Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 108 (2016)
Heft: 2

Artikel: Bemessung von Sicherheits-Abschlussorganen
Autor: Gilgen, Alexander / Meier, Jürg
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939515

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bemessung von Sicherheits-Abschlussorganen

Alexander Gilgen, Jürg Meier

Zusammenfassung

Die Schwierigkeit bei der Bemessung von Sicherheits-Abschlussorganen für Wasserkraftwerke ist, dass die Einwirkungen nicht genau bekannt sind. Insbesondere bei hoch instationären Vorgängen, wie beispielsweise dem Rohrbruch, treten Belastungen auf, welche nur schwer abzuschätzen sind. Durch den Einsatz moderner CAE-Tools kann das Verhalten der Strömung in den Triebwasserleitungen genau untersucht werden. Die Koppelung der Druckstoss- und der CFD-Simulation ermöglicht es komplette Wasserkraftwerke auf Druckstoss- und Strömungsproblematiken zu untersuchen und die entsprechenden Randbedingungen für die CFD-Simulation zu erarbeiten. Die Resultate der CFD-Simulation zeigen anschliessend die hydrodynamischen und hydrostatischen Einwirkungen auf das Abschlussorgan auf.

1. Einleitung

Sicherheits-Abschlussorgane wie Kugelschieber und Drosselklappen stellen, vor allem sicherheitstechnisch, einen sehr wichtigen Bestandteil eines Wasserkraftwerks dar. Diese Elemente werden dazu eingesetzt, um das Durchströmen der Triebwasserleitung im Störfall zu unterbrechen oder um die Leitungen sicher zu verschliessen.

Diese Abschlussorgane sind üblicherweise aus einem fixen Gehäuse und einem drehbaren Verschlusskörper aufgebaut. Durch die Drehung des Verschlusskörpers wird das durchströmende Fluid von der geraden, strömungsoptimierten Bahn abgelenkt. Die daraus resultierende Impulsänderung und Veränderung des Strömungsquerschnitts erzeugen grosse Kräfte auf die Struktur, welche über den Antrieb und die Lagerung aufgenommen und abgeführt werden müssen.

Durch die massiv erhöhte Anzahl an Starts und Stopps im heutigen Betriebsumfeld wird das Risiko eines Ausfalls des Turbinenabschlussorgans (Leitapparat, Düse) grösser. Somit steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Sicherheitsabschlussorgan unter Durchströmung geschlossen werden muss.

Die Hauptproblematik bei der Auslegung neuer Abschlussorgane ist die sichere Bestimmung der auftretenden Einwirkungen. Besonders schwer zu erfassen sind die Katastrophenfälle, z. B. Rohrbruch. Diese können nicht durch Versuche getestet werden, sind jedoch massgebende Randbedingungen für die Dimensionierung der Abschlussorgane.

2. Berechnungsbasis

Die Fachliteratur stellt keine gefestigten Grundlagen zur Berechnung und Auslegung eines Sicherheitsabschlussorgans zusammen. Klar ist, dass die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG für Abschlussorgane Gültigkeit hat.

Als Bemessungsgrundlage kann die DIN 19704:2014 «Stahlwasserbauten», angewendet werden. Diese schliesst Druckrohrleitungen und deren Abschlussorgane explizit ein. Da die DIN 19704 auf dem Eurocode EN 1990 (oder SIA 260 in der Schweiz) basiert, kann das Bemessungskonzept auch aus diesen beiden Normen übernommen werden.

Das Bemessungskonzept nach EN 1990/SIA 260 verlangt einen Nachweis der Tragsicherheit (Festigkeit) und der Gebrauchstauglichkeit (Funktion, Verformung). Durch diese Nachweise sind alle Vorgaben der Maschinenrichtlinie konform umgesetzt.

Zusätzlich zur DIN 19704 und dem Eurocode muss die ISO 12100 «Sicherheit von Maschinen» beachtet werden. Damit sind die Forderungen aus der Produkthaftung ganzheitlich umgesetzt (in der Schweiz PrHG und PrSG).

3. Betriebsarten

Für eine Bemessung sind die auftretenden Betriebsarten des Abschlussorgans wichtig. Diese sind:

- Normalbetrieb:
  Im Normalbetrieb wird der Drehkörper erst nach dem Abbremsen der Fliessgeschwindigkeit, in der stillstehenden Wassersäule und bei ausgeglichenem Druck über das Abschlussorgan geschlossen. Der Drehkörper kann ohne grossen Kraftaufwand gedreht werden. Im Wesentlichen muss nur die mechanische Reibung überwunden werden. Nach dem Schliessvorgang wird die unterwasserseitige Leitung entleert, was den statischen Wasserdruck als Last auf den Drehkörper aufbringt.
- Maximale dynamische Belastung:
  Das Schliessen unter dem maximal möglichen Turbinendurchfluss ist der schlimmste Bemessungsfall, welcher im Betrieb geprüft werden kann. Das Abschlussorgan wird als Redundanz zum ausgefallenen Abschlussorgan der Turbine eingesetzt. Dieser Betriebsfall kann zu Testzwecken erzeugt werden.
- Rohrbruch:
  Als extremes Worst-Case-Szenario wird der Rohrbruchfall betrachtet. Dabei wird angenommen, dass die Leitung unterwasserseitig des Organs durch ein Katastrophenereignis abgetrennt wird und das Wasser als Freistrahl aus dem Leitungssystem entweichen kann. Dieser Fall ist sehr unwahrscheinlich, ist aber dennoch ein nachzuweisender Bemessungsfall.

Ein Testversuch ist nicht möglich, daher muss mit Risikobetrachtungen gearbeitet werden.

4. Tragsicherheit

Die Tragsicherheit muss für jedes Abschlussorgan nachgewiesen werden. Hierzu kann aus der DIN 19704-1:2014 die *Tabelle 5* unter Kapitel 7.2 mit den Lastfallarten und den jeweiligen Teilsicherheitsbeiwerten entnommen werden. Diese sind für die verschiedenen Lastfallkombinationen entsprechend zu kombinieren.

Die *Tabelle 5* der DIN 19704-1 kann

für Kugelschieber und andere Abschlussorgane in Druckrohrleitungen unverändert eingesetzt werden. Zu beachten ist, dass die jeweiligen hydrostatischen und hydrodynamischen Einwirkungen in den verschiedenen Betriebsarten unterschiedlich sind.

In *Tabelle 1* sind die möglichen Gefährdungsbilder dargestellt. Es wurden die jeweiligen Teilsicherheitsbeiwerte eingesetzt. Der Kombinationsbeiwert wird mit dem Wert 1.00 verwendet. Gemäss DIN 19704-1/Kap. 7.2 darf der Kombinationsbeiwert verringert werden, wenn er nachprüfbar ermittelt worden ist.

Die Lastfallkombinationen 1 bis 6 müssen elastisch-elastisch nachgewiesen werden, da bei diesen Lastfallkombinationen keine bleibenden Verformungen zurückbleiben dürfen. Das Gefährdungsbild 9 muss ebenfalls elastisch-elastisch nachgewiesen werden können. Einfach austauschbare Komponenten dürfen auch elastisch-plastisch nachgewiesen werden, sofern ein eindeutiges Anzeichen auf plastische Verformungen möglich ist.

Das Gefährdungsbild 8 ist der Rohrbruchfall. Da dieser sehr selten auftritt und beim Auftreten ebenfalls viel anderes zerstört wird, kann der Nachweis komplett elastisch-plastisch erfolgen.

5. Gebrauchstauglichkeit

Gemäss DIN 19704-1 Kap. 7.5.1 sind Gebrauchstauglichkeitsnachweise mit den Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_F = \gamma_{M,ser} = 1.00$ zu führen. Dabei ist relevant, dass die Verformungen klein sind, das Abschlussorgan dicht bleibt und alle Funktionen gewährleistet sind.

Insbesondere gilt dies für die Antriebs- und Steuerungskomponenten. Der sicheren Einstellung der Schliesscharakteristik zur Beherrschung der Druckstösse kommt hier besondere Bedeutung zu.

6. Funktionsprüfungen

6.1 Statische Druckprüfung

Das Ziel einer Druckprüfung muss eindeutig sein. Ein zu hoher Prüfdruck kostet unnötig Lebensdauer, ein zu geringer Prüfdruck ist hingegen nicht aussagekräftig. Branchenüblich ist der Prüfdruck um den Faktor 1.5 höher als der maximale Betriebsdruck.

Mit modernen Berechnungsmethoden ist es möglich, die während des Betriebs auftretenden Einwirkungen sowie die entsprechenden Festigkeiten der Struktur zu berechnen. Im Vergleich mit den Rechnerleistungen der ersten Auslegungen vor 50 Jahren sind heutzutage hochkomplexe Druckstoss-, CFD-Strömungs- und Festigkeitsberechnungen digital möglich.

Dadurch dienen die Druckprüfungen lediglich zur Validierung der berechneten Grössen und Feststellung allfälliger Fertigungs- und Montagefehler auf Kosten der Lebensdauer.

6.2 Schliessung bei vollem Turbinendurchfluss

Die zweite Methode einer Funktionsprüfung ist das Schliessen des Abschlussorgans (üblicherweise Kugelschieber oder Drosselklappe) bei vollem Durchfluss durch die Turbinen. Dies erzeugt eine höhere Belastung als im normalen Betrieb und testet so die Funktion und Festigkeit der Organe. Das Problem ist jedoch, dass diese Prüfung ebenfalls unnötig Lebensdauer vernichtet und neben den Abschlussorganen auch das gesamte Rohrleitungssystem stark belastet wird.

Um die Lebensdauerreduktion zu verringern, besteht die Möglichkeit, die höchstbeanspruchten Bauteile, wie beispielsweise die Lagerbüchsen, aus einem «weichen» Material herzustellen, um so die umliegenden, komplizierten und teuren Teile zu schonen. Nach dem Test können die Lagerbüchsen ausgetauscht und so die Lebensdauer wieder verlängert werden. Dies bedingt jedoch, dass die Austauschinstandsetzung konstruktiv realisiert ist.

7. Druckstossberechnung

7.1 Allgemein

Die Schliessbewegung des Drehkörpers beeinflusst nicht nur die Strömung innerhalb des Kugelschiebers (nachfolgend: KS), sondern das gesamte mit dem KS verbundene Leitungssystem. Es kommt zu Druckschwankungen, welche den normalen Betriebsdruck um ein Vielfaches überwie auch unterschreiten können.

Die Druckschwankungen werden durch die Geschwindigkeitsänderungen der gesamten Wassersäule erzeugt. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass Wasser ein inkompressibles Medium ist. Es ist jedoch so, dass auch

s = Ständig v = Vorübergehend a = Aussergewöhnlich	Fall	s	s	s	v	v	a	a	a	a	a
	Lastkombination	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nr	Einwirkung	γ_{F1}	γ_{F1}	γ_{F1}	γ_{F2}	γ_{F2}	γ_{F3}	γ_{F3}	γ_{F3}	γ_{F3}	γ_{F3}
1	Eigengewicht	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
2	Betriebsdruck, (Hydrostatische Einwirkung)	1.35	1.35	1.35	1.25		1.1	1.1	1.1		1.1
3	Staudruck bei ausgeschalteter Maschine, (Hydrostatische Einwirkung)		1.35	1.35							
4	Staudruck bei geschlossenem KS (UW-Leitung entleert); (Hydrostatische Einwirkung)				1.25			1.1	1.1		1.1
5	Prüfdruck, (Hydrostatische Einwirkung)									1.1	
6	Schliesskräfte und –momente bei Teil-Notabschaltung, (Hydrodynamische Einwirkung)							1.1			1.1
7	Schliesskräfte und –momente bei kompletter Notabschaltung, (Hydrodynamische Einwirkung)										1.1
8	Schliesskräfte und –momente bei Rohrbruch, (Hydrodynamische Einwirkung)								1.1		
9	Druckstossdruck bei Teil-Notabschaltung, (Hydrodynamische Einwirkung)							1.1			
10	Druckstossdruck bei Rohrbruch, (Hydrodynamische Einwirkung)								1.1		
11	Fundamentsetzungen, (Änderung der Stützbedingungen)	1.35	1.35	1.35	1.25	1.25	1.1	1.1	1.1		1.1
12	Massenkräfte bei normalem Schliessen		1.5	1.5							
13	Massenkräfte bei Notschluss							1.1			
14	Massenkräfte bei Rohrbruch								1.1		
15	Temperatureinflüsse				1.35		1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
16	Transportbeschleunigungen					1.35					
17	Einwirkungen eines Störfalles des Antriebs bei normalem Schliessen oder Öffnen						1.25				
18	Einwirkungen eines Störfalles des Antriebs bei Schliessen oder Öffnen bei Notabschaltung										1.1
		Normalbetrieb – Kugelschieber durchströmt	Anfahren – Öffnen bei stillstehender Wassersäule	Herunterfahren – Schliessen bei stillstehender Wassersäule	Entleerung UW-Leitung – Kugelschieber geschlossen	Transport, Montage, Wartung	Störung Antrieb –Öffnen / Schliessen in stehender Wassersäule (Druck ausgeglichen)	Abschaltung bei vollem Turbinendurchfluss	Abschaltung bei Rohrbruch	Druckprüfung	Störung Antrieb –Öffnen / Schliessen in fliessender Wassersäule (Druck nicht ausgeglichen)

Tabelle 1. Gefährdungsbilder nach DIN 19704.

Wasser kompressibel, also elastisch ist. Diese Elastizität des Wassers und jene der Leitung zusammen führen dazu, dass die Wassersäule wie eine Feder zusammengedrückt und die Leitung wie ein Ballon gedehnt wird. Die Summe der Verformungen ermöglicht es, die Bewegungsenergie in Druckenergie umzuwandeln und so die Strömungsgeschwindigkeit zu verringern.

Das Problem ist nur, dass, sobald die Geschwindigkeit auf null zurückgegangen ist, ein Ungleichgewicht der Energie besteht. Die Druckhöhe am Abschlussorgan ist höher als jene, welche der Stausee erzeugt, und somit kommt es zu einer wellenartigen Entspannung dieses Drucks in Richtung See.

Erreicht die Druckwelle den See, ist die Leitung für einen kurzen Moment im Gleichgewicht, jedoch in bergseitiger Bewegungsrichtung. Da das Abschlussorgan geschlossen ist, erzeugt die Bewegung stromaufwärts einen Unterdruck, welcher sich bergwärts entspannt. Erreicht der Unterdruck den See, wird er sich wieder in Richtung Tal erhöhen, was zu einer stromabwärts führenden Bewegung führt. Beim Auftreffen auf das Abschlussorgan führt dies wieder zu einem Überdruck, wodurch sich der Vorgang wiederholt.

7.2 Berechnungsmethoden

Es gibt grundsätzlich drei Methoden zur Berechnung eines Druckstosses:

1. Berechnung nach Joukowski
2. Berechnung nach Michaud-Allievi
3. Berechnung mit speziellen Software-Tools

7.3 Berechnung nach Joukowski:

Die Druckstossberechnung nach *Joukowski* beschreibt das Verhalten der Strömung bei plötzlichem Schliessen des Abschlussorgans mit einer Schliesszeit von 0 Sekunden. Diese Methode zeigt den theoretisch maximal möglichen Druckstoss direkt am Abschlussorgan auf. In der Praxis ist die Drucküberhöhung aber niemals so hoch, da ein Schliessen in 0 Sekunden technisch nicht möglich ist.

Die Formel nach Joukowski lautet:

$$\Delta H = \frac{a * v}{g}$$

mit

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho_W} * \left(\frac{1}{\frac{1}{E_W} + \frac{D}{s * E_{St}}} \right)}$$

Symbol	Bedeutung
ΔH	Druckstosshöhe
a	Wellen- oder Druckstossgeschwindigkeit *(für Wasser in einer Stahlleitung in der Grössenordnung von 1'000 bis 1'440 m/s)*
v	Strömungsgeschwindigkeit
g	Erdbeschleunigung *(9.81 m/s²)*
ρ_W	Dichte Wasser
E_W	Elastizitätsmodul Wasser
E_{St}	Elastizitätsmodul Rohrleitung
s	Wanddicke
D	Leitungsdurchmesser

Wie in der Formel (links unten) ersichtlich, ist die Druckstosshöhe nicht abhängig von der Rohrleitungslänge.

7.4 Berechnung nach Michaud-Allievi

Die Berechnung nach *Michaud-Allievi* wird eingesetzt, um die maximale Druckstosshöhe am Abschlussorgan zu berechnen, welche durch langsames Schliessen entsteht.

Die Formel nach Michaud-Allievi lautet:

$$\Delta H = \frac{2 * v * L}{g * T_s}$$

Symbol	Bedeutung
ΔH	Druckstosshöhe
L	Länge der Druckleitung
v	Strömungsgeschwindigkeit
g	Erdbeschleunigung *(9.81 m/s²)*
T_S	Schliesszeit des Abschlussorgans

Die Formel nach *Michaud-Allievi* dient lediglich einer groben Abschätzung. Die Druckstosshöhe wird direkt am Abschlussorgan berechnet.

7.5 Berechnung mit speziellen Software-Tools

Für die genaue Berechnung der transienten Vorgänge innerhalb des Leitungssystems sind die Handrechnungsmethoden nicht geeignet. Sowohl die Formeln von *Joukowski* wie auch diejenige von *Michaud-Allievi* sind Näherungen und geben den Druck direkt am Abschlussorgan an. Um das Verhalten der Strömung an jedem Punkt der Leitung bestimmen zu können, können Software-Tools eingesetzt werden, welche über spezielle Lösungsalgorithmen das ganze Leitungssystem auflösen können.

8. CFD-Berechnung

In der Welt der Produktentwicklung und Berechnung von um- und durchströmten Bauteilen und Anlagen ist die Simulation der Strömung von grosser Bedeutung. Durch genaue Kenntnisse der Strömung können die Bauteile hinsichtlich Verlust, Strömungswiderstand usw. optimiert werden. Es ist meist wirtschaftlich nicht sinnvoll, für jedes Bauteil einen experimentellen Versuch durchzuführen. Werden die Strukturen während und nach der Konstruktion simuliert, können bereits Schwachstellen erkannt und verbessert werden.

Heutzutage sind (fast) alle Computer genügend leistungsfähig, um die numerisch aufwendigen Berechnungen auszuführen.

9. Gekoppelte Druckstoss- und CFD-Berechnung

Um die Einwirkungen auf das Abschlussorgan so genau wie möglich bestimmen zu können, müssen die Randbedingungen der CFD-Berechnung so angepasst werden, dass die Grössen und Effekte der Druckstossberechnung mit einbezogen werden.

Das Vorgehen ist folgendermassen:

1. Berechnung des stationären Zustandes des Leitungssystems für die Bestimmung aller Reibungs- und Verlustparameter sowie der Randbedingungen am Kugelschieber im stationären Fall.
2. Berechnung der Schliesscharakteristik mit Hilfe der CFD-Simulation, um den kugelschieberspezifischen Zusammenhang zwischen Durchfluss und Schliesswinkel zu erhalten.
3. Transiente Berechnung des Verhaltens innerhalb des Leitungssystems bei den Schliessvorgängen für die verschiedenen Betriebsarten. Die Werte für den Druck am Eingang in das CFD-Modell sowie diejenigen des Durchflusses am Ausgang sind aufzuzeichnen für die nachfolgende transiente CFD-Berechnung.
4. Volltransiente Berechnung des Schliessvorgangs im CFD mit den vorgängig berechneten Randbedingungen und anschliessende Auswertung der Daten.

10. Umsetzung: Masterarbeiten zur Bemessung von Sicherheits-Abschlussorganen am Beispiel eines Kugelschiebers

10.1 Ausgangslage

Das Ziel der Masterthesis war, ein Bemessungskonzept für Abschlussorgane in Druckrohrleitungen, im speziellen Kugelschieber, zu entwickeln. Im Rahmen der Masterprojektarbeiten und der Masterthe-

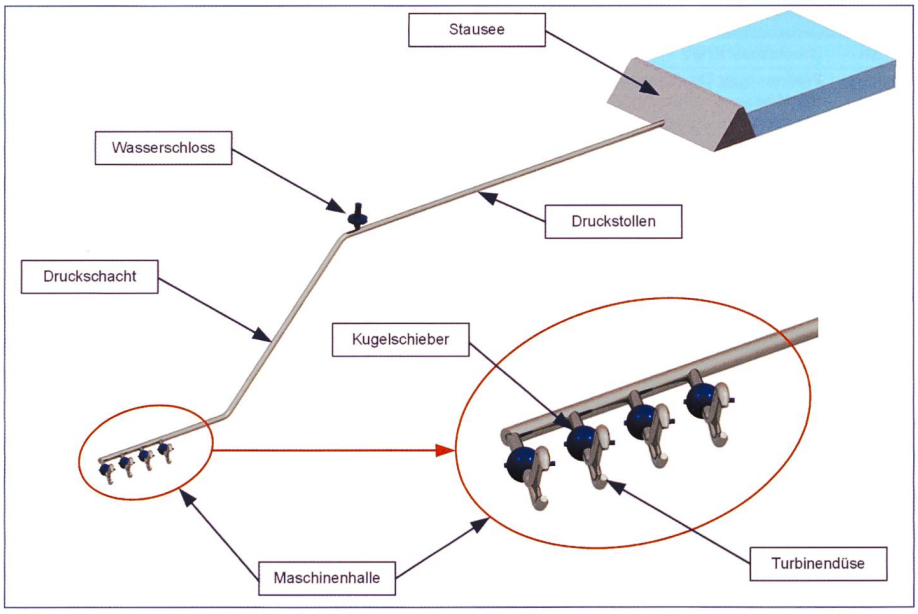


Bild 1. Kraftwerkslayout komplett.

sis wurden die Einwirkungen aus der Strömung auf den Kugelschieber betrachtet. Die Berechnung der Struktur (FEM) wurde nicht betrachtet.

Für eine optimale Auslegung und Bestimmung der fluidtechnischen Einwirkungen muss neben der eigentlichen Durchströmung des KS auch das Verhalten des gesamten Triebleitungssystems berechnet werden. Einwirkungen aus Druckstössen, Kavitationsschlägen und Veränderungen des Durchflusses sind wichtig für die genaue Berechnung.

Auf der Basis des in *Bild 1* dargestellten Kraftwerks wurde einer der vier Kugelschieber berechnet.

Das Wasserkraftwerk besteht aus einem Stausee, welcher über den langen, beinahe horizontalen Druckstollen mit einem Schachtwasserschloss verbunden ist. Kurz nach dem Wasserschloss führt der Stollen in einen Druckschacht, welcher mit der Maschinenhalle verbunden ist und dort vier Turbinenlaufräder antreibt.

Das transiente (zeitabhängige) Verhalten der gesamten Strömung ist stark von der Schliesscharakteristik der Abschlussorgane abhängig.

10.2 Betriebsarten

Aus strömungstechnischer Sicht sind im Kraftwerksbetrieb die drei Hauptbetriebsarten (Nutzungszustände) zu betrachten:

- Notabschaltung bei vollem Turbinendurchfluss aller Maschinen gleichzeitig
- Notabschaltung bei vollem Turbinendurchfluss einzelner Maschinenstränge
- Rohrbruch

Der normale Betriebsfall, das Schliessen bei stillstehender Wassersäule und anschliessendem Entleeren der unterwasserseitigen Leitung, kann durch die langsamen, kaum zeitabhängigen Bewegungen als statischer Fall betrachtet werden.

10.3 Stationäre Anlagedaten

In einem ersten Durchgang wird der stationäre Zustand der Kraftwerksanlage mit Hilfe des Druckstossberechnungsprogramms bestimmt, um für die nachfolgende Berechnung der Schliesscharakteristik die nötigen Randbedingungen zu kennen.

Dies erfolgt durch die Modellierung des gesamten Leitungssystems inklusive Parametrisierung der einzelnen Elemente hinsichtlich Verlustbeiwerte. usw.

10.4 Berechnung der Schliesscharakteristik

Mit Hilfe der Randbedingungen, welche im stationären Betriebsfall am Kugelschieber wirken, wurde das Verhalten des Durchflusses in Abhängigkeit des Schliesswinkels berechnet. Die für den Beispielfall berechnete Charakteristik hat die Form wie in *Diagramm 1* dargestellt.

Aus dieser Abhängigkeit kann nun umgerechnet und in die transiente Druckstossberechnung implementiert werden, um das Verhalten der Kugelschieber möglichst genau abzubilden.

10.5 Schliessgesetz

Um das ideale Schliessgesetz ermitteln zu können, kann die Druckstossberechnung eingesetzt werden. Mit Hilfe dieser ist es möglich einen Kompromiss aus einem möglichst einfachen Schliessgesetz, einer möglichst schnellen Schliessung und dem minimalem Druckstoss zu finden.

In der berechneten Kraftwerksanlage wird davon ausgegangen, dass ein lineares Schliessgesetz mit 50 Sekunden Schliesszeit eingesetzt wird.

10.6 Schliessen bei vollem Turbinendurchfluss

10.6.1 Belastungen des Leitungssystems

Die Kugelschieber nach dem Abzweiger in die Turbinenzuleitung werden als redundantes Abschlussorgan zu den Turbinendüsen für die Sicherstellung der Stillsetzung des Turbinenstrangs und für dessen Entleerung eingesetzt. Sollte es aus einem technischen Grund nicht möglich sein die

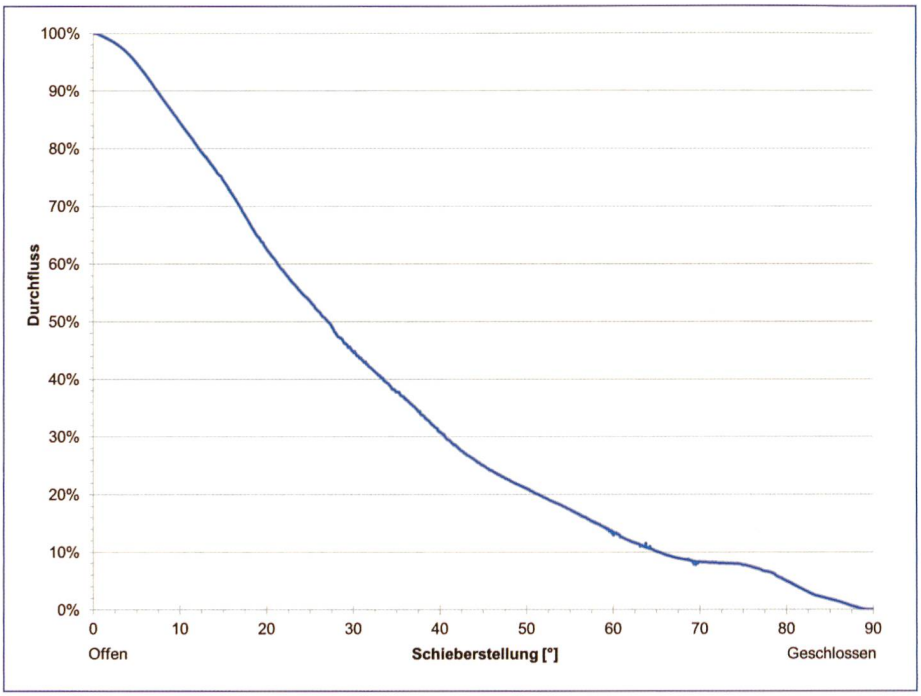


Diagramm 1. Schliesscharakteristik.

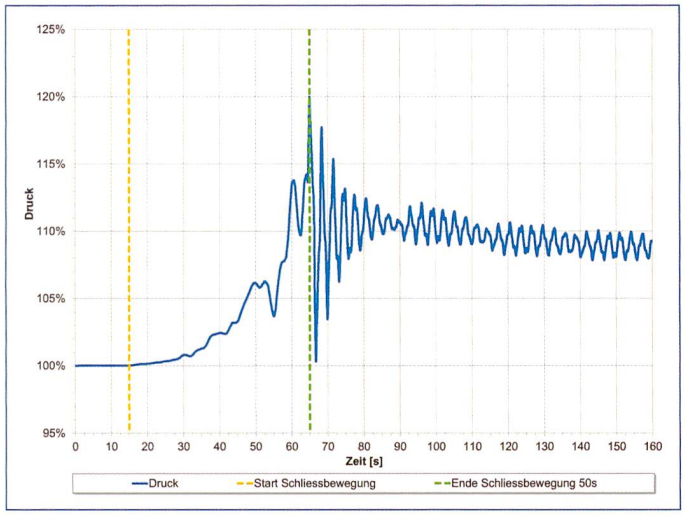


Diagramm 2. Verlauf des Drucks bergseits des Kugelschiebers.

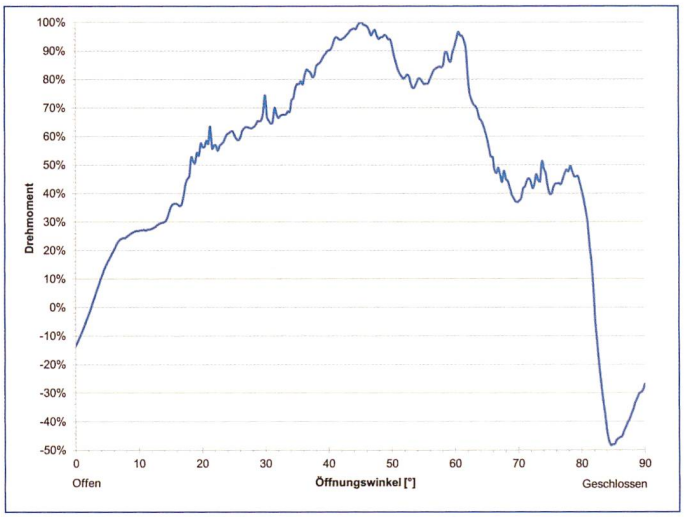


Diagramm 4. Drehmomentverlauf am Drehkörper beim Schliessen mit vollem Turbinendurchfluss.

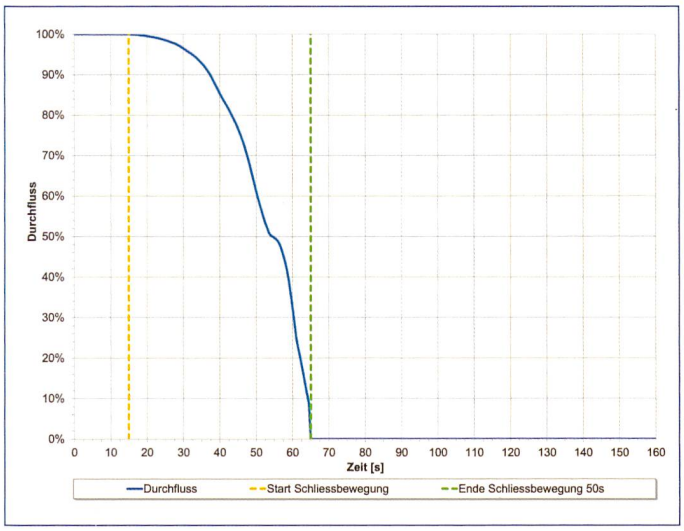


Diagramm 3. Verlauf des Durchflusses durch den Kugelschieber.

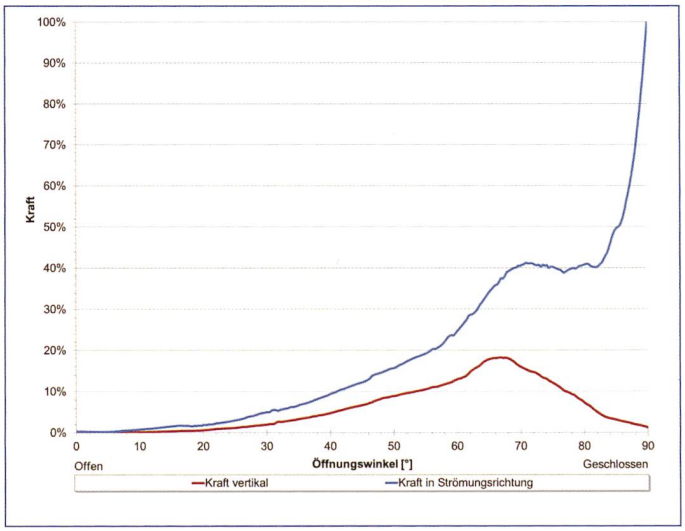


Diagramm 5. Kraft auf den Drehkörper während des Schliessvorgangs bei vollem Turbinendurchfluss.

Turbinendüsen bzw. den Leitapparat zu schliessen, müssen die Kugelschieber den vollen Turbinendurchfluss sicher zum Stillstand bringen. Es handelt sich hierbei um einen Sonderfall und kann als aussergewöhnlicher Fall (gem. DIN 19704, *Tabelle 5*) betrachtet werden.

Als schlimmstes Szenario dieses Lastfalls wird angenommen, dass alle vier Kugelschieber durch eine Notabschaltung gleichzeitig geschlossen werden. Der Druck oberhalb des Kugelschiebers erhöht sich während des Schliessvorgangs immer weiter, bis er bei kompletter Schliessung sein erstes Maximum erreicht. Dieses Verhalten kann dem *Diagramm 2* entnommen werden. Der Wert von 100 % entspricht dem Betriebsdruck der Anlage während des Normalbetriebs.

Der Enddruck nach dem Abklingen der Druckstossschwingung entspricht dem geodätischen Höhendruck, da keine geschwindigkeitsabhängigen Druckverluste mehr vorhanden sind.

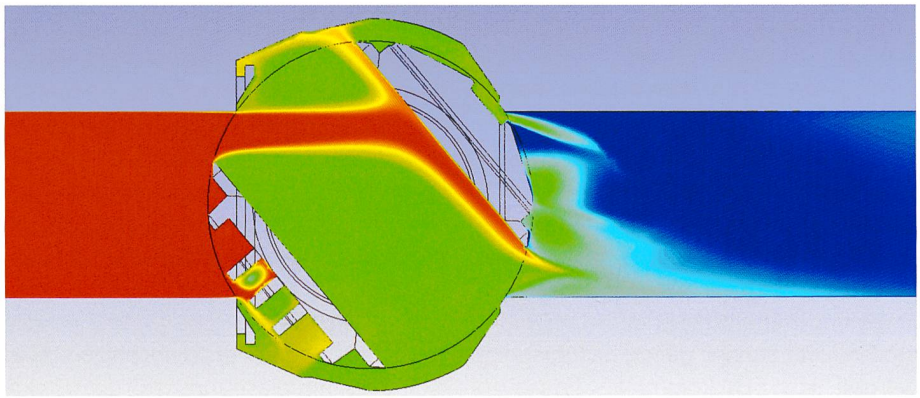


Bild 2. Visualisierung der Strömung durch den Kugelschieber.

10.6.2 Einfluss auf den Kugelschieber

Die Belastung, welche diese Abschaltung auf den Kugelschieber auswirkt, kann anhand einer CFD-Simulation berechnet werden. Das wirksame Drehmoment und die auftretenden Kräfte während des Schliessvorgangs können aus den *Diagrammen 4* und *5* entnommen werden. Positive Drehmomentwerte entsprechen einem schliessend wirkenden Drehmoment.

10.7 Schliessen im Fall eines Rohrbruchs

10.7.1 Belastungen des Leitungssystems

Das Verhalten der Strömung während eines Rohrbruchs ist als höchst instationär einzustufen. Die Berechnung der Strömung mit einem Freistrahl am Ende der Leitung als stationärer Fall würde zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten ergeben.

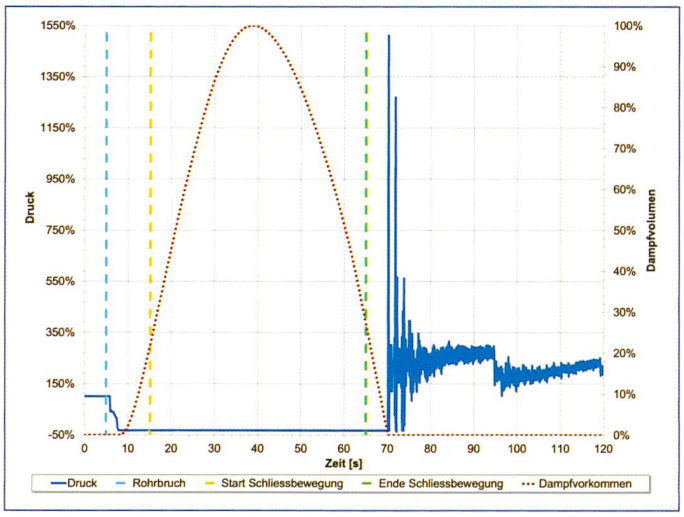


Diagramm 6. Druck und Dampfvolumen an der Übergangsstelle zwischen Druckstollen und -schacht.

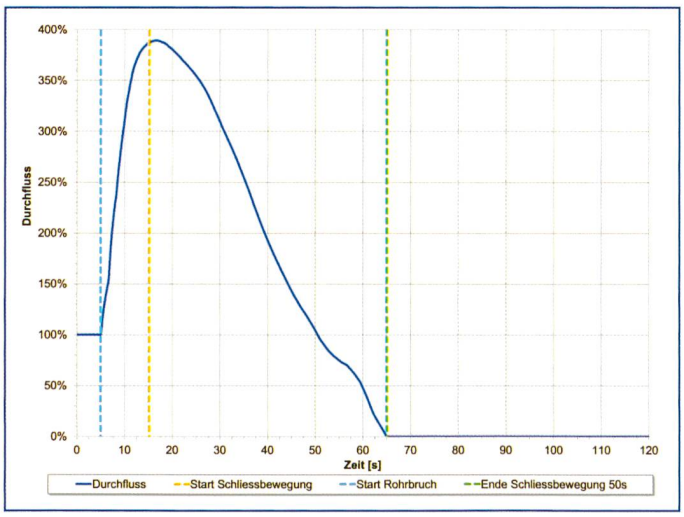


Diagramm 8. Zeitlicher Verlauf des Durchflusses durch den Kugelschieber im Rohrbruchfall.

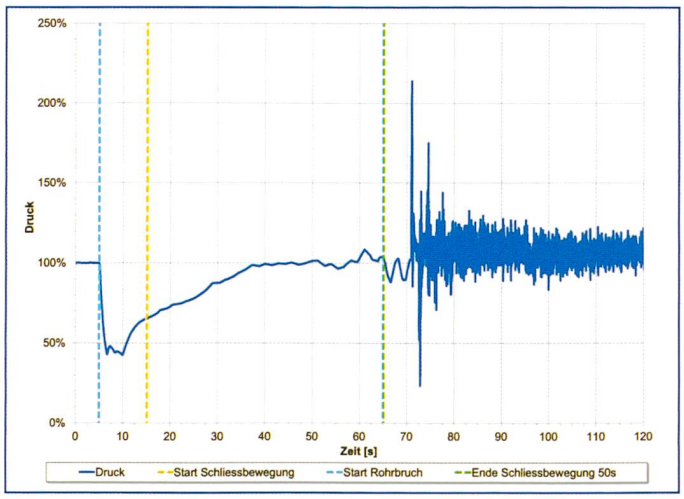


Diagramm 7. Zeitlicher Verlauf des Druckes oberwasserseitig des Kugelschiebers im Rohrbruchfall.

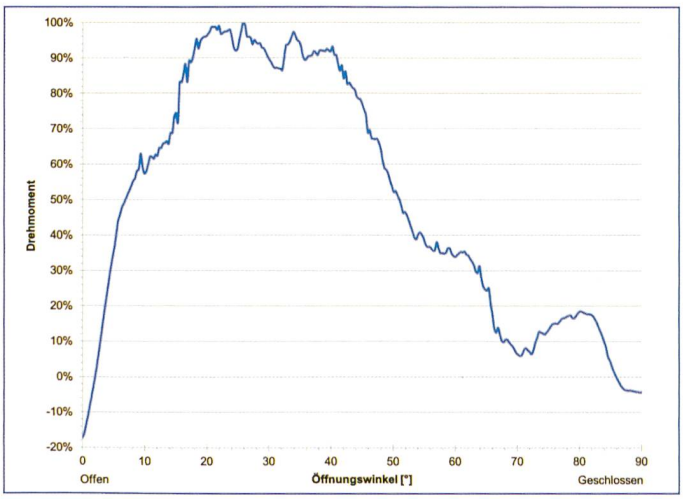


Diagramm 9. Drehmomentverlauf am Drehkörper beim Schliessen im Rohrbruchfall.

Zusätzlich kommt es während eines Rohrbruchs zu Einwirkungen, welche stationär nicht erfasst werden können.

Ein Beispiel dafür ist die rasche Beschleunigung des Wassers innerhalb der Leitungen aufgrund der durch den Rohrbruch massiv reduzierten Strömungswiderstände am Ende der Leitung (Wegfall der Abzweiger, der Düsen usw.). Diese Beschleunigung ist so gross, dass die lange und träge Wassersäule im Druckstollen nicht schnell genug beschleunigt werden kann. Es kommt als Erstes zu einem «Leersaugen» des Wasserschlosses und anschliessend zu einem Unterdruck im Übergangsbereich zwischen Druckstollen und Druckschacht. Wird dieser Unterdruck zu gross, kommt es zum Verdampfen des Wassers, zur sogenannten Kavitation. Je nach Lage und Länge der Leitung sowie Dauer des Unterdrucks, kann ein grosser Teil der Leitung mit Dampf gefüllt werden.

Wird der Kugelschieber geschlossen und bewegt sich die Druckwelle in Richtung des Sees, passiert sie die kavitierte Stelle. Ist der Druck gross genug, kollabiert die Dampfblase und erzeugt so Druckschläge, welche den «normalen» Druckstossdruck um ein Vielfaches übersteigen können. Dieses Verhalten ist im betrachteten Leitungssystem an der Übergangsstelle zwischen dem Druckstollen und Druckschacht, ebenfalls aufgetreten.

Wird der zeitliche Verlauf an der Knickstelle betrachtet, ist ersichtlich, dass sich die Dampfblase kurz nach dem Ereignen des Rohrbruchs bildet. Im Zeitpunkt, in welchem die Dampfblase komplett zusammengefallen ist, erzeugt sie einen Drucksprung (bei ca. 70 s im *Diagramm 6*). Dieser wandert stromabwärts und trifft nach etwa 2 Sekunden am Kugelschieber auf (ersichtlich im *Diagramm 7*).

Der Druck oberwasserseitig des Kugelschieber zeigt das in *Diagramm 7* abgebildete Verhalten. Gut ersichtlich ist der Kavitationsschlag, welcher nach dem abgeschlossenen Schliessvorgang auftritt.

Aufgrund der noch vorhandenen Strömungswiderstände und des Schliessvorgangs des KS steigt der Durchfluss nicht auf einen so hohen Wert an, wie er dies im stationären Rohrbruchfall tun würde.

10.7.2 Einfluss auf den Kugelschieber

Die transienten Randbedingungen werden wiederum in die CFD-Analyse importiert und die Berechnung wreden durchgeführt.

Das wirksame Drehmoment und die Kräfte als Einwirkungen aus der Strömung können aus *Diagramm 9* und *10* entnommen werden. Positive Drehmomentwerte entsprechen einem schliessend wirkenden Drehmoment.

10.7.3 Vergleich zwischen den verschiedenen Fällen (siehe *Diagramm 11*)

In der Gegenüberstellung mit der Berechnung der Schliesscharakteristik kann festgestellt werden, dass das maximal wirksame Drehmoment des gekoppelt berechneten Rohrbruchs mit instationä-

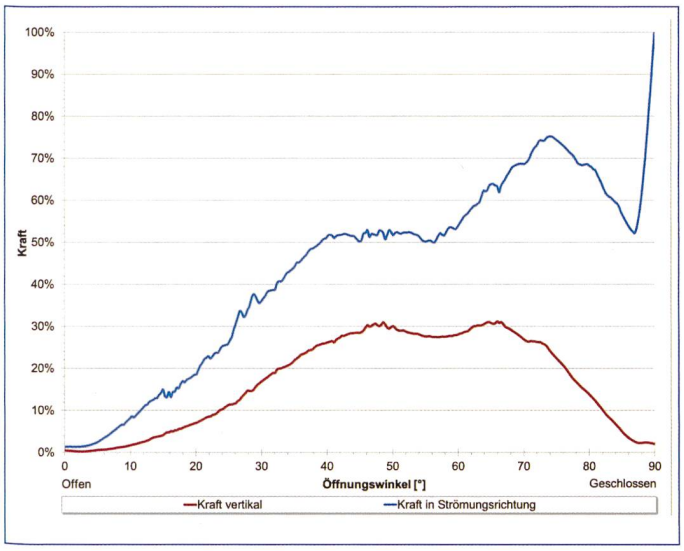


Diagramm 10. Kraft auf den Drehkörper während des Schliessvorgangs im Rohrbruchfall.

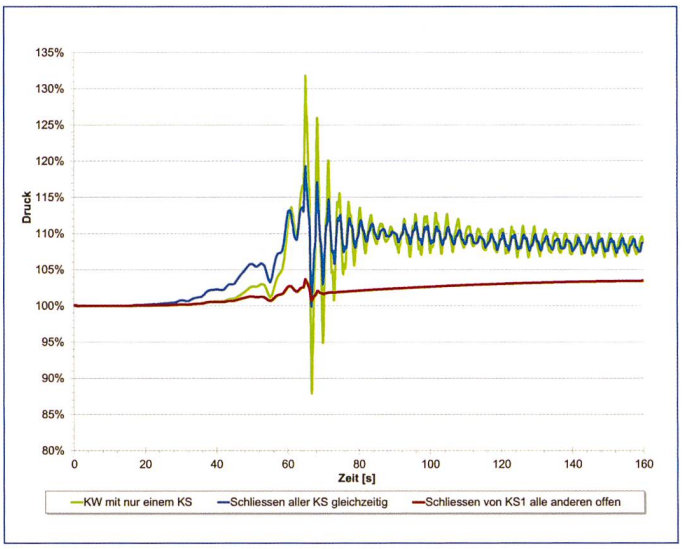


Diagramm 12. Vergleich zwischen verschiedenen Abschaltvorgängen bei Betriebsdurchfluss.

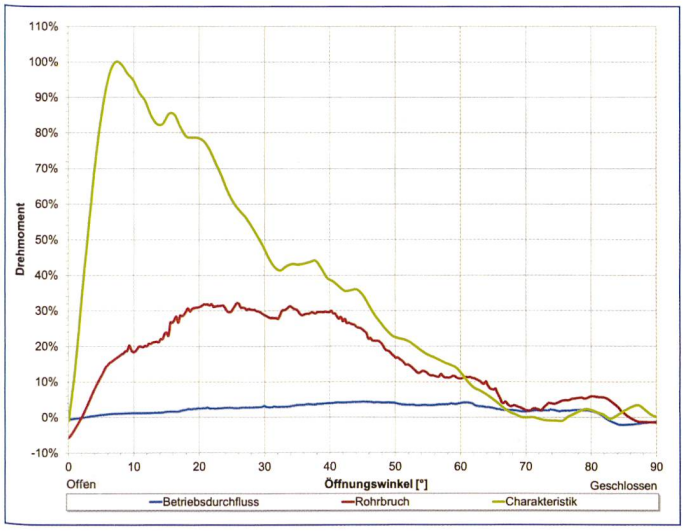


Diagramm 11. Vergleich zwischen Charakteristik, Betriebsdurchfluss und Rohrbruchfall.

ren Randbedingungen nur 32 % desjenigen mit stationären Randbedingungen (Berechnung der Schliesscharakteristik) beträgt. Dies ist primär darauf zurückzuführen, dass der austretende Volumenstrom im Kugelschieber zeitlich variabel und im Maximum kleiner ist, da das gesamte Rohrleitungssystem der Wasserkraftanlage durch den Anstieg des Druckverlusts einen grösseren Volumenstrom verhindert. Zusätzlich sinkt der Druck am Eingang, wie in *Diagramm 7* ersichtlich, durch das Auftreten des Rohrbruchs ab. Dadurch werden das wirkende Drehmoment und die Kräfte kleiner.

11. Anlagenkonfiguration

Bei einer Anlage, wie sie in dieser Arbeit betrachtet wurde, wurde davon ausgegangen, dass alle vier Kugelschieber zur gleichen Zeit geschlossen werden. Wird nun betrachtet was geschieht, wenn nur einer der Kugelschieber geschlossen wird und die übrigen im Normalbetrieb bleiben, ist ersichtlich, dass in der Verteilleitung der Maschinenhalle der Druck nur um einen Bruchteil so stark ansteigt. Ein zweites Resultat der Druckstossberechnung ist, dass, wenn die Kraftwerksanlage mit demselben Druck und demselben Gesamtdurchfluss nur eine Maschine und somit nur einen Kugelschieber hätte, eine Abschaltung noch einmal um ein Vielfaches schlimmer wäre. Alle diese Verhalten sind in *Diagramm 12* ersichtlich.

12. Fazit

Durch das systematische Vorgehen zur Bestimmung der Einwirkungen auf das Abschlussorgan, welches während der Masterthesis erarbeitet wurde:

1. Bestimmung aller möglichen und relevanten Betriebsarten
2. Sammeln aller geltenden Normen
3. Berechnung der stationären Betriebsarten des gesamten Triebwassersystems zur Ermittlung der Druckverluste, Strömungsgeschwindigkeiten, Durchflüsse usw.
4. Berechnung der Schliesscharakteristik des Abschlussorgans
5. Berechnung der transienten Betriebsfälle des Triebwassersystems, die Druckstossberechnung des Kraftwerks
6. CFD-Strömungsberechnung des Schliessvorgangs mit instationären Randbedingungen aus der Druckstossberechnung zur Ermittlung der effektiven Einwirkungen

... ist es möglich eine Bemessung mit tiefen Teilsicherheitsbeiwerten ohne Einbussen bei der Sicherheit durchzuführen.

Wichtig ist, dass jede Kugelschieberanlage individuell betrachtet und bemessen werden muss.

Literatur

Penninger, G., Benigni, H. «Numerical simulation and design of spherical valves for modern pump storage power plants», 14th Intern. Seminar on Hydropower plants, Institute for Waterpower and Pumps, Wien 2006.

Chaudhry, M. Hanif. «Applied Hydraulic Transients» 2. Edition.

Versteeg, H. K., W. Malalasekera, W. «An Introduction to Computational Fluid Dynamics» 2. Edition.

Bohl, W., Elmendorf, W. «Technische Strömungslehre» 14. Auflage.

Osterwalder, J. «Versuche bei hohen natürlichen Gefällen zur Beurteilung des Verhaltens bei Rohrbruch und Freilauf», Escher Wyss Mitteilungen 2, Seiten 7–14, 1958.

Verbandsschrift Nr. 50 des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes. «Abschlussorgane im Wasserbau» 1991.

Alstom, J. Ball. «Spherical Type Main Inlet Valves» November 2004.

DIN 19704:2014 (Teil 1, 2 und 3), Stahlwasserbauten.

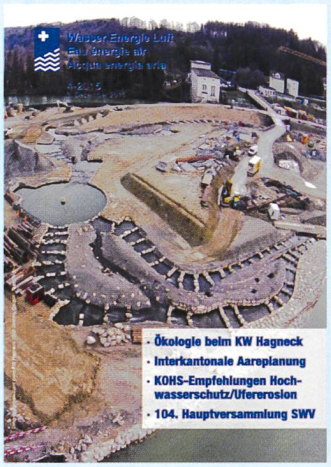
Anschrift der Verfasser

Alexander Gilgen, Jürg Meier, Institut für Anlagen- und Sicherheitstechnik, SITEC,

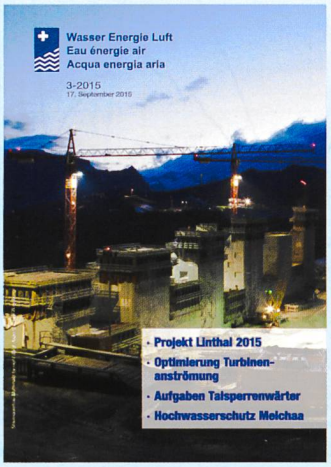
alexander.gilgen@hsr.ch, juerg.meier@hsr.ch

Bestellen Sie die Ausgaben von «Wasser Energie Luft» unter www.swv.ch (solange Vorrat)

WEL 1-2016



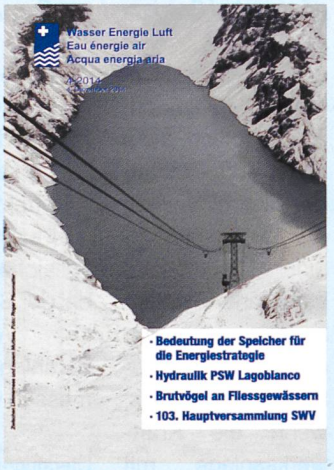
WEL 4-2015



WEL 3-2015

WEL 2-2015

WEL 1-2015

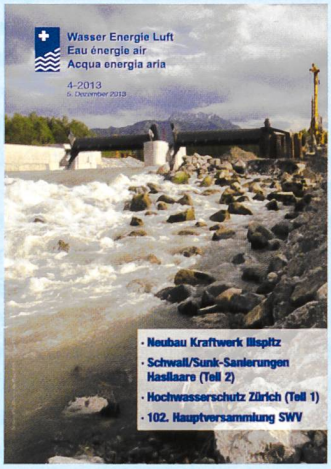


WEL 4-2014

WEL 3-2014

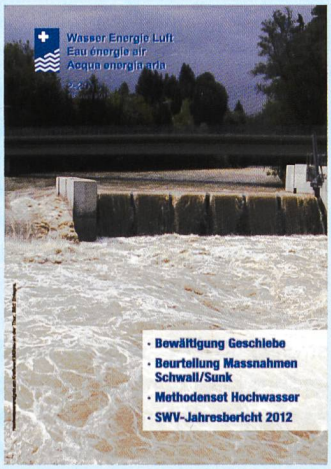
WEL 2-2014

WEL 1-2014

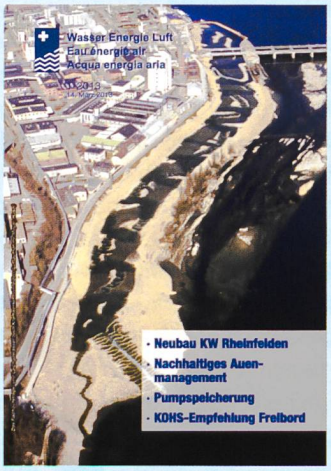


WEL 4-2013

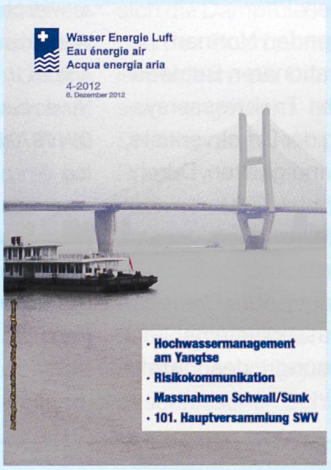
WEL 3-2013



WEL 2-2013

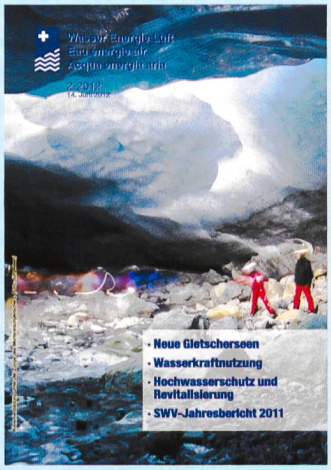


WEL 1-2013



WEL 4-2012

WEL 3-2012



WEL 2-2012