

# Inhaltsverzeichnis

## Dimensionierung Kleinwasserkraftwerke. Regulierung und Sicherheit

<b>1.</b>	<b>Einführung</b>	<b>7</b>
<b>2.</b>	<b>Betriebsanforderungen und - überwachung</b>	<b>11</b>
2.2	Hydraulische Grössen	16
2.3	Mechanische Grössen	20
2.4	Elektrische Grössen	22
2.5	Zustands- und Störungsanzeigen, Alarme	25
<b>3.</b>	<b>Der Arbeitspunkt eines KWKW</b>	<b>33</b>
3.1	Wasserdurchfluss, Fallhöhe und Druckverlust	35
3.2	Momentenbilanz	38
<b>4.</b>	<b>Das Transiente Verhalten eines KWKW</b>	<b>43</b>
4.1	Die Anlaufzeit der Rotationsmasse	45
4.2	Die Anlaufzeit des Wassers	50
4.3	Der Druckstoss	52
4.4	Maximale Überdrehzahl	76
<b>5.</b>	<b>KWKW Regelungen</b>	<b>79</b>
5.1	Grundlagen der Regelungstechnik	81
5.2	Übersicht der KWKW Regelungsarten	97
<b>6.</b>	<b>Simulation von KWKW</b>	<b>107</b>
6.1	Einleitung	109
6.2	Die Aufgabenstellung	109
6.3	Die Modellierung	111
<b>7.</b>	<b>Fallbeispiel DTC Leitsystem</b>	<b>121</b>
7.1	Ausgangslage	123
7.2	Konzept und Funktionsbeschreibung	124
7.3	Komponenten des Systems	127
7.4	Leitsystem-Peripheriegeräte zur Anlagenüberwachung	131
7.5	Elektrischer Leistungsschaltschrank	133
7.6	Benutzeroberfläche	134
7.7	Software	137
	<b>Bibliographie</b>	<b>139</b>
	<b>Publikationen und Videos des Impulsprogrammes PACER</b>	<b>141</b>



# 1. Einführung

Die Steuerung und Regelung eines Kleinwasserkraftwerkes umfasst grundsätzlich zwei Themen: einerseits muss im Normalbetrieb das Erzeugnis, nämlich der produzierte Strom, in der geforderten Qualität und möglichst kostengünstig, d.h. mit bestmöglicher Maschinenauslastung geliefert werden. Andererseits müssen die Grössen, die alle vorhersehbaren Notsituationen anzeigen, überwacht werden, um dann die entsprechenden Schutzmassnahmen einzuleiten. Eine Gefährdung von Personen oder der Anlage ist nicht zulässig.

Einerseits muss also die Regelung einer KWK Anlage zB die Drehzahl unabhängig von der Last konstant halten, andererseits muss ein heisslaufendes Lager zu einer Abschaltung und einer Meldung an das Wartungspersonal führen.

Auf den ersten Blick scheint eine der wichtigsten Regelungsaufgaben in KWK Anlagen, das Regeln der Drehzahl, eher trivial. Was ist schon dabei, die Drehzahl zu messen und die Maschine auf Nenn-drehzahl zu halten und damit in ihrem besten Arbeitspunkt zu fahren? Das transiente Verhalten bei Störungen ist wohl auch nicht so komplex, als dass man die Maschine nicht wieder in den Nennbereich zurückbrächte.

Hier begeht man jedoch einen bedeutenden Fehler der Perspektive: man schaut auf die Drehzahl der Turbinenwelle einer doch recht kleinen und übersichtlichen Maschine und spielt mit dem Wasserhahn bis die Drehzahl stimmt. Tatsächlich spielt man aber mit dem Wasser hinter dem Wasserhahn, und dies ist der eigentliche Koloss im mechanischen System, den es zu regeln gilt. Oft hunderte von Tonnen schwer, und oft hunderte von Metern ausgedehnt, was sind dagegen schon die paar hundert Kilogramm der Turbine und des Generators.

Denken Sie, sie müssten eine gerade Linie an eine Wand zeichnen, aber am Bleistift hängt ein wabbelnder, wassergefüllter Ballon. Ihr Augenmerk wäre wohl zuerst nur auf dem Ballon, denn das Stabilisieren des Bleistifts nützt kaum etwas und der Strich wird niemals gerade, bevor sich nicht das Wasser beruhigt hat; und danach werden Sie sich hüten, diese hängende Masse wieder in unkontrollierte Bewegung zu versetzen.

Ganz ähnlich verhält es sich mit einem KWKW: solange alles normal läuft gilt die Aufmerksamkeit der Einhaltung der Drehzahl in engen Grenzen. In Ausnahmesituationen, wie das Anfahren und Anhalten, gilt es, mit dem Wasser sanft umzugehen, ohne dabei die Maschine selbst oder die Verbraucher zu gefährden. Dieses Buch folgt diesen Motiven in den folgenden Schritten:

### **Der Arbeitspunkt**

Das Betreiben der Maschine in ihrem Auslegungspunkt. Eine sinnvolle Aufgabe aber ähnlich dem Stillhalten einer Kugel auf einer Wölbung. Die Turbine und der Generator laufen keineswegs von selbst in ihrem Bestpunkt sondern müssen ständig überwacht und dort gehalten werden.

### **Das transiente Verhalten**

Falls die Drehzahl der Turbine ausser Kontrolle gerät, wie rasch wird es dann gefährlich, welches sind die bestimmenden Parameter dafür und wie können sie beeinflusst werden? Im wesentlichen betrachten wir hier den Extremfall des vollständigen Lastabwurfs, bei dem der voll belastete Generator die Turbine bei voller Öffnung gerade auf Nenn-drehzahl hält, um dann schlagartig in den Leerlauf zu gehen. Die weiterhin offene Turbine beschleunigt die Gruppe mit voller Leistung auf Überdrehzahl.

### **Die KWK Regelung**

Welche Strategien werden angewendet, um im weniger dramatischen Fall von Störungen, zB dem Umschalten eines Bügeleisens, die Maschine auszuregulieren? Es wird eine kleine Einführung in die Regelungstechnik gegeben und die Anwendung in der KWKW Technik gezeigt.

### **KWKW Simulation**

das Komplexe dynamische Verhalten einer KWK Anlage wird in den ersten Kapiteln zwar treffend aber doch sehr verkürzt und unzusammenhängend beschrieben. Dies nicht nur aus Gründen des engen Rahmens, sondern weil es rasch mathematisch sehr aufwendig wird (komplexe Differentialgleichungssysteme, etc.).

Heute gibt es glücklicherweise den PC, auf dem kann das Verhalten eines KWKW relativ einfach simuliert werden; reden wir von einem Digitalen Turbinenregler, wird es möglich, ausser dem Regler selbst auch die Regelstrecke, also Druckrohr, Turbine etc. zu modellieren. Damit ist es möglich, die Reglereinstellung auf einer simulierten Anlage in demselben Regelgerät zu optimieren und erst danach die Feineinstellungen auf der wirklichen Anlage zu machen.

Zu Beginn des Buches wird jedoch ein Überblick über die allgemeinen Betriebsanforderungen und die nötigen Überwachungen gegeben. Dies ist eine ebenso komplexe Aufgabe wie die Regelung selbst und Bedarf einer anlagenspezifischen Ausrüstung. Auch hier ist heute der Trend, solche Überwachungsfunktionen dem Computer zu übertragen womit man ein Leitsystem erhält das alle Aufgaben integriert:

- Regelung
- Überwachung
- Kommunikation



## 2. Betriebsanforderungen und -überwachung

---

2.1.1	Gesetzliche Auflagen	13
2.1.2	Verfügbarkeit	16

---

<b>2.2</b>	<b>Hydraulische Größen</b>	17
2.2.1	Parameter	17
2.2.2	Sensorik	19
2.2.2.1	Druckmessdose mit Schaltpunkten	19
2.2.2.2	Kapazitive/piezoresistive Messsonde	19
2.2.2.3	Resistive Messsonden	19

---

<b>2.3</b>	<b>Mechanische Größen</b>	20
2.3.1	Drehzahl	20
2.3.1.1	Sensorik	20
2.3.2	Betriebstemperatur	21
2.3.2.1	Sensorik	22
2.3.3	Vibrationen	22

---

<b>2.4</b>	<b>Elektrische Größen</b>	22
2.4.1	Leistungsschaltschrank	23
2.4.2	Notstromversorgung	24
2.4.3	Überwachungsparameter	24

---

<b>2.5</b>	<b>Zustands- und Störungsanzeigen, Alarme</b>	25
2.5.1	Optische Anzeigen in der Anlage	25
2.5.2	Alarme	28
2.5.3	Protokollierung	31
2.5.4	Fernwirkung	31

---





## 2. Betriebsanforderungen und -überwachung

Der Betrieb einer Anlage soll für Menschen und Maschinen sicher erfolgen. In Bezug auf die Regelung und Überwachung bedeutet dies:

- Bei Änderungen im Normalbetrieb (Last, Wasserangebot etc.) soll die Anlage sich selbsttätig regulieren und die Nennwerte für Frequenz, Spannung, etc. möglichst rasch wieder erreichen.
- bei ernsthaften Störungen, die nicht ausgeregelt werden können, muss eine Abschaltung und Stilllegung der Anlage automatisch funktionieren. Dies auch, wenn z.B. die Energieversorgung des Schliessorgans ausfällt.
- Eine NOT-AUS Vorrichtung muss vorhanden sein, damit bei manuellen Fehlmanipulationen welche zu einer gefährlichen Situation führen, ein Notschluss rasch und zuverlässig manuell ausgelöst werden kann.
- Eine Abschaltung einer automatischen Startvorrichtung muss vorgesehen werden. Nur damit ist sichergestellt, dass z.B. bei Wartungsarbeiten die Automatik nicht unerwartet in Funktion tritt.

### 2.1.1 Gesetzliche Auflagen

Für Energie-Erzeugungsanlagen (EEA) bestehen eine ganze Reihe von Weisungen des Eidg. Starkstrominspektorates (ESTI), die für die Regelung und Steuerung wichtige Konsequenzen haben. Folgend eine Zusammenstellung relevanter Bestimmungen, die sich vor allem auf die elektrische Seite einer Anlage beziehen:

1. Beim Parallelbetrieb von Generatoren mit Transformatoren können Ausgleichsströme über die Sternpunktverbindungen (Neutralleiter, PEN-Leiter) verursacht durch Oberwellen, auftreten. Um Überlastungen dieser Verbindungen zu vermeiden, ist eine der folgenden Massnahmen zu treffen:
  - Dauernde Überwachung des Stromes in den Verbindungsleitungen so, dass beim Erreichen des höchstzulässigen Wertes der Parallelbetrieb unterbrochen wird.
  - Einbau eines Filters in die Sternpunktverbindung, wobei die Erdungsbedingungen (Nullung, Schutzerdung usw) in jeder Betriebsart erfüllt sein müssen.
  - Automatische Unterbrechung der Sternpunktverbindung während des Parallelbetriebes.

- Bemessung der Sternpunktverbindung so, dass die Bedingungen von Art. 30 und 31 der Starkstromverordnung erfüllt sind, und die Konstruktionen der EEA und Netztransformatoren die Führung von Überströmen erlauben, ohne Schaden zu nehmen (der Querschnitt der Sternpunktverbindung zwischen Generator und Netztransformator muss für mindestens 125 % des Nennstromes der EEA bemessen sein).
- 2. Zwischen dem Generatorsternpunkt und den Apparaten zur Erfüllung der Bedingung nach Ziff. 1 hievor, darf der Neutral- oder PEN-Leiter, weder mit Erde noch mit dem Generatorgehäuse verbunden werden.
- 3. Bei Ausfall des Stromversorgungsnetzes sind Massnahmen zu treffen, um unerwünschte Rückspannungen von der EEA in das Netz zu verhindern. Dies kann zum Beispiel erreicht werden durch Abschaltung der EEA mittels spannungsunabhängigen Frequenzrelais, Frequenz- und Spannungsrelais, oder anderen technisch gleichwertigen Apparaten.
- 4. Bei Netzausfall müssen Asynchrongeneratoren ausgeschaltet und die Antriebsmaschine ausser Betrieb gesetzt werden.
- 5. Mit Rücksicht darauf, dass die unter Ziff. 3 beschriebenen Schutzapparate Rückspannungen nicht in allen Betriebsfällen vermeiden können, wird den Betriebsinhabern der Niederspannungsnetze empfohlen, bei Arbeiten im Niederspannungsnetz die für Hochspannungsanlagen gültigen Schutzmassnahmen gemäss Art. 8, Abs. 7 und 8 der Starkstromverordnung, ebenfalls anzuwenden.
- 6. Die Konstanzhaltung der Generatordrehzahl erfolgte früher meistens durch automatisches Verstellen des Leitapparates der Turbine. Damit wurde die abgegebene Leistung dem jeweiligen Bedarf angepasst. Bei Anlagen mit kleinen Wassermengen (Reservoir) ist dies immer noch die beste Lösung. Bei genügend Wasser (gefasste Bäche) wird ein System bevorzugt, bei dem die Turbinenanlage dauernd auf Nennlast läuft (Wassermenge fest eingestellt). Die Regelung erfolgt durch Zu- und Abschalten von Last, z. B. Heizelementen, in Abhängigkeit der Drehzahl und damit der Gesamtleistung. Diese Anordnung ist betriebssicherer, da mechanische Stellorgane fehlen.
- 7. Als Regellast wird in vielen Fällen ein Warmwasserboiler verwendet. Die Heizelemente müssen je-

doch für die Leistungsregelung immer zur Verfügung stehen und dürfen nicht vom Boilerthermostaten abgeschaltet werden. Die Temperaturregelung geschieht daher durch Betätigen eines Magnetventils, welches warmes Wasser ablässt. Dadurch wird kaltes Wasser nachgespiesen.

Diese Ausführungsart widerspricht jedoch den Hausinstallations-Vorschriften (HV 47 34 1. 1) in Bezug auf Abschaltbarkeit von Boilern oder auch Heizkörpern. Ausserdem wird die in den HV 47 342 verlangte Sicherheit für den Boiler bei weitem nicht erreicht, da das Verhindern einer Überhitzung vom Funktionieren eines einzigen Thermostaten bzw. eines Magnetventils abhängig ist. Wenn der Wasserzufluss zum Boiler ausfällt, tritt ebenfalls eine Überhitzung auf, weil für diesen Fall keine Sicherheitsvorrichtungen vorgesehen sind.

Eine solche Lastregulierung birgt also erhebliche Gefahren und ist deshalb nicht zulässig.

8. Die überschüssige Energie muss durch Elemente vernichtet werden, die mit dem Generator eine Einheit bilden und die nicht ein Teil des Verbrauchernetzes sind. Als solche kommen in Betracht:
  - luftgekühlte Heizkörper (Belastungswiderstände) direkt beim Generator
  - wassergekühlte Heizkörper, die direkt vom Turbinenwasser gekühlt werden
  - Wasserwiderstände.
9. Diese Vorschriften sind bei allen Neuanlagen einzuhalten. Bei bestehenden Anlagen ist eine vollständige Nachrüstung nicht mehr überall möglich. Es müssen jedoch auch bei diesen Anlagen zusätzliche Schutzmassnahmen für den Boiler getroffen werden. Die zu treffenden Massnahmen sind mit dem Eidg. Starkstrominspektorat abzusprechen.
10. Die Drehzahlregelung durch die Last am Generator bedingt entweder eine automatische Reduktion der Wasserzuführung bei Überdrehzahl oder eine überdrehzahlsichere Turbinen-Generatorgruppe, da jederzeit mit einem Versagen der Lastregulierung gerechnet werden muss.
11. In Anlagen, die keine automatische Reduktion der Wasserzuführung besitzen, müssen Verbraucher, für welche zu hohe Frequenzen und Überspannungen gefährlich sind, auf andere Weise geschützt werden.

### 2.1.2 Verfügbarkeit

Mit Verfügbarkeit sind zwei Dinge gemeint:

- die Möglichkeit des Betriebs der Anlage während möglichst vielen Jahresstunden
- die weitestgehend mögliche Turbinierung des zur Verfügung stehenden Abflusses

Die Frage der erforderlichen oder erwünschten Verfügbarkeit der Anlage hat einen Einfluss auf die Regelung und Überwachung. Soll die Anlage zu möglichst 100% verfügbar sein, auch wenn kein Bedienungspersonal präsent ist, so kommt nur ein automatisiertes Regel- und Überwachungssystem in Frage.

Dient eine Anlage andererseits im Inselbetrieb der Stromversorgung eines Produktionsprozesses, so beschränkt sich der Anspruch an die Verfügbarkeit auf die Dauer der zu versorgenden Produktion. Da für letztere wahrscheinlich Personal vor Ort ist, kommt ein manuelles oder halbautomatisches Regelsystem möglicherweise in Frage.

Aus wirtschaftlichen Gründen ist es heute in den meisten Fällen erforderlich, dass die Verfügbarkeit hoch ist, da nur dann die Produktion und damit der Ertrag maximiert werden können. Beeinflusst ein Regelsystem die erreichbaren Jahresstunden positiv und reagiert es selbsttätig auf Abflussänderungen, so hat dies positive Auswirkungen auf die mögliche Jahresarbeit.

## 2.2 Hydraulische Grössen

Eine Kleinwasserkraftanlage ist so ausgelegt, dass sie unter einem bestimmten Gefälle arbeitet. Die maximale Verfügbarkeit ist also nur gegeben, wenn der Wasserstand im Oberwasser dieser Druckhöhe entspricht und wenn er konstant gehalten wird. Ein niedrigerer Wasserstand als der vorgesehene hat eine Minderleistung zur Folge und sinkt der Pegel weiter ab, gelangt Luft in die Druckleitung, was zu Störungen und schliesslich Maschinenstillstand führt. Der Wasserstand wird deshalb überwacht und möglichst konstant gehalten. Oft handelt es sich um verschiedene Pegel die überwacht werden.

### 2.2.1 Parameter

Abbildung 2.1 zeigt einen Schnitt durch eine Anlage, in welcher die wesentlichen Pegel, die es zu überwachen gilt, eingetragen sind. Dabei ist  $p_1$  der Pegel im Oberwasser, welcher konstant zu halten ist. Meist ist ein Feinrechen vorgesehen. Ist dieser ganz oder teilweise verstopft, so sinkt das Niveau unterhalb des Rechen, weil zuwenig Wasser nachfliesst. Deshalb wird in der Regel der Pegel oberhalb und unterhalb des Rechen überwacht und die Pegeldifferenz  $p_d$  zur Steuerung einer Rechenreinigungsanlage verwendet. Schliesslich ist es sinnvoll, den Pegel  $p_2$  im Ausgleichsbecken vor dem Druckrohr zu überwachen. Wird ein nicht mehr zulässiges Minimum erreicht, so muss die Anlage abschalten. Für den Hochwasserschutz kann zusätzlich ein Pegel  $p_3$  im Unterwasser überwacht werden.

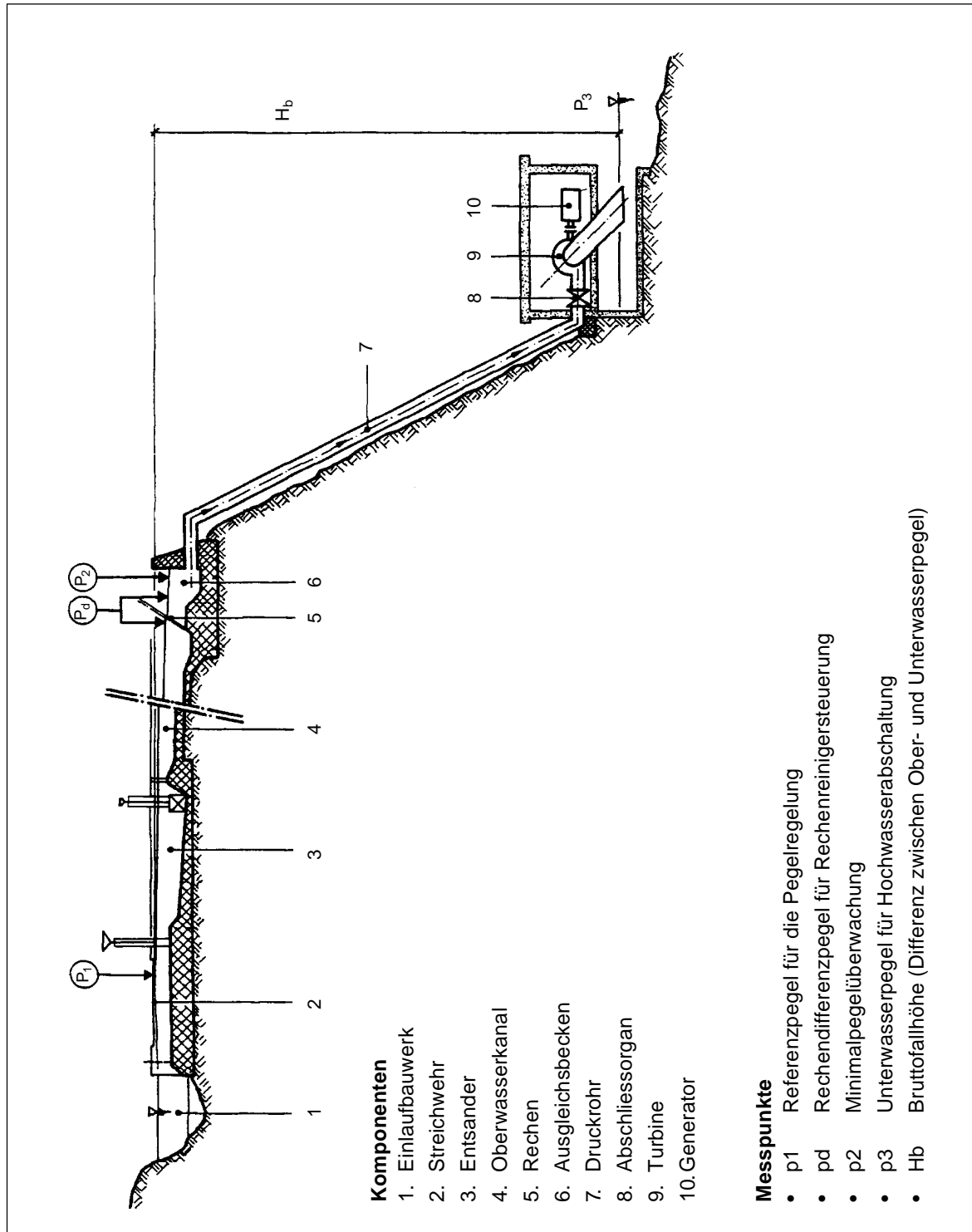


Abbildung 2.1: wesentliche Komponenten eines KWKW und Wasserpegelmesspunkte für die Überwachung und Regelung.

### 2.2.2 Sensorik

Zur Messung der Pegel kommen verschiedene Messsonden in Frage. Im Folgenden sind drei übliche Sensoren näher beschrieben.

#### 2.2.2.1 Druckmessdose mit Schaltpunkten

Hierbei handelt es sich um eine normale Druckmessdose, welche einstellbare elektrische Kontakte enthält. Ein solches Gerät ist zB einsetzbar zur Überwachung des Minimaldruckes und wird am Ende des Druckrohres plziert.

#### 2.2.2.2 Kapazitive/piezoresistive Messsonde

Eine solche Sonde wird eingetaucht und misst die Deformation einer Membrane, die wasserseitig mit dem Wasserdruck, auf der anderen Seite mit dem Luftdruck beaufschlagt ist. Die Deformation wird in ein elektrisches Signal umgewandelt. Moderne Sonden enthalten auch einen Transducer, welcher dieses Messsignal in ein Standard-Übertragungssignal, meist 4..20mA, übersetzen. Diese Sensoren erlauben das kontinuierliche Erfassen eines Pegels und ermöglichen damit ein schnelles und genaues Ausregeln eines Wasserstandes.

#### 2.2.2.3 Resistive Messsonden

Diese Pegelmessung beruht auf der Leifähigkeit des Wassers. Taucht man zwei Stabelektroden ein, kann ein kleiner Strom fließen, welcher ein entsprechend ausgelegtes Relais zum Schalten bringt. Damit lassen sich, mit der entsprechenden Anzahl Elektroden, bestimmte Pegel detektieren (Abb. 2.2).

Eine solche Messung lässt natürlich nur eine Reaktion bei Über- bzw Unterschreiten der entsprechenden Pegel zu. Die Einstellung geschieht über die Positionierung der Sonden.

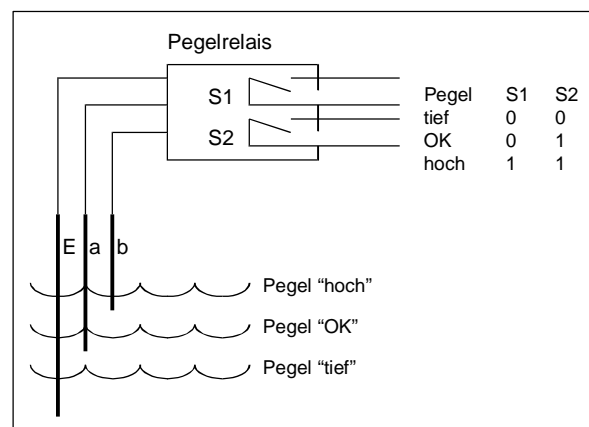


Abbildung 2.2: Niveaumessung mittels Pegelrelais.

## 2.3 Mechanische Grössen

Wesentlich beim Betrieb und der Regelung einer Wasserkraftanlage ist die Einhaltung derjenigen Grössen, welche bei zu grossen Abweichungen zu Leistungsverlust, Verschleiss, Störungen und allenfalls Anlageschäden führen. Dazu gehören:

- Nenndrehzahl
- Betriebstemperatur
- Vibrationen

### 2.3.1 Drehzahl

Es gibt zwei Gründe, warum die Nenndrehzahl eingehalten werden soll:

1. Über eine allfällige Transmission und die Anzahl Polpaare ist die Frequenz eines Drehstromgenerators direkt an die Drehzahl gekoppelt. Einhaltung der Frequenz bedeutet also die Einhaltung der Drehzahl.
2. Wasserturbinen werden möglichst so eingesetzt, dass der beste Wirkungsgrad bei Nenndrehzahl liegt. Bei tieferer oder höherer Drehzahl fällt der Wirkungsgrad ab. Mit dem Ziel einer möglichst effizienten Energieumwandlung wird die Nenndrehzahl möglichst eingehalten.

#### 2.3.1.1 Sensorik

Zur Messung der Drehzahl gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten. Grundsätzlich kann man entweder eine direkte Messung der mechanischen Drehzahl vornehmen, oder die abgeleitete Grösse der elektrischen Frequenz messen.

##### 2.3.1.1.1 Frequenzmessung

Diese Methode umgeht die Schwierigkeit eines Aufnehmers, indem direkt die Frequenz der vom Generator abgegebenen Spannung ausgewertet wird. Die Methode misst also nicht die Drehzahl der Turbine und erlaubt deswegen keine sichere Überwachung. Trotzdem ist es für eine Kleinanlage mit einem direktgekoppelten Asynchrongenerator eine kostengünstige Möglichkeit, um das Erreichen der Nenndrehzahl zur Aufschaltfreigabe festzustellen.



### 2.3.1.1.2 Drehzahlmessung

Zur Überwachung einer maximalen Drehzahl, die zu einer Notabschaltung führt, ist ein Tachogenerator eine Möglichkeit. Er übersetzt die Drehzahl in eine proportionale Spannung, die von einem Relais ausgewertet werden kann.

Für die Regelung der Drehzahl wird heute jedoch ein magnetischer Sensor, ein pick-up, verwendet, welcher nahe einem an der Welle befestigten Zahnrad angebracht wird. Jede Annäherung eines Zahnes löst einen elektrischen Impuls aus. Den zeitlichen Abstand dieser Impulse wandelt der Regler in eine Drehzahl um.

### 2.3.2 Betriebstemperatur

Die Betriebstemperatur verschiedener Komponenten einer Anlage stellt sich, je nach den Verhältnissen, auf einem konstanten Wert ein. Ein Anstieg der Temperatur weist in der Regel auf eine nicht zulässige Betriebsbedingung hin, welche durch die Überwachung der Betriebstemperatur somit eruiert werden kann. Typische zu überwachende Komponenten sind (siehe Fig. 2.3):

- Turbinenlager
- Generatorlager
- Statorwicklung (pro Phase)
- Hydrauliköltemperatur

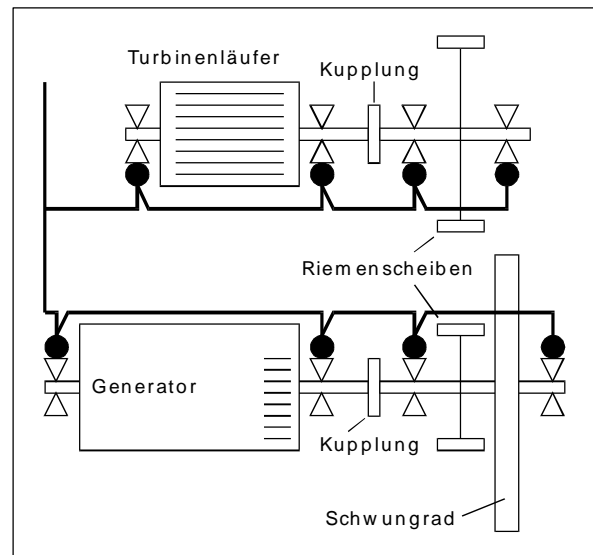


Abbildung 2.3: Temperaturmesspunkte der Lager

### 2.3.2.1 Sensorik

Zur Überwachung von Grenzwerten bieten sich Temperaturschalter an, welche beim Überschreiten einer Maximaltemperatur einen Kontakt schliessen. Diese rein mechanische Lösung wird durch temperaturabhängige Widerstände, sogenannte PTC, nachgebildet. Sie erhöhen ihren Widerstand oberhalb einer gewissen Temperatur drastisch, was von einer Auswertungselektronik erfasst und der Steuerung weitergemeldet werden kann.

Muss ein Temperaturverlauf verfolgt werden, z.B. wenn man die Alterung eines Lagers überwachen will zum vorbeugenden Unterhalt, werden linear temperaturabhängige Widerstände verwendet, üblich ist z.B. PT100. Durch die Messung des Widerstandes kann dadurch präzise die Temperatur abgelesen werden.

### 2.3.3 Vibrationen

Eine sorgfältig ausgeführte Anlage ist nach der Inbetriebsetzung weitgehend vibrationsfrei. Nimmt der Vibrationspegel während des Betriebes zu, so weist dies auf einen entstehenden Mangel hin. Meist handelt es sich dabei um rotierende Teile, für welche auch eine Temperaturüberwachung in Frage kommt. Vibrationsüberwachung ist deshalb eine doppelte Sicherheit, auf welche bei Kleinanlagen meist verzichtet wird.

## 2.4 Elektrische Grössen

Die Einhaltung und Überwachung elektrischer Grössen ist aufgrund des Gefahren- und Störungspotentials weitgehend vom Gesetz (auch bei Selbstversorgern) und vom übergeordneten Elektrizitätswerk vorgeschrieben.

Relevante Grössen in Bezug auf die Regelung sind:

- Frequenz
- Spannung
- Cos Phi (oder Blindleistung)

Relevante Größen in Bezug auf die Überwachung sind:

- Frequenz des Generators oder des Netzes
- Spannung (Wert und Symmetrie)
- Strom des Generators (statisch und dynamisch)
- Stellung der Hauptschalter

### 2.4.1 Leistungsschaltschrank

Die folgende Abbildung zeigt einen möglichen Aufbau eines Leistungsschaltschrank. Für die Regelung sind keine relevanten Komponenten enthalten, jedoch müssen zur Überwachung die Stellungen aller wichtigen Hauptschalter der Steuerung zurückgemeldet werden. Ebenso ist der Zustand wichtiger Sicherungen, in diesem Falle die Sicherungen für den Ballast, zu überwachen.

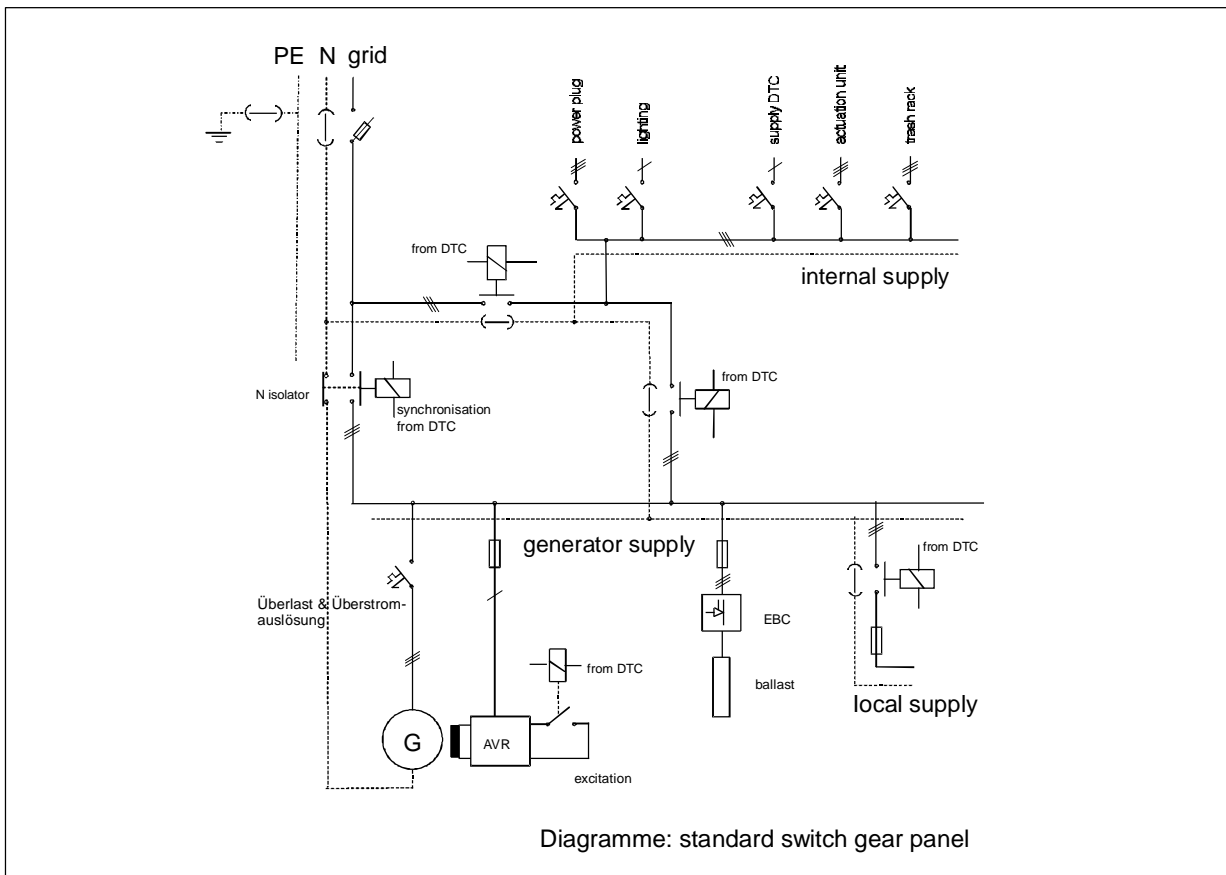


Abbildung 2.4: Schaltschema für eine Anlage zum Insel- und Verbundbetrieb

### 2.4.2 Notstromversorgung

Anlagen die auch ohne Netz, dh. im Inselbetrieb oder bei Netzausfall sicher fahren sollen und dazu elektrische Energie benötigen, werden mit einer Notstromversorgung ausgerüstet. Dies ist heute fast immer der Fall. Die Notstromversorgung besteht aus einem Batterieladegerät und einer Pufferbatterie mit einer Spannung von meistens 24VDC. Dies bedeutet einerseits, dass der Ladezustand überwacht werden muss, andererseits, dass alle Überwachungs-, Steuerungs- und Regelgeräte, welche bei einem Ausfall aller Netzspeisungen (Netz und Generator im reinen Inselbetrieb) in Betrieb sein müssen, über diese 24VDC gespeist sein müssen.

### 2.4.3 Überwachungsparameter

Arbeitet die Anlage im Inselbetrieb, und damit meistens mit einer Synchronmaschine, ist die Drehzahl bestimmend für die Frequenz der abgegebenen Spannung. Die Spannung selbst wird durch die Erregung der Maschine eingestellt. Dh. im Normalbetrieb werden diese Grössen durch den Drehzahlregler und den Spannungsregler nachgeführt.

Im Falle einer Störung müssen die Verbraucher und der Generator über den Generatorschutz vor Schäden bewahrt werden:

Generatorschutz:

Messgrösse	Phasen	Auslösung
I Generator	L1, L2, L3	bei Überlast
I Generator	L1, L2, L3	bei Kurzschluss
U Generator	L1, L2, L3	bei Über- oder Unterspannung und Spannungsasymmetrie (weite Toleranz)
f Generator	L1	bei Über- oder Unterfrequenz (weite Toleranz)
I Erregung	Ie	bei Überlast

Im Verbundbetrieb ist die Spannung und die Frequenz durch das starre Netz vorgegeben. Eine Frequenz- und Spannungsregelung entfällt deswegen. Die Blindleistung ist jedoch in den vom EW vorgegebenen Grenzen zu halten, also zu regeln.

Im Störfall, dh bei Netzausfall oder Kurzschluss, muss sichergestellt sein, dass der Generator rasch und bleibend von Netz getrennt wird. Rasch heisst zB dass bei einer Schnellwiedereinschaltung des Netzes die Anlage sich bereits getrennt hat (<200ms).

Das Erkennen des Netzausfalles ist keineswegs trivial, wird aber mit modernen schnellen Überwachungsrelais gewährleistet.

Messgrösse	Phasen	Auslösung
I Generator	L1, L2, L3	bei Kurzschluss
U Netz	L1, L2, L3	bei Über- oder Unterspannung und Spannungsasymmetrie (enge Toleranz)
f Generator	L1	bei Über- oder Unterfrequenz (enge Toleranz)
Vektorsprung	L1	Zur Erkennung von Schwebelasten wird bei einem Sprung des Lastwinkels der Netzschalter ausgelöst

## 2.5 Zustands- und Störungsanzeigen, Alarme

### 2.5.1 Optische Anzeigen in der Anlage

Anzeigen und Bedienelemente für den Bediener sollen ergonomisch und unverwechselbar angebracht sein. D.h. Es sollen nicht mehr Informationen und Kommandos zugänglich sein als nötig. Im Normalbetrieb sollten die im Beispiel aufgeführten Anzeigen genügen:

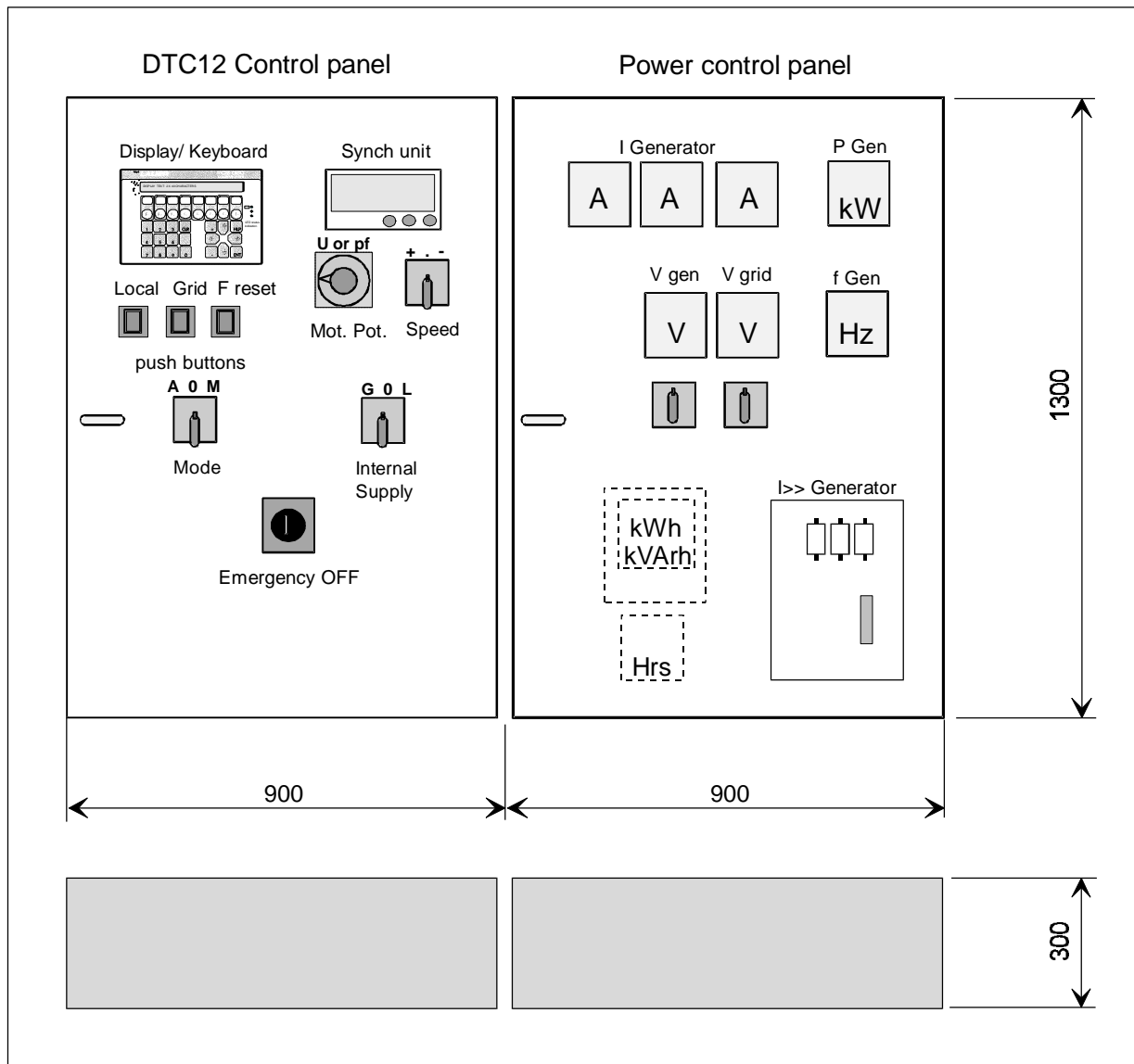


Abbildung 2.5: Frontansicht einer Gesamtanlage (50-250kW)

Anzeigen	Gerät
Netzspannungen	analog Instrument & synch unit
Generatorspannungen	analog Instrument & synch unit
Generatorfrequenz	analog Instrument & synch unit
Generatorströme	analog Instrument & synch unit
Wirkleistung	analog Instrument & synch unit
cosφ	synch unit
Energiezähler (Wirk & Blind)	elektronischer Zähler (im Leistungsschrank)
Betriebsstundenzähler	elektronischer Zähler (im Leistungsschrank)

Die wesentlichen Bedienelemente sind alle auf dem Steuerschrank logisch gruppiert:

Bedienung	Gerät
Generatorspannungen → kontinuierlich	Drehknopf (Motorpotentiometer)
cosφ → kontinuierlich	Drehknopf (Motorpotentiometer)
Betriebswahlschalter: → auto / aus / manuell	Wippschalter (rastend)
Turbinendrehzahl → mehr / weniger	Wippschalter (schnellend)
Verbundwahl	Leuchttaster
Inselwahl	Leuchttaster
Eigenverbrauch	Wippschalter
Alarm Quittierung	Leuchttaster

Im Falle von Ausnahmesituationen (Alarmer), soll der Bediener entweder über Leuchten und deren Blinkfrequenz oder eine Klartextanzeige über den Fehler und den gegenwärtigen Stand der Anlage informiert werden. Alarmer sind zu quittieren!

### 2.5.2 Alarme

Nicht jeder Fehler ist gleich ernsthaft in seiner Auswirkung. Aus diesem Grunde werden die möglichen Fehler in Gruppen eingeteilt und es werden ihnen Prioritäten zugeordnet.

Priorität	Ursache	Wirkung
NotAus	manueller NotAus; Regel- und Überwachungssystem defekt (watch-dog)	spannungsfrei schalten der ganzen Anlage; raschest mögliches Schliessen der Turbine
I	<ul style="list-style-type: none"> <li>• max. Lagertemperatur</li> <li>• max. Statortemperatur</li> <li>• min. Schmieröl</li> <li>• Sicherung el. Ballast</li> <li>• Sicherung Generator</li> </ul>	Abschalten der Anlage und erst wieder Anfahren nach Alarm Quittierung
II	<ul style="list-style-type: none"> <li>• min. Spannung</li> <li>• min. Pegel</li> <li>• min. Öldruck (Servo unit)</li> </ul>	Abschalten der Anlage und wieder Anfahren nachdem die Störung vorbei ist. Bei Wiederholungen der Störung auslösen von Priorität I
III	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Netzausfall</li> </ul>	Umschalten in Inselbetrieb und Meldung. Bei Wiederholungen der Störung auslösen von Priorität II

Alarmanzeigen auf Leuchten sollen Grundsätzlich wie folgt erfolgen:

Status Störung	Wirkung
steht noch an	entsprechende Lampe blinkt; nach Reset → Dauerlicht
stand an	entsprechende Lampe blinkt; nach Reset → aus
mehrere (Ersterkennung)	erste Störung → entsprechende Lampe blinkt alle weiteren → entsprechende Lampen Dauerlicht



Eine übersichtliche Methode um Alarmer zu erfassen und auszuwerten, ist das Einführen von Alarmbausteinen. Um die Eingangs erklärten Funktionen zu ermöglichen sind Alarmbausteine mit Erstwerterkennung notwendig. Ein solcher Baustein wird in der Abbildung 2.6 beschrieben.

#### Funktion:

Ist der Alarmeingang (ACT=1) freigegeben und wird eine Störung gemeldet (AL=1), wird dieses Ereignis gespeichert (LAM=blinkt, ALS=1, ALP=1 Puls). Verschwindet die Störung bleibt dieser Speicherzustand erhalten, bis ein Reset (Quittierung) erfolgt (RES=1 Puls). Dabei wird unterschieden ob beim Reset der Fehler noch ansteht oder nicht und entsprechend geht die Lampe aus oder auf Dauerlicht. Um bei mehreren auftretenden Störungen die erste zu unterscheiden, wird der first out (FOU) Eingang benützt. Wie im folgenden Schema dargestellt, erfolgt beim ersten Alarm eine normale blinkende Anzeige, die jedoch zurückgeführt wird auf alle FOU Eingänge. Alle weiteren Alarmer lösen nun Dauerlicht aus, da das blinken gesperrt ist.

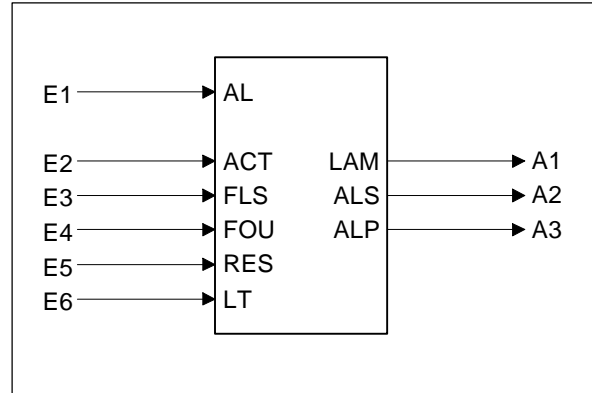


Abbildung 2.6: Alarmbaustein mit Erstwerterkennung

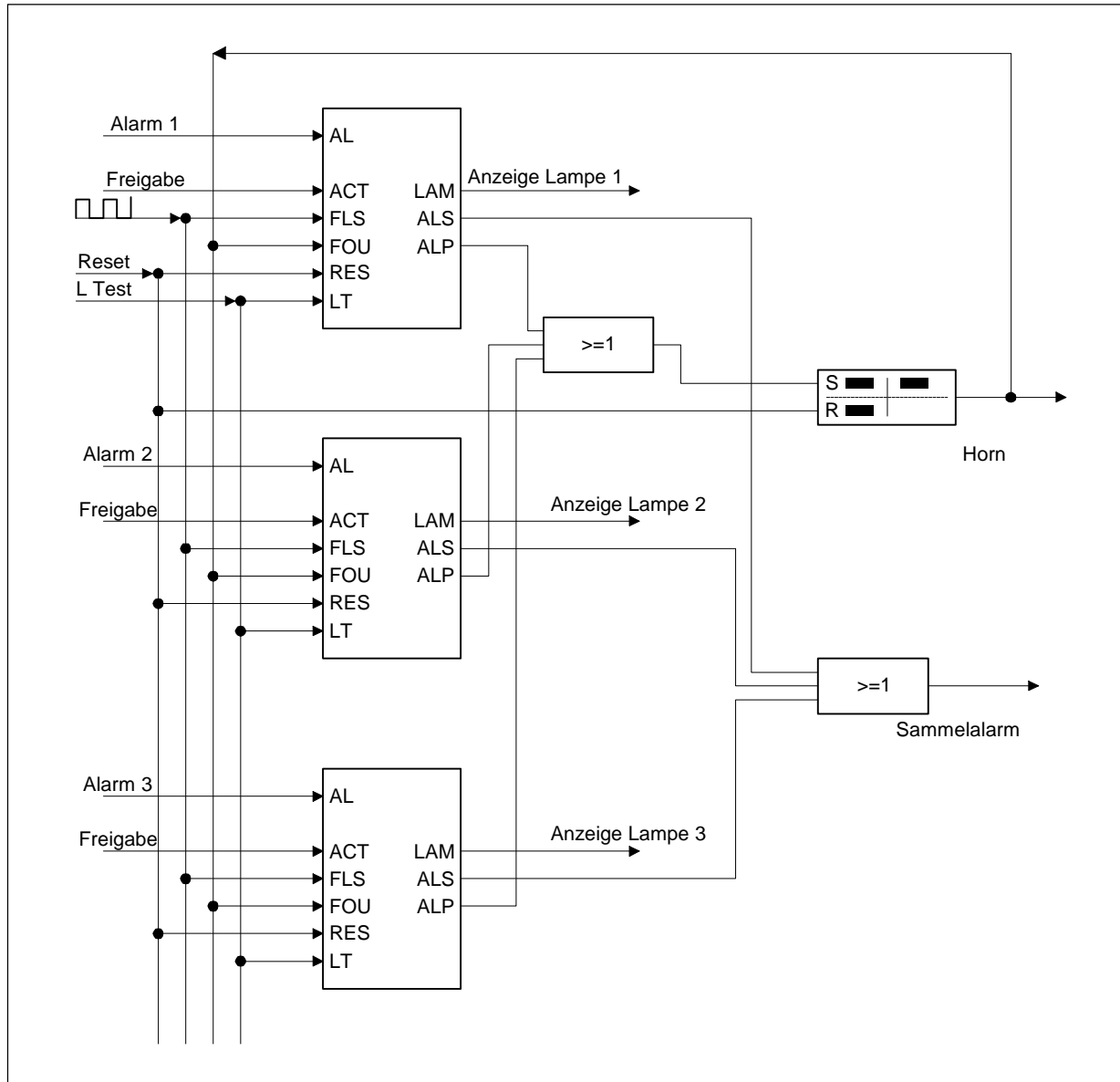


Abbildung 2.7: Aufbau einer Alarmauswertung

### 2.5.3 Protokollierung

Eine etwas aufwendigere Möglichkeit, aber heute durchaus Standard, sind kleine Meldedrucker. Ein solches Gerät gibt alle wichtigen Ereignisse (Fehler) und Tagesprotokolle auf dauerhaftem Thermopapier aus.

Eine weitere Möglichkeit ist das Aufzeichnen wichtiger Kenngrößen der Anlage wie Momentanleistung, Energieproduktion oder Wasserdurchfluss mittels sogenannter "Data-Logger". Ein solches Gerät erfasst diese Daten in bestimmten Zeitintervallen und speichert sie ab. Diese Daten können dann von einem PC aus abgefragt und zB statistisch ausgewertet werden. Ebenso ist es natürlich möglich, Alterungsvorgänge zu beobachten, zB die Temperatur eines Lagers um daraus Wartungsbedarf abzuleiten (präventive Wartung). Ein modernes, elektronisches Leitsystem enthält alle diese Möglichkeiten ohne nennenswerten Aufpreis bereits.

### 2.5.4 Fernwirkung

Um Betriebskosten niedrig zu halten, sind KWKW Anlagen nicht ständig besetzt. D.h. aber auch, dass in einer Notsituation die Anlage Meldungen abschicken können muss. Im einfachsten Fall ist dies ein Horn, welches akustisch einen Betriebswart herbeiruft. Ist ein Telefonanschluss vorhanden, kann man einen "Tele-Alarm" auslösen, welcher nach einer Liste Telefone anwählt und ab Band eine Meldung abgibt.

Die Möglichkeit, Informationen über eine Telefonverbindung zu übertragen ist selbstverständlich bidirektional. Modernere Regelsysteme verfügen über die Möglichkeit, die Anlage fernzubedienen.



## 3. Der Arbeitspunkt eines KWKW

---

<b>3.1</b>	<b>Wasserdurchfluss, Fallhöhe und Druckverlust</b>	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>Momentenbilanz</b>	<b>38</b>

---



## 3. Der Arbeitspunkt eines KWKW

### 3.1 Wasserdurchfluss, Fallhöhe und Druckverlust

Der Wasserdurchfluss ist eine typische Grösse, welche im Kleinkraftwerk geregelt wird. Das Schluckvermögen einer Turbine ist eine spezifische Grösse, welche abhängig ist vom Druck unter dem die Anlage arbeitet. Die Nettofallhöhe ergibt sich aus dem statischen Druck abzüglich aller Fließreibungsverluste des Wassers und letztere sind im wesentlichen abhängig von der Fließgeschwindigkeit und den einzelnen Dimensionen und Materialien der wasserbaulichen Teile. Daraus ergeben sich die Verhältnisse in einer Anlage gemäss Abb. 3.1.

Die Nettofallhöhe ist also:

$$H_n = H_b - \Delta H_{\text{tot}}$$

Die Grösse  $\Delta H_{\text{tot}}$  setzt sich aus verschiedenen Verlusten zusammen, wovon folgend einige beschrieben sind:

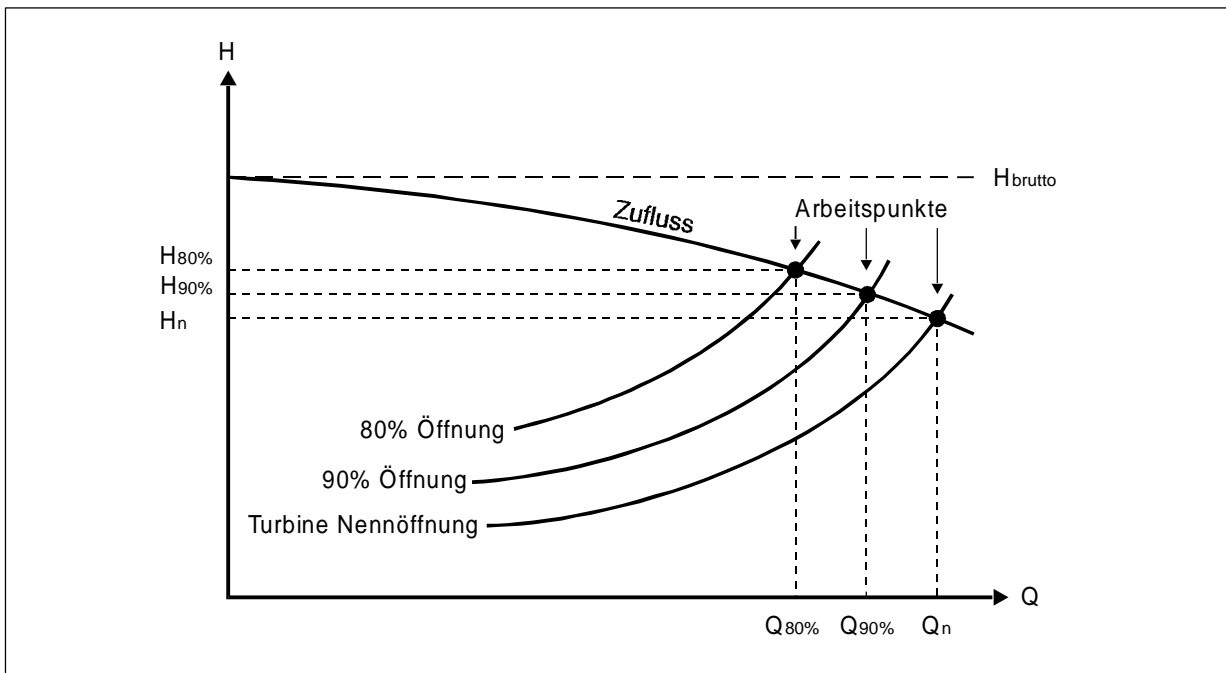


Abbildung 3.1: Statischer Durchfluss und Nettofallhöhe für verschiedene Turbinenöffnungen.

Der Druckverlust in einer geraden Druckleitung ist abhängig von der Fließgeschwindigkeit und dem Reibungskoeffizienten ( $k$ , nach STRICKLER, Abb. 3.2) und der Länge. Die Fließgeschwindigkeit ergibt sich dabei aus dem Durchfluss  $Q$  und dem Rohrquerschnitt. Folgende Formel zur Berechnung der Druckverluste in der geraden Rohrleitung wird oft angewendet.

$$\Delta H_{\text{rohr}} = \frac{4^{\frac{10}{3}}}{\pi^2} \cdot \frac{Q^2 \cdot L}{k^2 \cdot D^{\frac{16}{3}}}$$

dabei sind:

$\Delta H_{\text{rohr}}$  = Druckverlust [m]  
 $Q$  = Durchfluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $L$  = Gerade Länge der Druckleitung [m]  
 $D$  = innerer Durchmesser der Druckleitung [m]  
 $k$  = Reibungskoeffizient nach STRICKLER [-]

Interessant ist dabei u.a. die extreme Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser: verdoppelt man ihn, verringert sich der Verlust um das vierzigfache, halbiert man ihn, erhöht sich der Verlust um das vierzigfache!

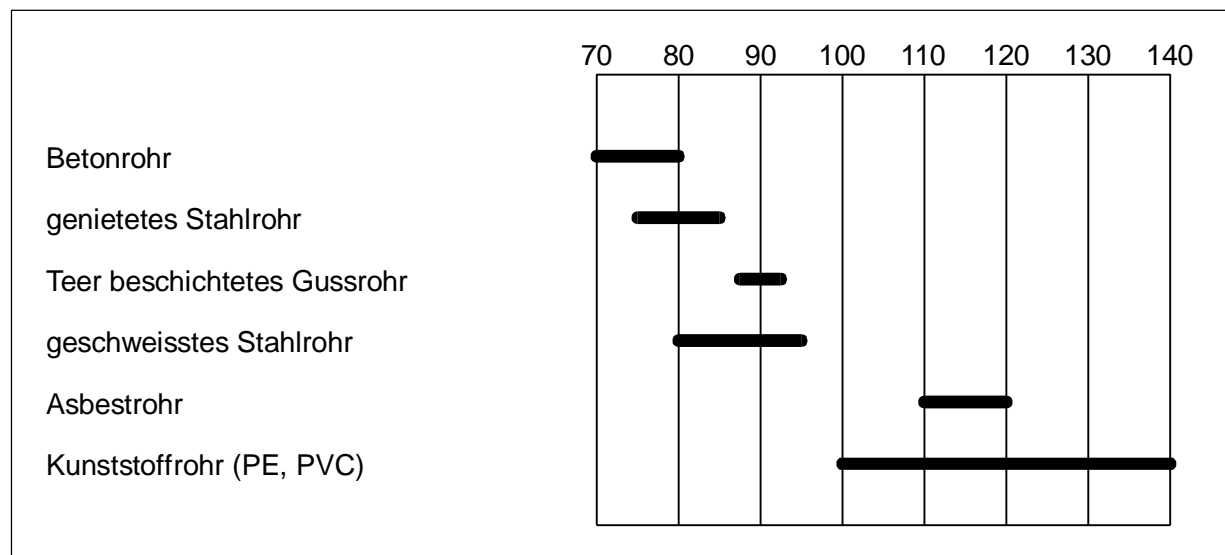


Abbildung 3.2:  $k$  Werte für verschiedene Rohrmaterialien



Zusätzlich zu den Verlusten in der geraden Rohrleitung sind Verluste am Einlass, in Bögen, bei Querschnittsänderungen, etc. zu addieren. Die Teilverluste berechnen sich nach der Formel:

$$\Delta H = \zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

dabei sind:

- $\Delta H$  = Teil-Druckverlust [m]
- $\zeta$  = der anwendbare Widerstandskoeffizient
- $v$  = Fließgeschwindigkeit [m/s]
- $g$  = Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

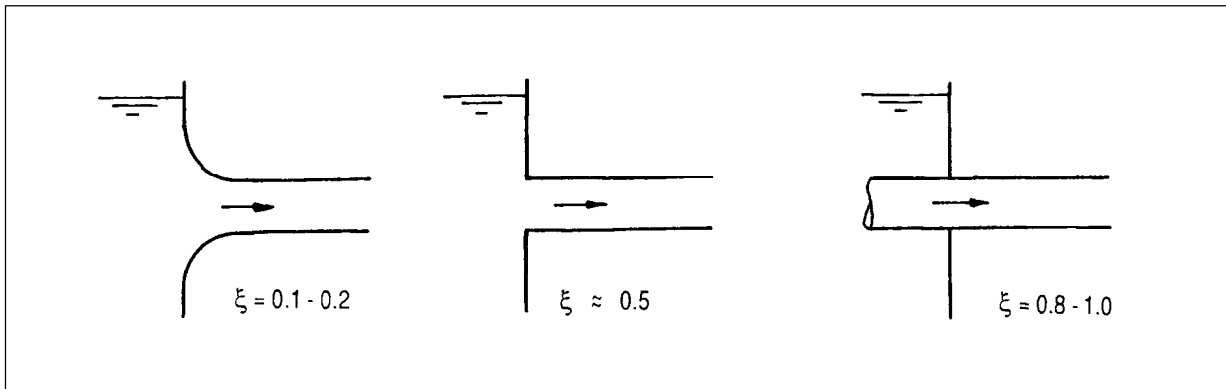


Abbildung 3.3:  $\zeta$  -Werte für verschiedene Situationen

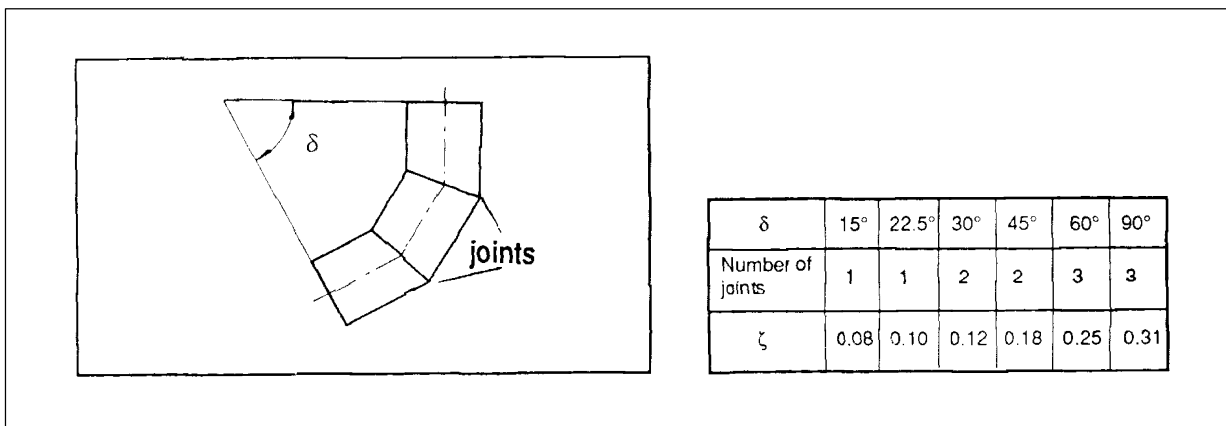


Abbildung 3.4:  $\zeta$  Werte für verschiedene Bögen

### 3.2 Momentenbilanz

Der Arbeitspunkt in Bezug auf Drehzahl und Drehmoment einer Anlage ergibt sich aus der Energiebilanz des rotierenden Systems. Es gilt:

Zugeführte Leistung = abgeführte Leistung

Im statischen Gleichgewicht, d.h. bei stabiler Drehzahl, muss die Abgangsleistung (Bremsmoment) der zugeführten Leistung (Antriebsmoment) entsprechen. Letztere ergibt sich aus Gefälle ( $H_n$ ), Durchfluss, und Wirkungsgrad. Die Antriebsleistung einer Turbine ergibt sich damit aus:

$$P_{\text{turb}} = Q \cdot H_{\text{net}} \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{\text{turb}}$$

wobei:

$Q$  = Durchfluss [m<sup>3</sup>/s]

$H_{\text{net}}$  = Nettofallhöhe [m]

$\rho$  = Dichte von Wasser = 1000 kg/m<sup>3</sup>

$g$  = Erdbeschleunigung = 9.81 m/s<sup>2</sup>

$\eta_{\text{turb}}$  = Wirkungsgrad der Turbine [-]

Das Drehmoment ist

$$M_{\text{turb}} = \frac{P_{\text{turb}}}{\omega}$$

wobei:

$M$  = Drehmoment [Nm]

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit [rad/s]

Die Winkelgeschwindigkeit hat dabei die Einheit [rad/s] und errechnet sich aus der Drehzahl, welche in Umdrehungen pro Minute angegeben wird:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$$

mit:

$n$  = Drehzahl [1/min]

Bei voll beaufschlagtem aber stillstehendem Turbinenläufer erreicht das Drehmoment ein Maximum. Weil die Drehzahl = 0 ist, ist die abgegebene Leistung = 0. Andererseits ist bei der Maximaldrehzahl (Durchbrenndrehzahl) das resultierende Drehmoment = 0 und die abgegebene Leistung = 0.

Nimmt man einen linearen Momentenverlauf an (statthaft für Pelton-turbinen), ergibt sich das Leistungsmaximum aus diesem Zusammenhang bei der halben Maximaldrehzahl (vgl. Abb. 3.5).

Der angestrebte Arbeitspunkt ist die Drehzahl, bei welcher die Turbinenleistung ihr Maximum hat. Der optimale Arbeitspunkt stellt sich also ein, wenn das Bremsmoment ( $M_{ab}$ ) gerade dem Antriebsmoment bei Nenndrehzahl entspricht

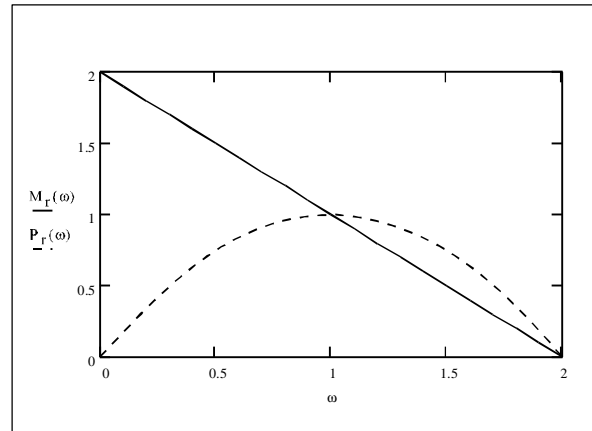


Abbildung 3.5: Drehzahlabhängigkeit des Moments und der Leistung bezogen auf den Nennwert.

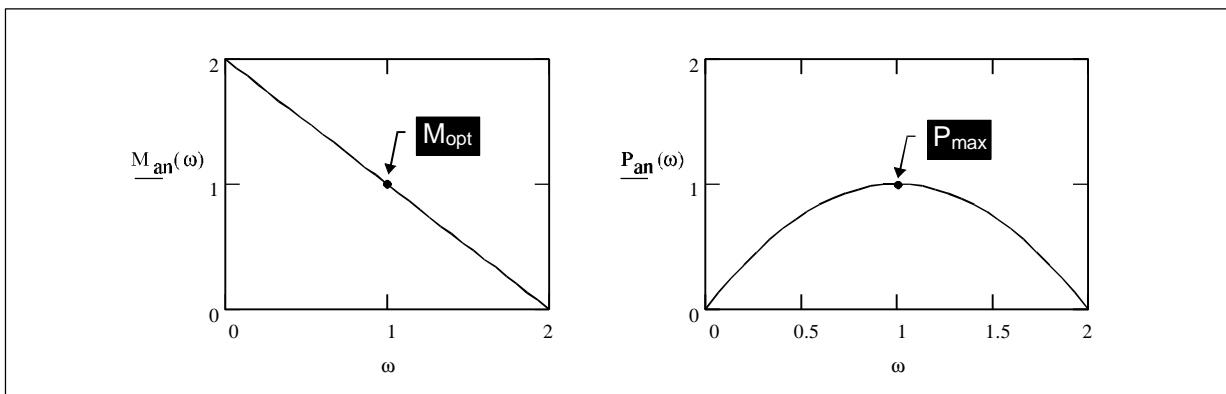


Abbildung 3.6: optimaler Arbeitspunkt.

**Spezialfall 1**

Nimmt man ein konstantes Bremsmoment an (z.B. in einem Bremsversuch), und ändert bei fester Turbinenöffnung das Bremsmoment, ergibt sich folgendes Bild (Abb. 3.7).

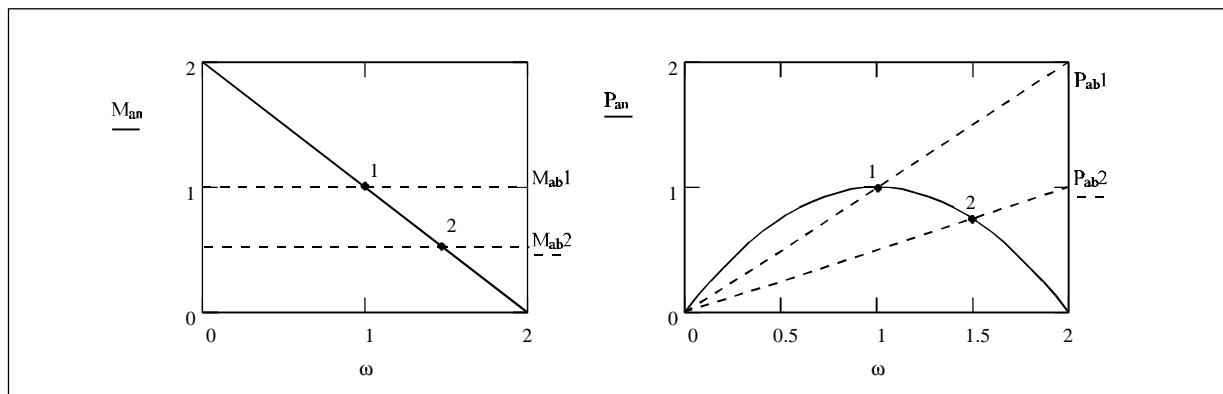


Abbildung 3.7: Reduktion der Abtriebsleistung (gezeichnet für ein konstantes Bremsmoment)

Reduziert man die Bremsleistung, nimmt also das Bremsmoment ab, so stellt sich ein neuer Arbeitspunkt (1 auf 2) auf der Leistungskurve der Turbine bei einer höheren Drehzahl ein. Dies ist der Sachverhalt beim ungeregelten System.

Beim geregelten System, wo das Ziel die Haltung der Drehzahl ist, wird die zugeführte Leistung gemäss Abb. 3.8 durch die Veränderung des Durchflusses der Bremsleistung angepasst (Arbeitspunkt 2 auf 3).

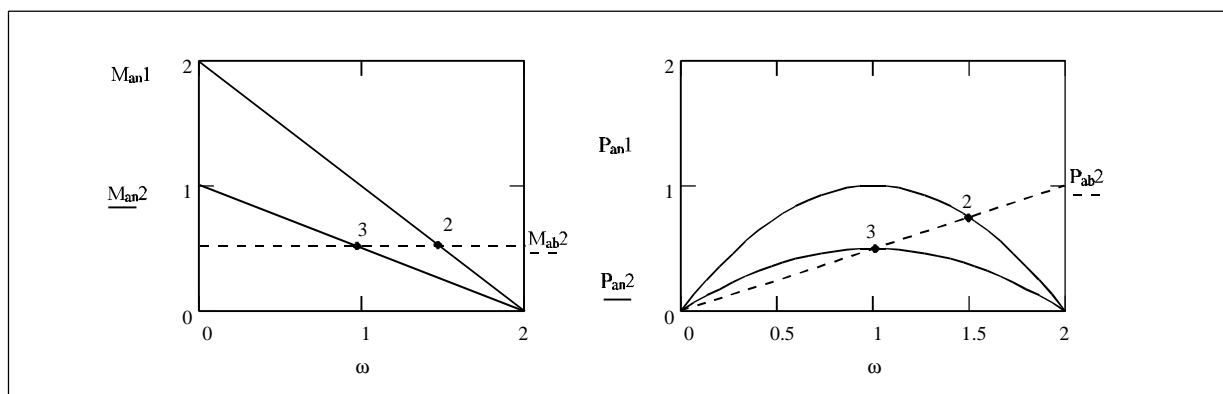


Abbildung 3.8: Nachführen der Antriebsleistung (gezeichnet für ein konstantes Bremsmoment)

### Spezialfall 2

Ein weiterer Spezialfall (Abb. 3.9), ist eine am Netz betriebene Anlage. Die Drehzahl ist vom Netz bestimmt und es kann jede Antriebsleistung absorbieren, d.h. die Bremskennlinie ist die Senkrechte auf die Nenndrehzahl. Da dabei jede beliebige Antriebsleistung möglich ist, wird in diesem Fall nicht die Drehzahl sondern der Wasserstand im Ausgleichsbecken geregelt. Der Turbinendurchfluss wird dabei so eingestellt, dass er dem Zufluss gleich wird. Damit wird alles zur Verfügung stehende Wasser turbinieren.

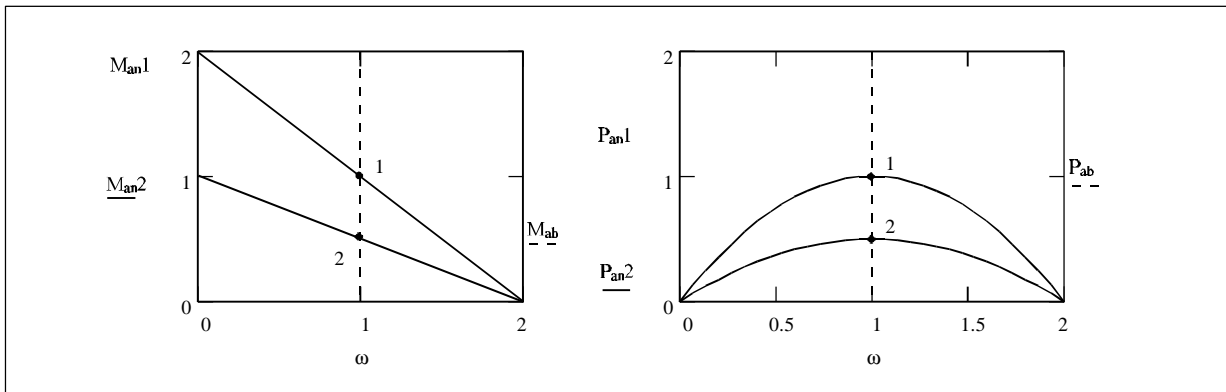


Abbildung 3.9: Nachführen der Antriebsleistung nach dem Wasserstand bei Verbundbetrieb

Die Verhältnisse sind hier nur sehr idealisiert wiedergegeben. In Wirklichkeit sind zB die Bremskennlinien eines Synchrongenerators im Inselbetrieb komplizierte Kurven. Dies führt dazu, dass es u.U. mehrere Schnittpunkte der Momentenkennlinien geben kann und die Maschine deswegen unter ungünstigen Verhältnissen sogar dauernd zwischen diesen Arbeitspunkten hin und her pendelt. Solch ein potentiell instabiler Betrieb ist nur mit einer guten Regelung in den Griff zu bekommen.



## 4. Das Transiente Verhalten eines KWKW

---

<b>4.1</b>	<b>Die Anlaufzeit der Rotationsmasse</b>	45
4.1.1	Massenträgheitsmoment Berechnung	46
4.1.2	Die Anlaufzeitkonstante	47

---

<b>4.2</b>	<b>Die Anlaufzeit des Wassers</b>	50
------------	-----------------------------------	----

---

<b>4.3</b>	<b>Der Druckstoss</b>	52
4.3.1	Vereinfachte Beschreibung	54
4.3.1.1	plötzliches Schliessen & Öffnen	54
4.3.1.2	plötzliches, teilweises Schliessen	58
4.3.1.3	schrittweises Schliessen	58
4.3.2	Einführung von vernachlässigten Grössen.	62
4.3.2.1	Die Druckrohrgeometrie	62
4.3.2.2	Druckverluste	64
4.3.2.3	Die Methode von Allievi	66
4.3.3	Spezielle Druckstossituationen	70
4.3.3.1	Generelle Überlegungen	70
4.3.3.2	Beispiel invertierte Pumpen	70
4.3.3.3	Resonanzerscheinungen	72
4.3.3.4	Negativer Druckstoss	73
4.3.3.5	Zusammenfassung von Lösungen zur Druckstossverminderung	74

---

<b>4.4</b>	<b>Maximale Überdrehzahl</b>	76
------------	------------------------------	----

---





## 4. Das Transiente Verhalten eines KWKW

Es wurde bisher gezeigt, dass sich bei einer Veränderung des Antriebs- oder des Abtriebsmomentes jeweils ein neuer Arbeitspunkt einstellt, woraus sich eine Drehzahländerung ergibt. Für die Regelung der Drehzahl ist es nun interessant zu sehen, wie der zeitliche Verlauf einer solchen Änderung aussieht. Dazu muss auf die Trägheit des Systems aufgrund der rotierenden Masse (Turbine/Generator) und der sich bewegenden Wassersäule eingegangen werden.

### 4.1 Die Anlaufzeit der Rotationsmasse

Wie rasch sich die Drehzahl der Gruppe ändern kann hängt ab von der momentanen Drehzahl, der Leistungsänderung und dem Massenträgheitsmoment.

Das Massenträgheitsmoment  $J$  des Gesamtsystems setzt sich zusammen aus den Massenträgheitsmomenten der Einzelkomponenten, welche addiert werden. Handelt es sich dabei beispielsweise um eine Turbine welche über eine Transmission (Drehzahlerhöhung) mit einem Generator verbunden ist, so müssen die einzelnen Massenträgheitsmomente auf die Bezugsdrehzahl reduziert werden, bevor sie addiert werden können.

$$J_{\text{tot}} = J_1 + \sum_i J_i \cdot \left( \frac{n_i}{n_1} \right)^2$$

wobei:

$n_1$  = Bezugsdrehzahl der Maschine 1 mit  $J_1$

$n_i$  = Drehzahlen aller anderen Maschinen mit  $J_i$

Das Massenträgheitsmoment des Generatorrotors und des Turbinenläufers kann meist den Unterlagen des Herstellers entnommen werden. Die übrigen Komponenten wie Riemenscheiben, Kupplungen und insbesondere Schwungräder, müssen berechnet werden. Man zerlegt dabei ein komplexes Bauteil in geometrisch einfache Rotationskörper wie Scheiben und Kreisringe, berechnet deren Massenträgheitsmomente und addiert die Teilresultate, um das gesamte Massenträgheitsmoment zu erhalten.

#### 4.1.1 Massenträgheitsmoment Berechnung

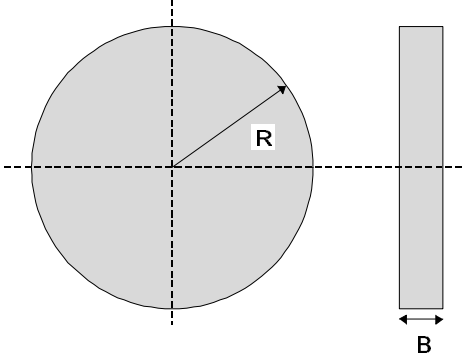
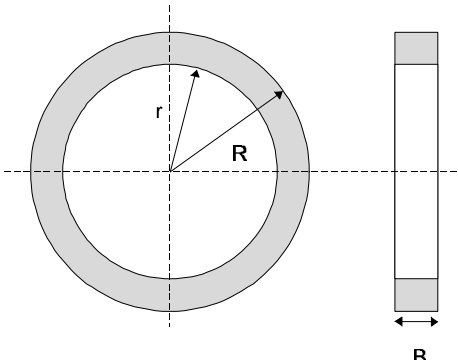
Form	Masse [kg]	Massenträgheitsmoment [kgm <sup>2</sup> ]
<p>Runde Scheibe</p> 	$M = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot B$	$J = \frac{R^2 \cdot M}{2}$ $= \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^4 \cdot B}{2}$
<p>Kreisring (Kranz eines Schwungrades)</p> 	$M = \rho \cdot \pi \cdot (R^2 - r^2) \cdot B$	$J = \frac{(R - r)^2 \cdot M}{2}$ $= \frac{\rho \cdot \pi \cdot (R - r)^2 \cdot (R^2 - r^2) \cdot B}{2}$

Abbildung 4.1: Berechnung von Massenträgheitsmomenten

wobei:

 $\rho$  = Dichte des verwendeten Materials [kg/m<sup>3</sup>] $R$  = äußerer Radius [m] $r$  = innerer Radius (Kreisring) [m] $B$  = Breite des Rotationskörpers [m]

Beispiel:

Berechne das wirksame Massenträgheitsmoment für folgende Anordnung:

Nennleistung der Anlage: 55 kW

Turbine:

Drehzahl  $n = 750$  1/min,  
Massenträgheitsmoment des Rotors  
 $J = 4,0$  kgm<sup>2</sup>

Generator:

Drehzahl  $n = 1500$  1/min  
Massenträgheitsmoment des Rotors  
 $J = 2.87$  kgm<sup>2</sup>

Schwungrad:

Runde Scheibe aus Stahl  
( $\rho = 7800$  kg/m<sup>3</sup> mit Durchmesser  
500 mm, Dicke 80 mm, auf Generator-  
welle laufend.)

Gewicht  $m = 7800 \cdot 3.14 \cdot 0.25^2 \cdot 0.08 = 122.5$  kg  
Massenträgheitsmoment  
 $J_s = 122.5 \cdot 0.25^2 / 2 = 3.83$  kgm<sup>2</sup>

Reduziertes Massenträgheitsmoment der Turbine

$$\begin{aligned} J_{\text{tred}} &= J_t (n_t / n_g)^2 \\ &= 4.0 \cdot (750/1500)^2 = 1.0 \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

Gesamtes Massenträgheitsmoment

$$\begin{aligned} J_{\text{tot}} &= J_{\text{tred}} + J_s + J_g \\ &= 1.0 + 3.83 + 2.87 = 7.7 \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

#### 4.1.2 Die Anlaufzeitkonstante

Bei Vollast (maximales Antriebsdrehmoment an der Turbinenwelle) führt eine Vollabschaltung auf der Generatorseite (Lastabwurf) dazu, dass die Drehzahl auf Durchbrenndrehzahl ansteigt. Da dann das Antriebsmoment Null ist, steigt die Drehzahl nicht weiter an. Der zeitliche Verlauf dieses Drehzahlanstiegs entspricht in erster Näherung einer Exponentialfunktion.

$$\omega(t) = \omega_d - (\omega_d - 1) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}$$

wobei:

$\omega_d$  = Durchbrenndrehzahl [rad/s]  
 $T_a$  = Anlaufzeitkonstante [s]

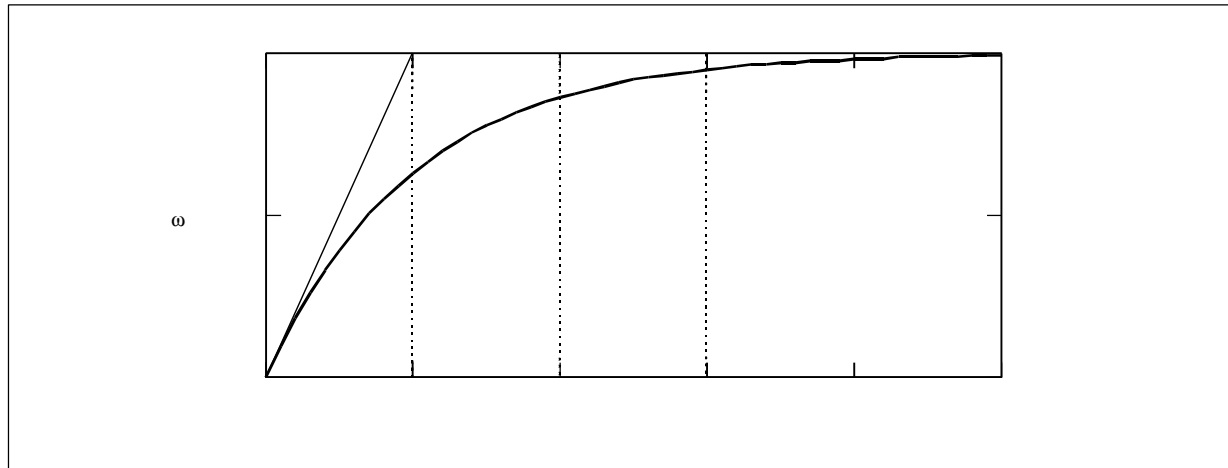


Abbildung 4.2: Drehzahlanstieg bei Vollastabwurf

Die Formel für die Berechnung der Anlaufzeitkonstante lautet:

$$T_a = \frac{J \cdot \omega_n}{M_n}$$

$$= \frac{J \cdot \omega_n^2}{P_n}$$

wobei:

$J$  = Massenträgheitsmoment  $[\text{kgm}^2]$

$\omega_n$  = Winkelgeschwindigkeit bei Nenndrehzahl  $[\text{rad/s}]$

$P_n$  = Nennantriebsleistung der Turbine  $[\text{W}]$

$M_n$  = Nenndrehmoment der Turbine  $[\text{Nm}]$

Dies gilt für den Fall, dass die Durchbrenndrehzahl das Zweifache der Nenndrehzahl ist (Pelton- oder Durchströmturbine). Ist dies nicht der Fall, so erfolgt eine Korrektur wie folgt:

$$T_{a2} = \frac{\omega_d - \omega_n}{\omega_n} \cdot T_a$$

mit  $\omega_d$  = Durchbrenndrehzahl

Will man den Drehzahlanstieg in Grenzen halten, so muss die Regelung das Antriebsmoment reduzieren. Die Anlaufzeitkonstante  $T_a$  ist dabei eine wichtige Grösse für die erforderliche Reglercharakteristik. Aus ihr geht hervor, wie rasch die zulässige Maximaldrehzahl erreicht wird.

Der effektive Drehzahlanstieg während der Zeit  $T_a$  beträgt gemäss Abb. 4.2 163% der Nenndrehzahl für den Fall vereinfacht angenommener Verhältnisse mit der Durchbrenndrehzahl  $= 2n$ . Für den Fall einer Pelton-turbine ist diese Vereinfachung zulässig, da man damit auf der sicheren Seite liegt.

Beispiel:

Vorausgesetzt es handelt sich im obigen Beispiel um eine Pelton- oder Durchströmturbine, dann gilt für die Anlaufzeitkonstante:

$$T_a = 7.7 \epsilon (p \epsilon 1500 / 30)^2 / 55'000 \\ = 3.5 \text{ s}$$

Die Drehzahl steigt innerhalb von 3.5 Sekunden auf das 1.63-fache der Nenndrehzahl, also 2445 1/min an, falls die Durchflussmenge unverändert bleibt. Eine Verlängerung der Anlaufzeit ist möglich durch ein grösseres Schwungrad oder aber durch eine elektrische Bremse. Dies ist unter Umständen zur Verhinderung unzulässiger Druckstösse notwendig.

Zur Bemessung einer elektrischen Bremse als Ersatz für ein Schwungrad kann die Energieaufnahme des Schwungrades während dem Drehzahlanstieg herangezogen werden. Es gilt:

Energieinhalt eines Schwungrades

$$W = \frac{J \cdot \omega_d^2 \cdot \omega_n^2}{2}$$

für das vorgängig berechnete Beispiel:

$$W = 3.83/2 \epsilon (\pi \epsilon 3000 / 30)^2 (\pi \epsilon 1500 / 30)^2 \\ = 14'600 \text{ Ws}$$

die erforderliche Verzögerungsleistung für eine elektrische Bremse im Zeitpunkt der Abschaltung berechnet sich zu:

$$P_{Br} = \frac{W}{T_a \cdot 1.5}$$

Im Beispiel:

$$P_{Br} = 141'600 / 3.5 \cdot 1.5 = 27128 \text{ W} \approx 27\text{kW}$$

Vorausgesetzt, die "elektrische Bremse" mit 27 kW wird im gleichen Moment eingeschaltet wie der Lastabwurf geschieht, so gilt mit dem um das Schwungrad reduzierten Massenträgheitsmoment:

$$T_a = \frac{J \cdot \omega_n^2}{(P_n - P_{Br})}$$

$$= (7.7 - 3.83) \text{ s} \left( \pi \in 1'500 / 30 \right)^2 / (55'000 - 27'000)$$

$$= 3.4 \text{ s}$$

Es ergibt sich das gleiche Resultat wie mit dem Schwungrad. Letzteres kann somit weggelassen werden.

## 4.2 Die Anlaufzeit des Wassers

Bei einer bestimmten Betriebssituation bewegt sich das gesamte Volumen im Druckrohr mit konstanter Geschwindigkeit. Wird eine Durchflussänderung vorgenommen, so ändert sich die Fließgeschwindigkeit  $v$ , da gilt:

$$v = \frac{Q}{D^2 \cdot \pi / 4}$$

wobei:

$Q$  = Durchfluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$D$  = Innendurchmesser des Druckrohres [m]

Bedingt durch die Trägheit hat die bewegte Wassersäule das Bestreben im Zustand vor der Durchflussänderung zu verharren. Daraus folgt, ähnlich wie beim Drehzahlanstieg eine Zeitkonstante für die Beschleunigung (oder Verlangsamung) der Wassersäule:

$$T_w = \frac{v \cdot L}{g \cdot H}$$
$$= \frac{Q \cdot L}{g \cdot H \cdot A}$$

wobei:

$v$  = Fließgeschwindigkeit im Druckrohr [m/s]

$Q$  = Durchfluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$L$  = gesamte Länge der Druckleitung [m]

$g$  = Schwerkraftkonstante [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

$H$  = Druckhöhe [m]

$A$  = Querschnitt der Druckleitung =  $D^2 \pi/4$

Beispiel:

Anlaufzeitkonstante für eine Anlage mit folgenden

Daten:

$Q = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}$

$L = 128 \text{ m}$

$H = 21 \text{ m}$

$D = 0.5 \text{ m}$  (Druckrohrdurchmesser)

Querschnitt der Druckleitung

$A = 0.5^2 \cdot \pi / 4$

$= 0.196 \text{ m}^2$

Anlaufzeitkonstante der Druckleitung

$T_w = 0.4 \cdot 128 / (9.81 \cdot 21 \cdot 0.196)$

$= 1.27 \text{ s}$

Die Zeitkonstante der Beschleunigung der Wassersäule ist die Grundlage für die Bestimmung der Öffnungszeit der Turbine. Wird diese unterschritten, so ist mit Problemen zu rechnen.

Im aufgeführten Beispiel wurde davon ausgegangen, es handle sich bei der bewegten Wassermasse nur um den Inhalt der Druckleitung. Tatsächlich ist dies in Wirklichkeit nie der Fall. Für eine genauere Berechnung müssen alle mit der Druckleitung direkt verbundenen Wasservolumina miteinbezogen werden. Es ergeben sich damit durchwegs längere Zeitkonstanten.

### 4.3 Der Druckstoss

Der Druckstoss, ergibt sich beim Versuch, die sich im Druckrohr bewegende Wassersäule durch verschliessen der Druckleitung am unteren Ende zum Stillstand zu bringen. Wird das Phänomen des Druckstosses bei Anlagen mit langer Druckleitung nicht beachtet, so kann daraus leicht eine totale Zerstörung der Anlage resultieren. Bei zu raschem schliessen des Turbinenleitapparates kommt es zu einer Druckerhöhung im Druckrohr und damit zum bersten, Ueberschwemmung, etc. Bei der Durchflussregelung muss deshalb die zulässige kürzeste Schliesszeit bestimmt werden.



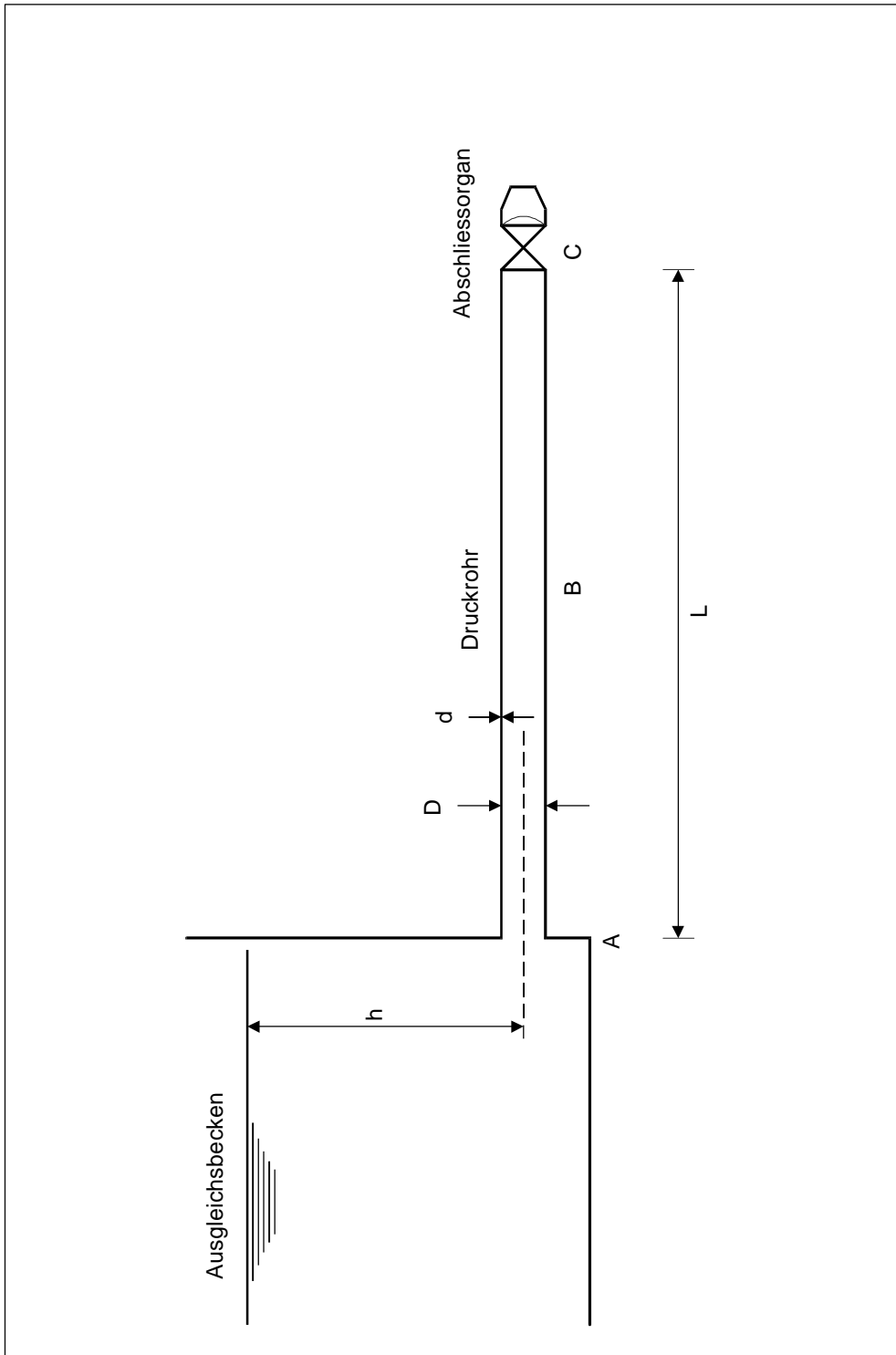


Abbildung 4.3: Schematische Anordnung eines Druckrohrs

#### 4.3.1 Vereinfachte Beschreibung

##### 4.3.1.1 plötzliches Schliessen & Öffnen

In der Ausgangslage fliesst das Wasser entlang dem Druckrohr mit der Geschwindigkeit  $v_0$ .

In diesem ersten Beispiel seien alle Druckverluste vernachlässigt, der Druck  $p_0$  also konstant entlang des ganzen Druckrohres. Erst in der Düse wird der Überdruck abgebaut und dafür der Wasserstrahl auf die Freistrahlggeschwindigkeit beschleunigt.

$$p_0 = \rho \cdot g \cdot H_0 \quad \text{N/m}^2$$

Durchgehend soll im folgenden der Druck durch eine Höhe der Wassersäule ausgedrückt werden.

$$h = \frac{p}{\rho \cdot g} \quad \text{m}$$

mit

$h$  Druckhöhe [m]

$p$  Druck 1[bar]= $10^5$ [N/m<sup>2</sup>]

$\rho$  spez. Masse von Wasser 1000[kg/m<sup>3</sup>]

$g$  Erdbeschleunigung 9.81[m/s<sup>2</sup>]

zur Zeit  $t=t_1$  wird nun die Turbine plötzlich geschlossen. Das Wasser vor dem Schliessorgans (Abb. 4.3 und 4.4) steht nun still, obwohl am Einlauf (Sektion AB) weiterhin Wasser mit der Geschwindigkeit  $v_0$  nachströmt. Zwei Bedingungen müssen weiterhin gelten: einerseits muss die Masse, andererseits die Energie erhalten bleiben, d.h. durch die Elastizität des Rohres und des Wassers wird das Rohr zuunterst (Sektion BC) gedehnt und das Wasser komprimiert, dies schafft Volumen für das einströmende Wasser, und die kinetische Energie des zum Stillstand gebrachten Wassers wird in der Materialdehnung bzw Kompression wie in einer Feder gespeichert. Dies führt zu einer lokalen Druckerhöhung.

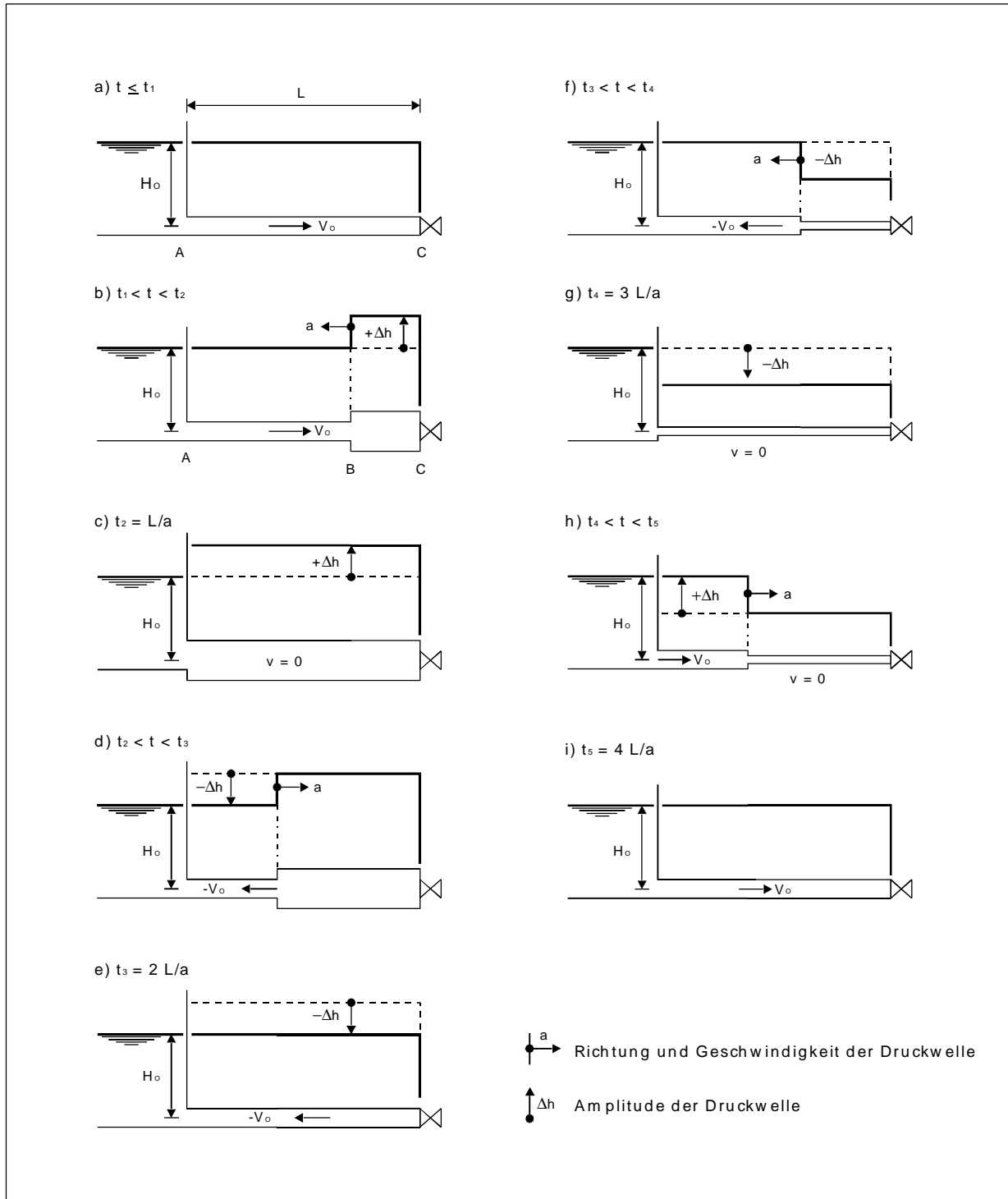


Abbildung 4.4: Druckstoss bei plötzlichem Schliessen

Die Front der Rohrausdehnung bewegt sich entlang des Rohres in Form einer Welle mit einer charakteristischen Schallgeschwindigkeit, die sich im wesentlichen aus der Kompressibilität von Wasser, der Elastizität des Rohrmaterials sowie den Abmessungen des Rohres zusammensetzt.

$$a_i = \sqrt{\frac{1}{\rho \left( \frac{1}{K} + \frac{D_i}{d \cdot E} \right)}} \quad \text{m/s}$$

- a Schallgeschwindigkeit [m/s]  
 K Kompressibilität von Wasser  $2.2 \cdot 10^{-10} [\text{N/m}^2]$   
 $D_i$  Rohrdurchmesser (innen) [m]  
 d Wandstärke des Rohres [m]  
 E Elastizitätsmodul des Rohrmaterials  $[\text{N/m}^2]$

material	E (ca.) [GN/m <sup>2</sup> ]
Stahl	210
PVC	2.7
PE	0.2
Beton	20
Grauguss	80
duktiler Guss	170

Die Druckerhöhung unter diesen Annahmen wurde von Jukowski so ausgedrückt:

$$\Delta h = \frac{a \cdot v_0}{g} \quad \text{m}$$

mit

- $\Delta h$  Druckerhöhung durch plötzliches Schliessen [m]  
 a Schallgeschwindigkeit [m/s]  
 $v_0$  Strömungsgeschwindigkeit [m/s]  
 g Erdbeschleunigung  $9.81 [\text{m/s}^2]$

zum Zeitpunkt  $t_2=L/a$  erreicht der Druckstoss das Reservoir. Das Wasser steht nun im gesamten Rohr still und es herrscht auf der ganzen Länge der gleiche Druck  $H_0+\Delta h$ . Damit herrscht jedoch ein Druckunterschied zwischen dem Einlauf und dem Rohr, der durch das Ausströmen des Wassers in Einlaufrichtung ausgeglichen wird. Die Energie dazu liefert das sich zusammenziehende Rohr und das sich entspannende Wasser. Eine Wellenfront mit  $-\Delta h$  bewegt sich nun in die gegengesetzte Richtung und bringt den Druck in den Anfangszustand zurück (die Fliessrichtung jedoch hat sich umgedreht). Die Druckwelle wurde demzufolge am offenen Rohrende unter Umkehrung des Vorzeichens vollständig reflektiert.

zum Zeitpunkt  $t_3=2L/a$  erreicht der Druckstoss das Schliessorgan. Das Wasser fliesst nun im gesamten Rohr mit  $v_0$  Richtung Einlauf und der Ausgangsdruck hat sich wieder auf der gesamten Länge eingestellt. Durch die Trägheit wird das Wasser in dieser Richtung weiterfliessen, wodurch sich das Rohr zusammenziehen und das Wasser sich dehnen muss. Dabei sinkt der Druck und das Wasser steht still. Wiederum läuft eine Druckwelle Richtung Einlauf. Sie wurde demzufolge am geschlossenen Rohrende unter gleichem Vorzeichen vollständig reflektiert.

zum Zeitpunkt  $t_4=3L/a$  erreicht der Druckstoss erneut das Reservoir. Das Wasser steht wiederum im gesamten Rohr still und es herrscht auf der ganzen Länge der gleiche Druck  $H_0-\Delta h$ . Wieder herrscht ein Druckunterschied zwischen dem Einlauf und dem Rohr, der diesmal durch das Einströmen von Wasser ausgeglichen wird.

zum Zeitpunkt  $t_5=4L/a$  erreicht der Druckstoss erneut das Schliessorgan. Das Wasser fliesst nun im gesamten Rohr mit  $v_0$  Richtung Auslauf und der Ausgangsdruck hat sich wieder auf der gesamten Länge eingestellt. Damit ist der Ausgangszustand erreicht und durch die Trägheit wiederholt sich nun dieser Vorgang zyklisch. Durch Reibungsverluste nimmt jedoch allmählich die Amplitude ab und der statische Zustand wird  $v=0$  und  $H=H_0$  sein.

Charakteristisch ist die Reflektionszeit  $T_r$

$$T_r = \frac{L}{a} \quad \text{s}$$

mit

$T_r$  Reflektionszeit [s]

$L$  Länge der Leitung [m]

$a$  Schallgeschwindigkeit [m/s]

Das gleiche gilt für das plötzliche Öffnen. Hier wird der Endzustand  $v=v_0$  und  $H=H_0$  erreicht wobei die Anfangsschwingung  $v=0$  bis  $v=2v_0$  und  $H=H_0-\Delta h$  bis  $H=H_0+\Delta h$  beträgt.

#### 4.3.1.2 plötzliches, teilweises Schliessen

die Anfangsgeschwindigkeit beträgt  $v_0$  die Endgeschwindigkeit  $v_1$ . Mit der Formel von Jukowski ergibt sich für diesen Fall:

$$\Delta h = \frac{a \cdot (v_0 - v_1)}{g} = \frac{a \cdot \Delta v}{g} \quad \text{m}$$

#### 4.3.1.3 schrittweises Schliessen

Das allmähliche Schliessen kann über eine Serie kleiner Schliessschritte angenähert werden. Dabei sei  $T_s$  die für ein vollständiges Schliessen benötigte Zeit.

Je nachdem ob nun die Schliesszeit grösser oder kleiner als die Reflektionszeit ist, unterscheidet sich der maximal erreichbare Druckstoss.

$$T_s < T_r$$

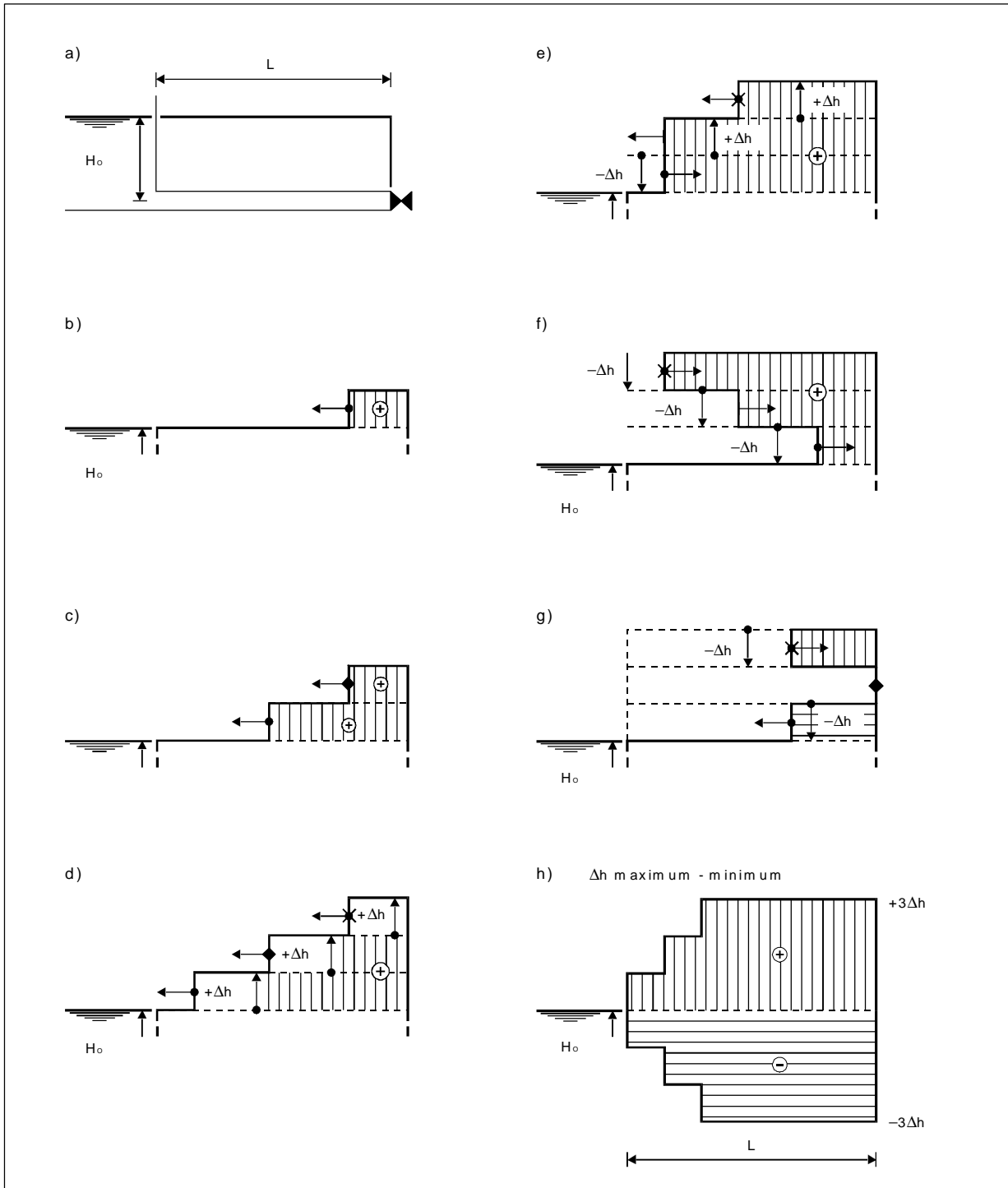


Abbildung 4.5: Druckstoss bei etappenweisem Schliessen,  $T_s < 2L / a$  (3 Schliessschritte)

der Höchstdruck kann sich aufbauen, bevor die negativ reflektierte Welle zurückkehrt.

$$T_s > T_r$$

Die negativ reflektierte rückkehrende Welle kompensiert den weiteren Druckanstieg durch das sich immer noch schliessende Ventil.

Stellt man sich nun ein kontinuierliches Schliessen als eine grosse Anzahl kleiner Schliessschritte vor und ist  $T_s > T_r$ , kann man den maximalen Druckstoss am Schliessorgan mildern.

Aus der Geometrie der Abb. 4.6 ergibt sich somit

$$\frac{\Delta h_{\max}}{2 \cdot L} = \frac{\Delta h_{\text{tot}}}{T_s \cdot a}$$

oder

$$\Delta h_{\max} = \Delta h_{\text{tot}} \cdot \frac{2 \cdot L}{T_s \cdot a} \quad \text{m}$$

und mit

$$\Delta h_{\text{tot}} = \frac{a \cdot v_0}{g} \quad \text{m}$$

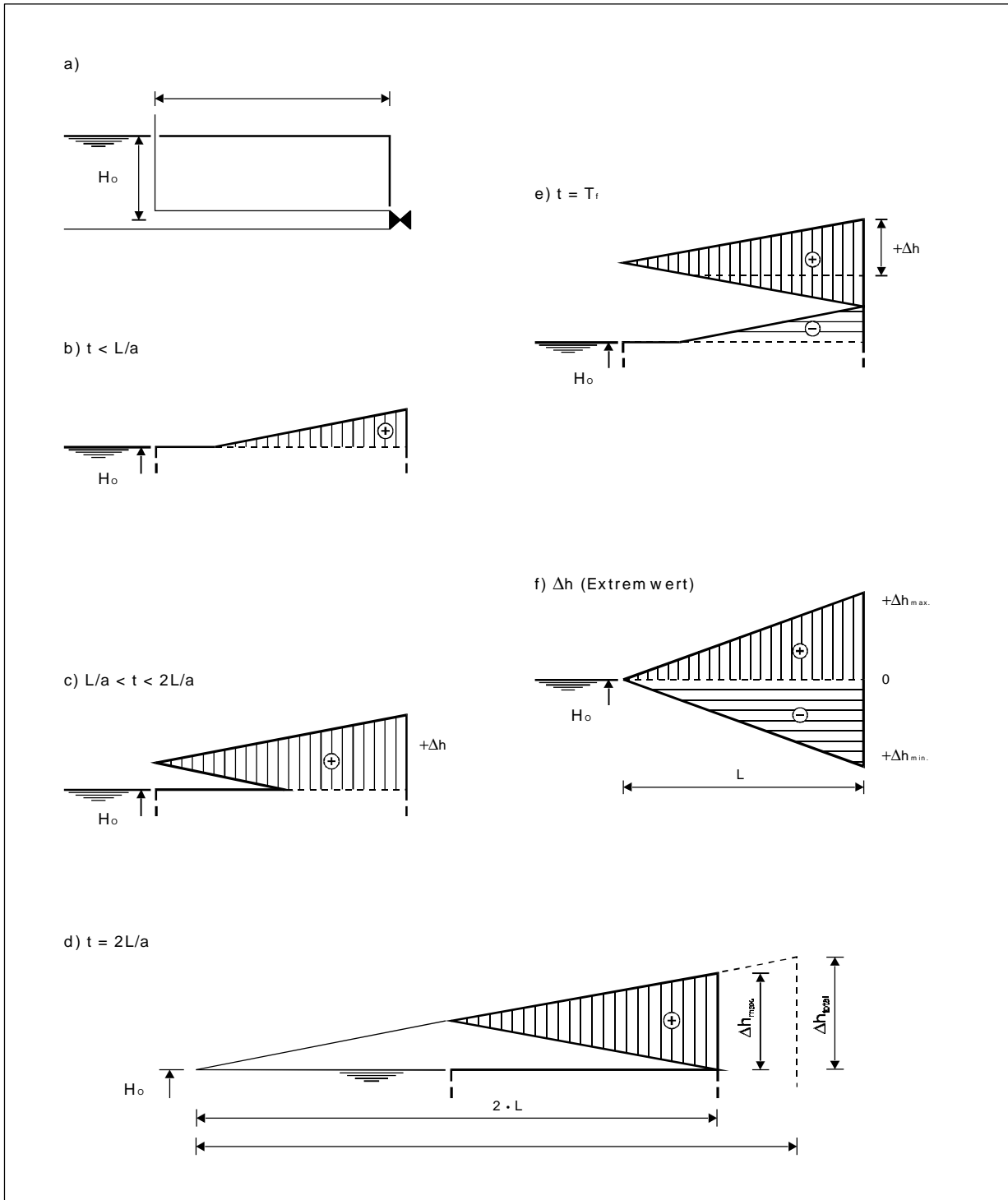
wird

$$\Delta h_{\max} = \frac{2 \cdot v_0 \cdot L}{T_s \cdot g} \quad \text{m}$$

Diese vereinfachte Formel ergibt eine gute obere Grenze des möglichen Druckstosses.

für  $T_s > T_r$  ist somit der Druckstoss unabhängig von der Schallgeschwindigkeit und damit vom Rohrmaterial und der Kompressibilität des Wassers!




Abbildung 4.6: Druckstoss bei gleichmässigem Schliessen,  $T_s > T_r$

#### 4.3.2 Einführung von vernachlässigten Größen.

Die vereinfachten Beschreibungen des vorangegangenen Kapitels werden im folgenden sinnvoll ergänzt.

##### 4.3.2.1 Die Druckrohrgeometrie

###### Die Druckrohrlänge

Die Druckleitung ist nie horizontal und hat selten ein konstantes Gefälle. Die zur Berechnung verwendete Länge  $L$  entspricht immer der effektiven Länge des Rohres.

###### Durchmesser und Wandstärke

Oft ändert sich aus Gründen der Kostenminimierung der Rohrdurchmesser und die Wandstärke. Die Gesamtreflektionszeit ist dann die Summe der Reflektionszeiten aller Teilstücke.

$$T_r = 2 \cdot \sum_i \frac{L_i}{a_i} \quad \text{s}$$

###### Äquivalente Werte

Zur Vereinfachung der Berechnung kann ein gleichförmiges Druckrohr angenommen werden, welches folgende Eigenschaften besitzt:

$$a_{\text{äq}} = \frac{2 \cdot L}{T_r} \quad \text{m/s}$$

$$A_{\text{äq}} = \frac{L}{\sum_i \frac{L_i}{A_i}} \quad \text{m}^2$$

mit  $A_i$  = Querschnittsfläche

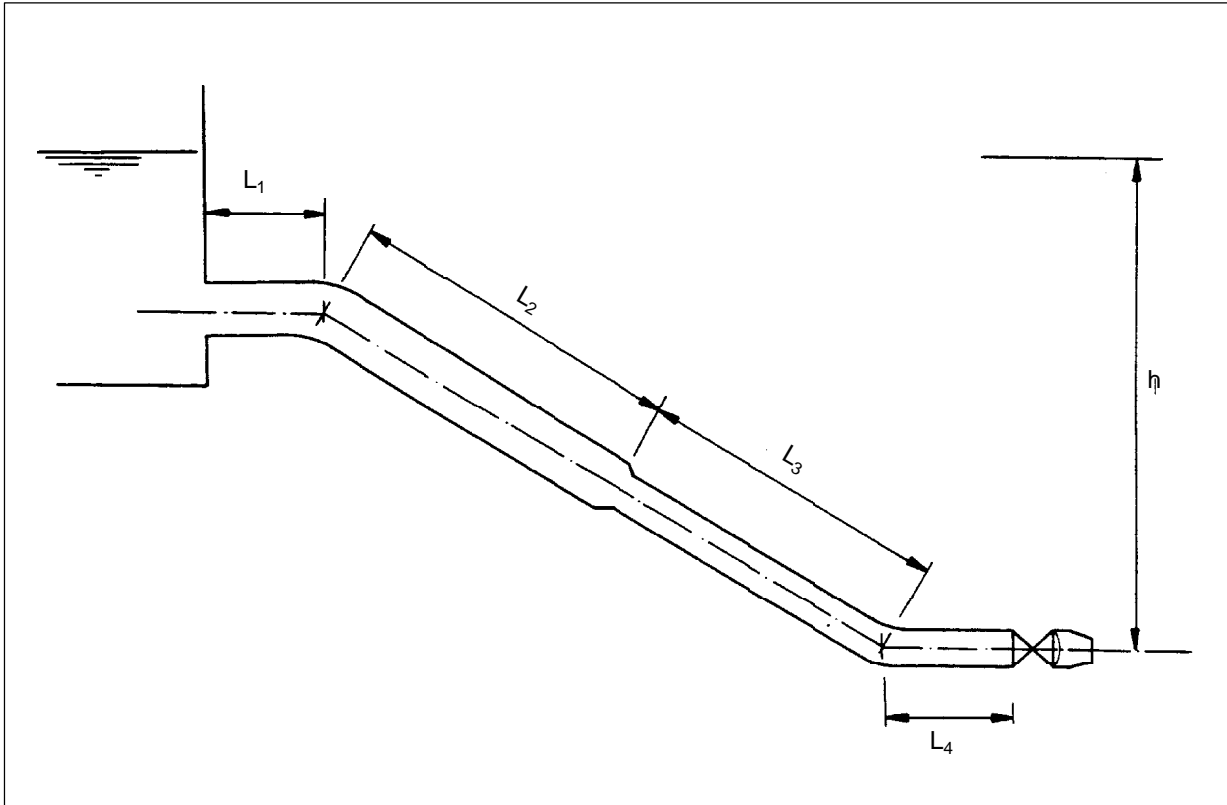


Abbildung 4.7: Berechnung von  $T_s$

mit

$$L = \sum_i L_i \quad \text{m}$$

$$a_i = \sqrt{\frac{1}{\rho \left( \frac{1}{K} + \frac{D_i}{d_i \cdot E_i} \right)}} \quad \text{m/s}$$

$$T_s = 2 \cdot \sum_i \frac{L_i}{a_i} \quad \text{s}$$

#### 4.3.2.2 Druckverluste

Die Druckverluste haben zwei wesentliche Auswirkungen auf den Druckstoss

##### **Dämpfung**

wie oben gezeigt ist der Druckstoss ein periodisches Phänomen, welches eine Zykluszeit von  $4L/a$  aufweist. Durch Reibungsverluste wird die Amplitude der Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen laufend verringert. Da den Planer jedoch nur die Maximalwerte des Druckstosses interessieren, ist das Abklingen der Schwingung zweitrangig und hier nicht weiter behandelt.

##### **Geschwindigkeitsänderung als Funktion des Druckes**

Bei nur teilweisem Schliessen schießt natürlich weiterhin Wasser durch die Restöffnung. Die Geschwindigkeit des Wasserstrahls ist nur abhängig von der Druckhöhe und gegeben durch:

$$v_s = \sqrt{2gh} \quad \text{m/s}$$

Beim Druckstoss ändert sich der Druck und damit auch die Strahlgeschwindigkeit und der Ausfluss. Damit wird der Druckanstieg zusätzlich gedämpft (Abb. 4.8). Diese ziemlich komplizierten Zusammenhänge wurden von Allievi beschrieben und können mit der folgenden Methode behandelt werden.

Durch die Vernachlässigung der Druckverluste im Kapitel 4.3.1 und 4.3.2 wird der Druckstoss überschätzt. In Wirklichkeit ist der Druckstoss um den Druckverlust vermindert.

Durch diese Vernachlässigung befindet man sich bei einer ersten Abschätzung deshalb immer auf der sicheren Seite.

beim Öffnen entspricht die Druckhöhe anfänglich der Bruttofallhöhe (kein Durchfluss) und nimmt dann allmählich auf die Nettofallhöhe ab. Rechnet man mit der Nettofallhöhe, unterschätzt man den anfänglichen Unterdruck.

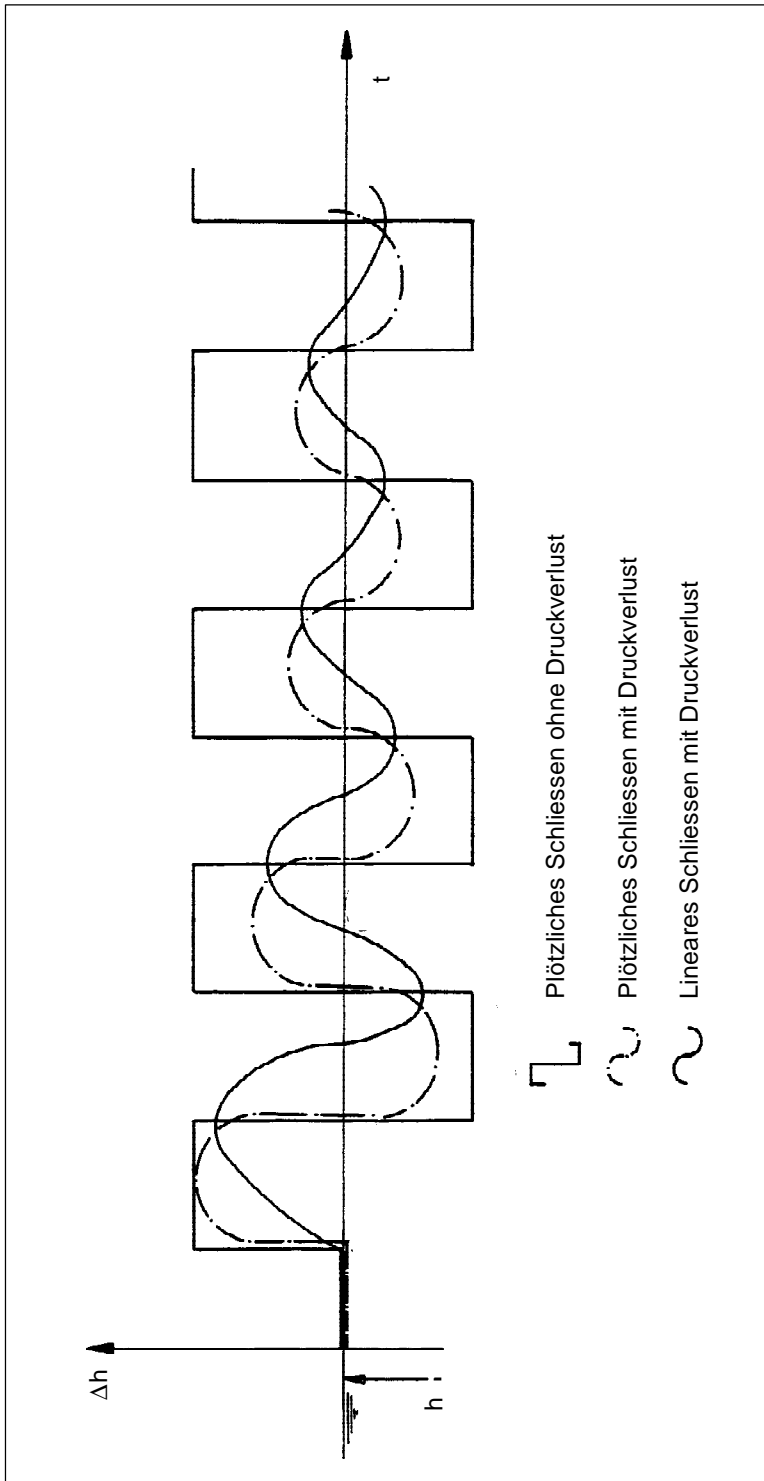


Abbildung 4.8: Auswirkungen des Druckverlustes

#### 4.3.2.3 Die Methode von Allievi

Der erreichte Maximaldruck beim Schliessvorgang wird beschrieben durch  $Z^2$

$$H_{\max} = Z^2 \cdot H_n \quad \text{m}$$

mit

$Z^2$  Druckerhöhungsfaktor

$H_n$  Nominaldruck m

die Parameter des Nomogrammes sind die relative Schliesszeit

$$\theta = t_s = \frac{T_s}{T_r}$$

mit

$T_c$  linearisierte Schliesszeit s

$T_r$  Reflektionszeit s

die Allievi Konstante

$$g = h_w = \frac{a \cdot Q_n}{2gH_nA}$$

mit

$a$  Schallgeschwindigkeit [m/s]

$Q_n$  Durchfluss bei Schliessbeginn  $\text{m}^3/\text{s}$

$H_n$  Druckhöhe bei Schliessbeginn m

$A$  Querschnittsfläche des Rohres  $\text{m}^2$

$g$  Erdbeschleunigung  $9.81[\text{m}/\text{s}^2]$

ändert sich  $a$  und  $A$  entlang der Druckleitung kann mit den äquivalenten Werten gerechnet werden (siehe Kap. 4.6.1)

beim Öffnen gelten die gleichen Formeln nur wird der Minimaldruck gefunden und das entsprechende Schliessnomogram verwendet.

Beispiel:

Berechnung des Druckstosses mit ALLIEVI

$$Q = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L = 128 \text{ m}$$

$$H = 21 \text{ m}$$

$$D = 0.5 \text{ m (Druckrohrdurchmesser)}$$

$$d = 0.006 \text{ m (Druckrohrwandstärke)}$$

Material    Stahl

Schallgeschwindigkeit  $a = 1060 \text{ m/s}$

Der zulässige Maximaldruck wird auf den doppelten Nenndruck gesetzt, womit  $Z^2 = 2.0$  wird

Die Beanspruchung der Druckleitung unterschreitet damit immer noch die Fließgrenze von Stahl um einen Faktor 2.

mit der Allievi Konstante  $h_w$

$$\begin{aligned} h_w &= \frac{a \cdot Q_n}{2gH_nA} \\ &= 5.65 \end{aligned}$$

erhält man aus dem Nomogramm 4.9 die normierte Schliesszeit  $t_s$  und daraus die Schliesszeit  $T_s$ .

$$t_s = 8$$

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{t_s \cdot 2L}{a} \\ &= 1.9 \end{aligned}$$

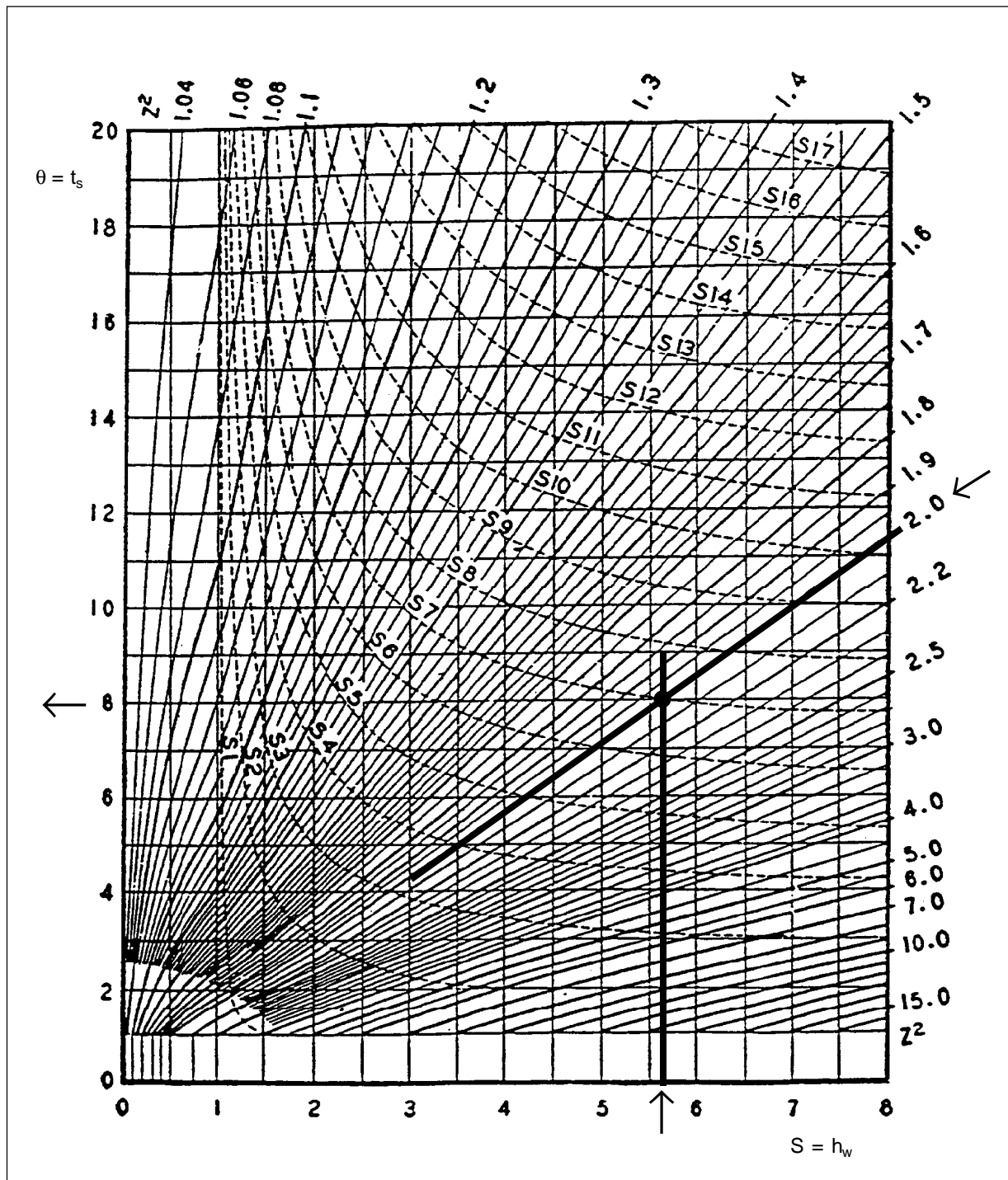


Abbildung 4.9: ALLIEVI-Diagramm für das Schliessen



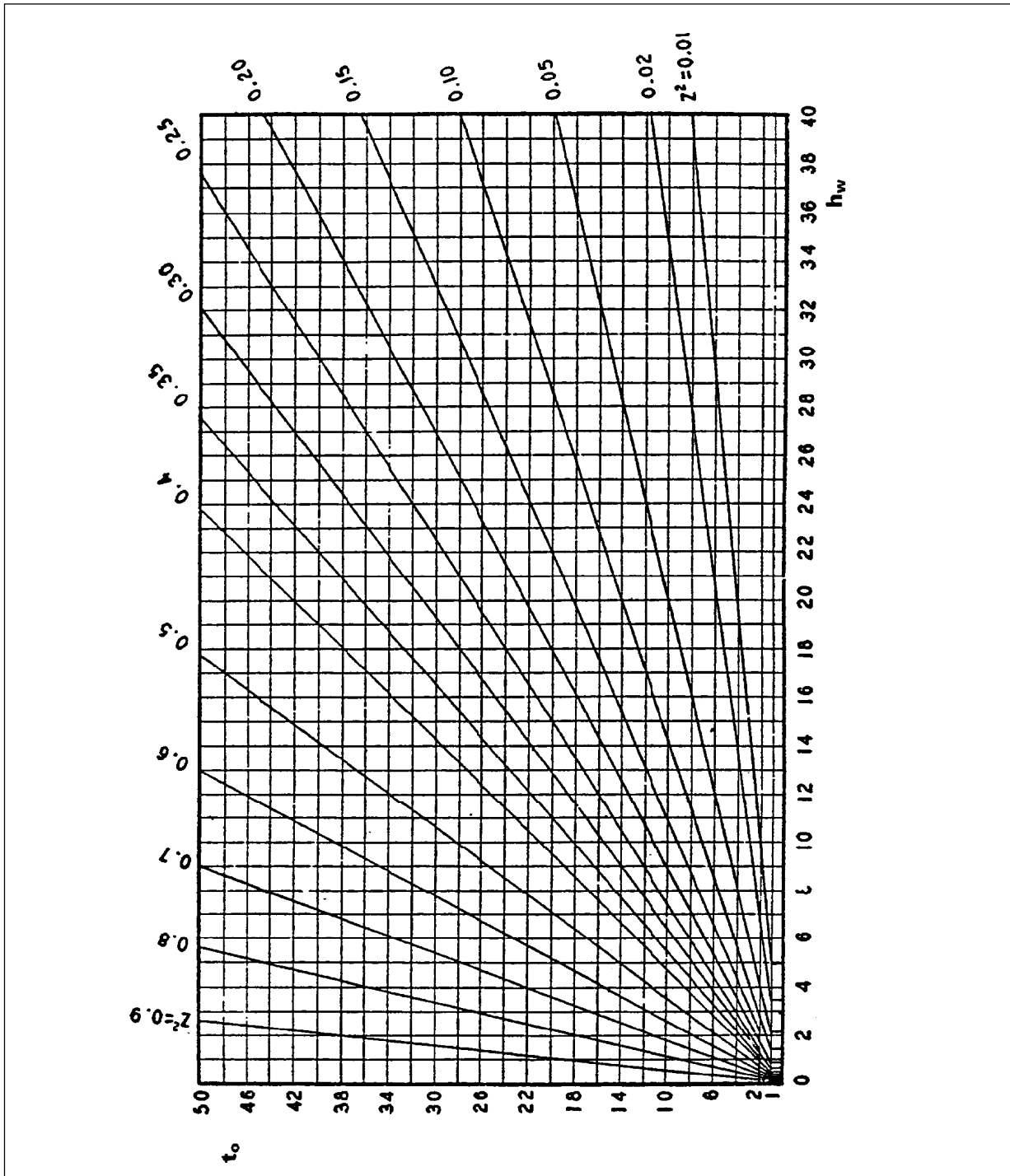


Abbildung 4.10: ALLIEVI-Diagramm für das Öffnen

### 4.3.3 Spezielle Druckstosssituationen

#### 4.3.3.1 Generelle Überlegungen

Bei der Planung einer Anlage hat der Ingenieur einige Möglichkeiten den Druckstoss zu mildern:

Reduktion der Durchflussgeschwindigkeit durch einen grösseren Rohrdurchmesser. Dies muss zusammen mit den verringerten Druckverlusten und den grösseren Investitionen optimiert werden.

Durch die Wahl eines "weicheeren" Rohrmaterials (Kunststoff), wird die Schallgeschwindigkeit und damit der Druckstoss reduziert. Für lange Schliesszeiten spielt dies jedoch keine Rolle.

Freistrahlturbinen (Pelton, Durchström) haben auch beim Durchbrennen das gleiche Schluckvermögen. Nicht so Reaktionsturbinen wie Francis, Kaplan oder invertierte Pumpen. Diese reduzieren oder erhöhen den Durchfluss beträchtlich beim Ansteigen der Drehzahl, was zu drastischen Druckstössen führen kann. Oft steht man vor dem Dilemma, dass man z.B. beim Lastabwurf einerseits ein Durchbrennen verhindern muss um den Generator vor Überdrehzahl zu schützen, andererseits kann man den Durchfluss nicht augenblicklich stoppen, weil sonst der Druckstoss das Rohr zerstört. Im Falle der Pelton turbine hat man die elegante Möglichkeit den Wasserstrahl über einen Strahlablenker von den Bechern abzulenken. Bei allen anderen Turbinen muss eine andere Massnahme getroffen werden.

#### 4.3.3.2 Beispiel invertierte Pumpen

Bei Pumpen mit einer spezifischen Drehzahl  $n_q < 100$  reduziert sich der Durchfluss beim Durchgehen; für  $n_q > 100$  erhöht er sich. Für kleine spezifischen Drehzahlen ( $20 < n_q < 40$ ) kann sich der Durchfluss bis auf die Hälfte verringern! weshalb der mögliche Druckstoss sorgfältig betrachtet werden muss (der Pumpenhersteller muss also nicht nur die Durchbrenndrehzahl sondern auch das Schluckvermögen angeben). Die Pumpe verhält sich beim Durchgehen wie ein Schliessorgan und die Schliesszeit  $T_{St}$  ist über die Beschleunigungscharakteristik der Gruppe gegeben. Die erlaubte Schliesszeit  $T_{St}$  beträgt ungefähr  $T_{St} \sim 1.5 \dots 2.0 T_a$ .

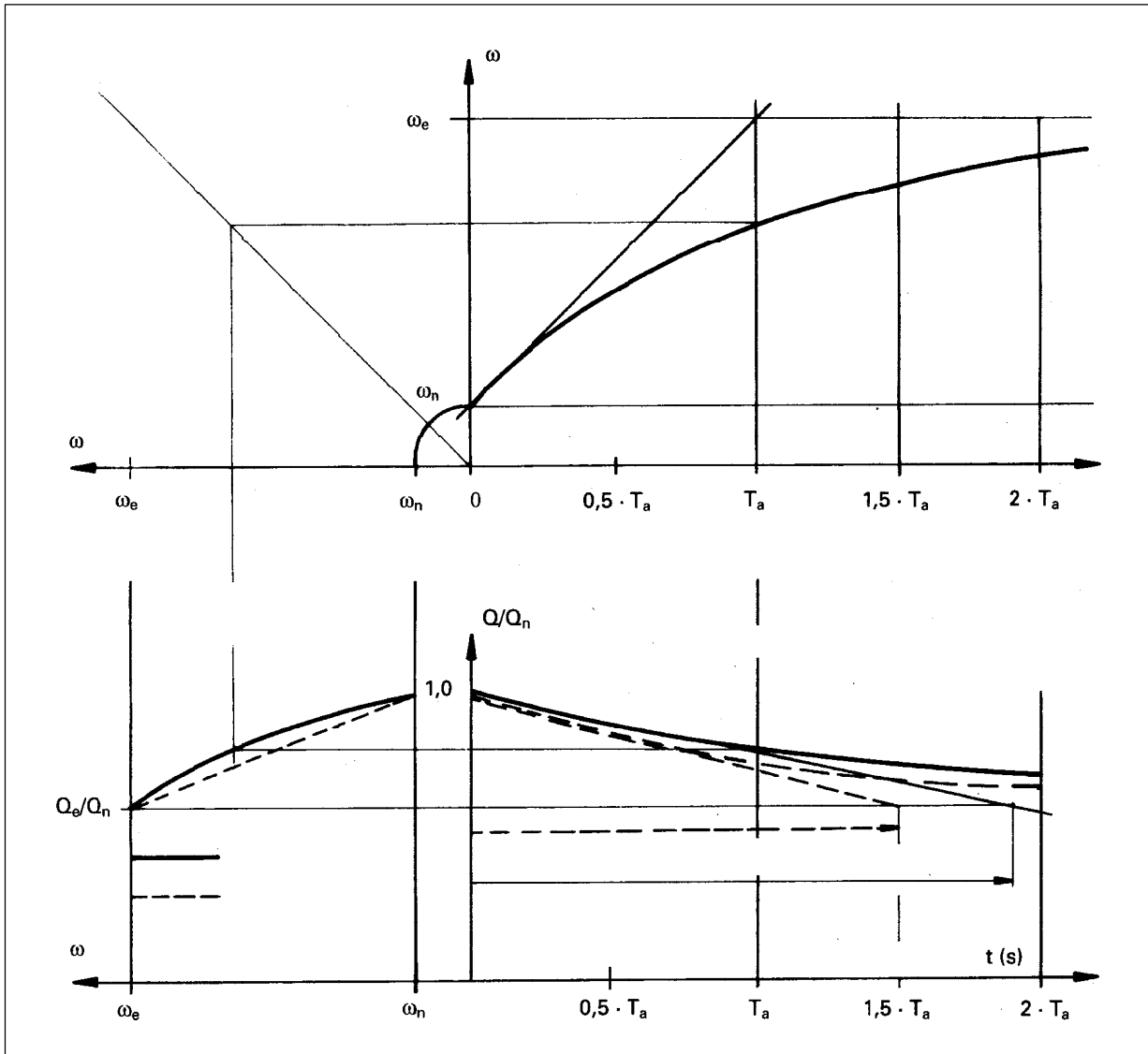


Abbildung 4.11: Veränderung des Schluckvermögens bei Drehzahlanstieg bei invertierten Pumpen

Durch einstellen von  $T_a$  (z.B. durch die Grösse des Schwungrades) lässt sich somit die Schliesszeit  $T_{St}$  der entsprechenden Durchflussänderung anpassen.

wichtige Bemerkung:

Die Werte werden vom Hersteller meistens für Nennbetrieb angegeben. Ändert sich jedoch die Druckhöhe durch Verluste oder Druckstösse, müssen die Werte angepasst werden:

$$n_d = n_{dn} \cdot \sqrt{\frac{H}{H_n}}$$

$$\omega_d = \omega_{dn} \cdot \sqrt{\frac{H}{H_n}}$$

$$Q_d = Q_{dn} \cdot \sqrt{\frac{H}{H_n}}$$

mit

$H_n$  Nenndruckhöhe m

$H$  Momentandruckhöhe m

#### 4.3.3.3 Resonanzerscheinungen

Der Druckstoss ist eine periodische Erscheinung mit einer Schwingungsdauer von  $4L/a$ . Schwingungen kann man durch äussere Beeinflussung anregen. Ein Druckrohr kann man durch eine solche Anregung zum bersten bringen. Eine heute übliche Konstellation ist eine gepulste Niveauregelung, die den Durchfluss in kleinen Schrittschritten dem Niveau im Reservoir und damit dem Zufluss nachfährt. Stimmt die Pulsweite genau mit einem vielfachen der Schwingungsdauer des Druckrohres überein, führt dies zu einer Anfachung des Druckstosses.

Es ist daher wichtig, die Pulsweite mit der Resonanzfrequenz des Druckrohres abzustimmen!

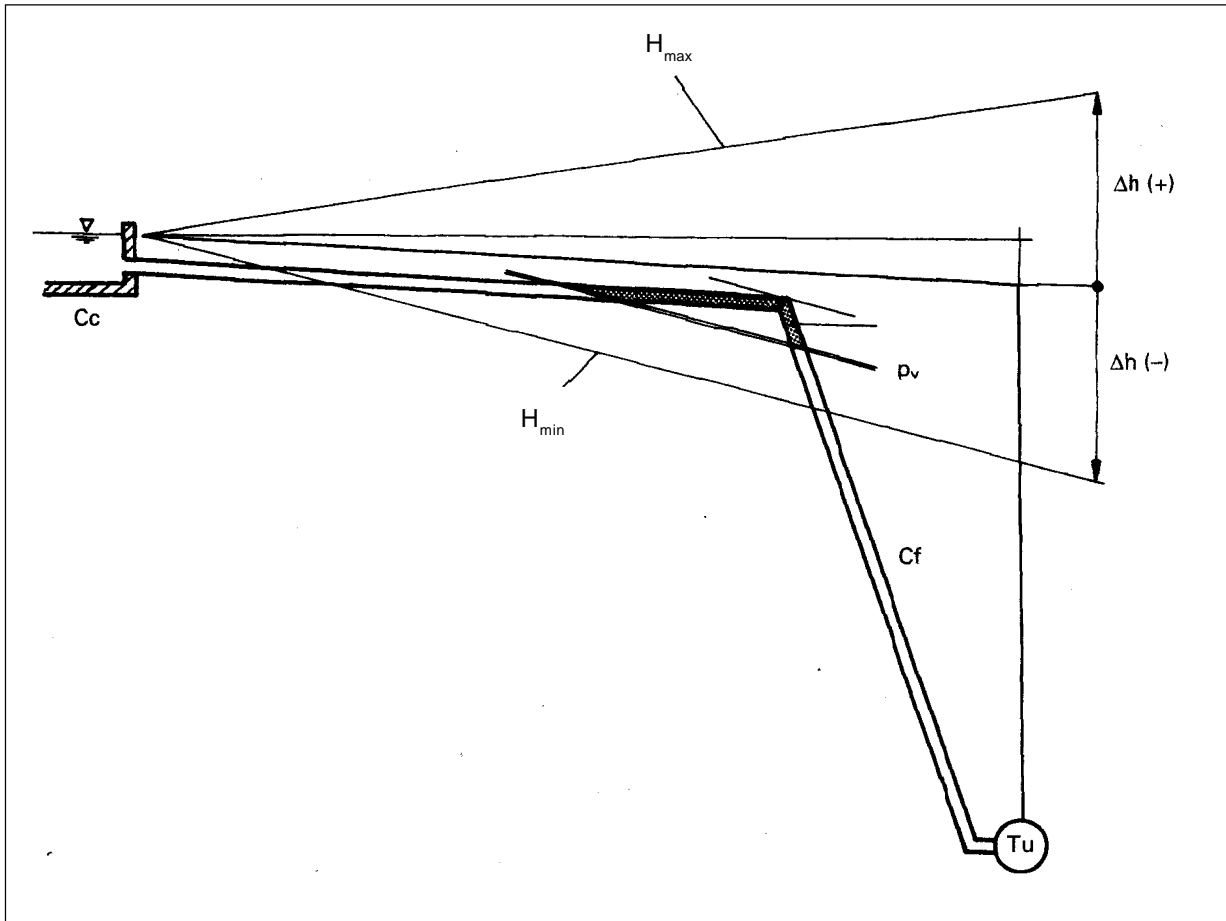


Abbildung 4.12: Negativer Druckstoss bei ungünstiger Druckrohrgeometrie

#### 4.3.3.4 Negativer Druckstoss

Bei einer ungünstigen Geometrie des Druckrohres ist es möglich, dass der Druck des Wassers unter seinen Dampfdruck absinkt. Dabei trennt sich die Wassersäule momentan und der Zwischenraum füllt sich mit Wasserdampf! Kehrt nun die Druckwelle mit umgekehrtem Vorzeichen zurück, implodiert die Dampfblase und der Zusammenprall der beiden Wasserflächen löst einen sehr starken Druckstoss aus, der zur Zerstörung des Druckrohres führen kann. Eine Überprüfung, dass der Dampfdruck nirgends unterschritten wird, ist daher immer sorgfältig durchzuführen.

#### **4.3.3.5 Zusammenfassung von Lösungen zur Druckstossverminderung**

##### **Druckrohr**

1. Vergrössern des Rohrdurchmessers zur Verringerung der Fliessgeschwindigkeit.
2. Materialwahl um die Schallgeschwindigkeit zu verringern.
3. Verkürzen der Leitung soweit wie möglich und damit der Reflexionszeit, was eine kürzere Schliesszeit bei gleichem Druckstoss erlaubt. Nötigenfalls kann ein Wasserschloss eingebaut werden, welches den Druckstoss unterbricht.

##### **Turbine/Generator**

4. Sicherstellen einer genügend grossen Massenträgheit oder elektrischen Bremse, um genügend Schliesszeit zu erhalten.

##### **Schliessorgane**

5. Korrekte Berechnung der Schliesszeiten unter Berücksichtigung der Nichtlinearitäten und der Schluckfähigkeit beim Durchbrennen.

Vermeiden von Schliessimpulsintervallen, die einem vielfachen der Reflexionszeiten entsprechen.

##### **andere Lösungen**

6. hydropneumatischer Druckstossdämpfer beim Schliessorgan.
7. Druckgesteuertes bypass Ventil. (sensible Lösung die Unterhalt erfordert)
8. Eine mechanische Bremse, um ein Durchbrennen zu verhindern (heikle Lösung die Unterhalt erfordert).

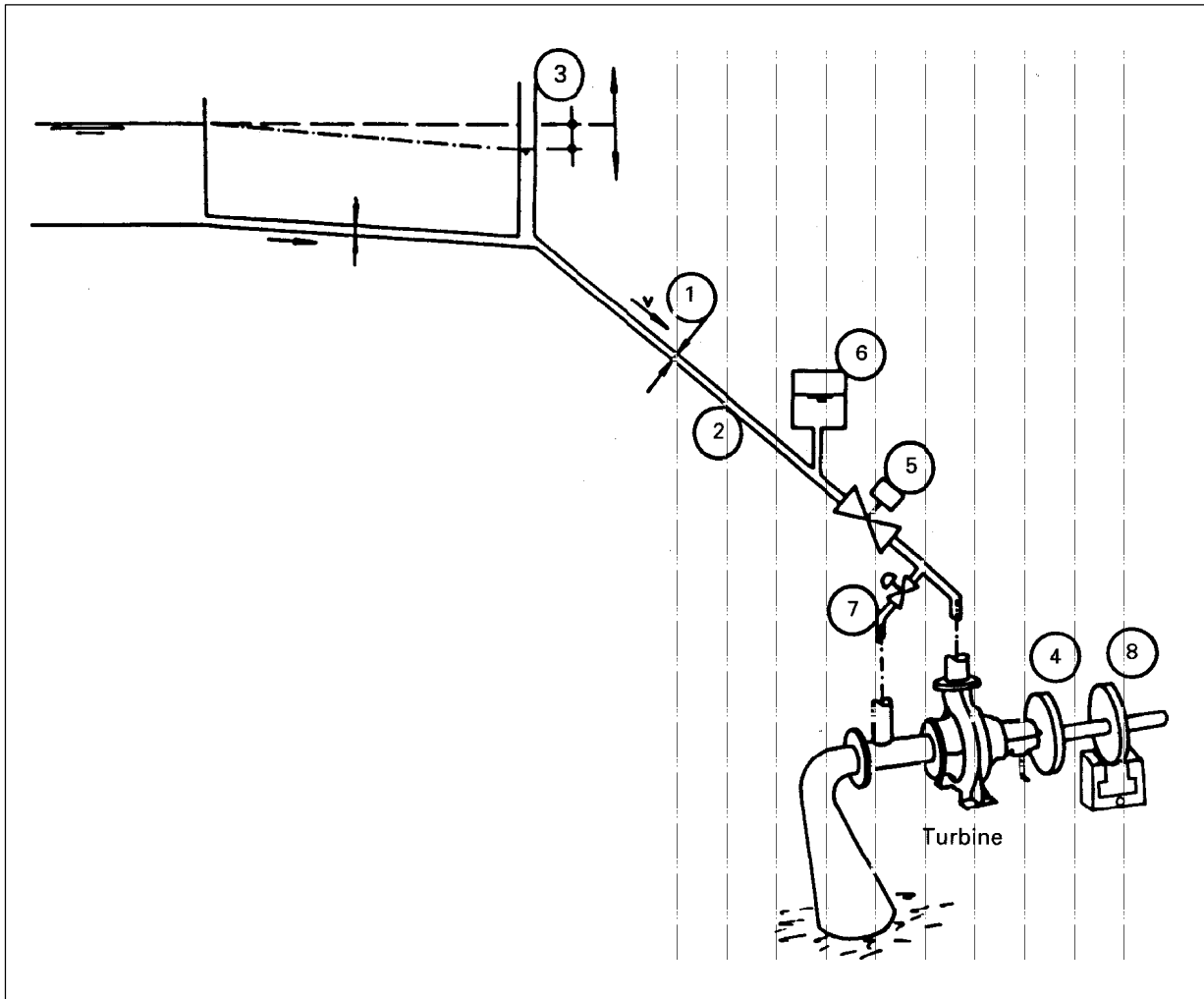


Abbildung 4.13: Möglichkeiten zur Beeinflussung des Druckstosses

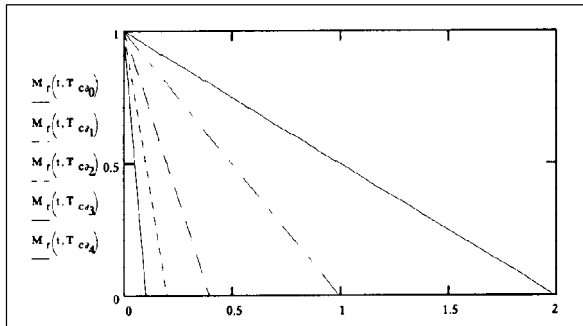


Abbildung 4.14: idealisierter Drehmomentverlauf beim Schliessvorgang

wobei:  $T_{cs}(0..4) = 10, 5, 2.5, 1, 0.5$   
und  $t' = t/T_a$

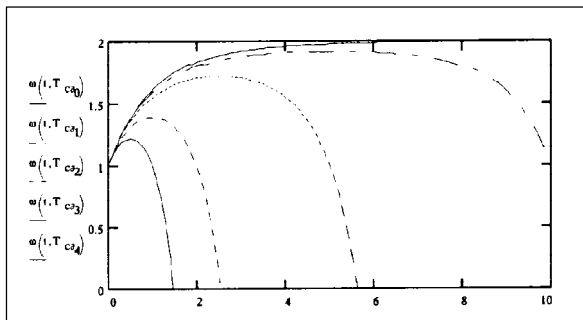


Abbildung 4.15: Drehzahlverlauf bei Lastabwurf und gleichzeitigem Schliessvorgang

## 4.4 Maximale Überdrehzahl

Die vorangegangenen Überlegungen zeigen, dass bei einem Lastabwurf die Gruppe mit einer bestimmten Zeitkonstanten auf Durchbrenndrehzahl geht. Dies kann natürlich verhindert werden, wenn möglichst rasch die Antriebsleistung weggenommen wird. Nur darf dieses Schliessen nicht schneller erfolgen als der zulässige Druckstoss dies erlaubt. Es ist also nicht zu verhindern, dass eine Überdrehzahl erfolgt! Der einzige Weg sie zu mildern ist die Anlaufzeitkonstante der Gruppe im Verhältnis zur erlaubten Schliesszeit zu erhöhen.

Um einen Eindruck dieses Verhaltens zu geben sei die folgende Vereinfachung dargestellt:

- Drehzahlanstieg bei 100%gem Lastabwurf für eine idealisierte Pelton- oder Durchström- Turbine
- idealisierte Durchflusssteuerung, sodass das Antriebsmoment linear in der Schliesszeit  $T_s$  gegen Null geht.  $T_{sa}$  ist dabei das Verhältnis der Schliess- zur Anlaufzeitkonstanten  $T_c / T_a$  (Abb. 4.14).

Der Drehzahlanstieg lässt sich darstellen als

$$\omega(t', T_{sa}) = \omega_d - (\omega_d - 1) \cdot e^{-\left(t'^2 - t'^2 \cdot \frac{1}{2T_{sa}}\right)}$$

und die maximale Drehzahl:

$$\omega_{\max} = \omega_d - (\omega_d - 1) \cdot e^{-\left(\frac{T_{sa}}{2}\right)}$$

Natürlich nimmt die Drehzahl bei Erreichen des Maximums nicht wieder ab (keine Reibung angenommen). Die Formel ist also nur anschaulich bis zur Maximaldrehzahl, dort bleibt die Drehzahl dann konstant (Abb. 4.15).



Die Maximaldrehzahlen ergeben sich für unsere Beispiele zu:

$$T_{sa} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 1 \\ 2.5 \\ 5 \\ 10 \end{bmatrix} \quad W_{max} = \begin{bmatrix} 1.221 \\ 1.393 \\ 1.713 \\ 1.918 \\ 1.993 \end{bmatrix}$$

Beispiel:

mit der minimalen Schliesszeit, die vorher mit der Allievimethode ermittelt wurde ergibt sich:

$$\begin{aligned} T_s &= 2s \\ T_a &= 3.5s \end{aligned}$$

$$\text{ist } T_{sa} = 0.6$$

und damit die maximale Drehzahlerhöhung  $< 1.39$  Nenndrehzahl.



---

## 5. KWKW Regelungen

---

<b>5.1</b>	<b>Grundlagen der Regelungstechnik</b>	81
5.1.1	Regelung	81
5.1.2	Regelstrecken	82
5.1.3	Regelstreckenglieder	83
5.1.4	Reglertypen	86
5.1.5	Häufige Aufgabenstellungen	90
5.1.6	Regleranpassung an die Strecke	90
5.1.7	Mehrgrößen- und Kaskadenregelung	92
5.1.7.1	Mehrgrößenregelung	92
5.1.7.2	Kaskadenregelung	92
5.1.8	Digitale Turbinen Leittechnik	93
5.1.8.1	Fundamentale Zusammenhänge: Regelungstechnik und Anlagensicherheit	93
5.1.8.2	Digital Turbine Control - DTC	94
5.1.8.3	DTC-Funktionen	95

---

<b>5.2</b>	<b>Übersicht der KWKW Regelungsarten</b>	97
5.2.1	Regelgrößen im Inselbetrieb	100
5.2.1.1	Drehzahlregelung	100
5.2.1.2	Spannungsregelung	103
5.2.2	Regelgrößen im Parallelbetrieb	103
5.2.2.1	Wasserstandsregelung und Leistungsfaktorregelung	104
5.2.2.2	Statik	104
5.2.2.3	Synchronisation	106

---



## 5. KWKW Regelungen

### 5.1 Grundlagen der Regelungstechnik

#### 5.1.1 Regelung

Der Begriff Regelung beschreibt einen Vorgang, der überall (nicht nur in der Technik) und immer abläuft. Die wesentliche Aufgabe eines Reglers ist, bestimmte Größen eines Systems wie Drehzahl, Leistung, Spannung oder auch CO<sub>2</sub> Gehalt oder die Körpertemperatur auf vorgeschriebene Werte zu bringen und entgegen allen Störeinflüssen zu halten.

Diese Aufgabe mag auf den ersten Blick recht einfach erscheinen, ist jedoch oft mit tückischen Problemen gespickt, deren man sich erst bewusst werden muss. Die Lösung einer Regelungsaufgabe, in diesem Falle das Regeln eines Wasserkraftwerkes, hat weniger mit dem beherrschen der Regelungstechnik zu tun, als mit dem Verstehen der Dynamik des Systems, welches der Regler beeinflussen soll.

Der Regler und das zu stabilisierende System, die Regelstrecke, bilden zusammen den Regelkreis. Der Regler reagiert auf ein Eingangssignal, die Regelgröße  $x$  (z.B. "erhöhe Drehzahl") und antwortet mit einer Stellgröße  $y$  (z.B. "öffne die Düse"), welche das System beeinflusst. Mit dem Begriff der Regelung ist der Begriff der Steuerung verknüpft. Regeln und Steuern werden vielfach nicht genau auseinandergehalten. Das Kennzeichen der Steuerung ist, einfach gesagt, das sie nicht weiss was sie tut, oder der offene oder rückwirkungsfreie Regelkreis. Dabei bedeutet rückwirkungsfrei, daß das Eingangssignal  $x$  zwar die Stellgröße  $y$  beeinflusst, selbst aber unabhängig von der Systemreaktion ist.

In der DIN 19226 ist der Begriff "Regelung" wie folgt definiert:

"Das Regeln (die Regelung) ist ein Vorgang, bei dem eine Größe, die zu regelnde Größe (Regelgröße), fortlaufend erfaßt, mit einer anderen Größe (Führungsgröße), verglichen und abhängig vom Ergebnis des Vergleichs im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Der sich dabei ergebende Wirkungsablauf findet in einem geschlossenen Kreis (Regelkreis) statt".

Glossar:

Regelkreis		das System gebildet durch den Regler und den Regelkreis
Regler		der Teil des Regelkreises, der Aufgrund von abweichenden Zuständen des Systems korrigierend eingreift
Regelstrecke		der Teil des Regelkreises, der vom Regler beobachtet und beeinflusst wird
Regelgröße	$x$	diese Grösse beobachtet der Regler in der Regelstrecke
Führungsgröße	$w$	diesen Wert für $x$ soll das Regelsystem beibehalten
Stellgröße	$y$	mit dieser Grösse beeinflusst der Regler die Regelstrecke
Störgröße	$z$	externe Größen die die Regelstrecke beeinflussen

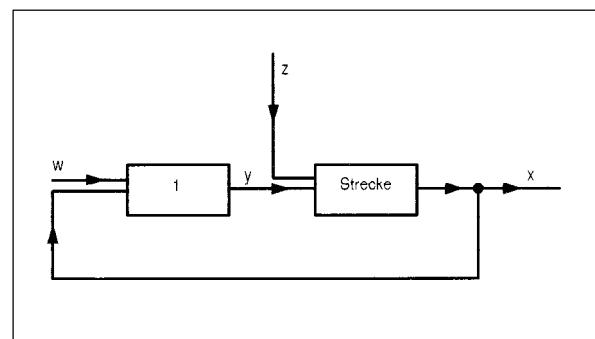


Abbildung 5.1: Signalflussplan einer Regelung

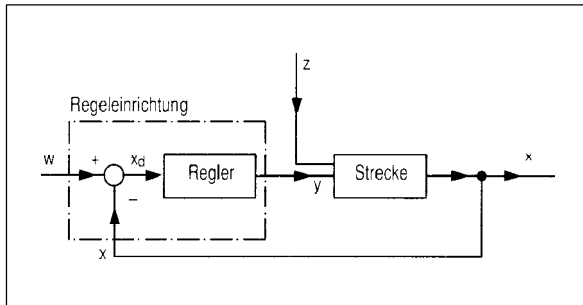


Abbildung 5.2: Prinzip einer Regelung

In dem geschlossenen Kreis, also dem Regelkreis, ist deutlich der Wirkungsablauf zu erkennen. Der geschlossene Kreis zeigt den Unterschied zu einer Steuerung. Bei einer Regelung soll der Wert einer Größe, die Regelgröße (Ausgangsgröße)  $x$ , unabhängig von Störgrößen  $z$ , deren Verlauf häufig nicht bekannt und nicht meßbar ist, einen gewünschten Verlauf annehmen. Dabei soll die Regelgröße  $x$  zu allen Zeitpunkten möglichst gleich der Führungsgröße  $w$  sein. Zu diesem Zweck wird die Regeldifferenz = Führungsgröße - Regelgröße gebildet. Die Regeldifferenz bewirkt über den Regler eine Stellgröße  $y$ , die auf die nachfolgende Regelstrecke einwirkt, wobei die Regelgröße der Führungsgröße nachgeführt wird. Abb. 5.2 zeigt den Signalflussplan, der um die Vergleichsstelle erweitert wurde.

$w$  = Führungsgröße  
 $x$  = Regelgröße  
 $y$  = Stellgröße  
 $z$  = Störgröße

Es ist sofort die Beziehung

$$x_d = w - x$$

für die Regeldifferenz  $x_d$  zu erkennen.

Die Hauptaufgabe einer Regelung besteht also darin, die Regeldifferenz  $x_d$  zu "Null" zu machen.

### 5.1.2 Regelstrecken

Eine grundlegende Voraussetzung, um einen Regler an eine Regelstrecke anzupassen oder einzustellen, ist, daß genaue Angaben über die Regelstrecke vorliegen. D.h., ohne genaue Angaben über die zu regelnde Strecke, ist es nicht möglich, einen Regler für diese Strecke auszuwählen oder einzustellen.

Deshalb werden an dieser Stelle die häufigsten Regelstreckenglieder näher beschrieben und erläutert. Aber zuvor noch eine allgemeine Beschreibung der Regelstrecke im Bezug auf ihr Zeitverhalten. Bei allen realen Systemen verstreicht eine Zeit, bis sich die Änderung der Eingangsgröße (z.B. Stellgröße  $y$  eines Reglers) auf die Ausgangsgröße (z.B. Regelgröße  $x$  einer Regelstrecke) bemerkbar macht oder bis die Ausgangsgröße ihren Beharrungszustand erreicht hat. Es handelt sich hierbei um eine Regelstrecke mit Ausgleich. Dies ist der Fall für ein Wasserkraftwerk, wenn  $y$  der Düsenöffnung und  $x$  der Drehzahl entspricht.

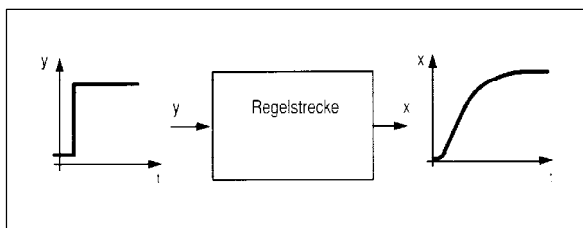


Abbildung 5.3: Zeitliches Verhalten einer Regelstrecke mit Ausgleich bei sprungförmigem Eingangssignal

Es gibt aber auch Regelstrecken, bei denen kein Beharrungszustand existiert, sodaß sich bei einer konstanten Eingangsgröße die Ausgangsgröße mit einer konstanten Geschwindigkeit oder Beschleunigung ändert. Hier denkt man z.B. an das Einschalten (y) eines Stellmotors und seine resultierende Position (x). Ist dies bei einer Regelstrecke der Fall, so handelt es sich um eine Regelstrecke ohne Ausgleich. Das Verhalten einer Regelstrecke mit oder ohne Ausgleich ist bei der später beschriebenen Regleranpassung und Reglereinstellung von großer Bedeutung.

### 5.1.3 Regelstreckenglieder

Um eine Übersicht zu bekommen, werden die häufig angetroffenen Regelstreckenglieder, oder auch Übertragungsglieder genannt, in Form einer Tabelle zusammengefaßt (Abb. 5.5).

In der ersten Spalte ist jeweils die Bezeichnung und in der zweiten die Differentialgleichung des Übertragungsgliedes angegeben. Die dritte Spalte enthält einen Block, wie er schon aus dem Abschnitt "Signalflußplan und Blockschaltbild" her bekannt ist, der das Übertragungsverhalten kennzeichnen soll. Zur besseren Verdeutlichung ist nur die zugehörige Übertragungsfunktion der Übertragungsglieder gezeichnet.

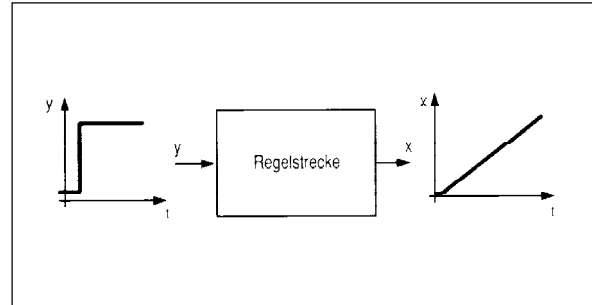


Abbildung 5.4: Zeitliches Verhalten einer Regelstrecke ohne Ausgleich bei sprungförmigem Eingangssignal

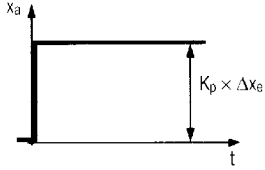
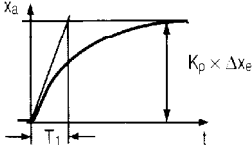
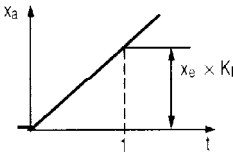
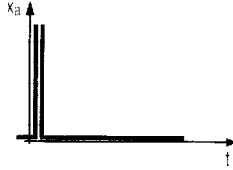
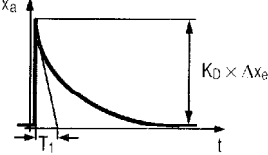
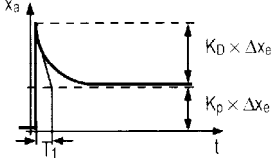
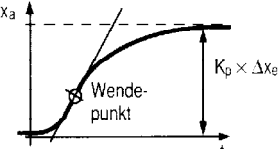
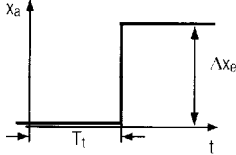
Bezeichnung	Differentialgleichung	Übertragungsblock
P-Glied	$x_a = K_p \cdot x_e$	
PT1-Glied	$T_1 \cdot \dot{x}_a + x_a = K_p \cdot x_e$	
I-Glied	$\frac{1}{K_I} \cdot \dot{x}_a = x_e$	
D-Glied	$x_a = K_D \cdot \dot{x}_e$	
DT1-Glied	$T_1 \cdot \dot{x}_a + x_a = K_D \cdot \dot{x}_e$	
PDT1-Glied	$T_1 \cdot \dot{x}_a + x_a = K_p (T_v \cdot \dot{x}_e + x_e)$	
PT2-Glied	$\frac{1}{\omega_0^2} \ddot{x}_a + \frac{2D}{\omega_0} \dot{x}_a + x_a = K_p \cdot x_e$	
Tt-Glied		

Abbildung 5.5: Uebersicht über die Regelstreckenglieder



---

Bei einem P-Glied (Proportional-Glied) folgt die Ausgangsgröße  $x_a$  der Eingangsgröße  $x_e$  unverzögert.

---

Bei einer Regelstrecke mit PT1 -Glied (Proportional-Glied mit Verzögerung erster Ordnung) ändert sich die Ausgangsgröße  $x_a$  sofort mit einer bestimmten Anfangsgeschwindigkeit.

---

Bei einem I-Glied (Integrales-Glied) ist die Ausgangsgröße  $x_a$  proportional dem zeitlichen Integral der Eingangsgröße  $x_e$ .

---

Analog zum I-Glied hat das D-Glied (Differential Glied) differentiell Verhalten. Dies bedeutet, daß die Ausgangsgröße  $x_a$  gleich dem zeitlichen Differential der Eingangsgröße  $x_e$  ist.

---

Bei einem DT1 -Glied (Differential-Glied mit Verzögerung erster Ordnung) wird dessen Ausgangsgröße  $x_a$  nicht nur aus der zeitlichen Ableitung der Eingangsgröße  $x_e$  sondern zusätzlich aus der ersten Ableitung der Ausgangsgröße gebildet.

---

Das PDT1 -Glied (Proportional-Differential-Glied mit Verzögerung erster Ordnung) besteht im wesentlichen aus einem P-Glied und einem DT1 -Glied.

---

Eine Regelstrecke mit zwei Verzögerungen (zwei PT1 -Glieder in Reihe) ist durch Angabe des Übertragungsbeiwertes  $K_p$  und durch zwei Zeitkonstanten  $T_1$ ,  $T_2$  gekennzeichnet. Im Unterschied zur Regelstrecke mit einer Verzögerung verläuft hier die Sprungantwort am Startpunkt mit einer waagerechten Tangente und besitzt einen Wendepunkt. Der Verlauf der Sprungantwort wird mathematisch durch die Differentialgleichung 2.Ordnung beschrieben.

---

Bei einem Tt-Glied (Totzeit-Glied), tritt, wie aus der folgenden Abbildung hervorgeht, nach einer sprunghaften Änderung der Eingangsgröße  $x_e$  eine ebenfalls sprunghafte Änderung der Ausgangsgröße  $x_a$  ein, jedoch um die Totzeit  $T_t$  verzögert. Die Totzeit ist also die Zeit, die vergeht, bis sich nach einer Änderung der Eingangsgröße eine Änderung der Ausgangsgröße bemerkbar macht.

---

---

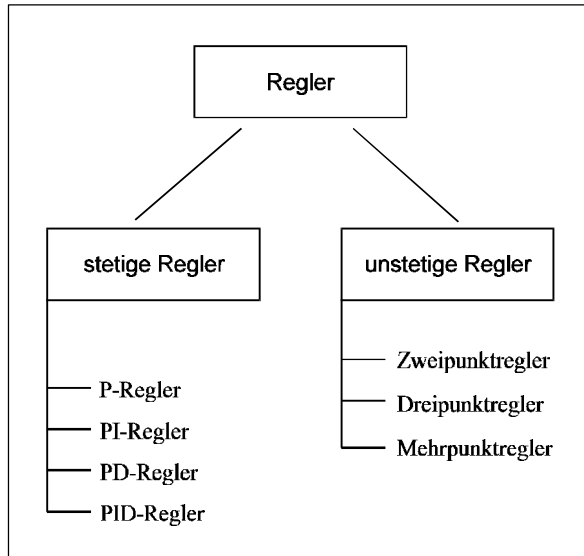


Abbildung 5.6: Zuordnung der Reglertypen zu den zwei Hauptgruppen

#### 5.1.4 Reglertypen

In den folgenden Abschnitten befassen wir uns mit dem wichtigsten Teil des Regelkreises, dem Regler. Hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den einzelnen Regelstreckengliedern. Es gibt in der Regelungstechnik eine Vielzahl von Reglern, die sich in zwei Hauptgruppen einteilen lassen: stetige und unstetige Regler.

Bei unstetigen Reglern, z. B. dem Zweipunktregler, weist die Stellgröße  $y$  nur zwei bestimmte Werte auf. Ein unstetiger Regler wird vorwiegend dort eingesetzt, wo sehr große Zeitkonstanten der Regelstrecke auftreten (z.B. Niveauregelung). In anspruchsvollen Regelkreisen werden stetige Regler, z.B. der PID-Regler, eingesetzt. Bei diesen Reglern kann die Stellgröße  $y$  jeden beliebigen Wert innerhalb des Stellbereiches annehmen, wobei jede Änderung der Regeldifferenz  $x_d$  (im Gegensatz zu den unstetigen Reglern) eine Änderung der Stellgröße  $y$  zur Folge hat. Die stetigen Regeleinrichtungen werden auf das zeitliche Verhalten ihrer Stellgröße  $y$  in Abhängigkeit von der Regeldifferenz  $x_d$  am Regeleingang in P-, PD-, PI- und PID-Regler eingeteilt. Für die Beurteilung dieser Regeleinrichtungen ist deren Sprungantwort maßgebend. Darunter ist die Änderung der Stellgröße  $y$  in Abhängigkeit von der Zeit bei sprungartiger Änderung der Regeldifferenz  $x_d$  zu verstehen. Die Sprungantworten werden ermittelt, indem man dem Eingang des Reglers einen Sprung zuschaltet und dabei den Verlauf der Stellgröße  $y$  am Reglerausgang mit einem xy-Schreiber aufzeichnet.

Die häufigsten Reglertypen werden nachfolgend tabellarisch zusammengefasst (Abb. 5.7).

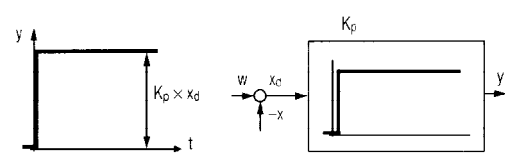
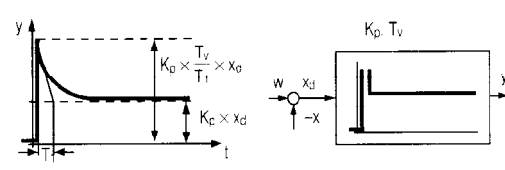
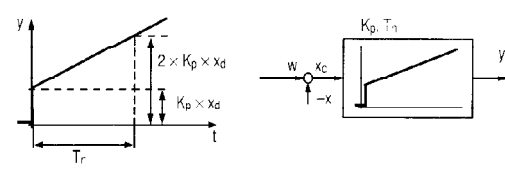
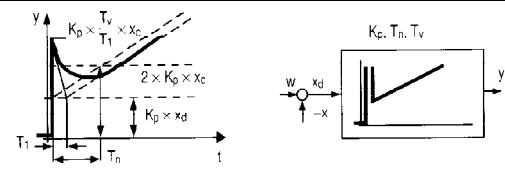
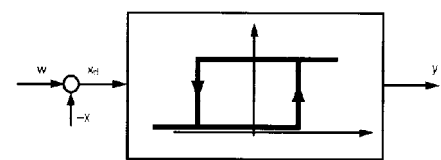
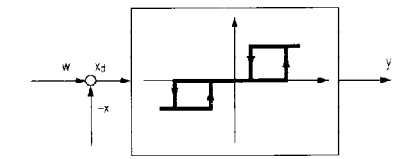
Bezeichnung	Differentialgleichung	Übertragungsblock
P-Regler	$y = K_p \cdot x_d = K_p \cdot (w - x)$	
PD-Regler	$T_1 \times \frac{dy}{dt} + y = K_p \times \left( T_v \times \frac{dx_d}{dt} + x_d \right)$ $x_d = w - x$	
PI-Regler	$T_n \cdot \frac{dy}{dt} = K_p \cdot \left( T_n \cdot \frac{dx_d}{dt} + x_d \right)$ $x_d = w - x$	
PID-Regler	$T_1 \cdot T_n \cdot \frac{d^2y}{dt^2} + T_n \cdot \frac{dy}{dt} = K_p \cdot \left( T_n \cdot T_v \cdot \frac{d^2x_d}{dt^2} + T_n \cdot \frac{dx_d}{dt} + x_d \right)$ $x_d = w - x$	
PID-P Regler		
Zweipunktregler		
Dreipunktregler		

Abbildung 5.7: Uebersicht über die häufigsten Reglertypen

---

Der P-Regler besteht aus einem proportionalen Übertragungsglied. Er gibt also im stationären Zustand ein Ausgangssignal ab, das dem Eingangssignal proportional ist. D. h. die Regeldifferenz  $x$  wird ohne dynamische Verformung einfach um einen Faktor  $K_p$  (Übertragungsbeiwert) verstärkt oder verkleinert, je nachdem ob  $K_p > 1$  oder  $K_p < 1$  ist.

**Hinweis:** Eine Regelung mit einem P-Regler weist immer eine bleibende Regeldifferenz auf (die Regeldifferenz ist ungleich 0), die mit wachsenden  $K_p$  kleiner wird.

---

Bei einem PD-Regler wird nicht nur die Regeldifferenz  $x$ , sondern auch die Änderung der Regeldifferenz  $\dot{x}$  zur Bildung der Stellgröße  $y$  verwendet. Diese Regeleinrichtung wirkt also schon korrigierend, wenn die Regelgröße  $x$  die Tendenz hat, von der Führungsgröße  $w$  abzuweichen.  $K_p$  ist der Übertragungsbeiwert des P-Anteils des PD-Reglers.  $T_v$  wird Vorhaltezeitkonstante genannt. Sie ist gleich derjenigen Zeit, die ein idealer PD-Regler ( $T_1 = 0$ ) benötigt um bei der Anstiegsantwort einen bestimmten Wert der Stellgröße  $y$  früher zu erreichen als der P-Regler. Wie bei dem P-Regler entsteht auch bei dem PD-Regler eine bleibende Regeldifferenz  $x_d$ . Durch die Vorhaltebildung von  $T_v$  entsteht eine stabilisierende Wirkung, wobei  $K_p$  im Gegensatz zu einem P-Regler vergrößert und die bleibende Regeldifferenz  $x_d$  somit verkleinert werden kann.

---

Der PI-Regler besteht aus einem P- und einen I-Regler, wobei der integrierende Teil (I-Anteil) die bleibende Regeldifferenz  $x_d$  verhindert. Bei diesem Regler ist  $K_p$  der Übertragungsbeiwert und  $T_n$  ist die Nachstellzeitkonstante. Die Nachstellzeit  $T_n$  ist also die Zeit, welche benötigt wird, um aufgrund des I-Anteils eine gleich große Stellgrößenänderung zu erzielen, wie sie infolge des P-Anteils sofort entsteht.

**Hinweis:** Bei Entstehen einer Regeldifferenz  $x_d$  wird aufgrund des P-Anteils direkt eine korrigierende Stellgröße  $y$  erzeugt. Der I-Anteil sorgt dann aber sofort dafür, daß die Regeldifferenz  $x$  im Beharrungszustand verschwindet.

---

Die Stellgröße des PID-Reglers wird hierbei durch die Überlagerung der drei Einflüsse (Proportional-, Integral- und Differential-Anteil) gebildet. Bei dem PID-Regler ist  $K_p$  der Übertragungsbeiwert,  $T_n$  die Nachstellzeit und  $T_v$  die Vorhaltezeit.

**Hinweis:** Der PID-Regler beinhaltet alle Vorteile der bisher genannten Reglertypen.

---

Häufig benötigt man eine bleibende Regelabweichung, die durch das Stellsignal  $y$  gegeben ist ("Statik" siehe Kap. 5.2.2.2). Dies wird bei einem PID Regler durch eine proportionale Rückführung von  $y$  erreicht. Die Konstante  $b_p$  wird bleibender P-Grad genannt.

---

Der Zweipunktregler entspricht vom Prinzip her einem Schalter, der nur zwei Zustände "EIN" und "AUS", annehmen kann. Das Zweipunktglied schaltet aber nicht exakt bei einer Regeldifferenz  $x_d = 0$ , sondern aufgrund einer unvermeidlichen aber auch erwünschten Hysterese erst, wenn  $x_d$  die Werte  $+X_u$  über- bzw.  $-X_u$  unterschritten hat.

---

Der Dreipunktregler ist wie der Zweipunktregler ein Schalter, der aber drei verschiedene Stellungen annehmen kann. Seine Anwendung geschieht sehr häufig in Verbindung mit Stellmotoren, die dann über ein Getriebe einen Schieber betätigen. Dieser Schieber kann nach rechts und links gefahren, oder an einer beliebigen Stellung angehalten werden.

---

---

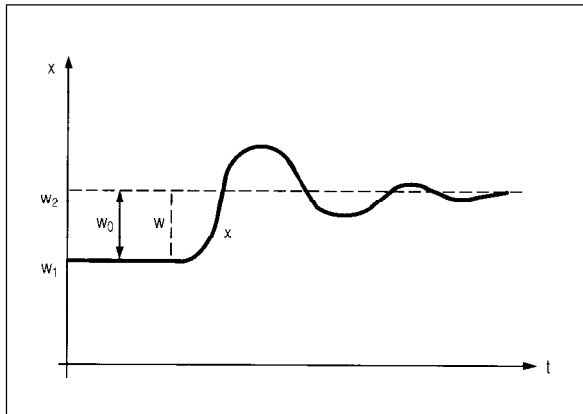


Abbildung 5.8: Verhalten der Regelgröße  $x$  bei einer sprunghaften Änderung der Führungsgröße  $w_1$  auf  $w_2$ . (Bei einer Niveauregelung soll z. B. das neu eingestellte Niveau in einem Behälter möglichst schnell ohne große Schwankungen erreicht werden).

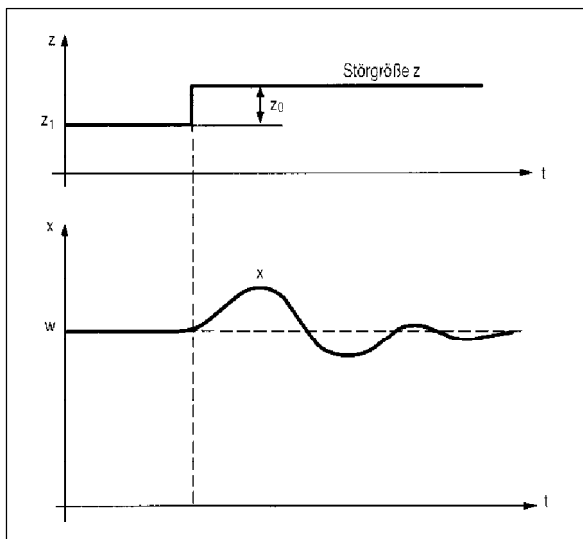


Abbildung 5.9: Verhalten der Regelgröße  $x$  bei Auftreten einer Störgröße  $z$  (Eine Störung ist zB eine Laständerung im Netz)

### 5.1.5 Häufige Aufgabenstellungen

In der Regelungstechnik werden zwei Aufgabenstellungen vorgegeben: die Folgeregelung und die Festwertregelung. Dies soll am Beispiel der Drehzahlregelung eines KWKW kurz dargestellt werden.

Bei der Folgeregelung hängt die Führungsgröße  $w$ , also die Soll-Drehzahl von einer anderen Größe oder der Zeit ab. Dies ist natürlich beim Anfahren der Fall, wo der Sollwert von 0 auf Nenndrehzahl gesetzt wird. Dabei soll eine Folgeregelung dafür sorgen, daß die Regelgröße  $x$  (die Drehzahl) der Führungsgröße  $w$  (die Nenndrehzahl) gut folgt.

Im Normalbetrieb ist die Drehzahlregelung eine Festwertregelung wo die Führungsgröße  $w$  immer zeitlich konstant ist. Die Festwertregelung hat dabei die Aufgabe, die Regelgröße  $x$  (die Drehzahl) auf dem festen Wert der Führungsgröße  $w$  (der Nenndrehzahl) zu halten.

Die Hauptaufgabe eines Reglers besteht also darin, einerseits die Regelgröße  $x$  auf dem eingestellten Führungswert  $w$  zu halten, auch wenn dieser verstellt wird. D.h., der Regler soll ein gutes Führungsverhalten aufweisen. Andererseits soll er ein gutes Störverhalten aufweisen, denn die Regelgröße  $x$  soll unabhängig von auftretenden Störungen auf dem vorgeschriebenen Wert der Führungsgröße  $w$  gehalten werden.

### 5.1.6 Regleranpassung an die Strecke

Eine bisher noch nicht erwähnte Schwierigkeit bei der Regelung ist die Gefahr, daß der Regelkreis instabil ist. Wird ein Regler für die gegebene Regelstrecke gewählt und man versieht ihn mit einer großen Verstärkung ( $K_p$  sehr groß), so daß der Regler in der Lage ist, schon bei einer kleinen Regelabweichung kräftig zu reagieren, ist mit folgender Erscheinung zu rechnen:

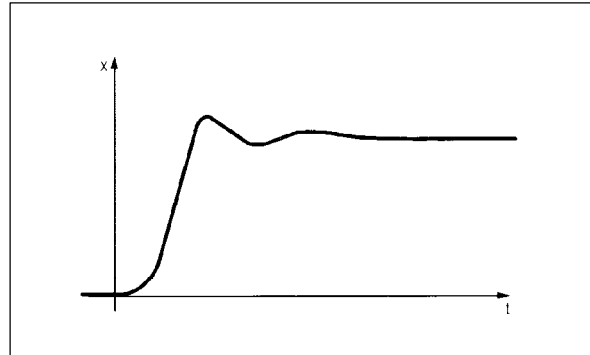
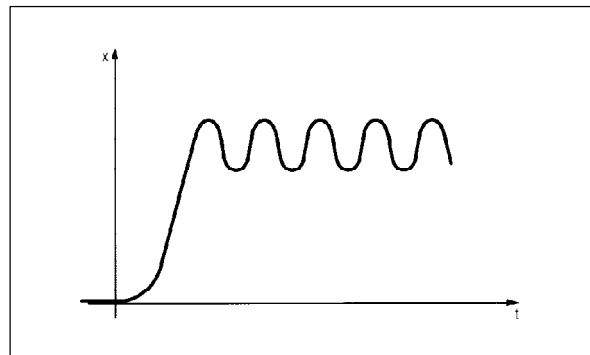
Der Regler wird die Regelgröße  $x$  auf keinen Fall in dem gewünschten Toleranzbereich halten können und die Störgrößen werden nicht ausgeglichen, sondern führen zum heftigen Schwingen der Regelgröße  $x$ , wodurch die Regelung nicht zu gebrauchen ist.

Damit ein Regler seine Aufgabe möglichst gut erfüllt, muß er so an die Regelstrecke angepaßt sein, daß der geschlossene Regelkreis ein „optimales“ Verhalten aufweist, d. h. der Regelkreis darf nicht schwingen und die Regelgröße  $x$  muß in ihrem vorgeschriebenen Toleranzbereich verbleiben.

Eine optimale Anpassung des Reglers an die Regelstrecke hängt also vom Anwendungszweck, d.h. von der Art der Regelstrecke, von der Auswirkung der Regelgrößenschwankungen und von der Einstellung durch den Projektur ab.

Aus der Tabelle auf der folgenden Seite geht hervor, welcher Reglertyp für einige in der Verfahrenstechnik häufig vorkommende Regelstrecken verwendet werden kann. Natürlich sind auch Fälle denkbar, in denen eine andere Zuordnung getroffen werden muß. Bevor ein Regelkreis eingestellt werden kann, muß der Reglertyp (P, PD, PI, PID) gewählt werden, der für die zu regelnde Strecke in Frage kommt. Danach können die Reglerkenngrößen (z.B. der Übertragungsbeiwert  $K_p$ ) bestimmt werden.

Um die Reglerkenngrößen zu berechnen, gibt es viele Möglichkeiten, von denen anschließend zwei beschrieben werden.


Abbildung 5.10: Optimales Verhalten der Regelgröße  $x$ 

Abbildung 5.11: Nicht optimales Verhalten der Regelgröße  $x$ 

Strecke	Reglertypen			
	P	PI	PD	PID
reine Totzeit	unbrauchbar	<b>Führung und Störung</b>	unbrauchbar	unbrauchbar
Totzeit + Verzögerung 1. Ordnung	unbrauchbar	etwas schlechter als PID	unbrauchbar	<b>Führung und Störung</b>
Totzeit + Verzögerung 2. Ordnung	nicht geeignet	schlechter als PID	schlecht	<b>Führung und Störung</b>
1. Ordnung+ sehr kleine Totzeit (Verzugszeit)	<b>Führung</b>	Störung	Führung bei Verzugszeit	Störung bei Verzugszeit
höherer Ordnung	nicht geeignet	etwas schlechter als PID	nicht geeignet	<b>Führung und Störung</b>
ohne Ausgleich mit Verzögerung	Führung (ohne Verzögerung)	Störung (ohne Verzögerung)	<b>Führung</b>	<b>Störung</b>

Abbildung 5.12: Eignung verschiedener Regler für verschiedene Regelaufgaben

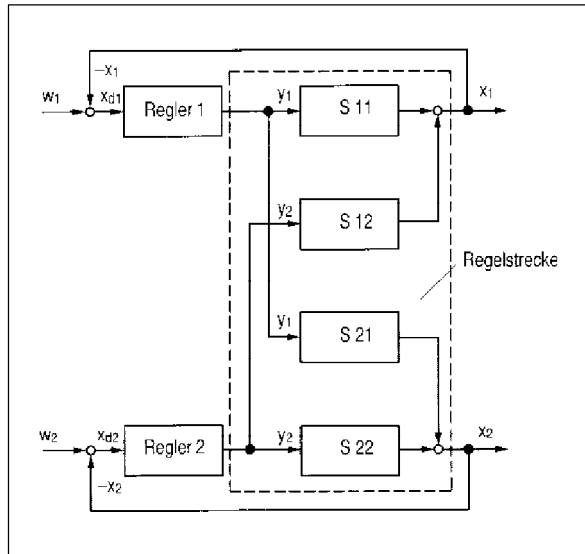


Abbildung 5.13: Zweigrößenregelung

### 5.1.7 Mehrgrößen- und Kaskadenregelung

Die bisher beschriebenen Regelkreise besaßen ausschließlich einen einzigen geschlossenen Signalverlauf. Die nun folgende Betrachtung zeigt, daß es auch möglich ist, mehrschleifige Regelkreise, die mehr oder weniger stark miteinander verkoppelt sind zu betreiben. Mit der Hilfe dieser mehrschleifigen Regelkreise ist es möglich, die Regelgüte eines Regelkreises wesentlich zu verbessern, d. h. die Einregelzeit der Regelgröße  $x$  kann verbessert werden.

Die Unterschiede der Mehrgrößen- und der Kaskadenregelung:

#### 5.1.7.1 Mehrgrößenregelung

Im besonderen Fall kann es vorkommen, daß ein Regler für eine Regelstrecke nicht ausreicht, d. h. es müssen mehrere Regler unabhängig voneinander über die Regelstrecke miteinander gekoppelt werden. Im Bild wird dargestellt, wie eine Zweigrößenregelung, bei der die beiden Ausgangsgrößen  $x_1$  und  $x_2$  der Regelstrecke mit Hilfe von zwei Reglern und daher mit zwei Stellgrößen  $y_1$  und  $y_2$  auf die Führungswerte  $w_1$  und  $w_2$  zugreifen und geregelt werden. Bei dieser Regelung beeinflusst jede der Stellgrößen die beiden Regelgrößen.

Die Zweigrößenregelung ist ein Beispiel für eine Mehrgrößenregelung bei der mehrere Regelkreise mit mehreren Reglern und Stellgrößen miteinander gekoppelt werden. Eine Mehrgrößenregelung wird beispielsweise zur Drehzahlregelung einer Turbine mittels Durchfluss- und Ballaststeller verwendet (siehe folgendes Kapitel).

#### 5.1.7.2 Kaskadenregelung

Bei der Kaskadenregelung wird die Regelstrecke unterteilt. Dadurch entstehen eine Hauptregelgröße und eine oder mehrere Hilfsregelgrößen. Jeder der Regelgrößen wird ein Regler zugeordnet. Bei diesem Regelkreis gibt der übergeordnete Regler, der Führungsregler genannt wird, den nachfolgenden Reglern - den Hilfs- oder Folgereglern - die Führungsgröße vor. Die Führungsgröße des ersten Hilfsreglers wird also von der Stellgröße des Führungsreglers geführt.



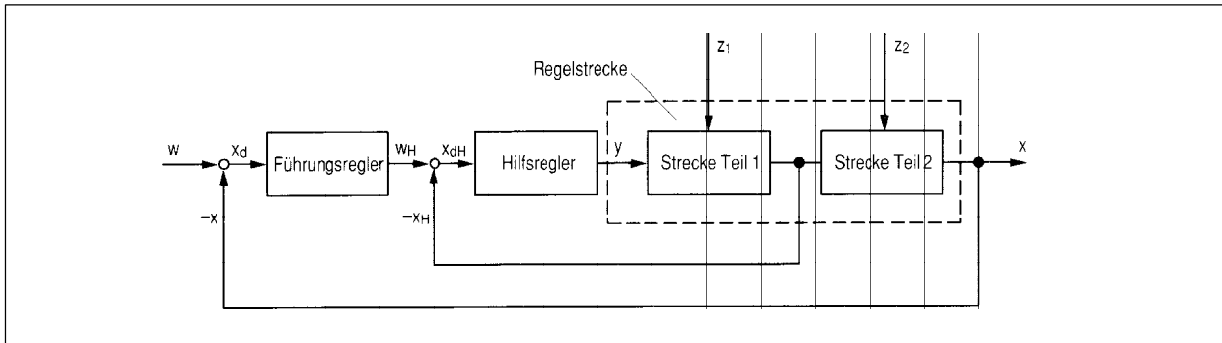


Abbildung 5.14: Blockschaltbild einer Kaskadenregelung mit Führungsregler und einem Hilfsregler

Der Hilfsregelkreis wird bei einer solchen Regelung von seinem Zeitverhalten her meist schneller eingestellt als der Führungsregler. Dies ist wünschenswert, um Störgrößen, die auf den Regelkreis eingreifen, schneller zu beseitigen. Eine Kaskadenregelung wird z.B. zur Positionierung der Düsenadel über ein Servoventil angewendet.

### 5.1.8 Digitale Turbinen Leittechnik

#### 5.1.8.1 Fundamentale Zusammenhänge: Regelungstechnik und Anlagensicherheit

Regelung- und Ueberwachungssysteme für Kleinwasserkraftanlagen werden benötigt, um einige Variable stabil und innerhalb festgelegter Grenzen unter veränderlichen Betriebsbedingungen zu halten. Typische Größen sind dabei: Frequenz, Spannung,  $\cos\phi$  auf der elektrischen Seite und der Pegelstand im Oberwasser und die Drehzahl auf der Antriebsseite. Die elektrische Frequenz und die Drehzahl der Turbine sind dabei im Falle direkter Kupplung zwischen Generator und Turbine fest miteinander verbunden.

Falls die Regelung innerhalb der festgelegten Grenzen nicht mehr möglich ist, muss das Sicherheitssystem in Funktion treten, die Anlage vom Netz trennen und kontrolliert zum Stillstand bringen. Für wärterlosen Betrieb ist es auch oft notwendig, den Betriebszustand an eine externe, beliebig weit entfernte Stelle zu melden.

Daraus lassen sich zwei wichtige Folgerungen ableiten:

- Jedes Kleinwasserkraftwerk beinhaltet mehr als eine Regelfunktion. Werden die verschiedenen Regelfunktionen zusammengefasst, so ergibt sich ein übergeordnetes Regelsystem.
- Ein Kleinwasserkraftwerk besteht aus mehr als einem Betriebssystem. Zusätzlich zum Regelsystem ist beispielsweise ein Sicherheitssystem Teil der Anlage.

Für die meisten einfachen Regelaufgaben gibt es bewährte Geräte, wie etwa mechanisch-ölhydraulische Drehzahlregler für Turbinen oder elektronische Spannungsregler für Generatoren. Solche Komponenten sind ausgereift und zuverlässig, aber auch relativ kostspielig. Ihr Hauptnachteil besteht darin, dass sie unabhängig voneinander funktionieren, und dass sie nicht miteinander kommunizieren können. Das klassische Kleinwasserkraftwerk das in den achtziger Jahren ausgerüstet wurde besteht so aus einem Regelsystem mit einem hydraulischen Drehzahlregler für die Turbine, einer Relaissteuerung für die Wasserstandsregelung im Synchronbetrieb und verschiedenen elektromechanischen Komponenten zur Netzüberwachung. Ein umfassendes Überwachungssystem fehlt dabei.

Eine Lösung für ein integriertes System besteht in einer gemeinsamen Regelsprache. Dies kann mit mathematischen Regelalgorithmen, als Computer-Software implementiert, erreicht werden.

#### 5.1.8.2 Digital Turbine Control - DTC

Die Haupteigenschaft eines DTC ist rasch erklärt. Alle Regel- und Überwachungsfunktionen werden einer Computerapplikation übertragen. Alle Aufgaben, welche durch klassische Komponenten übernommen werden, können beibehalten werden, aber eine völlig neue Dimension für die Betriebsoptimierung ergibt sich dadurch, dass alle Regelkreise auf einfache Weise über die Software kommunizieren können. Dies wird ermöglicht durch Digitalisierung aller Daten von der Anlage zum Regelsystem und vom Regelsystem zur Anlage. Der Prozess erfolgt in drei Schritten:

- Daten werden durch Sensoren erfasst, in ein elektrisches Signal umgewandelt und dem Computer zugeführt. Industriestandard sind dabei 0 ... 10 V, 4 ... 20 mA oder Impulse. Ein A/D-Wandler (analog/digital) übersetzt dabei die elektrischen Signale in numerische (digitale) Werte.

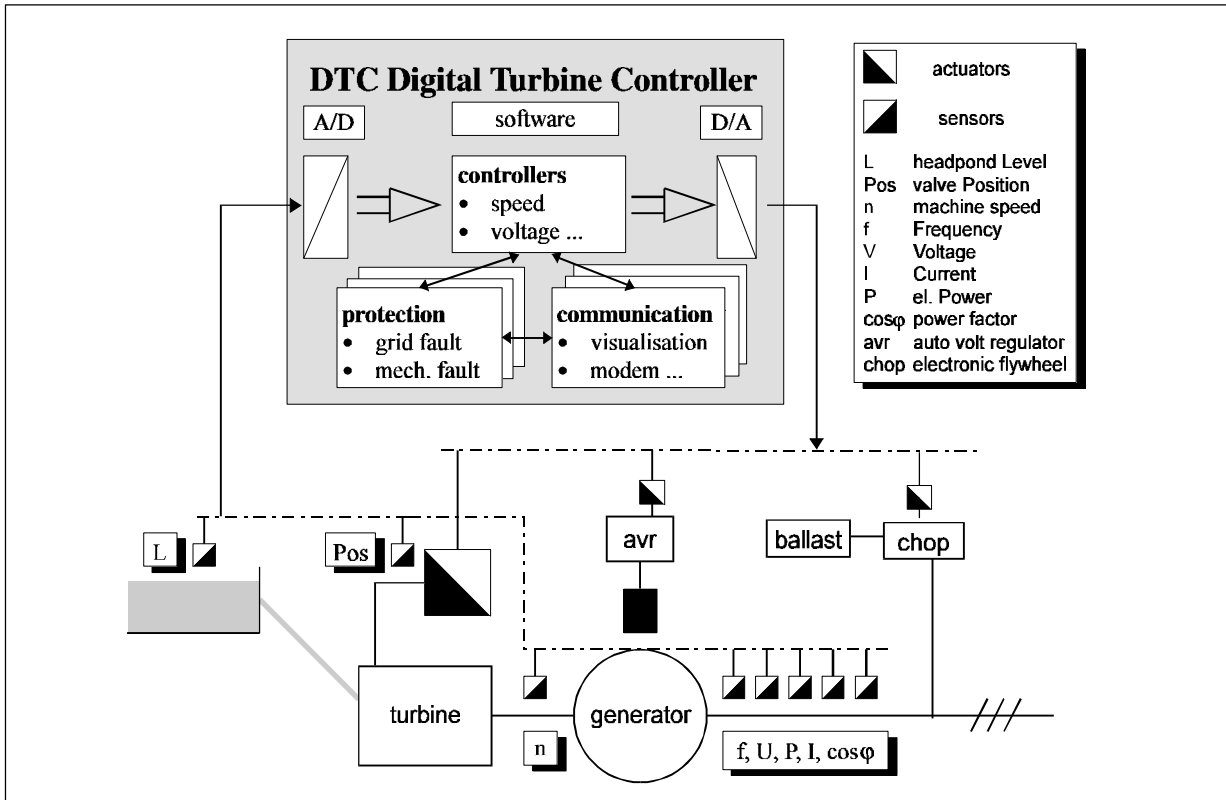


Abbildung 5.15: DTC, schematisch dargestellt

- Die Computerapplikation verarbeitet die so aufbereiteten Daten entsprechend den programmierten Funktionen und generiert digitale Ausgangssignale.
- D/A-Wandler (digital/analog) übersetzen die digitalen Werte in elektrische Signale, welche für die Ansteuerung verschiedener Komponenten verwendet werden.

Parameter wie die Sollfrequenz und die maximal zulässige Ueberspannung, etc., sind dabei veränderbar, was eine einfache Betriebsoptimierung ermöglicht.

### 5.1.8.3 DTC-Funktionen

Zusätzlich zu den reinen Regelfunktionen, können auf diese Weise eine Vielfalt anderer Funktionen in das System integriert werden. Die folgende Liste gibt einen Ueberblick.

- **Kommunikation:** Einer der Hauptvorteile von DTC ist die Möglichkeit, zu geringen Zusatzkosten alle erfassten Daten, wie etwa Betriebsstatus und Not-Abschaltzustand, an andere Systeme oder eine Ueberwachungsperson zu übertragen. Die Uebertragungsdistanz ist dabei fast beliebig. Ueber ein Modem und eine Telefonleitung zum Beispiel, sind Meldungen an irgendeinen Ort auf der Erde übertragbar. Die Bedienungsperson kann die Anlage über das Modem manipulieren und sie kann vom System selbst on-line Hilfe in der Form kontextsensitiver Texte erhalten.
- **System Integration:** Die Barrieren zwischen Einzelsystemen wie Regelung, Anlagenschutz und Kommunikation verschwinden, sobald alle Funktionen in die Applikation integriert sind. So kann beispielsweise der Schaltzustand einer Netzschutzkomponente dazu verwendet werden, eine Regelfunktion auszuführen.
- **Verschiedene Regelungsarten:** Verschiedene Schaltzustände von elektrischen Komponenten oder ein bestimmter Status der Anlage können dazu verwendet werden, unterschiedliche Regelungsarten zu implementieren. Im Inselbetrieb zum Beispiel, muss die Turbine drehzahlregelt betrieben werden. Nach der automatischen Synchronisierung und Zuschaltung an das Netz hingegen, soll Wasserstandsregelung erfolgen. Ein DTC kann dies auf einfache Weise realisieren: Sobald die Meldung "Netzschalter EIN" erhalten wird, erfolgt die Aktivierung des Programmteils, welcher für die Niveauregelung zuständig ist. Die Umschaltung von Drehzahlregelung auf Wasserstandsregelung erfolgt dabei praktisch verzögerungsfrei.
- **Zustands- und Fehlermeldung:** Betriebs- und Leistungsdaten einer Anlage können von einem DTC ausgegeben, gesammelt oder ausgedruckt werden.
- **Nachrüstung:** Eine Anlage kann jederzeit, durch herunterladen einer neuen Applikation, an neue Betriebsbedingungen oder umfangreichere Funktionen angepasst werden. Der Hardwareaufwand bleibt dabei auf allenfalls zusätzliche Peripheriegeräte beschränkt.

Nachdem auf dem Markt in jüngster Zeit echte DTC-Systeme erhältlich sind, erscheint der Weg für integrierte Regel- und Ueberwachungssysteme für Kleinwasserkraftanlagen in Zukunft geebnet.

## 5.2 Übersicht der KWKW Regelungsarten

Nach der Einführung in die Grundlagen der Regelungstechnik, insbesondere die Blockdarstellung von Reglern, werden hier übersichtsweise die Reglerschema für zwei grundsätzlich verschiedene Regelstrategien wiedergegeben (Abb. 5.16 und 5.17). In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Regler funktional beschrieben.

Obwohl die beiden wichtigen Regelfunktionen

- Drehzahlregelung
- Pegel- oder Wasserstandsregelung

enthalten sind, unterscheiden sie sich doch wesentlich in ihrer Funktionsweise. Alle Reglerausgänge des ersten Reglers sind Positionsvorgaben für das Stellorgan, dessen Position seinerseits durch einen Positionsregler über den Stellantrieb ausgeregelt wird. Dies ist ein typischer Kaskadenregler. Der Strahlableiter wird über eine nichtlineare Abhängigkeit mit dem Düsenpositionssollwert eingeschwenkt.

Der zweite Regler bedient zwei Stellglieder: wie vorher die Düsennadel, aber zusätzlich einen elektrischen Ballast (elektrische Bremse). Dies ist ein typischer Zweigrößenregler. Ein weiterer wichtiger Unterschied ist, dass es keine Positionsmessung gibt wodurch alle Reglerausgänge welche den Durchfluss ändern nicht die Position vorgeben, sondern die Stellgeschwindigkeit, und dass erst durch die Integration des Stellgliedes der I-Anteil aller Regler entsteht. Dies hat zunächst den Nachteil, dass der Regler langsamer sein muss, als die Antwortzeit der Regelstrecke, sonst "überschiesst" die Düsennadel laufend ihre richtige Position. Verzichtet man jedoch ganz auf das Regeln der schnellsten Änderung des mech. Systems, der Drehzahl, mittels Durchflussänderung und führt stattdessen einen Ballast ein, ergeben sich eine ganze Reihe neuer und interessanter Möglichkeiten:

- Die Drehzahl wird mit einem variablen Ballast sehr rasch ausgeregelt.
- der Durchfluss wird langsam so nachgestellt, dass der mittlere Ballast gehalten wird
- Ungenauigkeiten im Durchfluss spielen kaum eine Rolle da sie vom Ballast kompensiert werden
- Deswegen sind keine Servoventile notwendig, ein gepulster Betrieb genügt.

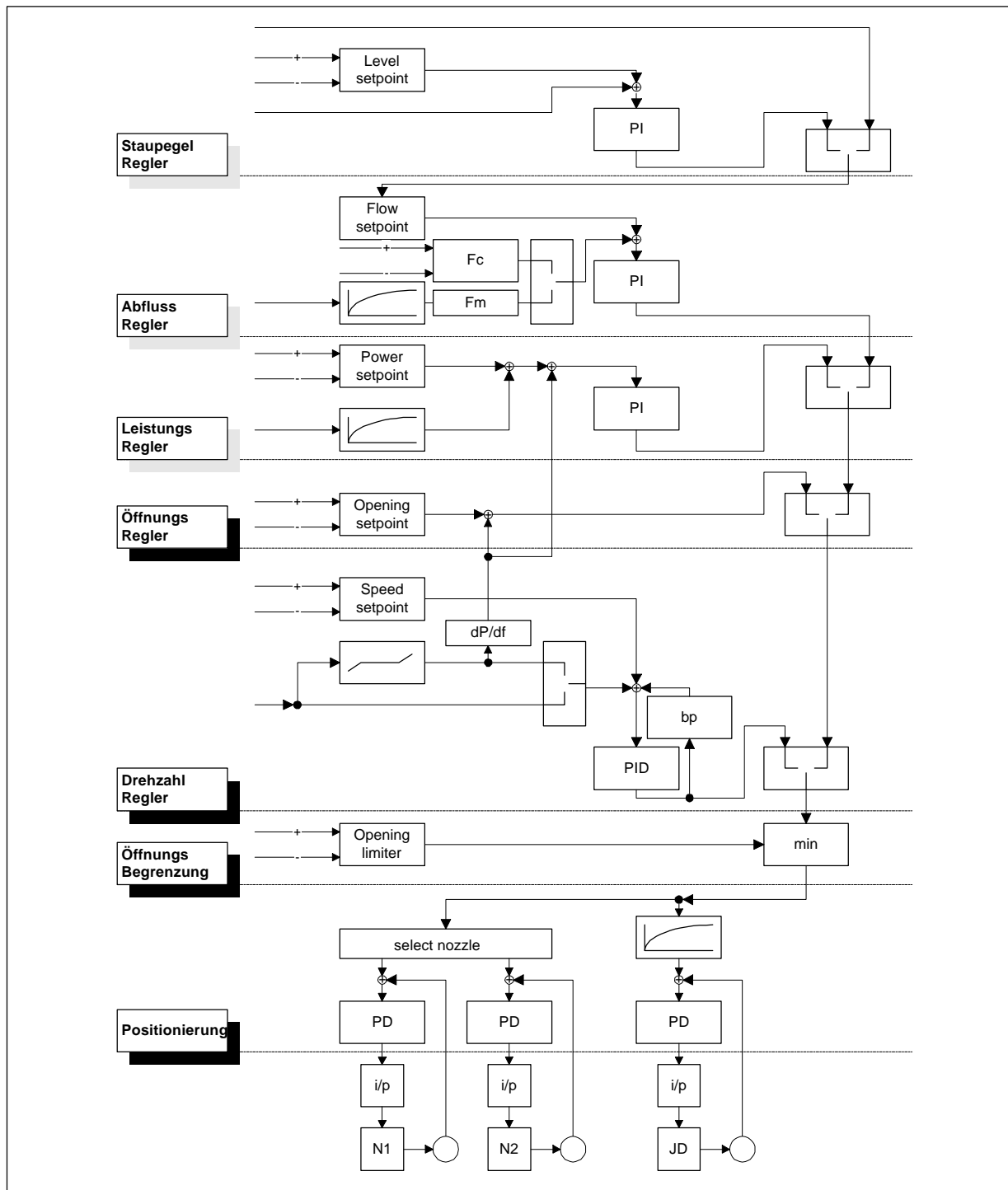


Abbildung 5.16: Turbinenregelung für eine zweidüsige Pelton turbine mit Strahlblenker für unterschiedlichen Betriebsmodi.

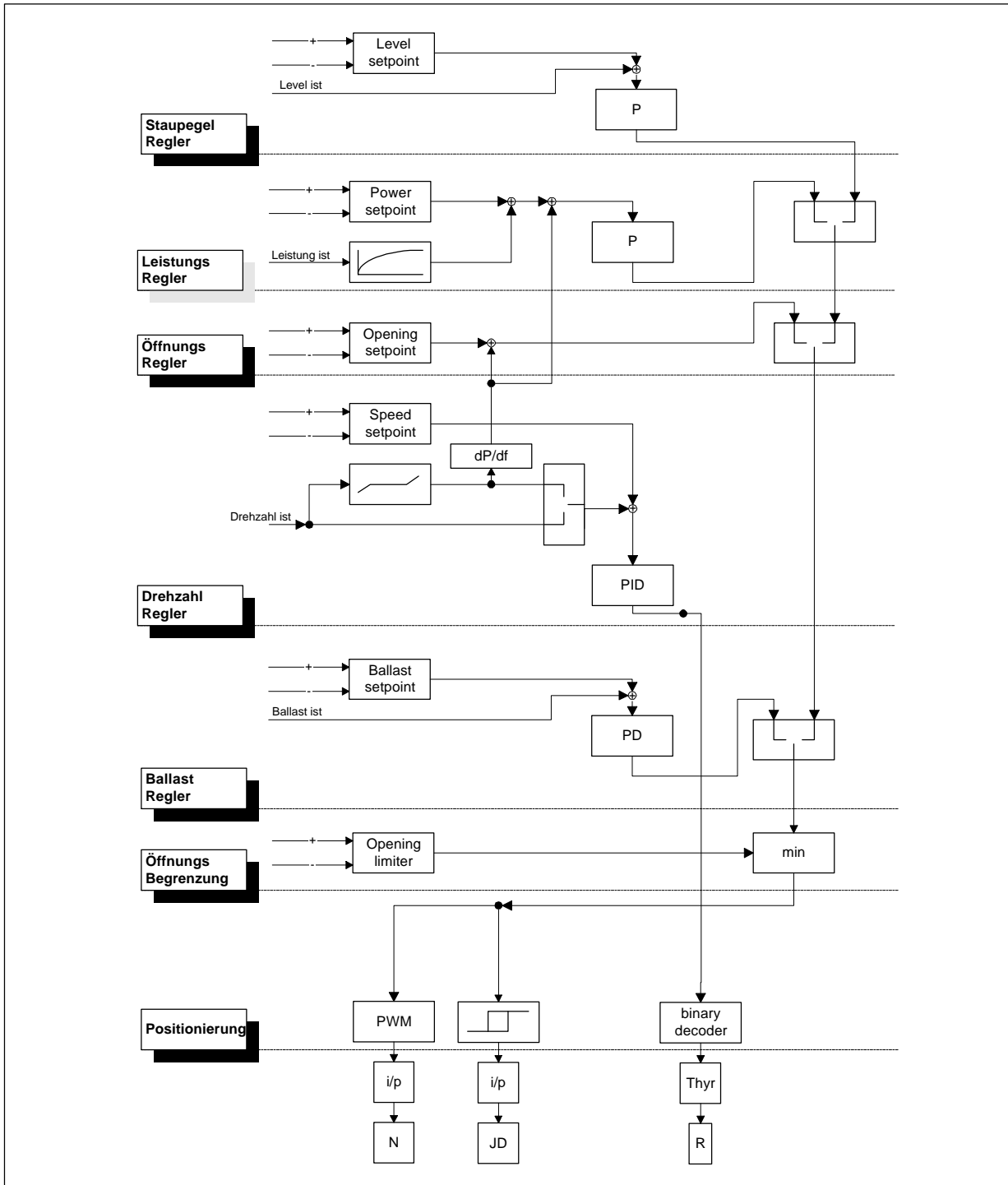


Abbildung 5.17: Turbinenregelung für eine eindüsige Pelton turbine mit Strahlblenker und Ballast für unterschiedliche Betriebsmodi.

### 5.2.1 Regelgrößen im Inselbetrieb

Im Inselbetrieb, das heisst bei autonomem Betrieb einer einzigen Anlage ohne Anschluss an das öffentliche oder ein anderes Netz, muss zur Einhaltung der relevanten elektrischen Grössen die Drehzahl möglichst konstant gehalten werden, unabhängig davon, was auf der Verbraucherseite passiert. Einige physikalische Zusammenhänge und die Möglichkeiten damit umzugehen, sind im folgenden erläutert.

#### 5.2.1.1 Drehzahlregelung

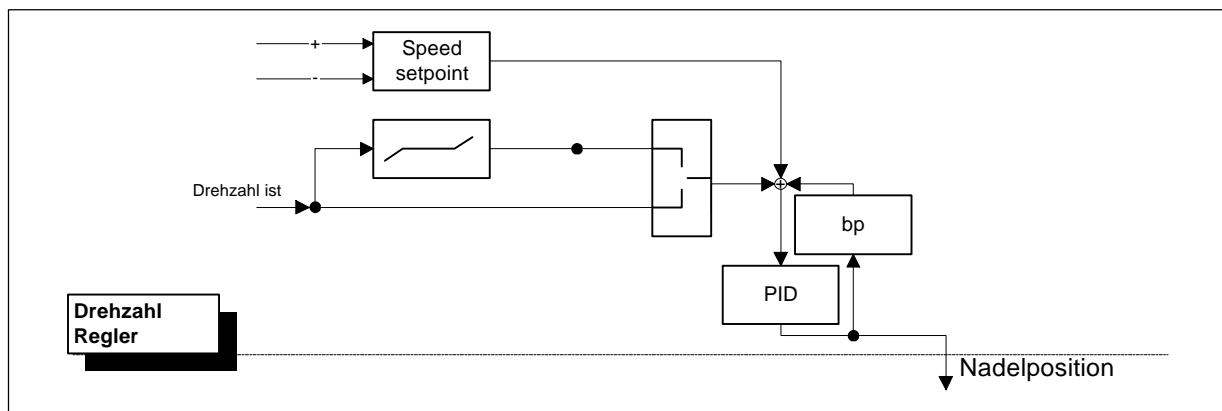


Abbildung 5.18: PID-P Drehzahlregler über den Durchfluss

Das Aggregat zur Verstellung des Turbinenleitapparates muss in seinem Arbeitsvermögen an den Bedarf der Regulierarbeit des Leitapparates angepasst sein. Dieses wird errechnet aus der Kraft, welche der Servomotor am Angriffspunkt des Leitapparates ausüben muss, um eine Verstellung zu erreichen und dem zurückzulegenden Weg.

Regulierarbeit:

$$A = s \in F$$

wobei:

$s$  = Verstellweg [m]

$F$  = notwendige Verstellkraft [N]



Die notwendige Verstellkraft ist abhängig vom Tubintyp und den Einsatzverhältnissen. Eine Berechnung ist aufwendig. In der Regel kann auf Herstellerangaben zurückgegriffen werden. Der Verlauf der Stellkraft über den Stellweg ist meist nicht konstant und wechselt möglicherweise auch seine Richtung.

Wird die kürzeste Stellzeit die erforderlich ist und der Wirkungsgrad des Antriebsaggregates miteinbezogen, erhält man die erforderliche Leistung. Dabei muss die maximale Stellkraft berücksichtigt werden um sicherzustellen, dass in jeder Stellung des Leitapparates die erforderliche Antriebsleistung zur Verfügung steht.

Antriebsleistung:

$$P_{agr} = \frac{A}{t_s} \cdot \eta_{agr}$$

wobei:

$t_s$  = Stellzeit [s]

$\eta_{agr}$  = Wirkungsgrad des Servomotors

Da ein grosser Anteil der erforderlichen Regulierarbeit durch Reibung bedingt ist, muss darauf geachtet werden, dass das Arbeitsvermögen und die Leistung mit ausreichender Reserve auch bei zunehmender Verkrustung des Leitapparates ausreichen.

Beispiel:

Berechnung der Antriebsleistung eines Hydraulikaggregates für folgende Anordnung:

Text	Einheit	Wert
Erforderliche Verstellkraft am Angriffspunkt des Turbinenleitapparates	$F_{max}$	4'000 N
maximaler Verstellweg	s	200 mm
Erforderliche Schliesszeit	$t_s$	2.5 s
Gesamtwirkungsgrad des Hydraulikaggregates	$\eta_{agr}$	35 %

Regulierarbeit:

$$\begin{aligned} A &= F_s \\ &= 4000 \cdot 0.2 \\ &= 800 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Aggregatleistung:

$$\begin{aligned} P_a &= A / t_s \cdot \eta_{agr} \\ &= 800 / 2.5 \cdot 0.35 \\ &= 914 \text{ Watt, d.h. mindestens ein 1 kW Motor.} \end{aligned}$$

### Drehzahlregelung mittels Ballast

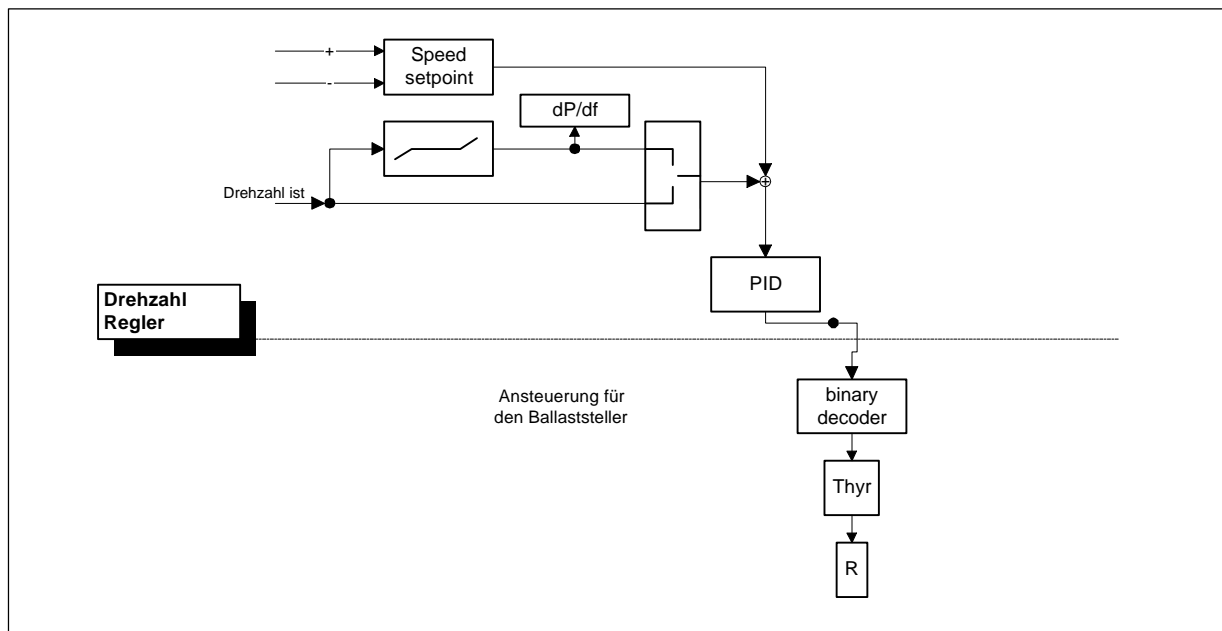


Abbildung 5.19: PID Drehzahlregler über einen Ballast

Vorauszuschicken ist, dass Drehzahlregelung mittels Ballast nur für relativ kleine Anlagen eingesetzt werden kann, da im Falle von kompletter Verbraucherabschaltung die gesamte Leistung „verheizt“ werden muss.

Pate dieser Regelungsart ist der Wunsch, die aufwendige Durchflussregelung zu vermeiden. Ziel ist es auch hier, die Drehzahl konstant zu halten. Da bei konstantem Durchfluss in diesem Fall das antreibende Moment konstant ist, muss auch das Bremsmoment und damit die Belastung des Generators konstant gehalten werden. Dies geschieht mit heutiger Technik durch den Vergleich der IST- und der SOLL-Drehzahl/ Frequenz und der elektronischen Zu- beziehungsweise Abschaltung von Ballastwiderständen, sodass die gesamte dem System entnommene Leistung konstant bleibt.

Unter schweizerischen Verhältnissen ist ein vollautomatischer Betrieb mit Ballast in der Regel nicht möglich. Ein im Jahreserlauf variables Wasserangebot bedeutet, dass der Turbinenleitapparat jahreszeitlich der Wasserführung manuell angepasst wird. Andernfalls kommt die Anlage bei Wassermangel zum Stillstand.

### 5.2.1.2 Spannungsregelung

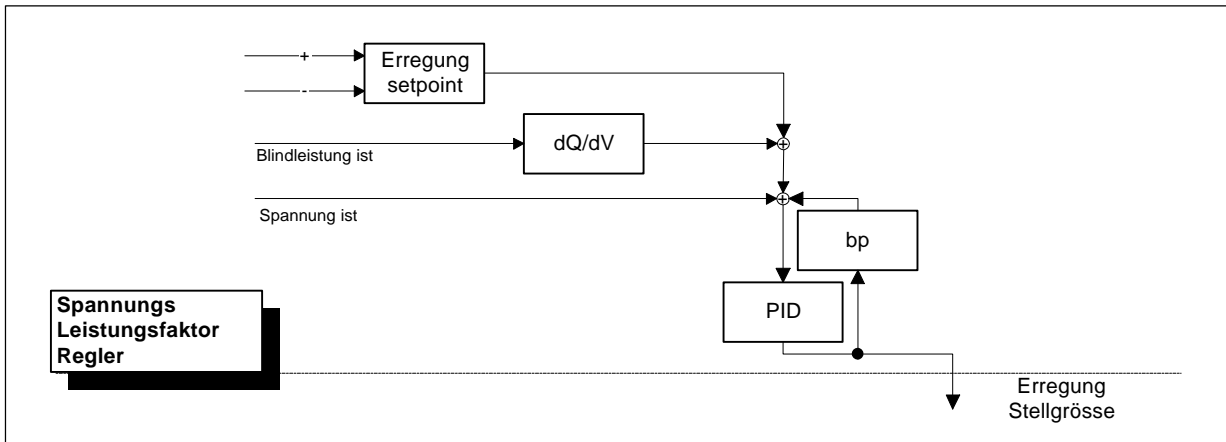


Abbildung 5.20: PID-P Spannungsregler, bei dem der Leistungsfaktor (Blindleistung) im Verbundbetrieb über eine Erregungssollwertanpassung geregelt wird.

Moderne Synchrongeneratoren enthalten einen Spannungsregler, der die Spannung an den Klemmen konstant hält. Solche Regler haben meist einen Anschluss für ein Potentiometer, mit welchem der Sollwert der Spannung vorgegeben werden kann ( $\pm 10\%$ ). Verwendet man ein Motor-Potentiometer kann dieser Wert auch von einem übergeordneten Regler gesetzt werden, zB dem Synchronisiergerät. Die Nachfolgende Abbildung zeigt den Aufbau eines Spannungs-/Blindleistungsreglers der den Erregerstrom einstellt.

### 5.2.2 Regelgrößen im Parallelbetrieb

Hier sind zwei wesentlich unterschiedliche Betriebsarten zu unterscheiden:

- starres Netz, wo alle anderen Generatoren sehr viel mehr Leistung ( $>10$ ) abgeben.
- weiches Netz, häufig Parallelbetrieb mit einem Dieselgenerator ähnlicher Leistung.

### 5.2.2.1 Wasserstandsregelung und Leistungsfaktorregelung

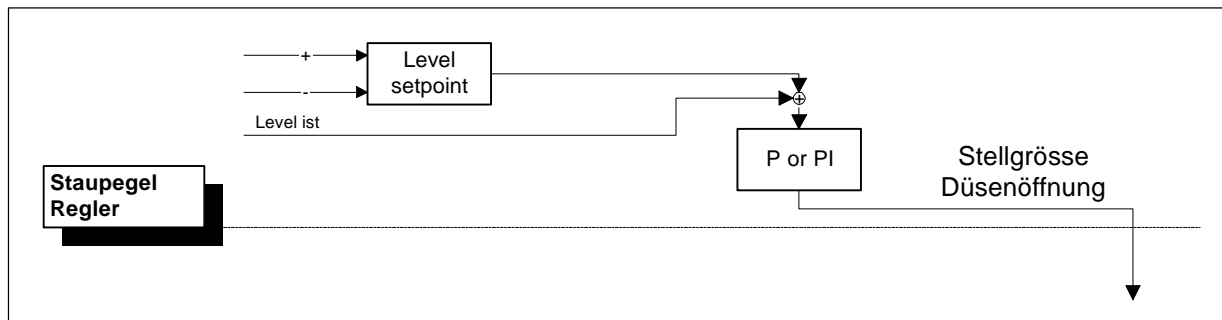


Abbildung 5.21: P oder PI Pegelregler.

im ersten Fall ist die Frequenz und die Spannung vom Netz vorgegeben, und es kann jede Leistung des KWKW absorbieren. Aus diesem Grunde wird einerseits möglichst alles Wasser turbinert (Pegelregelung), andererseits soll möglichst keine Blindleistung produziert werden.

Die Leistungsfaktorregelung geschieht wie die Spannungsregelung im Inselbetrieb über das Einstellen des Erregerstromes. Die beiden Regler werden daher, wie vorhin dargestellt, kombiniert (Kap. 5.2.1.2).

### 5.2.2.2 Statik

Der zweite Fall das koppeln ähnlich starker Generatoren, ist sehr viel heikler. Die im Inselbetrieb zu regelnden Grössen, nämlich die Frequenz und die Spannung, die beim Einspeisen in ein aktives Netz bereits mehr oder weniger starr vorgegeben sind, treten hier hinter die Beherrschung der Wirk- und Blindleistung zurück. Die Regelaufgabe ist nunmehr, die Aufteilung dieser Leistungen zwischen den beiden Maschinen zu stabilisieren. Man kann sich ja einfach eine Situation denken, wo zwei 120kVA Generatoren eine Last von 100kW+20kVAr speisen. Jede Maschine könnte diesen Bedarf selber decken, sie könnten auch friedlich halbe-halbe machen, aber sie könnten auch wild um die Lieferung kämpfen, ohne dass dabei die gemeinsame Spannung oder die Frequenz ändert. Es gilt zu vermeiden, dass die Leistungen zwischen den Maschinen pendeln!

Die übliche Lösung dieses Regelungsproblems ist das Einführen einer Verknüpfung zwischen der Frequenz und der Wirkleistung einerseits und der Spannung und der Blindleistung andererseits. Man verwendet einen linearen, fallenden Zusammenhang, d.h. bei steigender Wirkleistung fällt die Frequenz und bei steigender Blindleistung fällt die Spannung. Die Steilheit dieser Kennlinien nennt man Statik.

$$S_f = df/f_0 \text{ bzw. } S_U = dU/U_0$$

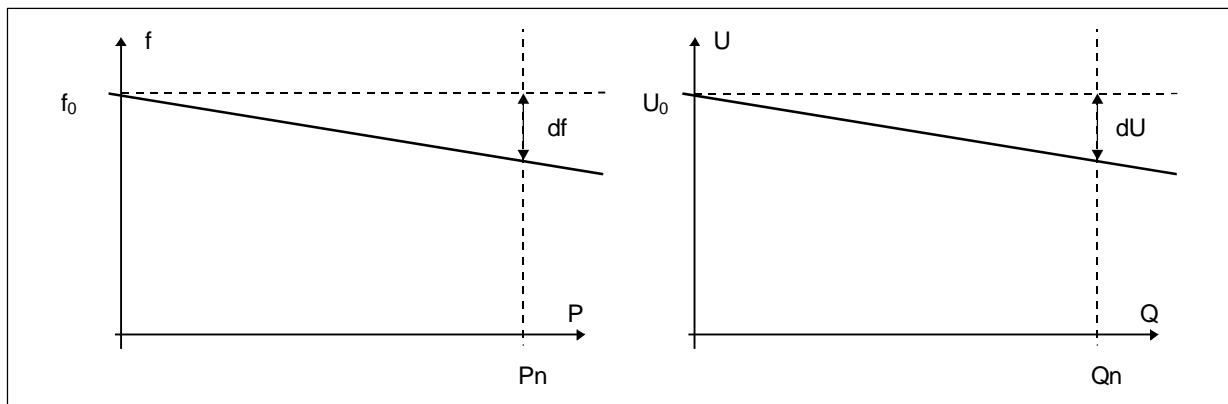


Abbildung 5.22: Statik der Frequenz und der Spannung.

Mit dieser Eigenschaft können die beiden Maschinen über ihre gemeinsame Größen, die Frequenz und die Spannung, eine feste Aufteilung der Leistungen einhalten. Dies soll anhand der folgenden Figur dargestellt werden:

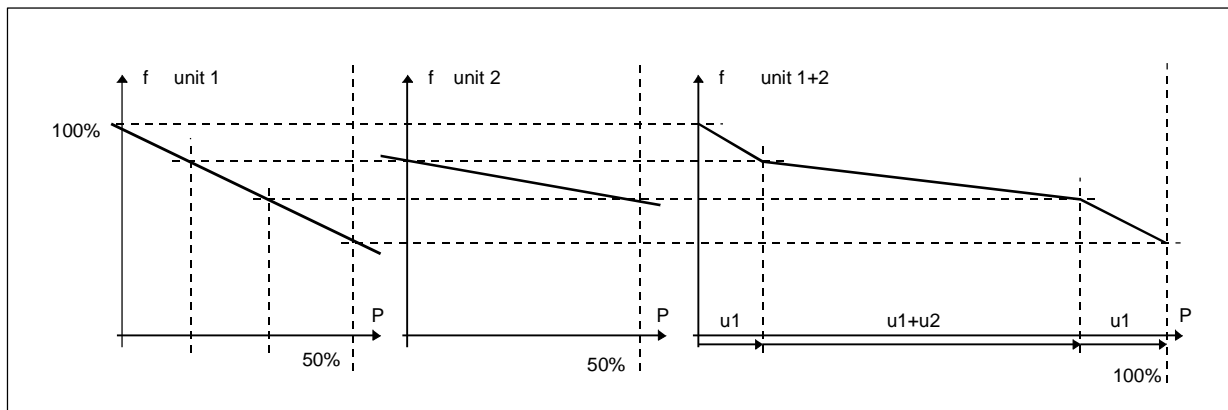


Abbildung 5.23: Aufteilung der Wirkleistung über die Statik der Frequenz.

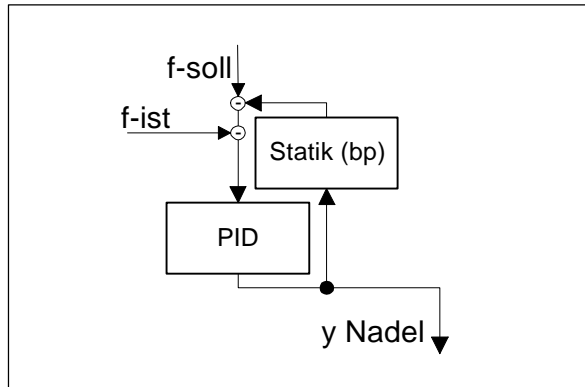


Abbildung 5.24: Einführen einer Statik im Regler.

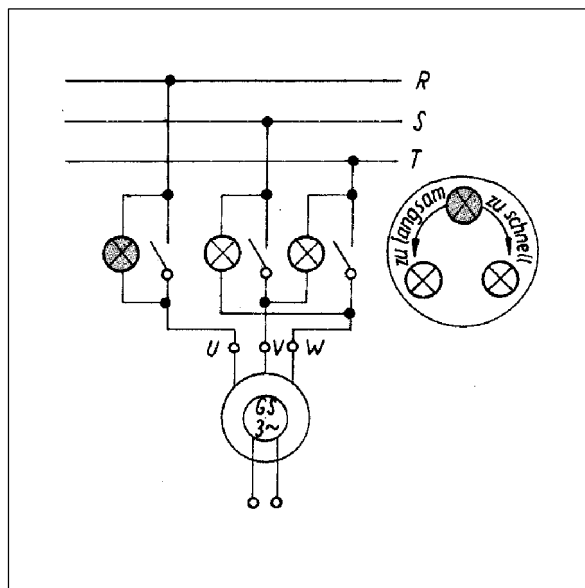


Abbildung 5.25: Hellschaltung.

Die Statik wird im Regler z.B. durch eine proportionale Rückführung der Stellgrösse erreicht. Der PID Regler regelt den Drehzahl-Istwert fehlerfrei, durch exaktes Einstellen der Nadelposition aus. Je grösser nun aber die Öffnung und damit die Leistung, desto mehr wird vom Sollwert durch die Rückführung abgezogen, desto mehr sinkt also die Frequenz.

### 5.2.2.3 Synchronisation

Der Synchronisationsvorgang ist ein Spezialfall der schon erwähnten Drehzahl- und Spannungsregelung. In diesem Falle werden die Sollwerte nicht fest vorgegeben, sondern diese sind die entsprechenden Grössen des Netzes. Damit ist vom Regler ein gutes Führungsverhalten gefordert. Da das Netz jedoch sehr konstant ist, sind die Anforderungen gering. Die Phasenlage der beiden Netze wird nicht ausgeregelt, so genau ist der Gleichlauf des KWKW kaum. Dies ist aber auch gar nicht nötig; stimmen einmal die Frequenzen ziemlich genau überein, genügt es auf den Moment zu warten, wo die Phasenlage gerade übereinstimmt. Manuelles Zuschalten erfolgt über das beobachten eines Synchronoskop oder einfach dreier Lampen die als Lauflicht zwischen die beiden Netze geschaltet sind. Wird eine Maschine bei falscher Phasenlage zugeschaltet, entspricht dies einem Kurzschluss in der Maschine und sie kann völlig zerstört werden. Daher werden heute meist Synchron-Freigabe Relais oder Vollautomaten verwendet.

## 6. Simulation von KWKW

---

<b>6.1</b>	<b>Einleitung</b>	109
------------	-------------------	-----

---

<b>6.2</b>	<b>Die Aufgabenstellung</b>	109
------------	-----------------------------	-----

---

<b>6.3</b>	<b>Die Modellierung</b>	111
6.3.1	Der Block „Stausee“	111
6.3.2	Der Block „Druckleitung“	112
6.3.3	Der Block „Düse“ und „Turbine“	114
6.3.4	Der Block „Rotor“	114
6.3.5	Block Generator	115
6.3.6	Der Block „Übertragungsleitung“	115
6.3.7	Block „Verbraucher“	115

---





## 6. Simulation von KWKW

### 6.1 Einleitung

Wie in anderen Bereichen, steigt auch bei Wasserkraftwerken der Automatisierungsgrad laufend, ebenso die Zuverlässigkeit der eingesetzten Automatisierungssysteme. Hinzu kommen steigende Anforderungen der Netzführung. Es bieten sich deshalb für den Bediener bedeutend weniger Gelegenheiten, die Anlage selbst zu fahren, und sich dabei das erforderliche Verständnis der Funktionsweise und des dynamischen Verhaltens zu erwerben. Damit wird für ihn das Lokalisieren von Störungen oder gar ein allfälliger Hand-Not-Betrieb zunehmend schwieriger. In der Luftfahrt sind Simulatoren zum Training der Piloten nicht mehr wegzudenken. Sie sind heute sehr realitätsnah und gestatten insbesondere die Schulung des Verhaltens bei gefährlichen Ausfällen. Auch bei Wärmekraftwerken werden Simulatoren für die zentrale Warte benützt. Der Anspruch des hier vorgestellten Systems geht nicht so weit. Er beschränkt sich darauf, das dynamische Verhalten einer konkret parametrisierten Klein-Wasserkraftanlage innerhalb ihrer Normalbetriebs-Envelope wiederzugeben. Damit erhält der Bediener ein Basis-Lernfeld für eigenes „learning by doing“, als Vorstufe zur Arbeit an seiner realen Anlage. Ebenso erlaubt dieses Modell, da es auf demselben Computer läuft, welcher nachher auch im Betrieb der Anlage die Regelung und Steuerung übernimmt, eine grobe Einstellung der Regelungsparameter. Es ist also möglich, den Regler auf eine konkrete Anlagensituation einzustellen, bevor man auf der Anlage selbst ist.

Im folgenden wird zunächst die Aufgabenstellung bezüglich Anlagentypen und Betriebsfällen definiert und abgegrenzt. Dann wird auf die mathematische Modellierung der einzelnen Subsysteme eingegangen.

### 6.2 Die Aufgabenstellung

Betrachtet werden Klein-Wasserkraftwerke mit bis zu ca. 100 kW Nennleistung, bei welchen typischerweise maximaler Wirkungsgrad bzw. Jahresarbeit zugunsten tiefer Investitionskosten und eher einfacher Betriebsweise in den Hintergrund treten. Betrachtet werden mithin Konfigurationen mit einfacher Triebwasserführung und einer Maschinengruppe. Als Turbinentypen stehen zwei Bauarten zur

Auswahl, eine Querstromturbine bei Gefällen bis etwa 50 m bzw. eine Pelton-turbine für höhere Gefälle mit entsprechend kleineren Wasserströmen. Als Stellorgan steht eine Drosselklappe bzw. eine Düse-Nadel-Kombination mit einem entsprechend leistungsfähigen Stellantrieb zur Verfügung. Der Turbinenregler entspricht dem im Kapitel 6 beschriebenen "gemischten" Drehzahlregler.

Auf der elektrischen Seite ist hier zunächst nur ein Synchrongenerator mit der üblichen Ausrüstung implementiert, d.h. einem integrierten Spannungsregler, wie er heute in bürstenlosen Generatoren angeboten wird. Er speist eine lokale Verbrauchergruppe bestehend aus ohmschen Lasten (Beleuchtung, Elektrowärme). Dieses lokale Netz ist in der Regel mit dem Verbundnetz stark gekoppelt (Netzbetrieb), muss jedoch in Notfällen für sich allein betrieben werden, und zwar im ganzen Lastbereich (Inselbetrieb). Dabei ist hinreichend genaue stationäre und transiente Frequenzhaltung verlangt, zum Schutz der angeschlossenen Verbraucher und um das Re-synchronisieren des Inselnetzes mit dem Verbundnetz unter Last zu ermöglichen. Diese einfache Grundkonfiguration kann offensichtlich auch für Wasserkraftwerke mit grösserer Leistung gebraucht werden. Daneben werden zunehmend auch andere Konfigurationen interessant.

Die Normalbetriebs-Envelope dieses Grundsystems umfasse die folgenden Betriebsfälle:

- Start aus dem Stillstand, Hochlauf und Stabilisierung der Drehzahl auf ihrem Sollwert nahe der Netzfrequenz;
- Synchronisieren mit dem Verbundnetz über den Drehzahlsollwert, Parallelschalten und Belasten über den Pegelsollwert;
- Aufbau eines Inselnetzes über den Hochlauf mit geschlossenem Generatorschalter, Frequenzregelung beim Zu- und Wegschalten einzelner lokaler Verbraucher und bei Frequenz-Sollwertänderungen (Resynchronisation) im ganzen Lastbereich.

Die Simulation ist wie folgt konzipiert:

## 6.3 Die Modellierung

Bei umfangreichen Systemen (wie dem vorliegenden) ist es zweckmässig, zuerst die qualitativen Wirkungszusammenhänge in Form eines Blockbildes darzustellen. Dabei entspricht jeder Block einem klar abgrenzbaren Anlagen-Subsystem. Er enthält die mathematische Beschreibung des Input-Output-Verhaltens dieses Subsystems in mehr oder weniger genauer Näherung. Durch Signalpfade werden die Blöcke zum Gesamtsystem zusammengefügt (Abb. 6.8).

Im nächsten Detaillierungsschritt ist das Verhalten jedes Blockes quantitativ zu beschreiben.

### 6.3.1 Der Block „Stausee“

Er erhält als Inputs die Summe aller Wasserzuflüsse in das Becken sowie den Abfluss in die Druckleitung  $Q_L$  und den Überfall-Abfluss  $Q_{ue}$ . Folglich ergibt sich als Volumenbilanz:

$$(d/dt) V_s = \sum Q_{s\text{ zu}} - \sum Q_{s\text{ weg}} = Q_{zu} - Q_L - Q_{ue}$$

und (bei senkrechten Wänden):  $h_s = V_s / A_s$

sowie für den Überfall mit

$$\Delta h(t) = (h_s(t) - h_{s\text{ lim}})$$

vereinfacht

$$Q_{ue} = k_s \Delta h(t) \text{ für } \Delta h(t) > 0 \text{ und } Q_{ue} = 0 \text{ für } \Delta h(t) < 0$$

Als Output erscheint also der Pegelstand  $h_{Becken}$  im Oberwasser und damit das treibende Gefälle für die anschliessende „Druckleitung“.

Bei dieser Modellierung wird impliziert, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Froudeschen Wellen im Oberwasserbecken vergleichsweise hoch ist. Dies ist der Fall bei tiefen Staubecken, jedoch in der Regel nicht bei Freispiegelkanälen an Niederdruckanlagen. Hier muss an sich die Beschreibung in partiellen Differentialgleichungen nach deSaint-Venant ins Modul eingesetzt werden. Üblich ist dabei eine Finite-Element-Darstellung.

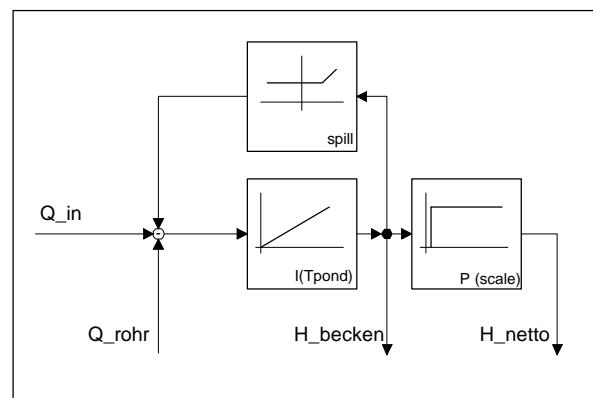


Abbildung 6.1: Block "Stausee"

Im Bereich der elektrischen Maschinen ist die sogenannte „per unit“ Darstellung gängig. Sie wird hier auf alle Blöcke ausgedehnt. Wählt man als Bezugsvariable den nominalen Beckeninhalt  $V_{SN}$  bzw. den nominalen Pegelstand  $h_{SN}$  und den nominalen Triebwasserdurchfluss  $Q_N$ , dann wird

$$\frac{V_{SN}}{Q_N} \cdot \frac{d V_s(t)}{dt} = T_{see} \frac{d h_s(t)}{dt} = \frac{Q_{zu}}{Q_N} - \frac{Q_L}{Q_N} - \frac{Q_{ue}}{Q_N}$$

Damit sind alle Variablen dimensionsbefreit und bewegen sich im Bereich zwischen Null und etwas über Eins. Als Koeffizient der Ableitung nach der Zeit entsteht die nominale Füllzeit:

$$T_{see} = V_{sn} / Q_n$$

des Beckens als anschauliche dynamische Kenngrösse. Man beachte, dass dabei keine Linearisierung vorgenommen wird, d.h. das Modell behält seine Gültigkeit über den ganzen Arbeitsbereich der Anlage. Im weiteren sind der Einfachheit halber mit den angegebenen Symbolen stets die dimensionsbefreiten Variablen gemeint. Alle weiteren Blöcke werden gleichermassen behandelt.

Damit entsteht das Signalfussbild (Abb. 6.1) als Visualisierung der Gleichungen in dimensionsbefreiter Darstellung, das im folgenden noch etwas kommentiert werden soll.

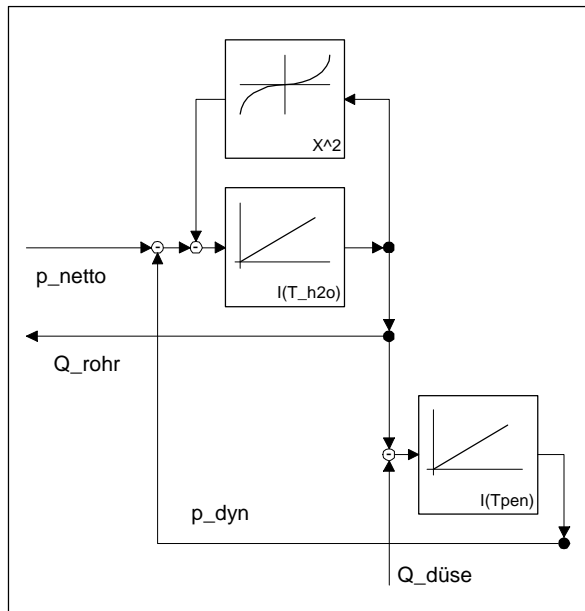


Abbildung 6.2: Block Druckleitung

### 6.3.2 Der Block „Druckleitung“

Er enthält eine kompressible, massenbehaftete Flüssigkeitssäule, die durch eine partielle Differentialgleichung zu beschreiben ist. Dies wird hier approximiert durch ein Finite-Element-Modell zweiter Ordnung, welches die Grundschwingung annähernd wiedergibt. Aus der Impulsbilanz ergibt sich in dimensionsbefreiter Darstellung mit der nominalen Wassergeschwindigkeit  $w_N$  in der Druckleitung, der Länge  $L_N$ , der nominalen Fallhöhe  $H_N$  und dem Druck  $p_L$  vor der Düse

$$T_w \cdot \frac{d w_L(t)}{dt} = -\frac{p_L(t)}{\rho g H_N} + \frac{H(t)}{H_N} - \frac{\Delta p_{rN}}{\rho g H_N} \frac{w_L^2(t)}{w_N^2} \text{sign} \frac{w_L(t)}{w_N}$$

mit der Anlaufzeitkonstante der Wassermasse

$$T_w = L_L w_N / g H_N$$

Der Druckverlust am Einlauf zur Druckleitung ist vernachlässigt. Die Beziehung enthält einen quadratischen Reibungsdruckabfall mit Berücksichtigung der Strömungsrichtung. Dabei ist gesetzt:

$$\Delta p_{rN} / \rho g H_N \approx 5\%$$

Weiter folgt aus der Volumenbilanz mit der Geschwindigkeit  $w_D$  vor der Düse

$$\frac{d}{dt} \frac{\Delta L_L(t)}{L_N} = \frac{w_L(t)}{w_N} - \frac{w_D(t)}{w_N}$$

zusammen mit der Kompressibilitätsbeziehung:

$$\Delta p(t) = (1/\kappa) [\Delta L_L(t) / L_N]$$

die zweite Differentialgleichung im Druckleitungsmodell:

$$T_\kappa \cdot \frac{d}{dt} \frac{p_D(t)}{\rho g H_N} = \frac{w_L(t)}{w_N} - \frac{w_D(t)}{w_N}$$

mit der Zeitkonstante:

$$T_\kappa = \kappa L_N (\rho g H_N / w_N)$$

und damit schliesslich für die Eigen-Kreisfrequenz des Modells:

$$\omega_L^2 = 1 / (T_w T_\kappa)$$

Bei veränderten Gegebenheiten ist das Modul entsprechend anzupassen.

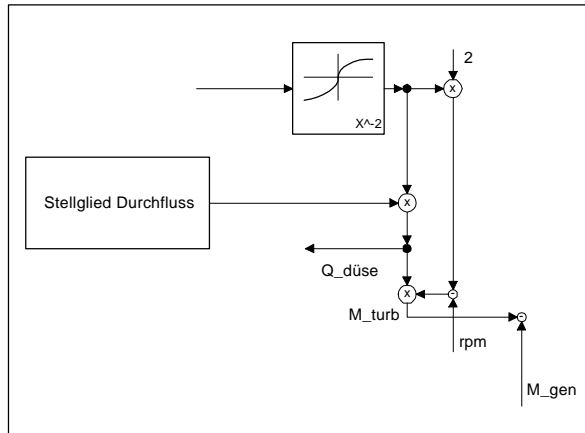


Abbildung 6.3: Block Düse + Turbine

### 6.3.3 Der Block „Düse“ und „Turbine“

Für die Peltonmaschine wurde die Torricelli-Ausflussformel gewählt. Dabei ist die Ausström-Querschnittsfläche proportional zum Nadelhub gesetzt. Allfällige weitere Druckverluste sind vernachlässigt, der Gegendruck ist konstant gleich dem Luftdruck.

Die Impulsumsetzung der Peltonmaschine vom Wasserstrahl auf den rotierenden Becherkranz wird durch ein lineares Drehmoment modelliert, welches dem Nenndrehmoment bei Nenndrehzahl und keinem Drehmoment bei der Durchbrenndrehzahl  $2n$  entspricht. Im Output, dem antreibenden Drehmoment  $M_{turb}$ , sind hier keine durchflussabhängigen Verluste mitmodelliert, ebenso nicht die Pulsation infolge der endlichen Becherzahl. Im Fall der Querstromturbine sind die Module „Düse“ und „Lauf-rad“ entsprechend den veränderten physikalischen Bedingungen auszutauschen.

### 6.3.4 Der Block „Rotor“

Er enthält die Drehmomentbilanz mit der Anlaufzeitkonstante

$$T_{an} = \Theta \omega_N / M_{IN}$$

des Rotors unter Einbezug der drehzahlabhängigen Verluste. Die „Drehzahlmessung“ ist ohne statische und dynamische Messfehler modelliert und auf den Messbereich 0 bis 100 Hz entsprechend 0 bis 2 normiert.

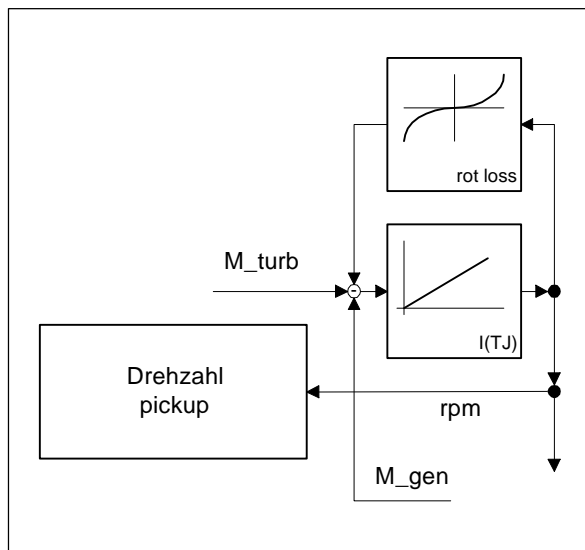


Abbildung 6.4: Block Rotor

### 6.3.5 Block Generator

Das elektrische Teilsystem enthält eine stark vereinfachte Modellierung. Das Bremsmoment am Rotor ist proportional zum Polradwinkel  $\vartheta$  gesetzt, der durch Integration der Differenz-Drehfrequenz zwischen Rotor und Netz entsteht. Die entsprechende Zeitkonstante ist

$$T_{\text{en}} = \varphi_N / \omega_N$$

Zusammen mit der Anlaufzeit des Rotors  $T_{\text{an}}$  ergibt sich die Kreisfrequenz der Polrad-schwingung

$$(\omega_P \approx 2\pi \cdot 2,5 \text{ s}^{-1})$$

Hinzugefügt ist ein Bremsmoment aus der Dämpferwicklung, das proportional zur Drehfrequenz-Differenz zwischen Rotor und Netz ist. Die abgegebene Wirkleistung proportional zum Bremsmoment angesetzt, und die Blindleistung wird nicht modelliert.

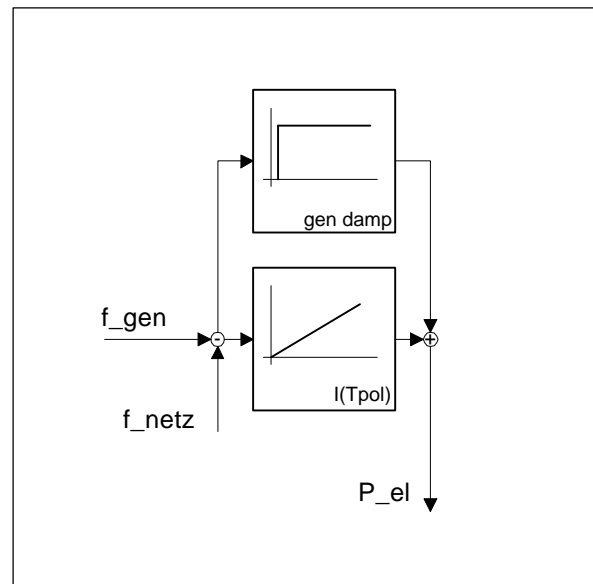


Abbildung 6.5: Das Modul „Synchrongenerator“

### 6.3.6 Der Block „Übertragungsleitung“

wird hier mit Übertragungsfunktion Eins eingesetzt.

### 6.3.7 Block „Verbraucher“

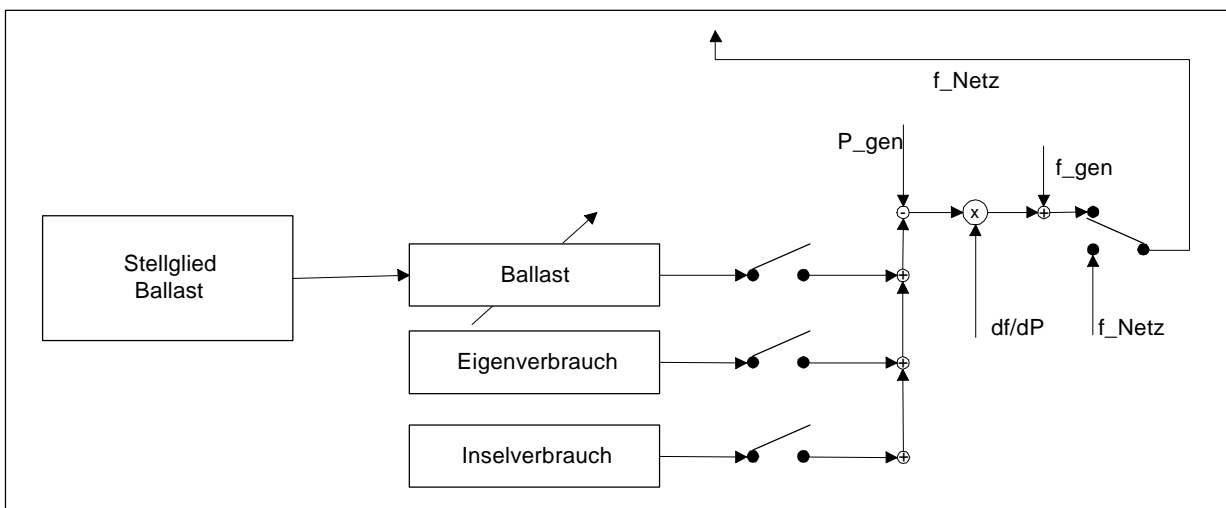


Abbildung 6.6: Block Verbraucher

Es ist im Verbundbetrieb keine Rückwirkung der abgegebenen Wirkleistung auf die Netzfrequenz vorhanden, d.h.  $w_{\text{Netz}}$  ist konstant und gleich  $w_N$ . Im Inselbetrieb gilt dies jedoch nicht mehr. In der Modellierung ergibt sich  $w_{\text{Netz}}$  aus einer proportionalen Rückwirkung der Verbraucher  $df/dP$ . Die Verbraucher selbst sind aufgeteilt in einen variablen Ballast zur Drehzahlregelung, der aufgeschaltet wird sobald der Generator erregt ist. Des weiteren einen Eigenverbrauch des Krafthauses und einen Inselverbrauch, der eigentlichen Nutzlast.

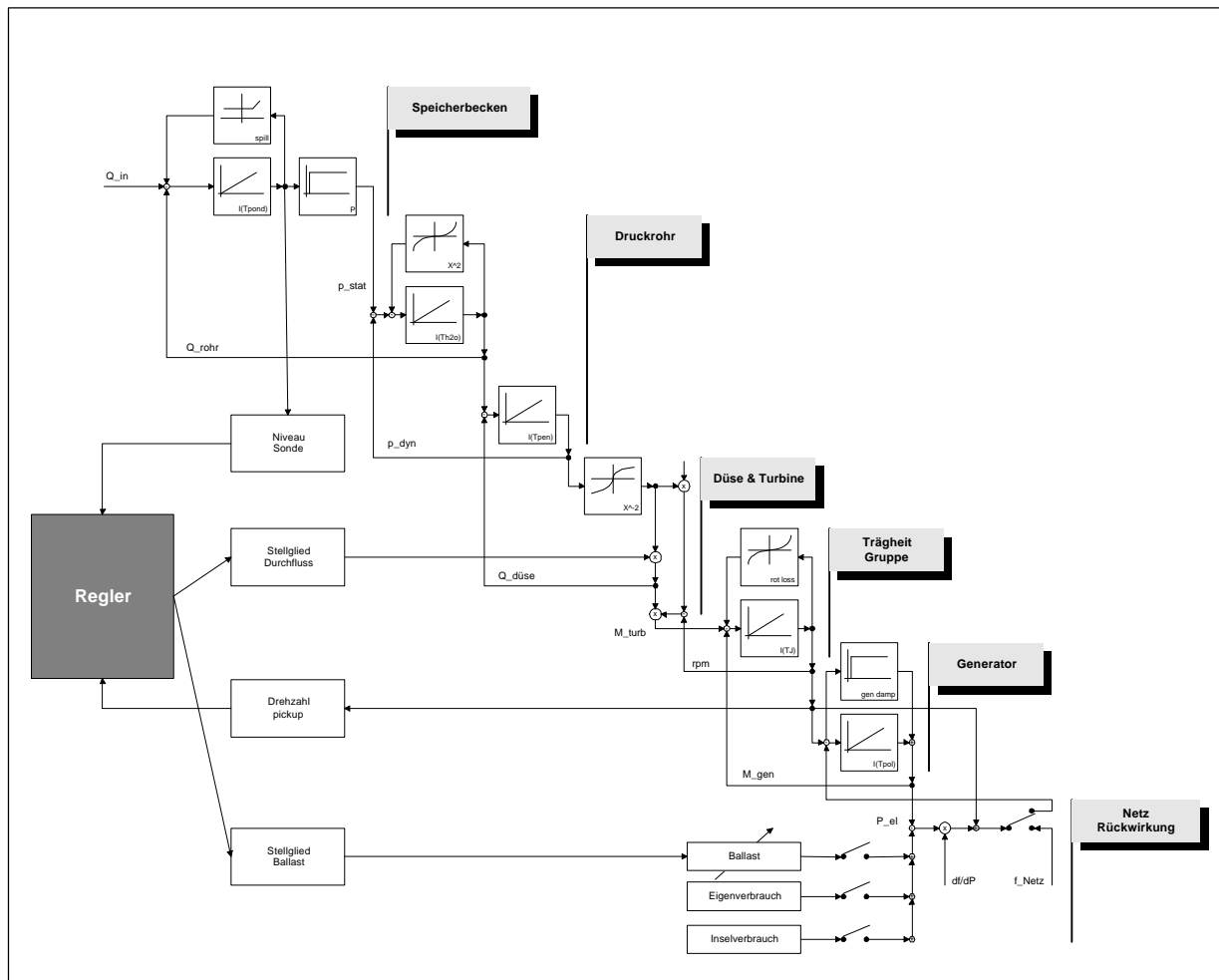
Damit sind die benötigten Blöcke zusammengetragen. Man erkennt, dass man gegebenenfalls einzelne Inhalte durch genauere Beschreibungen ersetzen kann, sofern die Input- und Output-Signale dieselben bleiben. Die Zeitkonstanten in dieser Modellierung bewegen sich zwischen  $T_{\text{pond}} > 10^3\text{s}$  über einige Sekunden für  $T_{h2o}$  bzw.  $T_J$  bis zu  $\approx 10^{-3}\text{s}$  für  $T_{\text{pen}}$  und  $T_{\text{pol}}$ . Dies ist bei der numerischen Integration gebührend zu beachten.

Diese Parameter sind in der folgenden Tabelle aus den Anlagendaten zusammenfassend für ein Beispiel berechnet.



reale Parameter				Modell Parameter			
Nennseefläche	A <sub>n</sub>	m <sup>2</sup>	500				
Nennseespiegel (vom tiefsten Niveau)	H <sub>see</sub>	m	5	Nennvolumen des Speichersees	V <sub>sn</sub>	m <sup>3</sup>	2'500.00
Nennzufluss des Speichersees	Q <sub>n</sub>	m <sup>3</sup> /s	1	normierter Zufluss			
				Zeitkonstante Niveauänderung	T <sub>see</sub>	s	2'500.00
Nennturbinendurchfluss	Q <sub>t,n</sub>	m <sup>3</sup> /s	0.4				
Überfallhöhe (vom tiefsten Niveau)	H <sub>slim</sub>	m	5.05	normierte Überfallhöhe	h <sub>slim</sub>	-	1.01
Secanstieg bei Nennüberfall	H <sub>ü</sub>	m	0.2	Überfall Effizienz	k <sub>s</sub>	-	25.00
Nettofallhöhe	H <sub>n</sub>	m	21	Niveauverhältnis	H <sub>ratio</sub>	-	0.24
Druckrohrinnendurchmesser	D	m	0.5	nominale Fließgeschwindigkeit	W <sub>n</sub>	m/s	2.04 nicht verwendet
Rohrwandstärke	d	m	0.008				
Druckrohrlänge	L	m	128	Anlaufzeitkonstante des Wassers	T <sub>h2o</sub>	s	1.27
Druckverlust bei Nenndurchfluss	H <sub>loss</sub>	m	1	normierter Druckverlust	fr <sub>pen</sub>	-	0.05
Elastizität des Rohres	E	GN/m <sup>2</sup>	150	Kompressionszeitkonstante	T <sub>stoss</sub>	-	0.0028
				Eigenfrequenz des Druckrohres	f <sub>rohr</sub>	1/s	2.67 nicht verwendet
Trägheit	J	kgm <sup>2</sup>	3.87				
Nennleistung					P <sub>n</sub>	kW	78.48 nicht verwendet
Nenndrehzahl	w <sub>n</sub>	rpm	1500	Anlaufzeitkonstante der Gruppe	T <sub>rot</sub>	s	1.22
Leistungsverlust bei Nenndrehzahl	P <sub>loss</sub>	%	0.1	Reibungsverluste		-	0.10
Polzahl	P		4	Nennfrequenz	f <sub>n</sub>	Hz	50.00
Nennpolradwinkel	Phi <sub>n</sub>	Grad	30	Zeitkonstante Polradwinkel	T <sub>en</sub>	s	0.0017
Netzurückwirkung					df/dp	-	0.0100

Abbildung 6.7: Tabelle von Eingabewerten für die Simulation für ein Beispiel



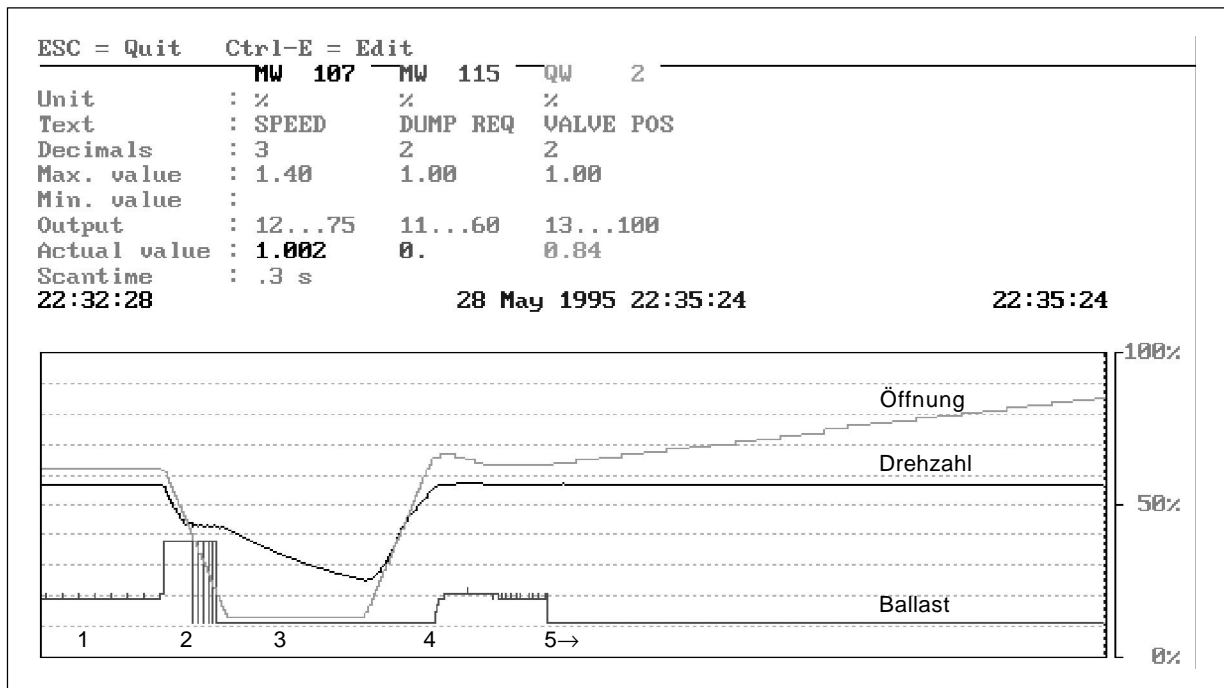


Abbildung 6.9: In dieser Simulation sind der zeitliche Verlauf für die Werte "Drehzahl", "Ballast" und "Öffnung" dargestellt.

1. Inselbetrieb mit konstanter Last. Die Drehzahl ist konstant bei konstanter Öffnung, der Ballast ist auf seinem Durchschnittswert und kompensiert von Zeit zu Zeit Drehzahlfluktuationen aus.
2. Schnellabschaltung: die Turbine fährt mit grösstmöglicher Geschwindigkeit zu, der Ballast bremst die Drehzahl auf die minimale Erregungsdrehzahl herunter und hält sie dort bis die Turbine vollständig geschlossen ist.
3. Jetzt läuft die Maschine im Leerlauf aus.
4. Die Maschine wird wieder angefahren mit maximaler Öffnungsgeschwindigkeit. Sobald die Nenndrehzahl erreicht ist setzt der Ballast mit der Bremsung ein und hält die Drehzahl konstant, obwohl die Öffnung deutlich überschwingt. Nach einiger Zeit hat sich wieder ein stabiler Inselbetrieb eingestellt.
5. Verbundfreigabe: sobald ein aufschalten zum Netz gewünscht wird, beginnt der Ballast die Maschine auf die Netzfrequenz "einzubremsen", ohne dabei die Öffnung zu verändern. Dies erlaubt eine schnelle Synchronisation. sobald der Netzschalter schliesst, wird der Ballast ausgeschaltet und die Pegelregelung setzt ein, dh die

Öffnung wird dem Pegelstand nachgefahren. In diesem Falle wird ein Dreipunktregler simuliert, wobei der Wasserstand "hoch" ist und die Turbine langsam schrittweise öffnet.

## 7. Fallbeispiel DTC Leitsystem

<b>7.1</b>	<b>Ausgangslage</b>	123
<b>7.2</b>	<b>Konzept und Funktionsbeschreibung</b>	124
<b>7.3</b>	<b>Komponenten des Systems</b>	127
7.3.1	Digitales Turbinenleitsystem DTC	127
7.3.2	Hydraulikaggregat zur Turbinenleitapparatverstellung	129
7.3.3	Elektronischer Leistungssteller EBC, mit Ballastwiderstand	130
7.3.4	Notstromversorgung 24V	131
<b>7.4</b>	<b>Leitsystem-Peripheriegeräte zur Anlagenüberwachung</b>	131
7.4.1	Druckmessonden	131
7.4.2	Drehzahlerfassungssensor	132
7.4.3	Temperatursensoren	132
7.4.4	Alarmanlage	132
<b>7.5</b>	<b>Elektrischer Leistungsschaltschrank</b>	133
<b>7.6</b>	<b>Benutzeroberfläche</b>	134
7.6.1	Schrank 1 (Bedienung-Regelung-Steuerung-Überwachung)	134
7.6.2	Schrank 2 (Produktionsanzeigen)	136
<b>7.7</b>	<b>Software</b>	137



## 7. Fallbeispiel DTC Leitsystem

Regelung, Betriebssystem und Schaltanlage

### 7.1 Ausgangslage

Das Fallbeispiel beinhaltet alle Komponenten zur Regelung, Steuerung und Ueberwachung sowie den elektrischen Leistungsschaltschrank einer Anlage mit 55 kW Nennleistung, bestehend aus einer Durchströmturbine mit Flachriemenantrieb und einem 70 kVA Synchrongenerator mit 1500 1/min. Der Betrieb der Anlage erfolgt vollautomatisch mit der Zusatzfunktion einer Hochwasserabschaltung aufgrund des Unterwasserpegels. Für einen wärterlosen Betrieb soll eine Fernabfragemöglichkeit gegeben sein. Die vollständigen, für die Auslegung des Regelsystems benötigten Daten sind aufgrund der ausgeführten Berechnungen aus der nachfolgenden Tabelle ersichtlich.

Wassermenge	$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	0.4
Gefälle	$H_b \text{ [m]}$	21.0
Nettodruckhöhe	$H_n \text{ [m]}$	19.5
Nennleistung	$P \text{ [kW]}$	55
Druckleitung	$\varnothing \text{ [m]}$	0.5
Länge	$L \text{ [m]}$	128
Wandstärke	$t \text{ [m]}$	0.006
Material: Stahl St. 50	$E \text{ [N/mm}^2]$	$210 \cdot 10^4$
zul. Maximaldruck	$p_{\max} \text{ [m]}$	2.0 $H_n$
Massenträgheitsmoment Turbine, inkl. Riemenscheibe	$J_t \text{ [kgm}^2]$	4.0
Turbinendrehzahl	$n_t \text{ [1/min]}$	750
Massenträgheitsmoment Generator, inkl. Riemenscheibe	$J_g \text{ [km}^2]$	2.87
Generatordrehzahl	$n_g \text{ [1/min]}$	1500
Leistung elektrische Bremse	$P_{br} \text{ [kW]}$	27
kürzeste Oeffnungszeit	s	2.0
kürzeste Schliesszeit	s	2.0
max. Drehzahl bei Vollastabschaltung	%	125

## 7.2 Konzept und Funktions- beschreibung

- **Allgemeine Funktionen:** Das System ist modular aufgebaut. Digitale und analoge Eingangssignale, welche über die entsprechenden Eingangsmodule der zentralen CPU zugeführt werden, werden von der, auf dem System residenten Applikation ausgewertet. Die Anwendungssoftware erzeugt entsprechend den gesetzten Parametern binäre und analoge Ausgangssignale, welche über die entsprechenden Ausgangsmodule des Systems die internen und peripheren Aktuatoren wie Hydraulikventile und Relais ansteuern. Typische Parameter sind Grenzwerte der Betriebsdaten der Anlage und Zeitkonstanten. Damit lassen sich alle Ereignisse in Bezug auf den zugrundeliegenden (Grenz)wert sowohl wertmässig als auch dynamisch beliebig einstellen.

Das System verfügt über eine "elektrische Bremse", welche ein kostspieliges Schwungrad überflüssig macht. Die Ansteuerung der im Nulldurchgang schaltenden Halbleiterschalter erfolgt pulsweise nach einem speziell entwickelten Algorithmus in Abhängigkeit der Regelabweichung. Damit wird ein stabiles Regelverhalten erreicht. Die Ansteuerung des Leistungsstellers erfolgt automatisch im Inselbetrieb zur Drehzahlregelung, beim Synchronisiervorgang und bei Lastabwurf. Im Verbundbetrieb ist der Leistungssteller ausgeschaltet. Es erfolgt damit kein störendes "verheizen" von Energie.

- **Automatischer Startvorgang, Synchronisierung und Parallelbetrieb = Niveauregelung:** Bei regulärer Netzspannung und einem Wasserstand innerhalb der festgesetzten Limiten läuft die Anlage automatisch an, wenn der Betriebswahlschalter auf AUTOMATIK steht. Die Magnetventile der Hydraulikeinheit werden pulsweise angesteuert wodurch der Leitapparat langsam öffnet, bis die Nenndrehzahl erreicht ist. Ist der Impulstaster auf NETZ EIN (Schalter leuchtet), dann wird der Ballastwiderstand EBC so angesteuert, dass die Drehzahl um die Nenndrehzahl pendelt. Das Ueberwachungsgerät ASG überwacht dabei die Netz- und Generatorgrößen Spannung, Frequenz und Phasenlage und übermittelt bei Uebereinstimmung einen Zuschaltbefehl an den Netzschütz. Dieser schaltet die Wasserkraftanlage synchron ans Netz. Gleichzeitig wird der Ballastwiderstand ausgeschaltet.



Liegt der Wasserstand über dem eingestellten Sollwert, öffnet der Turbinenleitapparat kontinuierlich, bis der Sollwasserstand erreicht ist. Danach regelt der DTC auf konstanten Oberwasserstand mittels nachfahren der Turbinenöffnung. Die Dynamik des Leitapparates wird bei Inbetriebnahme so eingestellt, dass kein unerwünschtes Pendeln des Wasserstandes im Oberwasser oder Druckstöße entstehen. Sinkt der Wasserstand unter die definierte Minimalgrenze, wird die Anlage vom Netz getrennt und die Turbine vollständig geschlossen.

Fällt das Netz aus, während die Anlage parallel dazu arbeitet, wird dies von der Netzüberwachung erfasst. Es erfolgt eine sofortige Trennung vom Netz, die Turbinenanlage arbeitet dann automatisch im Inselbetrieb (drehzahl geregelt) weiter. Bei Rückkehr der Netzspannung erfolgt nach einer einstellbaren Wartezeit erneut der Synchronisationsvorgang.

- **Autonomer Inselbetrieb = Drehzahlregelung:** Bei Betriebswahlschalterstellung AUTOMATIK und Impulstaster auf Stellung Insel (Netz EIN leuchtet nicht), startet die Anlage in der oben beschriebenen Weise. Hier erfolgt die weitere Öffnung des Leitapparates jedoch nach dem Leistungsbedarf der an das Inselnetz zugeschalteten Verbraucher. Aus Gründen der Anlagensicherheit bei Netzausfall ist vorgesehen, die Schützenantriebe vom Inselnetz zu speisen. Damit kann bei Netzausfall und gleichzeitigem Hochwasser die Öffnung des Grundablasses und anderer Entlastungsschütze zuverlässig erfolgen.

Im Inselbetrieb erfolgt die Verstellung der Turbinenleitapparates aufgrund der Drehzahlabweichung. Der Ballastwiderstand wird dabei mit einer (einstellbaren) Grundlast von ca. 10 kW gespeist. Damit ist bei Lastsprüngen im Inselnetz ein rasches Ausgleichen der Insellast möglich. Die Drehzahl wird damit innerhalb definierter Grenzen gehalten. Aufgrund der Massenträgheit erfolgt die Leitapparatverstellung langsamer als die Reaktion des Ballastwiderstandes. Die Applikation arbeitet in der Weise, dass nach sofortiger Reaktion des Ballastes die Leitapparat-Nachstellung erfolgt und damit die Belastung des Widerstandes auf den eingestellten Durchschnittswert zurückgestellt wird.

- **Notabschaltfunktion = sichere Stilllegung der Anlage bei Störungen:** Die integrierte Watchdogfunktion des Gerätes und die konsequente Implementierung von Sicherheits-

funktionen in allen relevanten Systemkomponenten bewirken ein reibungsloses Abschalten der Anlage im Falle von ernsthaften Störungen. Das Leitsystem unterscheidet drei Kategorien von Störfällen und reagiert darauf in unterschiedlicher Weise.

**Störung Netzausfall (Priorität III):** Dabei erfolgt sofortige Trennung der Erzeugeranlage vom Netz und volle Zuschaltung des Lastwiderstandes. Letztere limitiert den resultierenden transienten Drehzahlanstieg. Gleichzeitig werden die Magnetventile der Hydraulikeinheit stromlos geschaltet; die Leitapparate schliessen mit der maximalen Schliessgeschwindigkeit durch Druckversorgung aus dem Druckspeicher, bis die Nenndrehzahl erreicht wird. Die Anlage läuft weiter im Inselbetrieb und falls eine Rückkehr der Netzspannung festgestellt wird, erfolgt nach eingestellter Wartezeit eine erneute Netzzuschaltung. Die Störungsmeldung bleibt bis zur Quittierung erhalten.

**Störung ohne Netzausfall mit Wegfall der Störung und Neustart (Priorität II):** Bei solchen schaltet die Anlage beim auftreten der Störung kontrolliert ab. Der Turbinenregler übermittlelt an die Hydraulik kontinuierliche Schliessbefehle und die Anlage wird durch die erhalten bleibende Netzeinspeisung abgebremst, bis bei Erreichen des motorischen Betriebs die Netztrennung und der Generatorabwurf erfolgt. Die angezeigte Fehlermeldung (Klartext) bleibt bei Wegfall der Störung bis zum Quittieren erhalten. Die Erzeugergruppe schaltet sich nach einer frei programmierbaren Wartezeit wieder auf. Zu der beschriebenen Art von Störung gehören:

- Unterschreitung des Minimalwasserstandes im Oberwasser
- Hochwasserauslösung (dabei erfolgt zusätzlich ein akustischer Alarm)

**Störung ohne automatischen Neustart (Priorität I):** Der Abschaltvorgang läuft wie oben beschrieben ab. Es erfolgt jedoch erst ein automatischer Neustart, wenn die Störungsmeldung manuell quittiert wird. Dazu gehören u.a.:

- alle Temperaturüberschreitungen
- die Unterschreitung des Hydraulikminimaldruckes
- mehrmaliger Wassermangel in Folge

**Wenn mehrere Störungen gleichzeitig auftreten:** Verfährt das System nach der höheren Priorität.

**Fernmeldekonzepkt:**

Die kostengünstigste Art der Datenübertragung, welche nicht auf die in der Nähe liegende Liegenschaft beschränkt zu bleiben braucht, erfolgt auf der Basis einer normalen Telefonleitung. Dazu wird ein Modem eingesetzt, welches mit dem DTC kommuniziert. Es ist damit möglich die Anlagedaten abzufragen, eine Fernabschaltung vorzunehmen und, in umgekehrter Richtung, kann das Leitsystem im Falle einer Störung eine beliebige Telefonnummer anrufen und eine aufgezeichnete Wortmeldung durchgeben. Der Empfänger des Anrufs ruft dann die Anlage zurück und fragt die Art der Störung im Klartext ab

## 7.3 Komponenten des Systems

Das digitale Turbinenleitsystem (DTC) übernimmt alle Regel- und Ueberwachungsfunktionen. Eine Abschaltung der Anlage erfolgt automatisch im Falle von Störungen, selbst wenn diese im DTC selbst auftreten. Das System besteht aus den folgenden Komponenten.

### 7.3.1 Digitales Turbinenleitsystem

**Typ DTC**

Das System DTC übernimmt sämtliche anfallenden Regel- Steuer- Ueberwachungs- und Meldeaufgaben, sowie Notabschalt- und Alarmfunktionen, die zwingend oder optional erfüllt werden sollen. Alle Funktionen werden dabei in der objekt-spezifischen Applikation (Anwendungsprogramm) definiert und parametrieret. Das System wird dauernd von der Notstromversorgung mit 24 VDC versorgt, sodass dessen Verfügbarkeit auch bei Netzausfall und Abschaltung der Anlage über Stunden gesichert bleibt.

**Spezifikationen:**

- Alu-Wandschrank, auf Sockel stehend, (identisch in Grösse und Bauart zum elektrischen Schaltschrank). Frontpanel mit Bedienungselementen und Anzeigen, als Tür mit Scharnieren und Stangenschloss ausgebildet. Baumasse: Grundfläche 400 x 1000 x 1600 hoch. Schutzart IP53.
- EMV-geschützte 32 bit CPU mit Speisung und vier seriellen Kommunikationsschnittstellen. Das Betriebssystem und die Applikationssoftware sind permanent im Flash-EPROM gespeichert. An den RS232-Schnittstellen sind folgende Geräte angeschlossen: Zwei Bedienkonsolen, Störmeldeprotokolldrucker, Modem für Fernabfrage, Fernbedienung und Störferrnmeldung, oder eine PC-online Verbindung für Inbetriebnahme und Parametrierung
- spezielle Ein-/Ausgangsmodule gemäss den definierten Funktionen, wie:
  - Betriebsstatus- und Alarmmeldungseingänge
  - Messeingänge für Wasserpegel und Drehzahl
  - Ausgänge für Signale an Stell- und Meldeaggregate
- Integrierte Notschlussschleife, Watchdog-Funktion
- 5 Gleichstromrelais, auf Klemmenblock verdrahtet, Schaltleistung 3A.
- Melde- und Bedienpanel, eingebaut in Gehäusefront, zur Anzeige sämtlicher Betriebszustand- und Störungsmeldungen sowie zur Bedienung der Anlage. LCD-Textdisplay 2 x 40 Zeichen, mit Funktions- Cursor- und Hilfetext-Tastatur. Funktionen gemäss separater Darstellung.
- ASG Synchronisier- und Messgerät für die vollautomatische Synchronisierung des Generators an das Netz und die Erfassung sämtlicher relevanter Generator- und Netzdaten, in Gehäusefront eingebaut. Alle Grenzwerte der erfassten Daten sind frei programmierbar. Das Gerät verfügt über drei Multifunktionstasten zur Wahl der angezeigten Daten und für die Programmierung und eine gut lesbare LED-Anzeige von 2 x 16 Zeichen.

- Weitere Bedienelemente: eingebaut in Gehäusefront, gravierte Beschriftung, wie folgt:
  - Betriebswahlschalter MANUELL - AUS - AUTOMATIK
  - Selbstrückstellender Wippschalter Turbine AUF - ZU (nur im MANUELL mode aktiv)
  - Drucktaster für Anwahl NETZBETRIEB
  - NOT-AUS Pilztaste, mit Rückstellschloss
- Störmeldeprotokolldrucker, eingebaut in Gehäusefront, mit auswechselbarer Thermo-papierrolle (60mm Papierbreite, max 64 Zeichen pro Zeile) und grosser Druckgeschwindigkeit max. 400 dotlines/s. Der Drucker ist grafikfähig.
- Drehpotentiometer mit Motorantrieb zur automatischen  $\cos\phi$  Regelung, in Gehäusefront eingebaut und manuell verstellbar.
- Modem mit 14'400 Baud, im Gehäuse untergebracht, verbunden mit einer seriellen Schnittstelle des DTC und angeschlossen an die vorhandene Telefonleitung. Zur Fernabfrage, Alarmfernmeldung mit Voice-Funktion.

### **7.3.2 Hydraulikaggregat zur Turbinenleitapparatverstellung**

Das Hydraulikkonzept wurde speziell für den Betrieb mit dem Leitsystem DTC entwickelt und ist speziell für die Anlage ausgelegt. Das Sicherheitskonzept wurde auch hier konsequent umgesetzt: fällt das Leitsystem total aus, schliesst die Hydraulik die Leitapparate der Turbine zuverlässig. Dies wird auf einfache Weise dadurch erreicht, dass bei stromlosen Magnetventilen der im Öldruckspeicher vorhandene Druck voll auf die schliessende Seite des Hydraulikkolbens wirkt, während die gegenüberliegende Kolbenseite drucklos ist. Ein weiteres Element der Betriebssicherheit besteht darin, dass die minimale Schliess- und Öffnungszeit der Hydraulik nicht von der Elektronik oder der Software des Leitsystems abhängt, sondern dass diese an unempfindlichen Drosseln mechanisch eingestellt werden kann. Die Hydraulikeinheit besteht aus folgenden Komponenten:

- Elektromotor 1,1 kW, 3-phasig, nach ICE-Norm, zum Antrieb der axialspaltkompensierten Hochdruck Zahnradpumpe, Fördervolumen 4,5 l/min.

- Differentialsteuermodul mit 4 2/2-Wege Sitzventilen, leckfrei, Verkettungsmodul mit Druckschalter, Druckbegrenzung und Drosselventil
- Rücklaufölfilter (Wechselpatrone), Saug-Wechselfilter und Druckfilter vor den Sitzventilen
- Niveauanzeige mit Thermometer
- Ölbehälter 25 l mit Entleerungsanschluss und Einfüller/Belüfter
- Membrandruckspeicher mit Stickstoffladung, Volumen 3 Liter, Prüfdruck 315 bar
- Handpumpe für den manuellen Start der Erzeugergruppe, wenn weder Oeldruck noch Netzspannung zur Verfügung steht.
- Manometer NG63 mit separatem Messanschluss
- Hydraulikzylinder, Kolbendurchmesser 50 mm x 135 mm Hub, angepasst an die Hebellänge und den Stellweg des Turbinenleitapparates.
- Gepanzerte Hochdruckverbindungsschläuche zwischen Hydraulikeinheit und Stellzylinder.
- Elektroklemmenkasten für externe Anschlüsse, inkl. Anschlusschema

### 7.3.3 Elektronischer Leistungssteller EBC, mit Ballastwiderstand

Innovativer Bestandteil des Leitsystems ist eine elektronische Ballastwiderstandsansteuerung, welche durch die Softwareapplikation als stufenlose elektrische Bremse funktioniert. Die Bestandteile sind:

- 4 Halbleiterschalter, 3-phasig, aufgebaut auf Kühlkörper. Die Zuschaltung erfolgt pulsweise nach einem speziellen Algorithmus und erfolgt nur bei Nulldurchgang der Sinuswelle. Damit werden störende Verzerrungen und Netzharmonische vermieden.
- Strahlungsheizung als Ballastwiderstand, bestehend aus 3 Gruppen mit jeweils doppelter Leistung, Gesamtkapazität 27 kW. Die Heizelemente sind in einem belüfteten Gehäuse isoliert und berührungssicher untergebracht. Die beim Betrieb anfallende Wärme erzeugt einen für die Kühlung ausreichenden Luftstrom. Es wird kein Ventilator benötigt.
- Masse: 860B x 480T x 670H

#### 7.3.4 Notstromversorgung 24V

Für die dauernde Bereitschaft des Leitsystems und die Auslösung von akustischen Alarmen wird eine Notstromversorgung benötigt. Das integrale Sicherheitskonzept sieht die dauernde Ueberwachung der Batteriespannung durch den DTC vor. Bei unterschreiten des definierten Minimalwertes liegt ein Defekt an der Notstromversorgung vor und die gesamte Anlage wird nach dem Verfahren für Notabschaltpriorität I abgeschaltet.

Die Notstromversorgung besteht aus:

- Ladegerät, primärgetaktet mit I/U Kennlinie 27,6V/6A
- Tiefentladeschutz
- 2 wartungsfreie, ventilregulierte Bleiakumulatoren 12V/24Ah
- Aufbau auf Montageschienen für den Einbau in den Elektroschaltschrank

### 7.4 Leitsystem-Peripheriegeräte zur Anlagenüberwachung

#### 7.4.1 Druckmessonden

Zur Wasserstandserfassung im Oberwasser und Hochwasser im Maschinenhaus.

##### Typ ED 552

Piezoresistiver Druckmessumformer für Tiefenmessung. Je ein Stück gelangt im Oberwasser (Niveauregelung) und im Unterwasser/Maschinenhaus (Hochwasserabschaltung) zum Einsatz. Der Einbau erfolgt in ein unten offenes Montagestahlrohr, welches an geeigneter Stelle permanent verankert wird.

- Messbereich: 0 .... 400 mbar
- Drucküberlastbarkeit: 4 bar
- Fehlergrenze: 0.5% FS
- Ausgangssignal: 4 .... 20 mA
- Speisung: 24VDC

**Funktionsweise:**

Der Druckmessumformer wird so eingebaut, dass er ständig im Wasser liegt. Der Wasserdruck erzeugt eine druckproportionale Verformung der Messmembran, welche in ein lineares Signal von 4 ... 20 mA umgesetzt wird. Die Speisung und Auswertung des Drucksignals erfolgt über ein gemeinsames Kabel durch das System über den entsprechenden Analogeingang. Beliebige Schaltpunkte können softwaremässig durch Parameter definiert werden. Dies bedeutet, dass eine Verstellung und Optimierung der Betriebspunkte ohne physische Eingriffe einfach möglich ist.

**7.4.2 Drehzahlerfassungssensor**

zur Überwachung der Turbinendrehzahl

**Typ DSH**

Der Sensor wird an geeigneter Stelle berührungsfrei über das freie Ende der Turbinenwelle angeordnet. Durch die vorhandene Keilbahn wird bei jeder Umdrehung ein Impuls in den Sensor induziert. Die Speisung und Auswertung erfolgt über ein gemeinsames Kabel und den entsprechenden Analogeingang.

**Funktionsweise:**

Der +/- 0.1% genau gemessene Drehzahlwert wird vom Leitsystem mit dem Sollwert verglichen. Das Signal dient im Inselbetrieb zur Drehzahlregelung, beim Anfahren und Synchronisieren zum Einstellen der Nenn-drehzahl. Bei den übrigen Betriebszuständen erfolgt die Überwachung der Drehzahl und falls nötig eine Abschaltung.

**7.4.3 Temperatursensoren**

Zur Überwachung der Betriebstemperaturen kritischer Bauteile

**Typ PT100**

Die Temperatursensoren werden für die Überwachung aller kritischen Temperaturen eingesetzt (Lager, Öl). Das temperaturlineare Ausgangssignal wird dabei vom System verarbeitet und dient beim eingestellten Wert als Auslösung für die Notabschaltfunktion (Priorität I)

**7.4.4 Alarmanlage**

2 Akustische Hörner, Typ HTG, 24 VDC, welche von der Notstromanlage gespeist werden. Es kann softwaremässig frei definiert werden, bei welchen Störungen ein akustischer Alarm ertönen soll.



## 7.5 Elektrischer Leistungsschaltschrank

### Typ S150

Der Alu-Wandschrank des elektrischen Leistungsteils entspricht in Grösse und Bauweise demjenigen des DTC. Er enthält alle Absicherungen, Leistungsschaltelemente, Anschlussklemmen, verschiedene Anzeigen und die Notstromversorgung, wie folgt:

#### Die wichtigsten Komponenten sind:

- Alu-Wandschrank mit Fronttür, Scharnieren und Stangenschloss, auf Sockel stehend, Masse: 400T x 1000B x 1600H
- Sammelschiene Inselbetrieb
- Sicherungsgruppen (Automaten) Inselverbraucher: 1A, 6A, 13A, 40A
- Absicherung Netzeinspeisung 180A
- Generatorschutzschalter mit thermischer und magnetischer Auslösung
- Leistungsschutz für Aufschaltung Generator auf das Inselnetz, 100A
- Leistungsschutz für Zuschaltung/Synchronisierung öffentliches Netz, 100A
- Absicherung Notstromversorgung, 24VDC, 6A
- Stromwandler für die Messung benötigter Generator- und Netzgrössen (die Ueberwachung dieser Grössen erfolgt vom Gerät ASG)
- Klemmenblock für alle externen Anschlüsse
- alle Hilfsrelais für die Ansteuerung peripherer Geräte / Motoren
- vollständige interne Vorverdrahtung
- Leistungskabel zwischen Generator, Schaltschrank und Einspeisepunkt
- Anschlusschema, Schaltschema
- Schutzart IP53

## 7.6 Benutzeroberfläche

(vgl. Abb. 2.5)

### 7.6.1 Schrank 1 (Bedienung-Regelung-Steuerung-Überwachung)

Der Schrank 1 enthält alle Systemkomponenten die die Anlage regeln, steuern und überwachen. Alle Anzeigen und Bedienelemente auf der Front beziehen sich daher auf die Funktion und den Betriebszustand der Gesamtanlage. Dazu gehören:

#### 1x Bedienkonsole

Diese dient zur Eingabe aller wichtigen Kommandos und Abfragen der Anlage. Die vom Bedienpersonal auszuführenden Manipulationen sind, durch Zugangsberechtigungen geschützt, menügeführt mit Klartext Instruktionen und Hilfstexten. In jedem Operationsmode werden die aktuellen Werte der Anlage angezeigt. Besondere Ereignisse und Notfälle werden durch entsprechende Leuchten und Klartexte angezeigt und das Bedienpersonal wird durch Textanweisungen zu einer Lösung geführt. Die Konsole umfasst:

- LCD Display, 2zeilig mit je 40 Zeichen, 8x5 Matrix, 5mm hoch
- Folientastatur (Polyester), mit mechanischem Taster
- Funktionstasten F1...F8 mit jeweils einer roten und grünen Melde LED.
- Zehner Tastatur für Sollwerteingaben
- Cursortasten mit LED und Steuertasten für Menü und Sollwerteingabe.
- wichtige Informations LED's zum PCS Status.
- Resettaste

#### 1x Bedienkonsole ASG:

Dieses Anzeige- und Bediengerät erfüllt im wesentlichen zwei Funktionen: das Automatische Synchronisier Gerät ermöglicht im Zusammenspiel mit dem Leitreehner ein einwandfreies aufschalten auf das Netz sowie ein unmittelbares abwerfen vom Netz im Störunqsfall. Weiter übermittleit der genaue Messteil alle nötigen Netzdaten in digitaler Form zum Leitreehner und ermöglicht damit eine weitreichende Bearbeitung dieser Daten, wie zB Datenfernübertragung. Die Funktionen sind:

Ausgabe Synchronisierungspuls (Parameter sind maximal zulässige Differenzfrequenz & -spannung, Schaltereigenzeit etc.).

serielles Übermitteln aller Daten die laufend erhoben werden an den Leitrechner (Spannungen, Ströme, Leistung, Leistungsfaktor).

Ausgabe von Abschaltimpulsen wenn die eingestellten Grenzwerte überschritten werden.

**1x Fronteinbaudrucker:**

Dieser Matrix-Thermo-Drucker/Plotter steht als Protokollmeldedrucker zur Verfügung. Er gibt alle wichtigen (Fehler) Ereignisse und Tagesprotokolle auf dauerhaftem Thermopapier aus.

Die weiteren Bedienelemente sind als übliche Dreh-Schalter und Taster mit gut lesbarer Beschriftung ausgelegt. Ihre Funktion umfasst die „täglichen“ Manipulationen der Anlage und verringern dadurch die Bedienunsicherheit von unroutiniertem Personal.

**1x Wippschalter**

(3 Positionen rastend): Mit diesem Schalter wird die Anlage EIN und AUS geschaltet (gestartet und gestoppt) sowie der Betriebsmodus (AUTOMATIK oder MANUELL) der Anlage gewählt. Die drei Wahlpositionen sind (AUTOMATIK, AUS und MANUELL). In der Mittelstellung AUS stoppt die Anlage; in den beiden anderen fährt sie in den jeweiligen Betriebsmodus an.

**1x Wippschalter**

(3 Positionen rückstellend): Mit diesem Schalter kann die Turbine in den manuellen Betrieb AUF und ZU gefahren werden. Dabei bleiben selbstverständlich alle Schutz- und Überwachungsfunktionen erhalten, insbesondere das Verhindern einer Über- oder Unterdrehzahl im Inselbetrieb.

**1x Drehknopf:**

dieser dient zur manuellen Verstellung der Generatorspannung (im Inselbetrieb) oder des Leistungsfaktors (im Verbundbetrieb). Er ist Teil des Motorpotentiometers, das im AUTOMATIK-Betrieb von der Software gesteuert wird.

**1x Taster**

(selbstleuchtend): dieser Taster dient zur manuellen Wahl des Betriebsmodes INSEL oder VERBUND. Damit kann die Anlage Wahlweise bis ans Verbundnetz oder nur auf das Inselnetz gefahren werden. Auch lässt sich damit die laufende Anlage vom Verbund trennen und als Insel weiter betreiben. Sobald die DTC12-Überwachung aus Sicherheitsgründen eingreifen muss, wird die Handwahl ausser Kraft gesetzt und der aktuelle Zustand auf der Leuchte angezeigt.

**1x Notaus Taster:**

fährt die Anlage schnellstmöglich zu und unterbricht die Netzverbindung.

**7.6.2 Schrank 2 (Produktionsanzeigen)**

Der Schrank 2 enthält alle Systemkomponenten, die Leistungen schalten, schützen und messen. Alle Anzeigen auf der Front beziehen sich daher auf die Betriebsdaten der Anlage, bezogen auf die elektrischen Grössen an den Generatorklemmen. Dazu gehören:

**3x Ampère-meter:**

Phasenströme (0-250A) (redundant mit ASG411 Anzeige)

**2x Volt-meter:**

Verschiedene Inselbusspannungen (redundant mit ASG411 Anzeige)

**2x 6fach Umschalter:**

ermöglicht die Anwahl verschiedener Spannungen (Phase-Phase, Phase-Null)

**1x kW-meter:**

Darstellung der Produzierten Wirkleistung (redundant mit ASG411 Anzeige)

**1x Frequenzmeter:**

Anzeige der Generator/Netzfrequenz (redundant mit ASG411 Anzeige)

**1x Betriebsstundenzähler:**

kumuliert die Betriebsstunden der Anlage

**1x kWh/kVarh-meter:**

produzierte/konsumierte Wirk- bzw Blindenergie.

## 7.7 Software

Die Reglercharakteristik für die Anlage ist softwaremässig implementiert. Dies heisst, dass alle Einstellungen durch die Eingabe von Parametern am PC vorgenommen werden. Es wird dabei mit Vorteil das folgende Vorgehen gewählt:

### **Berechnen und festlegen der Parameter:**

Gemäss den Daten der Anlage werden Parameter wie Oeffnungs- und Schliesszeiten berechnet und Grenzwerte, wie zum Beispiel für die maximale Ueber- und Unterdrehzahl werden festgelegt.

### **Simulation der Anlage im Modell:**

Die Anlagedaten werden zusammen mit den berechneten Parametern in das Simulationsmodell übertragen. Eine erste Optimierung der Parameter geschieht nun mittels der grafischen Darstellung des dynamischen Ablaufs in Extremsituationen (z.B. Vollastabschaltung).

### **Uebernahme der Parameter und Optimierung bei der Inbetriebnahme**

Durch verschiedene Zu- und Abschaltversuche, sowie die Betätigung aller Funktionen der Anlage, werden die Parameter on-line empirisch optimiert, bis ein optimales Betriebsverhalten erreicht wird.

Oft können aufgrund der momentanen Bedingungen nicht alle Parameter schon bei der Inbetriebnahme optimiert werden. In diesem Fall geschieht eine Veränderung später, wenn das Problem auftritt. Typisch für eine solche Situation ist beispielsweise ein Hochwasser, das abgewartet werden muss, um die Anlage diesbezüglich zu optimieren.

Für die dargestellte Anlage werden etliche Dutzend Parameter verwendet. Damit ist es möglich, alle Funktionen in der gewünschten Weise zu beeinflussen. Aus der nachfolgenden Parameterliste ist ersichtlich, welchem Zweck die wichtigsten dienen. Interessant ist die Art der Darstellung der Parameter: Sollwerte werden generell als 100% dargestellt, womit für zulässige Abweichungen, Totband und Hysterese auch Prozentzahlen verwendet werden können. Parameter mit einer Zeitfunktion, einer Verstärkungsfunktion oder zur Skalierung werden andererseits in absoluten Werten wie Sekunden oder als Faktoren angegeben.

Code	Bezeichnung	Wert	Unit	Erläuterung	Zweck
PW00	rspeed	100.00	%	Nenn Drehzahl der Maschine n	Drehzahlregler
PW01	rspeed_incr	0.00	%	Drehzahl Sollwertanhebung vor Netz EIN	
PW02	speed_Pval	20.00	-	Drehzahl Proportional-Verstärkung P	
PW03	speed_lval	0.50	s	Drehzahl Nachstellzeit Ti	
PW04	speed_Dval	0.50	s	Drehzahl Vorhaltezeit Td	
PW05	aspeed_scale	1.06	-	Skalierungsfaktor des Drehzahl Istwertes	
PW06	aspeed_filter	0.00	-	Drehzahl Istwert Filter	
PW07					
PW08	hyd_minstep	0.05	s	min. Schaltzeit der hydr. Ventile [s]	Ballastregler
PW09					
PW10	ebc_avload	50.00	%	mittlere elektrische Last in % Ballast	
PW11	ebc_startld	100.00	%	Anfahrlast vor Netz EIN in % Ballast	
PW12	ebc_Pval	5.00	-	Ballast Proportional Verstärkung P	
PW15	ebc_Dval	00.50	s	Ballast Vorhaltezeit Td	Pegelregler
PW16					
PW17	level_Pval	00.50	-	Pegel Proportional Verstärkung P	
PW18					Generator Erregung
PW19	genexc_low	80.00	%	unterer Drehz. Grenzwert Erregung	
PW20	genexc_l_hys	5.00	%	untere Drehz. Grenzwert Hysterese	
PW21	genexc_high	130.00	%	oberer Drehz. Grenzwert Erregung AUS	
PW22	genexc_h_hys	5.00	%	obere Drehz. Grenzwert Hysterese	
PW23					Notabschaltung
PW24	embrake_low	120.00	%	untere Drehz. Limite Notbremse EIN	
PW25	embrake_high	130.00	%	obere Drehz. Limite Notbremse 100%	
PW26	ospeed_lim	140.00	%	Überdrehzahl Limite für Notschluss	
PW27	ospeed_hys	5.00	%	Überdrehzahl Hysterese Notschluss	
PW28					Generatorschutz
PW29	genfreq_rated	100.00	%	Generator Sollfrequenz	
PW30	genfreq_low	96.00	%	unterer Grenzwert Generatorfrequenz	
PW31	genfreq_high	104.00	%	oberer Grenzwert Generatorfrequenz	
PW32	genvolt_rated	100.00	%	Generator Sollspannung	
PW33	genvolt_low	90.00	%	unterer Grenzwert Generatorspannung	
PW34	genvolt_high	110.00	%	oberer Grenzwert Generatorspannung	
PW35	gen_timedel	1.00	s	Zeitverzögerung Generatorschutz	
PW36					Netzschutz
PW37	gridfreq_rated	100.00	%	Netz Sollfrequenz	
PW38	gridfreq_low	99.20	%	unterer Netzfrequenz Grenzwert	
PW39	gridfreq_high	100.80	%	oberer Netzfrequenz Grenzwert	
PW40	gridvolt_rated	100.00	%	Netz Sollspannung	
PW41	gridvolt_low	90.00	%	unterer Netz Sollspannung Grenzwert	
PW42	gridvolt_high	110.00	%	oberer Netz Sollspannung Grenzwert	
PW43	grid_timedel	0.10	s	Zeitverzögerung Netzschutz	
PW44					
PW45					

Parameterliste des DTC Systems der beschriebenen Anlage

# Bibliographie

**Regelungstechnik, Einführungen in die Methoden und ihre Anwendung**

*Föllinger O.*

Hüthig Verlag, 1984

**Regelungstechnik, ein Leifaden für Einsteiger**

Klockner-Moeller, G 27-2102

**Kleines Handbuch Technischer Regelvorgänge**

*Oppelt W.*

Verlag Chemie 1972

**Elektronisch geregelte Kleinkraftwerke**

*Keller Chr., Hug Chr., Widmer R.*

„Sulzer Technical Review“, no. 1/94, pp. 34-37, 1994

**Governor Product Information**

*Fischer G., Arter A., Meier U., Chapallaz J.-M.*

MHPG Series- Harnessing Water Power on a Small Scale- Vol8

SKAT 1990

**Village Electrification**

*Widmer R., Arter A.*

MHPG Series- Harnessing Water Power on a Small Scale- Vol5

SKAT 1992

**Manual on Pumps used as Turbines**

*Chapallaz J.-M., Dos Ghali J., Eichenberger P.*

MHPG Series- Harnessing Water Power on a Small Scale- Vol10

GATE 1992

**Wasserturbinenregelung mit Elementen der elektronischen Modultechnik**

*Wührer W.*

„Escher Wyss Mitteilungen“

Bd. 43, H. 2, pp. 3-14, 1976

**Stabilité de réglage des installations hydroélectriques**

*Borel L.*

Payot, Lausanne / Dunod, Paris, 1960

**Experience with low head hydro plant frequency control**

*Glattfelder A. H., Bucher J., Studer F., Huser L.*

„Int. Water Power & Dam Construction“

vol.43, no. 5, pp. 20-24, 1991

**Benutzerkonfigurierbares Digitales Turbinen-Leitsystem**

*Huser, L.*

DTL 525, Produktbeschreibung

Sulzer Escher Wyss, Zürich, 1991

**Hydropower reservoir level control - a case study**

*Glattfelder A. H., Huser L.*

„Automatica“, vol. 29, no. 5, pp. 1203-1214, 1993

