



Markus Koch, BSc.

**3D-Numerische Simulationen der hydraulischen
Verlustbeiwerte der asymmetrischen Drossel
im Wasserschloss Krespa**

Masterarbeit

Technische Universität Graz

Graz, im Mai 2016

Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz
mitbetreuender
Assistent: Dipl.-Ing. Wolfgang Richter

Vorgelegt am
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am
.....
(Unterschrift)

Statuary Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date
.....
(signature)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während meiner Studienzeit begleitet und motiviert haben. Sie alle haben mit ihrer Unterstützung zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen.

Mein Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Richter, der als mitbetreuender Assistent die Anregung zum Thema der Masterarbeit gab. Vielen Dank für die Hilfsbereitschaft, die vielen fachlichen Diskussionen und die wertvollen Anmerkungen. Darüber hinaus schätze ich die besondere Betreuungsatmosphäre und Zusammenarbeit, die ich im Rahmen der Erstellung dieser Masterarbeit genossen habe.

Vielen Dank an Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerald Zenz für die Betreuung dieser Masterarbeit sowie für die Erfahrungen, die ich während der Tätigkeiten als studentischer Mitarbeiter am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft sammeln durfte.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern, die mir mit ihrer Unterstützung das Studium ermöglicht haben und mich in meinem Wunsch zu studieren bestärkt haben. Mein Dank gilt auch meinen Freunden und Studienkollegen, die mir mit Ratschlägen, Ideen und Diskussionen zur Seite standen, aber auch für den nötigen Ausgleich in meiner Freizeit sorgten.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden mit Hilfe eines dreidimensionalen, numerischen Strömungssimulationsprogramms (ANSYS-CFX) die Verlustbeiwerte der asymmetrischen Drossel im Wasserschloss Krespa bestimmt. Diese wasserbaulichen Elemente des Triebwasserwegs sind Teil des derzeit gebauten Pumpspeicherkraftwerkes Obervermuntwerk II der Vorarlberger Illwerke AG. Teil dieser Arbeit ist die Einarbeitung in die hydraulischen und wasserbaulichen Grundlagen von Druckleitungen in Hochdruckwasserkraftanlagen – insbesondere für Drosseln – sowie in die Theorie für numerische Strömungssimulation. Die Untersuchungen werden im Naturmaßstab 1:1 sowie in den Modellmaßstäben 1:15 und 1:30 durchgeführt. Ausgehend von der Bernoulli'schen Energiegleichung werden mittels einer wandreibungsfreien Strömungssimulation die lokalen Verlusthöhen der Drossel und ihrer Anschlussgeometrie in den beiden Strömungsrichtungen bestimmt. Daraus werden im Bereich höherer Reynold'zahlen unabhängige Verlustbeiwerte für das Auf- und das Abschwingen ermittelt, welche aufgrund der asymmetrischen Bauart wesentliche Größenunterschiede aufweisen. Die Ergebnisse der numerischen Simulation werden mit den Ergebnissen eines bereits durchgeführten physikalischen Modellversuchs verglichen und die Abweichungen zwischen den beiden Methoden bestimmt. Die Analysen in den Modellen mit unterschiedlichen Maßstäben geben den Einfluss des Skalierungsfaktors auf die Verlustbeiwerte an. Weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Sandrauigkeiten bestimmen die Abhängigkeit des Gesamtverlustbeiwertes von der Wandreibung. Die in dieser Arbeit beschriebene und angewandte Vorgangsweise ist allgemein für eine dreidimensionale, numerische Strömungssimulation anwendbar und beinhaltet auch die Beurteilung von Konvergenzproblemen.

Abstract

The objective of this thesis is to determine the loss coefficient of the asymmetric throttle of the surge tank “Krespa”. The loss coefficient is determined by using a three-dimensional computational fluid dynamics program (ANSYS-CFX). Throttle and surge tank “Krespa” are part of the headrace tunnel of the pumped-storage power plant “Obervermuntwerk II” of the Voralberger Illwerke AG, which is currently under construction. A part of this thesis is devoted to the theoretical hydraulic-engineering principles of headrace tunnels with a focus on throttles. Additionally, the theoretical principles of computational fluid dynamics are explained. The analyses are realized at the original scale of 1:1 and at model scales of 1:15 and 1:30. By the application of computational fluid dynamics the local head losses of the throttle and its joined geometry are determined in both flow directions on the basis of the Bernoulli’s equation without wall friction. In the range of higher Reynolds numbers, independent loss coefficients for inflow and outflow are determined, which display significant differences due to asymmetric construction. The results of the computational dynamics are compared with the results of an already realized model test. Subsequently deviations between the two methods are determined. The analyses of the models on different scales display the influence of the scaling factor on the loss coefficient. Further analyses with different roughness heights determine the dependence of the wall friction on the total loss coefficient. The procedure which is described and applied in this thesis, is generally applicable for three-dimensional computational dynamic analyses. The thesis also specifies a procedure, which can be applied in case of convergence problems.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	II
Statuary Declaration.....	II
Danksagung.....	III
Kurzfassung.....	IV
Abstract.....	V
Inhaltsverzeichnis.....	VI
Abkürzungen.....	IX
Einheiten.....	X
Symbole.....	XI
1. Einleitung.....	14
1.1 Vorbemerkung.....	14
1.2 Definitionen und Begriffsbestimmungen.....	15
1.2.1 Hochdruckwasserkraftanlage.....	16
1.2.2 Druckstoß und Massenschwingung.....	27
1.3 PSKW Obervermuntwerk II.....	29
1.3.1 Wasserschloss Krespa.....	31
1.3.2 Drossel des Wasserschloss Krespa.....	33
1.4 Physikalischer Modellversuch.....	34
1.4.1 Messstellen.....	35
1.4.2 Extrapolation des Drosselverlusts.....	36
1.4.3 Ergebnisse des physikalischen Modellversuches.....	37
1.5 Zielsetzung.....	38
2. Grundlagen.....	39
2.1 Strömungsbild in der Rohrhydraulik.....	39
2.2 Ähnlichkeitsgesetze.....	39
2.2.1 Reynold'sches Modellgesetz.....	40
2.3 Gleichungen.....	41
2.3.1 Bernoullische Energiegleichung.....	41
Markus Koch.....	VI

2.3.2	Navier-Stokes- und Kontinuitätsgleichung	44
2.3.3	Modellierung von turbulenten Strömungen	45
2.3.4	Turbulenzmodell	47
2.3.5	Wandgesetz	48
2.3.6	Residuum	50
2.4	Software	51
3.	Numerische Untersuchung	52
3.1	Konzept	52
3.1.1	Pre-processing	53
3.1.2	Processing	53
3.1.3	Post-processing	53
3.2	Wahl der zu implementierenden physikalischen Prozesse	53
3.2.1	Erdbeschleunigung	53
3.2.2	Strömungszustand	54
3.2.3	Materialeigenschaften	54
3.2.4	Turbulenz	54
3.2.5	Reibung	54
3.3	Bestimmen der Beurteilungskriterien	55
3.3.1	Netzqualität	55
3.3.2	Dimensionsloser Wandabstand	56
3.3.3	Residuum	56
3.4	Umsetzung des Pre-processings	56
3.4.1	Geometrie	57
3.4.2	Netz	57
3.4.3	Lastfälle	62
3.4.4	Setup	62
3.4.5	Voruntersuchung	66
3.5	Vorgangsweise bei Konvergenzproblemen	68
3.5.1	Zeitschrittanpassung	68

3.5.2	Konvergenz der stationäre Simulationen mit unstrukturiertem Netz	69
3.5.3	Umstieg auf strukturiertes Netz	72
3.5.4	Konvergenz der stationären Simulationen mit strukturiertem Netz	77
3.5.5	Transiente Analyse	79
3.5.6	Konvergenz der transienten Simulationen mit strukturiertem Netz	81
3.6	Darstellung der Ergebnisse	82
3.7	Zusammenfassung der Vorgangsweise	82
4.	Ergebnisse der numerischen Simulationen	84
4.1	Bestimmung des Verlustbeiwertes	84
4.2	Verlustbeiwerte	85
4.3	Strömungsbild	86
4.3.1	Aufschwingen.....	87
4.3.2	Abschwingen.....	92
4.4	Vergleiche	99
4.4.1	Vergleiche zum physikalischen Modellversuch.....	99
4.4.2	Vergleiche der Verlustbeiwerte aus der numerischen Simulation	100
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	103
5.1	Zusammenfassung der Untersuchung.....	103
5.2	Modellannahmen.....	103
5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	104
5.4	Beurteilung.....	105
5.5	Ausblick	106
5.6	Fazit	106
	Literatur.....	108
	Tabellenverzeichnis.....	110
	Abbildungsverzeichnis.....	111

Abkürzungen

CFD	Computational Fluid Dynamics, numerische Strömungssimulation
DNS	Direkte Numerische Simulation
DS	Drossel
IFL	Inflationlayer, Prismenwandschichten
KW	Kraftwerk
LES	Large Eddy Simulation, Grobstruktursimulation
OW	Oberwasser
OWW	Obervermuntwerk
PSKW	Pumpspeicherkraftwerk
RANS	Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Equations
RMS	Root Mean Square, Quadratisches Mittel
SKW	Speicherkraftwerkes
SST	Shear Stress Transport, Schubspannungstransport
Si	Silvretta
UW	Unterwasser
Ve	Vermunt
VZ	Verfeinerungszone
WS	Wasserschloss

Einheiten

[-]	Einheitslos
[%]	Prozent
[Mio]	Millionen
[m]	Meter
[mm]	Millimeter
[km]	Kilometer
[mWS]	Meterwassersäule
[müA]	Meter über Adria
[s]	Sekunde
[m ³ /s]	Kubikmeter pro Sekunde
[l/s]	Liter pro Sekunde
[kg]	Kilogramm
[N]	Newton
[Pa]	Pascal
[Joule]	Joule
[MW]	Megawatt

Symbole

A	Fläche	[m ²]
α	Geschwindigkeitshöenausgleichswert	[-]
β	Druckhöenausgleichswert	[-]
d, \varnothing	Durchmesser	[m]
Δ	Differenz	
E	Energie	[Joule]
E_{Druck}	Druckenergie	[Joule]
E_{kin}	Kinematische Energie	[Joule]
E_{pot}	Potentielle Energie	[Joule]
f	relative Abweichung	[%]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
H	Energiehöhe	[m]
H_{Druck}	Druckenergiehöhe	[m]
H_{kin}	kinematische Energiehöhe	[m]
H_{pot}	potentielle Energiehöhe	[m]
h	Höhe	[m]
h_v	Verlusthöhe	[m]
δ	Kronecker-Symbol	
k_s	äquivalente Sandrauigkeit	[mm]
l	Länge	[m]
∇	Nabla-Operator	

m	Masse	[kg]
\dot{m}	Massestrom	[kg/s]
M_l	Längenmaßstab	[-]
M_t	Zeitmaßstab	[-]
M_v	Geschwindigkeitsmaßstab	[-]
n	Anzahl	[-]
P	Leistung	[W]
p	Druck	[Pa]
p_{abs}	Absoluter Druck	[Pa]
p_{dyn}	dynamischer Druck	[Pa]
ϕ	unbestimmte Größe	
ϕ_m	Größe im Modell	
ϕ_n	Größe in der Natur	
π	Kreiszahl	[-]
p_{ref}	Referenzdruck	[Pa]
p_{stat}	statischer Druck	[Pa]
p_{tot}	Totaldruck	[Pa]
Q	Durchfluss	[m ³ /s]
Q_A	Ausbauwassermenge	[m ³ /s]
q	Wachstumsrate bei Prismenwandschichten	[-]
r	Residuum	[-]
Re	Reynold'zahl	[-]

ρ	Dichte	[kg/m ³]
ρ_w	Dichte von Wasser	[kg/m ³]
t	Zeit	[s]
T	Periodendauer	[s]
τ	Schubspannung	[N/m ²]
τ_w	Wandschubspannung	[N/m ²]
u	Geschwindigkeit in x-Richtung (bei Wandgesetz)	[m/s]
u^+	dimensionslose Geschwindigkeit in x-Richtung (bei Wandgesetz)	[-]
u_τ	Schubspannungsgeschwindigkeit	[m/s]
v	Geschwindigkeit	[m/s]
η	dynamische Viskosität	[Pa·s]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]
V	Volumen	[m ³]
\dot{V}	Volumenstrom	[m ³ /s]
y	Wandabstand (bei Wandgesetz)	[m]
y^+	dimensionsloser Wandabstand (bei Wandgesetz)	[-]
ζ	Verlustbeiwert	[-]

1. Einleitung

1.1 Vorbemerkung

Die Drossel Krespa ist ein Bauteil des Wasserschlosses Krespa des Pumpspeicherkraftwerks Obervermuntwerk II (OVW II) des Energieversorgungsunternehmens **Vorarlberger Illwerke AG**. Dieses Kraftwerk ist als Erweiterung des bestehenden Speicherkraftwerkes Obervermuntwerk I zu sehen und damit auch ein Teil der Werksgruppe Obere III. Zu dieser Werksgruppe zählen neben einigen Niederdruckwasserkraftanlagen auch die Hochdruckanlagen Kopswerk I und II sowie das Vermuntwerk. Gemeinsam mit der Werksgruppe Lünersee/Rodund zählt die Werksgruppe Obere III zum Kern der Vorarlberger Illwerke (siehe Abbildung 1.1). Das PSKW OVW II weist eine Turbinenleistung von 360 MW und eine Pumpleistung von 320 MW auf. Die Drossel dient zur Dämpfung der Massenschwingung im Druckstollen, welche durch Schaltvorgänge induziert werden. Das Wasserschloss Krespa wird auf ungünstige Mehrfachschaltfälle ausgelegt, wobei die Volumenansforderungen der Kammern durch die asymmetrische Drosselung signifikant verringert werden kann.

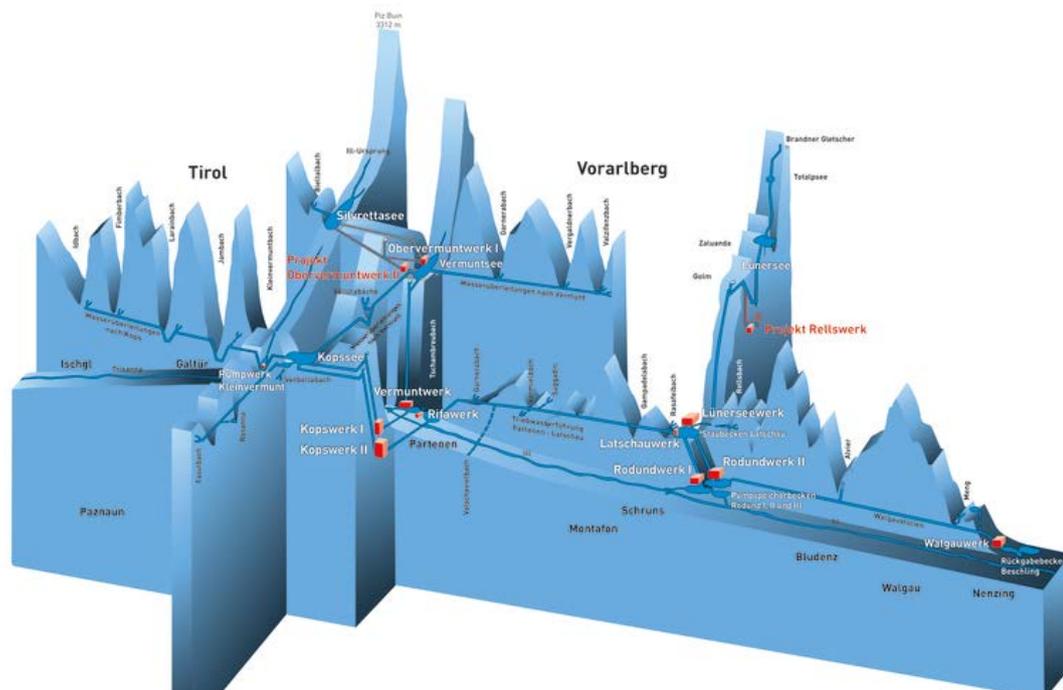


Abbildung 1.1 Kraftwerksschema der Vorarlberger Illwerke AG (Vorarlberger Illwerke AG 2016)

Am **Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft** der TU Graz wurden im Zeitraum von Juni 2012 bis Februar 2014 mehrere Untersuchungen für das Wasserschloss des Pumpspeicherkraftwerk Obervermuntwerk II durchgeführt. Die wichtigsten Punkte waren dabei die Untersuchung der Funktionsfähigkeit des Wasserschlosses mittels der Beurteilung der Strömungsverhältnisse und des Lufteintrags im Wasserschloss, die Festlegung der Wasserspiegelkurven sowie Zufluss- und Abflusskurven zu den einzelnen Lastfällen. Weiters waren die Bestimmung des Verlustbeiwertes von der Drossel und die Festlegung der Ausführungsgeometrie vom Wasserschloss und der Drossel ein Teil der Untersuchung. Dabei wurde der Drosselverlustbeiwert durch einen physikalischen Modellversuch im Maßstab 1:30 bestimmt und für den Prototyp extrapoliert.

1.2 Definitionen und Begriffsbestimmungen

Wasserkraftanlagen werden hinsichtlich ihrer Nutzfallhöhe in drei Klassen eingeteilt. Bei Niederdruckwasserkraftanlagen wird die Turbine mit einer Nutzfallhöhe kleiner 15 m beaufschlagt. Darunter fallen in Österreich Laufkraftwerke ohne Ausleitungskanal. Der Nutzfallhöhenbereich zwischen 15 m und 50 m wird von den Mitteldruckwasserkraftanlagen abgedeckt, dazu zählen hauptsächlich Ausleitungskraftwerke. Anlagen mit einer Nutzfallhöhe größer 50 m werden als Hochdruckwasserkraftanlagen bezeichnet, dies betrifft vor allem Speicherkraftwerke und Pumpspeicherkraftwerke (Giesecke, Heimerl und Mosonyi 2014). Die Eingrenzung der einzelnen Bereiche nach ihrer Nutzfallhöhe kann je nach Literatur variieren und wird auch oft mit der Einteilung nach bautechnischen Gesichtspunkten – Flusskraftwerk, Ausleitungskraftwerk, Speicher-/Pumpspeicherkraftwerk – gleichgesetzt.

Tabelle 1.1 zeigt die Einteilung von Wasserkraftanlagen nach ihren Entwurfsfallhöhen und die dazugehörigen Eigenschaften, Bestandteile sowie Charakteristika.

Tabelle 1.1 Klassifizierung der Wasserkraftanlagen nach wesentlichen Merkmalen
(Giesecke, Heimerl und Mosonyi 2014)

Entwurfsbasis	Niederdruckanlagen $h_f < 15$ m	Mitteldruckanlagen $h_f = 15-50$ m	Hochdruckanlagen $h_f > 50$ m
1. topografische Lage	Flachland (Hügelland)	Mittelgebirge	Mittel-/Hochgebirge
2. Baugrund	vorwiegend Lockergestein	Felsgestein	Felsgestein
3. Stauhaltung	feste und bewegliche Wehre	Talsperren (Dämme oder Staumauern)	Talsperren (Dämme oder Staumauern)
4. Triebwasserführung	Fluss-/Ausleitungskraftwerke	Ausleitungskraftwerke, seltener Flusskraftwerke	Ausleitungskraftwerke oder Kraftwerke mit Triebwasserstollen
5. Wesentliche Bauelemente	Einlauf - Maschinenhaus - Auslauf	Einlauf - Druckrohrleitung/-stollen - Maschinenhaus - Auslauf	Einlauf - Druckstollen - Wasserschloss - Druckrohrleitung - Maschinenhaus - Auslauf
6. Hydraulische Maschinen	Kaplan-/Propeller-/Rohr-/Francis-Turbinen	Francis-/Kaplan-/Propeller-Turbinen	Francis-/Pelton-Turbinen
	bei gleicher Maschinenleistung:		
	Einheiten großer Abmessungen vertikale oder horizontale Wellenanordnung (geneigt bei Rohr- und teilweise Propellerturbinen)	Einheiten mittlerer Abmessungen vertikale oder horizontale Wellenanordnung	Einheiten kleiner Abmessungen vertikale oder horizontale Wellenanordnung
7. Generatoren/ Hydrogeneratoren	Generatoren mit großer Polzahl	Generatoren normaler Bauart	Generatoren normaler Bauart
	Generator unmittelbar gekuppelt/mit Getriebe		
8. Ausmaß der Speicherung	Laufkraftwerke oder Tagesspeicherung	Tages- oder Wochenspeicherung	Tages- bis Überjahresspeicherung
9. Vorwiegende Energieerzeugung	schwankend, u. U. unterbrochen	kleinere Schwankungen, stetig	in Anpassung an den Bedarf
10. Lastbereich im Verbundbetrieb	Grundlastkraftwerk im Verbundbetrieb	Grundlastkraftwerk im Verbundbetrieb	Grund-/Mittel-/Spitzenkraftwerk

1.2.1 Hochdruckwasserkraftanlage

Ab einer Fallhöhe von etwa 50 m wird von einer Hochdruckwasserkraftanlage gesprochen. Dabei wird der geringe zur Verfügung stehende Durchfluss in Kombination mit dem großen Höhenunterschied zur Energiegewinnung genutzt.

Bei Hochdruckanlagen wird Energie (E) durch einen höher gelegenen Wasserspeicher als potentielle Energie ($E_{pot.}$) gespeichert und bei Bedarf durch die Erdbeschleunigung in Bewegungsenergie ($E_{kin.}$) umgewandelt. Daraus wird mittels einer Turbine-Generator-Einheit elektrische Energie ($E_{elek.}$) generiert. Dies stellt sich ohne Berücksichtigung von Verlusten wie folgt dar:

$$E = const. = E_{pot.} = m \cdot h \cdot g \Rightarrow E_{kin.} = \frac{m \cdot v^2}{2} \Rightarrow E_{elek.} \quad [Joule] \quad 1-1$$

Die Leistung der Turbine ($P_{\text{turb.}}$) – Leistung ist gleich Energie pro Zeitintervall – kann ohne Berücksichtigung von Verlusten dargestellt werden als:

$$P_{\text{turb.}} = \frac{E}{t} = \frac{m \cdot h \cdot g}{t} = \frac{\rho_w \cdot V \cdot h \cdot g}{t} = \rho_w \cdot Q \cdot h \cdot g \text{ [W]} \quad 1-2$$

Dabei ist Masse (m) gleich der Dichte (ρ_w) multipliziert mit dem Volumen (V) und Volumen pro Zeit (V/t) ist gleich dem Durchfluss (Q).

Die Hauptbestandteile einer Hochdruckwasserkraftanlage sind in Richtung des Kraftabstieges der Speicher, der Triebwasserweg, das Wasserschloss, das Krafthaus oder die Maschinenkaverne mit Turbine bzw. Pumpe, die Unterwasserführung und zum Teil der Unterwasserspeicher.

1.2.1.1 Speicher

Der Speicher, insbesondere das Absperrbauwerk, hält das Wasser auf einer gewissen Höhenlage zurück und speichert somit potentielle Energie. Das Gebiet, welches sein Oberflächen- und Grundwasser in den Speicher entwässert, wird als Einzugsgebiet bezeichnet. Um benachbarte Einzugsgebiete, hinter Wasserscheiden liegende Gebiete, einzubeziehen, können Fassleitungen verwendet werden. Diese fassen Oberflächenwässer und leiten sie in den Speicher ein. Dabei kann auch Grundwasser mit einem höheren Pegel als in der Fassleitung selbst in den Speicher entwässert werden. Das Absperrbauwerk kann als Schüttdamm, Schwergewichtsmauer oder als Gewölbestau-mauer ausgeführt werden. Neben dem Triebwasserweg sind auch ein Grundablass und eine Hochwasserentlastung vor zu sehen.

1.2.1.2 Triebwasserweg

Die Oberwasserführung, sprich die Wasserführung oberhalb der Turbine, besteht meist aus einem System von Druckstollen, Druckschächten und einem Wasserschloss. Stollen und Schacht sind bergmännische Begriffe für den horizontalen und vertikalen Grubenbau. Über Tage spricht man von einer horizontalen oder vertikalen Druckrohrleitung. Auch hier können durch sogenannten Beileitungen und durch Entwässern des Grundwassers weitere Zuflüsse generiert werden. Die Anordnung der Stollen und Schächte werden nach Seeber in mehrere Bauformen unterschieden (Seeber und Friedrich 1999).

Die alpine Bauweise (Abbildung 1.2) zeichnet sich durch einen langen, hochliegenden Druckstollen und einen kurzen steilen Druckschacht aus. Der Druckstollen wird dabei nur durch einen geringen Innen- und Bergdruck belastet. Weiters wird er durch ein Was-

erschloss vor den erhöhten dynamischen Drücken geschützt. Daher ergeben sich geringere Beanspruchungen für dessen Auskleidung. Der Bereich mit hoher Innendruckbelastung ist kurz, dies führt zu Einsparungen bei der Panzerung und somit auch bei den Kosten. Durch die geringe Länge des Kraftabstieges reduzieren sich auch die Reflexionszeit der Druckwelle zwischen Turbine und Wasserschloss und somit auch der Druckstoß. Die damit verbundene schnelle Reaktion der Wassersäule im Druckschacht führt zur notwendigen guten Regelbarkeit der Wasserkraftanlage.

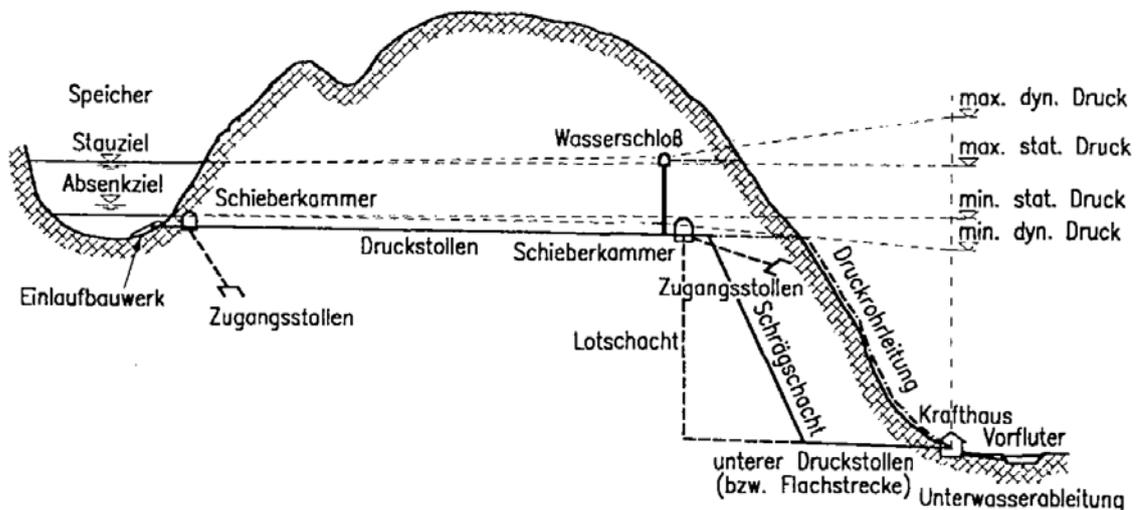


Abbildung 1.2 Hochdruckwasserkraftanlage nach alpiner Bauweise und die wichtigsten Bestandteile
(Seeber und Friedrich 1999)

Bei der Norwegischen Bauweise (ab 1973) (Abbildung 1.3) werden der Höhenunterschied und die Distanz zwischen Speicher und Turbine auf direktem Weg überwunden. Das Wasserschloss – hier ein Druckluftwasserschloss – befindet sich in unmittelbarer Nähe zur Kraftkaverne, dies reduziert den Druckstoß und die Reaktionszeit der Wassersäule zwischen Maschinen und Wasserschloss erheblich. Der hohe Innendruck des verhältnismäßig langen, schrägen Druckstollens wird durch das Gebirge aufgenommen. Norwegische Druckstollen sind zu einem Großteil unausgekleidet ausgeführt. Für diese Anforderungen an die Festigkeit und die Anforderungen an ein möglichst luftdichtes Wasserschloss können durch die vorhandenen guten Gebirgsverhältnisse in Norwegen abgedeckt werden.

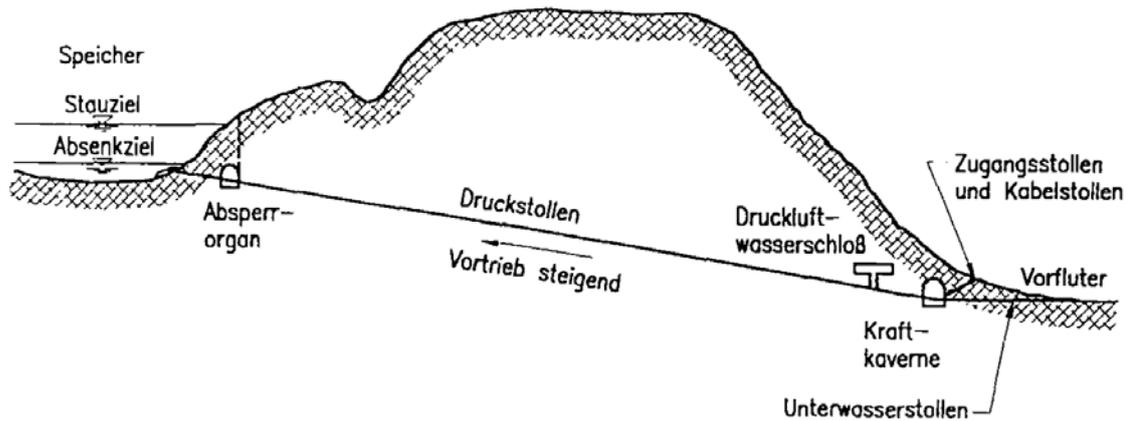


Abbildung 1.3 Hochdruckwasserkraftanlage nach Norwegischer Bauweise und die wichtigsten Bestandteile (Seeber und Friedrich 1999)

Eine tief im Gebirge liegende Maschinenkaverne ist charakteristisch für die Schwedische Bauweise (Abbildung 1.4). Dabei wird der Höhenunterschied mittels einem Lotschacht zu Beginn des Kraftabstieges überwunden. Nach der Maschinenkaverne folgen ein Unterwasserschloss und ein Unterwasserstollen, welcher auch als unverkleideter Freispiegelstollen ausgeführt werden kann.

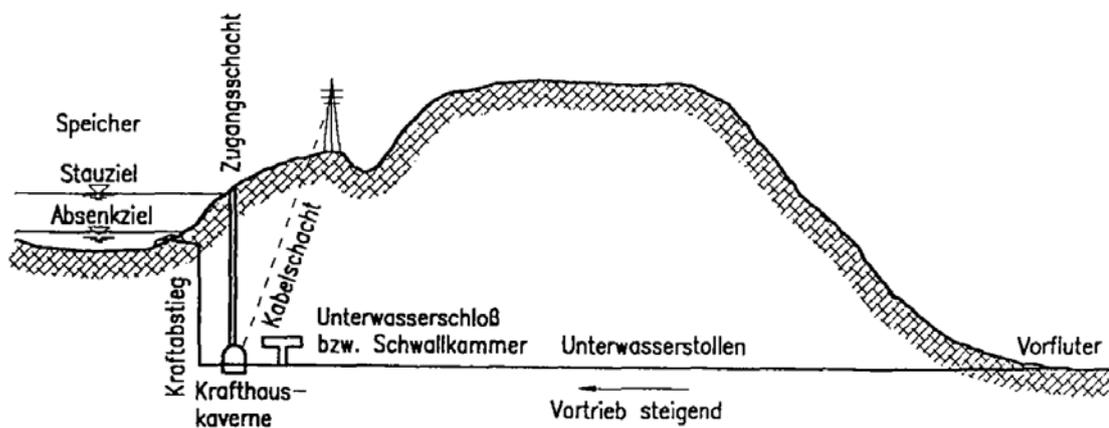


Abbildung 1.4 Hochdruckwasserkraftanlage nach Schwedischer Bauweise und die wichtigsten Bestandteile (Seeber und Friedrich 1999)

1.2.1.3 Wasserschloss

Bei Hochdruckwasserkraftanlagen liegen Speicher und Maschinenhalle meist in Höhe und Lage weit auseinander. Durch die betriebsbedingten Änderungen des Durchflusses wird Bewegungsenergie der fließenden Wassersäule stoßartig in Druckenergie umgewandelt, dies wird Druckstoß genannt (siehe Kapitel 1.2.2). Dessen Ausmaß ist in erster Linie von der Länge der Wassersäule zwischen Maschinen und freier Wasseroberfläche und der Schließ- bzw. Öffnungszeit der Regelorgane abhängig. Beides kann nur bedingt minimiert werden. Die Länge des Triebwasserwegs ist durch die Topographie vorgegeben. Die Bedienzeiten werden prinzipiell kurzgehalten. Bei Pumpturbinen entscheidet insbesondere die Maschinencharakteristik im Fall des Lastabwurfes wie hoch der Druckstoß ausfällt. Die Regelbarkeit der Maschinen hängt wiederum von der Anlauf- und Reaktionszeit der Wassersäule ab und verbessert sich je schneller die betroffene Wassermasse auf Durchflussänderungen reagiert. Daher wird bei langen Triebwasserwegen ein Wasserschloss eingebaut, welches die Druckschwankungen begrenzt und die Regelbarkeit ermöglicht. Das allerdings eine Massenschwingung zwischen dem Wasserschloss und dem Speicher verursacht. Bei der alpinen Bauweise wird ein Wasserschloss zwischen Druckstollen und Falleitung angeordnet, während bei der Norwegischen Bauweise ein Druckluftwasserschloss vor der Maschinenkaverne angeordnet wird. Bei der Schwedischen Bauweise wird hingegen ein Unterwasserschloss bzw. Schwallkammer verwendet.

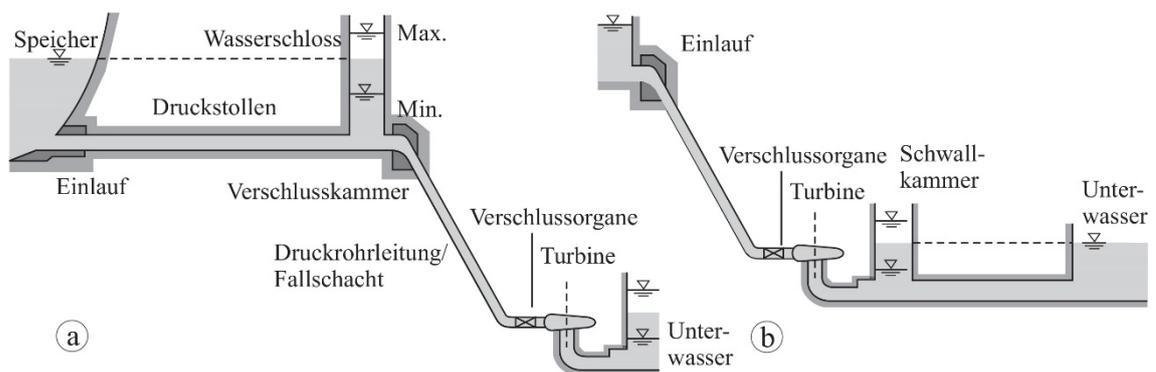


Abbildung 1.5 Schemaskizze eines Wasserschlosses (a) und einer Schwallkammer (b)

(Giesecke, Heimerl und Mosonyi 2014)

Die wichtigsten Aufgaben eines Wasserschlosses sind die Trennung des Niederdruck- vom Hochdruckbereich, die Dämpfung des Druckstoßes, Ermöglichung der Regelbarkeit

der Maschinen und Ausgleich der Wasservolumina (Giesecke, Heimerl und Mosonyi 2014).

Seit über einem Jahrhundert werden bei Hochdruckwasserkraftanlagen Wasserschläs-ser eingebaut. Wesentlich für die Stabilität und Regelbarkeit von Hochdruckwasserkraft-anlagen sind die Erkenntnisse von Thoma (Thoma 1910). Durch die unterschiedlichen örtlichen Gegebenheiten, behördlichen Auflagen, geologischen Verhältnisse und aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten wurden eine Vielzahl von verschiedenen Wasserschloss-typen (Abbildung 1.6) entwickelt. Die Wasserschläs-ser a-d) sind einfache Schachtwas-serschläs-ser; e-k) Kammerwasserschläs-ser; l-s) gedrosselte Wasserschläs-ser. Dabei haben sich einige Typen bewährt und andere wiederum werden heute nur noch sehr selten verwendet, insbesondere solche mit Überlauf (Richter 2010). Diese Arbeit be-schränkt sich auf den Wasserschlosstyp des Kraftwerks Obervermuntwerk II, ein ge-drosseltes Mehrkammerwasserschloss.

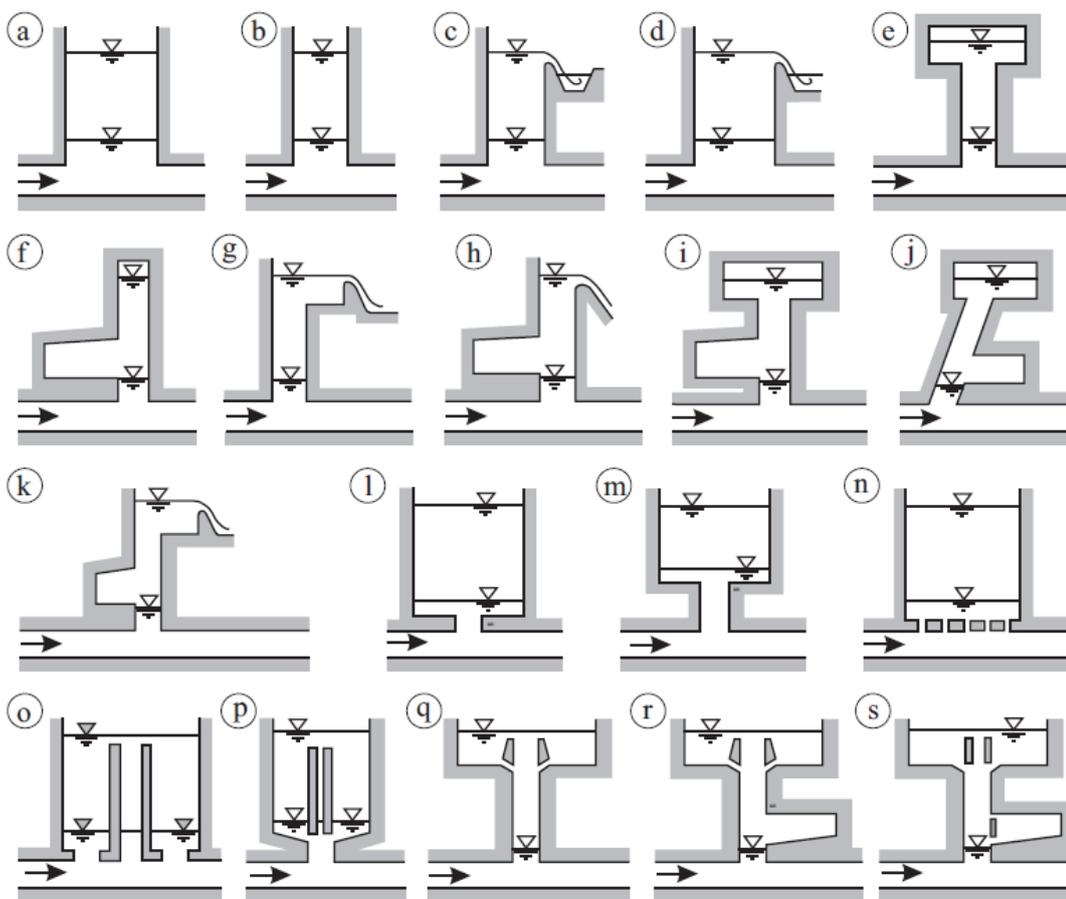


Abbildung 1.6 Wasserschlosstypen (Giesecke, Heimerl und Mosonyi 2014)

1.2.1.4 Drossel

Um die Dämpfungseigenschaft eines Wasserschlosses insbesondere für Mehrfachschaltfälle zu verbessern, wird am Wasserschlosseinlauf oder im Übergang der Unterkammer zum Steigschacht eine Drossel eingebaut. Der Zweck dafür ist die Regelfähigkeit des Kraftwerkes bei minimalem Bauaufwand für das Wasserschloss zu erhöhen. Dabei stellt sich die Dimensionierung und anschließende Optimierung (Variantenstudie) einer Drossel als eine einfache und kostengünstige Methode heraus, um Dämpfungseigenschaft des Wasserschlosses zu justieren. Das grundlegende Prinzip ist, Bewegungsenergie der Massenschwingung beim Durchströmen des Wasserschlosseinganges durch einen lokalen Widerstand zu dissipieren.

Dabei ist in den zwei Strömungsrichtungen zu unterscheiden:

- Beim Einströmen in das Wasserschloss steigt der Wasserspiegel im Wasserschloss, daher auch Aufschwingen genannt. Im Stollen entsteht durch den Widerstand ein Staudruck, der wiederum auf den Druckstollen wirkt. Ein Überlaufen des Wasserschlosses ist zu vermeiden. Der Drosselverlust wird zum Wasserspiegel im Wasserschloss addiert und bestimmt so den Innendruck am Wasserschlossfußpunkt.
- Nach der Umkehr der Strömungsrichtung sinkt der Wasserspiegel im Wasserschloss, daher auch Abschwngen genannt. Dabei ist zu beachten, dass der Wasserspiegel nicht unter die Oberkante des Druckstollens fällt. Ein Unterdruck im Druckstollen aufgrund einer starken Drosselwirkung ist zu vermeiden.

Um Wartungsfreiheit und Sicherheit gegen Störfälle zu gewährleisten, dürfen Drosseln keine beweglichen Teile beinhalten (Seeber, 1970). Aus diesem Grund wird die klassische Form einer Drossel, die Klappe, nicht verwendet. Im Wesentlichen lassen sich Drosseln in drei Bauformen einteilen, die jeweils unterschiedliche Eigenschaften besitzen:

- Blende
- Düsendrossel
- Wirbelkammerdrossel

Die **Blende** ist eine einfache Querschnittsverengung, die beim Durchströmen in beide Richtungen den selben Widerstand hervorruft (Drosselverhältnis 1:1). Wobei dies auch von den Durchmessern der anschließenden Bauteile abhängt. Da aber der Aufschwingewiderstand durch den zulässigen dynamischen Druck im Stollen begrenzt wird, kann

es sein, dass der Abschwingwiderstand zu gering ist, bzw. ein höherer Abschwingwiderstand zielführender wäre. Bei Kammerwasserschlossern mit geringen Spiegelschwankungen des Speichers oder bei Differenzialwasserschlossern kann die Blende eine kostengünstige Bauform sein. Der lokale Verlust entsteht dadurch, dass durch die Einengung des Querschnittes die Strömungsgeschwindigkeit lokal steigt und dieser beschleunigte Wasserstrahl in die verhältnismäßige langsamere Wassermasse hineinstößt. In Richtung der Fließrichtung entsteht nach der Blende ein Totwasserraum mit Rotationsströmungen mit erhöhter innerer Reibung (Abbildung 1.7).

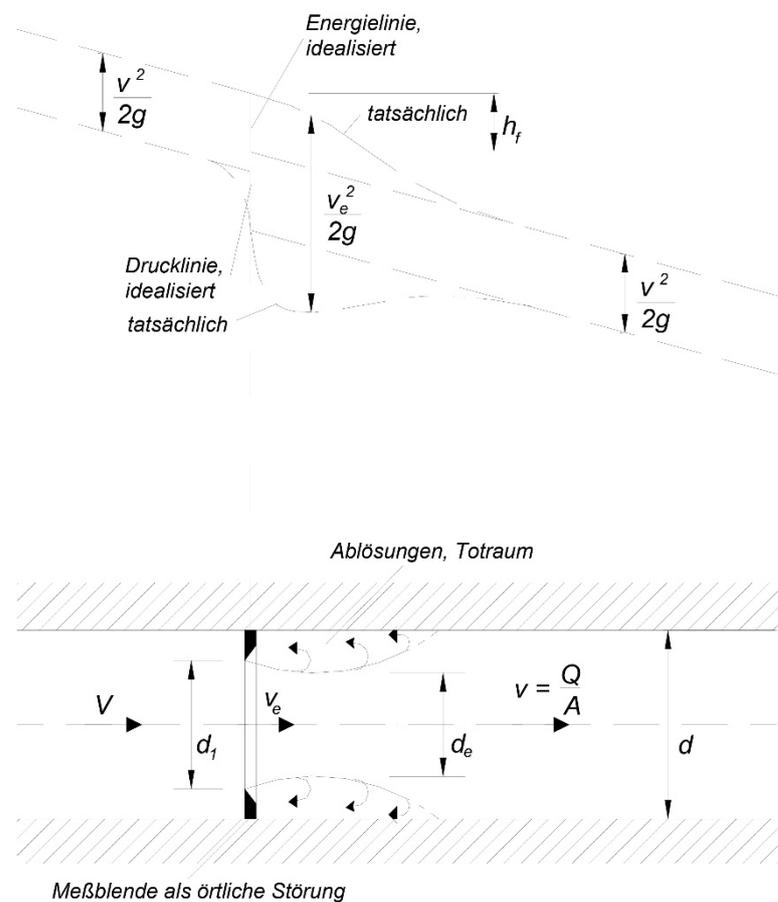


Abbildung 1.7 Verlauf von Energie- und Drucklinie sowie Strömungsablösung bei einer Blende (Zenz, et al. 2014)

Eigenschaften (Richter 2010) einer Blende sind:

- einfachste Drosselkonstruktion
- einfach zu dimensionieren
- sicher im Betrieb
- kostengünstig
- geringer Materialaufwand
- Drosselverhältnis 1:1

Die **Düsendrossel** kann im Gegensatz zur Blende eine asymmetrische Drosselwirkung erzielen. Sie erreicht ein Drosselverhältnis von bis zu 1:3 (Heigerth 2016). Werden die Anschluss-Geometrien vor und nach der Drossel berücksichtigt kann ein höheres Drosselverhältnis erreicht werden. In Richtung des Wasserschlosses verengt sich der Querschnitt kontinuierlich und danach weitet er sich wieder abrupt auf. Meist ist die Seite der plötzlichen Querschnittseinengung mit einem scharfkantigen Einstand, der in Richtung des Wasserschloss zeigt, umrandet (siehe Abbildung 1.8). Ähnlich der Blende ist das Grundprinzip: Ein beschleunigter Wasserstrahl stößt in eine verhältnismäßig langsamere Wassermasse und löst dadurch Verwirbelungen mit erhöhter innerer Reibung aus. Der wesentliche Unterschied ist die Form der Ablösezone. Diese ragt beim Aufschwingen nicht so weit in den Massenstrom der Strömung hinein und verursacht dadurch einen geringeren Widerstand. Beim Abschwigen hat diese Bauform in etwa die gleichen Drossel Eigenschaften wie eine Blende oder kann durch den Drosseleinstand noch verstärkt werden. Dies wird hervorgerufen durch die weiter in den Massestrom hineinreichende Ablösezone. Der Vorteil der Bauform ist, dass das Aufschwingen gezielt leichter gedämpft werden kann, um einen zu hohen dynamischen Drucks im Druckstollen zu verhindern.

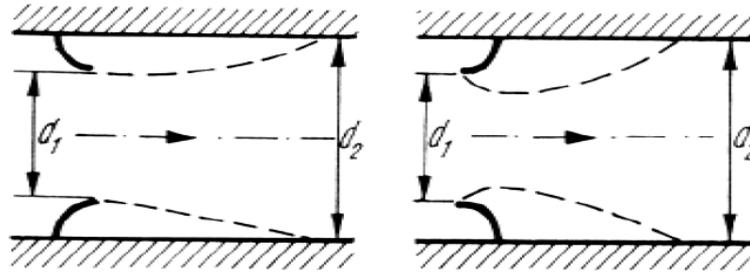


Abbildung 1.8 Ablösezone bei einer kontinuierlichen (links) und bei einer plötzlichen Querschnittsverengung mit Einstand (rechts)

Die Einsatzmöglichkeiten der Düsendrossel sind dank der asymmetrischen Drosselung nicht wie bei der Blende auf schwache Spiegelschwankungen des Speichers beschränkt, sondern sie kann bei nahezu allen Kammerwasserschlossern und Differenzialwasserschlossern verwendet werden.

Die Eigenschaften (Richter 2010) einer Düsendrossel sind:

- einfach zu konstruieren
- sicher im Betrieb
- kostengünstig
- Drosselverhältnis 1:3 (Heigerth 2016)

Die **Wirbelkammerdrossel**, auch Rückströmdrossel genannt (Giesecke, Heimerl und Mosonyi 2014), ist in Relation zur Düsendrossel eine stark asymmetrische Drossel, die ein Drosselverhältnis von bis zu 28:1 (Heigerth 2016) erreicht, teilweise auch darüber siehe Kaunertalkraftwerk (Seeber 1970). Speziell im Fall von hohen Spiegelschwankungen des Speichers wird ein niedriger Aufschwingwiderstand notwendig. Um jedoch die Massenschwingung einbremsen zu können, muss gleichzeitig ein verhältnismäßig hoher Abschwingwiderstand zur Verfügung stehen. Im Gegensatz zur Blende und zur Düsendrossel wird diese Bauform nicht im Wasserschlosseinlauf eingebaut, sondern zwischen Unterkammer und Oberkammer (siehe Abbildung 1.9).

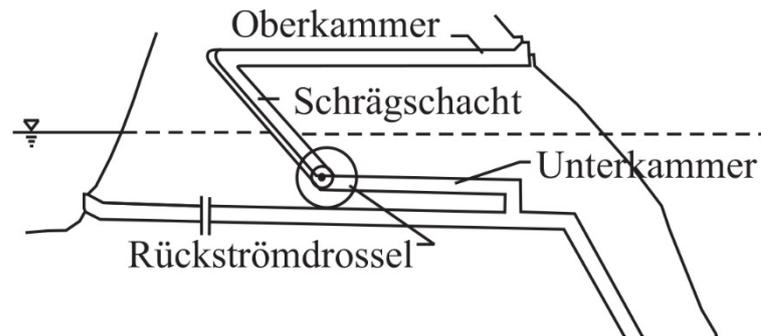


Abbildung 1.9 Schema Zweikammerwasserschloss mit Rückströmdrossel
(Giesecke, Heimerl und Mosonyi 2014)

Genauer gesagt wird sie rechtwinklig zur Unterkammer beim Einlauf zum schrägen Steigschacht eingebaut. Ein Saugrohr verbindet den Drosseltorus mit der Unterkammer und der Abgang zum Schrägschacht läuft tangential aus der Drossel heraus. Durch die starke Drosselwirkung der Wirbelkammerdrossel beim Abschwingen müssen zusätzliche Belüftungseinrichtungen für die Unterkammer (Hauptbelüftung) und für die Drossel selbst (Nabenbelüftung) eingebaut werden (siehe Abbildung 1.10).

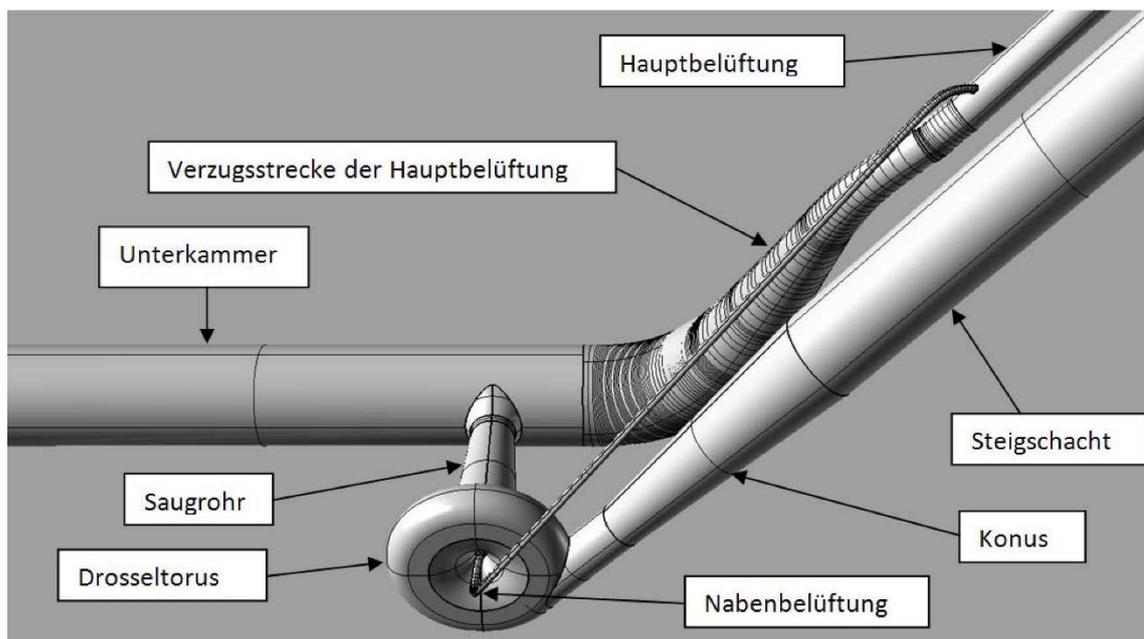


Abbildung 1.10 Bestandteile und Einbauschema der Wirbelkammerdrossel des KW Kاونertal (1964-2016)
(Richter 2010)

Der Unterschied zwischen Auf- und Abschwingwiderstand wird durch zwei völlig konträre Strömungsvorgänge verursacht. Beim Aufschwingen wird die Strömung durch die Umlenkung und – wie bei den Drosselvarianten zuvor – durch das Einstoßen in verhältnismäßig langsamere Strömung abgebremst. Nach der Umkehr der Strömungsrichtung wird beim Abschwingen ein Rotationswirbel mit hohem Energieverlust erzeugt. Dies wird durch den tangentialen Einlauf vom Schrägschacht in die Drosselkammer und dem zentralen Abfluss in die Unterkammer hervorgerufen.

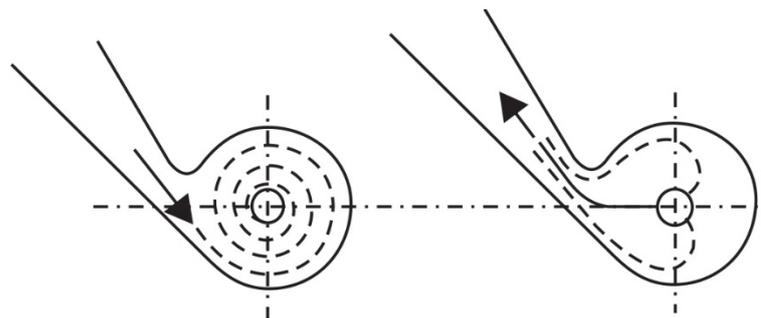


Abbildung 1.11 Funktionsweise einer Wirbelkammerdrossel links Abschwingen, rechts Aufschwingen
(Giesecke, Heimerl und Mosonyi 2014)

Die Eigenschaften (Richter 2010) einer Wirbelkammerdrossel sind:

- gut geeignet bei hohen Spiegelschwankungen des Speichers
- starke Asymmetrie
- Drosselverhältnis 1:28 (Heigerth 2016), im KW Kaunertal 1:40 (Seeber 1970)
- reduziert das erforderliche Kammervolumen, insbesondere Unterkammer
- kavitations- und vibrationsanfällig
- komplexe Bauform

Diese Arbeit beschränkt sich auf die Drosselvariante des Kraftwerks Obervermuntwerk II, einer asymmetrischen Düsendrossel.

1.2.2 Druckstoß und Massenschwingung

Durch die betriebsbedingten Änderungen des Durchflusses (Q_t) wird bei der Verringerung des Durchflusses Bewegungsenergie der fließenden Wassersäule in Druckenergie und bei der Erhöhung des Durchflusses Druckenergie in Bewegungsenergie umgewandelt. Dies schlägt sich in einen positiven bzw. negativen Druckstoß nieder. Durch das

Auftreten des Druckstoßes und durch die Eigenschaften von Wasser entstehen Druckwellen mit unterschiedlichen Wellenlängen. In der Falleitung treten hochfrequente Druckwellen auf, diese werden durch die Kompressibilität von Wasser hervorgerufen und durch die Verformbarkeit von der Auskleidung beeinflusst. Sie pflanzen sich bis zur nächsten freien Wasseroberfläche (im Wasserschloss) fort und schwingen mit kurzer Schwingungsdauer als Druckstoßfolge. Sie oszilliert, nach einer fast vollständigen Reflexion an der Wassermenge im Wasserschloss, zwischen Wasserschloss und Ausgangspunkt der Störung (Abbildung 1.12 b). Durch interne Reibungsverluste und der Umwandlung in Verformungsenergie wird die Druckstoßenergie dissipiert. Der Druckstoß und die Massenträgheit rufen im Wasserschloss eine Veränderung des Wasserstands hervor (siehe in Abbildung 1.4 Max. und Min. Wasserstand im Wasserschloss bzw. Schwallkammer). Dies löst im Bereich des Druckstollens niederfrequente Druckwellen sowie ein Massenschwingen zwischen Wasserschloss und Speicher aus (Abbildung 1.12 a). Wegen der meist sehr großen Wasseroberfläche im Speicher schwingt der Wasserspiegel im Wasserschloss nur einseitig mit einer großen Schwingungsdauer.

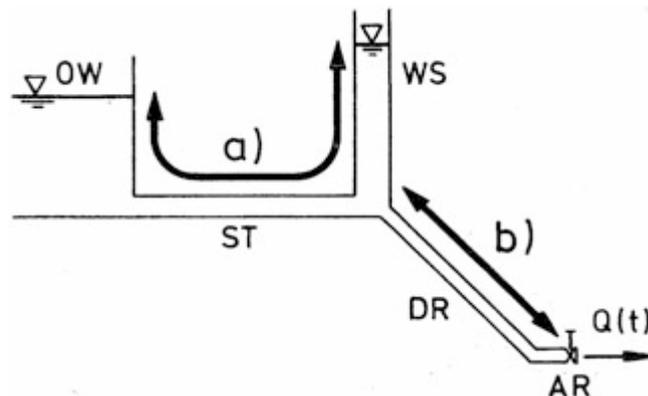


Abbildung 1.12 a) Massenschwingung und b) Druckstoßfolge (Zanke 2013)

Die Druckstoßschwingung in der Falleitung wird hauptsächlich durch die Überlagerung der Druckwellen sowie der Reibung und der elastischen Verformung gedämpft. Die Massenschwingung im Druckstollen durch die Dämpfungseigenschaft des Wasserschlusses und durch die Reibung im Stollen selbst. Bei der Dämpfung der Massenschwingung im Wasserschloss ist zwischen Aufschwingen, das Steigen des Wasserspiegels im Wasserschloss und Abschwngen, das Absinken des Wasserspiegels, zu unterscheiden (siehe Kapitel 1.2.1.4). Da beim Abschwngen ein Lufteinbringen in den Stollen unbe-

dingt vermieden werden soll, wird weiteres Volumen durch die Verwendung einer Unterkammer bereitgestellt und das Ausfließen aus dem Wasserschloss stärker gedämpft (asymmetrische Drossel).

1.3 PSKW Obervermuntwerk II

Das im Bau befindliche Pumpspeicherkraftwerk Obervermuntwerk II ist eine Erweiterung des bereits bestehenden Obervermuntwerk I und steht mit diesem in einem hydraulischen Zusammenhang. Die Fertigstellung ist für das Jahr 2018 geplant. Beide Hochdruckwasserkraftanlagen sind Teil der Kraftwerksgruppe Obere III (Abbildung 1.13) des Energieversorgungsunternehmens Vorarlberger Illwerke AG.

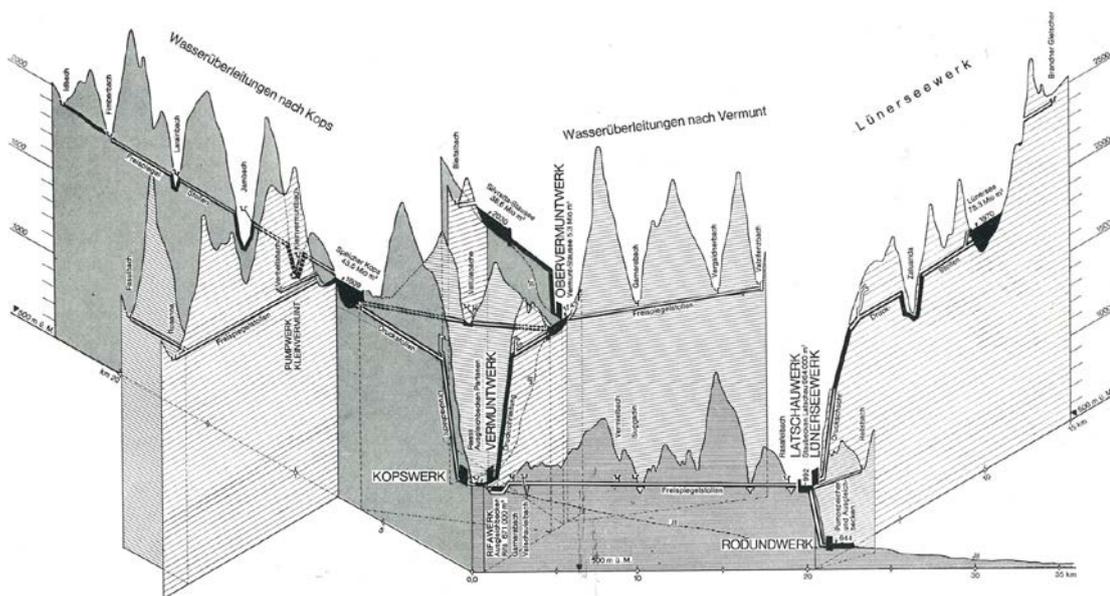


Abbildung 1.13 Übersichtslängenschnitt der Werksgruppe Obere III (Laufer 1983)

Das Kraftwerk OVW II wird mit dem Wasser aus dem Silvretta-Stausee gespeist und leitet das Unterwasser in den Vermunt-Stausee. Die Energiegewinnung erfolgt in einem untertage befindlichen Kavernenkrafthaus mit einer Turbinenleistung von 360 MW und einer Pumpleistung von 320 MW. Die maximale Bruttofallhöhe beträgt 311,2 m und die Ausbauwassermengen belaufen sich auf 160 m³/s für den Turbinenbetrieb und 135 m³/s für den Pumpbetrieb. Der 3,7 km lange Triebwasserweg verläuft vollständig unter Tage. Der obere Teil wird nach Fertigstellung auch vom bestehenden Kraftwerk OVW I genützt, dessen Triebwasserleitung zurückgebaut werden wird. Der Druckstollen Silvretta (Silv-

rettastollen) besitzt eine Neigung von rund 10 %, der darauf anschließende Druckschacht Silvretta besitzt eine Länge von 100 m und eine Neigung von 48 %. Zirka 480 m vor dem Übergang vom Stollen zum gepanzerten Schacht zweigt der rund 1300 m lange Druckstollen des OVW I ab. 60 m danach befindet sich der Verbindungsstollen mit eingebauter Drossel zum Wasserschloss Krespa.

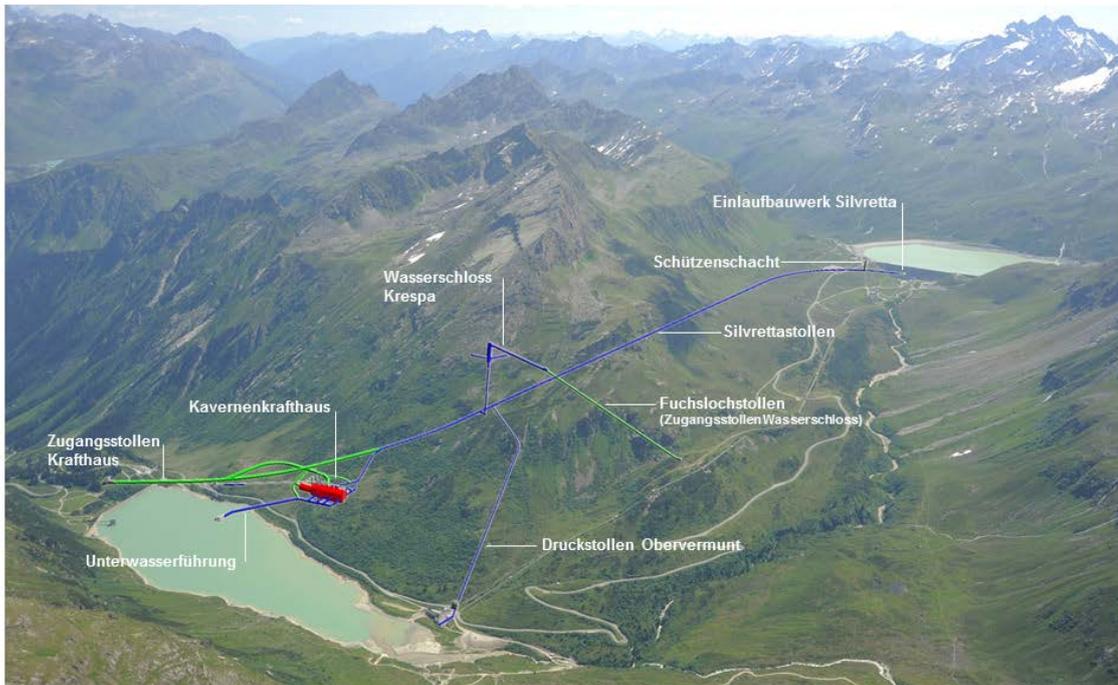


Abbildung 1.14 Projektübersicht OVW II (Zenz, et al. 2014)

Tabelle 1.2 Eckdaten des Obervermuntwerk II (Zenz, et al. 2014)

Bruttofallhöhen	[m]
Maximal: Stauziel Speicher Silvretta – Absenkziel Speicher Vermunt	311,2
In den Speicherschwerpunkten	279,7
Minimal: Absenkziel Speicher Silvretta – Stauziel Speicher Vermunt	243,2
Nennleistungen:	[MW]
im Turbinenbetrieb	360
im Pumpbetrieb	320
Nenndurchflüsse:	[m³/s]
Turbinenbetrieb	166
Pumpenbetrieb	135

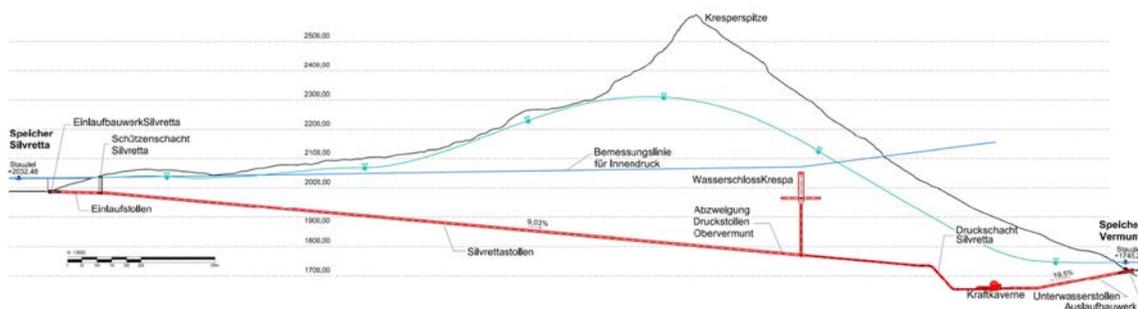


Abbildung 1.15 Längsschnitt OVW II (Zenz, et al. 2014)

1.3.1 Wasserschloss Krespa

Das Wasserschloss Krespa (Abbildung 1.16) ist ein gedrosseltes Mehrkammerwasserschloss, wobei drei um den Steigschacht sternförmig angeordnete Stollen, als nicht durchflossene Unterkammern dienen. Nach der Abzweigung vom Silvrettastollen (\varnothing 6,8 m) folgt ein waagrechter Verbindungsstollen mit einer Länge von 50 m, in dem eine asymmetrische Drossel (\varnothing 3,854 m) eingebaut ist. Darauf schließen ein Neunzig-Grad-Segmentbogen und ein Konus, der den Durchmesser kontinuierlich auf 6,3 m verringert,

an. Es folgen ein 185 m langer Vertikalschacht und eine Aufweitung die den Durchmesser auf 17 m vergrößert. An den 78 m langen Steigschacht schließt das eigentliche Wasserschloss an. Die sternförmig angeordneten Unterkammern sind drei Stollen mit je einer Länge von 70 m und einem Innendurchmesser am Stollenende von 7 m. Die Neigungen der Sohlen und der Firsten alternieren (-2 % Firstneigung und 1 % Sohlneigung), so dass sich die Stollen zum Schacht hin vertikal auf 9 m aufweiten. Die steilere Firstneigung ermöglicht ein rasches Ausblasen von eingeschlossener Luft im Fall des Aufschwingens. Der Steigschacht schließt mit einer Kopfkaverne ab (\varnothing 20,3 m), die beim Übergang zum Schacht mit einem perforierten Ring versehen ist. Diese „Brause“ besitzt insgesamt 432 Durchbrüche an der Sohle und Brüstung mit einem Durchmesser von 0,18 m. Dies verhindern beim Abschwingvorgang, dass Luft zu weit in den Steigschacht eingetragen wird (max. Oberkante der Unterkammern). Die Oberkammer bildet ein 320 m langer Stollen mit einem Durchmesser von 7 m und ist bis zum Übergangsbauwerk mit 1,5 % geneigt. Darauf folgt der fallende Belüftungsstollen (-15 %) mit einer Länge von rund 660 m bis zur Zufahrtsstraße.

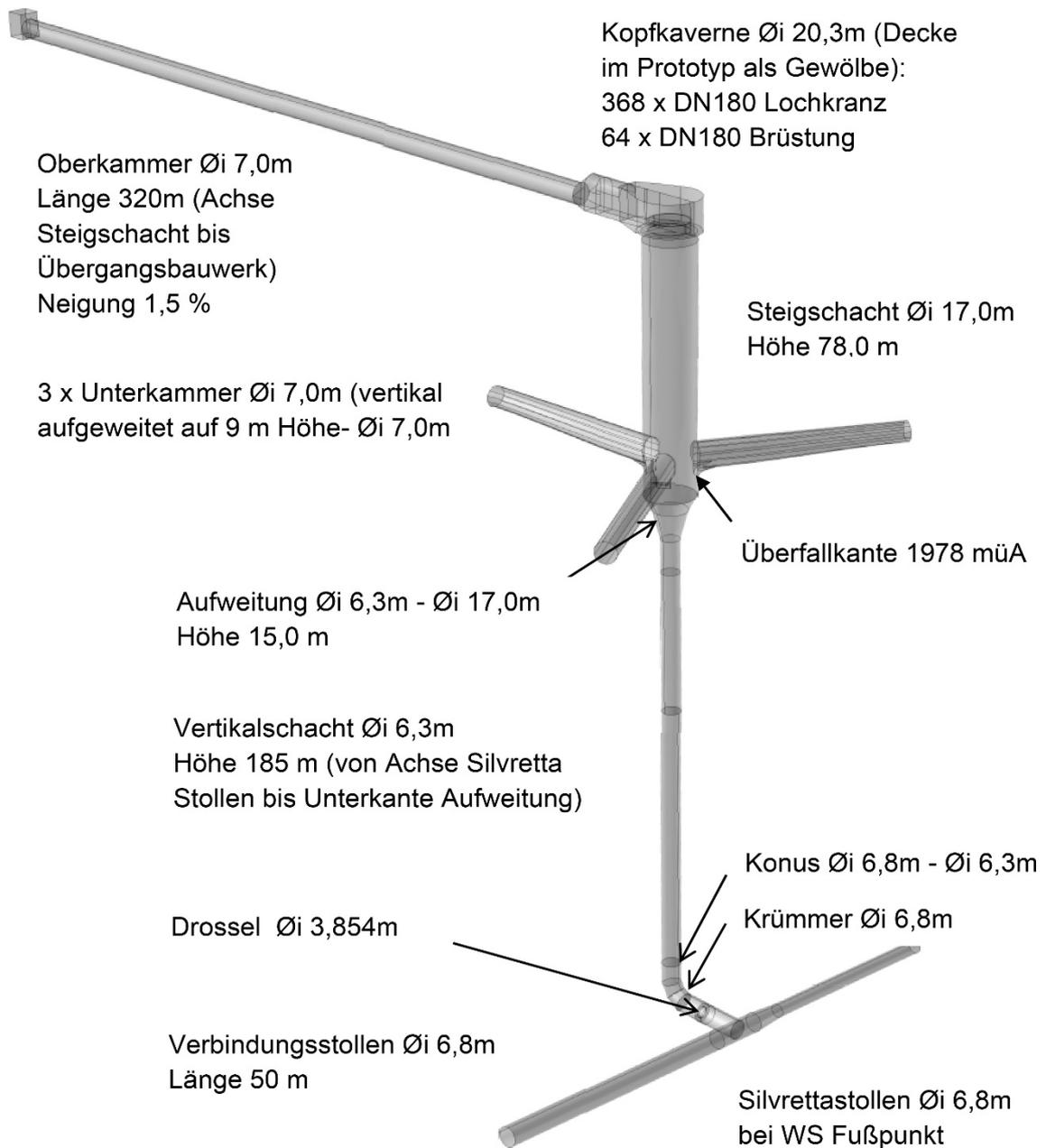


Abbildung 1.16 3D-Darstellung Wasserschloss Krespa (Zenz, et al. 2014)

1.3.2 Drossel des Wasserschloss Krespa

Die Drossel des Wasserschlosses Krespa ist eine asymmetrische Düsendrossel (siehe Abbildung 1.17), die sich in Richtung des eigentlichen Wasserschlosses kontinuierlich auf einen Durchmesser von 3,854 m verjüngt. Danach weitet sich der Querschnitt wieder abrupt auf den Durchmesser des Verbindungsstollens (\varnothing 6,8 m) auf und ist dabei mit einem scharfkantigen Einstand umrandet (siehe Abbildung 1.17).

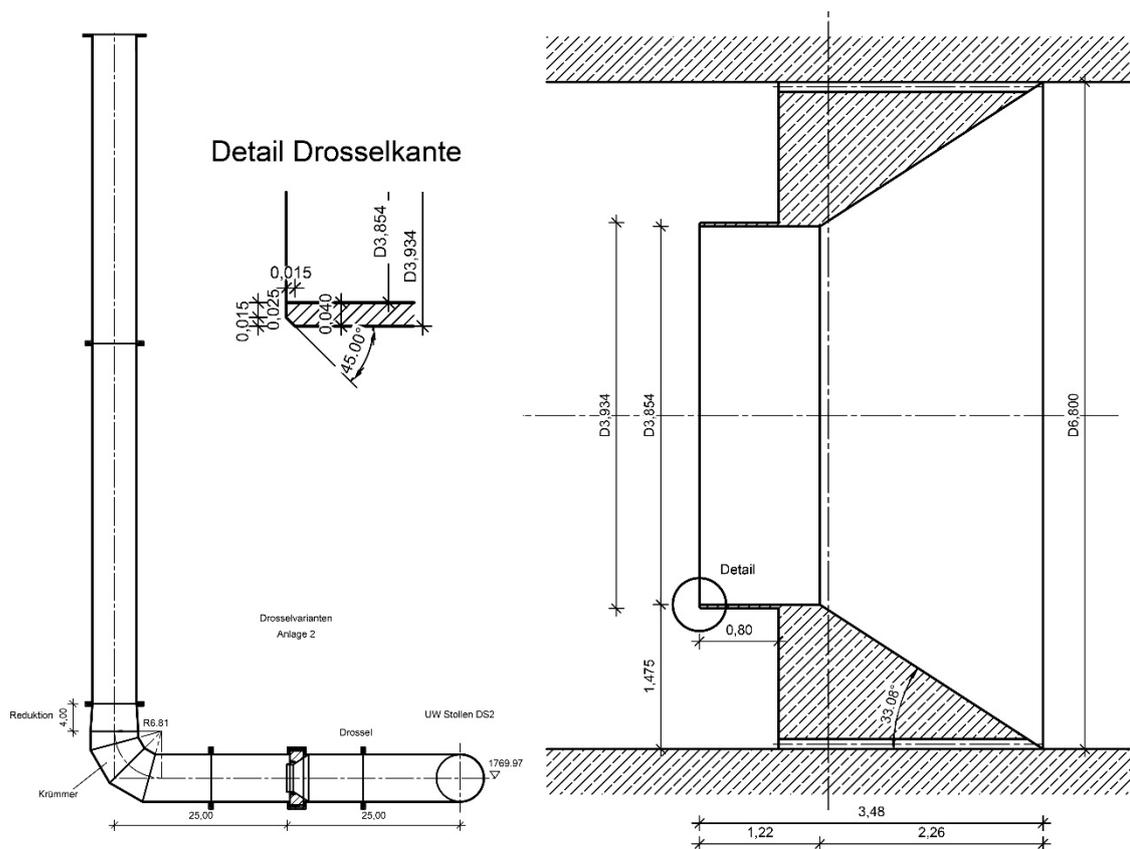


Abbildung 1.17 Auszug aus dem Modellbauplan, Kreuzriss und Drosseldetail
(Zenz, et al. 2014)

Die Strömung wird beim Aufschwingen durch die kontinuierliche Querschnittseinengung der Drossel auf Grund der Kontinuitätsbedingung ($Q=\text{konstant}$) beschleunigt, jedoch steigt der Reibungsverlust. Anschließend stößt die Strömung in verhältnismäßig langsamerer Strömung nach der Drossel und verursacht dadurch Wirbelströmungen mit erhöhter Energiedissipation. Beim Abschwngen entstehen durch den scharfkantigen Einstand radiale Strömungskomponenten in Richtung Drosselachse im Bereich der plötzlichen Querschnittsverengung. Diese Strömungskräfte beeinflussen die Ablösezone der Drossel. Verstärkt durch den scharfkantigen Einstand verengt die Ablösezone weiters den durchströmten Querschnitt. Nach der allmählichen Querschnittserweiterung entstehen wieder Wirbelströmungen mit erhöhten Energieverlusten.

1.4 Physikalischer Modellversuch

Am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft wurde ein Modell in Stahl bzw. Edelstahl und Acrylglas der Drossel Krespa im Maßstab von 1:30 samt Verbindungsstollen,

T-Stück, Segmentbogen und Ansätze (mindestens 15 Durchmesserlängen) des Vermunt- und Silvrettastollens sowie des Verbindungsschachtes zum Wasserschloss aufgebaut (siehe Abbildung 1.18). Aufgrund der begrenzten Druckhöhe der Pumpenanlage wurden am Modell bei verschiedenen Durchflüssen die Verlusthöhen gemessen und dann auf den Prototyp extrapoliert (Klasinc, Knoblauch und Dum 1992). Die Verluste aus der Rohrreibung wurden abgezogen, um dann den Verlustbeiwert, $\zeta_{\text{auf/ab}}$, für die Drossel inklusiver Anschlüsse in Aufschwing- und Abschwingrichtung angegeben zu können. Dabei wurde darauf geachtet, dass ein äußerer stationärer Fließzustand (Zufluss = Abfluss) erreicht wird.

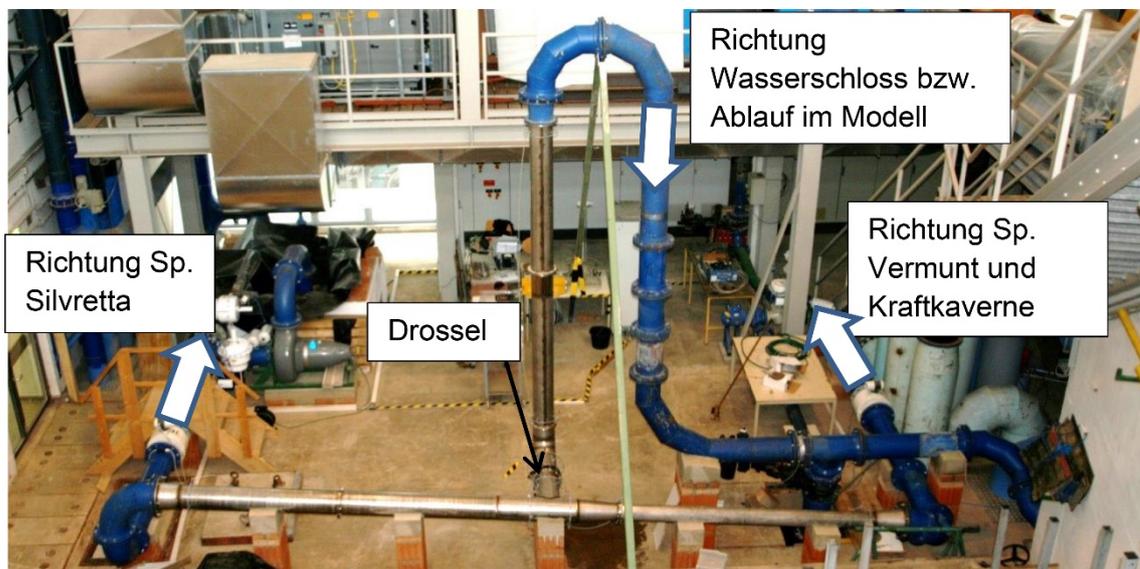


Abbildung 1.18 Modellaufbau im Wasserbaulabor der TU Graz (Zenz, et al. 2014)

1.4.1 Messstellen

Die Messungen erfolgten mittels Differenzdruckmessungen zwischen den einzelnen Messstellen nach Abbildung 1.19. Dabei stehen die Abkürzungen W_s , V_e , S_i für Wasserschloss, Vermunt- und Silvrettastollen. Die Zählung der Messstellen in den drei Richtungen beginnt von der Drossel ausgehend. Die lokalen Verluste, die durch den Konfusor im Vermuntstollen ausgelöst werden, sind nicht Teil des Drosselverlustes. Daher wurde dieser nur mittels Auf- und Abströmen von und in Richtung des Silvrettastollens ermittelt.

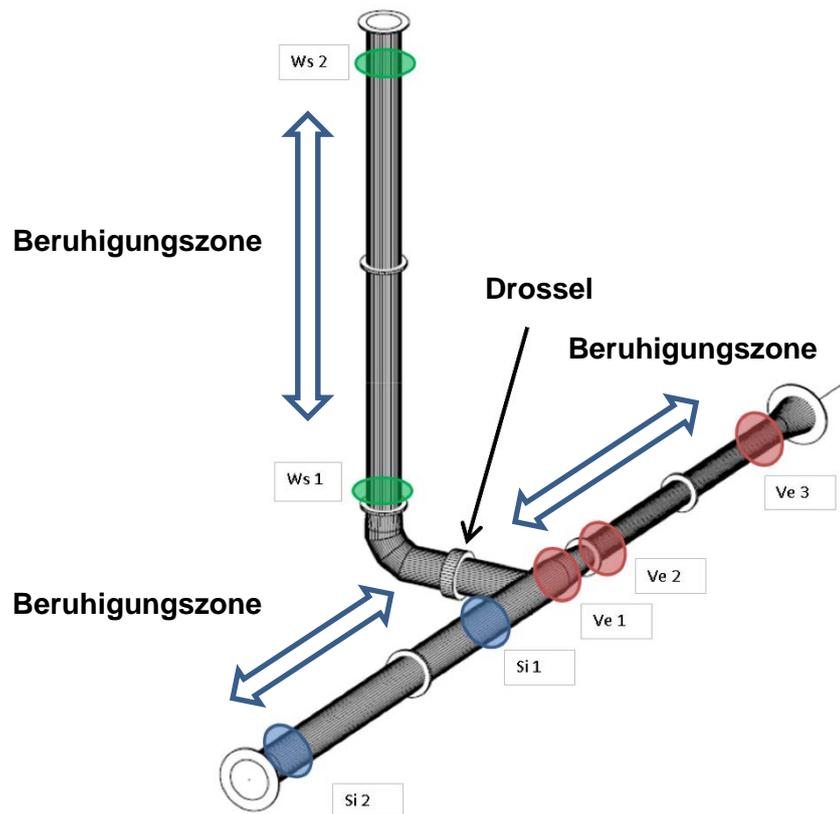


Abbildung 1.19 Messstellenübersicht
(Zenz, et al. 2014)

1.4.2 Extrapolation des Drosselverlusts

Mit Anstieg der Reynolds'zahl nimmt der Einfluss dieser Zahl auf die Wandreibung im hydraulischen Übergangsbereich ab und wird im rauen Bereich von ihr unabhängig (siehe Abbildung 1.20). Die lokalen Verluste sind ab einer Reynolds'zahl von 10^5 konstant (Ideľ'čik 1994). Für die Extrapolation wurde ein Basispolynom durch quadratische Interpolation zwischen den gemessenen Gesamtverlusten aufgestellt. Dabei wurden mehrere Versuche mit unterschiedlichen Durchflüssen herangezogen. Die Rohrreibung wurde dann vom Gesamtverlust abgezogen, um nur den lokalen Verlust der Drossel zu bestimmen (Klasinc, Knoblauch und Dum 1992) (Zenz, et al. 2014).

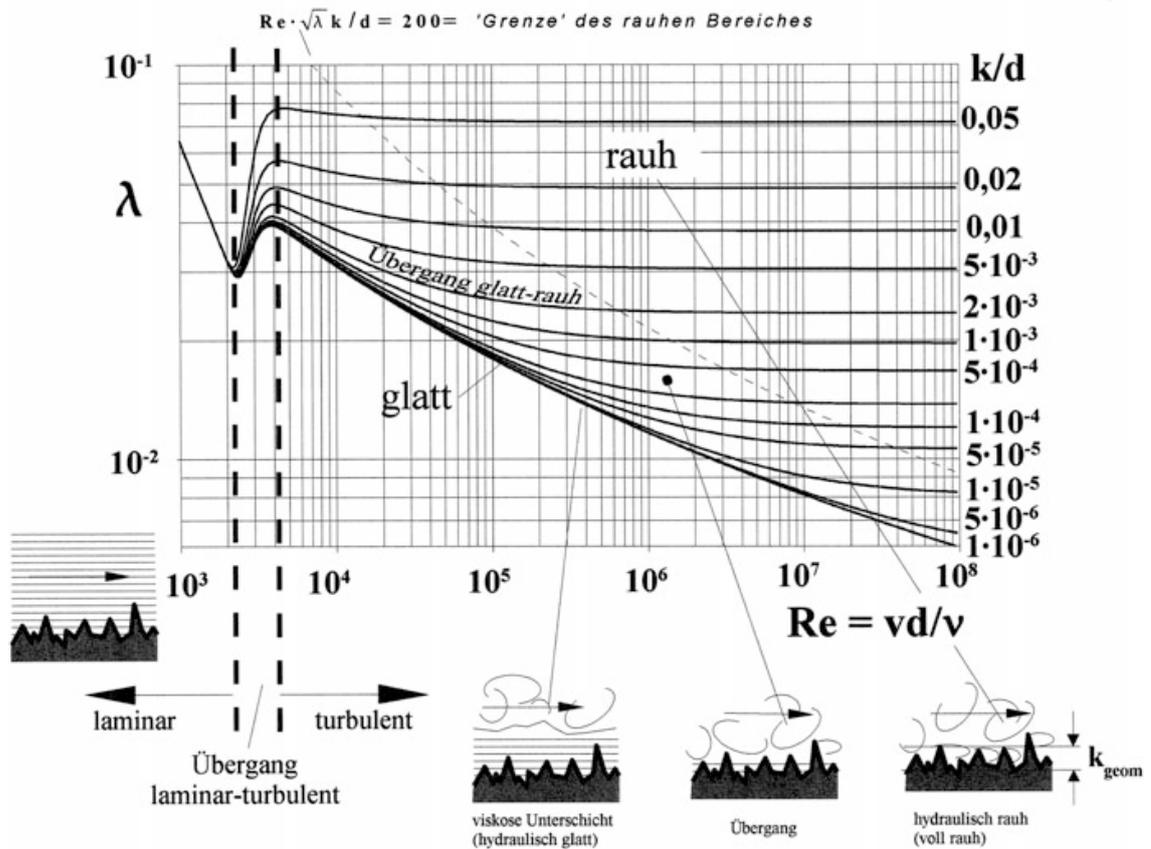


Abbildung 1.20 Diagramm für technisch raues Widerstandsverhalten (Zanke 2013)

1.4.3 Ergebnisse des physikalischen Modellversuches

Die Untersuchungen und anschließenden Berechnungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft haben folgende Ergebnisse geliefert:

Tabelle 1.3 Ergebnisse des physikalischen Modellversuches
(Zenz, et al. 2014)

	ζ
Lastfall	[-]
Aufschwingen	0,666
Abschwingen	1,815

Anzumerken ist, dass für die Wasserschlossauslegung die Verlustbeiwerte konservativ um 10 % abgemindert werden.

1.5 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit geht über eine rein projektbezogene Untersuchung für das Pumpspeicherkraftwerk Obervermuntwerk II hinaus und soll weitere Aspekte für die Einbeziehung der numerischen Verfahren in Verlustwertbestimmung von Drosselbauteilen in Hochdruckanlagen beleuchten. Dabei wird die numerische Bestimmung des Verlustbeiwertes einen physikalischen Modellversuch derzeit nicht ersetzen können, sondern ist als unterstützende Untersuchung anzusehen. Insbesondere bieten numerische Untersuchungen folgende Vorteile:

- Umfassende Variantenstudie
- Untersuchung der Strömungskomponenten, insbesondere des transienten Strömungsverhaltens
- Hydraulische Optimierung der Drosselgeometrie

Um dies zu erreichen werden die Ergebnisse aus der numerischen Untersuchung mit den Ergebnissen aus dem physikalischen Modellversuch verglichen. Des Weiteren soll der Einfluss des Maßstabes (Modellfamilie) im numerischen Verfahren untersucht werden. Ein weiteres Ziel ist es, unterschiedliche Sandrauhigkeiten in unterschiedlichen Modellmaßstabsfaktoren untereinander zu vergleichen.

2. Grundlagen

2.1 Strömungsbild in der Rohrhydraulik

In der Rohrhydraulik unterscheidet man prinzipiell zwischen laminarer und turbulenter Strömung. Darüber hinaus gibt es zwischen diesen einen Übergangsbereich. Die Eingrenzung erfolgt anhand der Reynold'zahl (Gleichung 2-1). Sie beschreibt das Verhältnis zwischen Trägheits- und Zähigkeitskräften und ist der Quotient aus dem Produkt von der Dichte (ρ), Geschwindigkeit (v), sowie der charakteristischen Länge (d) und der dynamischen Viskosität ($\eta \approx 1,31 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$). In der Rohrhydraulik ist die charakteristische Länge meist der Rohrdurchmesser.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} [-] \quad 2-1$$

Ab einer Reynold'zahl von 2320 ist eine Rohrströmung gegenüber kleinen Störungen instabil und geht von einer laminaren zu einer turbulenten Strömung über (Sigloch 2014). Charakteristisch für die beiden Strömungszustände sind ihre Geschwindigkeitsverteilungen über den Querschnitt (siehe Abbildung 2.1). Bei der laminaren Strömung steigt die Strömungsgeschwindigkeit bis zur Rohrmitte an und verfolgt dabei einen parabolischen Verlauf. Im Gegensatz dazu besitzt eine turbulente Strömung eine mittlere Geschwindigkeitsverteilung mit logarithmischem Verlauf, die tatsächliche Verteilung weist jedoch hohe stochastische Schwankungen auf. In der Natur sind die meisten Strömungen turbulent.

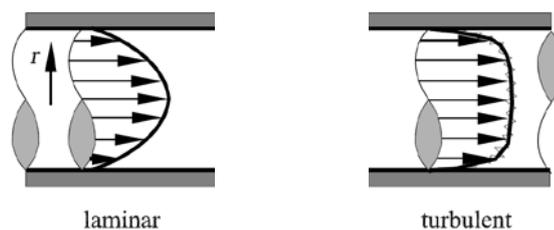


Abbildung 2.1 Geschwindigkeitsverteilung einer Rohrströmung
(Oertel, Böhle und Reviol 2011)

2.2 Ähnlichkeitsgesetze

„Als hydraulisches Modell bezeichnet man die geometrisch verkleinerte Nachbildung eines Naturwasserbauwerkes (Prototyp) im hydraulischen Labor. Im Gegensatz zu solch

einem physikalischen Modell ist ein mathematisches Modell ein Gedankenmodell. Es muss zwischen den im Modell und im Prototyp ablaufenden Strömungsvorgängen und Erscheinungen eine mechanische Ähnlichkeit vorliegen, um Ergebnisse aus dem Modell auf die Natur übertragen zu können.“ (Schneider 2015)

Von Ähnlichkeit spricht man, wenn entsprechende Größen im Modell und in der Natur in einem konstanten Verhältnis stehen. Die mechanische Ähnlichkeit umfasst die geometrische Ähnlichkeit – das Verhältnis zwischen entsprechenden Längen in der Natur und im Modell ist konstant – die kinematische Ähnlichkeit, sie bezieht sich auf korrespondierende Zeitintervalle, und die dynamische Ähnlichkeit, sinngemäß für die auftretenden Kräfte.

Diese Ähnlichkeiten können mit gleicher Flüssigkeit im Modell und in der Natur, insbesondere die dynamische Ähnlichkeit für alle Arten von Kräften, nicht gleichzeitig erfüllt werden. Darum wird das Gesetz so bestimmt, dass die geometrische sowie kinematische und für die maßgebenden Kräfte die dynamische Ähnlichkeit zutreffen.

2.2.1 Reynold'sches Modellgesetz

In der Rohrhydraulik wird grundsätzlich das Reynold'sche Modellgesetz verwendet. Es skaliert die realen Größen so, dass die Reynold'zahl (Re nach Gleichung 2-1) gleich bleibt. Durch das Modell wird die Länge in der Natur (l_n) durch den Modelllängenmaßstab (M_l) in den drei Dimensionen (meist gleichbleibend) auf eine Länge im Modell (l_m) skaliert.

$$M_l = \frac{l_m}{l_n} [-] \quad 2-2$$

Um das Modellgesetz bei gleichbleibender Dichte und Viskosität ($\rho_m = \rho_n$, $\eta_m = \eta_n$) zu erfüllen, müssen die anderen Größen (z.B.: Strömungsgeschwindigkeit, Zeitintervall, Durchfluss) mit bestimmten Maßstabsfaktoren skaliert werden. Für die Strömungsgeschwindigkeit (M_v) wird dieser Faktor wie folgt hergeleitet:

$$\frac{Re_m}{Re_n} = 1 = \frac{\frac{\rho_m \cdot v_m \cdot d_m}{\eta_m}}{\frac{\rho_n \cdot v_n \cdot d_n}{\eta_n}} = \frac{v_m \cdot d_m}{v_n \cdot d_n} = M_v \cdot M_l \rightarrow M_v = M_l^{-1} \quad 2-3$$

Daraus kann der Maßstabsfaktor für ein Zeitintervall (M_t) abgeleitet werden:

$$M_t = \frac{t_m}{t_n} = \frac{\frac{l_m}{v_m}}{\frac{l_n}{v_n}} = \frac{M_l}{M_v} = M_l^2 \quad 2-4$$

Für den Maßstabsfaktor für den Durchfluss (M_Q) gilt:

$$M_Q = \frac{Q_m}{Q_n} = \frac{v_m \cdot A_m}{v_n \cdot A_n} = M_v \cdot M_l^2 = M_l \quad 2-5$$

In dieser Arbeit werden die Modelllängenmaßstäbe 1:15 und 1:30 verwendet, daraus ergeben sich die weiteren abgeleiteten Maßstabsfaktoren für ein ideales Reynold'sches Modell:

Tabelle 2.1 Verwendete Maßstabsfaktoren

M_l	[-]	1:15	1:30
M_v	[-]	15:1	30:1
M_t	[-]	1:225	1:900
M_Q	[-]	1:15	1:30

2.3 Gleichungen

2.3.1 Bernoullische Energiegleichung

Die Energie nimmt in der Hydraulik verschiedene Form an – potentielle Energie (E_{pot}), kinematische Energie (E_{kin}) oder statische Druckenergie (E_{Druck}). Um diese Energieformen besser und anschaulicher untereinander vergleichen zu können, werden sie im Wasserbau in entsprechenden Höhen (piezometrische Höhe H) verlustfrei umgerechnet. Also in eine Höhe, die ein ruhender Wasserspiegel mit gleicher Energie einnehmen würde (Energieerhaltungssatz).

$$E_{pot.} = \rho \cdot V \cdot h \cdot g = \rho_w \cdot V \cdot H \cdot g \Rightarrow H_{pot} = h \quad 2-6$$

$$E_{kin.} = \frac{m \cdot v^2}{2} = \rho_w \cdot V \cdot H \cdot g \Rightarrow H_{kin.} = \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad 2-7$$

$$E_{Druck} = V \cdot p = \rho_w \cdot V \cdot H \cdot g \Rightarrow H_{Druck} = \frac{p}{\rho_w \cdot g} \quad 2-8$$

Es wird angenommen, dass der Referenzdruck ($p_{ref.}$) über das gesamte Strömungsfeld konstant bleibt. Trifft dies nicht zu, muss an Stelle des statischen Drucks (p) der absolute Druck ($p_{abs.}$) verwendet werden. Dieser ist die Summe vom statischen Druck und dem Referenzdruck.

$$p_{abs.} = p + p_{ref.} \quad 2-9$$

Summiert man die einzelnen Teile der Energiehöhe an einer Stelle auf, so erhält man die gesamte piezometrische Höhe. In weiterer Folge besagt der Satz von Bernoulli, dass die Energiehöhe einer stationären Strömung ohne Verluste in Strömungsrichtung (Stromfadentheorie) gleich bleibt.

$$H = H_{kin.} + H_{Druck} + H_{pot.} = \frac{v^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\rho_w \cdot g} + h = const. \quad 2-10$$

2.3.1.1 Druck- und Geschwindigkeitshöhenausgleichswert

Der Satz von Bernoulli setzt die Stromfadentheorie voraus. Dieses Gedankenmodell hat in weiterer Folge auch eine konstante Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt als Grundlage. In der Realität besitzen Rohrströmungen im besten Fall eine idealisierte rotationssymmetrische Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt, selbiges gilt auch für die Druckverteilung (Gabl 2012). Um dies zu korrigieren, werden zwei Korrekturfaktoren eingeführt (Franke 1974) und in Gleichung 2-11 aufgenommen. Wobei α der Geschwindigkeitshöhenausgleichswert und β der Druckhöhenausgleichswert sind.

$$H = \alpha \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} + \beta \cdot \frac{p}{\rho_w \cdot g} + h \quad 2-11$$

Der Druckhöhenausgleichswert hat vor Allem bei gekrümmten Strömungen einen wesentlichen Einfluss und sollte in gewissen Fällen, wie z.B. bei einem unterströmten Schütz, nicht vernachlässigt werden. Jedoch spielt er im Allgemeinen eine untergeordnete Rolle und wird deshalb auf 1 gesetzt (Bollrich 2007).

Der Geschwindigkeitshöhenausgleichswert nimmt bei turbulenten Strömungen nur selten einen Wert höher 1,2 an (Ward-Smith 1980). Falls die Querschnitte vor (Indizes 1) und nach (Indizes 2) einer lokalen Störung gleich sind, dann sind die Annahmen $v_1 = v_2$ und $\alpha_1 = \alpha_2$ zulässig (Gabl 2012) und nach Differenzbildung entfällt der Anteil des Korrekturfaktors (Kobus und Abraham 1984). Darum wird dieser Wert auch auf 1 gesetzt und Gleichung 2-11 wird zu Gleichung 2-10. Um diese Werte genau bestimmen zu können bedarf es weitere Untersuchungen die nicht Teil dieser Arbeit sind.

2.3.1.2 Verlusthöhe und Verlustbeiwert

Wenn Verluste in einer Strömung zwischen zwei Stellen (Indizes 1-Indizes 2) auftreten, wird ein Verlustterm (h_v) eingeführt, um die Gleichung 2-10 erfüllen zu können.

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho_w \cdot g} + h_1 = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho_w \cdot g} + h_2 + h_v \quad 2-12$$

Stellt man die Verlusthöhe (h_v) frei und gruppiert die einzelnen Terme nach Geschwindigkeits-, Druck- und absoluter Höhe ergibt sich:

$$h_v = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2 - p_1}{\rho_w \cdot g} + h_2 - h_1 = \frac{\Delta(v^2)_{2-1}}{2 \cdot g} + \frac{\Delta p_{2-1}}{\rho_w \cdot g} + \Delta h_{2-1} \quad 2-13$$

Führt man einen auf eine Strömungsgeschwindigkeit (v_i) bezogen Verlustbeiwert (ζ) ein, kann die Verlusthöhe als Produkt von Verlustbeiwert und Geschwindigkeitshöhe der entsprechenden Geschwindigkeit definiert werden.

$$h_v = \zeta \cdot \frac{v_i^2}{2 \cdot g} [m] \quad 2-14$$

Verbindet man Gleichung 2-13 mit Gleichung 2-14 dann kann der Verlustbeiwert (ζ) bezogen auf die Strömungsgeschwindigkeit (v_i) durch den Satz von Bernoulli bestimmt werden:

$$\zeta = \frac{\Delta(v^2)_{2-1} + \frac{2 \cdot \Delta p_{2-1}}{\rho_w} + 2 \cdot g \cdot \Delta h_{2-1}}{v_i^2} \quad 2-15$$

In druckbehafteten Strömungen ist der Einfluss der Erdbeschleunigung sehr gering, darum wird sie oft in der Strömungsnumerik nicht berücksichtigt. Dadurch fällt die absolute

Höhendifferenz aus der Gleichung 2-15 heraus und es bleiben nur die Geschwindigkeits- und Druckhöhdendifferenz stehen.

$$\zeta = \frac{\Delta(v^2)_{2-1} + \frac{2 \cdot \Delta p_{2-1}}{\rho_w}}{v_i^2} [-] \quad 2-16$$

In der Praxis werden Druck und Geschwindigkeit über die Messquerschnitte gemittelt und dann die Differenzen gebildet. Treten am Messquerschnitte jedoch Rückströmungen auf, kann die Mittelung über den Querschnitt zu falschen Ergebnissen führen. Darum wird vor der Querschnittsmittelung der totale Druck ($p_{tot.}$), das ist die Summe aus statischem (p) und dynamischem Druck ($p_{dyn.}$), ausgewertet.

$$p_{tot.} = p + p_{dyn.} \quad 2-17$$

Dies entspricht auch dem Messprinzip der Differenzdruckmessung, die beim physikalischen Modellversuch verwendet wurde. Dann kann für den Verlustbeiwert (ζ) geschrieben werden:

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta p_{tot2-1}}{\rho_w \cdot v_i^2} [-] \quad 2-18$$

2.3.2 Navier-Stokes- und Kontinuitätsgleichung

Die Navier-Stokes-Gleichung (Gleichung 2-19) und die Kontinuitätsgleichung (Gleichung 2-20), hergeleitet aus dem Impuls- bzw. Massenerhaltungssatzes am infinitesimalen Strömungselement, beschreiben die Zustände und Strömungsgrößen in einem isothermen Strömungsfeld exakt (Schwarze 2013). Dabei ist es unerheblich in welchen Strömungszustand (turbulent oder laminar) sich die Strömung befindet.

$$\frac{\delta(\rho \cdot \vec{v})}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{v}) + \nabla p = \rho \vec{g} + \nabla \cdot \vec{\tau} \quad 2-19$$

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad 2-20$$

Die Schubspannung (τ) ist vom Geschwindigkeitsgradient (∇v) sowie der dynamischen Viskosität (η) abhängig und wird durch das Newton'schen Fließgesetz (Gleichung 2-21) beschrieben (Schwarze 2013).

$$\bar{\tau} = \eta \cdot \left(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \cdot \bar{\delta} \right) \quad 2-21$$

Dieses Gleichungssystem nichtlinearer partieller Differentialgleichungen ist selbst bei genau bekannten Anfangs- und Randbedingungen nicht allgemein analytisch lösbar. Um eine hinreichend genaue Lösung zu finden, müssen die Gleichungen einerseits vereinfacht werden und andererseits mit Hilfe numerischer Verfahren gelöst werden.

Für inkompressible isotherme Flüssigkeiten vereinfachen sich die Gleichungen 2-19 und 2-20, da die räumlichen und zeitlichen Ableitungen unabhängig von der konstante Dichte sind (siehe Gleichungen 2-22 und 2-23). Des Weiteren verändert sich die Schubspannung durch den Wegfall des hydrostatischen Verzerrungsanteils (siehe Gleichungen 2-24).

$$\rho \cdot \left(\frac{\delta \vec{v}}{\delta t} + \nabla \cdot (\vec{v} \cdot \vec{v}) \right) + \nabla p = \rho \vec{g} + \nabla \cdot \bar{\tau} \quad 2-22$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad 2-23$$

$$\bar{\tau} = \eta \cdot (\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) \quad 2-24$$

Die wichtigsten numerischen Methoden zur Lösung dieses Gleichungssystems sind die Finite-Volumen-Methode, die Finite Differenzen-Methode und die Methode der Charakteristiken. Weiters gibt es für die unterschiedlichen Methoden mehrere verschiedene mathematische Diskretisierungsschemen in Raum und Zeit auf die hier nicht näher eingegangen wird. In dieser Arbeit werden die Finite-Volumen-Methode und das Diskretisierungsschemen situationsangepasst, nach den Empfehlungen des Programmherstellers verwendet.

2.3.3 Modellierung von turbulenten Strömungen

Die numerische Modellierung von turbulenzbehafteten Strömungen wird grundsätzlich nach absteigenden Feinheitegrad in Direkte numerische Simulation (DNS), Large Eddy Simulation (LES) und Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) unterschieden. Die LES und die RANS kommen nur bei Strömungen mit hoher Reynold'zahl (turbulenter Strömungen) zur Anwendung. Eine Einteilung in turbulent und laminar ist für

die DNS, wegen der direkten numerischen Lösung der Navier-Stokes- und Kontinuitätsgleichungen (Gleichungen 2-19 und 2-20), nicht notwendig.

2.3.3.1 Direkte numerische Simulation

Die DNS liefert ein Maximum an Informationen über turbulente Strömung durch das Auflösen aller Strömungsprozesse. Dies fordert einen erheblich hohen Feinheitsgrad in räumlicher und zeitlicher Auflösung. Des Weiteren ist nur eine instationäre Simulation (zeitabhängig) sinnvoll. Dies führt zu einem erheblichen Rechenaufwand, daher findet die DNS weitgehend nur in der Grundlagenforschung Anwendung, wie z.B.: der laminar-turbulente Umschlag.

2.3.3.2 Grobstruktursimulation

Bei der LES werden bis zu einer vorher definierten Filtergrenze die Navier-Stokes- und Kontinuitätsgleichung (Gleichungen 2-19 und 2-20) direkt gelöst. Dadurch werden alle Turbulenzelemente, die größer sind als die Filtergrenze, vollständig aufgelöst. Auswirkungen kleinerer Turbulenzelemente auf die Strömung müssen durch ein geeignetes Turbulenzmodell (Subgrid-Scale-Turbulenzmodelle) abgeschätzt werden. Die LES ist wie die DNS zeitabhängig auszuführen, ist aber wegen der Filterung nicht so aufwendig. Dennoch ist sie im Vergleich zur RANS rechenintensiver und wird nur begrenzt eingesetzt.

2.3.3.3 Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen

Durch die RANS werden keine Turbulenzelemente direkt aufgelöst, stattdessen werden die Turbulenz- und Strömungsgrößen gemittelt ausgewertet. Hier muss der Einfluss aller Turbulenzelemente auf die Strömungsgrößen durch ein geeignetes Turbulenzmodell abgeschätzt werden (siehe Kapitel 2.3.4). Diese Modellierung ist aktuell die derzeit üblich verwendete Methode für dreidimensionale Strömungssimulationen im Ingenieurwesen und wird in dieser Arbeit verwendet.

Bei den RANS-Gleichungen werden die Strömungsgrößen (ϕ) in der Navier-Stokes- und der Kontinuitätsgleichung (Gleichungen 2-19 und 2-20) nach der Reynolds-Zerlegung in einen Mittelwert ($\underline{\phi}$) und in eine stochastische, turbulente Fluktuation (ϕ') aufgeteilt.

$$\phi = \underline{\phi} + \phi'$$

2-25

Des Weiteren ist der Mittelwert des Mittelwerts ($\underline{\underline{\phi}}$) gleich dem Mittelwert und der Mittelwert der Fluktuation ($\underline{\phi}'$) gleich Null (Fröhlich 2006).

$$\underline{\underline{\phi}} = \underline{\phi} \quad 2-26$$

$$\underline{\phi}' = 0 \quad 2-27$$

Wendet man die Reynolds-Zerlegung auf die Navier-Stokes- und Kontinuitätsgleichung für inkompressible Flüssigkeiten an (Gleichungen 2-21 und 2-22) und mittelt danach, ergibt sich die RANS-Gleichungen für inkompressible Flüssigkeiten:

$$\rho \cdot \left(\frac{\delta \underline{\underline{v}}}{\delta t} + \nabla \cdot (\underline{\underline{v}} \cdot \underline{\underline{v}}) + \nabla \cdot (\underline{\underline{v}}' \cdot \underline{\underline{v}}') \right) + \nabla p = \rho \underline{\underline{g}} + \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}} \quad 2-28$$

$$\nabla \cdot \underline{\underline{v}} = 0 \quad 2-29$$

$$\underline{\underline{\tau}} = \eta \cdot \left(\nabla \underline{\underline{v}} + (\nabla \underline{\underline{v}})^T \right) \quad 2-30$$

Der Gradient-Term aus dem Produkt der gemittelten fluktuierten Geschwindigkeiten multipliziert mit der Dichte $\rho \cdot \nabla \cdot (\underline{\underline{v}}' \cdot \underline{\underline{v}}')$ wird, wenn auf die rechte Seite verschoben, Reynolds-Spannung (τ^{RS}) bezeichnet und durch ein geeignetes Turbulenzmodell beschrieben (Schwarze 2013).

2.3.4 Turbulenzmodell

Für die Turbulenzmodelle werden 2 verschiedene Ansätze verwendet – das Wirbelviskositätsmodell und das Reynolds-Spannungsmodell – beide werden aus den mittleren Strömungsgrößen ($\underline{\underline{\phi}}$) abgeleitet. In dieser Arbeit wird das SST-Modell, ein Wirbelviskositätsmodell, verwendet. Dieses Modell baut auf das k- ϵ -Modell auf, liefert aber bei Turbulenzwirbel mit niedrigen Reynold-zahlen, wie z.B. in Wandnähe, dank dem k- ω -Modell bessere Ergebnisse.

„Das Wilcox-k- ω -Modell liefert speziell in der Nähe von festen Wänden eine deutlich bessere Beschreibung der mittleren Turbulenz und damit des gesamten mittleren Strömungsfeldes als das Standard-k- ϵ -Modell. Die Qualität der Turbulenz- und Strömungsmodellierung wird dagegen in der freien Außenströmung deutlich schlechter, während sich die Güte der Simulationsergebnisse des Standard-k- ϵ -Modells hier im allgemeinen [sic.] merklich verbessert.“ (Schwarze 2013)

Beide Modelle (k - ε - und k - ω -Modell) haben gemeinsam, dass sie die Reynolds-Spannung mit dem Lösen zweier gekoppelter Gleichungen bestimmen (Schließungsproblem). Diese Gleichungen beschreiben im k - ε -Modell den Transport der kinetischen Energie mit der mittleren kinetischen Energie (k) sowie den Transport von Dissipation mit der Dissipationsrate (ε) (Kuhlmann 2008). Bei dem k - ω -Modell wird neben der Transportgleichung für die kinetische Energie eine Transportgleichung für charakterliche Frequenz (ω) der energietragenden Wirbel verwendet. Das SST Modell verwendet grundsätzlich das k - ω -Modell, jedoch verwendet es für die Transportgleichung der charakterlichen Frequenz einen hybriden Ansatz. Es unterscheidet zwischen zwei Bereichen mit unterschiedlichen Modellgleichungen für charakterliche Frequenz (ω), die Zuordnung erfolgt durch den dimensionslosen Wandabstand (y^+) (siehe Kapitel 2.3.5). An der Wand – hier besitzt die Strömung meist eine verhältnismäßige geringere Reynold'zahl als im Strömungsinnen – gilt das unveränderte k - ω -Modell. Im Bereich, der nicht mehr im Einfluss der Wandreibung liegt, wird eine transformierte ω -Gleichung verwendet, so dass im Grunde das k - ε -Modell gilt (Schwarze 2013).

2.3.5 Wandgesetz

Bei einer turbulenten Strömung entlang einer Wand gibt es einen Bereich in dem das Geschwindigkeitsprofil senkrecht zur Wand ($u_{(y)}$) von der Viskosität des strömenden Fluids abhängt. Dieser Bereich wird turbulente Grenzschicht genannt und kann, auf Grund des unterschiedlichen Einflusses der Viskosität, wiederum in drei verschiedene Geschwindigkeitsverteilungen eingeteilt werden. Dieser Zusammenhang wird durch das universelle Wandgesetz beschrieben. Obwohl es anhand des Spezialfalls, Couette-Strömung, entwickelt wurde, besitzt es universelle Bedeutung (Schlichting und Gersten 2006).

Die drei Schichten werden viskose Unterschicht (auch laminare Unterschicht), Übergangschicht und Überlappungsschicht genannt. Sie werden anhand des dimensionslosen Wandabstands (y^+) eingeteilt (Schlichting und Gersten 2006). Dieser abgeleitete Wandabstand berechnet sich aus dem tatsächlichen Wandabstand (y) multipliziert mit

der Dichte (ρ) und der Schubspannungsgeschwindigkeit (u_τ) gebrochen durch die dynamische Viskosität (η). Die Schubspannungsgeschwindigkeit ist weiters definiert als die Wurzel aus dem Verhältnis von der Schubspannung an der Wand (τ_w) und der Dichte.

$$y^+ = \frac{\rho \cdot y \cdot u_\tau}{\eta} \quad [-] \quad 2-31$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad 2-32$$

Tabelle 2.2 Einteilung der turbulenten Grenzschicht durch den dimensionslosen Wandabstand y^+ (Schlichting und Gersten 2006)

viskose Unterschicht	$y^+ < 5$
Übergangsschicht	$5 < y^+ < 70$
Überlappungsschicht	$y^+ > 70$

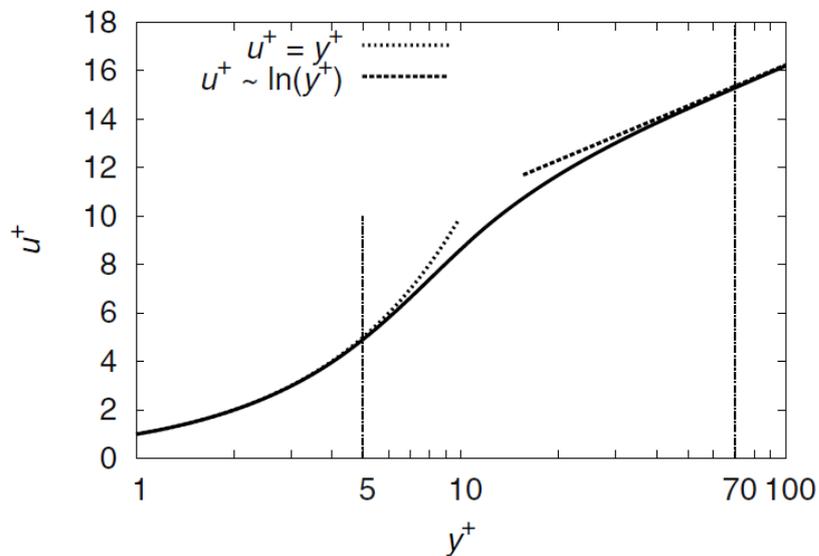


Abbildung 2.2 Verteilung der dimensionslosen Geschwindigkeit (u^+) abhängig vom dimensionslosen Wandabstand (y^+) (Schwarze 2013)

Die Abbildung 2.2 zeigt die Verteilung der dimensionslosen Geschwindigkeit in Abhängigkeit des dimensionslosen Wandabstands ($u^+(y^+)$) der turbulenten Couette-Strömung. Diese Geschwindigkeit ist die Strömungsgeschwindigkeit entlang der Wand (u) durch die Schubspannungsgeschwindigkeit (u_τ).

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad 2-33$$

In der viskosen Unterschicht ist der Einfluss der Viskosität des Fluides am stärksten und die Geschwindigkeitsverteilung hat hier einen approximierten linearen Verlauf.

$$u^+ = y^+ \quad 2-34$$

In der Übergangsschicht, zwischen Überlappungsschicht und viskoser Unterschicht, nimmt der Einfluss der Viskosität rasch ab, deren Geschwindigkeitsverteilung wird durch einen komplexen Zusammenhang definiert siehe (Schlichting und Gersten 2006).

In der Überlappungsschicht geht die wandnahe Strömung in den Kernbereich der turbulenten Grenzschicht über. Die Geschwindigkeitsverteilung wird in dieser Schicht durch das logarithmische Wandgesetz (Gleichung 2-35), mit der κ = Karman-Konstante $\approx 0,41$ und $C = 5,5$ für glatte Oberflächen, charakterisiert.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C \quad 2-35$$

Es kann gezeigt werden, dass die dimensionslosen Größen (y^+ und u^+) mit guter Näherung durch die mittlere kinetische Energie (k) und der Dissipationsrate (ϵ) ausgedrückt werden können, siehe (Schwarze 2013).

Für die Überführung in das k - ω -Modell siehe (ANSYS 2009).

2.3.6 Residuum

In den meisten Solver werden die RANS-, die Turbulenzmodellgleichungen und die Randbedingungen in verschiedene Terme aufgeteilt. Nach der Diskretisierung in Raum und Zeit über das gesamte Modellgebiet entstehen daraus mehrere gekoppelte lineare Gleichungssysteme in der Form von Gleichung 2-36, mit der Koeffizientenmatrix (A), der unbekannte Variable (ϕ) und der rechten Seite (b) (ANSYS 2009).

$$\bar{A} \cdot \phi = b \quad 2-36$$

Die Lösung erfolgt nun iterativ mit dem Startwert (ϕ^n), dessen Lösen weicht um das Residuum (r^n) ab.

$$r^n = \bar{A} \cdot \phi^n - b \quad 2-37$$

Aus dem Residuum wird ein Korrekturfaktor (ϕ') berechnet, der den Startwert bzw. die vorige Lösung verbessert, hier exemplarisch eine mögliche Definierung des Korrekturfaktors.

$$\bar{A} \cdot \phi' = r^n \quad 2-38$$

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \phi' \quad 2-39$$

Das Residuum wird durch eine repräsentative Größe der Lösungsvariable ($\tilde{\phi}$) genormt, um es mit den Residuen anderer Variablen vergleichen zu können.

$$\tilde{r} = \frac{r}{\tilde{\phi}} \quad 2-40$$

Weiters werden alle Residuen für eine Variable über alle Knoten (n) quadratisch gemittelt (RMS steht für root mean square).

$$\tilde{r}_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{r}_i^2} \quad 2-41$$

Beide Residuen haben bei der Bestimmung der Konvergenz, bzw. des Konvergenzabbruchkriteriums eine wichtige Rolle.

2.4 Software

Zur Berechnung der dreidimensionalen Strömungssituation wird die Software ANSYS-CFX verwendet. Es ist ein numerisches Strömungssimulationsprogramm, auf Englisch computational fluid dynamics – kurz CFD. Weiters ist das Programm in ein Programmbündel, ANSYS-Workbench eingebettet, welches eine vereinfachte Datenverarbeitung ermöglicht und bei Variationsberechnungen hilfreich ist. Auch wird das in der Workbench integrierte Programm ANSYS ICEM, zum Erstellen von strukturierten Netze verwendet. Zur Modellierung der Geometrie wird das Konstruktionsprogramm AutoCAD verwendet.

3. Numerische Untersuchung

3.1 Konzept

Die Abbildung 3.1 zeigt den typischen Ablauf einer numerischen Strömungsberechnung, bezogen auf das Programm ANSYS-CFX (ANSYS-Programmbezeichnungen). Wie jede numerische Simulationsuntersuchung lässt sich der Ablauf in drei Teile gruppieren: das Pre-processing, das Processing und das Post-processing (in Abbildung 3.1 grün, rot und blau gekennzeichnet). Hier ist zu sagen, dass eine numerische Strömungssimulation auf keinen Fall einem linearen Ablauf folgt, vielmehr ist es ein iterativer Prozess. Einige Eingabewerte sind am Anfang unbekannt und werden abgeschätzt, nach den ersten Simulationen folgt eine Überprüfung und gegebenenfalls werden die Eingaben angepasst.

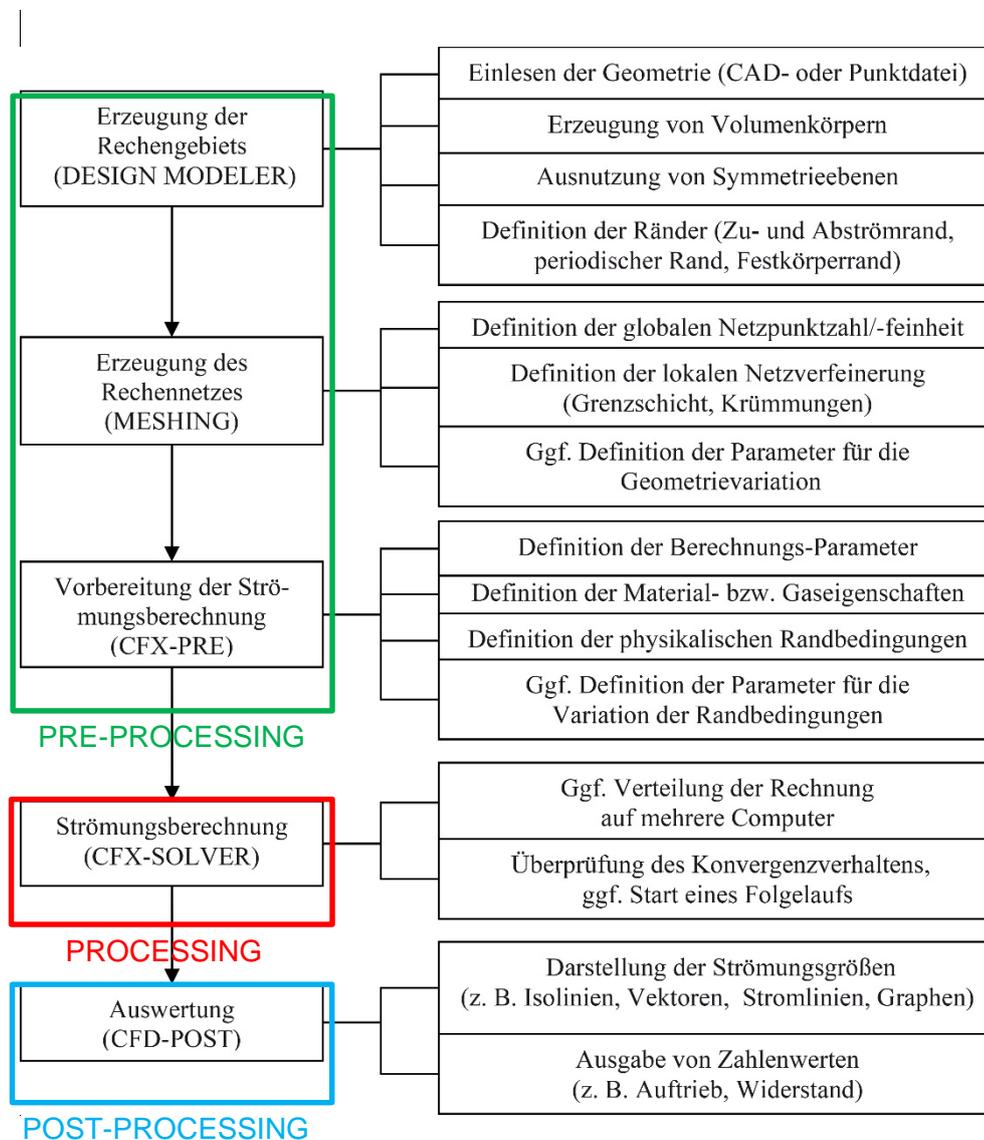


Abbildung 3.1 Übersicht über den typischen Ablauf einer numerischen Strömungsberechnung (Lecheler 2014)

3.1.1 Pre-processing

Am Beginn jeder Strömungssimulation stehen die Einschätzung der erwarteten physikalischen Prozesse und die Bewertung ihrer Einflüsse auf die Ergebnisse. Die erforderliche Genauigkeit der Ergebnisse und ihre Beurteilungskriterien sind zu definieren, um Unsicherheiten zu minimieren. Dafür ist es notwendig, das hydraulische Verhalten des zu untersuchenden Bauteils zu kennen (siehe Kapitel 1.2.1.4), und die theoretischen Grundlagen in den Bereichen numerische Verfahren sowie Strömungsmodelle (siehe Kapitel 2) zu beherrschen. Erst wenn diese Punkte geklärt sind, ist es sinnvoll mit der eigentlichen Umsetzung des Pre-Processing zu beginnen. Die sich im Wesentlichen in das Definieren der Geometrie, das Vernetzen des Strömungsgebietes und das Erstellen des Setups gliedert.

3.1.2 Processing

Unter Processing ist nicht nur das Lösen des Gleichungssystems durch den Solver zu verstehen. Während der Berechnung ist auch das Konvergenzverhalten zu kontrollieren sowie die Ausgabewerte auf Plausibilität zu prüfen. Dies erfolgt durch die Kontrolle von Gleichungsvariablen (RMS und max. Residuum), die Massenbilanz von Kontrollvolumen (Zufluss ist gleich Abfluss) und das Verfolgen der Ergebniswerten (Verlusthöhen) mittels setzen von Ausgabevariablen.

3.1.3 Post-processing

Das Post-processing ist einerseits die grafische Aufbereitung der Ergebnisse und der Strömungsvariablen, unterstützt durch Darstellung von Ausgabewerten in Tabellen und Diagrammen. Die Visualisierung von Größen erfolgt durch Pfeilgitter, Stromlinien, Konturen und Isoflächen, wobei zwischen Skalare und Vektoren unterschieden werden soll. Ein wichtiger Punkt des Post-processings ist auch die Validierung und Plausibilitätsuntersuchung der Ergebnisse.

3.2 Wahl der zu implementierenden physikalischen Prozesse

3.2.1 Erdbeschleunigung

Strömungen in Wasserkraftanlagen werden prinzipiell durch das Wirken von Gravitation verursacht. Jedoch wird angenommen, dass im lokal begrenzten Gebiet der Untersuchung (Drossel und Stollenansätze) der Einfluss der Erdbeschleunigung gering ist und die Schwerekräfte im Verhältnis zu den Trägheits- und Reibungskräften untergeordnet sind. Daher wird die Gravitation in dieser Untersuchung vernachlässigt.

3.2.2 Strömungszustand

Es wird vorausgesetzt, dass das komplette System vollständig mit Wasser gefüllt ist. Teilfüllung, Lufteintrag oder Sedimenttransport werden nicht untersucht. Daher wird die Strömungsuntersuchung auf eine Einphasenströmung in einem geschlossenen Volumen mit Zufluss und Abfluss definiert und der Strömungszustand ist voll turbulent. Da die Strömungsrandbedingungen konstant bleiben, sowie der Abfluss gleich dem Zufluss ist, wird zu Beginn der Untersuchung eine stationäre Strömung angenommen. Es wird gezeigt, dass diese Annahme durch inneres transientes Verhalten nicht zutrifft und eine transiente Untersuchung notwendig ist (siehe Kapitel 3.5.5). Eine Symmetrieebene in der Geometrie ist nicht vorhanden. Eine Modelladaption zur Erzeugung einer solchen, wie z.B. das Rotieren des Lotschachtes um die Drosselachse, würde das Strömungsbild in Hinblick auf Rotationsströmungen stark beeinflussen.

3.2.3 Materialeigenschaften

Da die Auswirkungen eines variablen Kompressionsmoduls erst ab Drücke von 500 bar signifikant werden (Sigloch 2014), wird von einem inkompressiblen Fluid ausgegangen. Die Dichte für Wasser wird konstant mit 997 kg/m^3 angenommen. Generell wird mit einem idealen Fluid mit konstanten Materialeigenschaften, wie z.B. Viskosität, und ohne Temperatureinfluss simuliert.

3.2.4 Turbulenz

Aufgrund der hohen Reynold'zahl ($Re > 10^6$) ist die Strömung turbulent und es bedarf eines Turbulenzmodells (siehe Kapitel 2.3.4). Dabei wird zwischen dem $k-\epsilon$ - und das SST-Modell abgewogen. Letzteres liefert bei lokal niedrigen Reynold'zahlen, wie z.B. in Wandnähe, und bei Strömungsschichtablösungen, die in Strömungsrichtung nach der Drossel auftreten, bessere Ergebnisse (ANSYS 2013). Für Referenz- und Initialisierungssimulationen wird das einfachere und robustere $k-\epsilon$ -Modell und für die Endsimulationen das SST-Modell verwendet.

3.2.5 Reibung

Für die Bestimmung des lokalen Drosselverlustes wird eine glatte Wand als Randbedingung verwendet. Dies wird dadurch begründet, dass der Wandreibungsverlust im Gegensatz zu der Annahme eines konstanten, lokalen Verlusten (ab Reynold'zahl von 10^5) erst bei weit höheren Reynold'zahlen von ihr unabhängig wird (siehe Kapitel 1.4.2). Bei der Untersuchung zur Wandreibung mit unterschiedlichen Sandrauigkeiten ist die Verwendung einer rauen Wand selbsterklärend. In Wandnähe wird für eine glatte wie auch

für eine raue Wand eine im Turbulenzmodell integrierte Wandfunktion verwendet. Dies erfordert eine Verfeinerung des Netzes in Wandnähe auf einen je nach Turbulenzmodell unterschiedlich geforderten, dimensionslosen Wandabstand. Die Überprüfung dieses Wertes bedarf einer Referenzsimulationen (siehe Kapitel 3.3.2). Für raue Wände wird gefordert, dass die Sandrauigkeit größer als die viskose Unterschicht ist, weiters darf die Dicke der ersten Schicht nicht kleiner als die Halbe Sandrauigkeit sein (ANSYS 2009). Beide Ansätze, raue und glatte, haben als Bedingungen, dass die Geschwindigkeit direkt an der Wand gleich null ist.

3.3 Bestimmen der Beurteilungskriterien

Um eine Simulation, insbesondere ihre Ergebnisse, beurteilen zu können, ist es erforderlich die Kriterien und die dazugehörigen Grenzen zu bestimmen. Die Beurteilung erfolgt nicht nur nach dem Processing sondern beginnt bereits im Pre-processing und setzt sich während dem Processing fort.

3.3.1 Netzqualität

Die Netzqualität kann vielfältig beurteilt werden. Die wichtigsten Kriterien sind jedoch die Winkel zwischen zwei benachbarten Elementflächen oder Elementkanten und die normierte Determinante der Jacobimatrix. Dabei gibt es für beide Kriterien Optimal- und k.o.-Werte abhängig von der Elementart. Ein Gleichungssystem eines Diskretisierungsnetz wird unlösbar, wenn ein Flächenwinkel oder die Jacobi-Determinante 0 werden. Dies bedeutet, dass ein Flächenelement zur Linie degeneriert bzw. eine Matrix nicht mehr invertierbar ist. Die Optimalwerte sind 1 für die Determinante und 90 bzw. 60 ° je nach Elementtyp für die Winkel. In Tabelle 3.1 sind die Grenzwerte für die unterschiedlichen Kriterien angeführt (ANSYS 2013).

Tabelle 3.1 Beurteilungskriterien für die Netzqualität

Kriterium	min. Winkel	Jacobi-Determinante
	[°]	[-]
k.o.	0	0
Grenzwert	10	1/6
Optimalwert	90/60	1

3.3.2 Dimensionsloser Wandabstand

Die Geschwindigkeitsverteilung in Wandnähe folgt dem universalem Wandgesetz (siehe Kapitel 2.3.5). Um dies nur mit den Turbulenzmodellen erreichen zu können, ist ein dimensionsloser Wandabstand (y^+) von 0.2 für das k- ϵ - und 2.0 für das k- ω -Modell notwendig. Speziell die Bedingung für das k- ϵ -Modell kann zu numerischer Instabilität führen, aber auch ein dimensionsloser Wandabstand von 2 ist nicht immer, bedingt durch die notwendige Rechenkapazität, erreichbar. Darum werden Wandfunktionen verwendet, die die Geschwindigkeitsverteilung nach dem Wandgesetz approximieren ohne dabei das Turbulenzmodell anzuwenden. Die Empfehlung des Programmherstellers für einen max. dimensionslosen Wandabstand liegt bei 300 (ANSYS 2009).

3.3.3 Residuum

Das RMS Residuum (siehe Kapitel 2.3.6) ist das grundlegendste Kriterium zur Beurteilung der Konvergenz über das gesamte Strömungsgebiet. Das maximale Residuum beschreibt das höchste Residuum des kompletten Strömungsgebiets. Dabei ist zu unterscheiden, ob das betroffene Element sich im maßgebenden Strömungsbereich, oder sich weit abseits ohne große Auswirkung auf das Ergebnis befindet. Als maßgebendes Gebiet sind der unmittelbare Drosselbereich und der Scherzonenbereich, der in Strömungsrichtung nach der Drossel auftritt, zu sehen. Strömungsbereiche die von der Drossel weit entfernt sind – insbesondere stromab – können als nicht auswirkungsstark angesehen werden. Das max. Residuum hat auch wesentlichen Einfluss auf das RMS Residuum, da bei der quadratischen Mittelung der höchste Wert stärker bewertet wird. Die Empfehlungen des Programmherstellers liegen bei 10^{-5} für das RMS Residuum, 10^{-4} für das max. Residuum im signifikanten Bereich und 10^{-3} im unbedeutenden (ANSYS 2013).

3.4 Umsetzung des Pre-processings

Die ANSYS Workbench ermöglicht es komplexe Strömungsuntersuchungen mit Variablenstudien in einer Programmoberfläche durchzuführen (siehe Abbildung 3.2). Dabei können verschieden Teilprogramme miteinander gekoppelt werden und der Datenaustausch erfolgt direkt. Diese Kopplung wird in der Workbench als Linie dargestellt. So wird mit dem DesignModeler die Geometrie eingelesen und mit dem Mesher verbunden. Dieser erzeugt das Rechenetz und wird mit dem Programm CFX gekoppelt. Dort erfolgen das Setup, die Simulation und die grafische Aufbereitung.

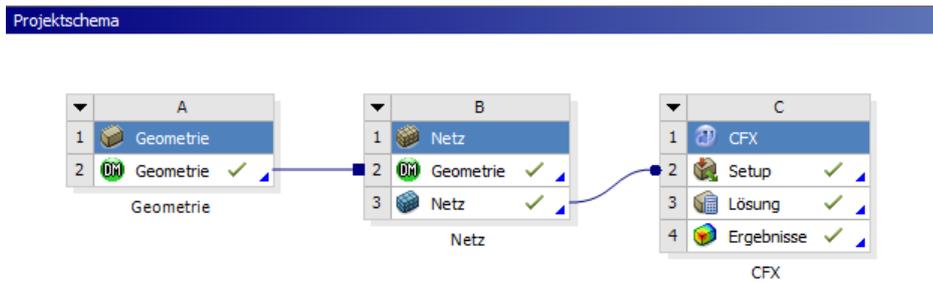


Abbildung 3.2 Projektschema in der ANSYS Workbench

3.4.1 Geometrie

Die Geometrie wird anhand der Modellbaupläne mittels dem Programm AutoCAD erstellt. Dabei wird das durchströmte Volumen modelliert und die Messquerschnitte wie beim physikalischen Modellversuch berücksichtigt (siehe Kapitel 1.4.1). Der Wasserkörper wird durch eine Schnittstelle in den DesignModeler eingelesen.

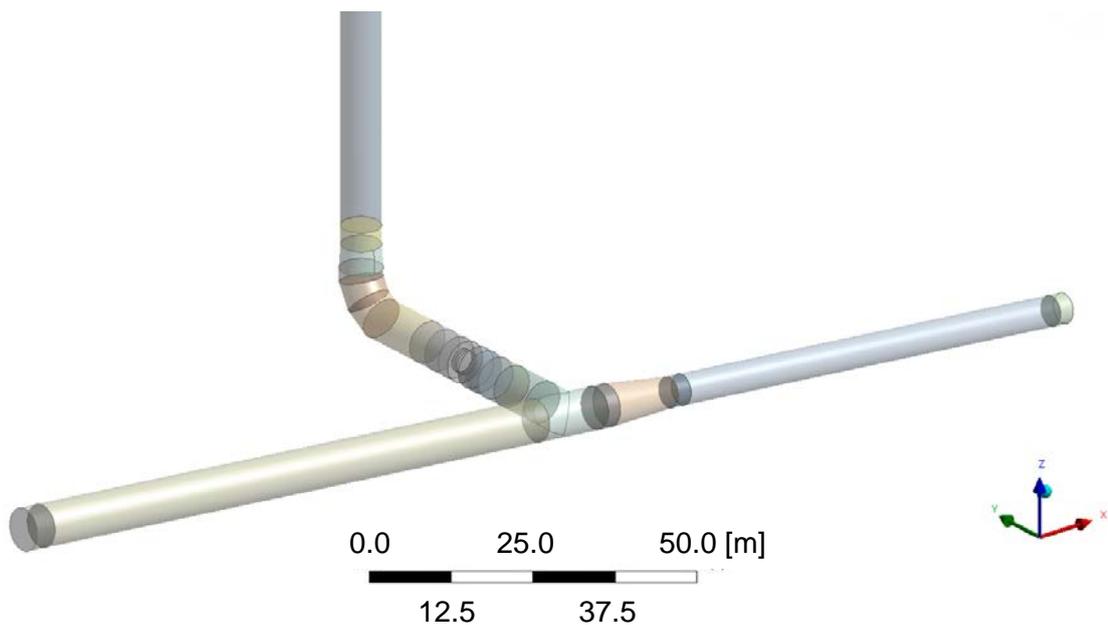


Abbildung 3.3 Wasserkörper im DesignModeller

3.4.2 Netz

Nach der Verknüpfung der Geometrie mit dem Mesher wird das Strömungsgebiet mit Hilfe eines unstrukturierten Netzalgorithmus von ANSYS mit unterschiedlichen Feinheitsgraden diskretisiert. Dabei wird das Netz in Verfeinerungszonen eingeteilt und in den Bereichen der Wände mit Prismenwandschichten versehen.

3.4.2.1 Prismenwandschichten

Um das Geschwindigkeitsprofil des Querschnittes in Wandnähe besser beschreiben zu können, werden am Wandrand bis zu 13 Prismenwandschichten, auch Inflationlayers genannt, mit einer Wachstumsrate (q) von 1,2 erzeugt. Die Höhe der ersten Schicht (h_{start}) wird mit dem Zehntel der Elementgröße im Inneren (h_{end}) festgelegt. Der dimensionslose Wandabstand (Y^+) ist nach einer Referenzuntersuchung zu kontrollieren und gegebenenfalls ist die Stärke der ersten Schicht anzupassen (siehe Kapitel 3.4.5). Die Anzahl (n) ergibt sich aus der Formel für die geometrische Reihe:

$$n = \frac{\log\left(\frac{h_{\text{start}}}{h_{\text{end}}}\right)}{\log(q)} \quad [-] \quad 3-1$$

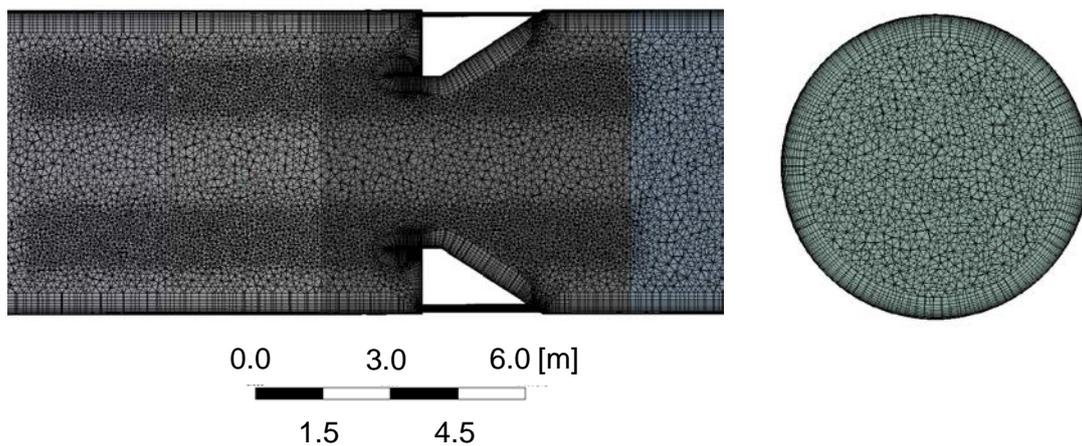


Abbildung 3.4 Unstrukturiertes Netz für den Lastfall des Aufschwings mit Prismenwandschichten und Verfeinerungszonen

3.4.2.2 Verfeinerungszonen

In den Bereichen mit höheren erwarteten Turbulenzen, bedingt durch die Scherzonen, werden Verfeinerungsgebiete für das Netz bestimmt, für die eine niedrigere Elementgröße gilt. Für die beiden Lastfälle Aufschwings und Abschwings werden die Verfeinerungszonen unterschiedlich festgelegt, da die maßgebenden Turbulenzen in Strömungsrichtung nach der Drossel zu finden sind (in Abbildung 3.6 Verfeinerungszone 2). Allgemein wird das Netz im Bereich zwischen T-Stück und Krümmer verfeinert (in Abbildung 3.5 Verfeinerungszone 1).

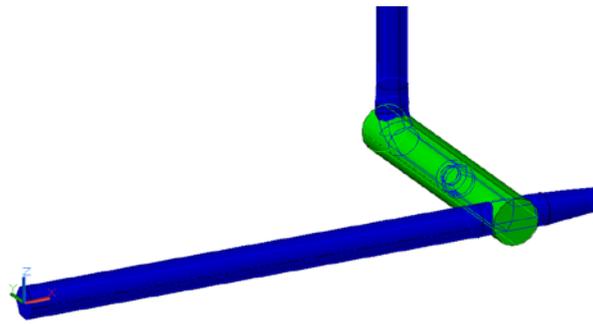


Abbildung 3.5 Verfeinerungszone 1

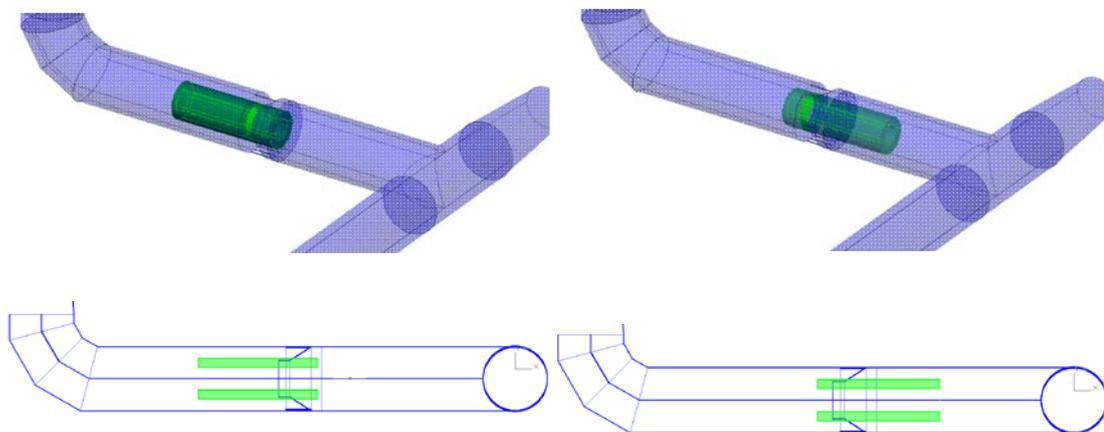


Abbildung 3.6 Verfeinerungszone 2 links beim Aufschwingen rechts beim Abschwigen

3.4.2.3 Kontrolle der Netzqualität

Nach dem Erstellen des Netzes wird es in den Programmteil ICEM eingelesen, um seine Qualität (siehe Kapitel 3.3.1) zu bewerten und die Bereiche mit schlechter Netzqualität zu ermitteln.

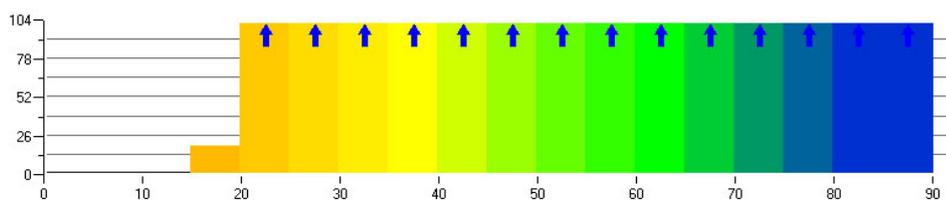


Abbildung 3.7 Überprüfung der Netzqualität im Programm ANSYS ICEM

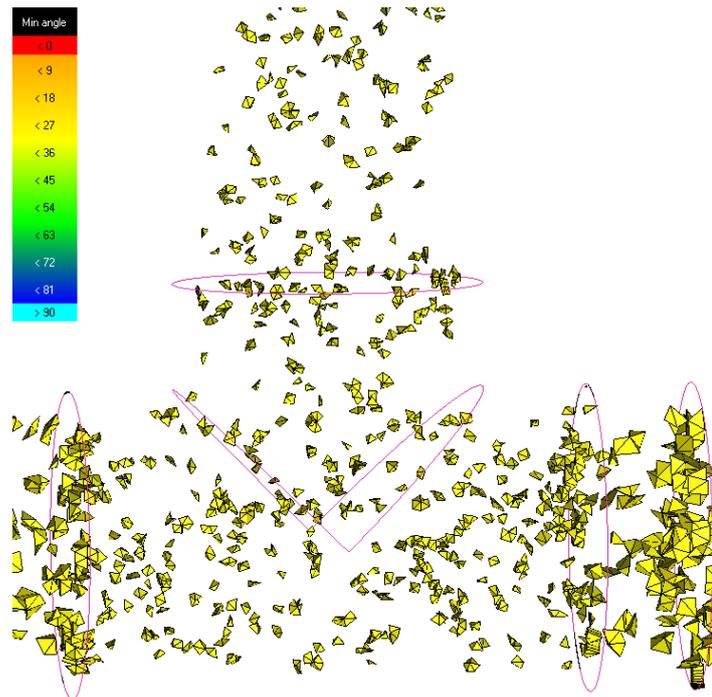


Abbildung 3.8 Darstellung der Elemente mit bestimmter Netzqualität

3.4.2.4 Adaptionen der Geometrie

Eine Geometrieadaptation im Bereich der Belüftungs- bzw. Entleerungsrohre erzielt eine Verbesserung der Netzqualität. Dabei werden die Rohre um deren halben Durchmesser zentrisch in Richtung Drosselachse verschoben. Diese Vereinfachung wird als nicht schwerwiegende Veränderung der Geometrie beurteilt und die erwarteten Auswirkungen auf das Strömungsbild als gering angesehen.

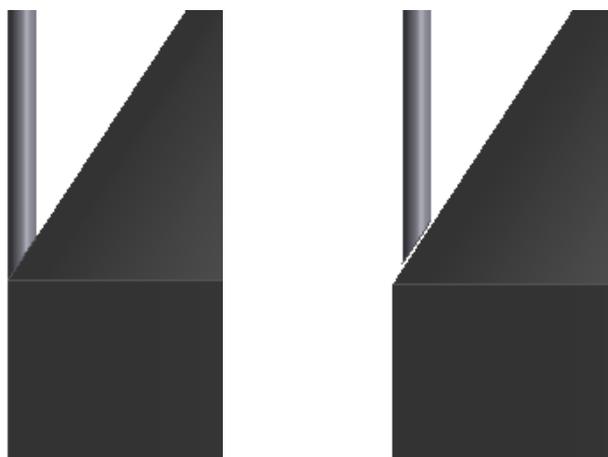


Abbildung 3.9 Geometrieadaptation, Versetzen der Belüftungs- bzw. Entleerungsrohre um den halben Durchmesser

3.4.2.5 Zusammenfassung der verwendeten unstrukturierten Netze

Für die ersten Initialsimulationen werden Netze ohne Verfeinerungszonen sowie Prismenwandschichten erstellt dabei wird die globale Elementgröße sehr hoch gewählt. Im nächsten Verfeinerungsschritt wird die Elementgröße verringert. Die nächste Initialstufe besitzt die Verfeinerungszonen im Drosselbereich und erst bei der Endsimulation werden die Prismenwandschichten verwendet.

Tabelle 3.2 Zusammenfassung der verwendeten Netze im Naturmaßstab

	Element- anzahl	Mittlere Ele- mentgröße	Max. Ele- mentgröße	VZ 1	VZ 2	IFL
	[Mio]	[m³]	[m³]	[m³]	[m³]	[m]
Initialnetz	0,32	0,033	1,2	–	–	–
Netz ohne Verfeinerung	1,27	0,009	0,15	–	–	–
Aufschwngen						
Netz mit Ver- feinerung	2,50	0,004	0,15	0,11	0,09	–
Endnetz mit Inflationlayer	6,35	0,002	0,15	0,11	0,09	0,01
Abschwngen						
Netz mit Ver- feinerung	2,81	0,004	0,15	0,11	0,09	–
Endnetz mit Inflationlayer	6,36	0,002	0,15	0,11	0,09	0,01

3.4.3 Lastfälle

Es werden die Lastfälle des Aufschwingvorganges und des Abschwingvorganges im Wasserschloss (siehe Kapitel 1.2.2) untersucht. Die Durchflüsse (Gleichung 3-2) werden so gewählt, dass die Strömung im Silvertastollen, mit einer Reynold'zahl (Re Gleichung 2-1) von 10^6 beschrieben werden kann. Weiters werden zwei Lastfälle, das Auf- und das Abschwingen, mit der Ausbauwassermenge (Q_A) von $160 \text{ [m}^3\text{/s]}$ im Naturmaßstab verwendet. Die Durchflüsse in Tabelle 3.3 gelten für beide Lastfälle

$$Q_i = \frac{Re_i \cdot \eta \cdot d \cdot \pi}{4 \cdot \rho} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad 3-2$$

Tabelle 3.3 Durchflüsse für die Lastfälle Auf- und Abschwingen

	Reynold'zahl	1:1	1:15	1:30
	[-]	[m ³ /s]	[l/s]	[l/s]
Q₁	10^6	7,00	466,42	233,21
Q_A	$2,29 \cdot 10^7$	160	10,67	5,33

Da in ANSYS CFX die Eingabe der Einlauftrandbedingung als Massenstrom (\dot{m}) erfolgt, wird die Gleichung für den Durchfluss (Q), der gleich dem Volumenstrom (\dot{V}) ist, mit der konstanten Dichte für Wasser multipliziert.

$$\dot{m}_i = \dot{V}_i \cdot \rho = Q_i \cdot \rho = \frac{Re_i \cdot \eta \cdot d \cdot \pi}{4} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad 3-3$$

3.4.4 Setup

Nach der Verknüpfung des Rechnernetzes mit dem Programmteil CFX, wird im Setup das Netz als Gebiet (Domain) deklariert und die Ränder werden automatisch als Wandrandbedingungen definiert. Die Einlass- und Auslassrandbedingung werden manuell zugeordnet. Bei Verwendung von mehreren Rechengebieten werden Übergangsbedingungen (Interfaces) gesetzt. Der erste Schritt ist die Festlegung des Analysetyps, gewählt wird eine stationäre Untersuchung. Im Kapitel 3.5.5 Transiente Analyse wird gezeigt, dass bedingt durch Konvergenzprobleme, eine instationäre Analyse notwendig ist. Dem

Gebiet wird ein Fluid zugeordnet und als dessen Material wird Wasser aus der vorhandenen Materialbibliothek verwendet. Es handelt sich um ein Einphasenmodell mit konstanten Materialeigenschaften. Weiters wird ohne Auftrieb, Bewegung oder Deformation des Gebiets simuliert. Das Fluidmodell wird als Kontinuum ohne Berücksichtigung von Wärmeleitung festgelegt und als Turbulenzmodell wird Shear-Stress-Transport (SST) im vollen turbulenten Bereich verwendet. Die Werteinitialisierung für die Strömungsgrößen, wie z.B. Geschwindigkeit und Druck, erfolgt durch das Programm oder durch das Einlesen von Ergebnisse voriger Simulationen.

3.4.4.1 Randbedingung

Je nach Strömungsrichtung wird der Einlass als Massezustrom (Gleichung 3-3) mit einem Turbulenzinitial von 5% bestimmt. Der Auslass wird als offene Randbedingung mit einem mittleren stationären Druck von 0 (Pa), was dem Referenzdruck entspricht, definiert. An den restlichen Rändern wird als Randbedingung die Geschwindigkeit mit null definiert und die entsprechende Sandraugigkeit angegeben. Diese werden nach den Kennwerten der verwendeten Materialien gewählt (siehe Tabelle 3.4).

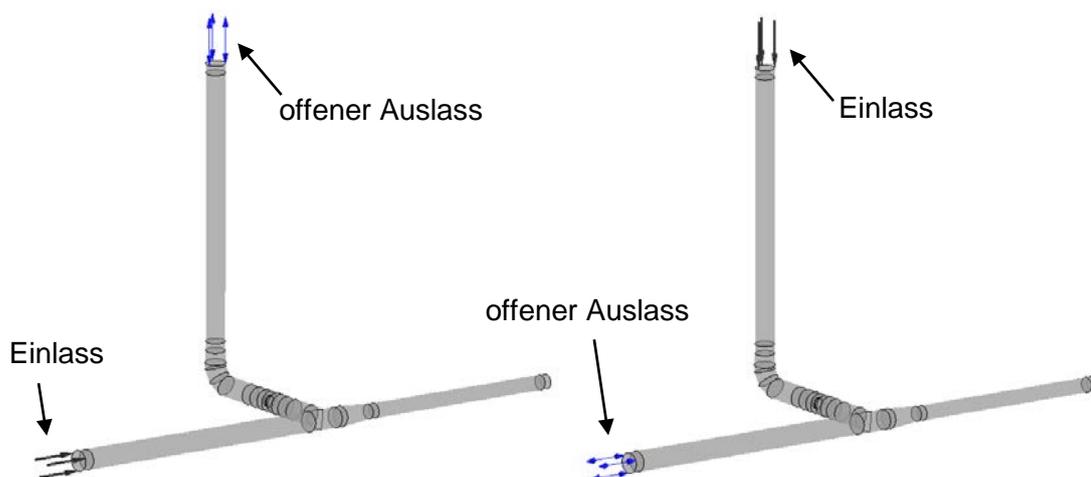


Abbildung 3.10 Strömungsmodell mit Randbedingungen links für Auf- rechts für Abschwingen

Tabelle 3.4 Untersuchte Sandrauigkeiten

	1:1	1:15	1:30
	[mm]	[mm]	[mm]
Variante ks₁	0,10	0,05	0,05
Variante ks₂	0,20	0,10	0,10

3.4.4.2 Initialisierung

Die Initialisierung für die erste Simulation wird programmgesteuert durchgeführt. Die Ergebnisse, in der Reihenfolge des Verfeinerungsgrades ihrer Rechennetze, werden für die jeweilige nächste Stufe als Initial verwendet. Die Untersuchungen bezüglich des Einflusses der Sandrauigkeit werden ausgehend von den Ergebnissen für die glatte Wand in ansteigender Rauigkeit initialisiert.

3.4.4.3 Lösungsschema

Die Lösungsschemen werden für die Initial-, Referenz- und Endsimulation unterschiedlich verwendet. Dabei ist weiters zwischen Advektions- und Turbulenzterm zu unterscheiden.

Für den Advektionsterm gilt:

Das Upwind-Verfahren besitzt ein einseitiges Diskretisierungsverfahren, ist 1.-Ordnung genau und verursacht numerische Diffusion (Abglätten). Für viele Fragestellungen in der Rohrhydraulik ist das Verfahren ausreichend und wird deshalb für die Initial- und Referenzberechnungen verwendet. Lösungsverfahren mit einer Genauigkeit 2.-Ordnung verursachen andererseits numerische Dispersion (Überschwingen). Dies kann durch das Einführen einer Übergangsfunktion vermindert werden. Bei dem Lösungsverfahren High Resolution ist der Einfluss der Übergangsfunktion durch einen variablen Faktor programmgesteuert. (Lecheler 2014). Dieses Verfahren wird bei allen Endsimulationen verwendet.

Für den Turbulenzterm wird bei Initial- und Referenzrechnung, ähnlich dem Advektionsterm, das Verfahren 1.Ordnung und bei Endrechnungen High Resolution verwendet.

3.4.4.4 Zeitschritt

Die Lösungsverfahren verwenden bei zeitunabhängiger Simulation einen sogenannten pseudo Zeitschritt, um sich der Lösung iterativ anzunähern. Dieser kann automatisch vom Programm berechnet werden, indem es die Länge des durchströmten Gebiets abschätzt und es durch die mittlere Geschwindigkeit einer Randbedingung teilt. Dies ist somit eine grobe Approximation der mittleren Fließdauer eines Strömungselements durch das Gebiet. Der automatisch generierte Zeitschritt kann wiederum durch einen Faktor reduziert werden.

Anfangs wird der automatische Zeitschritt verwendet jedoch wird er bedingt durch Konvergenzproblemen im Kapitel 3.5.1 Zeitschrittanpassung durch einen physikalischen Zeitschritt ersetzt und weiter verringert.

3.4.4.5 Ausgabewerte

Während der Simulation können Ausgabewerte für jeden Zeitschritt dargestellt werden. Einerseits werden die Gleichungsresiduen vom Programm ausgegeben, andererseits können weitere Werte im Pre-processing definiert werden. Dies können Kontrollwerte, um die Konvergenz zu überprüfen, aber auch Ergebniswerte sein. Das Implementieren der Ergebniswerte der Untersuchung unterstützt die Konvergenzkontrolle während des Processings und erleichtert auch das darauffolgende Post-processing.

Dazu werden die flächengemittelten Energiehöhen mittels Totalendrucks an jedem Messquerschnitt (siehe Kapitel 1.4.1) ausgelesen. Daraus die relevanten Differenzen gebildet und anschließend der Verlustbeiwert (vgl. Gleichung 2-18), bezogen auf eine mittlere Geschwindigkeit des Drosselquerschnitts, berechnet. Das Verhältnis zwischen dem Querschnitt des Silvretastollens und dem Drosselquerschnitt ist für alle Maßstäbe konstant bei ~ 3.11 . Die Implementierung sieht beispielhaft für die Messquerschnitte Ws1 und Se2 (siehe Abbildung 3.11) wie folgt aus:

$$HSi2 = \text{areaAve}(\text{Total Pressure})@SI2 / (997[\text{kg}/\text{m}^3] * g)$$

$$Hws1 = \text{areaAve}(\text{Total Pressure})@WS1 / (997[\text{kg}/\text{m}^3] * g)$$

$$\text{DeltaSi1Ws2} = Hws2 - HSi1$$

$$\text{ZetaSi1Ws2} = \text{DeltaSi1Ws2} * 2 * g / (\text{areaAve}(\text{Velocity})@outlet * 3.113109557)^2$$

Dies entspricht dem Verlustbeiwert, wie er im physikalischen Modellversuch für das Abschwingen berechnet wird. Für den Verlustbeiwert des Aufschwings werden die Messerquerschnitte Ws2 und Se1 (siehe Abbildung 3.11) verwendet und die Differenz in

Strömungsrichtung gebildet. Weiters werden die Energiehöhen an allen Messquerschnitten als Kontrollwerte ausgegeben.

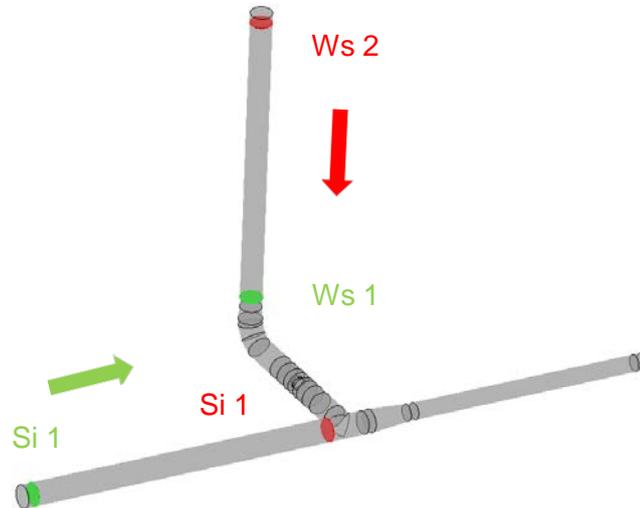


Abbildung 3.11 Messquerschnitte zur Verlustbeiwertbestimmung
Aufschwingen (grün) und Abschwngen (rot)

3.4.4.6 Konvergenz- und Abbruchkriterium

Das Festlegen des Konvergenz- und des Abbruchkriteriums erfolgt laut den Empfehlungen des Programmherstellers (ANSYS 2013). Für die Initial- und Referenzberechnungen wird der Zielwert für das quadratisch gemittelte Residuum auf 10^{-4} und für die Endsimulationen auf 10^{-5} gesetzt. Der Lösungsabbruch erfolgt in allen Simulationen nach spätestens 100 Iterationsschritten.

3.4.5 Voruntersuchung

In einer Voruntersuchung werden der dimensionslose Wandabstand (y^+) und die max. Residuen überprüft. Dafür werden nach Referenzrechnungen im Post-processing die Variablen dargestellt. Die Abbildung 3.12 zeigt die Zwischenergebnisse für den dimensionslosen Wandabstand (y^+) einer Referenzsimulation mit der Ausbauwassermenge Q_A beim Aufschwingen. Die Werte für den dimensionslosen Wandabstand befinden sich innerhalb der Grenzwerte (siehe Kapitel 3.3). Bei den max. Residuen muss zwischen dem unmittelbaren Drosselbereich und davon abseits unterschieden werden, für den ein höherer Grenzwert gilt. Die Abbildung 3.13 zeigt die max. Residuen und ihre Lage für eine Referenzsimulation mit der Ausbauwassermenge Q_A beim Aufschwingen.

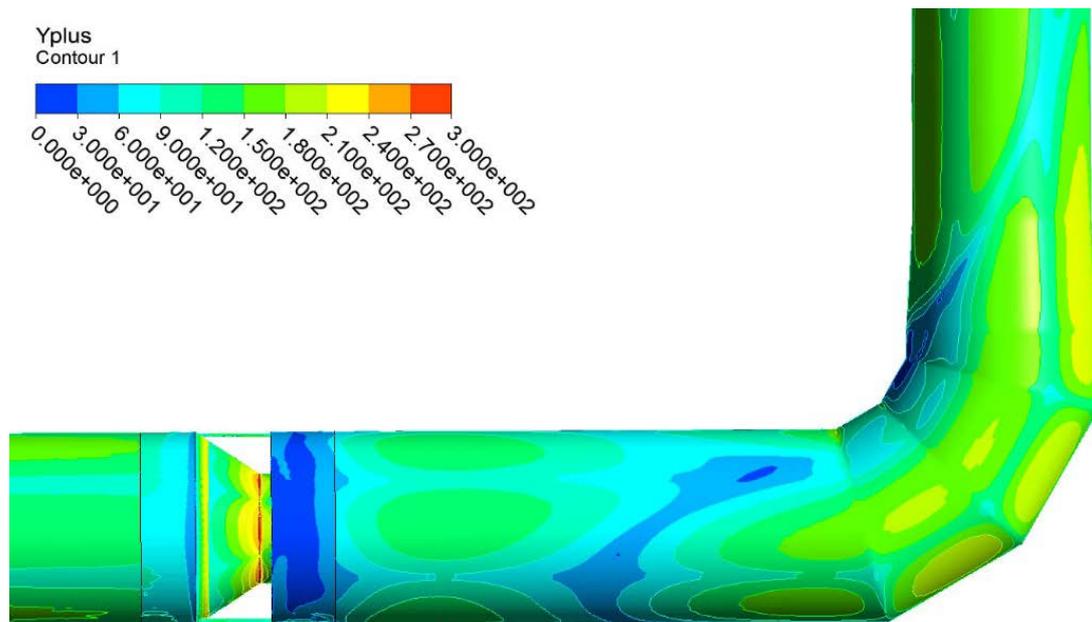


Abbildung 3.12 Darstellung des dimensionslosen Wandabstandes y^+ , bei Aufschwingen mit Q_A

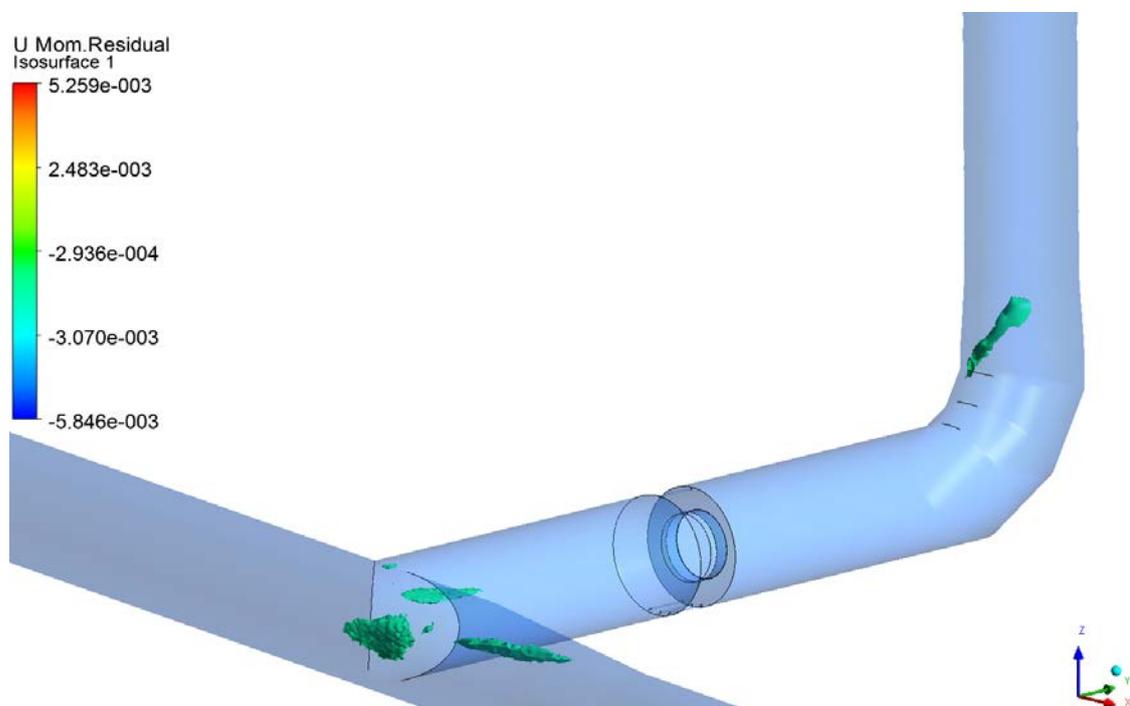


Abbildung 3.13 Lagebestimmung der max. Residuen, bei Aufschwingen mit Q_A

3.5 Vorgangsweise bei Konvergenzproblemen

Falls die Residuen nicht wie gewünscht zum Abbruchkriterium konvergieren ist die simpelste Methode die Reduktion des Zeitschrittes. Führt dies nicht zum gewünschten Ergebnis, kann eine Netzverbesserung dabei helfen die numerischen Fehler zu minimieren. Eine Veränderung der Lösungs- oder Diskretisierungsverfahren wird nicht verfolgt, da bereits die Methoden mit der höchsten Genauigkeit, die im Programm implementiert sind, verwendet werden. Bei weiteren Konvergenzproblemen ist ein Beurteilen der physikalischen Prozesse (z.B. transientes Verhalten) notwendig.

3.5.1 Zeitschrittanpassung

ANSYS empfiehlt bei Konvergenzproblemen auf einen physikalischen Zeitschritt zu wechseln und diesen je nach Strömungsbild selbst zu berechnen (siehe Gleichung 3-4). Dafür wird das Gebiet in Bereiche (Indizes i) mit unterschiedlichen Querschnitten eingeteilt und deren Längen (l_i) mit den dazugehörigen mittleren Geschwindigkeiten (Q/A_i) geteilt. Der kleinste Wert dieser Teilfließzeiten (t_i) ergibt den physikalischen Zeitschritt.

$$t_{physik.} = \min\{t_i\} = \min\left\{\frac{l_i \cdot A_i}{Q}\right\}, i = \text{Indizes des Teilbereichs} \quad 3-4$$

Wird das High-Resolution-Lösungsverfahren verwendet ist der Zeitschritt weiters zu reduzieren. Nach den Empfehlungen von ANSYS für das High-Resolution-Verfahren wird der errechnete Zeitschritt geviertelt und es ergeben sich folgende Werte für die unterschiedlichen Modellgrößen.

Tabelle 3.5 Gewählte Zeitschritte für die unterschiedlichen Modellgrößen

	1:1	1:15	1:30
	[s]	[s]	[s]
Zeitschritt	25	0,1	0,03

Durch den Umstieg auf einen selbst definierten physikalischen Zeitschritt wird die Konvergenzschwelle von 10^{-4} nach weniger Rechenschritten erreicht, jedoch wird eine volle Konvergenz mit 10^{-5} nicht erreicht. Dafür wird der Zeitschritt in 10er-Potenzen bis auf eine Millisekunde während des Berechnungsvorganges verringert.

3.5.2 Konvergenz der stationäre Simulationen mit unstrukturiertem Netz

Anhand des Lastfalls Aufschwingen mit dem Durchfluss (Q_2) von $7 \text{ m}^3/\text{s}$ im Naturmaßstab wird eine Konvergenzuntersuchung gezeigt. Dabei werden Simulationen mit den Zeitschritten 25, 10, 1, 0,1, 0,01, 0,001 s jeweils über 100 Iterationsschritte durchgeführt. Diese starten für die jeweils reduzierten Zeitschritte immer vom gleichen Ergebnis ausgehend, um sie untereinander vergleichen zu können. Die Initialisierung erfolgt durch die Resultate aus der Untersuchung mit programmgesteuerten Zeitschritt.

Wie in Abbildung 3.14 bis Abbildung 3.20 ersichtlich, haben die Zeitschrittreduktionen bis auf 1 s wenige Auswirkungen auf das Konvergenzverhalten. Das Residuum liegt bei allen vier Simulationen bei 10^{-4} . Ab einen Zeitschritt von einer Zehntelsekunde sind Oszillationen zur erkennen, die durch weitere Reduktion des Zeitschrittes stärker ausfallen und die Lösungen divergieren lässt. Da in den Wellen der Residuen keine Regelmäßigkeit zu erkennen ist, werden sie als numerische Fehler, bedingt durch unzureichende Vernetzung, interpretiert (ANSYS 2013).

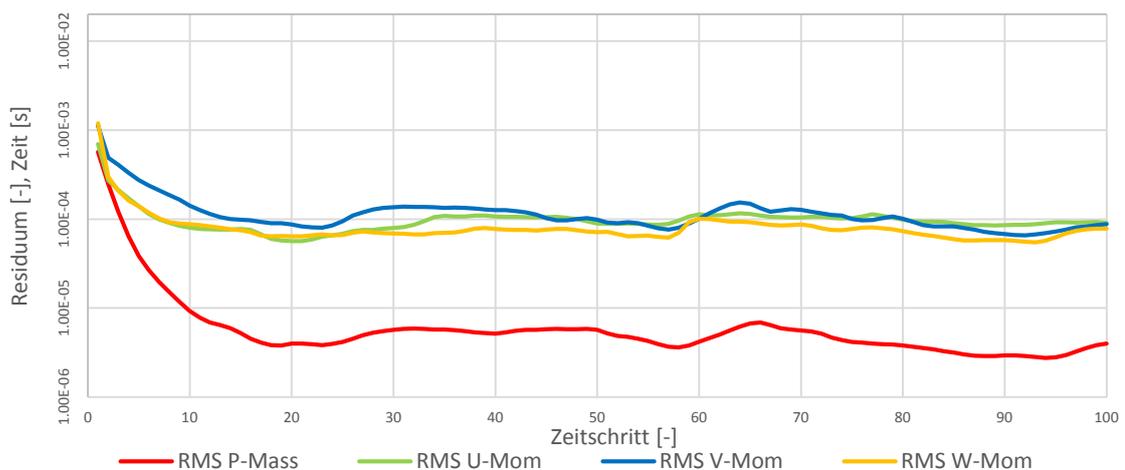


Abbildung 3.14 Residuen-Verlauf mit einem programmgesteuerten Zeitschritt

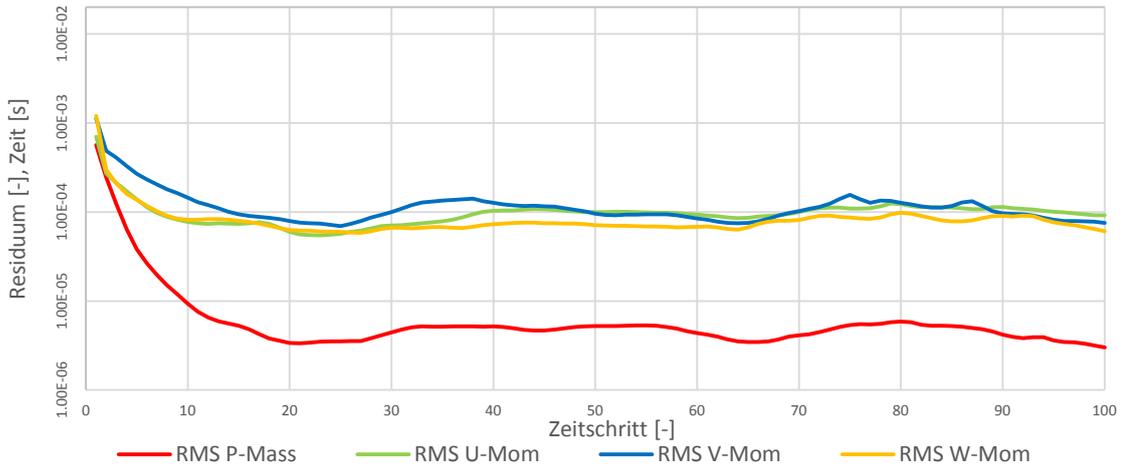


Abbildung 3.15 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt von 25 [s]

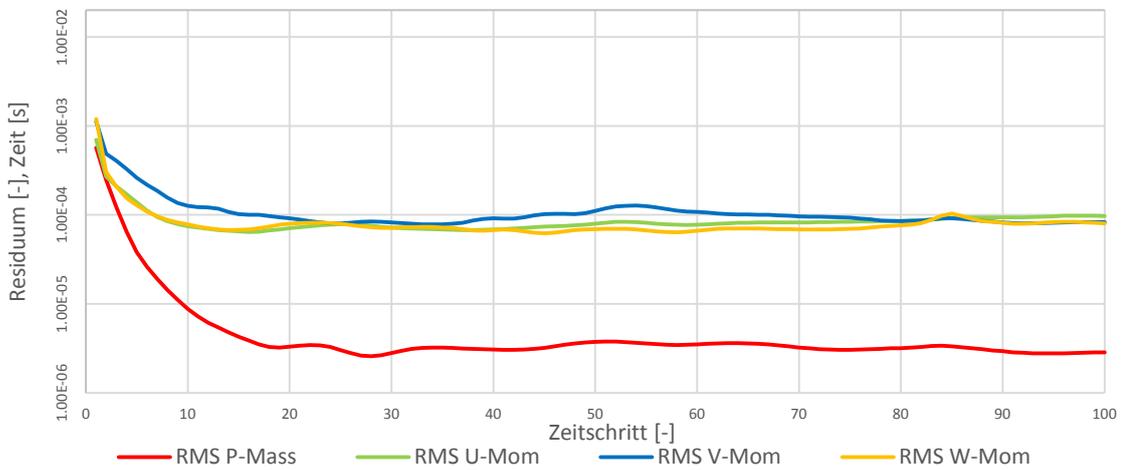


Abbildung 3.16 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt von 10 [s]

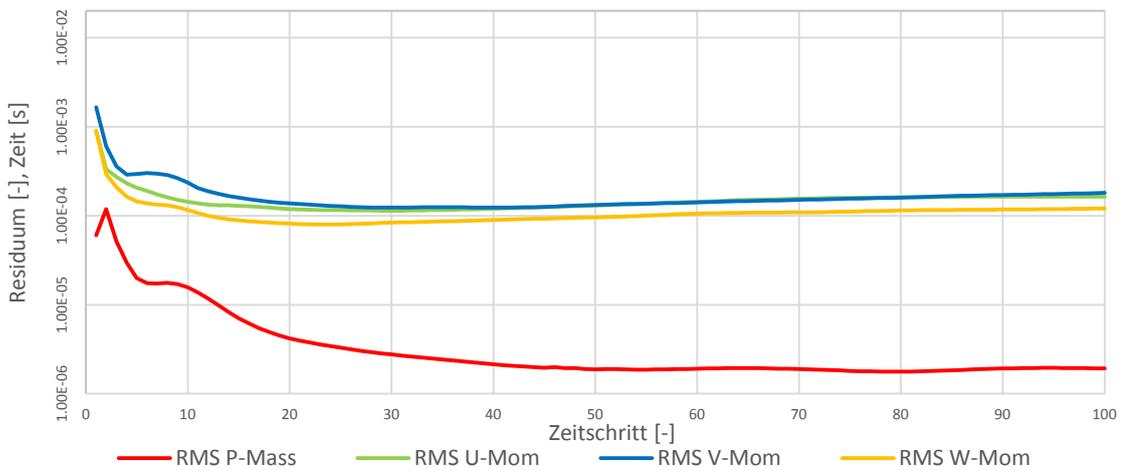


Abbildung 3.17 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt von 1 [s]

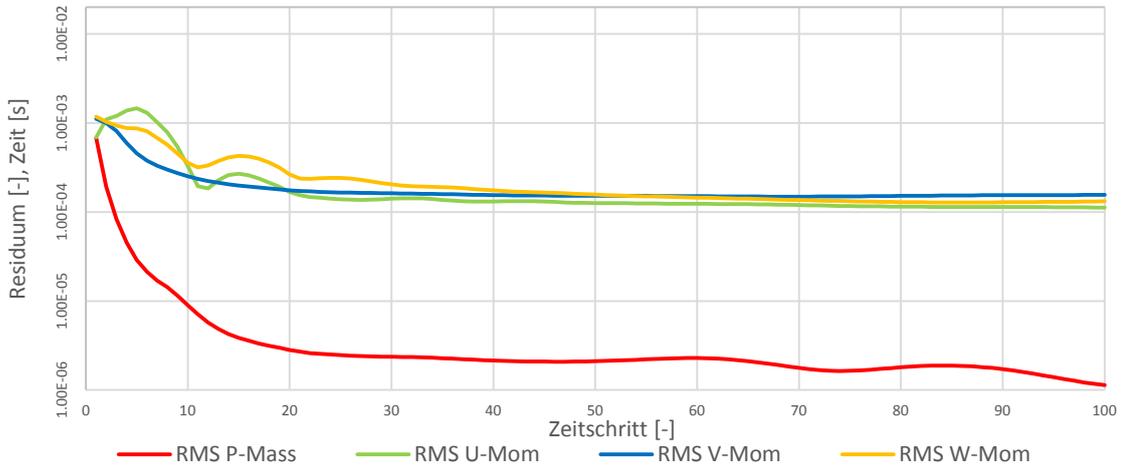


Abbildung 3.18 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt von 0,1 [s]

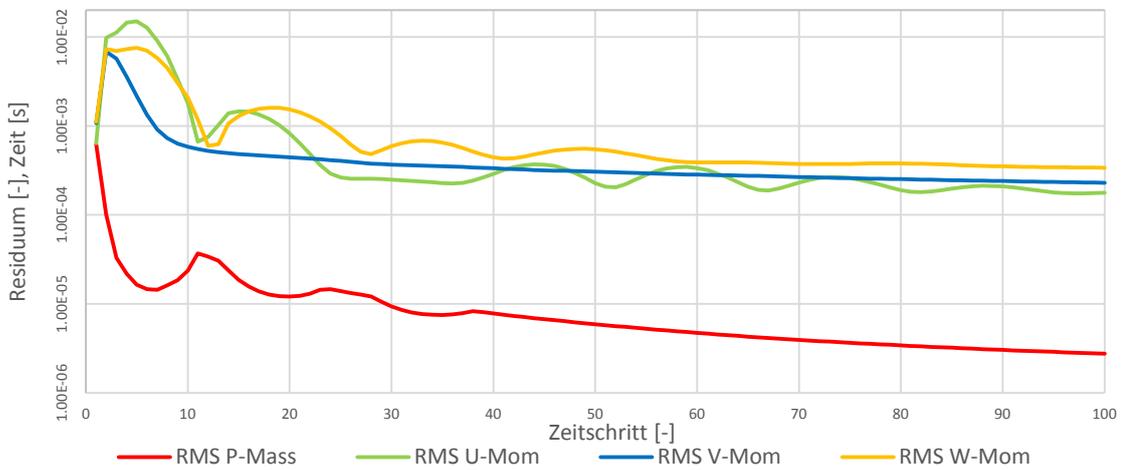


Abbildung 3.19 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt von 0,01 [s]

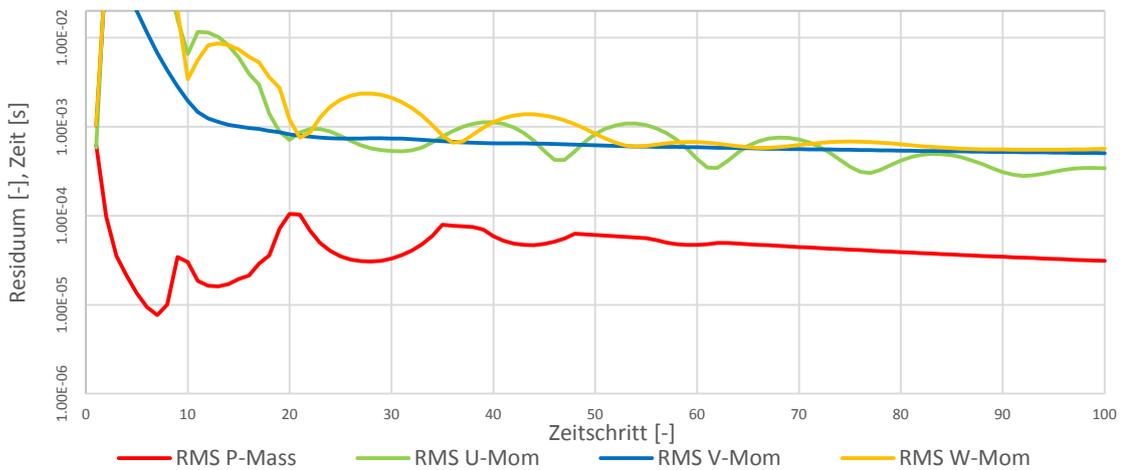


Abbildung 3.20 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt von 0,001 [s]

3.5.3 Umstieg auf strukturiertes Netz

Als Ursache der anhaltenden Konvergenzprobleme werden numerische Fehler vermutet, die durch die Netzqualität verursacht werden. Bedingt durch die bereits hohe Anzahl an Elementen und damit einhergehenden hohen Rechenaufwand ist eine Verbesserung des unstrukturierten Netzes nicht möglich. Weitere Geometrieadjustierungen werden als starke Beeinflussungen des Strömungsverhaltens angesehen. Daher wird auf ein strukturiertes Netz umgestiegen. Für komplexe Geometrien ist es notwendig das Gebiet in Blöcke einzuteilen. Jeder Block besitzt ein eigenes Koordinatensystem, das in den lokalen Koordinaten orthogonal ist. Diese Blöcke werden dann auf die Geometrie projiziert, behalten aber dabei ihre Strukturiertheit. Nach der Umwandlung in ein „unstrukturiertes“ Netz werden die lokalen Koordinaten gelöscht und es gilt nur noch das globale Koordinatensystem. Die Erstellung des strukturierten Netzes erfolgt mittels dem ANSYS-Programmteil ICEM.

3.5.3.1 Blockstrategie

Für die Zuordnung der Blöcke zur Geometrie ist eine Blockstrategie erforderlich, die vorab ausgearbeitet wird. Bei Rohren hat sich eine Einteilung in Kern- und Ringblöcke bewährt. Der Kern besitzt einen hexagonalen Querschnitt, der mittels den Ringblöcken an die Geometrie angepasst wird (Abbildung 3.21). Speziell die Abzweigung vom Silvertastollen in den Wasserschlossverbindungsstollen und die Drossel mit den Entlüftungs- bzw. Belüftungsrohre bedürfen einer guten Planung der Blockeinteilung. Durch die Komplexität der Drosselgeometrie wird diese getrennt vernetzt und durch Übergangsbedingungen im Pre-Processing (Abbildung 3.23) mit dem restlichen Netz verbunden. Die Abbildung 3.22 zeigen die Blockeinteilung für den Drosselbereich vor und nach der Projektion, die Ringblöcke sind blau strichliniert dargestellt.

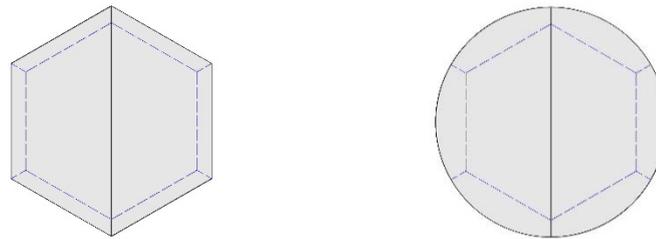


Abbildung 3.21 Schematische Darstellung der Kern- und der Ringblöcke (blau), links vor, rechts nach Projektion

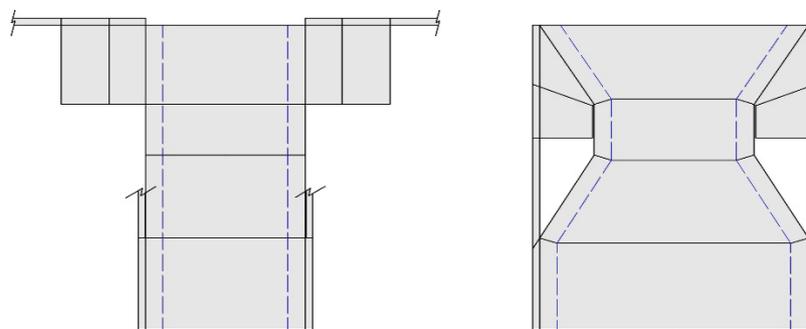


Abbildung 3.22 Schematische Blockstrategie für die Drosselgeometrie, links vor, rechts nach der Projektion

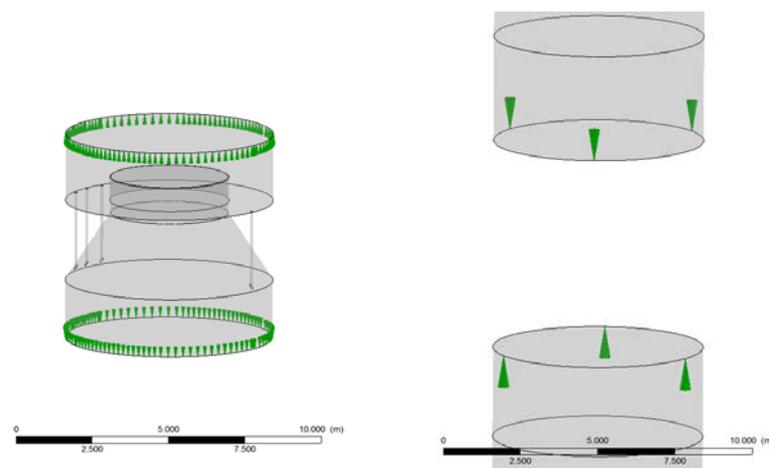


Abbildung 3.23 Zweigeteiltes Strömungsgebiet gekoppelt durch Übergangsbedingung an den Rändern

3.5.3.2 Vergleich zum unstrukturierten Netz

Der Vergleich zwischen unstrukturierten und dem strukturierten Netz (Abbildung 3.6) zeigt eine deutliche Verringerung der mittleren Elementgröße bei verhältnismäßig geringem Anstieg der Elementanzahl. Speziell der Drosselbereich konnte durch das strukturierte Netz feiner diskretisiert werden.

Tabelle 3.6 Vergleich der unstrukturierten Netze mit dem strukturierten Netz im Naturmaßstab

	Element- anzahl	Mittlere Elementgröße	Max. Elementgröße	VZ 1	VZ 2	IFL
	[Mio]	[m³]	[m³]	[m³]	[m³]	[m]
Aufschwingen unstrukturier- tes Netz	6,35	0,0020	0,15	0,11	0,09	0,01
Abschwingen unstrukturier- tes Netz	6,36	0,0020	0,15	0,11	0,09	0,01
strukturiertes Netz Drossel	2,12	0,0001	0,001	–	–	0,01
strukturiertes Netz Stollen	6,84	0,0016	0,01	–	–	0,01
Gesamt	8,95	0,0013	0,01	–	–	0,01

3.5.3.3 Ausmaß der Netzqualitätsverbesserung

Die Tabelle 3.7 zeigt eine deutliche Verbesserung der Netzqualität durch die Verwendung eines strukturierten Netzes. Die Werte sind deutlich über den Grenzwerten und das Netz kann daher für diese schwierige Geometrie als gut angesehen werden. Die Optimalwerte können nur bei sehr einfachen und orthogonalen Geometrieverhältnissen erreicht werden.

Tabelle 3.7 Verbesserung der Netzqualität durch die Verwendung eines strukturierten Netzes

	min. Winkel	Jacobi-Determinante
	[°]	[-]
Grenzwert	10	0,166°
Unstrukturiertes Netz	18	0,187
Strukturiertes Netz	27	0,54
Optimalwert	90/60	1

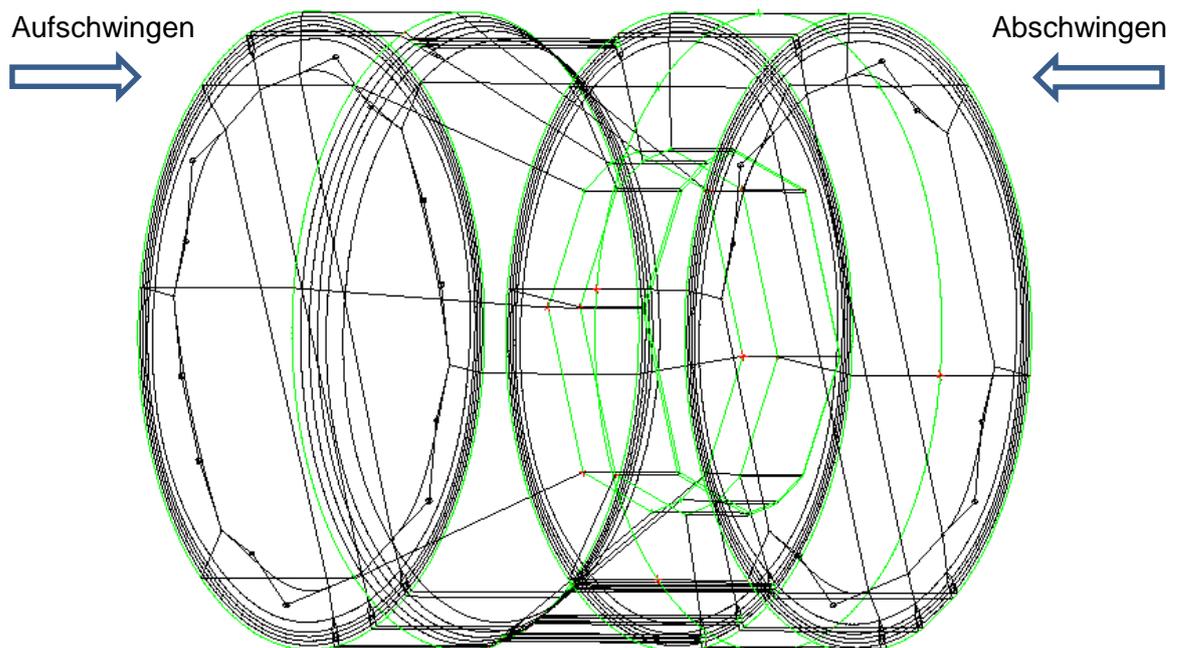


Abbildung 3.24 Blockeinteilung der Drosselgeometrie ohne Innenkanten

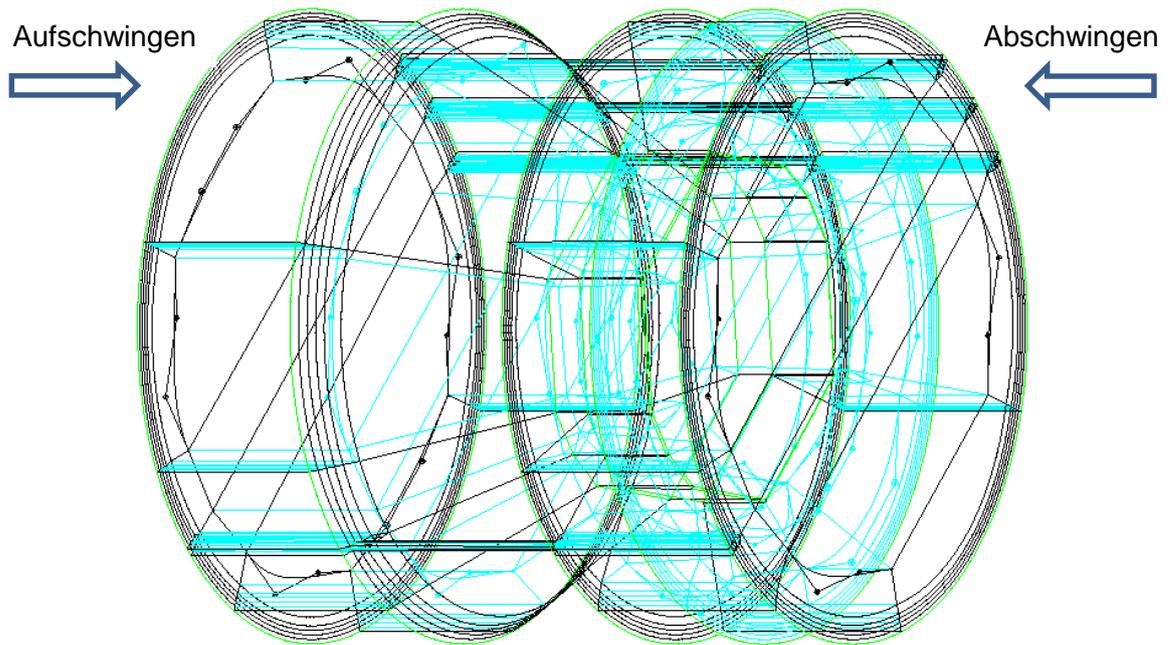


Abbildung 3.25 Blockeinteilung der Drosselgeometrie mit Innen Kanten (Cyan)

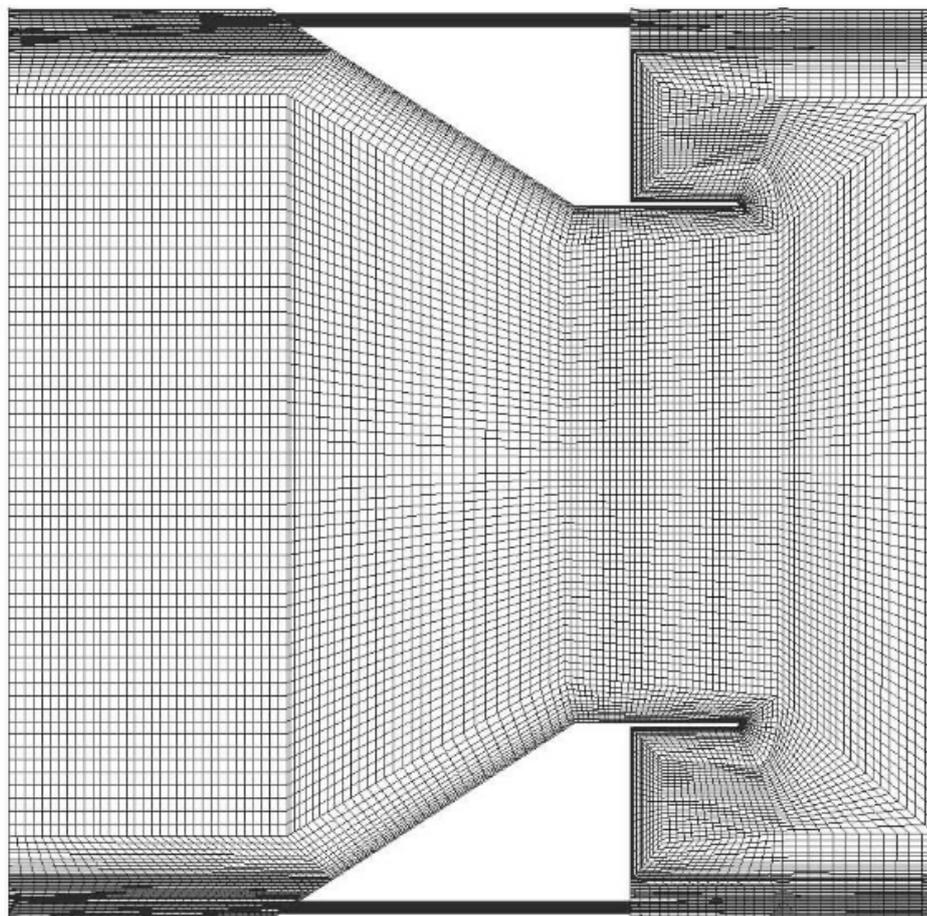


Abbildung 3.26 Strukturiertes Netz im Drosselbereich

3.5.4 Konvergenz der stationären Simulationen mit strukturiertem Netz

Die Konvergenzuntersuchung für die Simulation mit strukturiertem Netz erfolgt nach dem Beispiel in Kapitel 3.5.2 Konvergenz der stationäre Simulationen mit unstrukturiertem Netz (Abbildung 3.27 - Abbildung 3.33). Hierbei fallen die Oszillationen zu Beginn der Untersuchung mit sehr kleinen Zeitschritten auf (ab Abbildung 3.31). Die Amplitude dieser Schwingung verringert sich über die Anzahl der Iterationsschritte. Jedoch bleibt die Periodendauer, gemessen in der Anzahl der Zeitschritte, während einer Simulation konstant. Vergleicht man die Simulationen mit den verschiedenen Zeitschritten untereinander, dann ist erkennbar, dass die Periodendauer unabhängig von der Größe des Zeitschrittes ist. Dies wird als Indikator für transientes Strömungsverhalten angesehen (ANSYS 2013).

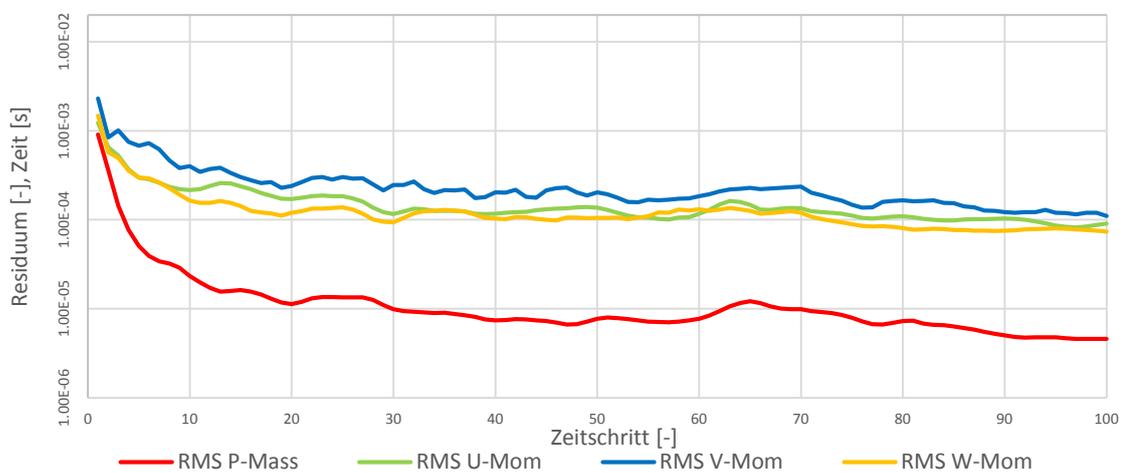


Abbildung 3.27 Residuen-Verlauf mit einem programmgesteuerten Zeitschritt

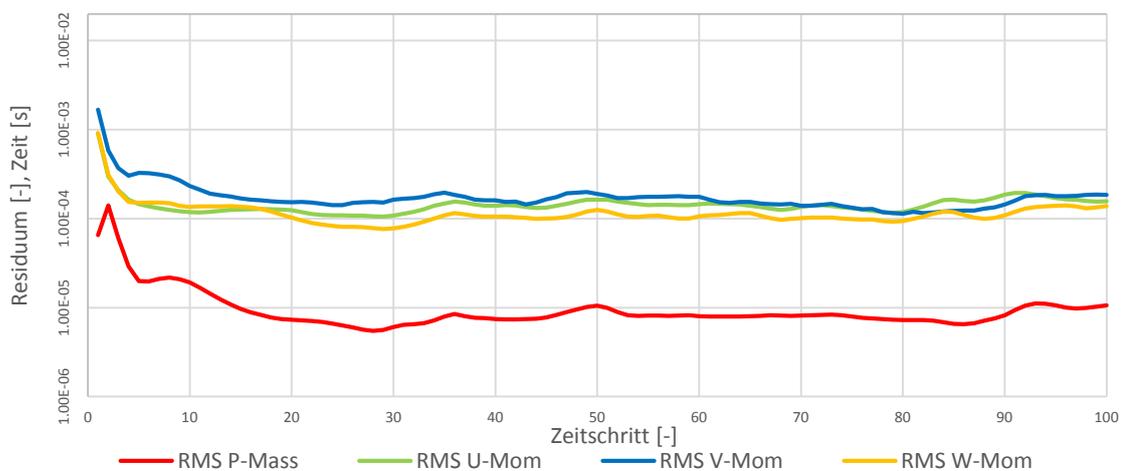


Abbildung 3.28 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt 25 [s]

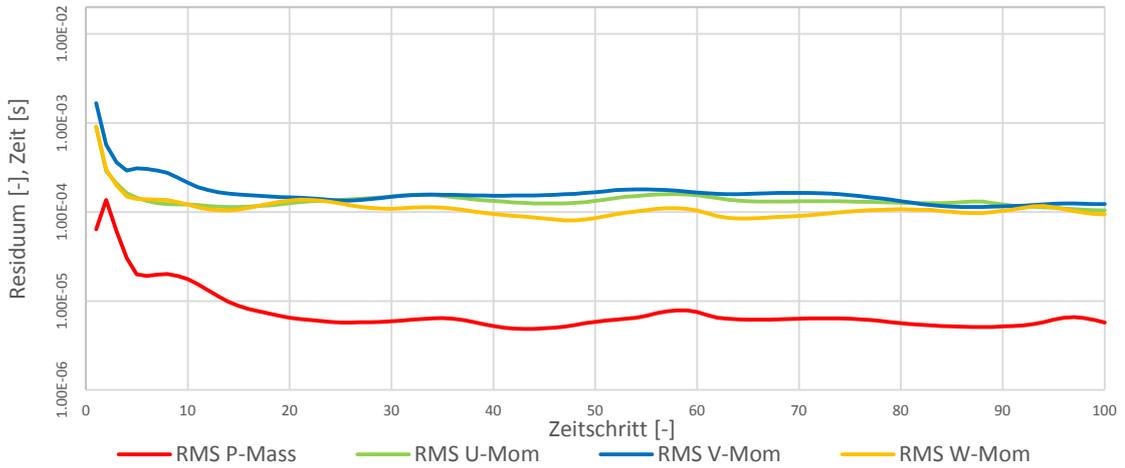


Abbildung 3.29 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt 10 [s]

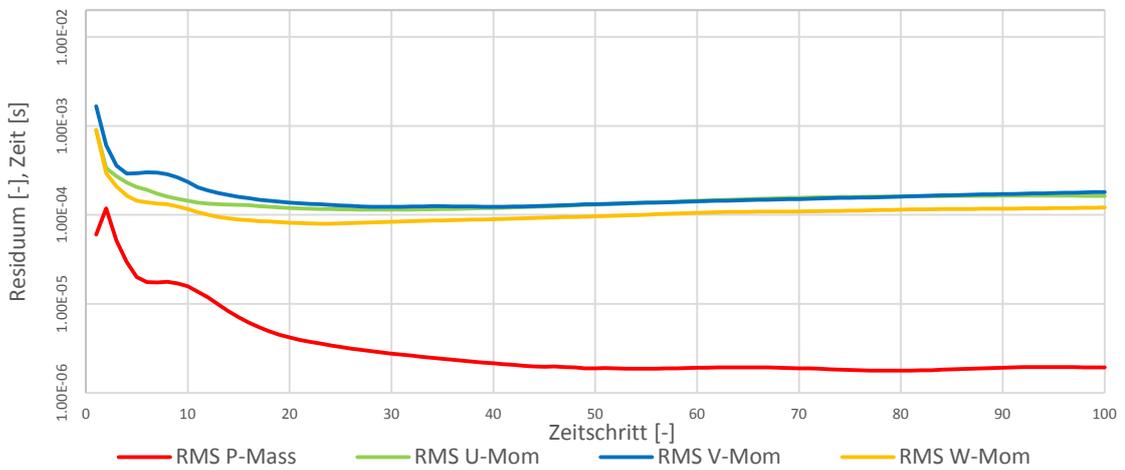


Abbildung 3.30 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt 1 [s]

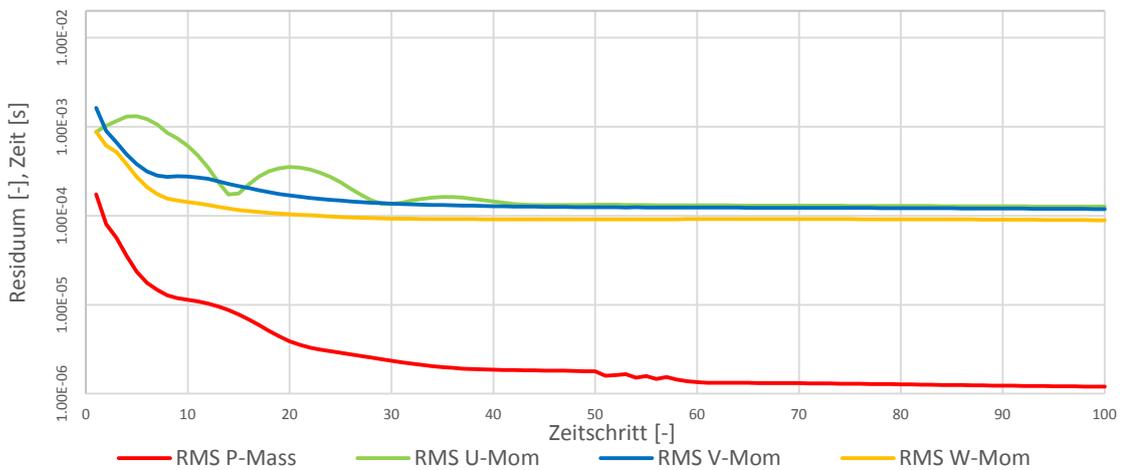


Abbildung 3.31 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt 0,1 [s]

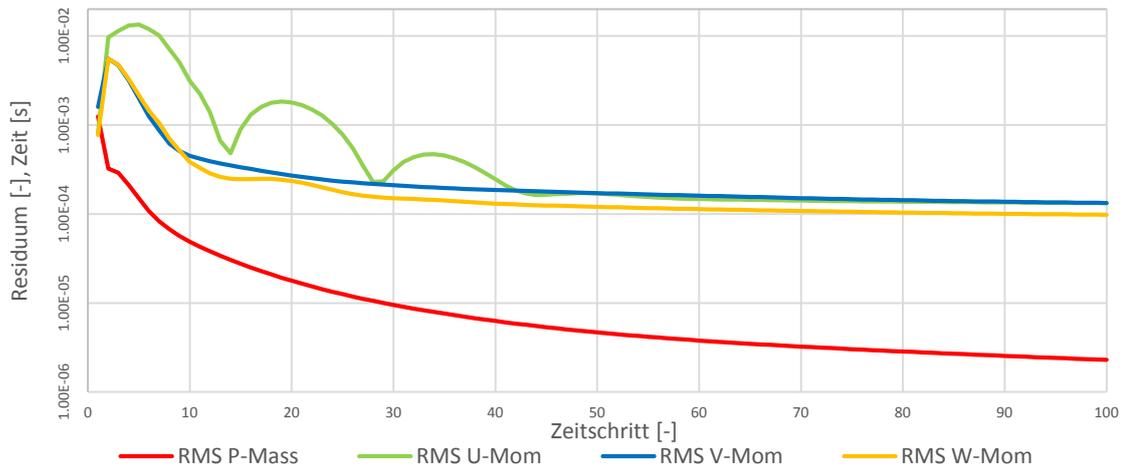


Abbildung 3.32 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt 0,01 [s]

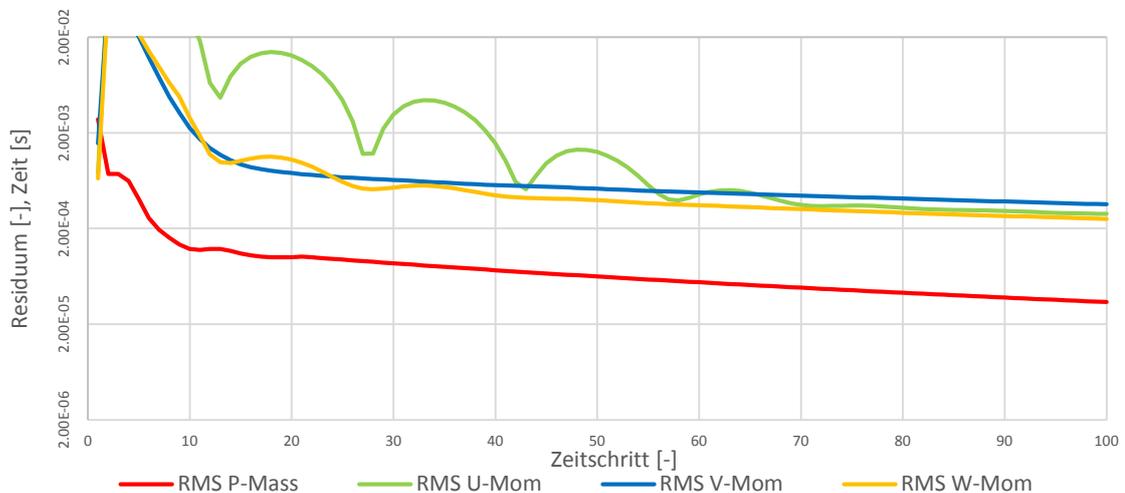


Abbildung 3.33 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt 0,001 [s]

3.5.5 Transiente Analyse

Nachdem in Kapitel 3.5.4 gezeigt wird, dass instationäres Verhalten die Konvergenz der stationären Berechnung beeinflusst, ist es erforderlich eine transiente Untersuchung durchzuführen. Dabei ist der Zeitschritt, anders als bei einer stationären Lösung, nach der gewünschten Auflösung der Zeit oder adaptive zu wählen. Da hier die Strömung äußerlich stationär und die Dauer der simulierten Zeit eine untergeordnete Rolle spielt, wird ein adaptiver Zeitschritt verwendet und die simulierte Zeit durch 100 variablen Zeitschritten begrenzt. Der Zeitschritt wird nach dem Konvergenzverhalten über den Simulationsverlauf angepasst.

3.5.5.1 Zeitschritt

Die transiente Untersuchung bedarf eines sehr geringen Anfangszeitritt, um nach wenigen Zeitschritten eine adäquate Konvergenz zu erreichen. Als Startwert für den Zeitschritt wird eine Millisekunde gewählt, dieser bleibt fünf Zeitschritte konstant danach wird er schrittweise angepasst. Dies erfolgt durch vorher festgelegte Werte und wird nach den benötigten Iterationsschritten pro Zeitschritt eingesetzt. Der Zielbereich liegt bei zwei bis sechs Iterationsschritten pro Zeitschritt. Wird die untere Grenze unterschritten, vergrößert sich der Zeitschritt um den Faktor 1,25 und beim Überschreiten der oberen Grenze, verringert er sich um den Faktor 0,8 (siehe Tabelle 3.8). Als max. Zeitschritt wird eine Zehntelsekunde gewählt, um eine ausreichende Auflösung zu erreichen. Der adaptive Zeitschritt hat den Vorteil, dass in relativ geringen Schritten und trotz sehr kleinen Anfangszeitritt eine angemessene Zeitdauer simuliert wird. Als Startwerte für die transiente Untersuchung werden die Ergebnisse der stationären Analyse herangezogen.

Tabelle 3.8 Adaptive Zeitschrittanpassung

	Iterationsschritte	Zeitschrittfaktor
	[-]	[-]
Untere Grenze	2	1,25
Obere Grenze	6	0,8

3.5.5.2 Konvergenz- und Abbruchkriterium

Das Konvergenzkriterium wird auf 10^{-5} gesetzt, wird dies für den aktuellen Zeitschritt erreicht, wird die Iteration abgebrochen und der neue Zeitschritt beginnt. Jedenfalls wird nach zehn Iterationsschritten für jeden Zeitschritt abgebrochen.

3.5.5.3 Diskretisierungsverfahren über die Zeit

Da in Richtung der Zeit simuliert wird, also die gesuchte Lösung im nächsten Zeitschritt liegt, ist nur eine rückwärts Diskretisierung in der Zeit sinnvoll. Es wird, nach Empfehlung des Programmherstellers, das rückwärts Euler-Verfahren der 2.-Ordnung verwendet.

3.5.6 Konvergenz der transienten Simulationen mit strukturiertem Netz

Die transiente Untersuchung bringt eine enorme Steigerung der Konvergenz. Hier wieder beispielhaft die Ergebnisse für den reibungsfreien Lastfall, Aufschwingen bei einer Reynold'zahl von 10^6 im Naturmaßstab. Werden anfangs noch zwischen sechs und zehn Iterationen pro Zeitschritt benötigt, so wird ab den fünften Zeitschritt bereits nach mindestens zwei Iterationen die Zielkonvergenz erreicht. Mit der Erhöhung des Zeitschrittes steigt auch das Residuum (in der Abbildung 3.34 zackiger Bereich) und kurzfristig die Anzahl der Iterationsschritte. Das Residuum flacht aber bei einem konstanten Zeitschritt wieder ab. Der Verlauf des Verlustbeiwertes (ζ) zeigt ein Einschwingen auf einen konstanten Wert, der nach 100 Zeitschritten bei 0,686 liegt (siehe Abbildung 3.35). Dies kann als ein Einpendeln des transienten Strömungszustanden aus einem erzwungen stationären gesehen werden. Das Konvergieren des Verlustbeiwertes trotz transientser Analyse ist darauf rückzuführen, dass die Messstellen weit außerhalb des instationären Strömungsgebietes sind.

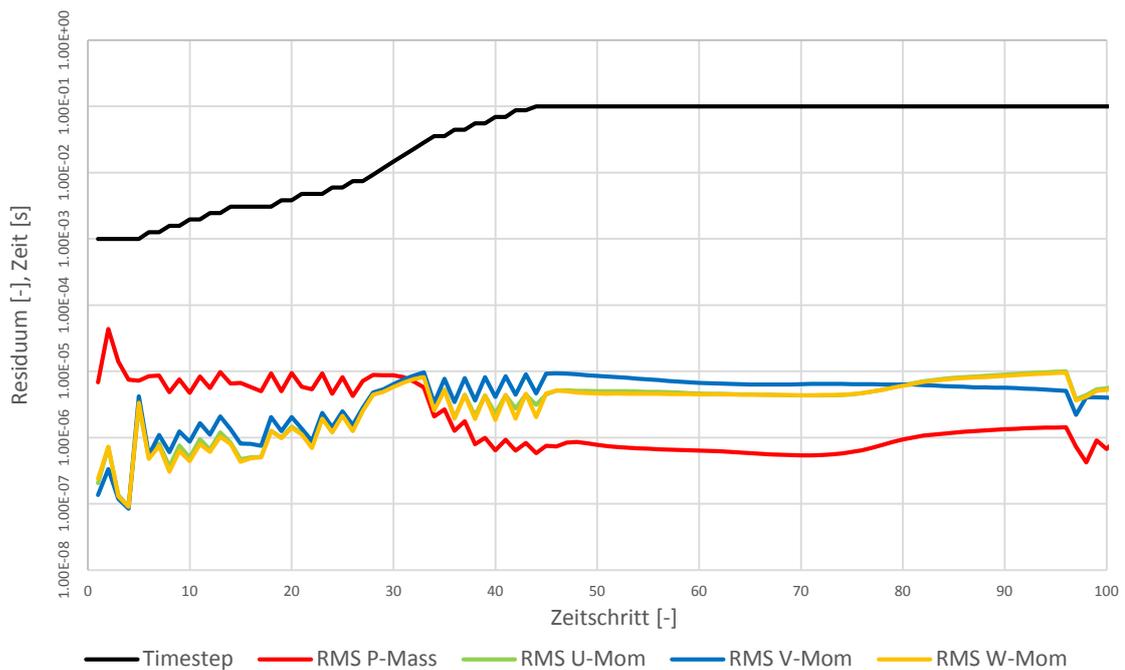
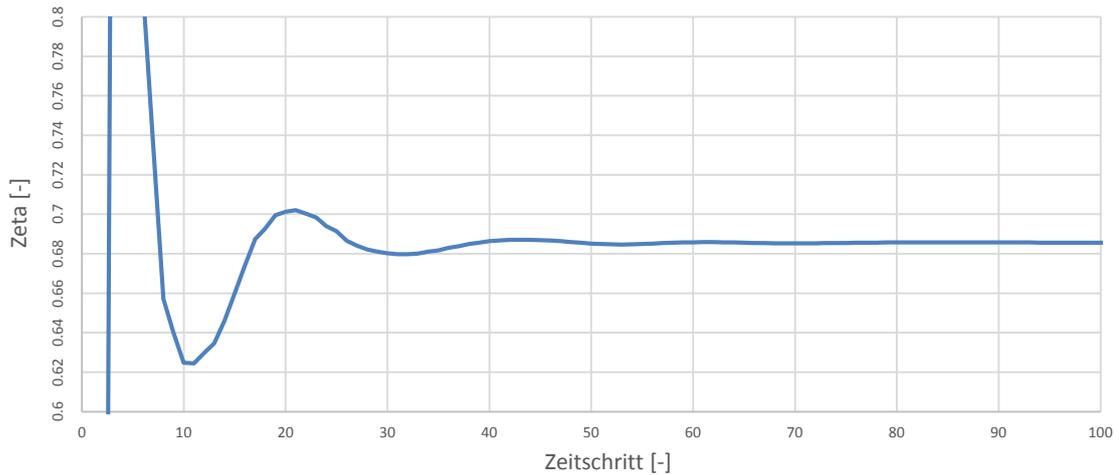


Abbildung 3.34 Residuen- und Zeitschrittverlauf einer transienten Simulation mit adaptiven Zeitschritt

Abbildung 3.35 Einpendeln des Verlustbeiwertes (ζ)

3.6 Darstellung der Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in ANSYS-CFX im Subprogramm Post-CFX. Dabei werden die Resultate eingelesen und die relevanten Werte (z.B. Druck, Geschwindigkeit) grafisch aufbereitet. Dafür werden die grafischen Elemente Isolinien, Isoflächen, Stromlinien und Vektorgitter verwendet. Diese können sich auf den ganzen Rechenmodellbereich beziehen oder auf einzelne Flächen wie Ränder, Quer- und Längsschnitte. Auch können Variablen als Diagramm über definierte Achsen im Raum erzeugt werden, z.B. Druckverlauf über die Rohrachse. Für weitere Vergleiche der unterschiedlichen Lastfälle, Modellmaßstäbe und Sandraugigkeiten werden die Werte tabellarisch im CSV-Format ausgegeben und in einem Tabellenkalkulationsprogramm aufbereitet.

3.7 Zusammenfassung der Vorgangsweise

Anhand eines Entscheidungsdiagramms (siehe Abbildung 3.36) soll die Vorgangsweise der numerischen Untersuchung in dieser Arbeit zusammenfassend dargestellt werden. Nach der Festlegung der zu implementierenden Prozesse, folgt die Bestimmung der Beurteilungskriterien. Die eigentliche Umsetzung beginnt mit der Eingabe der Geometrie und der Erzeugung des unstrukturierten Netzes. Mit der Überprüfung der Netzqualität beginnt der iterative Kontroll-Korrekturprozess (in Abbildung 3.36 strichlinierte Pfeile). Nach mehrmaliger Netzverfeinerung erfolgt eine Anpassung der Netzgeometrie, um die gesetzten Werte für die Qualität einzuhalten. Im Setup werden die Randbedingungen, die Initialisierung, das Lösungsschema, der pseudo Zeitschritt, die Ausgabewerte sowie das Konvergenz- und das Abbruchkriterium definiert. Nach einer Voruntersuchung werden die geforderten Werte für den dimensionslosen Wandabstand sowie für das max.

Residuum kontrolliert und gegebenenfalls das Netz angepasst. Es folgt die Simulation mit ständiger Plausibilitätskontrolle der Ausgabewerte und der Konvergenzverfolgung. Bei Konvergenzproblemen wird zuerst der Zeitschritt reduziert und danach die Netzqualität verbessert, um einen numerischen Fehler auszuschließen. Dies wird durch den Umstieg auf ein strukturiertes Netz erreicht. Nach anhaltenden Konvergenzproblemen wird das Konvergenzverhalten genauer untersucht und ein inneres instationäres Verhalten als Ursache erkannt. Der Umstieg auf eine transiente Untersuchung bedarf weiterer Einstellungen im Setup, dazu zählen das Bestimmen des Zeitschritts, die Festlegung der simulierenden Zeit und die Wahl der Diskretisierung in der Zeit. Abschließend werden die erzeugten Ergebnisse ausgelesen und im Post-Processing grafisch dargestellt.

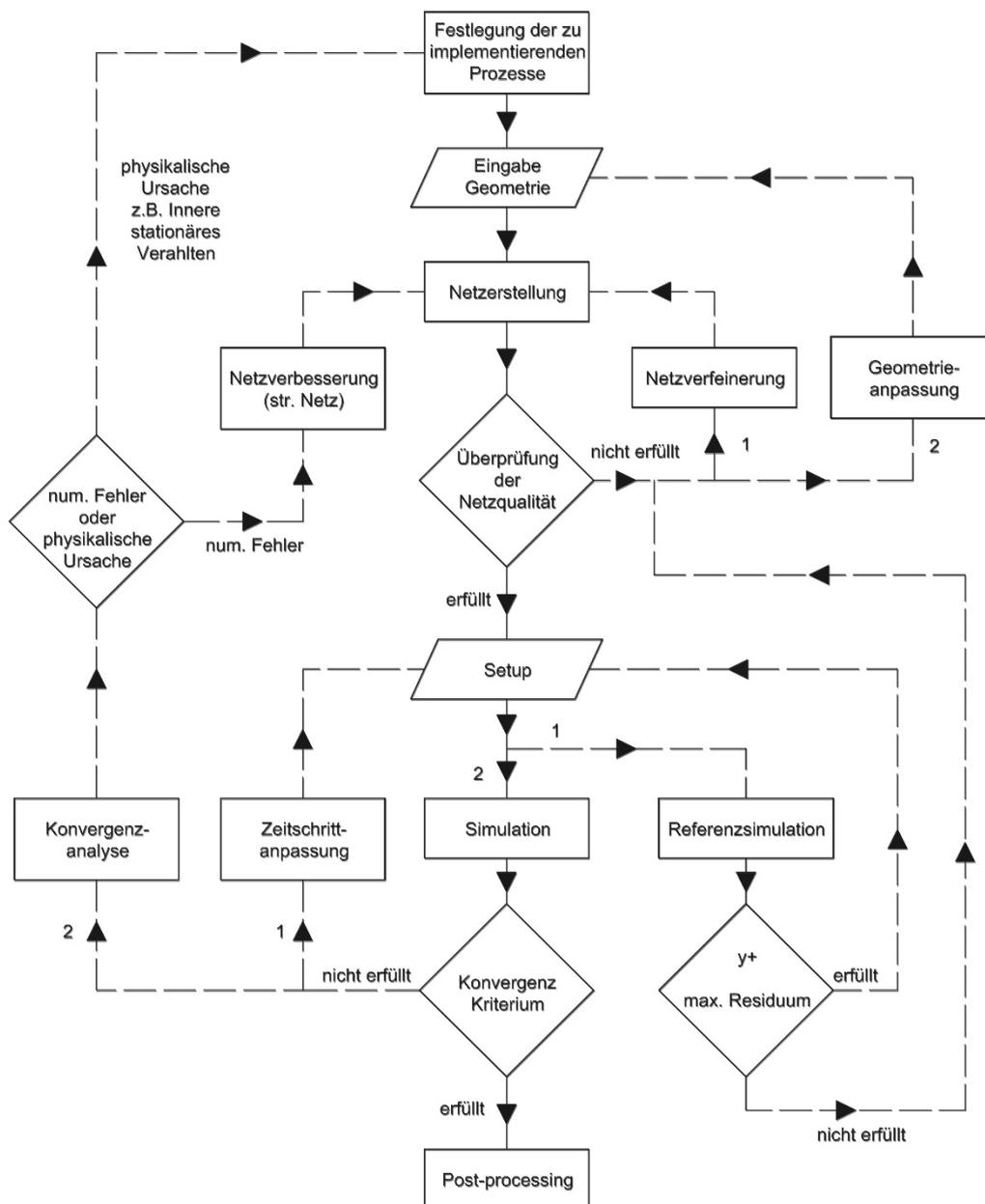


Abbildung 3.36 Entscheidungsdiagramm zur Vorgangsweise der numerischen Untersuchung

4. Ergebnisse der numerischen Simulationen

4.1 Bestimmung des Verlustbeiwertes

Die Abbildung 3.36 zeigt den zeitabhängigen Ausgabewert Zeta für die Simulation des reibungsfreien Aufschwinglastfalles bei einer Reynold'zahl von 10^6 (zur Definition des Ausgabewertes siehe Kapitel 3.4.4.5). Der Verlauf verfolgt ein Einschwingen aus einem erzwungen stationären Strömungszustand auf einen Zielwert. Zur Bestimmung des Verlustbeiwertes wird der Bereich der starken Oszillation nicht berücksichtigt, dies ist in der Abbildung 3.36 außerhalb der roten Kennzeichnung. Mit den restlichen Werten erfolgt eine arithmetische Mittelung. Der im physikalischen Modellversuch bestimmte Verlustbeiwert ist grün eingezeichnet. Davon weicht der Verlustbeiwert aus der numerischen Analyse ab (siehe Kapitel 4.4.1).

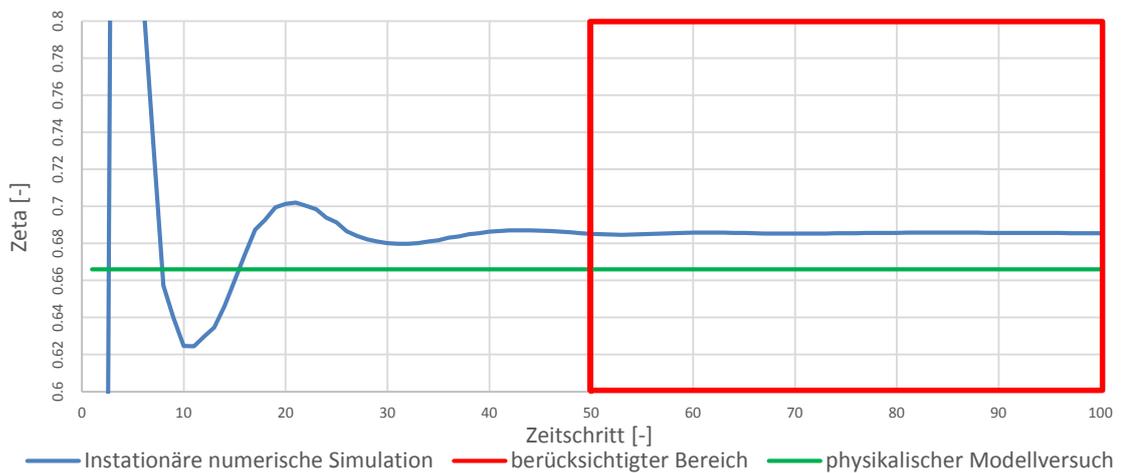


Abbildung 4.1 Bestimmung des Verlustbeiwertes

Wird die Letzte Schwingung des Einpendelvorganges nicht durch den Mittelwert geschlossen besteht ein gewisser Grad der Unsicherheit. Dies kann durch eine Erhöhung der simulierten Zeit verringert werden. Ein mögliches Abbruchkriterium ist, dass der letzte Ausgabewert nur um einer vorher definierten Toleranz vom Mittelwert abweichen darf. Beides wird in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt, da die Abweichung des Verlustbeiwertes im vertretbaren Rahmen liegt (siehe Kapitel 4.4.1).

4.2 Verlustbeiwerte

Nachstehend werden die Ergebnisse für den Verlustbeiwert der numerischen Simulation tabellarisch dargestellt. Dabei werden sie nach dem Längenmaßstab gruppiert und nach Durchfluss, Sandraugigkeit und Strömungsrichtung gelistet.

Tabelle 4.1 Ergebnisse der Verlustbeiwerte (ζ) zu den Lastfällen im Maßstab 1:1

Durchfluss	Äquivalente Sandraugigkeit	Aufschwüngen	Abschwüngen
[m ³ /s]	[mm]	[-]	[-]
7,00	0,00	0,685	1,659
7,00	0,10	0,640	1,754
7,00	0,20	0,644	1,655
160	0,20	0,691	1,715

Tabelle 4.2 Ergebnisse der Verlustbeiwerte (ζ) zu den Lastfällen im Maßstab 1:15

Durchfluss	Äquivalente Sandraugigkeit	Aufschwüngen	Abschwüngen
[m ³ /s]	[mm]	[-]	[-]
0,47	0,00	0,667	1,719
0,47	0,05	0,676	1,590
0,47	0,10	0,689	1,828
10,67	0,10	0,714	1,680

Tabelle 4.3 Ergebnisse der Verlustbeiwerte (ζ) zu den Lastfällen im Maßstab 1:30

Durchfluss	Äquivalent Sandrauigkeit	Aufschwingen	Abschwingen
[m ³ /s]	[mm]	[-]	[-]
0,23	0,00	0,660	1,671
0,23	0,05	0,672	1,670
0,23	0,10	0,690	1,632
5,33	0,05	0,711	1,637

Für den Aufschwinglastfall ist ein Anstieg des (Gesamt-)Verlustbeiwertes mit Zunahme der äquivalenten Sandrauigkeit und Durchfluss bis auf eine Ausnahme (im Naturmaßstab) erkennbar (ζ von 0,640 bis 0,714). Der (Gesamt-)Verlustbeiwerte für den Abschwingvorgang wird zwischen 1,590 und 1,828 berechnet. Mit Zunahme des Durchflusses und der Sandrauigkeit ist bei diesem Lastfall keine erkennbare Erhöhung des Verlustbeiwertes festzustellen. Die maximale Abweichung (f_{max} siehe Gleichung 4-2), bezogen auf den Zentralwert ($\zeta_{zentral}$ siehe Gleichung 4-1), beträgt für den Lastfall des Aufschwingens 5,47 % und für das Abschwingen 6,96 %.

$$\zeta_{zentral} = \frac{\zeta_{min} + \zeta_{max}}{2} [-] \quad 4-1$$

$$f_{max} = 100 \cdot \left(\frac{\zeta_{min/max}}{\zeta_{zentral}} - 1 \right) [\%] \quad 4-2$$

Die Abweichungen der einzelnen Verlustbeiwerte zu den Ergebnissen des physikalischen Modellversuches werden im Kapitel 4.4.1 und die Untersuchung bezüglich des Einflusses der Sandrauigkeit sowie des Durchflusses im Kapitle 4.4.2 behandelt.

4.3 Strömungsbild

Nachfolgend wird das Strömungsbild der Lastfälle Auf- und Abschwingen mit der Ausbauwassermenge (Q_A) mit einer Sandrauigkeit von 0,2 mm exemplarisch grafisch dargestellt. Dabei beziehen sich die relativen Strömungsgrößen auf ihren Mittelwert des

Strömungsgebietes (Domain). Sie werden wie folgt, am Beispiel der Geschwindigkeit, im Programm implementiert:

$$\text{RelativeVelocity} = \text{Velocity} / \text{volumeAve}(\text{Velocity}) @ \text{Domain}$$

4.3.1 Aufschwingen

Beim Aufschwingen fließt das Wasser den Silvrettastollen entlang und wird größtenteils beim T-Stück umgelenkt. Ein kleiner Teil stößt in das stehende Wasser des Konfusors und erzeugt dort Verwirbelungen, die aber vernachlässigbar gering sind. Durch die Umlenkung wird die Drossel einseitig angeströmt. In der Drossel wird das Wasser beschleunigt und fließt nach der Drossel mit hoher Geschwindigkeit durch einen Bereich langsameren Wasser. Dort entsteht die Rückstromzone mit der maßgebenden Dissipation. Nach der zweiten Umlenkung besitzt die Rohrströmung eine klar erkennbare Rotation um die Rohrachse, die bereits nach der ersten Umlenkung leicht erkennbar ist. Die Ursache für die Rotation ist nicht klar auszumachen, vielmehr resultiert diese aus dem Zusammenspiel aller Geometriekomponenten.

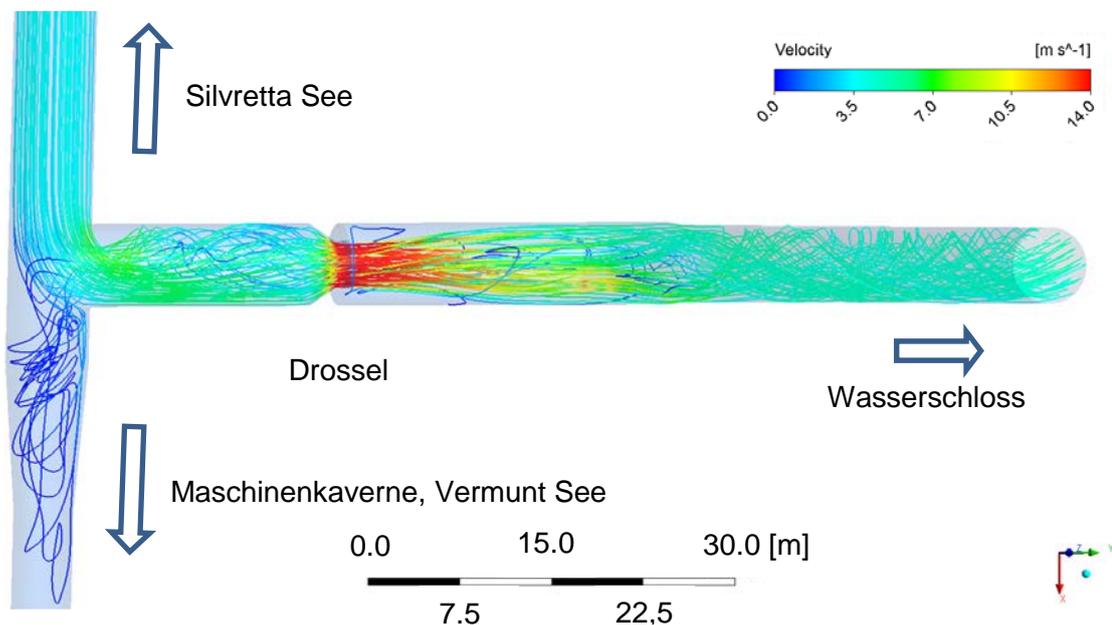


Abbildung 4.2 Stromliniendarstellung, Aufschwingen Q_A 160 [m³/s] im Naturmaßstab

Die Abbildung 4.3 und die Abbildung 4.4 zeigen die Geschwindigkeitsvektoren der Strömung im unmittelbaren Drosselbereich, wobei die Länge der Vektoren gleich dem Betrag der Geschwindigkeit ist. Abseits der konzentrierten Strömung ist die Rückstromzone in der Abbildung 4.5 und der Abbildung 4.6 mit den normierten Geschwindigkeitsvektoren zu sehen. Das Kapitel 4.3.1.1 zeigt zum Lastfall des Aufschwings mit der Ausbauwas-

sermenge Q_A die Druck- und Geschwindigkeitsverteilung am Vertikalschnitt durch die Drossel und das Kapitel 4.3.1.2 den Horizontalschnitt.

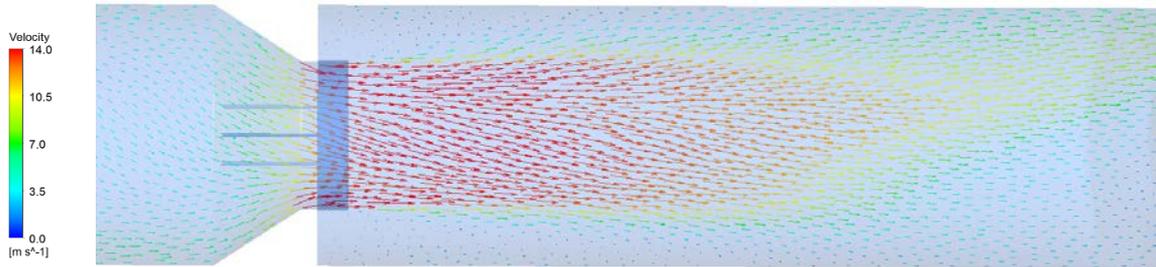


Abbildung 4.3 Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich horizontal, Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab

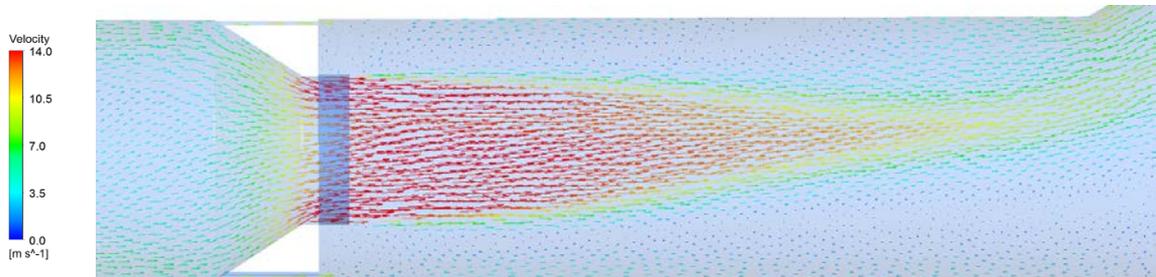


Abbildung 4.4 Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich vertikal, Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab

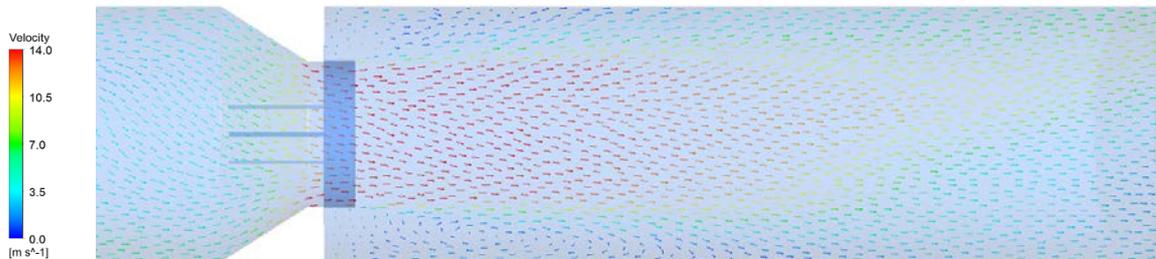


Abbildung 4.5 Normiertes Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich horizontal

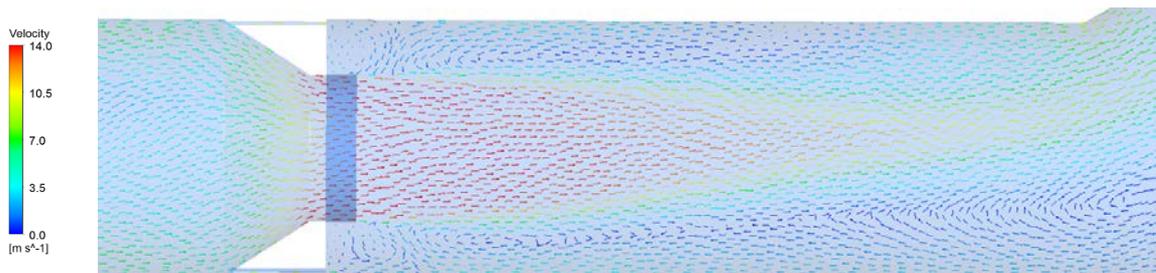


Abbildung 4.6 Normiertes Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich vertikal

4.3.1.1 Geschwindigkeits- und Druckverteilung vertikal durch die Drossel

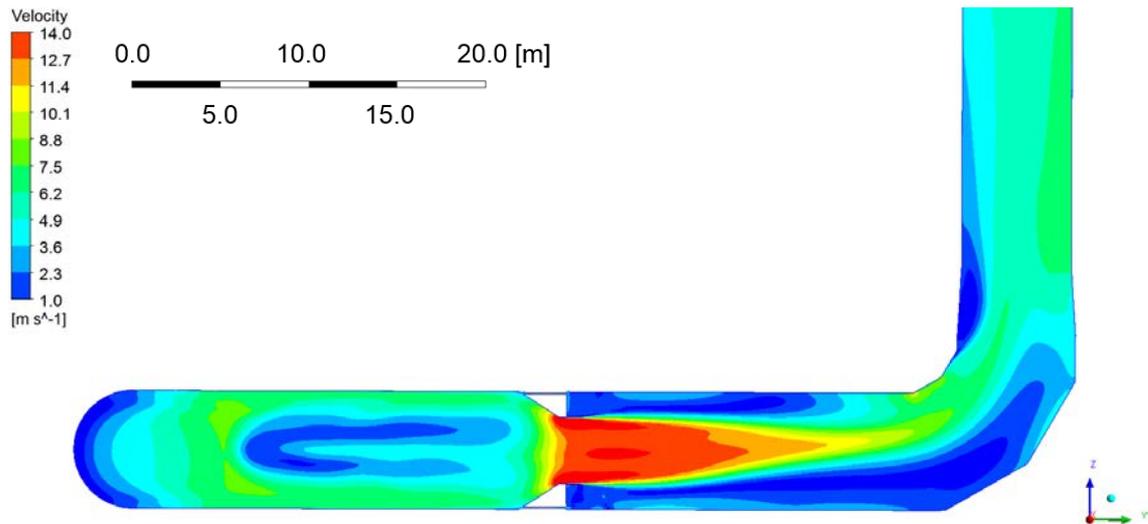


Abbildung 4.7 Isolinien der Geschwindigkeitsverteilung vertikal, Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab

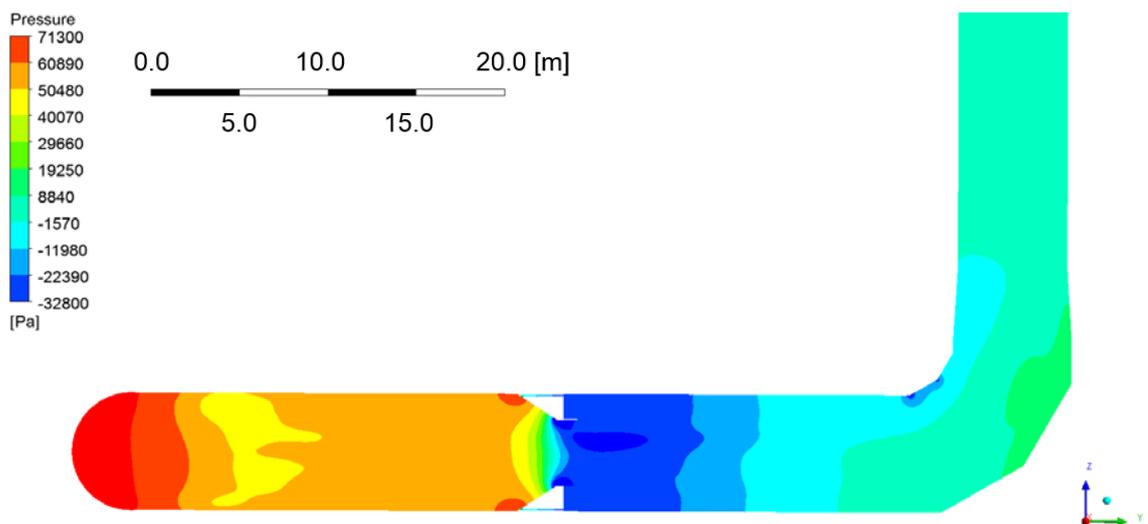


Abbildung 4.8 Isolinien der Druckverteilung vertikal, Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab

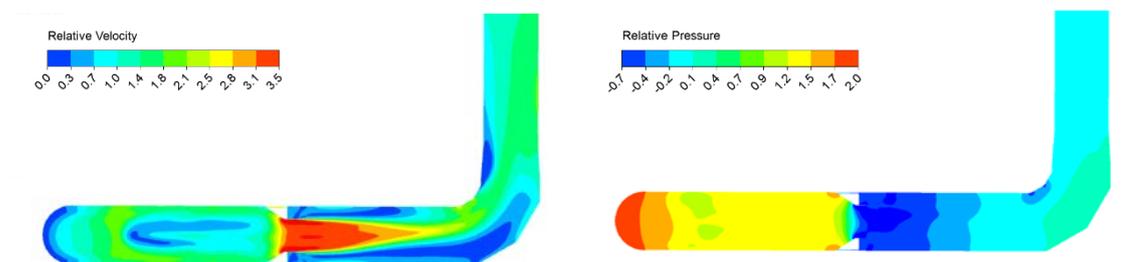


Abbildung 4.9 Relative Geschwindigkeits- und Druckverteilung vert., Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab

4.3.1.2 Geschwindigkeits- und Druckverteilung horizontal durch die Drossel

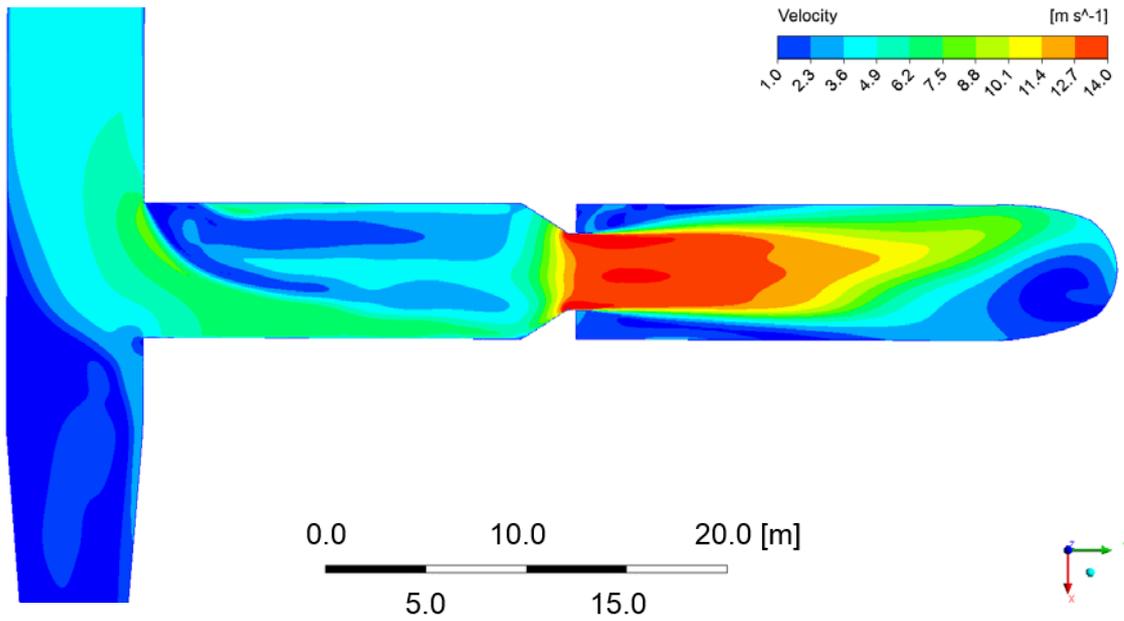


Abbildung 4.10 Isolinien der Geschwindigkeitsverteilung horizontal, Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab

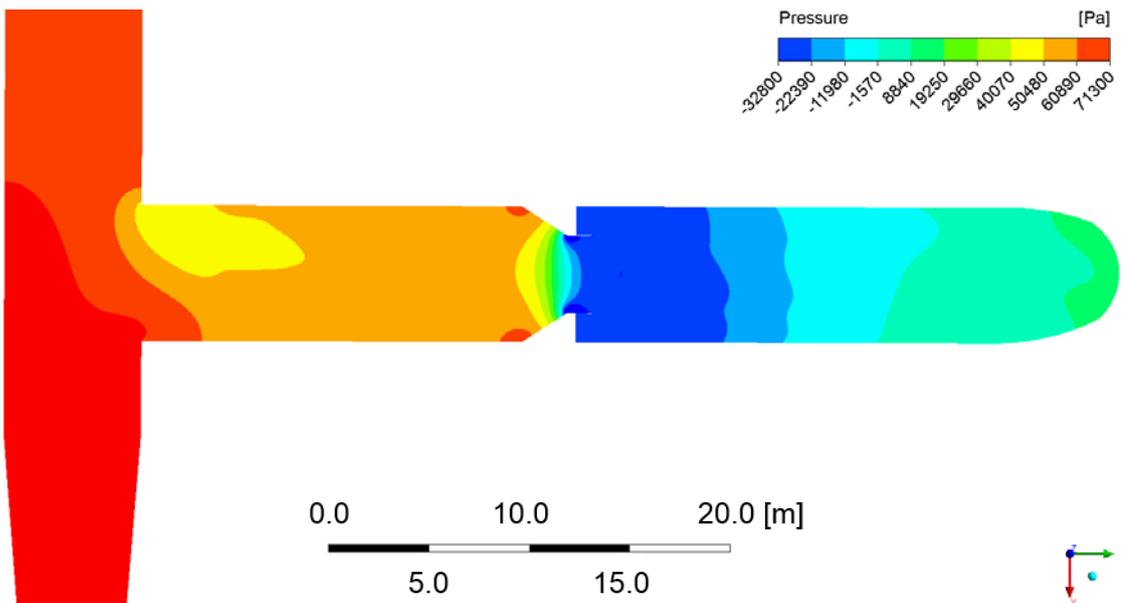


Abbildung 4.11 Isolinien der Druckverteilung horizontal, Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab

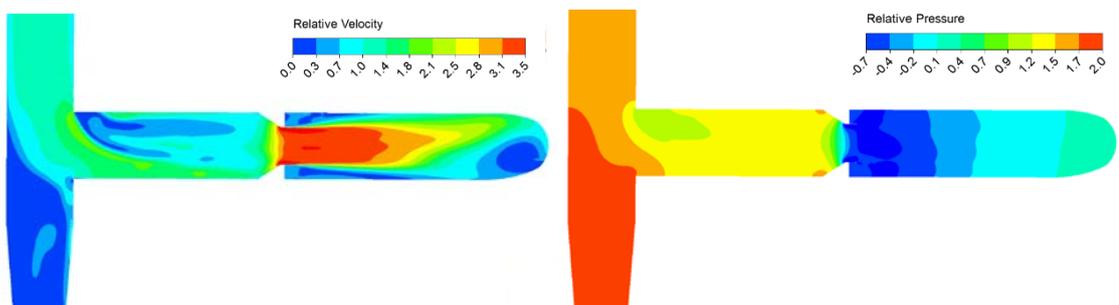


Abbildung 4.12 Relative Geschwindigkeits- und Druckverteilung hor., Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab

4.3.1.3 Geschwindigkeits- und Druckverteilung an den Messquerschnitten

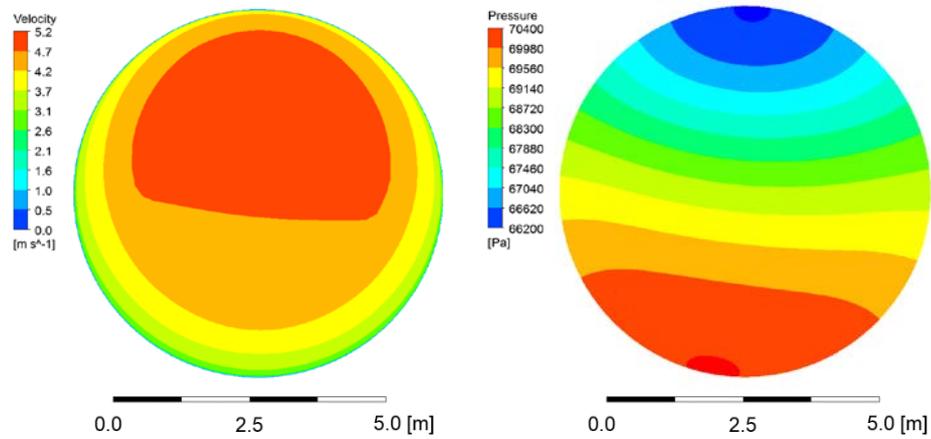


Abbildung 4.13 Links Geschwindigkeitsverteilung, rechts Druckverteilung am Einlaufquerschnitt

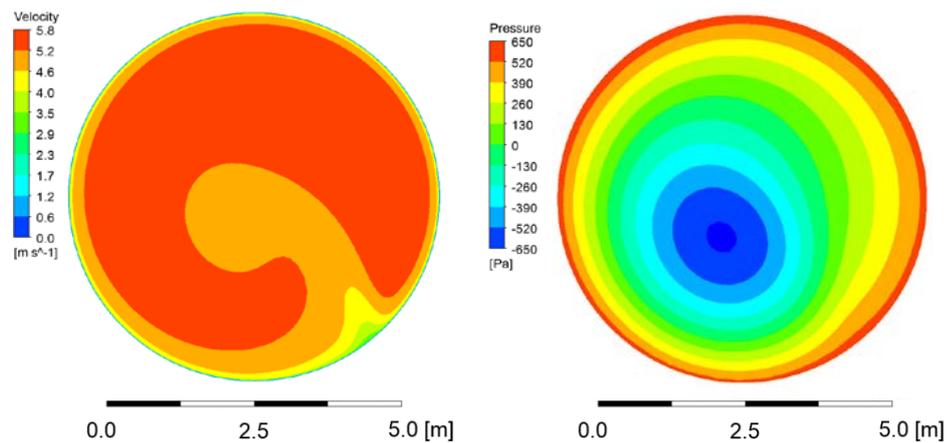


Abbildung 4.14 Links Geschwindigkeitsverteilung, rechts Druckverteilung am Auslaufquerschnitt

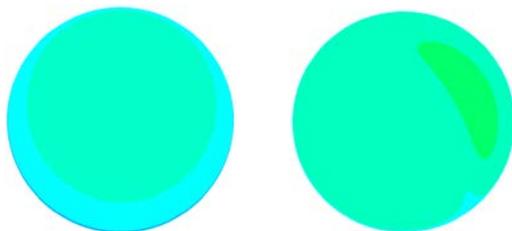
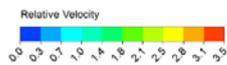


Abbildung 4.15 Relative Geschwindigkeitsverteilung, l. am Einlauf, rechts am Auslauf

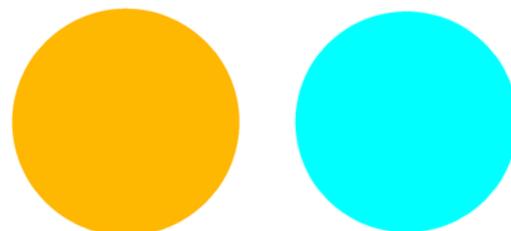
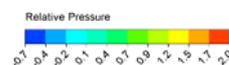


Abbildung 4.16 Relative Druckverteilung, links am Einlauf, rechts am Auslauf

Der Druckverlust zwischen Einlauf und Auslauf entsteht durch die Energiedissipation im untersuchten System. Die Geschwindigkeits- und Druckverläufe am Einlauf und am Auslauf geben Hinweis, dass die Energieausgleichswerte in der Bernoulli'schen Energiegleichung für die Geschwindigkeits- und Druckhöhe nach Bollrich zu berechnen sind (Bollrich 2007). Dies wird auf Grund der – im Verhältnis zu den üblichen Unsicherheiten im Wasserbau – geringen Abweichungen des Verlustbeiwertes zum physikalischen Modellversuch (siehe Kapitel 4.4.1) in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

4.3.1.4 Energiehöhenverlauf entlang der Rohrachse

Der Geschwindigkeits- und der Druckhöhenverlauf werden entlang der Rohrachse in Strömungsrichtung angegeben. Bei einem Anstieg der Geschwindigkeitshöhe, bedingt durch die Drossel, fällt gleichzeitig die Druckhöhe. Die Sprünge in der Geschwindigkeitslinie sind durch das Abdriften des Massestroms aus der Rohrmitte zu erklären.

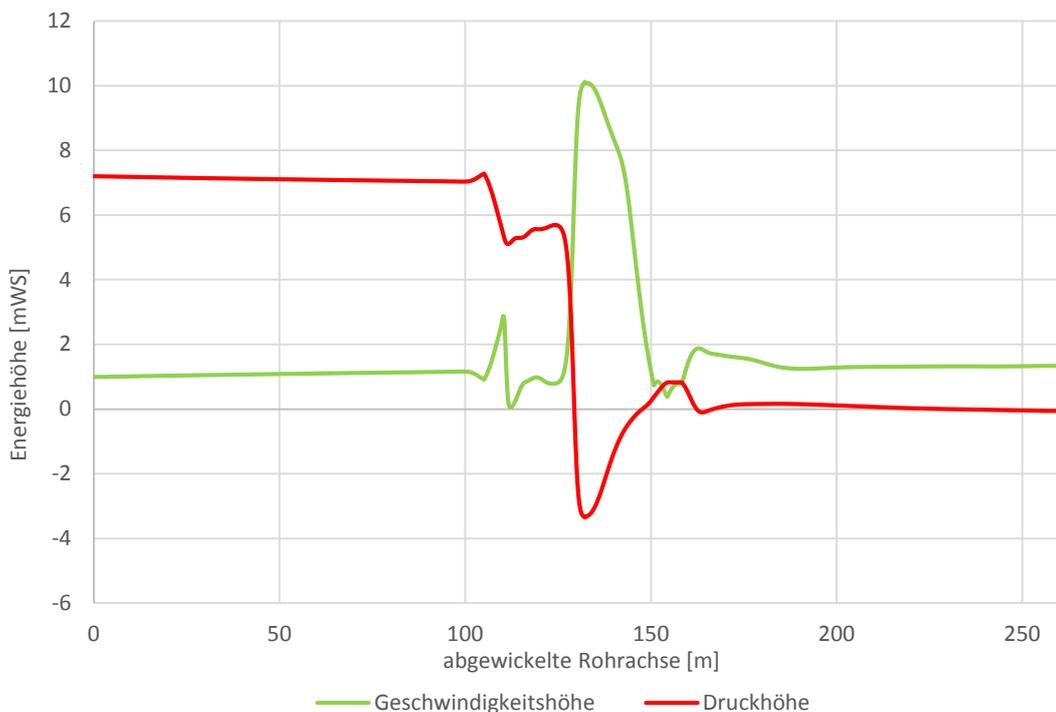


Abbildung 4.17 Druck- und Geschwindigkeitshöhen entlang der Rohrachse, Aufschwüngen Q_A , Aufschwüngen Q_A 160 [m³/s] im Naturmaßstab

4.3.2 Abschwüngen

Beim Abschwüngen fließt das Wasser dem vertikal Schacht entlang und wird durch den 90°-Segmentbogen um gelenkt, dadurch wird die Drossel einseitig angeströmt. Durch

die abrupte Querschnittsverengung der Drossel wird das Wasser beschleunigt und stößt in das langsamere Wasser nach der Drossel. Dort entsteht die für die Energiedissipation maßgebliche Rückstromzone, die im Vergleich zum Aufschwingen in Richtung der Strömung eine längere Ausdehnung besitzt. Durch den scharfkantigen Einstand und der abrupten Querschnittsverengung der Drossel wird durch die größere Ablösezone die Strömung stärker konzentriert als im Lastfall des Aufschwingens. Durch die exzentrische Anströmung des Druckstollens im T-Stück wird eine Rotationsströmung ausgelöst, die in den Vermuntstollen reicht (aber mit verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten) sowie im Silvretta Stollen bis zum Auslass anhält.

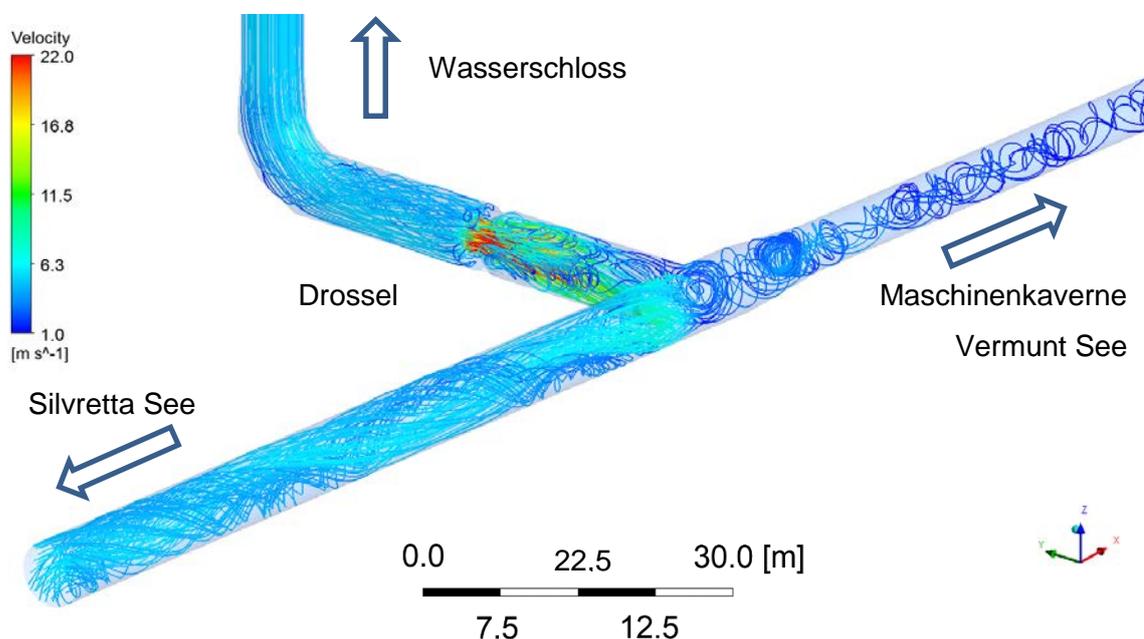


Abbildung 4.18 Stromliniendarstellung, Aufschwingen Q_A 160 [m³/s] im Naturmaßstab

Die Abbildung 4.19 und die Abbildung 4.20 zeigen die Geschwindigkeitsvektoren der Strömung im unmittelbaren Drosselbereich (Länge der Vektoren gleich dem Betrag der Geschwindigkeit). Die Abbildung 4.21 und Abbildung 4.22 zeigen die normierten Geschwindigkeitsvektoren. Besonders im Horizontalschnitt ist die deutlich Längenausdehnung der Rückstromzonen zuerkennen. Das Kapitel 4.3.2.1 zeigt zum Lastfall des Abschwingens mit der Ausbaumwassermenge Q_A die Druck- und Geschwindigkeitsverteilung am Vertikalschnitt durch die Drossel und das Kapitel 4.3.2.2 den Horizontalschnitt.

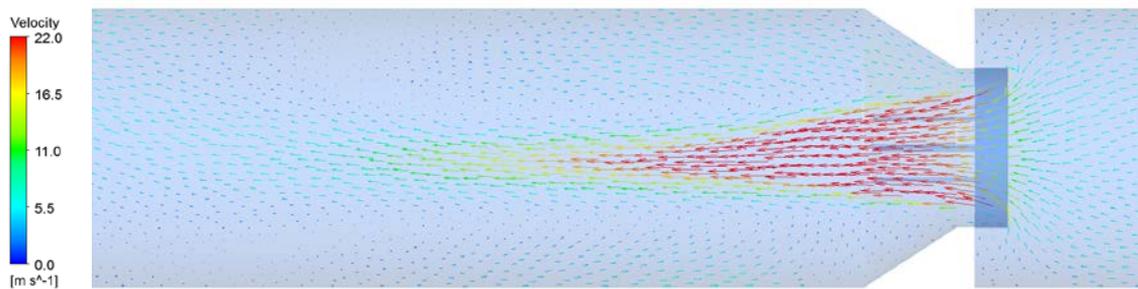


Abbildung 4.19 Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich horiz., Abschwingen Q_A im Naturmaßstab

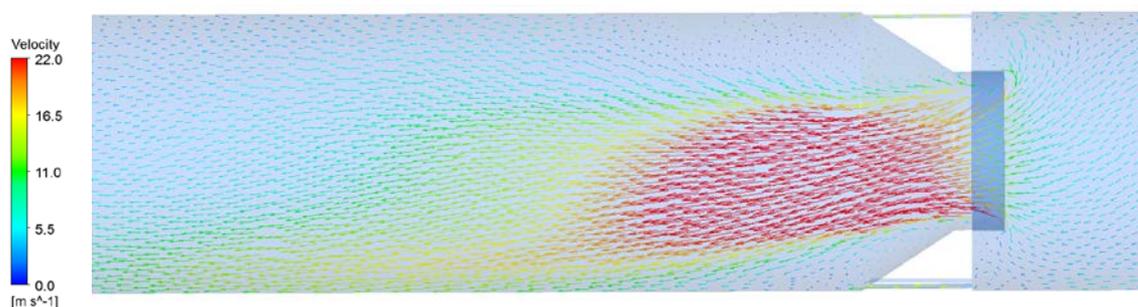


Abbildung 4.20 Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich vertikal, Abschwingen Q_A im Naturmaßstab

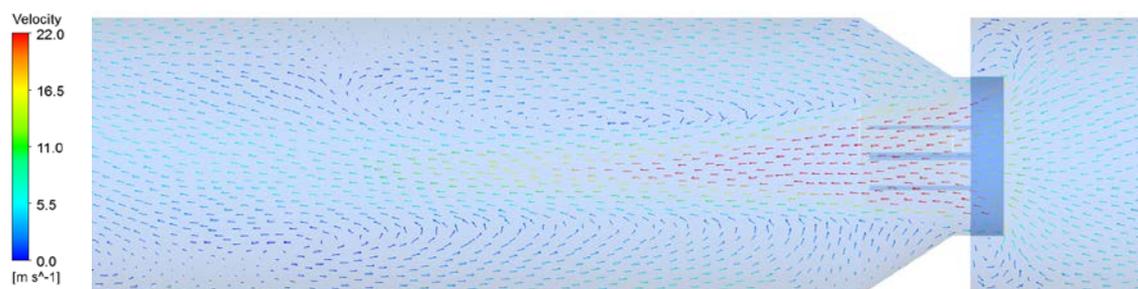


Abbildung 4.21 Normiertes Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich horizontal

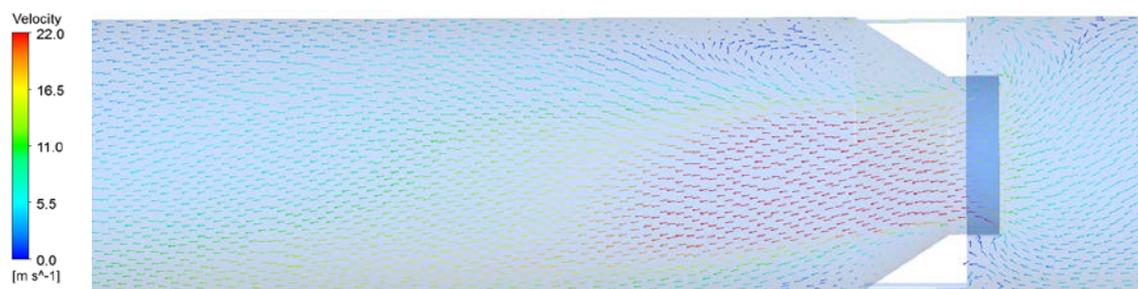


Abbildung 4.22 Normiertes Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich vertikal

4.3.2.1 Geschwindigkeits- und Druckverteilung vertikal durch die Drossel

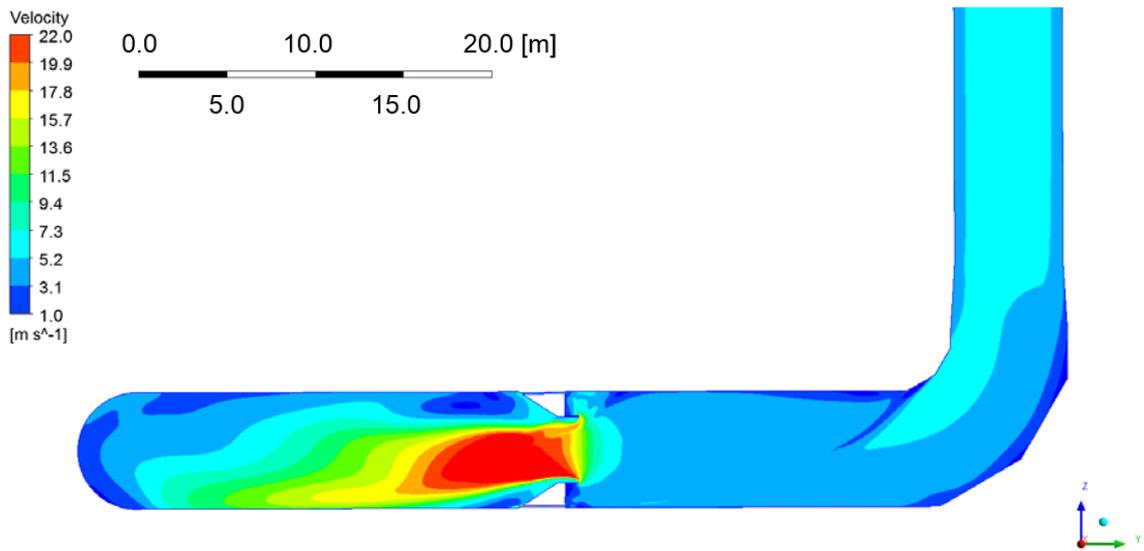


Abbildung 4.23 Isolinien der Geschwindigkeitsverteilung vertikal, Abschwingen QA im Naturmaßstab

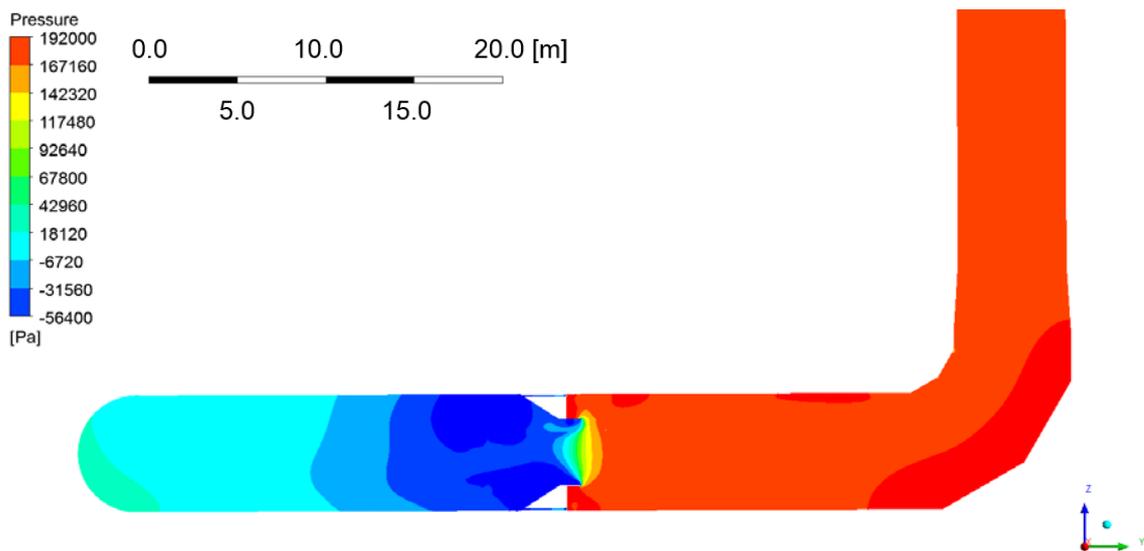


Abbildung 4.24 Isolinien der Druckverteilung vertikal, Abschwingen QA im Naturmaßstab

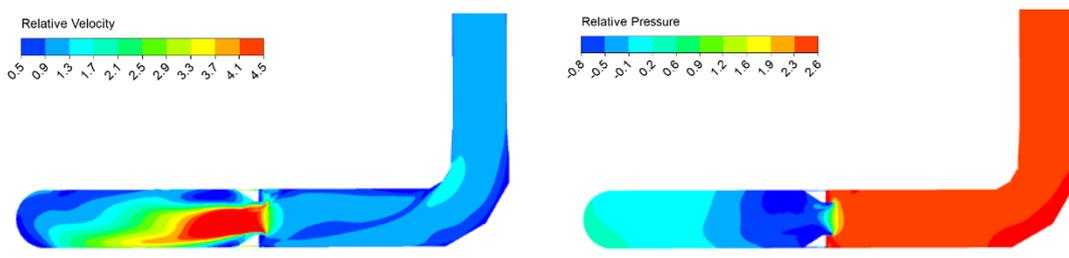


Abbildung 4.25 Relative Geschwindigkeits- und Druckverteilung vert., Abschwingen QA im Naturmaßstab

4.3.2.2 Geschwindigkeits- und Druckverteilung horizontal durch die Drossel

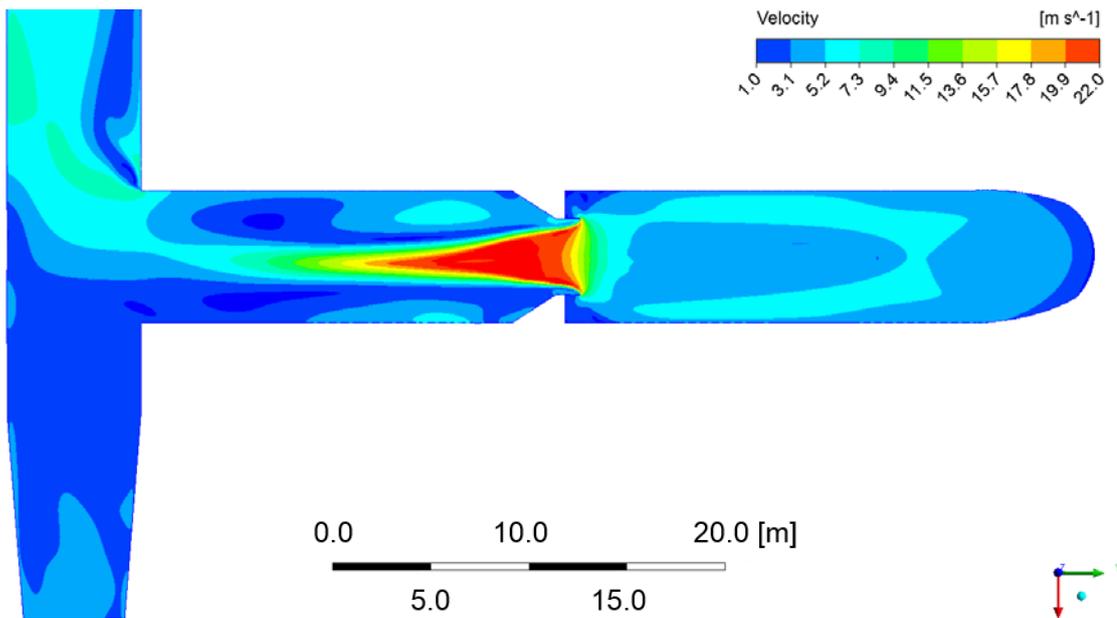


Abbildung 4.26 Isolinien der Geschwindigkeitsverteilung horizontal, Abschwigen QA im Naturmaßstab

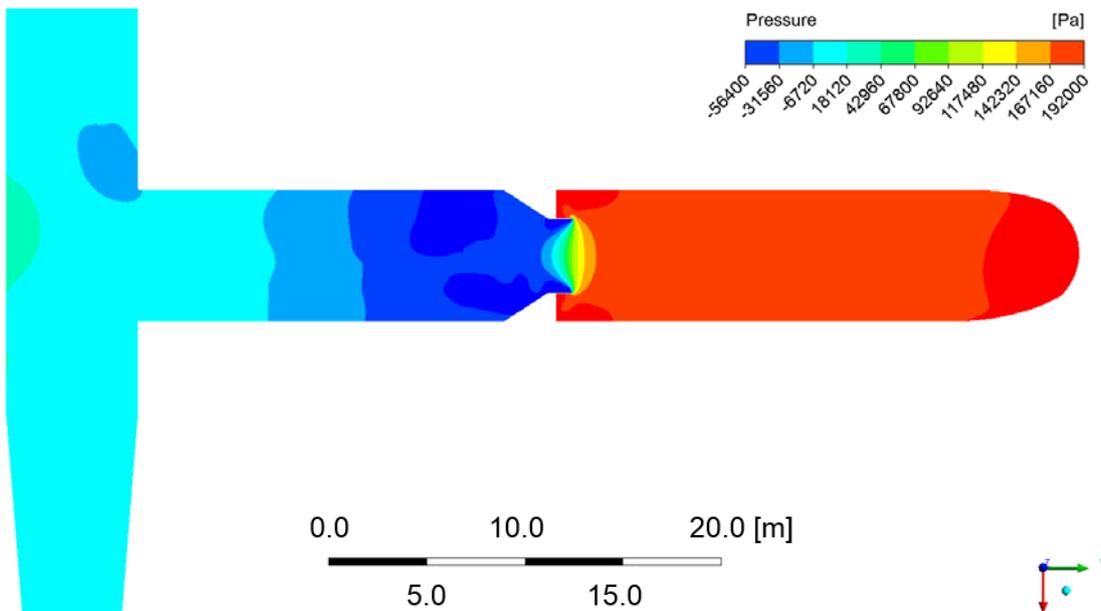


Abbildung 4.27 Isolinien der Druckverteilung horizontal, Abschwigen QA im Naturmaßstab

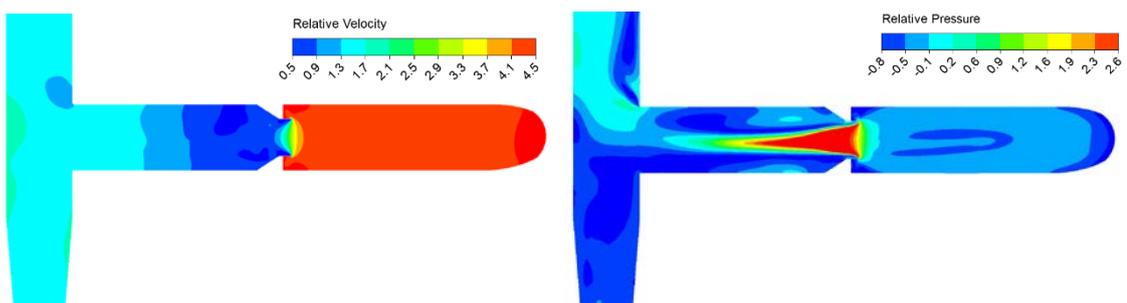


Abbildung 4.28 Relative Geschwindigkeits- und Druckverteilung hor., Abschwigen QA im Naturmaßstab

4.3.2.3 Geschwindigkeits- und Druckverteilung an den Messquerschnitten

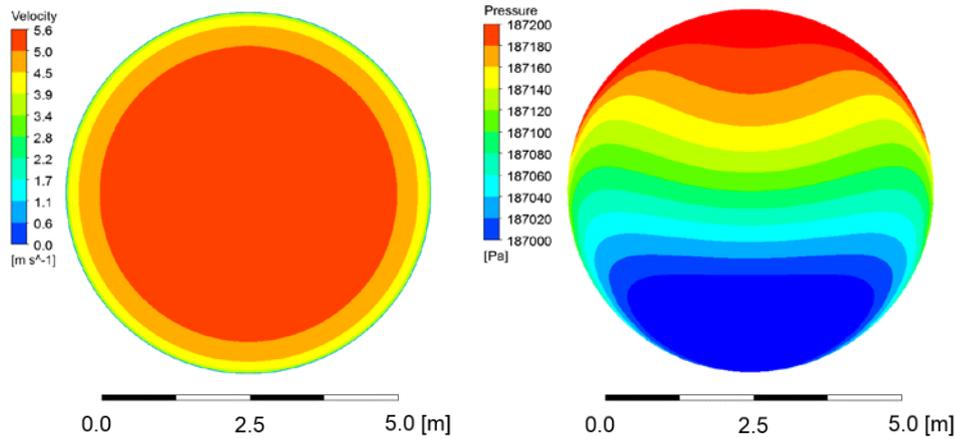


Abbildung 4.29 Links Geschwindigkeitsverteilung, rechts Druckverteilung am Einlaufquerschnitt

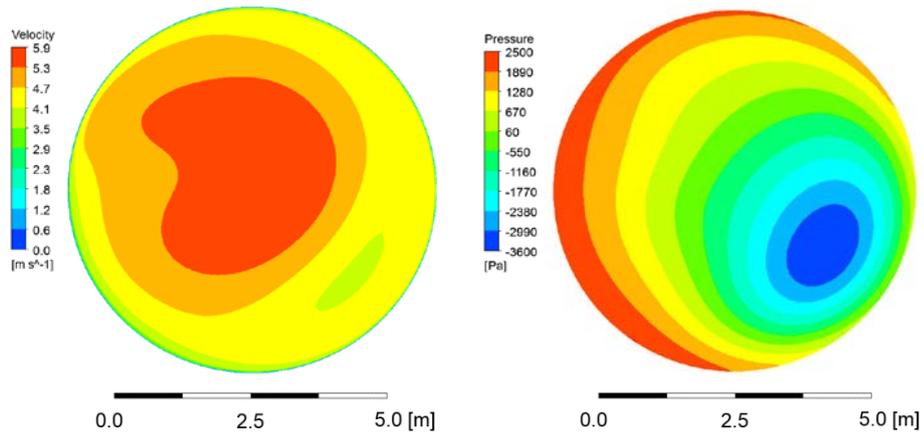


Abbildung 4.30 Links Geschwindigkeitsverteilung, rechts Druckverteilung am Auslaufquerschnitt

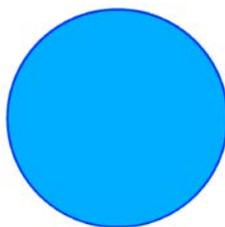
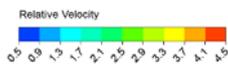


Abbildung 4.31 Relative Geschwindigkeitsverteilung, l. am Einlauf, rechts am Auslauf

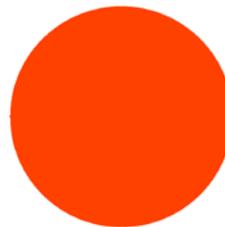
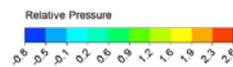


Abbildung 4.32 Relative Druckverteilung, links am Einlauf, rechts am Auslauf

Durch die höheren Verluste des Abschwingvorganges ist der Unterschied des Drucks zwischen Einlauf und Auslauf größer als beim Aufschwingen. Die Geschwindigkeitsprofile für den Ein- und Auslauf sind beim Abschwingen (im Verhältnis zum Aufschwingen) gleich. Daher wird hier eine Berechnung der Energieausgleichswerte für die Bernoulli'schen Energiegleichung nicht für notwendig erachtet.

4.3.2.4 Energiehöhenverlauf entlang der Rohrachse

Der Geschwindigkeits- und der Druckhöhenverlauf entlang der Rohrachse in Strömungsrichtung sind in der Abbildung 4.33 ersichtlich. Der höhere Verlustbeiwert des Abschwingens (als beim Aufschwingen) zeigt sich in dem höheren Druckunterschied zwischen Ein- und Auslauf. Bei einem Anstieg der Geschwindigkeitshöhe (im Drosselbereich) fällt gleichzeitig die Druckhöhe.

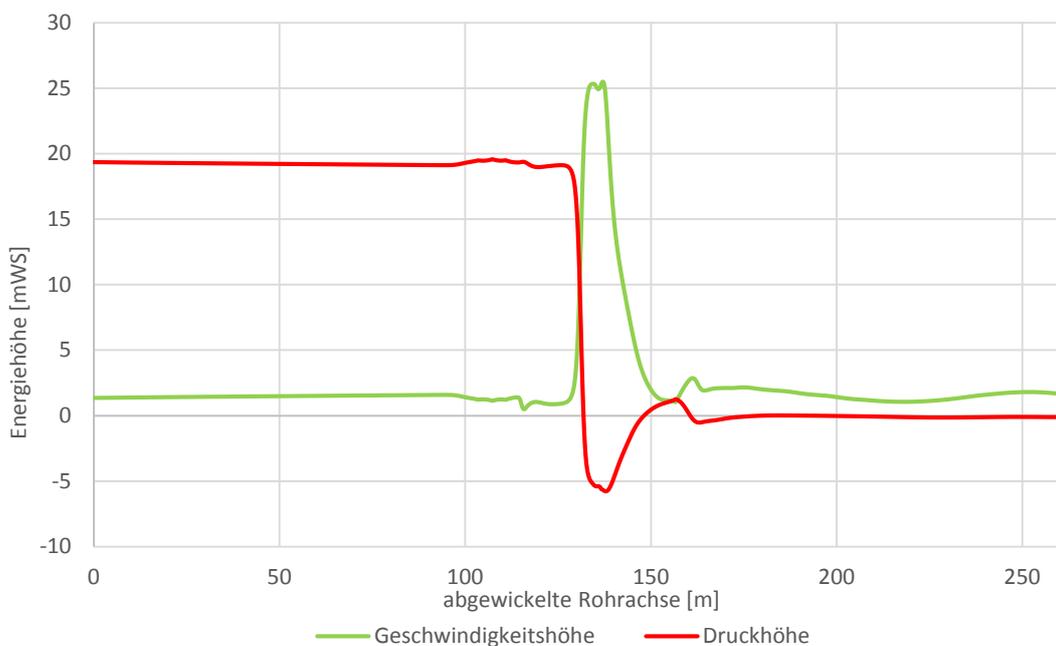


Abbildung 4.33 Druck- und Geschwindigkeitshöhen entlang der Rohrachse, Abschwingen Q_A 160 [m³/s] im Naturmaßstab

4.4 Vergleiche

Einerseits werden die zuvor bestimmten Verlustbeiwerte in den Lastfällen ohne Reibung mit den Ergebnissen aus dem physikalischen Modellversuch verglichen, andererseits werden die Ergebnisse aus den unterschiedlichen Lastfällen miteinander verglichen mit um den Einfluss des Modellmaßstabes, der Sandraugigkeit und des Durchflusses zu beurteilen.

4.4.1 Vergleiche zum physikalischen Modellversuch

Nachfolgend werden Verlustbeiwerte (ohne Wandreibung) mit den entsprechenden Ergebnissen aus dem physikalischen Modellversuch verglichen. Insgesamt weichen die Verlustbeiwerte aus der numerischen Simulation nur im einstelligen Prozentbereich ab. Dabei besitzen die Verlustbeiwerte für das Abschwängen eine höhere Abweichung als für das Aufschwängen. Der Werte für das Aufschwängen liegen mit einer Abweichung von 3 % im Naturmaßstab über, im Modellmaßstab 1:15 mit 0 % exakt bei und mit -1 % im Maßstab 1:30 unter dem Verlustbeiwert aus dem physikalischen Modellversuch. Beim Abschwängen weichen alle Verlustbeiwerte auf die untere Seite ab, somit werden sie geringer als im physikalischen Modellversuch abgeschätzt. Für den Naturmaßstab um -8,6 %, für den Modellmaßstab 1:15 um -5,3 % und für den Maßstab 1:30 um -8 %.

Tabelle 4.4 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) zum physikalischen Modellversuch

Maßstab	Durchfluss	Aufschwängen	Abschwängen
[-]	$[m^3/s]$	[%]	[%]
1:1	7,00	2,93	-8,61
1:15	0,47	0,08	-5,29
1:30	0,23	-0,92	-7,95

Die auf die Ausbauwassermenge (Q_A) mit $160 m^3/s$ bezogene Differenz in der Verlusthöhe (h_v) sind in Tabelle 4.5 dargestellt. Die Bezugsverlusthöhe für diesen Lastfall (mit den Verlustbeiwerten aus dem physikalischen Modellversuch) ergibt sich nach Gleichung 2-14 für das Aufschwängen mit 6,39 m und für das Abschwängen mit 17,4 m.

Tabelle 4.5 Abweichung der Verlusthöhe (h_v) mit Q_A 160 [m³/s]

Maßstab	Aufschwingen	Abschwingen
[-]	[m]	[m]
1:1	0,19	-1,5
1:15	0,00	-0,92
1:30	-0,06	-1,38

4.4.2 Vergleiche der Verlustbeiwerte aus der numerischen Simulation

Die Ergebnisse des Verlustbeiwertes aus der numerischen Simulation werden hinsichtlich der Einflussfaktoren untersucht. Die betrachteten Faktoren sind der Maßstab, der Durchfluss und die Sandraugigkeit. Dabei werden die einzelnen Verlustbeiwerte auf das arithmetische Mittel aller entsprechenden Werte bezogen und die relative Abweichung (f_i) in Prozent angegeben.

$$f_i = 100 \cdot \left(\frac{\zeta_i \cdot n}{\sum_{j=1}^n \zeta_j} - 1 \right) [\%] \quad 4-3$$

4.4.2.1 Einfluss des Maßstabes

Die Werte aus den Simulationen mit den gleichen Durchflüssen und Rauigkeiten zu den unterschiedlichen Modellmaßstäben werden herangezogen, um den Einfluss des Maßstabes zu bestimmen. Im Fall des Aufschwingens erhöht sich der Verlustbeiwert bei Verringerung des Maßstabes. Beim Abschwingen sind keine Tendenzen zu erkennen.

Tabelle 4.6 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) in Abhängigkeit vom Maßstab

Maßstab	Durchfluss	Sandraugigkeit	Aufschwingen	Abschwingen
[-]	[m ³ /s]	[mm]	[%]	[%]
1:1	7,00	0,00	-3,66	-3,63
1:15	7,00	0,00	3,08	6,42
1:30	7,00	0,00	6,36	-4,72

4.4.2.2 Einfluss des Durchflusses

Hier werden die Abweichungen der Verlustbeiwerte gleicher Rauigkeiten über alle Durchflüsse und Modellmaßstäbe verglichen. Durch eine Durchflusserhöhung steigt der Verlustbeiwert bedingt durch die höhere Reynold'zahl im Fall des Aufschwingens bei alle Maßstäben und beim Abschwngen nur im Naturmaßstab.

Tabelle 4.7 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) in Abhängigkeit vom Durchfluss im Maßstab 1:1

Durchfluss	Sandrauigkeit	Aufschwingen	Abschwngen
[m ³ /s]	[mm]	[%]	[%]
7,00	0,20	-6,27	-1,44
160	0,20	0,45	2,09

Tabelle 4.8 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) in Abhängigkeit vom Durchfluss im Maßstab 1:15

Durchfluss	Sandrauigkeit	Aufschwingen	Abschwngen
[m ³ /s]	[mm]	[%]	[%]
0,47	0,10	0,29	8,83
10,67	0,10	4,01	0,05

Tabelle 4.9 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) in Abhängigkeit vom Durchfluss im Maßstab 1:30

Durchfluss	Sandrauigkeit	Aufschwingen	Abschwngen
[m ³ /s]	[mm]	[%]	[%]
0,23	0,05	-2,14	-0,60
5,33	0,05	3,48	-2,56

4.4.2.3 Einfluss der Sandrauigkeit

Zur Bestimmung des Einflusses der Sandrauigkeit werden alle Verlustbeiwerte aus den Lastfällen mit gleichen Durchfluss in allen Modellmaßstäben verwendet. Nur im Aufschwinglastfall bei einem Maßstab von 1:15 und 1:30 steigt mit der Sandrauigkeit der Verlustbeiwert.

Tabelle 4.10 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) in Abhängigkeit von der Rauigkeit im Maßstab 1:1

Durchfluss	Sandrauigkeit	Aufschwingen	Abschwingen
[m ³ /s]	[mm]	[%]	[%]
7,00	0,00	2,45	-1,64
7,00	0,10	-4,37	4,00
7,00	0,20	-3,80	-1,84

Tabelle 4.11 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) in Abhängigkeit von der Rauigkeit im Maßstab 1:15

Durchfluss	Sandrauigkeit	Aufschwingen	Abschwingen
[m ³ /s]	[mm]	[%]	[%]
0,47	0,00	-0,38	1,93
0,47	0,05	1,01	-5,69
0,47	0,10	2,93	8,40

Tabelle 4.12 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) in Abhängigkeit von der Rauigkeit im Maßstab 1:30

Durchfluss	Sandrauigkeit	Aufschwingen	Abschwingen
[m ³ /s]	[mm]	[%]	[%]
0,23	0,00	-1,38	-0,93
0,23	0,05	0,45	-1,00
0,23	0,10	3,09	-3,24

5. Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung der Untersuchung

Zur Bestimmung des Verlustbeiwertes der Drossel im Wasserschlosses Krespa wird eine dreidimensionale Strömungsuntersuchung durchgeführt. Dafür werden die hydraulischen und wasserbaulichen Grundlagen für Druckleitungen in Hochdruckwasserkraftanlagen insbesondere für Drosseln ausgearbeitet. Des Weiteren wird ein Überblick der Theorie zur numerischen Strömungssimulationen gegeben. Nach der Festlegung der zu implementierenden Prozesse (Modellannahmen siehe Kapitel 5.2) folgt die Eingabe der Geometrie, die Netzerstellung, die Eingabe der Randbedingungen, die Definition der Lösungsschemen und Konvergenz- sowie Abbruchkriterien. Für Konvergenzprobleme wird eine Vorgangsweise ausgearbeitet, dass im ersten Schritt numerische Fehler minimiert und danach physikalische. Dafür wird mithilfe eines strukturierten Netzes die Netzqualität verbessert, der Zeitschritt verkleinert und schließlich von einer stationären auf eine transiente Untersuchung umgestiegen. Untersucht werden die Lastfälle des Aufschwingens und des Abschwingens mit einem Durchfluss der einer mittleren Reynolds'zahl von 10^6 entspricht sowie mit der Ausbauwassermenge $160 \text{ m}^3/\text{s}$. Für die Ermittlung des Verlustbeiwert wird ohne Wandreibung (Wandrandbedingung glatte Wand) simuliert. Mit Hilfe des Reynold'schen Modellgesetz werden der Naturmaßstab sowie die Modellmaßstäbe 1:15 und 1:30 untersucht. Auch werden Simulationen mit verschiedenen Sandrauhigkeiten durchgeführt. Dach der dreidimensionalen numerischen Simulationen werden die Ergebnisse ausgelesen und mit den Ergebnissen des physikalischen Modellversuchs verglichen. Weiters werden die Ergebnisse in Hinblick auf die Einflussfaktoren Modellmaßstab, Sandrauhigkeit und Durchfluss untersucht.

5.2 Modellannahmen

Für die numerische Untersuchung zur Bestimmung des Verlustbeiwertes (ζ) der lokalen Verluste einer Drossel und ihrer Anschlussgeometrie an den Druckstollen bzw. Steigschacht werden nachstehende Annahmen getroffen:

- Der Einfluss der Erdbeschleunigung wird aufgrund des Verhältnisses zwischen Schwerkraften und viskosen Kräften vernachlässigt.
- Die Eigenschaften von Wasser (insbesondere Dichte und Viskosität) werden als konstant angenommen. Als Fluid wird ein isothermes, inkompressibles Einphasen-Kontinuum angenommen.

- Das komplette System ist vollständig mit Wasser gefüllt. Teilfüllung, Lufteintrag oder Sedimenttransport werden nicht untersucht.
- Die Randbedingungen sind stationär, nach anhaltenden Konvergenzproblemen für die stationäre Untersuchung, bedingt durch innere instationäre Strömungen, wird transient simuliert.
- Als Ähnlichkeitsgesetz für die unterschiedlichen Modellmaßstäbe wird das Reynold'sche Modellgesetz verwendet.
- Die Strömung ist vollturbulent und die turbulente Grenzschicht wird durch das universelle Wandgesetz beschrieben. Das Strömungsgebiet wird durch die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben. Das Schließungsproblem der RANS-Gleichung wird durch das Turbulenzmodell gelöst. Als Turbulenzmodell werden das k - ϵ -Modell für Initial- und Referenzsimulationen und das SST-Modell für alle Endsimulationen verwendet.
- Die Verlusthöhe wird aus der erweiterten Bernoulli'sche Energiegleichung ermittelt. Die Energiehöhenausgleichswerte für die Geschwindigkeitshöhe und Druckhöhe werden zu eins gesetzt. Der Verlustbeiwert (ζ) bezieht sich auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Drosselquerschnitt.

5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt weisen die Ergebnisse aus der numerischen Simulation eine Abweichung zum physikalischen Modellversuch von maximal 8,61 % auf. Dabei ist zwischen Aufschwingen – hier ist die maximale Abweichung bei 2,93 % – und Abschwingen (-8,61 %) zu unterscheiden. Der Verlustbeiwert im Fall des Aufschwingens steigt – bis auf eine Ausnahme – bei einem Anstieg der Sandrauigkeit (siehe Kapitel 4.4.2.3) und des Durchflusses (siehe Kapitel 4.4.2.2). Für den Lastfall des Abschwingens gilt dies nur für den Durchfluss. Der Einfluss des Maßstabes (siehe Kapitel 4.4.2.1) zeigt für das Aufschwingen bei kleiner werdenden Längenmaßstäben eine Steigerung des Verlustbeiwertes. Auch hier können für das Abschwingen keine Schlüsse gezogen werden. Betrachtet man die Strömungsbilder dieser beiden Strömungszustände (siehe Kapitel 4.3) kann das Abschwingen als der komplexere angesehen werden. Die möglichen Ursachen für die Abweichung der Ergebnisse aus der numerischen Simulation vom physikalischen Modellversuch werden nachstehend gezeigt.

Der max. Unterschied in der Verlusthöhe zwischen physikalischer und numerischer Untersuchung liegt bei 0,19 m im Lastfall Aufschwingen und im Abschwinglastfall bei 1,5 m, beide für die Ausbauwassermenge 160 m³/s. Die Bezugsverlusthöhe (mit den Verlustbeiwerten aus dem physikalischen Modellversuch) beträgt für das Aufschwingen 6,39 m und für das Abschwingen mit 17,4 m. Die Untersuchungen zeigen auch, dass für die Bestimmung eines Verlustbeiwerts dreidimensionale, numerische Strömungssimulationen anhand eines verkleinerten Modells (1:15) zweckmäßig sind.

5.4 Beurteilung

Die Abweichungen in den geringen Prozentbereichen können in Hinblick der üblichen Unsicherheiten im konstruktiven Wasserbau als hinreichend genau angesehen werden. Die höheren Abweichungen, der in dieser Arbeit bestimmten Verlustbeiwerte, von den Werten aus dem physikalischen Modellversuch sind durchwegs negative, sie werden somit geringer abgeschätzt. Dies bedeutet, dass die Massenschwingung zwischen Wasserschloss und Speicher schwächer gedämpft wird. Daher sind die Verlustbeiwerte aus dieser Arbeit, hinsichtlich ihrer Unsicherheit, auf der sicheren Seite. Durch die schwächere Dämpfung wird die Volumenforderung an das Wasserschloss größer. Aufgrund der unterschiedlichen Modellierung für numerische und physikalische Untersuchungen ist mit Unterschieden im Prozentbereich zu rechnen. Auch für den Prototyp selbst ist aufgrund Imperfektionen mit Abweichungen zu rechnen. Daher sind stets adäquate Sicherheitsannahmen zu treffen.

Wird jedoch eine höhere Genauigkeit gefordert sind folgende Punkte zu klären.

- Die Festlegung der Energiehöhenausgleichswerte auf 1 für gleichbleibende Querschnitte der Messstellen setzt eine gleichbleibende Geschwindigkeits- und Druckverteilung voraus. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Annahme nicht zutrifft und sie nach Bollrich für eine höhere Genauigkeit zu bestimmen sind (Bollrich 2007).
- Ein Schwachpunkt der Wirbelviskositätsturbulenzmodelle (somit $k-\epsilon$ -, $k-\omega$ - und SST-Modell) sind starke Rotationsströmungen. Bessere Ergebnisse liefern die rechenintensiveren Reynoldsspannungsturbulenzmodelle, die für das Schließungsproblem sechs weitere Gleichungen lösen (ANSYS 2013).

- Die Dauer der transienten Untersuchungen ist mit 100 Zeitschritten festgelegt. Teilweise reicht dies nicht aus den vollen Einpendelvorgang abzudecken. Die Unsicherheit wird in Bezug auf die Verlusthöhe aber als gering erachtet. Eine Festlegung der simulierten Zeit durch den Verlauf des Ausgabewertes ist ein mögliches Abbruchkriterium um die Genauigkeit zu erhöhen (siehe Kapitel 4.1).

Da auch die Bestimmung des Verlustbeiwertes durch den physikalischen Modellversuch ein gewisses Maß an Unsicherheiten mit sich bringt, ist eine Überprüfung beider Ansätze durch eine Naturmessung sinnvoll.

5.5 Ausblick

Aufgrund der Vorteile in Bezug auf die Variantenstudie und der damit verbundenen Dichte an Daten, kann die dreidimensionale numerische Simulation zur Lösung von lokalen Fragestellungen als sinnvolle Ergänzung gesehen werden. Eine dreidimensionale Simulation einer kompletten Hochdruckwasserkraftanlage ist bedingt durch den hohen Rechenaufwand derzeit nicht sinnvoll. Berechnungen von Gesamtanlagen werden auch weiterhin durch eindimensionale Simulationen untersucht werden, jedoch kann die Ergänzung von Randbedingungen mit Parametern aus der dreidimensionalen Untersuchung für höhere Genauigkeit sorgen und sind bei Prototypen wie Drosseln auch nötig.

Weiterführende Untersuchungen bezüglich Energiehöhenausgleichswerte, Reynoldsspannungsturbulenzmodelle und längeren transienten Untersuchungen wären sinnvoll. Ein Zwischenschritt dafür wäre das Verwenden eines auf ω -basierende Reynoldsspannungsturbulenzmodells. Um den Einfluss der Wandreibung genauer zu verifizieren, wären Untersuchungen mit weiteren Sandraugigkeiten in kleineren Abstufungen notwendig.

5.6 Fazit

Die Drossel des Wasserschloss Krespa hat sich aufgrund der vorhandenen Messungen im physikalischen Modellversuch als ideales Studienobjekt gezeigt. Die Vorteile einer numerischen Strömungsuntersuchung gegenüber des physikalischen Modellversuches haben sich als vergleichsweise unproblematische Variationsmöglichkeiten in dieser Arbeit gezeigt. So kann eine Adaption der Geometrie oder das Verwenden unterschiedlicher Materialien relativ einfach umgesetzt werden. Im physikalischen Modellversuch würde diese Variantenstudie einen erheblichen Modellbauaufwand bedeuten. Allerdings ist nach wie vor eine physikalische Überprüfung des Verlustbeiwertes einer ausgewählten Drosselgeometrie zweckmäßig.

Im physikalischen Modellversuch wird zur Bestimmung des Verlustbeiwertes die Wandreibung mit Hilfe eines zu bestimmenden Rohrreibungsbeiwertes vom gemessenen Gesamtverlust abgezogen, dies birgt jedoch Unsicherheiten. Die wesentlichen Vorteile von dreidimensionalen numerischen Untersuchungen bestehen in der Bestimmung des Verlustbeiwertes ohne Wandreibung (Wandrandbedingung glatte Wand), sowie in der Durchführung umfangreicher Variantenstudien.

Literatur

ANSYS. *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide*. Canonsburg, 2013.

ANSYS. „ANSYS CFX-Solver Theory Guide.“ Canonsburg, 2009.

Bollrich, Gerhard. *Technische Hydromechanik*. 6. Berlin Wien: Beuth Verlag, 2007.

Franke, Paul-Gerhard. *Hydraulik für Bauingenieure*. Berlin: de Gruyter, 1974.

Fröhlich, Jochen. *Large Eddy Simulation turbulenter Strömungen*. 1. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2006.

Gabl, Roman. *Numerische und physikalische Untersuchung des Verlustbeiwertes einer asymmetrischen Düse im Wasserschloss*. Innsbruck: Innsbruck Univ. Press, 2012.

Giesecke, Jürgen, Stephan Heimerl, und Emil Mosonyi. *Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb*. 6. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.

Heigerth, Günther. *Skript für LV Wasserschloss-Konzept*. Graz: TU Graz Institut Hydraulische Strömungsmaschinen, 2016.

Idel'čik, I. E. *Handbook of Hydraulic Resistance*. 3. Boca Raton: CRC Press, 1994.

Klasinc, Roman, Helmut Knoblauch, und Thomas Dum. „Power Losses in Distribution.“ *4th International Conference HYDROSOFT 92'*. 1992.

Kobus, Helmut, und Gerrit Abraham. *Wasserbauliches Versuchswesen*. Hamburg: Parey, 1984.

Kuhlmann, Hendrik Christoph. *Skript für die LV Numerische Methoden der Strömungsmechanik*. Wien: TU Wien Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, 2008.

Lauffer, H. „Die Jahresspeicherwerke Österreichs.“ *Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft*, 1983: 134.

Lecheler, Stefan. *Numerische Strömungsberechnung*. 3. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.

- Oertel, Herbert jr., Martin Böhle, und Thomas Reviol. *Strömungsmechanik Grundlagen – Grundgleichungen – Lösungsmethoden – Softwarebeispiele*. 6. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- Richter, Wolfgang. *3D-numerische Strömungssimulation von hydraulischen Rückstromdrosseln in Wasserschlossern*. Innsbruck: Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, 2010.
- Schlichting, Hermann, und Klaus Gersten. *Grenzschicht-Theorie*. 10. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- Schneider, Josef. *Versuchstechnik und Laborübungen im Wasserbau - Vorlesungs- und Übungsskript*. Graz: TU Graz Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 2015.
- Schwarze, Rüdiger. *CFD-Modellierung - Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- Seeber, Gerhard. „Das Wasserschloss des Kaunertalkraftwerkes der TIWAG.“ *Schweizerische Bauzeitung*, 1970: 1-8.
- Seeber, Gerhard, und R. Friedrich. *Druckstollen und Druckschächte: Bemessung - Konstruktion - Ausführung*. Stuttgart New York: ENKE im Georg Thieme Verlag, 1999.
- Sigloch, Herbert. *Technische Fluidmechanik*. 9. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.
- Thoma, Dieter. *Zur Theorie des Wasserschlosses bei selbsttätig geregelten Turbinenanlagen*. München: Technische Hochschule München, 1910.
- Vorarlberger Illwerke AG. 09. 05 2016. <https://www.illwerke.at/gesamtplan.htm>.
- Ward-Smith, A. J. *Internal fluid flow - the fluid dynamics of flow in pipes and ducts*. Oxford: Clarendon Pr., 1980.
- Zanke, Ulrich. *Hydraulik für den Wasserbau*. 3. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- Zenz, Gerald, Josef Schneider, Wolfgang Richter, und Friedrich Lazar. *Endbericht: Wasserschloss Krespa OVW II*. Graz: TU Graz, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 2014.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1 Klassifizierung der Wasserkraftanlagen nach wesentlichen Merkmalen (Giesecke, Heimerl und Mosonyi 2014).....	16
Tabelle 1.2 Eckdaten des Obervermuntwerk II (Zenz, et al. 2014).....	31
Tabelle 1.3 Ergebnisse des physikalischen Modellversuches (Zenz, et al. 2014).....	37
Tabelle 2.1 Verwendete Maßstabsfaktoren.....	41
Tabelle 2.2 Einteilung der turbulenten Grenzschicht durch den dimensionslosen Wandabstand y^+ (Schlichting und Gersten 2006).....	49
Tabelle 3.1 Beurteilungskriterien für die Netzqualität.....	55
Tabelle 3.2 Zusammenfassung der verwendeten Netze im Naturmaßstab.....	61
Tabelle 3.3 Durchflüsse für die Lastfälle Auf- und Abschwngen.....	62
Tabelle 3.4 Untersuchte Sandrauigkeiten.....	64
Tabelle 3.5 Gewählte Zeitschritte für die unterschiedlichen Modellgrößen.....	68
Tabelle 3.6 Vergleich der unstrukturierten Netze mit dem strukturierten Netz im Naturmaßstab.....	74
Tabelle 3.7 Verbesserung der Netzqualität durch die Verwendung eines strukturierten Netzes.....	75
Tabelle 3.8 Adaptive Zeitschrittanpassung.....	80
Tabelle 4.1 Ergebnisse der Verlustbeiwerte (ζ) zu den Lastfällen im Maßstab 1:1.....	85
Tabelle 4.2 Ergebnisse der Verlustbeiwerte (ζ) zu den Lastfällen im Maßstab 1:15.....	85
Tabelle 4.3 Ergebnisse der Verlustbeiwerte (ζ) zu den Lastfällen im Maßstab 1:30.....	86
Tabelle 4.4 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) zum physikalischen Modellversuch.....	99
Tabelle 4.5 Abweichung der Verlusthöhe (h_v) mit Q_A 160 [m ³ /s].....	100
Tabelle 4.6 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) in Abhängigkeit vom Maßstab.....	100
Tabelle 4.7 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) in Abhängigkeit vom Durchfluss im Maßstab 1:1.....	101
Tabelle 4.8 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) in Abhängigkeit vom Durchfluss im Maßstab 1:15.....	101
Tabelle 4.9 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) in Abhängigkeit vom Durchfluss im Maßstab 1:30.....	101
Tabelle 4.10 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) in Abhängigkeit von der Rauigkeit im Maßstab 1:1.....	102
Tabelle 4.11 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) in Abhängigkeit von der Rauigkeit im Maßstab 1:15.....	102
Tabelle 4.12 Abweichung des Verlustbeiwertes (ζ) in Abhängigkeit von der Rauigkeit im Maßstab 1:30.....	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Kraftwerksschema der Vorarlberger Illwerke AG (Vorarlberger Illwerke AG 2016)	14
Abbildung 1.2 Hochdruckwasserkraftanlage nach alpiner Bauweise und die wichtigsten Bestandteile (Seeber und Friedrich 1999)	18
Abbildung 1.3 Hochdruckwasserkraftanlage nach Norwegischer Bauweise und die wichtigsten Bestandteile (Seeber und Friedrich 1999)	19
Abbildung 1.4 Hochdruckwasserkraftanlage nach Schwedischer Bauweise und die wichtigsten Bestandteile (Seeber und Friedrich 1999)	19
Abbildung 1.5 Schemaskizze eines Wasserschlosses (a) und einer Schwallkammer (b) (Giesecke, Heimerl und Mosonyi 2014).....	20
Abbildung 1.6 Wasserschlosstypen (Giesecke, Heimerl und Mosonyi 2014).....	21
Abbildung 1.7 Verlauf von Energie- und Drucklinie sowie Strömungsablösung bei einer Blende (Zenz, et al. 2014).....	23
Abbildung 1.8 Ablösezone bei einer kontinuierlichen (links) und bei einer plötzlichen Querschnittsverengung mit Einstand (rechts)	25
Abbildung 1.9 Schema Zweikammerwasserschloss mit Rückstromdrossel (Giesecke, Heimerl und Mosonyi 2014).....	26
Abbildung 1.10 Bestandteile und Einbauschema der Wirbelkammerdrossel des KW Kaunertal (1964-2016) (Richter 2010).....	26
Abbildung 1.11 Funktionsweise einer Wirbelkammerdrossel links Abschwingen, rechts Aufschwingen (Giesecke, Heimerl und Mosonyi 2014)	27
Abbildung 1.12 a) Massenschwingung und b) Druckstoßfolge (Zanke 2013)	28
Abbildung 1.13 Übersichtslängsschnitt der Werksgruppe Obere Ill (Lauffer 1983)	29
Abbildung 1.14 Projektübersicht OVW II (Zenz, et al. 2014)	30
Abbildung 1.15 Längsschnitt OVW II (Zenz, et al. 2014).....	31
Abbildung 1.16 3D-Darstellung Wasserschloss Krespa (Zenz, et al. 2014)	33
Abbildung 1.17 Auszug aus dem Modellbauplan, Kreuzriss und Drosseldetail (Zenz, et al. 2014)	34
Abbildung 1.18 Modellaufbau im Wasserbaulabor der TU Graz (Zenz, et al. 2014)	35
Abbildung 1.19 Messstellenübersicht (Zenz, et al. 2014).....	36
Abbildung 1.20 Diagramm für technisch raues Widerstandsverhalten (Zanke 2013).....	37
Abbildung 2.1 Geschwindigkeitsverteilung einer Rohrströmung (Oertel, Böhle und Reviol 2011)	39
Abbildung 2.2 Verteilung der dimensionslosen Geschwindigkeit (u^+) abhängig vom dimensionslosen Wandabstand (y^+) (Schwarze 2013).....	49
Abbildung 3.1 Übersicht über den typischen Ablauf einer numerischen Strömungsberechnung (Lecheler 2014).....	52
Abbildung 3.2 Projektschema in der ANSYS Workbench.....	57
Abbildung 3.3 Wasserkörper im DesignModeller.....	57

Abbildung 3.4 Unstrukturiertes Netz für den Lastfall des Aufschwingens mit Prismenwandschichten und Verfeinerungszonen	58
Abbildung 3.5 Verfeinerungszone 1	59
Abbildung 3.6 Verfeinerungszone 2 links beim Aufschwingen rechts beim Abschwngen.....	59
Abbildung 3.7 Überprüfung der Netzqualität im Programm ANSYS ICEM	59
Abbildung 3.8 Darstellung der Elemente mit bestimmter Netzqualität.....	60
Abbildung 3.9 Geometrieadaption, Versetzen der Belüftungs- bzw. Entleerungsrohre um den halben Durchmesser.....	60
Abbildung 3.10 Strömungsmodell mit Randbedingungen links für Auf- rechts für Abschwngen.....	63
Abbildung 3.11 Messquerschnitte zur Verlustbeiwertbestimmung Aufschwingen (grün) und Abschwngen (rot).....	66
Abbildung 3.12 Darstellung des dimensionslosen Wandabstandes y^+ , bei Aufschwingen mit Q_A	67
Abbildung 3.13 Lagebestimmung der max. Residuen, bei Aufschwingen mit Q_A	67
Abbildung 3.14 Residuen-Verlauf mit einem programmgesteuerten Zeitschritt.....	69
Abbildung 3.15 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt von 25 [s]	70
Abbildung 3.16 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt von 10 [s]	70
Abbildung 3.17 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt von 1 [s]	70
Abbildung 3.18 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt von 0,1 [s]	71
Abbildung 3.19 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt von 0,01 [s]	71
Abbildung 3.20 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt von 0,001 [s]	71
Abbildung 3.21 Schematische Darstellung der Kern- und der Ringblöcke (blau), links vor, rechts nach Projektion	73
Abbildung 3.22 Schematische Blockstrategie für die Drosselgeometrie, links vor, rechts nach der Projektion	73
Abbildung 3.23 Zweigeteiltes Strömungsgebiet gekoppelt durch Übergangsbedingung an den Rändern .	73
Abbildung 3.24 Blockeinteilung der Drosselgeometrie ohne Innenkanten.....	75
Abbildung 3.25 Blockeinteilung der Drosselgeometrie mit Innen Kanten (Cyan)	76
Abbildung 3.26 Strukturiertes Netz im Drosselbereich	76
Abbildung 3.27 Residuen-Verlauf mit einem programmgesteuerten Zeitschritt.....	77
Abbildung 3.28 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt 25 [s].....	77
Abbildung 3.29 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt 10 [s].....	78
Abbildung 3.30 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt 1 [s].....	78
Abbildung 3.31 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt 0,1 [s]	78
Abbildung 3.32 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt 0,01 [s]	79

Abbildung 3.33 Residuen-Verlauf mit einem Zeitschritt 0,001 [s]	79
Abbildung 3.34 Residuen- und Zeitschrittverlauf einer transienten Simulation mit adaptiven Zeitschritt....	81
Abbildung 3.35 Einpendeln des Verlustbeiwertes (ζ)	82
Abbildung 3.36 Entscheidungsdiagramm zur Vorgangsweise der numerischen Untersuchung.....	83
Abbildung 4.1 Bestimmung des Verlustbeiwertes	84
Abbildung 4.2 Stromliniendarstellung, Aufschwingen Q_A 160 [m ³ /s] im Naturmaßstab	87
Abbildung 4.3 Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich horizontal, Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab	88
Abbildung 4.4 Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich vertikal, Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab	88
Abbildung 4.5 Normiertes Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich horizontal	88
Abbildung 4.6 Normiertes Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich vertikal	88
Abbildung 4.7 Isolinien der Geschwindigkeitsverteilung vertikal, Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab	89
Abbildung 4.8 Isolinien der Druckverteilung vertikal, Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab	89
Abbildung 4.9 Relative Geschwindigkeits- und Druckverteilung vert., Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab	89
Abbildung 4.10 Isolinien der Geschwindigkeitsverteilung horizontal, Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab	90
Abbildung 4.11 Isolinien der Druckverteilung horizontal, Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab.....	90
Abbildung 4.12 Relative Geschwindigkeits- und Druckverteilung hor., Aufschwingen Q_A im Naturmaßstab	90
Abbildung 4.13 Links Geschwindigkeitsverteilung, rechts Druckverteilung am Einlaufquerschnitt.....	91
Abbildung 4.14 Links Geschwindigkeitsverteilung, rechts Druckverteilung am Auslaufquerschnitt.....	91
Abbildung 4.15 Relative Geschwindigkeitsverteilung, l. am Einlauf, rechts am Auslauf.....	91
Abbildung 4.16 Relative Druckverteilung, links am Einlauf, rechts am Auslauf.....	91
Abbildung 4.17 Druck- und Geschwindigkeitshöhen entlang der Rohrachse, Aufschwingen Q_A , Aufschwingen Q_A 160 [m ³ /s] im Naturmaßstab	92
Abbildung 4.18 Stromliniendarstellung, Aufschwingen Q_A 160 [m ³ /s] im Naturmaßstab	93
Abbildung 4.19 Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich horiz., Abschwingen Q_A im Naturmaßstab.	94
Abbildung 4.20 Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich vertikal, Abschwingen Q_A im Naturmaßstab	94
Abbildung 4.21 Normiertes Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich horizontal	94
Abbildung 4.22 Normiertes Geschwindigkeitsvektoren im Drosselbereich vertikal	94
Abbildung 4.23 Isolinien der Geschwindigkeitsverteilung vertikal, Abschwingen Q_A im Naturmaßstab.....	95
Abbildung 4.24 Isolinien der Druckverteilung vertikal, Abschwingen Q_A im Naturmaßstab	95
Abbildung 4.25 Relative Geschwindigkeits- und Druckverteilung vert., Abschwingen Q_A im Naturmaßstab	95

Abbildung 4.26 Isolinien der Geschwindigkeitsverteilung horizontal, Abschwngen Q_A im Naturmaßstab.	96
Abbildung 4.27 Isolinien der Druckverteilung horizontal, Abschwngen Q_A im Naturmaßstab.....	96
Abbildung 4.28 Relative Geschwindigkeits- und Druckverteilung hor., Abschwngen Q_A im Naturmaßstab	96
Abbildung 4.29 Links Geschwindigkeitsverteilung, rechts Druckverteilung am Einlaufquerschnitt.....	97
Abbildung 4.30 Links Geschwindigkeitsverteilung, rechts Druckverteilung am Auslaufquerschnitt.....	97
Abbildung 4.31 Relative Geschwindigkeitsverteilung, l. am Einlauf, rechts am Auslauf.....	97
Abbildung 4.32 Relative Druckverteilung, links am Einlauf, rechts am Auslauf.....	97
Abbildung 4.33 Druck- und Geschwindigkeitshöhen entlang der Rohrachse, Abschwngen Q_A 160 [m ³ /s] im Naturmaßstab.....	98