trinkwasserverbrauchs der versorgten Gemeinschaft ist, ist nur diese Messung vor der Turbine notwendig. Bei Durchflüssen, die grösser als der Ausbaudurchfluss sind, wird der nicht nutzbare Überschuss in den Überlauf des Einlaufbauwerkes geleitet. Der Verlust dieses Wassers, das auch ohne Turbinierung in einen Überlauf geleitet werden würde, hat somit keinen negativen Einfluss auf die Trinkwasserversorgung.

Wenn aus Auslegungsgründen der Turbine der Ausbaudurchfluss so gewählt wird, dass er zu gewissen Zeiten des Jahres kleiner ist als der maximale Durchfluss (hoher Verbrauch eines Ferienorts während einer kurzen Zeit, aussergewöhnliche Schüttung der Quellen, bestehende Leitung, die unterdimensioniert wurde usw.), kann der parallel zur Turbine installierte *Bypass* verwendet werden. Dieser kommt somit nicht nur beim Ausschalten der Turbine zum Einsatz, sondern kann parallel zur Turbine geöffnet werden, wenn der maximal turbinierbare Durchfluss unzureichend ist. Da jedoch durch den zusätzlichen Durchfluss durch den Bypass zusätzliche Energieverluste in der Druckleitung entstehen, sollte seine Verwendung möglichst beschränkt werden. So kann vermieden werden, einerseits dass Wasser herunterströmt, ohne Energie zu produzieren, und andererseits dass Energieverluste in der Leitung sowie die dadurch zu erwartende Verringerung des Wirkungsgrades der Turbine verursacht werden. Zu diesem Zweck

kann das Becken, das sich unmittelbar nach der Anlage befindet, als Ausgleichsbecken verwendet werden. Wenn der mittlere Tagesverbrauch kleiner oder gleich dem maximalen Durchfluss der Turbine ist, muss der Bypass nicht aktiviert werden, auch wenn der Durchfluss am Tage grösser ist als der turbinierter Durchfluss. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass das Volumen des Beckens ausreichend gross ist, sodass schwankende Wasserpegel, die durch die ungleichen ein- und austretenden Durchflüsse entstehen, möglich sind. Ist dies der Fall, kann der optimale Betrieb der Turbine trotz des fluktuierenden Trinkwasserbedarfs der Bevölkerung sichergestellt werden. Man muss also den minimalen Wasserpegel des Beckens nach der Turbine genau bestimmen und messen: Wenn dieser Pegel unterschritten wird, wird der Bypass geöffnet.

Trinkwasser muss oft in *Filteranlagen* aufbereitet werden, bevor es als Getränke angeboten werden kann. Die Ultrafiltration, mit der Bakterien und Viren aus dem Trinkwasser entfernt werden können, wird heutzutage relativ oft angewandt. Die Kosten für die Installation und auch den Betrieb sind dennoch nicht vernachlässigbar, weshalb die verschiedenen Bestandteile korrekt dimensioniert werden müssen. Diese Filtersysteme werden in Bezug auf den maximalen Trinkwasserverbrauch einer Gemeinschaft dimensioniert, können ihre Trinkwasserproduktion jedoch an die jeweilige Nachfrage anpassen. Deshalb entspricht in einem Trinkwassernetz, das eine Filteranlage umfasst, das aufbereitete Wasservolumen dem verbrauchten Wasservolumen, sodass unterhalb der Filteranlage kein Überlauf stattfindet. Bei Installation einer Turbine unterhalb einer solchen Anlage kann somit genau das Volumen des aufbereiteten Trinkwassers verwertet werden. In einem Trinkwassernetz mit Filteranlage können oberhalb der Wasserbecken Schwimmer- und Druckreduzierventile angebracht werden, um einen Überlauf zu verhindern. In moderneren Trinkwassernetzen erlauben es Niveausensoren und gesteuerte Ventile, die gespeicherten Wasservolumina zu kontrollieren, um den Betrieb der Filteranlage zu regulieren. Es ist somit sehr einfach, statt eines dieser Ventile ein Kleinwasserkraftwerk zu installieren. Seine Steuerung erfolgt über die Messung des Wasserpegels im unteren Becken, das eventuell direkt auf der Turbine folgt, für den Fall dass ein Schwimmerventil ersetzt wird. In einem automatisierten Trinkwassernetz sind die Steuerungskabel schon vorhanden. Es genügt deshalb, die an die Turbine gesandten Signale anzupassen. Ausserdem kann der Betrieb der Turbine, wie auch derjenige der Filteranlage, optimiert werden, wenn zum Beispiel häufige Starts und grosse Durchflussänderungen vermieden werden sollen. Wie oben erwähnt wird die Verwendung von Reservoirs als Ausgleichsbecken empfohlen, sowohl aus energietechnischer Sicht als auch für die Filterung des Trinkwassers. Aus Sicherheitsgründen muss parallel zur Turbine ein Bypass installiert werden, damit das Reservoir auch im Fall einer Panne der Gruppe oder des Stromnetzes gefüllt wird. Das existierende Ventil, dessen Funktion nun von der Turbine übernommen werden soll, kann eventuell dazu verwendet werden.

Wenn der Betrieb einer Turbine einen Niveaugeber in einer Wasserkammer in relativ weiter Entfernung erforderlich macht, kann für die Verbindung des Messgerätes mit der Anlagensteuerung ein *Glasfaserkabel* verwendet werden. Im Falle wo die Turbine ein einfaches Schwimmerventil ersetzt, reicht ein Steuerkabel aus Kupfer aus, da sich der Niveaugeber im Reservoir befindet, das unmittelbar auf die Anlage folgt. Bei grossen Entfernungen und wenn keine Aushubarbeiten für das Auswechseln der Druckleitung vorgesehen sind, kann das Verlegen von unterirdischen Kabel rasch teuer zu stehen kommen. Deshalb wird eine Übertragung der Steuersignale mit Hertzschen Wellen oder, falls es das Relief ermöglicht, über WiFi-Verbindungen vorgezogen.

Schliesslich müssen die Messgeräte und die eventuellen Sender mit Strom versorgt werden. Wie schon weiter oben erwähnt, können *Niederspannungskabel* geringe Leistungen wie diejenige dieser Geräte über längere Strecken transportieren, falls kein Stromnetz an deren Aufstellungsort zur Verfügung steht. Dieses Kabel kann an das Kleinkraftwerk angeschlossen werden, wenn die Entfernung nicht zu gross ist und wenn für die Wasserleitungen ein Aushub vorgenommen wird. Anderenfalls können die Geräte auch an einem anderen Punkt des Niederspannungsnetzes angeschlossen werden. Wenn die Wasserkammer, in der die Messung vorgenommen wird, sich wirklich sehr weit von jeglichem Stromanschluss entfernt befindet, kann eine Inselanlage, bestehend aus einem Solarpanel, einer Batterie und eventuell einem Wechselrichter, den Stromverbrauch der für die Messung und die Signalübertragung benötigten Geräte decken.

#### 4.4\* Die Seite „Anschluss“ des Programms MiniHydro

Auf der Seite "Anschluss" des Programms MiniHydro wird eine Berechnung durchgeführt, um dem Anwender eine Empfehlung zur Anschlussart der Kleinwasserkraftanlage an das Stromnetz zu liefern. Die Installations- und Betriebsbedingungen der Niederspannungskabel zuoberst auf der Seite ermöglichen die Bestimmung der Kabeleigenschaften, die für die Berechnung des Maximalstroms und des Spannungsabfalls benötigt werden. An dieser Stelle werden wir uns ausschliesslich mit erdverlegten Kabeln befassen, deren Verwendung heute stark empfohlen wird.

Der Benutzer muss die Länge des Anschlusses angeben, die *verkettete oder Linien-spannung*, d. h. die zwischen zwei Phasen gemessene Spannung, des Verteilernetzes, an das die Anlage angeschlossen werden kann (Niederspannungsnetz mit ca. 400V) sowie den relativen Wert des maximal zulässigen Spannungsabfalls auf dem Kabel (max. 3 bis 5 %). Einige Zeilen darunter werden das Ergebnis sowie das Spannungsniveau angezeigt, d. h. NS für Niederspannung und MS für Mittelspannung. Wenn sich ein Niederspannungsanschluss als geeignet herausstellt, werden die Leiterquerschnitte des zu installierenden Kabels angezeigt.

Wenn ein Niederspannungsanschluss nicht ausreicht, da einer oder mehrere Parameter (Leistung, Länge, maximaler Spannungsabfall) zu gross werden, wird angegeben, dass sich ein Mittelspannungsanschluss besser eignet; es werden jedoch nur wenige Informationen zum erforderlichen Querschnitt und Kabeltyp angegeben. Die Übertragung grosser Leistungen erfordert nämlich besondere Vorsicht, da diese mit grossen Energieverlusten einhergehen kann. Deshalb geht man davon aus, dass ein Mittelspannungskabel mit Leiterquerschnitten von  $50 \text{ mm}^2$  geeignet ist, dies solange die thermischen Verluste 1 % der weggeleiteten Leistung nicht überschreiten; ausserdem müssen die Grenzen von 3,4 MW für die Leistung und von 20 km für die Länge eingehalten werden. Das Programm MiniHydro gibt somit an, dass sich ein Kabel mit einem Querschnitt von  $3 \times (1 \times 50 / 16) \text{ mm}^2$ , d.h. mit drei Leitern mit  $50 \text{ mm}^2$  mit je einer konzentrischer Abschirmung von  $16 \text{ mm}^2$ , für elektrische Leistungen bis zu 3,4 MW verwendbar ist; bei dieser Leistung ist jedoch seine Länge auf etwa 1 km beschränkt. Umgekehrt liegt die Länge bei fast 20 km, wenn die Leistung nur 200 kW beträgt. Bei höheren Leistungen als 3,4 MW, bei grösseren Längen als 20 km und bei anderen Fällen, wo die thermischen Verluste (pessimistisch mit dem Widerstand von Kupfer bei  $70^\circ\text{C}$  berechnet) höher als 1 % der übertragenen Leistung liegen, wird nur angegeben, dass der Querschnitt grösser sein muss als

50 mm<sup>2</sup>, was für jeden Fall überprüft und genau bestimmt werden muss. Nähere Einzelheiten zu den Mittelspannungskabeln findet der Benutzer in den Werken in der Literaturliste.

Wenn der Benutzer weiss, welchen Kabeltyp er verwenden muss, kann er anhand der Tabelle einige Zeilen oberhalb des Rechenergebnisses die Kosten für den Anschluss abschätzen. Dieser Betrag kann anschliessend auf die Seite „Investitionskosten“ des Programms MiniHydro übertragen werden, auf der einige Zeilen für die Preise der verschiedenen elektrischen Kabel vorgesehen sind. Für das Steuerungskabel wird in der Regel ein Preis von 12 CHF/m angenommen. Im Rahmen der Grobanalyse dienen die Berechnungen im Zusammenhang mit dem elektrischen Anschluss hauptsächlich der Schätzung des Kostenaufwands für die Installation eines Kabels. Die Informationen zu Kabelgrösse und -typ liefern Anhaltspunkte nicht nur zum Preis dieses Kabels selbst, sondern auch zu den damit verbundenen Arbeiten, insbesondere wenn Aushübe nötig sind, weil die bestehenden Rohre nicht ausreichend Platz bieten, oder wenn bei der Planung des Gebäudes der Anlage neben der Maschinengruppe auch Platz für eine Trafostation eingeplant werden muss.

## 5 Investitionen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Investitionen im Zusammenhang mit dem Bau einer Kleinwasserkraftanlage vorgestellt. In erster Linie werden die wichtigsten Bauten und Komponenten, die gebaut oder gekauft und finanziert werden müssen, zusammen mit den ungefähren Kosten vorgestellt. Diese Kosten sind natürlich nur Näherungswerte und variieren stark, insbesondere in Funktion der Leistung und der Grösse der Anlage, der Art und des Gefälles des Terrains, auf dem sich die Leitung oder die Zentrale befinden, sowie der Wirtschaftslage und der Unternehmen. Diese Zahlen bilden die unentbehrliche Grundlage für die Einschätzung der Rentabilität eines Projekts, bevor detailliertere Studien durchgeführt werden und mit dem Bau der Anlage begonnen werden kann.

### 5.1 Gebäude, Wasserfassung, Reservoir

Je nach Art des turbinierten Wassers können die Wasserfassungen sowie die Wasserkammer schon vorhanden sein und fast oder gänzlich unverändert übernommen werden. Es kann auch sein, dass sie neu gebaut werden müssen, was sich natürlich stark auf die Kosten auswirkt. Eingangs der Druckleitung braucht es eine *Fluss- oder Quellwasserfassung*, gefolgt von einem *Entsander*, der je nach Abfluss und Grösse der Lehm-, Sand- oder Kiesteilchen im Wasser mehr oder weniger gross ist. Anschliessend muss eine kleine *Wasserkammer* mit einem Fassungsvermögen von einigen Kubikmetern vorgesehen werden, deren Wasserpegel konstant oberhalb der Öffnung der Druckleitung liegen muss, so dass keine Luft eindringen kann. Oft wird dieser Wasserpegel gemessen, um den Durchfluss der Turbine zu bestimmen. Wenn das Wasser noch zu anderen Zwecken als zum Turbinieren verwendet wird, kann eine solche Wasserkammer in Form einer Sammelstube, eines Trinkwasserreservoirs oder eines Abwasserauffangbeckens schon vorhanden sein. Wenn die bestehenden Konstruktionen umgebaut werden können, belaufen sich die Kosten auf CHF 10'000.- bis 20'000.-. Wenn die Wasserfassung und der Entsander, die den Hochwassern und Anschwemmungen standhalten müssen, neu gebaut werden müssen, steigen die Kosten jedoch rasch auf mehrere Hunderttausend Franken.

Für das *Turbinenhaus*, in dem die elektromechanische Gruppe untergebracht ist, ist für kleinere Maschinen ein Gebäude in der Grösse einer Garage ausreichend. Um die Maschinen ins Innere zu tragen, ist ein Flaschenzug nötig. Einfacher wird es, wenn ein Teil des Dachs mittels eines Krans entfernt werden kann, z.B. mit dem Kran des Lastwagens, der die Ausrüstung liefert. Auch in diesem Fall sind die Kosten sehr tief, im besten Fall CHF 20'000.- bis 30'000.-, wenn ein Nebengebäude an ein bestehendes Reservoir angefügt werden kann. Die Kosten belaufen dagegen sich auf mehrere Hunderttausend Franken, wenn das Gebäude von Grund auf neu gebaut werden muss, wenn sich das Grundstück als schwierig erweist und/oder wenn eine Zufahrtsstrasse gebaut werden muss. Der auf die Turbine folgende *Unterwasserkanal* kann einen sehr kurzen Kanal umfassen, wenn sich die Turbine oberhalb des bestehenden Reservoirs befindet, oder einen Ablaufkanal bis zum benachbarten Wasserlauf erfordern.

Die *Baustelleneinrichtung*, d. h. der Transport der Werkzeuge und der Aufbau der für die Durchführung der Arbeiten notwendigen Lokale und Installationen beläuft sich für kleinere Baustellen auf CHF 10'000.- bis 20'000.- Franken.

## 5.2 Druckleitung

Die Druckleitung ist oft das teuerste Element einer Anlage und es ist deshalb wichtig, die Kosten dafür möglichst genau zu bestimmen. Die Druckleitung umfasst zunächst die *Rohre*, deren Preise den Katalogen entnommen werden können (z. B. [4.1] bis [4.5]). Diese Preise sind oft Höchstpreise, da bei grossen Bestellmengen vielfach bedeutende Mengenrabatte gewährt werden. Neben den Preisen für die Rohre selber dürfen die Kosten für Zubehör wie Formstücke oder bei Bedarf Schubsicherungen nicht vergessen werden.

Die Kosten für den *Aushub*, das *Verlegen* der Rohre, das *Auffüllen* und die Wiederinstandsetzung des Geländes können je nach Geländeart, Gefälle, Zugang zur Baustelle und Unternehmen bis auf das Zehnfache ansteigen. In den besten Fällen reichen 80.- CHF/m aus, in anderen Fällen sind 500.- bis 800.- CHF/m notwendig. Für Leitungen mit einem Nenndurchmesser von weniger als 300 mm in einem Gelände, das keine besonderen Schwierigkeiten darstellt, kann mit Durchschnittskosten von CHF 200.- gerechnet werden. Für überirdische Leitungen müssen Sockel für ihre Befestigung vorgesehen werden, insbesondere bei Leitungsknien.

Wenn eine Leitung noch zu anderen Zwecken als zur Energieproduktion dient, zum Beispiel zur Trinkwasserversorgung oder zum Abwassertransport, und sie ohnehin ersetzt werden muss, gehen nur die *zusätzlichen Kosten* in Verbindung mit der Installation einer Turbine am Leitungsende zu Lasten der Kleinwasserkraftanlage. Dies betrifft insbesondere die Tatsache, dass die Leitung druckbeständig sein muss und ihr Querschnitt gross genug sein muss, um tiefe Energieverluste zu verursachen. Man kann dann davon ausgehen, dass die Kosten für den Aushub auch ohne Turbinierung anfallen und diese bei der Berechnung der Investitionskosten nicht berücksichtigt werden müssen. Ausserdem würde ein Rohr mit einem kleineren Querschnitt und einem kleineren Nenndruck für den Transport dieses Wassers ausreichen, da Druckbrecherschächte installiert würden oder es sich um eine Freispiegelleitung handeln würde. Deshalb können die Kosten für dieses Rohr von den Kosten für das für die Turbinierung vorgesehene Rohr abgezogen werden.

## 5.3 Elektromechanische Ausrüstung

In der Regel wird die gesamte *elektromechanische Ausrüstung* (Abschlussorgan, Turbine, Generator, Steuerung, Sicherheitsvorrichtungen, Schränke) von derselben Firma geliefert. Dadurch wird die Kompatibilität der verschiedenen Bauteile sichergestellt, da für die Konstruktion, die Lieferung, die Montage, und auch den Unterhalt und Garantiefälle nach der Inbetriebnahme ein einziger Partner zuständig ist. Auf der Grundlage einer Reihe von Rechnungen und Offerten für solche Ausrüstungen haben wir die nachstehende Formel für den Preis in Funktion der maximalen hydraulischen Leistung aufgestellt (Stand: September 2009)

$$\text{Preis} = -20'000 + 350 \cdot (P_h - 5) + 2'000 \cdot \sqrt[2]{P_h - 5} + 55'000 \cdot \sqrt[3]{P_h - 5} \quad [\text{CHF}] \quad (5.1)$$

Wenn der so bestimmte Preis kleiner als 20'000 CHF wird, dann wird dieser Mindestbetrag angenommen, was bis etwa 10 kW der Fall ist. Hierzu muss gesagt werden, dass der Preis der Offerten für dieselbe Maschine zum selben Zeitpunkt je nach Lieferant bis doppelt so hoch sein

kann. Dieser Preis ist zudem abhängig von der Wirtschafts- und der Marktlage: Wenn die Nachfrage nach Mini-Turbinen stark und die Stahl- und Kupferpreise hoch sind, steigen die Preise. Aus diesem Grund ist es schwierig, genaue Preisangaben zu machen.

Wenn die von der Gruppe gelieferte Leistung hoch ist oder die Entfernung zum nächsten Transformator gross ist, muss die Spannung in der Nähe des Wechselstromgenerators mithilfe eines Transformators, dessen Preis ebenfalls berücksichtigt werden muss, auf 16 oder 20 kV erhöht werden (bezüglich der Preise vgl. Standard-Preisliste [6.1]). Dieser Transformator kann eventuell im gleichen Raum wie die Turbine installiert werden, falls dieser gross genug ist, oder in der Nähe in einem vorgefertigten speziell für diese Art von Geräten vorgesehenen Behälter.

## 5.4 Netzanschlüsse und Signalleitungen

Wenn noch keine Anschlüsse vorhanden sind, müssen in der Regel folgende drei Anschlüsse gelegt werden. Zuerst muss der *Generator an das Stromnetz* angeschlossen werden, in das der erzeugte Strom eingespeist wird, entweder bei Niederspannung (400 V) oder bei Mittelspannung (16 oder 20 kV). Dafür sind ein Kabel mit einem relativ grossen Querschnitt erforderlich sowie ein *Aushub* für dessen Verlegung erforderlich. Wenn der Wechselstromgenerator an das Niederspannungsnetz angeschlossen werden soll, muss überprüft werden, ob die erzeugte Spannung wirklich 400 V entspricht.

Zweitens muss das für die Messung des Wasserpegels, von dem die Öffnung der Turbine abhängt, verwendete Gerät *mit Strom versorgt werden*. Dazu ist ein zweites Kabel – ein Niederspannungskabel – mit einem kleinen Querschnitt nötig. Wenn die Stromversorgung von der Kleinwasserkraftanlage aus erfolgt, kann das Kabel in demselben Aushub wie die Druckleitung verlegt werden. Anderenfalls muss die Wasserkammer mit dem nächsten Niederspannungsnetz verbunden werden. Wenn eine bestehende Druckleitung verwendet und kein Aushub benötigt wird, kann dieses Gerät auch mit einer Batterie gespeist werden, die über einen Sonnenkollektor aufgeladen wird.

Drittens muss der *Turbinenregler mit dem* für die Messung des Wasserpegels verwendeten *Gerät* oder mit einem anderen Sensor, von dem der turbinierbare Durchfluss abhängt, verbunden werden. Dafür wird in der Regel ein Glasfaserkabel verwendet, das, wenn der überwachte Wasserpegel sich oberhalb der Turbine befindet, ebenfalls in demselben Aushub verlegt werden kann wie die Druckleitung. Es kann auch nützlich sein, die Daten in Zusammenhang mit der elektromechanischen Gruppe an eine Steuerzentrale weiterzuleiten. Dafür wird ein weiteres Glasfaserkabel benötigt. Betreiber grosser Anlagen sowie die grösseren Gemeinden verfügen oft über Fernüberwachungsnetze ihrer Anlagen und schliessen ihre Kleinwasserkraftanlage daran, was jedoch für deren Betrieb nicht unentbehrlich ist.

Jedes dieser Kabel muss sich in einem *Kabelschutzrohr* aus Kunststoff befinden, der einen Nenndurchmesser von 120 mm hat. Das Glasfaserkabel kann sich in demselben Rohr wie das ihm parallel laufende Niederspannungskabel befinden.

## 5.5 Verschiedenes

Neben der vorstehend erwähnten Ausrüstung können noch weitere Elemente nötig sein, zum Beispiel der *Bypass*, der parallel zur Turbine installiert werden muss, wenn die Wasserversorgung auch bei abgeschalteter Turbine nicht unterbrochen werden darf. Als Richtpreis für diesen Bypass kann mit CHF 25'000.- gerechnet werden.

Zu den Ausrüstungskosten müssen die *Kosten für die Studie und die Bauleitung* hinzugefügt werden, die sich in der Regel auf 10% belaufen. Schlussendlich müssen die Mehrwertsteuer (7,6%) sowie – je nach Schätzungsgenauigkeit – eine Reserve für Unvorhergesehenes (z. B. 10 %) berücksichtigt werden.

## 5.6\* Die Seite "Investitionskosten" des Programms MiniHydro

Auf dieser Seite können die Kosten der vorstehend aufgeführten Bauteile erfasst werden. Die Mittelwerte, die, falls sie sich eignen, übernommen werden können, sind in Klammern angegeben. Für die Druckleitungen muss der Preis pro Laufmeter sowie die Länge des betroffenen Abschnitts angegeben werden. Wenn der Preis für eine Leitung, für deren Kosten nicht die Anlage aufkommt, abgezogen werden, aber trotzdem aufgeführt werden soll, können negative Werte eingegeben werden.

Der Preis für die gesamte elektromechanische Ausrüstung wird in Funktion der maximalen hydraulischen Leistung automatisch mittels der Formel (5.1) berechnet. Dasselbe gilt für die Kosten für die Studie und die Bauleitung, die 10% der Investitionskosten ausmachen.

Zuunterst auf der Seite werden die Gesamtinvestitionskosten für die Realisierung der Kleinwasserkraftanlage angezeigt.

## 6 Rentabilität

### 6.1 Jahreskosten, Stromgestehungskosten

Nachdem die Investitionen getätigt und die Kleinwasserkraftanlage gebaut wurden, müssen die Anlage unterhalten, das Fremdkapital amortisiert und die Zinsen, Gebühren und Versicherungen bezahlt werden. Für die *Unterhaltskosten* verweisen wir auf die Wegleitung ([0.2], in der diese Kosten als Anteil der entsprechenden Investitionskosten angegeben sind (Fig. 6.1).

Kostenart	Jahreskosten- ansatz	Bezugsgrösse für den Jahreskostenansatz
1 Turbine und elektrische Teile	3,0 – 6,0 %	Investitionskosten des Anlageteils
2 Wehre, Fassungen und Druckleitungen	1,2 – 1,6 %	Investitionskosten des Anlageteils
3 Zentralengebäude und Nebenanlagen	0,4 – 0,6 %	Investitionskosten des Anlageteils
4 Wasserzinse, Steuern, Versicherungen, Administration	0,8 – 1,5 %	Gesamter Kapitalaufwand

Fig. 6.1 Jahreskostenansätze für den Betrieb und den Unterhalt von Kleinwasserkraftanlagen (gemäss [0.2], Tabelle C.5)

Die höchsten Jahreskosten entstehen durch die Kapitalkosten, d.h. die *Amortisation* und die *Zinsen* für die aufgenommene Anleihe. In der Regel sind die Annuitäten konstant, d.h. es wird jedes Jahr derselbe Betrag zurückgezahlt, um einerseits die Schuld zu tilgen und andererseits die Zinsen für das Restkapital zu bezahlen. In diesem Fall wird der Faktor, mit dem das Fremdkapital multipliziert werden muss, der sogenannte *Annuitätsfaktor*  $a$ , wie folgt berechnet

$$a = \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1} \quad (6.1)$$

wobei  $r$  den Zinssatz darstellt, von dem eventuell die Inflationsrate abgezogen werden kann, und  $m$  die Laufzeit des Darlehens in Jahren ist. Da die Energieverordnung eine Vergütungsdauer von 25 Jahren vorsieht (vgl. Anhang 1.1 zur Stromversorgungsverordnung [9.5]), wird empfohlen, diese Laufzeit zu verwenden. Wie aus der Abbildung 6.2 ersichtlich ist, entspricht dies auch der durchschnittlichen Lebensdauer einer Kleinwasserkraftanlage.

<b>Kostengruppe</b>	<b>Anteil an Gesamtkosten</b>	<b>Amortisationszeit in Jahren</b>
<b>Bauliche Anlageteile</b> (Wehranlage, Wasserfassung, Entsander, Triebwasserweg, Zentralengebäude) Stahlwasserbau (Wehrverschluss, Rechen- und Rechenreinigungsanlage, Absperrorgane) Druckleitung	25 – 55 %	25 – 30
<b>Elektromechanische Anlageteile</b> (Turbine, Generator, Regelung und Steuerung, Überwachung)	20 – 50 %	15 – 20
<b>Nebenkosten</b> (Projektierung, Bauleitung und Inbetriebnahme, bewilligungsverfahren, Abgaben und Entschädigungen)	10 – 20 %	15 – 20
<b>Unvorhergesehenes</b>	10 %	15 – 20

Fig. 6.2 Kostenverteilung und Amortisationsdauer der Komponenten von Kleinwasserkraftanlagen (gemäss [0.2], Tabelle C.2)

Schlussendlich betragen die *Gebühren, Steuern, Versicherungen und Verwaltungskosten* zwischen 0,8 und 1,5% der Investitionskosten (vgl. Fig. 6.1).

## 6.2 Einspeisevergütung

Der produzierte und in das öffentliche Stromnetz eingespeiste Strom kann zu verschiedenen Preisen verkauft werden, je nach Vereinbarung zwischen dem Eigentümer der Kleinkraftanlage und dem Käufer, d.h. dem Netzbetreiber. Es ist somit möglich, den Strom zum *Strommarktpreis* zu verkaufen, was für eine Kleinkraftanlage kaum ausreicht, um ihre Kosten zu decken. Es ist auch möglich, seine Stromproduktion als *Ökostrom* zertifizieren zu lassen, d. h. als Stromprodukt aus der umweltfreundlichen Wasserkraft (vgl. [8.1]). Die dritte Möglichkeit besteht darin, von den Massnahmen des Bundes zur Förderung von Kraftwerken, die erneuerbare Energie nutzen, zu profitieren. Bis Anfang des Jahres 2009 wurde der Strom aus einer Kleinanlage mit 15 Rp/kWh vergütet. Seit diesem Datum (vgl. Anhang 1.1 zur Revision der Energieverordnung [9.5]) sieht das revidierte Energiegesetz eine „*kostendeckende Einspeisevergütung*“ (KEV) vor, die eine offizielle Berechnungsgrundlage darstellt. Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass dieser Tarif periodisch revidiert wird, da sich „die Berechnung der Gestehungskosten und die Vergütung nach den [...] Referenzanlagen“ und nach der „effizientesten Technologie“ richten (vgl. Art. 3b Anhang zur Revision der Energieverordnung [9.5]), und natürlich dass die Vergütung dem Eigentümer einer neuen Anlage gewährt sein muss.

Gemäss Rechtsgrundlagen wird die „am Einspeisepunkt gemessene Elektrizität“ vergütet (vgl. Art. 3b Anhang zur Revision der Energieverordnung [9.5]). Die Vergütung setzt sich aus einer Grundvergütung und aus zwei Boni zusammen (vgl. Anhang zur Revision der Energieverordnung [9.5]). Die Höhe der *Grundvergütung* bestimmt sich jeweils anteilmässig nach der „äquivalenten Leistung“ der Anlage, d. h. der jährlichen mittleren Leistung (vgl. Abschnitt 3.1 weiter oben) und wird nach Leistungsklassen berechnet: Jede Leistungsklasse wird zu einem bestimmten Tarif vergütet (Fig. 6.3): Die ersten 10 kW zu 26 Rp./kW, die nächsten 40 kW zu 20 Rp./kW usw. Wenn man den Preis in Funktion der Leistung in ein Diagramm überträgt, erhält man eine nichtlineare, ungewöhnlich aussehende Kurve (Fig. 6.4).

Leistungsklasse	Grundvergütung [Rp/kWh]
≤10 kW	26
≤50 kW	20
≤300 kW	14,5
≤1 MW	11
≤10 MW	7,5

Fig. 6.3 Berechnung der Grundvergütung (gemäss [9.5], Anhang 1.1, Abs. 3.2)

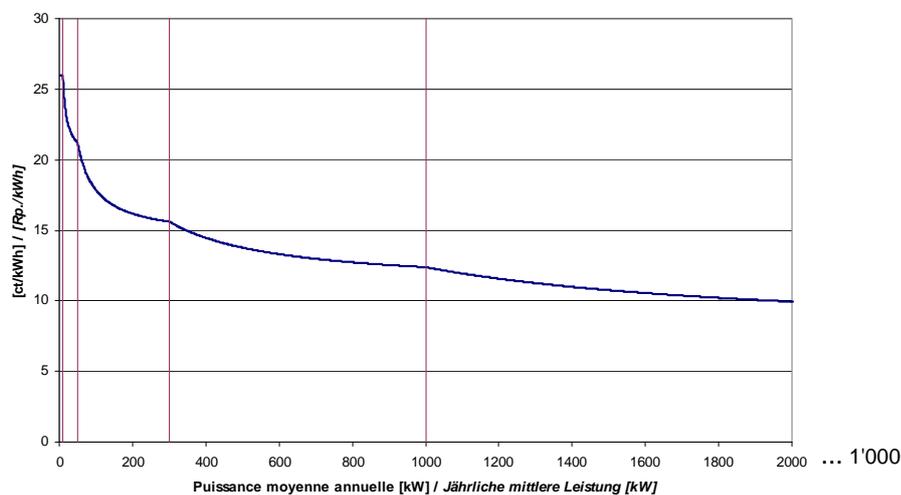


Fig. 6.4 Grundvergütung in Funktion der jährlichen mittleren Leistung

Die Grundvergütung wird durch einen *Druckstufen-Bonus* ergänzt, der jeweils in Funktion der Brutto-Fallhöhe berechnet wird. Auch hier erfolgt die Vergütung nach Klassen (*Druckhöhenklassen*, vgl. Fig. 6.5 und 6.6). Der zweite Bonus ist der *Wasserbau-Bonus*, der die hohen Kosten von Wasserbauten kompensieren soll; er wird ebenfalls in Funktion der

jährlichen mittleren Leistung gewährt wird (Fig. 6.7 und 6.8). Dieser Bonus wird nicht gewährt, wenn der „Anteil des nach dem aktuellen Stand der Technik realisierten Wasserbaus (inkl. Druckleitungen) weniger als 20% der gesamten Investitionskosten des Projektes“ entspricht. Der gesamte Bonus wird gewährt, wenn dieser Anteil über 50% liegt; und wenn er zwischen 20 und 50% liegt, wird er zum Teil gewährt, mit einer linearen Interpolation von 0 auf 100 %.

Fallhöhenklasse [m]	Druckstufenbonus [Rp/kWh]
≤5	4,5
≤10	2,7
≤20	2
≤50	1,5
>50	1

Fig. 6.5 Berechnung des Druckstufen-Bonus (gemäss [9.5], Anhang 1.1, Abs. 3.3)

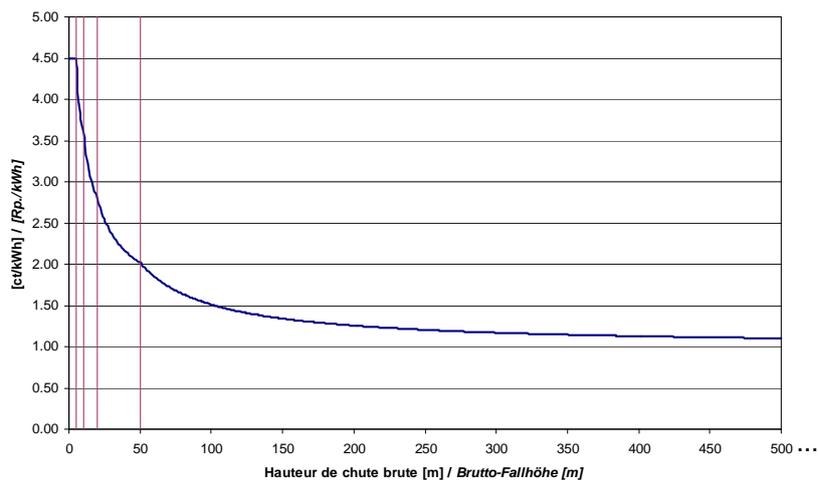


Fig. 6.6 Druckstufen-Bonus in Funktion der Brutto-Fallhöhe

Leistungsklasse [kW]	Wasserbau-Bonus [Rp/kWh]
≤10	5,5
≤50	4
≤300	3
>300	2,5

Fig. 6.7 Berechnung des Wasserbau-Bonus (gemäss [9.5], Anhang 1.1, Abs. 3.4)

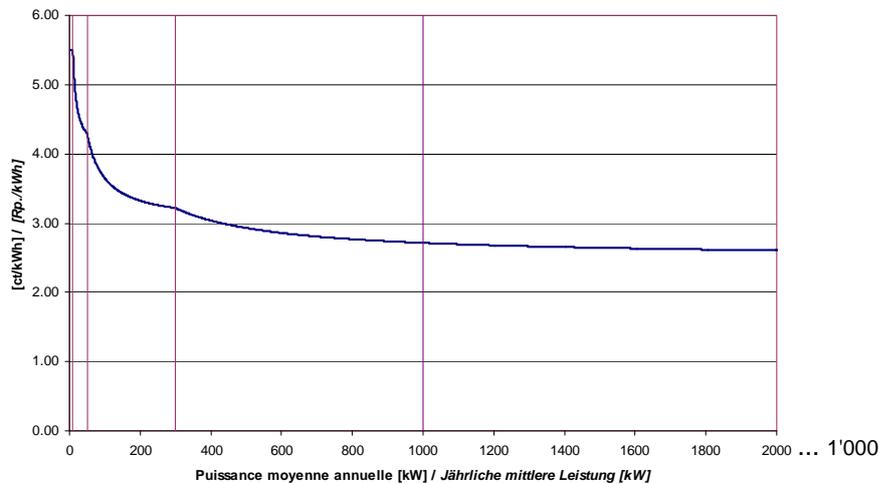


Fig. 6.8 Wasserbau-Bonus in Funktion der jährlichen mittleren Leistung

Zum Schluss muss erwähnt werden, dass die „maximale Vergütung inklusive Boni“ 35 Rp/kWh beträgt (vgl. [9.5], Anhang 1.1, Abs. 3.6) und „die effektive Vergütung wird pro Kalenderjahr aufgrund der tatsächlich am Einspeisepunkt gemessenen Elektrizität [...] berechnet“ (vgl. [9.5], Anhang 1.1, Abs. 3.5). Auf der folgenden Website: [www.kleinwasserkraft.ch/download/KEV/Berechnung\\_KEV\\_Kleinwasserkraft.xls](http://www.kleinwasserkraft.ch/download/KEV/Berechnung_KEV_Kleinwasserkraft.xls) wird ein kleines Excel-Programm als Berechnungshilfe für die kostendeckende Einspeisevergütung zur Verfügung gestellt.

### 6.3 Rentabilität

Durch die Addition aller Jahreskosten (vgl. Abschnitt 6.1 weiter oben) und deren Division durch die in einem Jahr produzierten kWh (vgl. Abschnitt 3.1) kann der *Stromgestehungspreis* pro kWh bestimmt werden. Auf der Basis der Jahreskosten und des Verkaufspreises der produzierten kWh (vgl. Abschnitt 6.2) kann schlussendlich der *Gewinn* bzw. eventuell der Verlust berechnet werden, der durch den Betrieb der Kleinwasserkraftanlage entsteht.

### 6.4\* Die Seite Rentabilität des Programms MiniHydro

Auf dieser Seite genügt es, den Zinsfuß für das erforderliche Darlehen sowie dessen Laufzeit anzugeben. Die anderen Daten, einschliesslich der Einspeisevergütung gemäss der Revision der Energieverordnung, werden automatisch anhand der dem Programm bekannten Zahlen berechnet.

## **Bibliographie sur les petites centrales hydro-électriques, adresses internet *Literatur über Kleinwasserkraftwerke, Internet-Seiten***

### **Sur les petites centrales hydrauliques / *Über Kleinwasserkraftwerke***

[0.1] -: "Guide pour l'équipement électromécanique des petits aménagements hydro-électriques / *Electromechanical equipment guide for small hydroelectric installations*", Norme CEI / IEC no 61116, Genève 1992

[0.2] Chapallaz J.-M., Eichenberger P.: "Petites centrales hydrauliques: guide pratique pour la réalisation / *Kleinstwasserkraftwerke: Einführung in Bau und Betrieb*", Programme d'action PACER / *Impulsprogramm PACER*, Office fédéral des questions conjoncturelles / *Bundesamt für Konjunkturfragen*, no 724.244 f / d, Berne 1992 / 1993  
([www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html](http://www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html))

[0.3] Heer F., Chapallaz J.-M.: "Petites centrales hydrauliques: le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une miniturbine / *Dimensionierung Kleinwasserkraftwerke: Turbinenauswahl, Dimensionierung, Abnahme*", Programme d'action PACER / *Impulsprogramm PACER*, Office fédéral des questions conjoncturelles / *Bundesamt für Konjunkturfragen*, no 724.247.4 f / d, Berne 1995  
([www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html](http://www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html))

[0.4] Penche C. et al.: "Guide on how to develop a small hydropower plant", ESHA, Brussels 2004 ([www.esha.be/fileadmin/esha\\_files/documents/publications/publications/Part\\_1\\_Guide\\_on\\_how\\_to\\_develop\\_a\\_small\\_hydropower\\_plant-Final.pdf](http://www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/publications/Part_1_Guide_on_how_to_develop_a_small_hydropower_plant-Final.pdf))

[0.5] Le Gourières D.: "Les petites centrales hydro-électriques", Moulin Cadiou, Goudelin 2009

### **1 Sur l'énergie en général / *Über Energie allgemein***

[1.1] Statistiques de l'énergie de l'Office fédéral de l'énergie ([www.bfe.admin.ch/themen](http://www.bfe.admin.ch/themen))

[1.2] Association des entreprises électriques suisses (VSE, ASE), documents et graphiques ([www.strom.ch/fr/dossiers.html](http://www.strom.ch/fr/dossiers.html))

[1.3] Programme SuisseEnergie de l'Office fédéral de l'énergie ([www.bfe.admin.ch/energie](http://www.bfe.admin.ch/energie))

[1.4] Programme "Petites centrales hydrauliques" de l'Office fédéral de l'énergie ([www.smallhydro.ch](http://www.smallhydro.ch))

## **2 Sur l'hydraulique en général / *Über Hydraulik allgemein***

- [2.1] Bohl W., Elmendorf W.: "Technische Strömungslehre", 13. Aufl., Vogel, Würzburg 2005
- [2.2] Carlier M.: "Hydraulique générale et appliquée", Eyrolles, Paris 1986
- [2.3] Cauvin A., Guerrée H.: "Eléments d'hydraulique", 10e éd., Eyrolles, Paris 1986
- [2.4] Comolet R.: "Mécanique expérimentale des fluides. Tome 1: statique et dynamique des fluides non visqueux", 5e éd., Dunod, Paris 1990
- [2.5] Comolet R.: "Mécanique expérimentale des fluides. Tome 2: dynamique des fluides réels, turbomachines", 4e éd., Dunod, Paris 1994
- [2.6] Graf W.H., Altinakar M.S.: "Hydrodynamique", 2e éd., in "Traité de génie civil, vol. 14", Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne 1998
- [2.7] Grote K.-H., Feldhusen J. (éd.): "Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau" 22. Aufl., Springer, Berlin 2007
- [2.8] Sinniger R.O., Hager W.H.: "Constructions hydrauliques: écoulements stationnaires", in "Traité de génie civil, vol. 15", Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne 1989
- [2.9] Streeter V.L. (éd.): "Handbook of fluid dynamics", McGraw-Hill, New York 1961
- [2.10] Streeter V.L., Wylie E.B.: "Fluid mechanics", McGraw-Hill, New York 1975
- [2.11] Vischer D., Huber A.: "Wasserbau", 6. Aufl., Springer, Berlin 2002

## **3 Sur l'hydrologie et les débits disponibles / *Über Hydrologie und das Wasserdargebot***

Cf. aussi les références [2.8], [2.11]

- [3.1] -: "Atlas hydrologique de la Suisse / *Hydrologischer Atlas der Schweiz*", Office fédéral de l'environnement / *Bundesamt für Umwelt BAFU*, Berne 2001
- [3.2] Musy A., Higy C.: "Hydrologie, une science de la nature", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne 2004
- [3.3] Zaugg C., Leutwiler H.: "Petites centrales hydrauliques et écologie des eaux. Analyse de la situation / *Kleinwasserkraftwerke und Gewässerökologie. Situationsanalyse*", Programme d'action Energie 2000 DIANE / *Aktionsprogramm Energie 2000 DIANE*, Office fédéral de l'énergie / *Bundesamt für Energiewirtschaft*, no 805.631 f / d, Berne 1996 ([www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiDiane.html](http://www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiDiane.html))

[3.4] Zaugg C., Pedroli J.C.: "Poissons et petites centrales hydrauliques / *Fische und Kleinwasserkraftwerke*", Programme d'action Energie 2000 DIANE / *Aktionsprogramm Energie 2000 DIANE*, Office fédéral de l'énergie / *Bundesamt für Energiewirtschaft*, no 805.635 d+f, Berne 1997 ([www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiDiane.html](http://www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiDiane.html))

#### **4 Sur l'hydraulique des conduites / *Über Rohrleitungshydraulik***

Cf. aussi les références du § 2

[4.1] -: "Stalder: Liste des Prix / *Preisliste*", Stalder extrusion SA, Eclépens 2009 ([www.stalderextrusion.ch](http://www.stalderextrusion.ch))

[4.2] -: "Georg Fischer Piping Systems, PP/PE, PE Systèmes industriels, catalogue / *PE Industriesysteme, Katalog*", Georg Fischer AG, Schaffhouse 2009 ([www.piping.georgfischer.com](http://www.piping.georgfischer.com))

[4.3] -: "vonRoll hydro: Tuyaux et raccords sous pression pour l'adduction d'eau et de gaz / *Druckrohre und Formstücke für die Wasser- und Gasversorgung*", vonRoll hydro AG, Oensingen 2008 ([www.vonroll-hydro.ch](http://www.vonroll-hydro.ch))

[4.4] -: "Wild Rohre und Armaturen: Tuyaux, pièces spéciales, liste de prix/ *Rohre, Formstücke, Preisliste*", Wild Armaturen AG, Jona-Rapperswil 2009 ([www.wildarmaturen.ch](http://www.wildarmaturen.ch))

[4.5] -: "Indufer: Conduites pour l'eau et l'assainissement, prospectus Mannesmann Fuchs / *Leitungsgrohre für Wasser und Abwasser, Prospekt Mannesmann Fuchs*", Indufer AG, Schlieren 2006 ([www.indufer.ch](http://www.indufer.ch))

[4.6] -: "W4f - Directives pour l'étude, la construction, l'exploitation et l'entretien des réseaux d'eau potable à l'extérieur des bâtiments / *W4d - Richtlinien für die Planung, Projektierung sowie Bau, Betrieb und Unterhalt von Trinkwasserversorgungssysteme ausserhalb von Gebäuden*", SSIGE / *SVGW*, Zürich 2004 ([www.ssig.ch/francais/pagesnav/PR.htm](http://www.ssig.ch/francais/pagesnav/PR.htm))

[4.7] Idel'cik I.E.: "Memento des pertes de charge: coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement", 3e éd., Eyrolles, Paris 1986

[4.8] Wagner W.: "Rohrleitungstechnik", 9. Aufl., Vogel, Würzburg 2006

#### **5 Sur les machines hydrauliques / *Über hydraulische Maschinen***

[5.1] -: "Essais de réception sur place des turbines hydrauliques, pompes d'accumulation et pompes-turbines en vue de la détermination de leurs performances hydrauliques / *Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines*", 3e éd., Norme CEI / *IEC* no 60041, Genève 1991

[5.2] -: "Turbines hydrauliques, pompes d'accumulation et pompes-turbines – Essais de réception sur modèles / *Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests*", 2e éd., Norme CEI / *IEC* no 60193, Genève 1999

- [5.3] Bohl W., Elmendorf W.: "Strömungsmaschinen 1, Aufbau und Wirkungsweise", 10. Aufl., Vogel, Würzburg 2008
- [5.4] Bohl W.: "Strömungsmaschinen 2, Berechnung und Konstruktion", 7. Aufl., Vogel, Würzburg 2005
- [5.5] Bovet Th.: "Feuilles de cours illustrées B", 2e éd., Lausanne 1972?
- [5.6] Chapallaz J.-M.: "Petites centrales hydrauliques: turbines hydrauliques / *Dimensionierung Kleinwasserkraftwerke: Wasserturbinen*", Programme d'action PACER / *Impulsprogramm PACER*, Office fédéral des questions conjoncturelles / *Bundesamt für Konjunkturfragen*, no 724.247.1 f / d, Berne 1995 ([www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html](http://www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html))
- [5.7] Gülich J.F.: "Kreiselpumpen, Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb", 2. Aufl., Springer, Berlin 2004
- [5.8] Henry P.: "Turbomachines hydrauliques: choix illustré de réalisations marquantes", Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne 1992
- [5.9] Raabe J.: "Hydro Power", VDI Verlag, Düsseldorf 1985
- [5.10] Vivier L.: "Turbines hydrauliques et leur régulation", Albin Michel, Paris 1966

## **6 Sur les alternateurs et les réseaux électriques / *Über Generatoren und elektrische Netze***

- [6.1] -: "Merkur Access 2, Recommandation de la branche pour le marché suisse de l'électricité, Coûts standardisés / *Merkur Access 2, Branchenempfehlung Strommarkt Schweiz, Einheitskosten*", Annexe à la recommandation pour l'évaluation des réseaux de distribution, Association des entreprises électriques suisses (AES), Aarau 2007 ([www.electricite.ch/uploads/media/Coûts\\_standardisés.pdf](http://www.electricite.ch/uploads/media/Coûts_standardisés.pdf) / [www.strom.ch/uploads/media/Einheitskosten.pdf](http://www.strom.ch/uploads/media/Einheitskosten.pdf))
- [6.2] -: "Nexans. Câbles et conducteurs d'énergie / *Nexans. Energiekabel und -leitungen*", Nexans Suisse SA, Cortaillod 2009 ([www.nexans.ch/eservice/Switzerland-fr\\_CH/navigate\\_225/R\\_seaux\\_d\\_nergie.html](http://www.nexans.ch/eservice/Switzerland-fr_CH/navigate_225/R_seaux_d_nergie.html))
- [6.3] Chatelain J.: "Machines électriques", 2e éd., Traité d'électricité, vol. X, Presses polytechniques romandes, Lausanne 1989
- [6.4] Dos Ghali J., Ludwig J.-P., Chapallaz J.-M., Schopfer E.: "Petites centrales hydrauliques: générateurs et installations électriques / *Dimensionierung Kleinwasserkraftwerke: Generatoren und elektrische Installationen*", Programme d'action PACER / *Impulsprogramm PACER*, Office fédéral des questions conjoncturelles / *Bundesamt für Konjunkturfragen*, no 724.247.2 f / d, Berne 1995 ([www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html](http://www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html))
- [6.5] Fischer R.: "Elektrische Maschinen", 14. Aufl., Hanser, München 2009

[6.6] Schwickardi G.: "Elektro-Energietechnik", Bde. 1 - 3, AT Verlag, Aarau 1975 - 1980

[6.7] Wildi T., Sybille G.: "Electrotechnique", 4e éd., De Boeck, Bruxelles 2005

## **7 Sur l'automatisation / Über Leittechnik**

[7.1] Chapallaz J.-M., Heer F.: "Petites centrales hydrauliques: régulation et sécurité d'exploitation / *Dimensionierung Kleinwasserkraftwerke: Regulierung und Sicherheit*", Programme d'action PACER / *Impulsprogramm PACER*, Office fédéral des questions conjoncturelles / *Bundesamt für Konjunkturfragen*, no 724.247.3 f / d, Berne 1995 ([www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html](http://www.petitehydraulique.ch/web/francais/biblio/publiPacer.html))

## **8 Sur la rentabilité / Über Rentabilität**

[8.1] -: "Label naturemade", Verein für Umweltgerechte Energie, Zürich 2009 ([www.naturemade.ch](http://www.naturemade.ch))

[8.2] Chenal R.: "Evaluation du coût de construction d'une petite centrale hydro-électrique nouvelle et complète et du prix de revient du kWh (P < 1'000 kW)", MHyLab, Montcherand 2000 ([www.mhylab.ch/fr/pages/pdf/cout\\_PCH.pdf](http://www.mhylab.ch/fr/pages/pdf/cout_PCH.pdf))

[8.3] Chenal R.: "Comment évaluer la faisabilité financière d'une petite centrale hydraulique?", MHyLab, Montcherand 2000 ([www.mhylab.ch/fr/pages/pdf/faisabilite\\_PCH.pdf](http://www.mhylab.ch/fr/pages/pdf/faisabilite_PCH.pdf))

## **9 Sur la législation / Über die rechtlichen Texte**

[9.1] RS 721.80 Loi fédérale du 22 décembre 1916 sur l'utilisation des forces hydrauliques (LFH) / *SR 721.80 Bundesgesetz vom 22. Dezember 1916 über die Nutzbarmachung der Wasserkräfte (Wasserrechtsgesetz, WRG)* ([www.admin.ch/ch/f/rs/c721\\_80.html](http://www.admin.ch/ch/f/rs/c721_80.html))

[9.2] RS 730.0 Loi fédérale sur l'énergie du 26 juin 1998 (LEne) / *SR 730.0 Energiegesetz vom 26. Juni 1998 (EnG)* ([www.admin.ch/ch/f/rs/c730\\_0.html](http://www.admin.ch/ch/f/rs/c730_0.html))

[9.3] RS 730.01 Ordonnance fédérale sur l'énergie du 7 décembre 1998 (OEne) / *SR 730.01 Energieverordnung vom 7. Dezember 1998 (EnV)* ([www.admin.ch/ch/f/rs/c730\\_01.html](http://www.admin.ch/ch/f/rs/c730_01.html))

[9.4] RS 734.7 Loi du 23 mars 2007 sur l'approvisionnement en électricité (LApEI) / *SR 734.7 Bundesgesetz vom 23. März 2007 über die Stromversorgung (Stromversorgungsgesetz, StromVG)* ([www.admin.ch/ch/f/rs/c734\\_7.html](http://www.admin.ch/ch/f/rs/c734_7.html))

[9.5] RS 734.71 Ordonnance du 14 mars 2008 sur l'approvisionnement en électricité (OApEI) / *SR 734.71 Stromversorgungsverordnung vom 14. März 2008 (StromVV)* ([www.admin.ch/ch/f/rs/c734\\_71.html](http://www.admin.ch/ch/f/rs/c734_71.html))

- [9.6] RS 814.20 Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux) / *SR 814.20 Bundesgesetz vom 24. Januar 1991 über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG)* ([www.admin.ch/ch/f/rs/c814\\_20.html](http://www.admin.ch/ch/f/rs/c814_20.html))
- [9.7] RS 814.201 Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux (OEaux) / *SR 814.201 Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (GSchV)* ([www.admin.ch/ch/f/rs/c814\\_201.html](http://www.admin.ch/ch/f/rs/c814_201.html))
- [9.8] Annonce pour la rétribution à prix coûtant d'une petite centrale hydraulique / *Anmeldung für die kostendeckende Energievergütung für Kleinwasserkraftanlage*, swissgrid, Laufenburg 2008 ([www.swissgrid.ch/power\\_market/renewable\\_energies/registration\\_crf/](http://www.swissgrid.ch/power_market/renewable_energies/registration_crf/))
- [9.9] RS 721.8 Canton du Valais: Loi sur l'utilisation des forces hydrauliques du 28 mars 1990 (LFH-VS) / *Kanton Wallis: Gesetz über die Nutzbarmachung der Wasserkräfte vom 28. März 1990 (WRG-VS)*, ([www.vs.ch/Navig/navig.asp?MenuID=4628&RefMenuID=0&RefServiceID=0](http://www.vs.ch/Navig/navig.asp?MenuID=4628&RefMenuID=0&RefServiceID=0))
- [9.10] RS 721.800 Canton du Valais: Règlement concernant l'exécution de la loi sur l'utilisation des forces hydrauliques du 4 juillet 1990 / *Kanton Wallis: Reglement betreffend die Ausführung des Gesetzes über die Nutzbarmachung der Wasserkräfte vom 4. Juli 1990*, ([www.vs.ch/Navig/navig.asp?MenuID=4628&RefMenuID=0&RefServiceID=0](http://www.vs.ch/Navig/navig.asp?MenuID=4628&RefMenuID=0&RefServiceID=0))