

Masterarbeit

Konstruktion und numerische Optimierung einer
Verteilrohrleitung einer vertikalen sechsdüsigen
Pelton turbine

von

Florian Hasenöhl

durchgeführt am

Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Technische Universität Graz

Vorstand: O. Univ.-Prof. Dr.-Ing Helmut Jaberg



Betreuer: Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Benigni

Graz, Januar 2013

Kurzfassung

Konstruktion und numerische Optimierung einer Verteilrohrleitung einer vertikalen sechsdüsigen Pelton turbine

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der Konstruktion und numerischen Optimierung einer Verteilrohrleitung einer Pelton turbine. Als Ausgangsbasis dient eine bestehende Verteilrohrleitung einer vertikalen sechsdüsigen Pelton turbine. Diese Leitung wird mit dem Software-Paket Ansys CFX numerisch analysiert. Die ausgewerteten Ergebnisse dienen als Referenz für die neue zu konstruierende Verteilrohrleitung. Die neue Geometrie stellt eine Weiterentwicklung in Hinblick auf Multifunktion von Bauteilen dar, da die Verteilrohrleitung gleichzeitig als Gehäuse dienen soll. Eine Optimierung der Geometrie der neuen Leitung ist durchzuführen und am Ende dieser Arbeit werden die Ergebnisse der neuen Leitung mit der Referenzleitung und einer weiteren bestehenden Verteilrohrleitung verglichen. Weiters werden für die neue Verteilrohrleitung Teillastfälle untersucht.

Abstract

Design and numerical optimization of a distribution pipe of a vertical Pelton-turbine with six nozzles

The present master thesis deals with the design and numerical optimization of a distribution pipe of a Pelton-turbine. It is based on an existing distribution pipe of a vertical Pelton-turbine with six nozzles. The pipe is numerically analyzed with the software package Ansys CFX. The calculated results serve as a reference for the new distribution pipe design. The new design is a development concerning multiple functions of parts, because the distribution pipe also works as a turbine casing. A geometrical optimization of the new pipe is performed and at the end of this thesis the results of the new pipe are compared to the ones of the reference pipe and another existing distribution pipe. Furthermore part load conditions of the new distribution pipe are analyzed.

Hier die eidestattliche Erklärung einfügen!!

Vorwort

Diese Masterarbeit wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Kössler GmbH & Co KG und dem Institut für hydraulische Strömungsmaschinen der Technischen Universität Graz erarbeitet. Der Kontakt mit der Firma Kössler wurde während der 2. Praktikerkonferenz Wasserkraft am Institut für hydraulische Strömungsmaschinen hergestellt. Herr Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Benigni vom Institut stellte mich Herrn Dipl.-Ing. Erwin Franz von der Firma Kössler vor und dabei wurden die Möglichkeiten für eine Masterarbeit besprochen.

Ich möchte mich bei Herrn O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Jaberg dafür bedanken, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, die Masterarbeit am Institut für hydraulische Strömungsmaschinen durchzuführen und mir den dafür benötigten Arbeitsplatz zur Verfügung gestellt hat.

Weiters möchte ich mich auch besonders bei den beiden Geschäftsführern der Firma Kössler GmbH & Co KG, Herrn Ing. Josef Lampl, MBA und Herrn Ing. Robert Doppler bedanken, dass sie mir diese Masterarbeit angeboten haben und dass mir bei den Besprechungen in der Firma immer ein konstruktives Feedback gegeben wurde.

Meinem Betreuer Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Benigni danke ich für seine richtungsweisenden Ideen und fachlichen Hilfestellungen, die mir beim Fortschritt dieser Masterarbeit sehr geholfen haben.

Dem gesamten Team des Instituts für hydraulische Strömungsmaschinen der Technischen Universität Graz danke ich, dass sie mir, wann immer ich Fragen hatte oder Hilfestellungen benötigte, ohne weiteres geholfen haben. Besonders erwähnen möchte ich hier die Kollegen Dipl.-Ing. Jürgen Schiffer, Dipl.-Ing. Stefan Höller-Litzlhammer und Dipl.-Ing. Markus Mosshammer, mit denen die Zusammenarbeit sehr angenehm war.

Mein Dank gilt auch ganz besonders den Herrn Dipl.-Ing. Erwin Franz und Ing. Manfred König der Firma Kössler GmbH & Co KG, welche bei den Zwischenbesprechungen immer mit wertvollem technischen Feedback und Informationen dienen konnten. Herr König war auch mein telefonischer Draht zur Firma, wenn ich Fragen jeglicher Art hatte, welche mir prompt beantwortet werden konnten.

Meine Freundin Patricia trug auch einen großen Teil dazu bei, dass meine Abschlussarbeit zustande kommen konnte. Sie unterstützte mich zu jeder Zeit und wann immer meine Motivation nachließ, half sie mir auf die Beine. Dafür danke ich Dir von ganzem Herzen.

Auch bei meiner gesamten Familie, vor allem meiner Mutter Elisabeth, meinen Großeltern Josef und Theresia und meinen Geschwistern Herbert und Martina, möchte ich mich herzlich bedanken, da sie mich während meiner gesamten Ausbildung und darüber hinaus immer tatkräftig unterstützt haben.

Danke!!

Nomenklatur

A	Fläche	m^2
\vec{a}	Beschleunigungsvektor	m/s^2
d	Durchmesser	m
d_0	Freistrahldurchmesser	m
e	spezifische innere Energie	m^2/s^2
\vec{F}	Kraftvektor	N
$\overline{f^B}$	spezifische Volumenkräfte	m/s^2
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
H	Fallhöhe	m
h_f	Fallhöhe	m
h_v	Fallhöhenverlust	m
k	äquivalente Rauheit	m
k_m	Laufzahl	
$k_{m,max}$	maximale Laufzahl	
L	Länge	m
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
\vec{n}	Normalenvektor der Oberfläche des Kontrollvolumens	
n_q	spezifische Drehzahl	min^{-1}
O	Oberfläche	m^2
P	Leistung	W
p	statischer Druck	Pa
\vec{p}	Impulsvektor	$kg \cdot m/s$
p_{tot}	Totaldruck	Pa
Q	Durchfluss	m^3/s
\vec{q}	spezifische Wärmeleistung durch Leitung	kg/s^3
\dot{q}_Q	spezifische Wärmeleistung durch Quellen	$kg/m \cdot s^3$
Re	Reynold-Zahl	
t	Zeit	s
U_m	Umfangsgeschwindigkeit am Strahlkreis	m/s
V	Volumen	m^3
v	Geschwindigkeit	m/s
\vec{v}	Geschwindigkeitsvektor	m/s
Y	spezifische Gesamtenergie der Strömung	m^2/s^2
Y_v	spezifische Verlustenergie	m^2/s^2
z	geodätische Höhe	m
λ	Reibungsbeiwert	
ρ	Dichte	kg/m^3
$\vec{\tau}_x$	Spannungsvektor in x-Richtung auf der Oberfläche des Kontrollvolumens	N/mm^2
$\vec{\tau}_y$	Spannungsvektor in y-Richtung auf der Oberfläche des Kontrollvolumens	N/mm^2
$\vec{\tau}_z$	Spannungsvektor in z-Richtung auf der Oberfläche des Kontrollvolumens	N/mm^2
ζ	Druckverlustbeiwert	

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung / Abstract	1
Vorwort	3
Nomenklatur	4
1. Einleitung	8
2. Theoretische Grundlagen	9
2.1. Hydraulische Strömungsmaschinen	9
2.1.1. Strömungstechnische Grundlagen	11
2.1.2. Rohrströmungen	13
2.1.3. Verteilrohrleitungen, Abzweiger	15
2.2. Numerische Strömungsberechnung	15
2.2.1. Diskretisierung der Navier-Stokes-Gleichungen	17
2.2.2. Rechengitter	18
2.2.3. Turbulenzmodelle	21
2.2.4. Lösungsverfahren	23
3. Verwendete Software	26
3.1. CATIA V5	26
3.2. Ansys ICEM CFD 12.1	26
3.3. Ansys CFX Pre 13.0	27
3.4. Ansys CFX Solver 13.0	28
3.5. Ansys CFD Post 13.0	28
4. Referenz-Verteilrohrleitung	29
4.1. Meshing, Solver-Setup	30
4.2. Auswertung	31
5. Neue Verteilrohrleitung	33
5.1. VRL neu Version 1	33
5.1.1. Konstruktion	33
5.1.2. Meshing, Solver-Setup	34
5.1.3. Auswertung	35
5.2. VRL neu Version 2	36
5.2.1. Konstruktion	36
5.2.2. Meshing, Solver-Setup	36
5.2.3. Auswertung	37
5.3. VRL neu Version 3	38
5.3.1. Offen außenregulierte Leitung	38

5.3.2.	Geschlossen außenregulierte Leitung.....	41
5.3.3.	Offen innenregulierte Leitung	43
5.3.4.	Geschlossen innenregulierte Leitung.....	46
6.	Vergleich der einphasigen Rechnungen	48
7.	Zweiphasige Rechnungen der neuen Leitung	49
7.1.	VRL neu Version 3.....	49
7.1.1.	Meshing, Solver-Setup	49
7.1.2.	Auswertung	50
7.2.	VRL neu Version 4.....	51
7.2.1.	Konstruktion.....	51
7.2.2.	Meshing, Solver-Setup	52
7.2.3.	Auswertung	52
7.3.	VRL neu Version 5.....	54
7.3.1.	Konstruktion.....	54
7.3.2.	Meshing, Solver-Setup	54
7.3.3.	Auswertung	55
7.4.	Vergleich V3, V4 und V5.....	56
7.5.	VRL neu Version 6.....	57
7.5.1.	Konstruktion.....	57
7.5.2.	Meshing, Solver-Setup	58
7.5.3.	Auswertung	58
7.6.	VRL neu Version 7.....	60
7.6.1.	Konstruktion.....	60
7.6.2.	Meshing, Solver-Setup	60
7.6.3.	Auswertung	61
7.7.	Vergleich V5, V6 und V7.....	62
7.8.	VRL neu Version 8.....	63
7.8.1.	Konstruktion.....	63
7.8.2.	Meshing, Solver-Setup	64
7.8.3.	Auswertung	64
8.	Vergleich der zweiphasigen Rechnungen.....	66
9.	Teillastfälle.....	67
9.1.	Teillastfall Version 7	67
9.1.1.	Meshing, Solver-Setup	67
9.1.2.	Auswertung	68
9.2.	Teillastfall Version 8	68
9.2.1.	Meshing, Solver-Setup	68

9.2.2.	Auswertung	69
9.2.3.	Weitere Maßnahmen zur Vermeidung der Luft in der Verteilrohrleitung.....	70
9.2.4.	Auswertung Teillastfälle Version 8.....	71
9.3.	Teillastfälle mit veränderter Position der geöffneten Düsen	78
9.3.1.	Meshing, Solver-Setup	78
9.3.2.	Auswertung 1-düsig; Düse 1 geöffnet.....	78
9.3.3.	Auswertung 2-düsig; Düse 1 und 4 geöffnet	79
10.	Zweiphasige Rechnung der Referenzleitung.....	80
10.1.1.	Meshing, Solver-Setup	80
10.1.2.	Auswertung	80
11.	Vergleich zwischen neuer Leitung und Referenz-Leitung.....	82
12.	Zweiphasige Rechnung einer bestehenden optimierten Leitung.....	83
12.1.1.	Meshing, Solver-Setup	84
12.1.2.	Auswertung	84
13.	Vergleich zwischen neuer Leitung und optimierter Leitung.....	86
14.	Zusammenfassung und Ausblick	87
15.	Abbildungsverzeichnis	88
16.	Tabellenverzeichnis	90
17.	Literaturverzeichnis.....	91

1. Einleitung

Die ECOLINE der Firma Kössler GmbH stellt eine Produktschiene dar, welche es ermöglicht, Kleinwasserkraftanlagen wirtschaftlich einzusetzen. Hierbei werden die Anlagen bewusst einfach im Aufbau gehalten, um die Anschaffungskosten möglichst gering zu halten.

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Masterarbeit war es, eine konstruktiv einfache und somit kostengünstige Verteilrohrleitung für eine vertikale sechsdüsige Pelton turbine zu konstruieren. Als Referenz wurde eine bestehende Verteilrohrleitung einer solchen Pelton turbine verwendet. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war, die Verluste der neuen Leitung so gering zu halten, dass sie maximal 2% höher liegen als die Verluste der Referenzleitung.

Der erste Schritt ist die numerische Berechnung der Referenzleitung. Diese ersten Rechenergebnisse können als Vergleich für die späteren Rechnungen verwendet werden.

Der zweite Schritt ist die Konstruktion und numerische Berechnung der neuen Leitung. Es gibt vier grundlegende Versionen der neuen Leitung. Zwei außenregulierte Leitungen und zwei innenregulierte Leitungen werden konstruiert, von denen jeweils eine nach der sechsten Düse geschlossen bzw. offen ist. Diese vier Varianten werden untereinander verglichen. Die effektivste und technisch sinnvollste Version wird einer weiteren Optimierung unterzogen und letztendlich mit der Referenzleitung verglichen.

Weiters sollen Teillastfälle untersucht werden, bei denen sich der Gesamtvolumenstrom so einstellt, dass die geöffneten Düsen den gleichen Volumenstrom besitzen wie im Vollastfall. Es wird ein 1-düsiger, 2-düsiger, 3-düsiger, 4-düsiger und 5-düsiger Teillastfall untersucht.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Hydraulische Strömungsmaschinen

Hydraulische Strömungsmaschinen entziehen dem durchströmenden Wasser über das Laufrad Energie und wandeln diese mit Hilfe des Generators in elektrische Energie um. Den umgekehrten Prozess beschreiben Pumpen, d.h. sie führen dem Fluid Energie zu, indem sie die Strömung auf ein höheres Druckniveau befördern. Pumpen zählen genauso wie Turbinen zu den hydraulischen Strömungsmaschinen. Bei den Turbinen unterscheidet man grundsätzlich zwischen Gleichdruckturbinen und Überdruckturbinen.

Zu den Gleichdruckturbinen gehören die Pelton-turbine und die Durchströmturbine, deren Laufrad in Atmosphärendruck angeströmt wird. Diese Anströmung des Laufrades erfolgt nicht auf der gesamten Laufradfläche, sondern wie im Beispiel des Pelton-Laufrades nur in einzelnen Bechern. Die Fallhöhe der Turbine ist beim Laufradeintritt vollständig in Form von Geschwindigkeitsenergie vorhanden.

Das Gehäuse von Pelton-turbinen mit vertikaler Achse soll wie in Abbildung 1 mit einem Blech ausgeführt sein, welches die nach oben aus den Bechern austretende Wassermenge am Gehäuse entlang nach unten führt. Dabei soll nichts von der nach oben austretenden Wassermenge das Laufrad und den Freistrahл der Düsen berühren. Nach Raabe [1] definiert sich ein nötiger Freihang über dem höchstmöglichen Unterwasser:

$$\text{Freihang} = 10 \cdot d_0 + \frac{H}{1200 \text{ bis } 2000} \quad (2.1)$$

d_0 ... Freistrahldurchmesser

H ... Fallhöhe

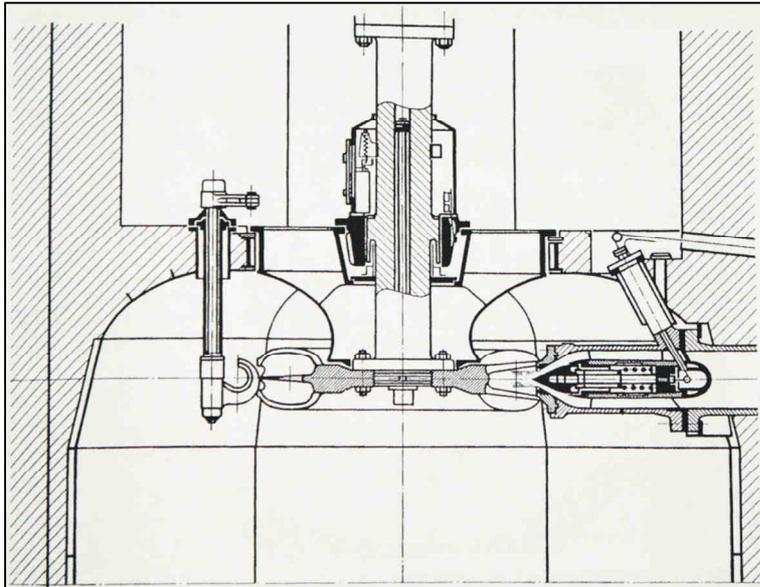


Abbildung 1: Querschnitt eines Turbinengehäuses einer vertikalen Pelton-turbine [1]

Spritzwasser, das wieder auf dem Laufrad landet wird wieder beschleunigt und erzeugt somit Verluste. Dieses Rückspritzen auf die obere Schaufelhälfte tritt nach Zhang [2] auf, wenn die Laufzahl k_m größer ist als die maximale Laufzahl $k_{m,max}$. Abbildung 2 zeigt die maximale Laufzahl für störungsfreien Wasseraustritt aus dem Laufrad. Zhang [2] schätzt diese Verluste auf maximal 1% bis 2%.

Die Laufzahl k_m errechnet sich wie folgt:

$$k_m = \frac{U_m}{\sqrt{2gH}} \quad (2.2)$$

U_m ... Umfangsgeschwindigkeit am Strahlkreis

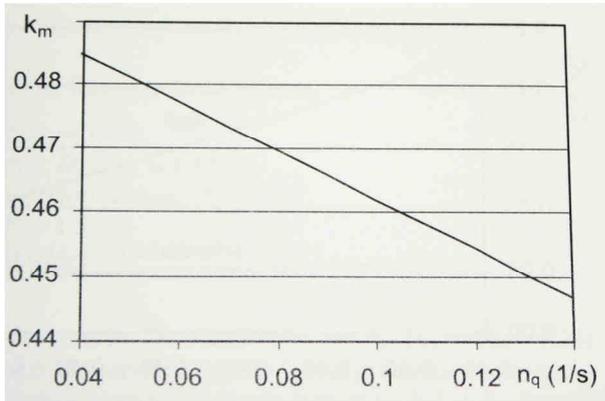


Abbildung 2: maximale Laufzahl für störungsfreien Wasseraustritt aus dem Laufrad mit vertikaler Achse [2]

Eine Möglichkeit den Freihang zu vergrößern beschreibt König [3]. Hierbei wird mit Pressluft im Gehäuse der Unterwasserspiegel abgesenkt und somit die Verluste infolge eines zu geringen Freihanges verringert werden.

Überdruckturbinen umfassen Kaplan-, Kaplan-Rohr-, Propeller-, Francis-, Diagonal- und Straflo-Turbinen, welche im Vergleich zu Gleichdruckturbinen zur Gänze mit dem durchfließenden Wasser durchströmt werden. Diese Turbinenlaufräder sind in Kontakt mit dem Unterwasser und erfahren dadurch einen entsprechenden Gegendruck am Laufradaustritt.

In Abbildung 3 ist eine Einteilung der hydraulischen Strömungsmaschinen nach Giesecke [4] zu sehen. Als Ordinate ist die Fallhöhe in m angegeben und als Abszisse der Durchfluss in m^3/s .

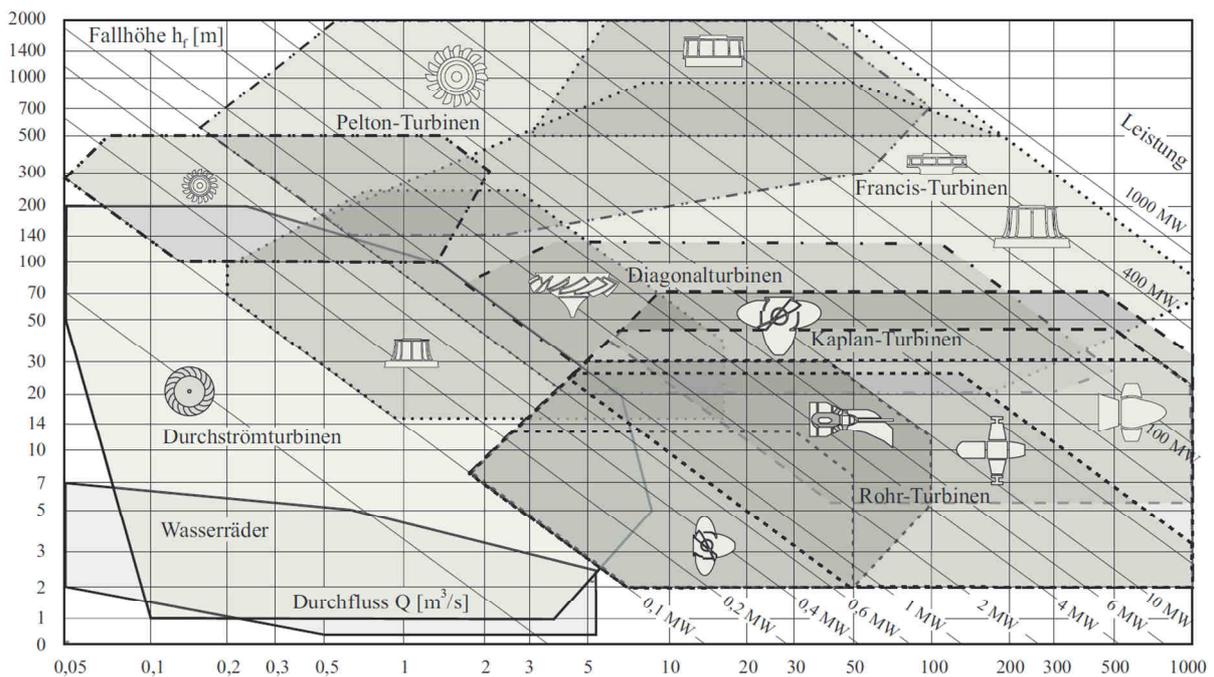


Abbildung 3: Einsatzbereiche hydraulischer Strömungsmaschinen nach Giesecke [4]

2.1.1. Strömungstechnische Grundlagen

Die Betrachtungen der Erhaltungsgleichungen in den folgenden drei Punkten beziehen sich auf ein raumfestes Kontrollvolumen V (siehe Abbildung 4):

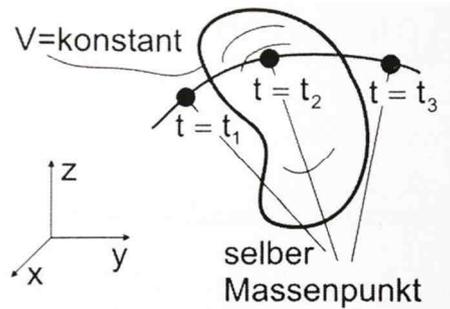


Abbildung 4: Raumfestes Kontrollvolumen [5]

2.1.1.1. Kontinuitätsgleichung

„Masse kann weder erzeugt noch vernichtet werden“. Auf diesem Axiom basiert die Kontinuitätsgleichung [5]:

$$\int \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = - \int_O (\rho \vec{v} \cdot \vec{n}) dO \quad (2.3)$$

oder in Worten:

$$\left(\begin{array}{l} \text{zeitliche Änderung der Masse} \\ \text{des Kontrollvolumens} \end{array} \right) + (\text{Massenabfluss}) - (\text{Massenzufluss}) = 0$$

Somit ergibt sich für ein vereinfachtes System mit einer Eintrittsfläche A_1 und einer Austrittsfläche A_2 bei Vernachlässigung von Quellen und Senken (zeitliche Änderung der Masse des Kontrollvolumens) die Kontinuitätsgleichung in folgender Schreibweise:

$$\dot{m} = \text{const} = \rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (2.4)$$

Da das Medium Wasser im Bereich der hydraulischen Strömungsmaschinen als inkompressibel angesehen werden kann, gilt hier die Vereinfachung $\rho_1 = \rho_2$ und die Kontinuitätsgleichung kann in folgender Form geschrieben werden:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (2.5)$$

2.1.1.2. Impulsgleichung

„Die zeitliche Änderung des Impulses eines Körpers = Die Summe der am Körper angreifenden Oberflächen- und Volumenkräfte“. Auf diesem Axiom basiert die Impulsgleichung [5]:

$$\begin{aligned} \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) dV + \int_O (\rho \vec{v} \cdot \vec{n}) dO &= \int_O -p \vec{n} dO + \int_O \vec{\tau}_x n_x dO + \int_O \vec{\tau}_y n_y dO \\ &+ \int_O \vec{\tau}_z n_z dO + \int_V \rho \vec{f}^B dV \end{aligned} \quad (2.6)$$

oder in Worten:

$$\left(\begin{array}{c} \text{zeitliche Änderung} \\ \text{des Impulses im} \\ \text{Inneren des} \\ \text{Kontrollvolumens} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{austretender} \\ \text{Impulsfluss} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{eintretender} \\ \text{Impulsfluss} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Summe der} \\ \text{Oberflächenkräfte} \\ \text{und Volumenkräfte} \end{array} \right)$$

Der Impuls ist definiert als:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} \quad (2.7)$$

Nach dem zweiten Newton'schen Gesetz gilt:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (2.8)$$

Der Impuls geht innerhalb eines Kontrollvolumens nicht verloren, kann jedoch übertragen werden.

2.1.1.3. Energiegleichung

„Die zeitliche Änderung der gesamten Energie (kinetische und innere Energie) eines Körpers = Die Summe der Leistungen der am Körper angreifenden Kräfte, der durch Leitung transportierten Wärmeleistung und der Wärmezufuhr aus inneren Wärmequellen“. Auf diesem Axiom basiert die Energiegleichung [5]:

$$\begin{aligned} & \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{\vec{v}^2}{2} \right) \right] dV + \int_O (\rho (e + \frac{\vec{v}^2}{2}) (\vec{v} \cdot \vec{n})) dO \\ & = \int_V (\rho \vec{v} \cdot \vec{f}^B) dV - \int_O (p \vec{v} \cdot \vec{n}) dO + \int_O (\vec{v} \cdot \vec{\tau}_x) n_x dO \\ & + \int_O (\vec{v} \cdot \vec{\tau}_y) n_y dO + \int_O (\vec{v} \cdot \vec{\tau}_z) n_z dO - \int_O (\vec{q} \cdot \vec{n}) dO + \int_V \dot{q}_Q dV \end{aligned} \quad (2.9)$$

oder in Worten:

$$\begin{aligned} & \left(\begin{array}{c} \text{Energieänderung} \\ \text{im Inneren} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{austretender} \\ \text{Energiestrom} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{eintretender} \\ \text{Energiestrom} \end{array} \right) \\ & = \left(\begin{array}{c} \text{Leistung der} \\ \text{äußeren Kräfte} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{übertragene} \\ \text{Wärmeleistung} \\ \text{durch Leitung und} \\ \text{innere Wärmequellen} \end{array} \right) \end{aligned}$$

Durch die Annahme, dass bei hydraulischen Strömungsmaschinen die übertragene Wärmeleistung durch Leitung und innere Wärmequellen verschwindend gering ist, können in Gleichung 2.9 die letzten zwei Terme vernachlässigt werden. Durch Anwendung der Kontinuitätsgleichung lässt sich für ein vereinfachtes System (z.B. ein Rohr) mit einer Eintrittsfläche A_1 und einer Austrittsfläche A_2 und der Annahme einer stationären und inkompressiblen Strömung die Energiegleichung in der folgenden Form (Bernoulli-Gleichung) schreiben:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{v1 \rightarrow 2} \quad (2.10)$$

Die Kontinuitätsgleichung in Verbindung mit der Impulsgleichung werden Navier-Stokes-Gleichungen genannt. Die Navier-Stokes-Gleichungen und die Bernoulli-Gleichung sind in der Strömungsmechanik sehr häufig angewandte Gleichungen.

2.1.2. Rohrströmungen

Bei Strömungen realer Fluide (siehe Abbildung 5) werden durch Reibung und Turbulenz Verluste erzeugt, die in Wärmeenergie und Schallenergie umgewandelt werden. Diese Verlustenergie Y_v lässt sich aus der erweiterten Energiegleichung realer inkompressibler Fluide (Bernoulli-Gleichung) ermitteln [6]:

$$Y_1 = Y_2 + Y_{v,12} \quad (2.11)$$

$$z_1 \cdot g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} = z_2 \cdot g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + Y_{v,12} \quad (2.12)$$

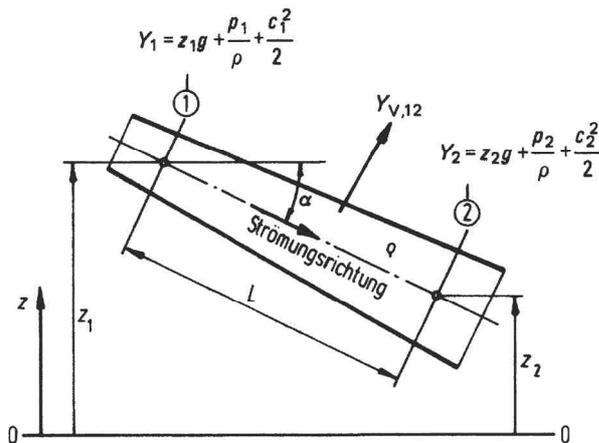


Abbildung 5: Rohrströmung eines realen inkompressiblen Fluides [6]

In der Regel sind Rohrströmungen bis auf wenige Ausnahmen immer turbulente Rohrströmungen. Abbildung 6 zeigt ein turbulentes Strömungsprofil einer Rohrströmung mit der charakteristischen bauchigen Form.

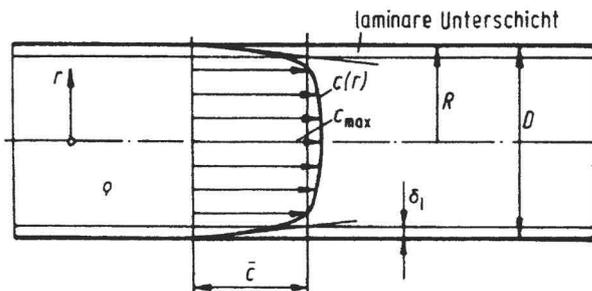


Abbildung 6: Strömungsprofil einer turbulenten Rohrströmung [6]

Umfangreiche Experimente und numerische Modelle liefern brauchbare Ergebnisse für die Lösung turbulenter Strömungen [4]. Die experimentell ermittelten Werte wurden zu Näherungsformeln, Tabellen und Diagrammen ausgearbeitet. In Abbildung 7 ist das Moody-Diagramm für den Widerstandsbeiwert λ für Rohrleitungen dargestellt. Als Ordinate ist der Widerstandsbeiwert λ aufgetragen und als Abszisse ist die Reynolds-Zahl Re aufgetragen. Im Moody-Diagramm ist der Ausdruck k/d zu erkennen. Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen Rohrrinnendurchmesser d (in mm) zu äquivalenter Rauheit k (in mm). Die äquivalente Rauheit ist entsprechenden Werkstofftabellen zu entnehmen.

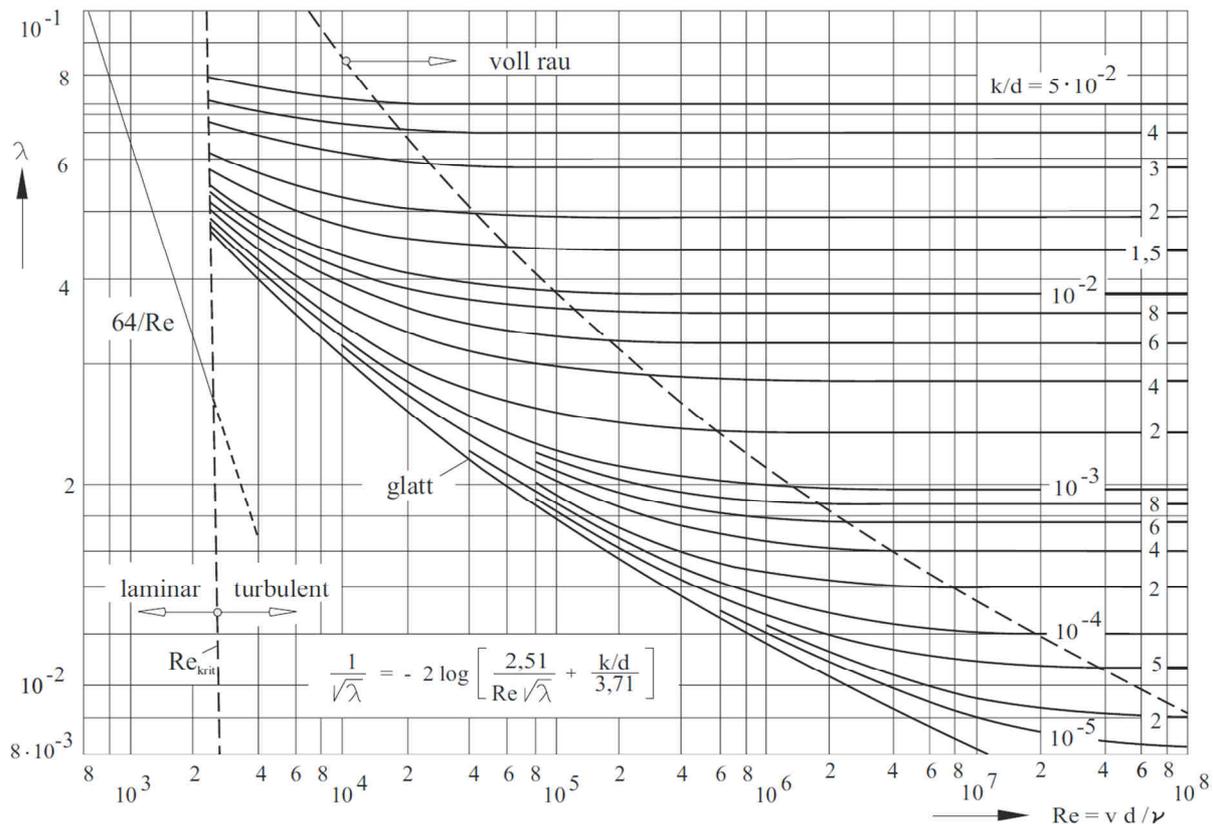


Abbildung 7: Rohrreibungsdiagramm [4]

Die Reynolds-Zahl errechnet sich im Allgemeinen wie folgt:

$$Re = \frac{\text{charakteristische Geschwindigkeit} \cdot \text{charakteristische Länge}}{\text{kinematische Zähigkeit}} \quad (2.13)$$

Für einen Rohrquerschnitt errechnet sich die Reynolds-Zahl aus der über den Rohrquerschnitt gemittelten Geschwindigkeit, dem Rohrlinnendurchmesser und der kinematischen Viskosität des Fluides:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (2.14)$$

Mit dem aus dem Moody-Diagramm ermittelten Widerstandsbeiwert λ , der Rohrlänge L , dem Rohrlinnendurchmesser d und der gemittelten Geschwindigkeit v lässt sich die Verlustenergie Y_V ermitteln:

$$Y_V = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.15)$$

Daraus ergibt sich eine Möglichkeit, die Rohrverluste in der Verteilrohrleitung abzuschätzen. In der vorliegenden Arbeit werden die Rohrleitungsverluste jedoch numerisch ermittelt. Die Verlusthöhe h_v ergibt sich aus der Differenz des Totaldrucks zwischen Eingangsquerschnitt und Ausgangsquerschnitt. Die Totaldrücke können direkt aus der CFD-Software ausgewertet werden.

$$h_v = \frac{Y_V}{g} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = \frac{p_{tot_ein} - p_{tot_aus}}{\rho \cdot g} \quad (2.16)$$

Der Zusammenhang zwischen Verlusthöhe h_v und Druckverlustbeiwert ζ ist in Formel 2.17 zu sehen. Der Druckverlustbeiwert ζ errechnet sich aus der Differenz der Totaldrücke und der gemittelten Geschwindigkeit v einer Bezugsebene (Formel 2.18):

$$h_v = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.17)$$

$$\zeta = h_v \cdot \frac{2g}{v^2} = \frac{2(p_{tot_ein} - p_{tot_aus})}{\rho \cdot v^2} \quad (2.18)$$

2.1.3. Verteilrohrleitungen, Abzweiger

Um eine verlustarme Anströmung des Wassers zum Pelton-Laufrad einer sechsdüsigen Pelton turbine zu erhalten, muss eine Verteilrohrleitung mit Abzweigern konstruiert werden. Diese Verteilrohrleitung sollte nach Möglichkeit folgende Merkmale besitzen um Fallhöhenverluste gering zu halten [4]:

- kleine Abzweigwinkel
- hydraulisch günstig ausgebildete Übergänge der Abzweiger
- eine eventuelle Überdimensionierung der Turbinenzulaufrohre

In Bezug auf die Aufgabenstellung der vorliegenden Masterarbeit liegt die Schwierigkeit in den ersten beiden Punkten. Wie sich am Ende dieser Arbeit herausstellen wird, wird der dritte Punkt (die Überdimensionierung der Rohre) ein ganz wesentlicher Punkt in Hinblick auf die Reduzierung der Fallhöhenverluste darstellen.

2.2. Numerische Strömungsberechnung

Nach Lecheler [7] ist eine numerische Strömungsberechnung durch folgenden Ablauf gekennzeichnet:

- Einlesen der Geometrie:

In der Regel werden Geometriedaten in 3D-CAD-Formaten (wie zum Beispiel .CATPart, .CATProduct, .igs, .stp, .prt etc.) erzeugt und bereitgestellt.

Eine weitere Möglichkeit ist das Einlesen von Koordinatenpunkten aus einer Text- oder Excel-File. Solche Datensätze kommen üblicherweise aus Messungen (z.B. Lasermessung) oder Auslegungsprogrammen. Durch Verbinden der Koordinatenpunkte und weiterem Erzeugen von Oberflächen können jedoch viele Kanten entstehen, die bei der Netzerzeugung stören können.

Einfache Geometrien können aber auch direkt im Vernetzungsprogramm (z.B. Ansys ICEM CFD) konstruiert werden. Weiters gibt es von Ansys Programme, mit denen Geometrien erzeugt werden können (z.B. Ansys BladeGen zur Erzeugung von Schaufelgeometrien oder Ansys Design Modeler).

- Erzeugung des Rechengebiets:

Das Rechengebiet ist der Bereich im Inneren der Geometrie, wo die Strömung berechnet werden soll. Es wird durch die Geometrie und die Ein- bzw. Austrittsflächen begrenzt, auf denen im Pre-Processing die Randbedingungen definiert werden müssen.

Weiters kann bei symmetrischen Konstruktionen das Rechengebiet durch eine Symmetrieebene geteilt werden, um somit das Rechengebiet zu halbieren.

Bei periodischen Bauteilen, wie zum Beispiel einem Leitapparat einer Kaplan turbine mit mehreren Schaufeln, kann das Rechengebiet derart vereinfacht werden, dass nur der Bereich einer Schaufel berechnet wird und dieser durch die Verbindungsflächen abgegrenzt wird. Die Strömung, die in den linken periodischen Rand einströmt, muss 1:1 an derselben Stelle am rechten periodischen Rand ausströmen.

Um Rechenzeit zu sparen, sollte das Rechengebiet nur so groß wie nötig gewählt werden. Wenn es möglich ist, sollen Symmetrien und Periodizitäten ausgenutzt werden.

- Erzeugung des Rechennetzes:

Das Konvergenzverhalten und die Genauigkeit der numerischen Lösung hängen sehr stark von der Qualität und der Feinheit des erzeugten Rechengitters ab. Bei der Erzeugung von Rechennetzen sind einige grundlegende Regeln zu beachten um eine gute Qualität zu erhalten:

- Die Gitterzellen sollen möglichst rechtwinkelig und quadratisch sein.
- In Bereichen mit starken Gradienten muss das Gitter verdichtet sein (z.B. im wandnahen Bereichen).
- Generell sind strukturierte Netze, wenn es aufgrund der Geometrie möglich ist, unstrukturierten Netzen vorzuziehen, da diese eine schnellere Konvergenz und somit kürzere Rechenzeit erzielen.

Bevor mit der Gittergenerierung begonnen wird, muss die Geometrie auf Fehler wie zum Beispiel Löcher und übereinanderliegende Flächen etc. überprüft werden. Derartige Fehler müssen vor der Gittergenerierung eliminiert werden.

- Vorbereitung der Strömungsberechnung

Im Pre-Processing werden alle zur numerischen Lösung notwendigen Parameter und Konvergenzkriterien definiert:

- Stationäre oder instationäre Strömung
- Stoffwerte des Fluides oder Festkörpers
- Turbulenzmodelle
- Zeitschritt
- Randbedingungen
- Abbruchkriterien der Rechnung (Iterationsschritte oder erreichte Genauigkeit)
- Zusätzliche Größen als Abbruchkriterium (z.B. statischer Druck an einer bestimmten Stelle als Konvergenzkriterium)

Die Randbedingungen sind physikalisch sinnvoll zu definieren, d.h. manche Werte für die Randbedingungen müssen berechnet werden (z.B. Massenstrom am Eintritt in die Verteilrohrleitung bei Teillast).

- Strömungsberechnung
Die im Pre-Processing erzeugte Datei wird im Solver eingelesen und gestartet. Hierzu ist eine Startlösung erforderlich, die entweder manuell als Initialisierung im Pre-Processing definiert werden kann oder von der Software aus den Randbedingungen selbst erzeugt wird. Um Rechenzeit zu sparen, ist es sinnvoll, bei unterschiedlichen Rechnungen mit erwarteter ähnlicher Lösung eine vorhandene konvergierte Lösung als Startlösung zu verwenden.
- Auswertung
Im Post-Processing wird die Auswertung der Rechenlösung des Solvers durchgeführt. Hierzu können Visualisierungen der Strömung wie zum Beispiel Contour-Plots, Vector-Plots, Streamlines etc. erzeugt werden. Die Darstellung von Strömungsgrößen entlang einer Linie in Form eines Diagramms (z.B. Strömungsprofil einer Rohrströmung) ist ebenso möglich wie Datei-Exporte von Wertetabellen und eindimensionalen Größen (z.B. gemittelter Totaldruck in einer Querschnittsebene eines Rohrs).
- Validierung
In der numerischen Strömungsberechnung ist die Überprüfung der Rechenergebnisse durch Vergleiche mit realen Messergebnissen von sehr großer Bedeutung. Dadurch kann ermittelt werden, wie gut die Randbedingungen definiert wurden oder welches Turbulenzmodell für die Problemstellung am besten geeignet ist. Weiters kann es Aufschluss über die erzeugte Gitterqualität geben.

2.2.1. Diskretisierung der Navier-Stokes-Gleichungen

Da für die Navier-Stokes-Gleichungen bis auf Sonderfälle wie die ebene Platte keine analytische Lösung vorhanden ist, muss das Differentialgleichungssystem für technische Problemstellungen numerisch gelöst werden. Hierfür werden die partiellen Differentiale in endliche Differenzen umgewandelt. Dieser Vorgang ist die Diskretisierung [7]. Es werden drei unterschiedliche Methoden zur Diskretisierung unterschieden [8]:

- Finite-Differenzen-Methode:

Die Differentialquotienten der Navier-Stokes-Gleichungen werden durch Differenzenquotienten ersetzt, welche auf definierten Zustandsgrößen der Gitterpunkte basieren. An jedem Gitterpunkt werden die Grundgleichungen näherungsweise erfüllt [8]. Bei strukturierten Gittern ist die Finite-Differenzen-Methode sehr einfach und effektiv, jedoch ist sie auf einfache Geometrien beschränkt [9].

- Finite-Volumen-Methode:

Die Navier-Stokes-Gleichungen werden hier in Integralform verwendet. Das Strömungsgebiet wird auf eine endliche Anzahl von Kontrollvolumen aufgeteilt, auf welche die Navier-Stokes-Gleichungen angewendet werden. Der Rechenknoten, in dem die Zustandsgrößen berechnet werden, liegt im Schwerpunkt des Kontrollvolumens. Das Volumenintegral des Kontrollvolumens wird in Oberflächenintegrale umgewandelt. Als Ergebnis erhält man für jedes Kontrollvolumen eine Gleichung, in der die Werte des jeweiligen Rechenknotens und die der Nachbarvolumen vorkommen. Diese Methode kann bei jedem Gittertyp angewendet werden und ist deshalb auch für komplexe Geometrien geeignet [9].

- Finite-Elemente-Methode:

Das Strömungsgebiet wird in diskrete Volumen (meist Tetraeder oder Hexaeder) aufgeteilt. Im Vergleich zur Finiten-Volumen-Methode werden die Gleichungen mit einer Gewichtungsfunktion (Formfunktion) multipliziert, bevor sie über das gesamte Strömungsgebiet integriert werden. Die Vorteile dieser Methode sind die mögliche Behandlung beliebiger Geometrien und die einfache mathematische Analyse. Nachteilig ist die Anwendung unstrukturierter Gitter, denn daraus resultiert eine schwierigere Suche nach effizienten Lösungsmethoden [9].

Abbildung 8 zeigt eine Gegenüberstellung der drei Diskretisierungsmethoden hinsichtlich Flexibilität und Genauigkeit. Finite-Volumen-Methoden haben sich bei den kommerziellen CFD-Programmen durchgesetzt, da sie gute Flexibilität und Genauigkeit liefern.

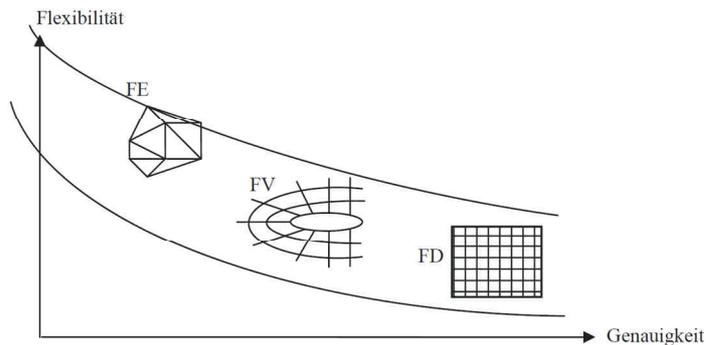


Abbildung 8: Flexibilität und Genauigkeit der Diskretisierungsmethoden[7]

2.2.2. *Rechengitter*

Die Knotenpunkte, in denen die Zustandsgrößen berechnet werden sollen, werden durch ein Rechengitter definiert. Dieses Gitter unterteilt das Strömungsgebiet in eine endliche Anzahl kleiner Teilgebiete. Mögliche Typen, um ein solches Gitter aufzubauen, sind im Folgenden beschrieben:

Strukturierte Gitter erlauben es, die Knotenpunkte nacheinander zu nummerieren. Die Lage eines Gitterpunktes kann durch seine Indizes eindeutig bestimmt werden. Der wesentliche Nachteil von strukturierten Gittern ist, dass sie nur bei geometrisch einfachen Strömungsgebieten einsetzbar sind. Strukturierte Gitter können vom Typ O, C und H sein [9]:

2.2.2.1. O-Grid-Struktur:

In Abbildung 9 ist ein Rechengitter vom Typ O zu sehen. Die Netzlinien $\zeta = \text{konst.}$ verlaufen um die Geometrie herum und die Netzlinien $\eta = \text{konst.}$ laufen sternförmig von der Kontur weg. Diese unterschiedlichen Netzlinien stehen in etwa senkrecht zueinander. Ein Vorteil von O-Gittern ist die gute Möglichkeit, die Grenzschicht an der Kontur aufzulösen. Der Nachteil dieses Typs ist, dass das Gebiet stromabwärts des Profils nicht gut aufgelöst werden kann und es entstehen schiefwinkelige Gitterelemente. Dieser Typ eignet sich eher für dicke und runde Hinterkanten.

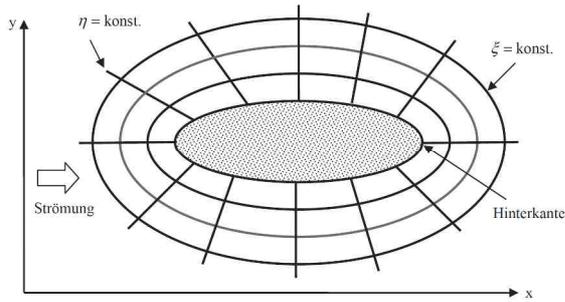


Abbildung 9: O-Grid-Struktur [7]

2.2.2.2. C-Grid-Struktur:

C-Gitter stellen Tragflügelprofile (siehe Abbildung 10) am besten dar, da das Gitter auch stromab der Hinterkante des Profils gut aufgelöst werden kann. Die Grenzschicht am Profil kann wie beim O-Typ gut aufgelöst werden. Jedoch ergeben sich beim C-Grid Nachteile, wenn man periodisch angeordnete Schaufelgitter vernetzen will. Periodizitäten sind mit dem C-Grid nur schwierig zu verwirklichen. Besser dafür geeignet ist das H-Grid, welches im nächsten Punkt beschrieben wird.

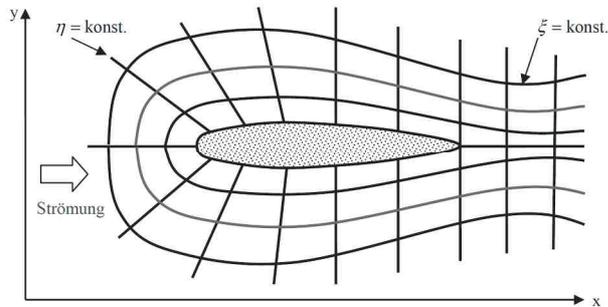


Abbildung 10: C-Grid-Struktur [7]

2.2.2.3. H-Grid-Struktur:

Abbildung 11 zeigt ein Strömungsgebiet zwischen zwei Schaufeln mit einer Zu- und Abströmung und Periodizitätslinien. Die Netzlinien $\zeta = \text{konst.}$ verlaufen entlang der Strömungsrichtung zwischen den Schaufeln hindurch. Die Linien $\eta = \text{konst.}$ verlaufen vom unteren zum oberen periodischen Rand. Eine Verdichtung des Gitters an der Kontur der Schaufeln bewirkt ebenso eine Verdichtung stromauf- und stromabwärts der Schaufeln. Dieser Effekt wird auch Verdichtungsstoß genannt. Stromaufwärts ist er unerwünscht, weil er wegen einer gleichmäßigen Anströmung unnötig ist. Stromabwärts bewirkt er eine bessere Auflösung der Nachlaufströmung und wird somit in der Regel toleriert.

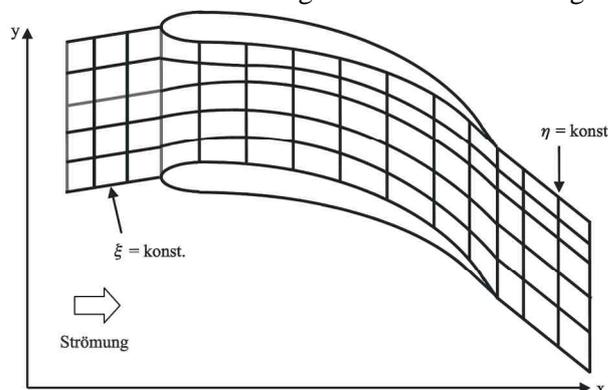


Abbildung 11: H-Grid-Struktur [7]

2.2.2.4. Blockstrukturierte Gitter

Ein blockstrukturiertes Gitter setzt sich aus mehreren, üblicherweise strukturierten Blöcken zusammen. In Abbildung 12 ist ein blockstrukturiertes Gitter mit einem O-Block um die Kreiskontur herum und jeweils einem H-Block stromauf- und stromabwärts des Kreises zu erkennen. Diese Art von Gitter eliminiert den Nachteil des O-Gitters, dass es im Nachlaufgebiet nicht gut auflösen kann.

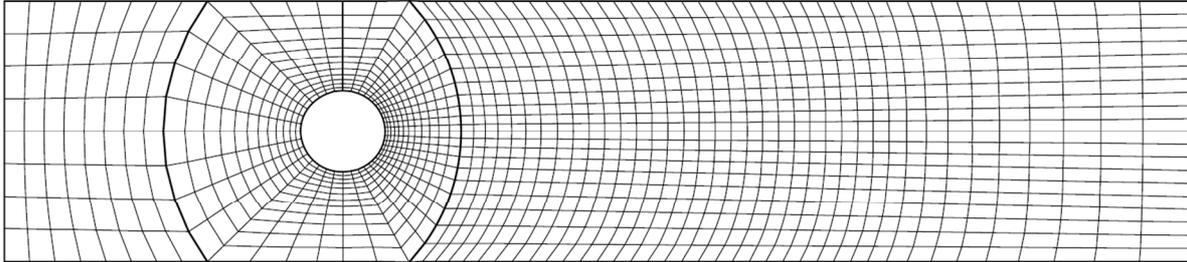


Abbildung 12: Blockstrukturiertes O-H-Gitter [9]

2.2.2.5. Unstrukturierte Netze

Unstrukturierte Netze haben im Vergleich zu strukturierten Netzen nicht die Möglichkeit, die Knotenpunkte mit Indizes zu versehen und somit die Lage der Knotenpunkte eindeutig zu bestimmen. Somit kann bei unstrukturierten Gittern die Finite-Differenzen-Methode nicht angewendet werden, da diese die Indizierung der strukturierten Gitter benötigen. Bei unstrukturierten Netzen muss die Software für jedes Volumenelement die zugehörigen Nachbarelemente kennen und verwalten. Dies bedeutet einen höheren Rechenaufwand. Andererseits sind unstrukturierte Gitter sehr flexibel und können komplexe Geometrien sehr gut darstellen. Üblicherweise werden für dreidimensionale unstrukturierte Gitter Tetraeder, Prismen, Pyramiden oder auch Hexaeder als Volumenelemente verwendet. In Abbildung 13 ist ein dreidimensionales unstrukturiertes Gitter eines Rohrstückes mit Abzweiger zu sehen. Im Inneren sind die Volumenelemente als Tetraeder ausgeführt und im wandnahen Bereich werden Prisma-Elemente zur besseren Auflösung der wandnahen Strömung erzeugt.

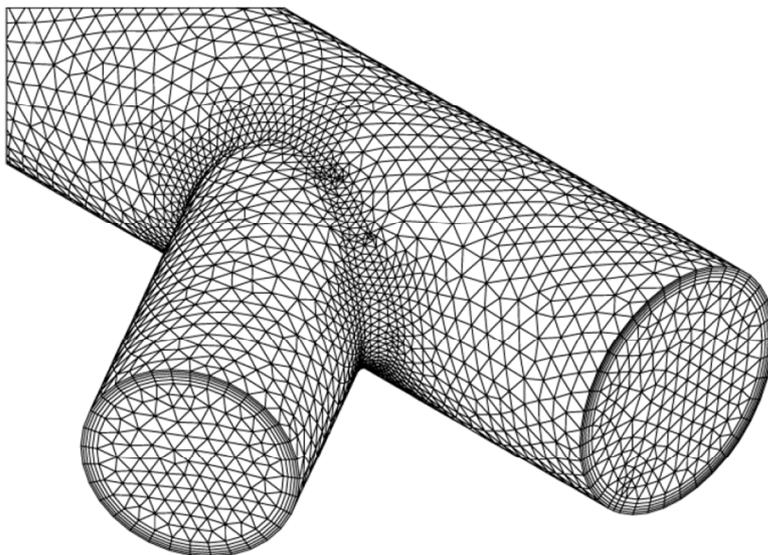


Abbildung 13: Unstrukturiertes Gitter mit Tetraedern und Prismen [9]

2.2.2.6. *Netzverdichtung im wandnahen Bereich*

Bei reibungsbehafteten Strömungen herrscht an einer stehenden Wand die Haftbedingung. Das heißt, dass die Strömung die Geschwindigkeit Null besitzt. Dadurch entsteht ein starker Gradient der Geschwindigkeit senkrecht zur Wand. Um diesen Gradienten ausreichend aufzulösen, muss das Netz im Bereich der Wand verfeinert werden. Abbildung 14 zeigt links ein Strömungsprofil mit starkem Gradienten an der Wand und das zugehörige verdichtete Gitter (rechts).

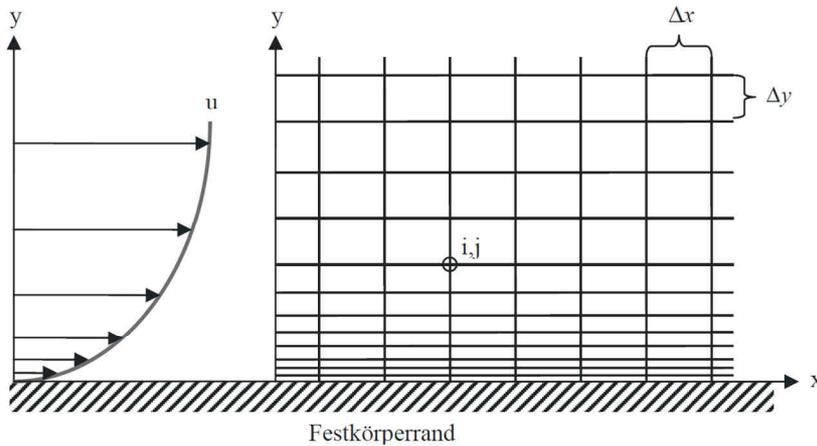


Abbildung 14: Netzverdichtung im wandnahen Bereich [7]

2.2.3. *Turbulenzmodelle*

Wie in Kapitel 2.1.2 bereits erwähnt wurde, sind Strömungen in der Realität fast immer turbulente Strömungen. Die Schwierigkeit bei der Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen von turbulenten Strömungen besteht darin, dass im Vergleich zur laminaren Strömung die Zustandsgrößen viel stärker schwanken. Deshalb werden die Gleichungen komplizierter und sind somit schwieriger (mehr Rechenaufwand) zu lösen. Neben der Direkten Numerischen Simulation (DNS), bei der die Navier-Stokes-Gleichungen unter sehr hohem Rechenaufwand direkt berechnet werden, sind Turbulenzmodelle in Verwendung, um die turbulente Strömung zu beschreiben. Die Turbulenzmodelle sind in folgende Gruppen zu unterteilen:

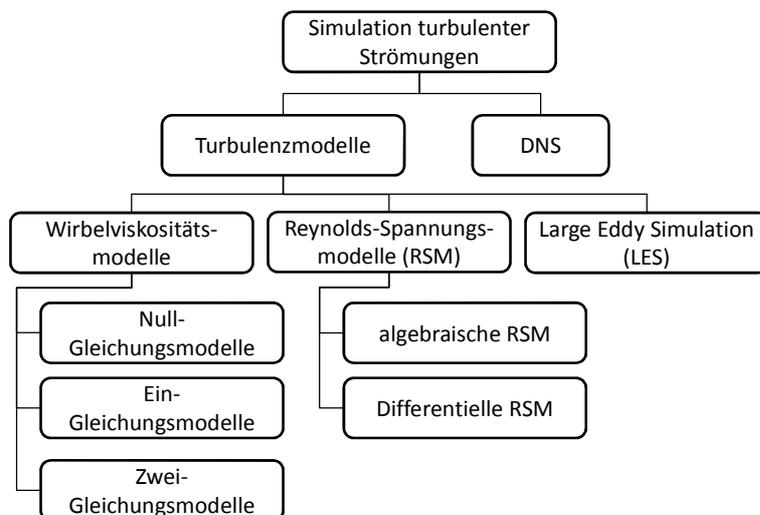


Abbildung 15: Einteilung der Turbulenzmodelle [10]

Im Folgenden werden einige Turbulenzmodelle etwas näher erläutert [7]:

2.2.3.1. Baldwin-Lomax-Modell:

Ein einfaches und robustes Modell ist das Baldwin-Lomax-Modell, welches zu den Null-Gleichungssystemen gehört. Es verwendet keine Differentialgleichung für den Wirbeltransport, sondern es nähert die Wirbelviskosität nur durch eine algebraische Gleichung an. Nachteilig wirkt sich bei diesem Modell die unzureichende Genauigkeit bei abgelösten Strömungen aus, weil die Ablösezone zu klein berechnet werden.

2.2.3.2. k- ϵ -Modell:

Beim k- ϵ -Modell werden zwei zusätzliche Differentialgleichungen für den Wirbeltransport verwendet, weshalb dieses Modell zu den Zwei-Gleichungssystemen zählt. Eine der zwei zusätzlichen Differentialgleichungen behandelt die turbulente kinetische Energie k, die andere behandelt die turbulente Dissipation ϵ . Mit dem k- ϵ -Modell hat man ein stabiles Modell, welches wenig zusätzlichen Rechenaufwand benötigt. Für die Berechnung im Inneren des Strömungsfeldes ist das Modell gut geeignet, jedoch bereitet es Probleme bei Strömungen mit großem Druckgradienten, die an der Wand ablösen. Die Ablösung der Strömung wird zu klein berechnet, weshalb dieses Modell bei Strömungen mit Ablösung an der Wand eher zu optimistische Ergebnisse liefert.

2.2.3.3. k- ω -Modell:

Das k- ω -Modell ist ebenso ein Zwei-Gleichungsmodell und liefert im Vergleich zum k- ϵ -Modell bessere Ergebnisse im Wandbereich. Dies wird durch Verwendung der turbulenten Frequenz ω anstelle der turbulenten Dissipation ϵ erreicht. Im Inneren des Strömungsgebietes ist das k- ω -Modell dem k- ϵ -Modell jedoch unterlegen.

2.2.3.4. SST-Modell:

Das SST-Modell kombiniert die guten Eigenschaften des k- ω -Modells im wandnahen Bereich mit denen des k- ϵ -Modells im Inneren. Mit diesem robusten Modell erreicht man genauere Ergebnisse mit akzeptablen Rechenzeiten. Es liefert auch bei Strömungen mit druckinduzierter Ablösung und Wärmeübergängen gute Ergebnisse.

2.2.3.5. Reynolds-Spannungs-Modelle:

Bei den RS-Modellen werden die Reynolds-Spannungen algebraisch oder über Transportgleichungen anstatt der isotropen Wirbelviskosität berechnet. Für komplexe Strömungen mit starken Sekundärströmungen ist es sehr genau, jedoch ist der Rechenaufwand im Vergleich zu den Wirbelviskositätsmodellen um einiges höher.

2.2.3.6. LES-Modelle:

Die Large-Eddy-Simulation ist eine sogenannte Grobstruktursimulation, welche die größeren Wirbel einer Strömung genauer betrachtet als die kleinen. Dies basiert auf der Tatsache, dass große Bewegungen in der Regel energiereicher sind als kleine Bewegungen und deshalb mehr zum Transport beitragen. Das LES-Modell rechnet dreidimensional und zeitabhängig (transient), was es aufwendiger macht als die zuvor beschriebenen Modelle [9]. Ein weiteres Modell ist die Detached-Eddy-Simulation (DES), bei der im Inneren der Strömung mit LES gerechnet und im wandnahen Bereich ein anderes Turbulenzmodell (z.B. eines der oben genannten Modelle) verwendet wird.

2.2.3.7. *Direkte Numerische Simulation:*

Die exakteste Lösung für eine turbulente Strömung wird mit der Direkten Numerischen Simulation erreicht. Dabei werden die Navier-Stokes-Gleichungen ohne Mittelung und Approximation gelöst und somit werden alle Bewegungen der Strömung erfasst. Die detaillierten Ergebnisse der DNS können zwar sehr hilfreich sein, jedoch benötigt man meistens nicht so detaillierte Informationen der Strömung. Außerdem ist der Rechenaufwand bei diesem Verfahren am höchsten und deshalb auch sehr teuer [9].

In Abbildung 16 ist ein Vergleich zwischen der Direkten Numerischen Simulation (DNS) und der Large-Eddy-Simulation (LES) zu sehen. Links sind die großen Wirbel, auch Large Eddies genannt, im Vergleich zu den kleinen Wirbeln, die mit der DNS berechnet werden können, zu sehen. Rechts ist ein Geschwindigkeitssignal eines einzelnen Punktes der Strömung zu sehen. Mit der DNS werden die Schwankungen viel genauer detektiert.

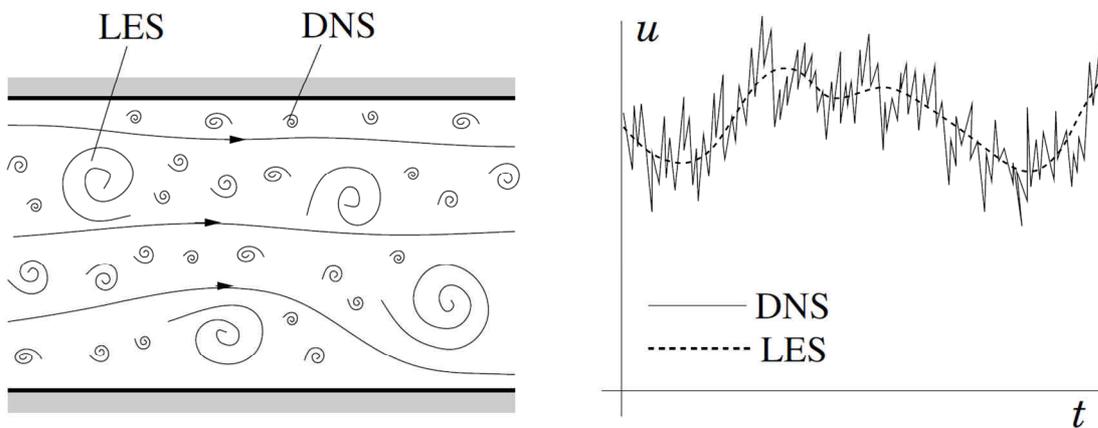


Abbildung 16: Vergleich von LES und DNS [9]

2.2.4. *Lösungsverfahren*

Nach Lecheler [7] werden die Lösungsverfahren in folgende drei Klassen unterteilt: Zentrale Verfahren, Upwind-Verfahren und High-Resolution-Verfahren. Abbildung 17 zeigt die drei Klassen der Lösungsverfahren mit ihren wichtigsten Untergruppen.

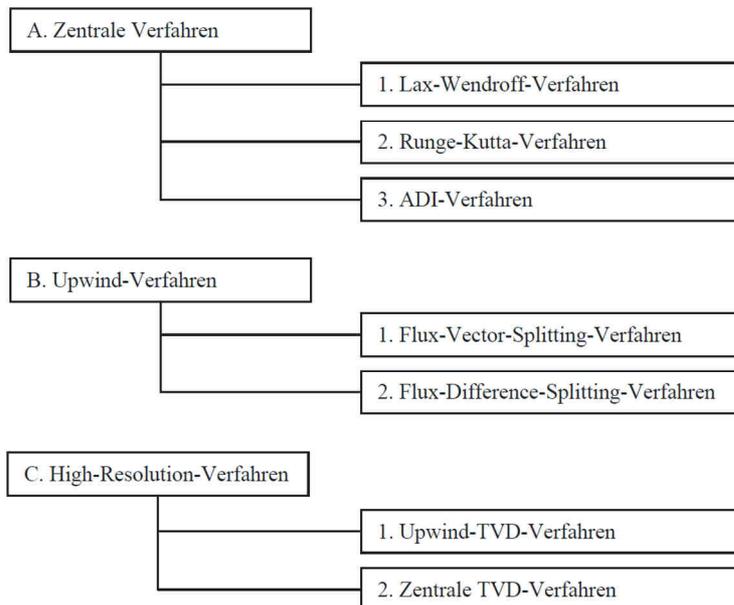


Abbildung 17: Einteilung der Lösungsverfahren [7]

2.2.4.1. Zentrale Verfahren:

Die Diskretisierung der räumlichen Ableitungen sind zentral und von zweiter Ordnung. Die zentrale räumliche Diskretisierung verknüpft Knotenpunkte aus allen Richtungen ohne die Ausbreitungsrichtung von Störungen zu berücksichtigen. Es wird angenommen, dass die Strömungsgrößen stetig sind. Konvergenzprobleme können bei starken Verdichtungsstößen auftreten. Im Folgenden sind die wichtigsten zentralen Verfahren aufgelistet:

- **Lax-Wendroff-Verfahren:**
 - Lax-Wendroff-Verfahren
 - Predictor-Corrector-Verfahren von MacCormack
 - Implizites Verfahren von Lerat
- **Runge-Kutta-Verfahren:**
 - Mehrschnitt-Verfahren von Jameson, Schmidt und Turkel
- **ADI-Verfahren:**
 - Implizites Verfahren von Briley und McDonald
 - ADI-Verfahren von Beam und Warming
 - Schiefwinkeliges ADI-Verfahren von Pulliam und Steger
 - Diagonales ADI-Verfahren von Pulliam und Chaussee

2.2.4.2. Upwind-Verfahren

Die Upwind-Verfahren berücksichtigen die physikalischen Eigenschaften der Strömung, indem eine sogenannte numerische Viskosität hinzugefügt wird, die sich automatisch an den Strömungsgradienten anpasst. Die numerische Viskosität soll idealerweise so klein wie möglich und so groß wie nötig sein. Eine große numerische Viskosität bringt ein gutes Konvergenzverhalten, jedoch kann es die Lösung verfälschen. Diese Verfahren sind sehr stabil, jedoch besitzen die reinen Upwind-Verfahren nur eine räumliche Genauigkeit erster Ordnung. Upwind-Verfahren mit räumlicher Genauigkeit zweiter Ordnung werden High-Resolution-Verfahren genannt und werden in Kapitel 2.2.4.3 behandelt. Die wichtigsten Upwind-Verfahren sind:

- **Flux-Vector-Splitting-Verfahren:**
 - Verfahren 1. Ordnung nach Courant, Isaacson und Reeves
 - Verfahren 1. Ordnung nach Steger und Warming
 - Verfahren 1. Ordnung nach van Leer
- **Flux-Difference-Splitting-Verfahren:**
 - mit exaktem Riemann-Solver
 - Verfahren 1. Ordnung nach Godunov
 - Verfahren 2. Ordnung nach van Leer
 - mit approximiertem Riemann-Solver
 - Roe
 - Enquist und Osher
 - Harten, Lax und van Leer

2.2.4.3. High-Resolution-Verfahren

Zentrale Verfahren sind zwar genau, können aber durch Unstetigkeiten ohne numerische Dämpfung zu Instabilität führen. Reine Upwind-Verfahren sind ungenauer als zentrale Verfahren. Abhilfe schaffen die High-Resolution-Verfahren, die Genauigkeit zweiter Ordnung besitzen und die Entstehung von Oszillationen an Unstetigkeiten verhindern.

- **Upwind-TVD-Verfahren:**
 - van Leer
 - Harten
 - Osher und Chakravarthy
 - Yee und Harten
- **Zentrale TVD-Verfahren:**
 - Roe
 - Yee

Für detaillierte Informationen zu den Lösungsverfahren sei an dieser Stelle auf die Literatur nach Lecheler [7] und Ferziger/Perić [9] verwiesen.

3. Verwendete Software

In diesem Kapitel wird die für die Durchführung dieser Masterarbeit verwendete Software in Kürze beschrieben.

3.1. CATIA V5

CATIA V5 (Computer Aided Three dimensional Interactive Application) ist ein Programmsystem zur computerunterstützten Konstruktion, Simulation und Verwaltung von Bauteilen. Es vereint CAD (Computer Aided Design), CAE (Computer Aided Engineering) und CAM (Computer Aided Manufacturing). Mit CATIA V5 können Geometrien erzeugt und analysiert werden. Des Weiteren können die erzeugten Daten mit den in CATIA integrierten CAE- und CAM-Modulen weiter bearbeitet werden [11]. Mit CATIA können dreidimensionale Draht-, Flächen- und Volumenmodelle erstellt werden und daraus zweidimensionale Zeichnungen abgeleitet werden.

Für die Konstruktion der Verteilrohrleitung wurde im Modul für Flächenerzeugung gearbeitet, da für die Erzeugung der Rechengitter nur die hydraulische Kontur notwendig ist.

3.2. Ansys ICEM CFD 12.1

Ansys ICEM CFD ist eine Software zur Geometrieerfassung, Netzerzeugung und Netzoptimierung. In ICEM erzeugte Gitter werden für CFD-Analysen aber auch für Struktur-Analysen verwendet. Mit ICEM können Rechnetze in folgenden Formaten erstellt werden [12]:

- Multiblock strukturiert
- Unstrukturiert hexaedrisch
- Unstrukturiert tetraedrisch
- Kartesisch mit H-Grid-Verfeinerung
- Hybrid-Gitter bestehend aus Hexaedern, Tetraedern, Pyramiden und Prismen
- Viereckige und dreieckige Oberflächengitter

Mit ICEM können Geometriedaten aus allen heute gängigen Dateiformaten importiert werden. Es können 3D-CAD-Daten genauso wie Scan-Datensätze oder Punktkoordinaten importiert werden.

Der Arbeitsablauf in Ansys ICEM CFD sieht im Groben folgendermaßen aus [12]:

- Öffnen/Erstellen eines Projektes
 - Erzeugen/Verändern der Geometrie
 - Erzeugung des Rechnetzes
 - Überprüfen/Editieren des Netzes
 - Rechnetze für benötigten Solver ausschreiben
- ↻ Qualitätskriterien für das Gitter

Folgende Qualitätskriterien für die Gittergenerierung werden meist in Betracht gezogen:

- quality
- aspect ratio
- angle
- mesh expansion factor
- volume (um zu überprüfen ob Elemente mit negativem Volumen erzeugt wurden)
- u.v.m.

3.3. Ansys CFX Pre 13.0

Ansys CFX Pre ist eine Pre-Processing-Software, mit der man Rechenetze importiert, physikalische Modelle auswählt und das Rechen-setup für die Lösung durch den Solver vorbereitet. In CFX Pre werden folgende Arbeitsschritte durchgeführt [13]:

- **Importieren/Transformieren von Rechenetzen:**

In CFX Pre können Netze aus verschiedenen Mesher-Programmen importiert werden. Diese Mesh File-Typen sind zum Beispiel ICEM CFD Files, Ansys Meshing Files, CFX-Mesh Files, BladeGenPlus Files u.a. Nachdem die Netze importiert sind, können sie noch positioniert und skaliert werden.

- **Definieren von Domains:**

CFX Pre benutzt Domains, um die Eigenschaften, den Typ und die Region des Fluides zu definieren. Hier werden Turbulenzmodelle, Modelle für Wärmetransport und andere physikalische Modelle ausgewählt. In manchen Fällen werden mehrere Domains definiert, die mit einem Domain Interface verbunden werden müssen (siehe nächster Punkt).

- **Erzeugen von Domain Interfaces:**

Domain Interfaces werden verwendet, um Domains zu verbinden, bei denen die Knotenpunkte nicht 1:1 zusammenpassen (z.B. unstrukturiertes Tetraeder-Netz mit strukturiertem Hexaeder-Netz verbinden). Die Verbindungsstelle einer rotierenden Domain und einer stehenden Domain oder zweier periodischer Verbindungsflächen werden ebenfalls mit Interfaces definiert.

- **Definieren von Randbedingungen:**

Randbedingungen müssen an allen Randflächen der Domain definiert werden. Solche Randbedingungen können Einlässe (inlets), Auslässe (outlets), Öffnungen (openings), Wände (walls) und Symmetrieebenen (symmetry planes) sein. Wird eine Domain-Fläche nicht definiert, dann wird sie von CFX Pre standardmäßig als reibungsfreie, adiabate Wand definiert. Außerdem wird diese Wand auf die jeweilige Domain bezogen als stehend definiert.

- **Definition der Initialisierung:**

Die Initialisierung ist die Belegung des Strömungsfeldes mit den sogenannten Anfangswerten (initial values) noch bevor der erste Rechenschritt des Solvers erfolgt ist. Für eine stationäre Rechnung entspricht diese Initialisierung einer Anfangsschätzung. Eine gut gewählte Initialisierung kann die Rechenzeit verkürzen und das Konvergenzverhalten verbessern. Für eine transiente Rechnung ist eine Initialisierung verpflichtend, es sei denn, man verwendet eine Lösung einer stationären Rechnung, was im Grunde auch wie eine Initialisierung gesehen werden kann.

- **Einstellen der Solver Control:**

Die Solver Control definiert Parameter für den CFX Solver. Hier werden die Lösungsverfahren, die Konvergenzkriterien oder die geplante Anzahl an zu rechnenden Iterationsschritten definiert. Die Konvergenzkriterien entscheiden darüber, ob eine Rechnung vor der geplanten Zeit (Anzahl der Iterationsschritte) abgebrochen wird.

- **Einstellen der Output Control:**

In der Output Control wird definiert, in welcher Form der Solver die Daten ausschreibt bzw. wie häufig Backups der Lösung ausgeschrieben werden. Außerdem können in der Output Control Monitor-Daten eingestellt werden, um während der Rechnung den Konvergenzverlauf bestimmter ausgewählter Strömungsgrößen zu beobachten (siehe Abbildung 63 und 64 auf Seite 69 und 70).

- **Definieren der Expressions:**

Die Expressions sind Gleichungen, mit denen im Falle dieser Masterarbeit zum Beispiel die Verlusthöhe oder der Druckverlustbeiwert aus der Totaldruckdifferenz zwischen Eintritt und der Auswerteebene berechnet wird. Die Expressions können später im Ansys CFD Post noch bearbeitet oder neu definiert werden.

3.4. Ansys CFX Solver 13.0

Der Solver ist das Lösungsprogramm, welches das im CFX Pre definierte Strömungsfeld berechnet und löst. Dabei unterscheidet man, ob der Solver die Rechnung seriell oder parallel durchführt.

Mit dem CFX Solver Manager hat man die Möglichkeit, die vom Solver im Moment durchgeführte Rechnung zu beobachten. Mit den im CFX Pre eingestellten Monitor Points und den Residuals kann die Konvergenz überprüft werden. Es wird definiert, ob der Solver seriell oder parallel rechnet. Die serielle Rechnung, bei der nur auf einem Prozessor gerechnet wird, ist standardmäßig eingestellt. Bei der parallelen Rechnung kann noch unterschieden werden, ob auf einem Computer (local parallel) oder auf mehreren Geräten (distributed parallel) gerechnet wird. Bei der parallelen Rechnung ist eine Partitionierung (Aufteilung) des Strömungsfeldes notwendig, da jeder Prozessor nur einen bestimmten Bereich des Strömungsfeldes berechnet [14].

3.5. Ansys CFD Post 13.0

Ansys CFD Post besitzt eine Benutzeroberfläche, auf der alle Ergebnisse der vom Solver gelieferten Rechnung graphisch angezeigt werden können. Hier können Contour-Plots, Vector-Plots, Streamlines, Particle Tracks etc. erstellt werden. Außerdem können Berechnungsgleichungen (Expressions) erstellt werden. Wenn diese im CFX Pre schon definiert wurden, können sie editiert werden. Die Berechnungsgleichungen liefern die gewünschten Zahlenwerte, die auch exportiert werden können. Output-Formate für graphische Darstellungen sind .jpeg, .png, verschiedene .bmp-Formate und auch .mpeg-Dateiformate für die Darstellung von transienten Ergebnissen [15].

4. Referenz-Verteilrohrleitung

Die Geometrie der Referenzleitung wurde von Herrn König im Dateiformat .stp abgespeichert und zur weiteren Bearbeitung freigegeben. Für die Berechnung der Strömung ist nur die hydraulische Kontur notwendig, weshalb alle Außenflächen der Leitung gelöscht werden. Abbildung 18 zeigt die hydraulische Kontur der Referenzleitung.

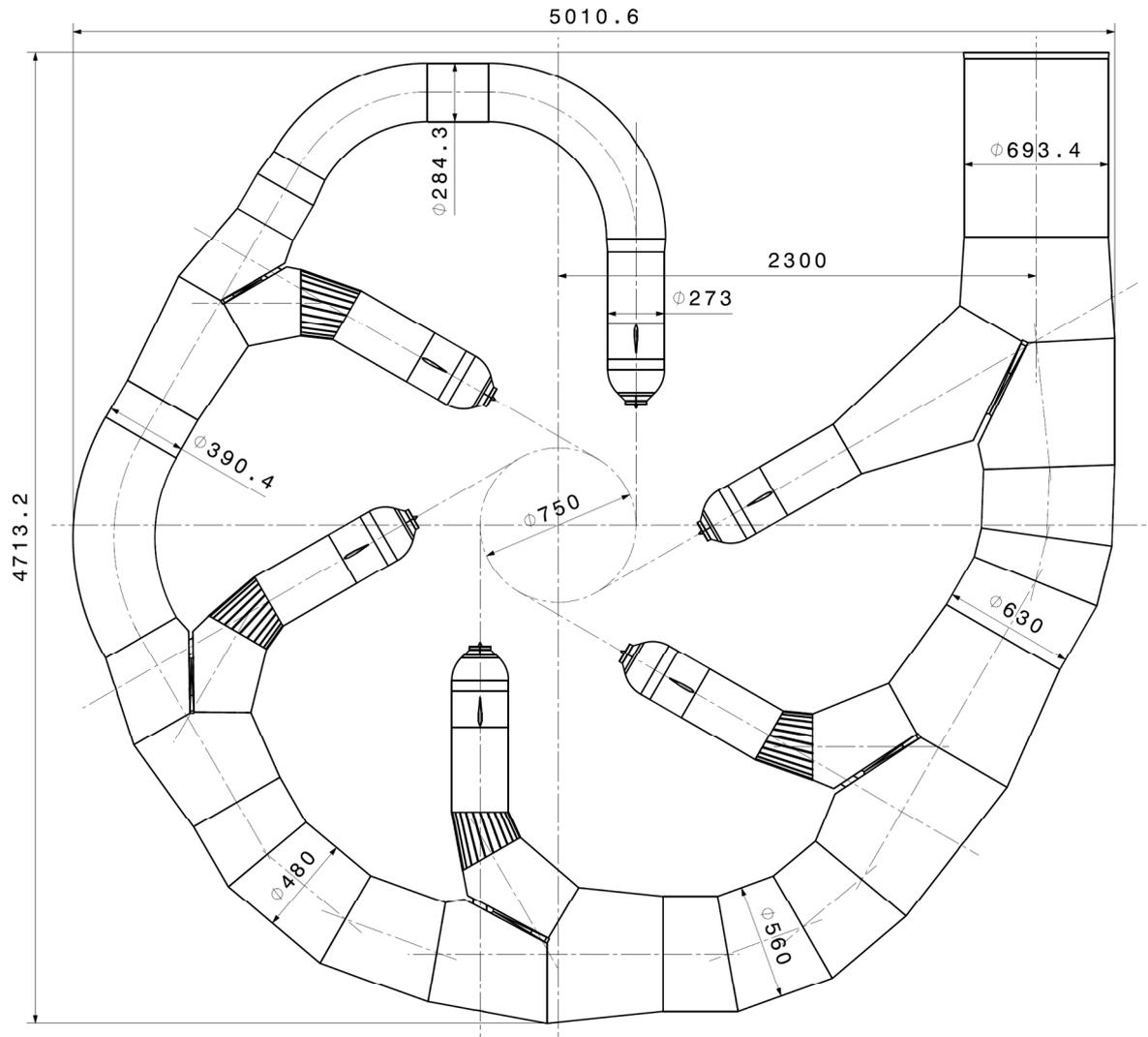


Abbildung 18: Hydraulische Kontur der Referenz-Verteilrohrleitung

Die Pelton turbine der Referenzleitung besitzt folgende Eckdaten:

Nettofallhöhe :	$H = 120,60 \text{ m}$
Durchfluss:	$Q = 1500 \text{ l/s}$
Turbinenleistung	$P = 1575 \text{ kW}$
Drehzahl:	$n = 600 \text{ min}^{-1}$

Die spezifische Drehzahl n_q errechnet sich nach Jaberg [16] wie folgt:

$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}} = 600 \cdot \frac{\sqrt{1,5}}{120,6^{3/4}} = 20,19 \text{ min}^{-1} \quad (4.1)$$

Für die Auslegung des Laufrades unter Berücksichtigung der richtigen Drehzahl für die Netzeinspeisung (Generatorpolpaarzahl p und Netzfrequenz f) wird nach Zhang [2] die Gleichung 4.1 mit der Düsenanzahl Z_D erweitert zu:

$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt{Z_D \cdot H^{3/4}}} = 600 \cdot \frac{\sqrt{1,5}}{\sqrt{6 \cdot 120,6^{3/4}}} = 8,24 \text{ min}^{-1} \quad (4.2)$$

Abbildung 19 zeigt den Einsatzbereich verschiedener Turbinen. Auf der Ordinate ist die Fallhöhe h_f in m und auf der Abszisse ist die spezifische Drehzahl n_q in min^{-1} aufgetragen. Die Turbine der Referenzleitung liegt mit $h_f = 120,6 \text{ m}$ und $n_q = 20,2 \text{ min}^{-1}$ im unteren Leistungsbereich der Pelton-turbinen.

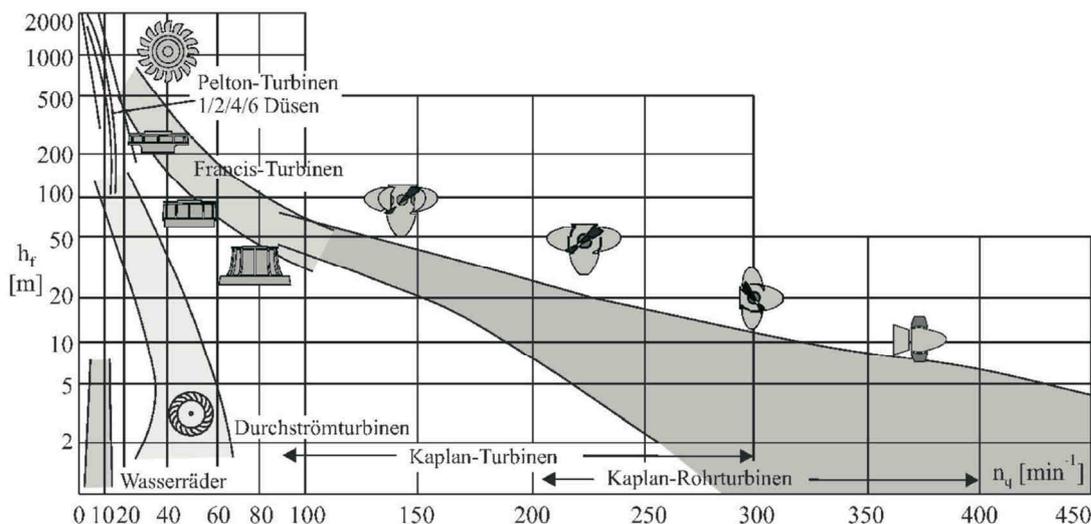


Abbildung 19: Einteilung hydraulischer Strömungsmaschinen über die spezifische Drehzahl [16]

4.1. Meshing, Solver-Setup

Die .stp-file der bestehenden Leitung wurde in Ansys ICEM CFD importiert und die Geometrie vereinfacht, indem nicht gebrauchte Flächen gelöscht wurden. Für die Berechnung der Leitung wird nur die hydraulische Kontur benötigt. Die Verteilrohrleitung wurde in der Symmetrieebene geteilt, sodass nur eine Hälfte der Leitung vergittert werden muss. Damit kann der Rechenaufwand beim Vergittern stark verringert werden. Die Leitung wurde bis zum geraden Rohrstück der Düsen vergittert. Die Düsen wurden extra vergittert und später durch ein Interface mit der Leitung verbunden. Für die ersten Rechnungen wurden die Gitter unstrukturiert erzeugt, was für eine erste Abschätzung der Ergebnisse ausreicht.

In Ansys CFX Pre wurde das Rechengitter der Leitung geladen und in der Symmetrieebene gespiegelt. Die beiden Hälften wurden mit einem Interface (GGI) verbunden. Das Gitter der Düsen wurde insgesamt 6-mal geladen und an die vorgesehenen Positionen verschoben. Die Düsen wurden mit einem Interface (GGI) mit der Leitung verbunden.

Für die Berechnung der Referenzleitung wurde für den Austritt der Düse ein Zylinder konstruiert, um den Raum zu simulieren, in den der Wasserstrahl eintritt. Alle Rechnungen wurden vorerst einphasig gerechnet, das heißt, dass im Austrittsraum nur mit dem Fluid Wasser gerechnet wird. Dies entspricht zwar nicht der Realität, weil der Freistrah in das mit Luft gefüllte Turbinengehäuse strömt. Aber für die erste Abschätzung und den Vergleich der Strömungsverluste ist diese Annahme vorerst ausreichend. Die zweiphasigen Rechnungen folgen im späteren Teil dieser Arbeit. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Parameter des Solver-Setups zusammengefasst.

Tabelle 1: Solver-Setup Referenz-Verteilrohrleitung

Gitterart	Unstrukturiertes Gitter mit 6 Wandschichten Düsenrohre extra vergittert
Turbulenzmodell	SST
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet 1495,5 kg/s
Randbedingung am Austritt	opening pressure and direction static pressure = 1 bar
einphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

4.2. Auswertung

Die Auswertung der Referenzleitung erfolgte bei jeder einzelnen Düse in einer definierten Ebene, welche 30 mm von der Austrittskante der Düse nach innen versetzt ist (siehe Abbildung 20). Der Versatz dieser Ebene wurde gewählt, da bei der Auswertung direkt an der Austrittskante starke Abweichungen zwischen den einzelnen Düsen zu erkennen waren.

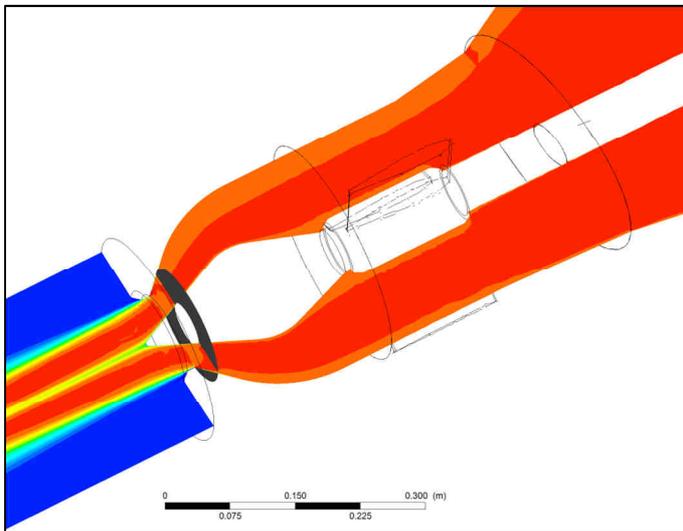


Abbildung 20: Auswertungsebene 30 mm

Tabelle 2 zeigt den Durchfluss Q am Eintritt und die Durchflüsse Q_1 bis Q_6 der einzelnen Düsen. Zusätzlich wurde eine Abweichung vom Mittelwert wie folgt berechnet:

$$\text{Abweichung} = \left(\frac{-Q_1}{Q/6} - 1 \right) \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad (4.3)$$

Die Geschwindigkeiten wurden über den Durchfluss ermittelt:

$$v_{Düse1} = \frac{Q_1}{A_1} \quad \text{in m/s} \quad (4.4)$$

Die Verlusthöhe h_v ergibt sich aus der Differenz des Totaldrucks zwischen Eintritt und der Auswertungsebene der Düsen:

$$h_{v1} = \frac{p_{tot_ein} - p_{tot_aus1}}{\rho \cdot g} \quad \text{in m} \quad (4.5)$$

Der dimensionslose Druckverlustbeiwert ζ ergibt sich aus der Differenz des Totaldrucks zwischen Eintritt und der Auswertungsebene der Düsen und der Geschwindigkeit in der Auswertungsebene:

$$\zeta_1 = \frac{2 \cdot (p_{tot_ein} - p_{tot_aus1})}{\rho \cdot v_{Düse1}^2} \quad (4.6)$$

Tabelle 2: Auswertung Referenz-Verteilrohrleitung

Q	1500,00 l/s	Abweichung
Q ₁	-252,96 l/s	1,18 %
Q ₂	-251,23 l/s	0,49 %
Q ₃	-249,36 l/s	-0,26 %
Q ₄	-250,04 l/s	0,01 %
Q ₅	-246,84 l/s	-1,27 %
Q ₆	-249,58 l/s	-0,17 %
Summe	-1500,00 l/s	

30 mm Versatz		
V _{Eintritt}	3,94 m/s	h _{v1} 0,31 m
V _{Düse1}	-20,73 m/s	h _{v2} 0,49 m
V _{Düse2}	-20,59 m/s	h _{v3} 0,56 m
V _{Düse3}	-20,44 m/s	h _{v4} 0,57 m
V _{Düse4}	-20,49 m/s	h _{v5} 0,55 m
V _{Düse5}	-20,23 m/s	h _{v6} 0,49 m
V _{Düse6}	-20,46 m/s	∅h _v 0,49 m

ζ ₁	0,40
ζ ₂	0,62
ζ ₃	0,71
ζ ₄	0,72
ζ ₅	0,70
ζ ₆	0,62
∅ζ	0,62

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q ₁ bis Q ₆ ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
A ₁ bis A ₆ ...	Querschnittsfläche der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m ²
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
p _{tot_ein} ...	Totaldruck am Eintritt in die Verteilrohrleitung in Pa
p _{tot_aus1} bis p _{tot_aus6} ...	Totaldruck der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in Pa
ρ...	Dichte von Wasser in kg/m ³
g...	Erdbeschleunigung in m/s ²
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
∅h _v ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
∅ζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten

Die Summe der Verlusthöhen beträgt 2,39 m. Das entspricht 1,98 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. In Abbildung 21 sind Contour-Plots von Geschwindigkeit und Totaldruck zu sehen. Links erkennt man beim Abzweiger der ersten Düse ein großes Gebiet mit Wirbelbildung.

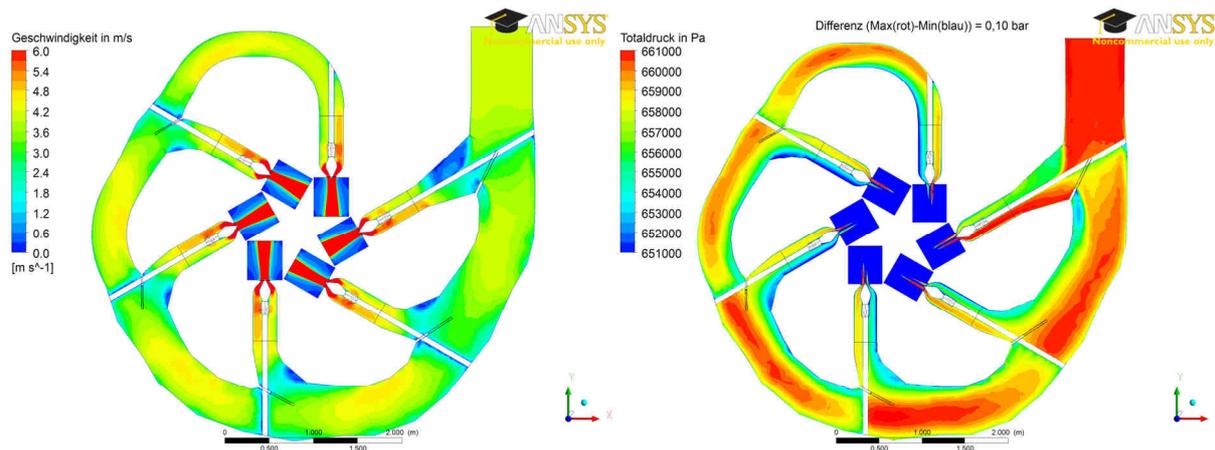


Abbildung 21: Auswertung Referenz-Verteilrohrleitung

Dieses Rechenergebnis wird als erste Referenz für die weiteren Auswertungen der neuen Verteilrohrleitung verwendet.

5. Neue Verteilrohrleitung

Die Anforderungen an die neue Leitung sind:

- Kostengünstige Konstruktion bei geringen Fallhöhenverlusten.
- Einteilung der Ringleitung in 12 gleiche Rohrschüsse mit konstantem Durchmesser.
- Es soll eine außenregulierte und eine innenregulierte Leitung konstruiert werden.
- Von diesen beiden Varianten wird jeweils eine nach der sechsten Düse geschlossen bzw. offen konstruiert.

Die Konstruktion der Leitung wurde in CATIA V5 als Flächenmodell aufgebaut und für die weitere Verarbeitung mit ICEM als .stp-Datei exportiert.

5.1. VRL neu Version 1

5.1.1. Konstruktion

In Abbildung 22 ist die Konstruktion der ersten Version der neuen Verteilrohrleitung zu sehen. Vorerst wurde eine offen außenregulierte Version konstruiert. Bei dieser Version wird die Geometrie der Düsen von der Referenzleitung übernommen und somit auch das Rechengitter. Der Kegel des Abzweigers und die Düse liegen auf derselben Achse. Der Kegel hat einen Öffnungswinkel von 41° und das Verbindungsrohr zwischen Düse und Kegel hat eine Länge von 300 mm. Die Position und Größe des Eintrittsdurchmessers der Verteilrohrleitung wurde wie bei der Referenzleitung belassen. Dieser Durchmesser wurde wie gefordert in der gesamten Leitung beibehalten und somit ergibt sich auch die Größe der Ringleitung.

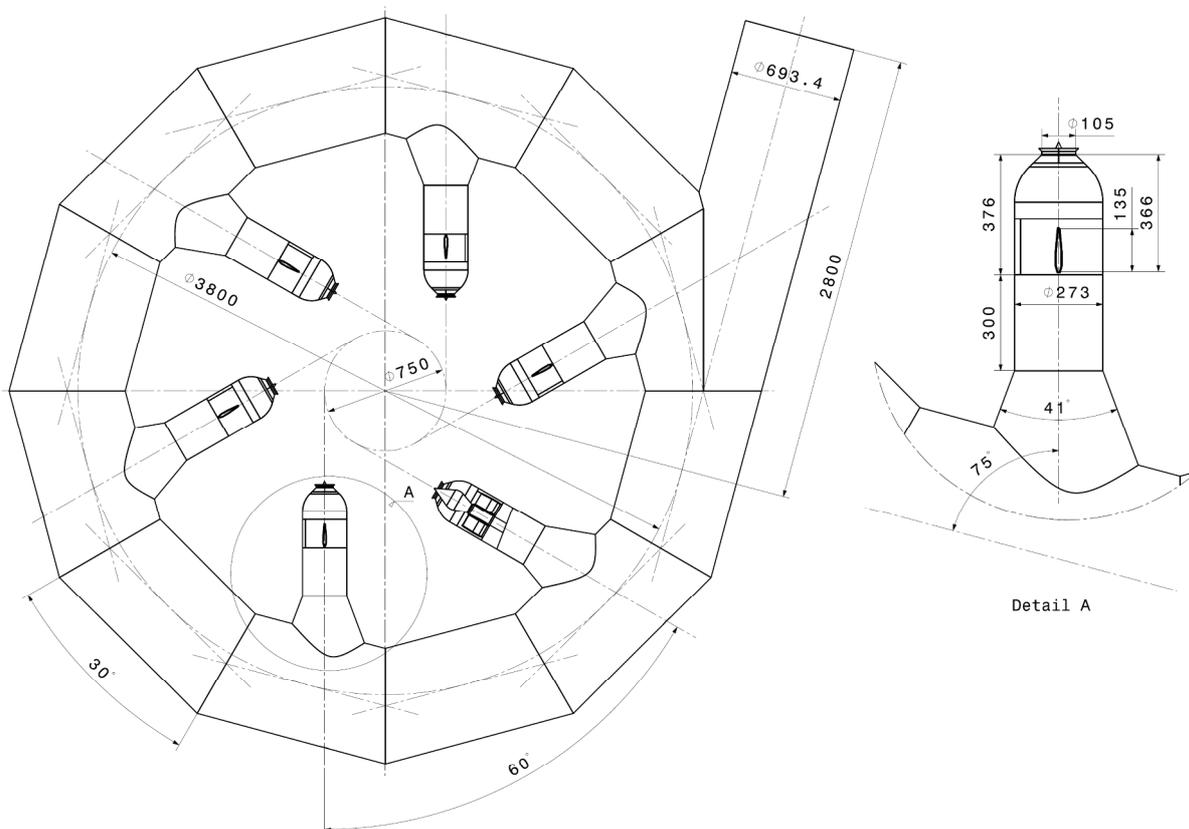


Abbildung 22: Konstruktion VRL neu Version 1 mit Detail des Abzweigers und der Düse

5.1.2. Meshing, Solver-Setup

Das Rechengitter der Leitung wurde unstrukturiert mit 6 wandnahen Prismenschichten vergittert. Für die Düsen wurde das gleiche Rechengitter verwendet wie für die Referenzleitung.

Die Rechnung erfolgte mit einer Randbedingung „opening – opening pressure and direction“ beim Austritt und „massflow-inlet“ beim Eintritt. Die wichtigsten Parameter des Solver-Setups sind in Tabelle 3 gezeigt.

Tabelle 3: Solver-Setup VRL neu Version 1

Gitterart	Unstrukturiertes Gitter mit 6 Wandschichten
Turbulenzmodell	SST
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet 1495,5 kg/s
Randbedingung am Austritt	opening pressure and direction static pressure = 1 bar
einphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

5.1.3. Auswertung

Die Auswertung erfolgte wie bei der Referenzleitung in einer Auswertungsebene mit 30 mm Versatz (siehe Abbildung 20). Die Summe der Verlusthöhen beträgt 8,64 m. Das entspricht 7,16 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Auswertung VRL neu Version 1

Q	1500,00 l/s	Abweichung
Q ₁	-251,59 l/s	0,64 %
Q ₂	-251,13 l/s	0,45 %
Q ₃	-249,76 l/s	-0,09 %
Q ₄	-250,68 l/s	0,27 %
Q ₅	-249,70 l/s	-0,12 %
Q ₆	-247,13 l/s	-1,15 %
Summe	-1500,00 l/s	

30 mm Versatz		
V _{Eintritt}	4,04 m/s	h _{v1} 1,09 m
V _{Düse1}	-20,62 m/s	h _{v2} 1,90 m
V _{Düse2}	-20,58 m/s	h _{v3} 1,73 m
V _{Düse3}	-20,47 m/s	h _{v4} 1,50 m
V _{Düse4}	-20,54 m/s	h _{v5} 1,30 m
V _{Düse5}	-20,46 m/s	h _{v6} 1,12 m
V _{Düse6}	-20,25 m/s	∅h _v 1,44 m

ζ ₁	1,31
ζ ₂	2,29
ζ ₃	2,08
ζ ₄	1,80
ζ ₅	1,56
ζ ₆	1,35
∅ζ	1,73

Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q ₁ bis Q ₆ ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
∅h _v ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
∅ζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten

In Abbildung 23 werden die Contour-Plots für Geschwindigkeit und Totaldruck gezeigt. Hierbei ist zu bedenken, dass der Maximalwert der Geschwindigkeitsskala bei 8 m/s liegt. Der Geschwindigkeitsplot weist einen Bereich erhöhter Geschwindigkeit beim Abzweiger der Düse 2 auf.

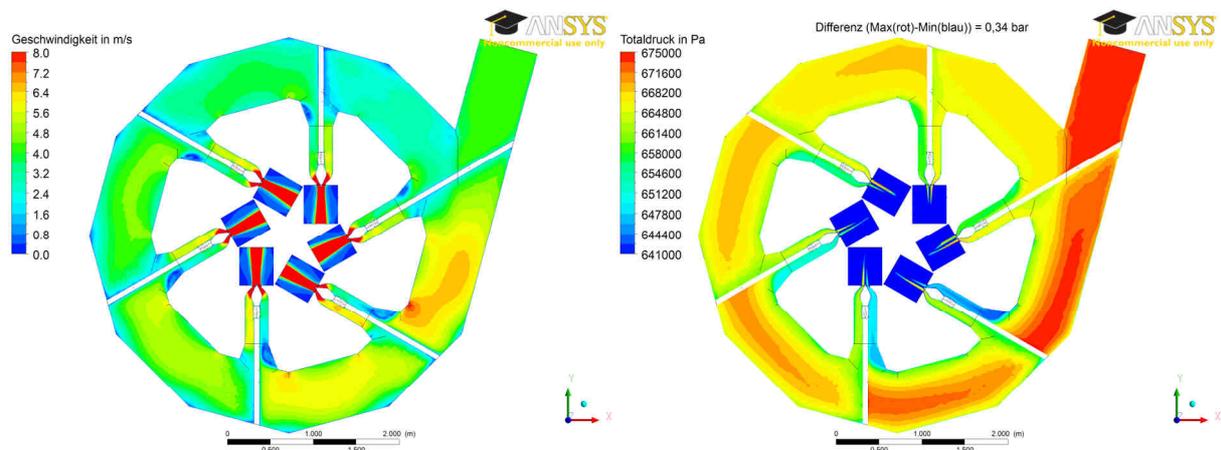


Abbildung 23: Auswertung VRL neu Version 1

5.2. VRL neu Version 2

5.2.1. Konstruktion

Die Konstruktion der Version 2 ist in Abbildung 24 zu sehen. Bei dieser Leitung wurde der Abzweiger als elliptischer Konus mit einem Öffnungswinkel von 40° ausgeführt. Der Winkelversatz des Kegels zur Düsenachse beträgt 20° . Alle weiteren Abmaße wurden von Version 1 übernommen.

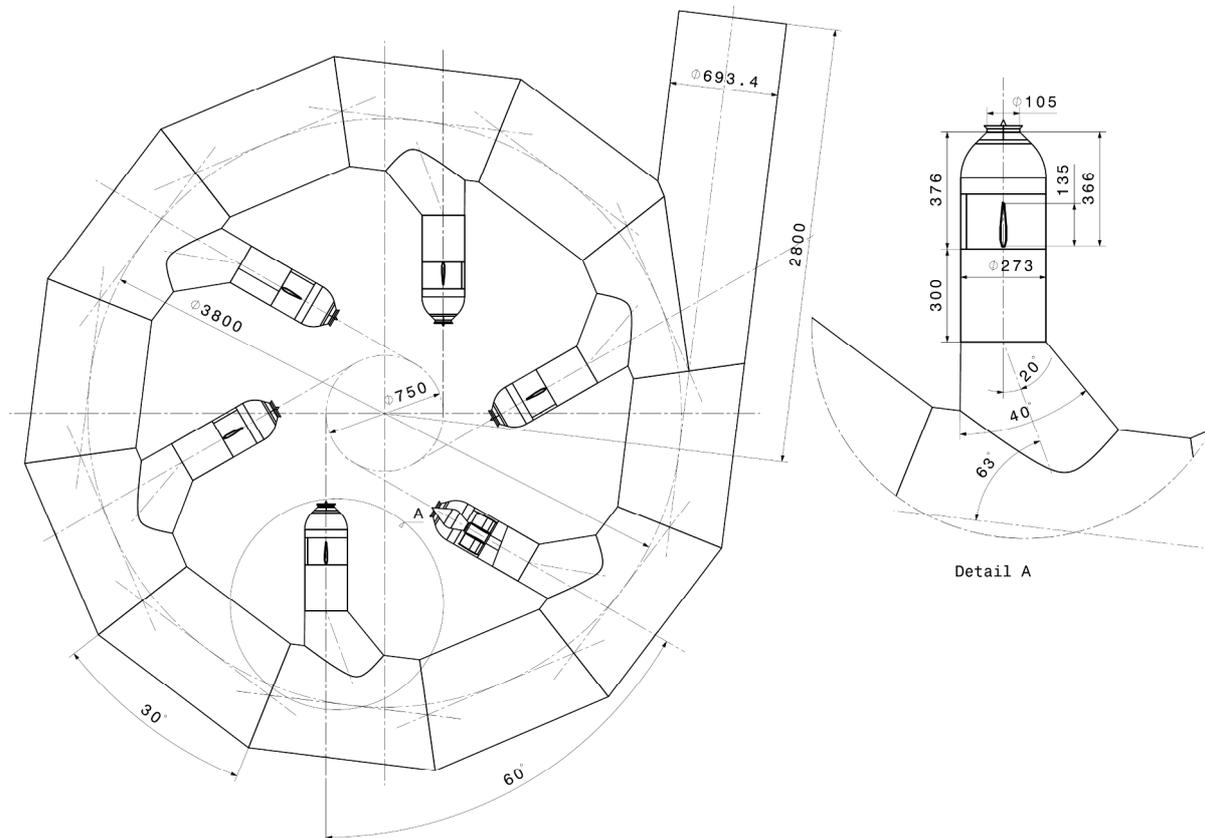


Abbildung 24: Konstruktion VRL neu Version 2 mit Detail des Abzweigers und der Düse

5.2.2. Meshing, Solver-Setup

Alle Parameter betreffend Vergitterung und Solver-Setup bleiben unverändert wie bei der Version 1 und werden in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Solver-Setup VRL neu Version 2

Gitterart	Unstrukturiertes Gitter mit 6 Wandschichten
Turbulenzmodell	SST
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet 1495,5 kg/s
Randbedingung am Austritt	opening pressure and direction static pressure = 1 bar
einphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

5.2.3. Auswertung

Die Summe der Verlusthöhen beträgt 8,04 m. Das entspricht 6,67 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. Tabelle 6 fasst die Rechenergebnisse der neuen Verteilrohrleitung Version 2 zusammen.

Tabelle 6: Auswertung VRL neu Version 2

Q	1500,00 l/s	Abweichung
Q ₁	-252,91 l/s	1,16 %
Q ₂	-250,46 l/s	0,18 %
Q ₃	-249,01 l/s	-0,40 %
Q ₄	-249,76 l/s	-0,10 %
Q ₅	-248,98 l/s	-0,41 %
Q ₆	-248,89 l/s	-0,44 %
Summe	-1500,00 l/s	

30 mm Versatz

v _{Eintritt}	4,03 m/s	h _{v1}	1,08 m
v _{Düse1}	-20,73 m/s	h _{v2}	1,73 m
v _{Düse2}	-20,53 m/s	h _{v3}	1,55 m
v _{Düse3}	-20,41 m/s	h _{v4}	1,39 m
v _{Düse4}	-20,47 m/s	h _{v5}	1,20 m
v _{Düse5}	-20,41 m/s	h _{v6}	1,09 m
v _{Düse6}	-20,40 m/s	Øh _v	1,34 m

ζ ₁	1,30
ζ ₂	2,09
ζ ₃	1,87
ζ ₄	1,68
ζ ₅	1,45
ζ ₆	1,32
Øζ	1,62

Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q ₁ bis Q ₆ ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
v _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
v _{Düse1} bis v _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
Øh _v ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
Øζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten

In Abbildung 25 werden die Contour-Plots für Geschwindigkeit und Totaldruck gezeigt. Der Maximalwert der Geschwindigkeitsskala liegt bei 8 m/s. Der Geschwindigkeitsplot weist wie bei der Version 1 einen Bereich erhöhter Geschwindigkeit unmittelbar vor dem Abzweiger der Düse 2 auf.

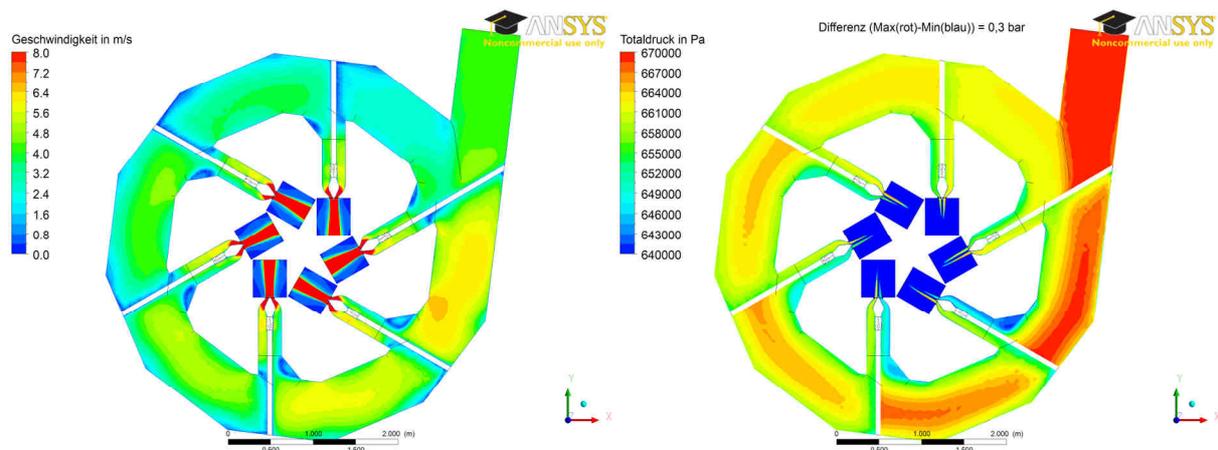


Abbildung 25: Auswertung VRL neu Version 2

5.3. VRL neu Version 3

Bei der Version 3 wurden erstmals alle vier Varianten untersucht, die im Folgenden beschrieben werden.

5.3.1. *Offen außenregulierte Leitung*

5.3.1.1. Konstruktion

Abbildung 26 zeigt die Konstruktion der Version 3 der Verteilrohrleitung in der offen außenregulierten Ausführung. Bei dieser Leitung wurden die Abmessungen so verändert, dass die Leitung am Turbinengehäuse (siehe strich-punktiertes Hexagon in Abbildung 26) anliegt bzw. dieses leicht durchdringt. Hierzu wurde das Eintrittsrohr näher an die Abmessungen des Turbinengehäuses herangeführt. Der Abzweiger wurde als Kegel mit einem Öffnungswinkel von 37° konstruiert. Die Achse des Kegels hat einen Winkelversatz von 10° zur Düsenachse. Die Düse hat einen Durchmesser von 273 mm und der Kegel hat düsenseitig einen Durchmesser von 300 mm.

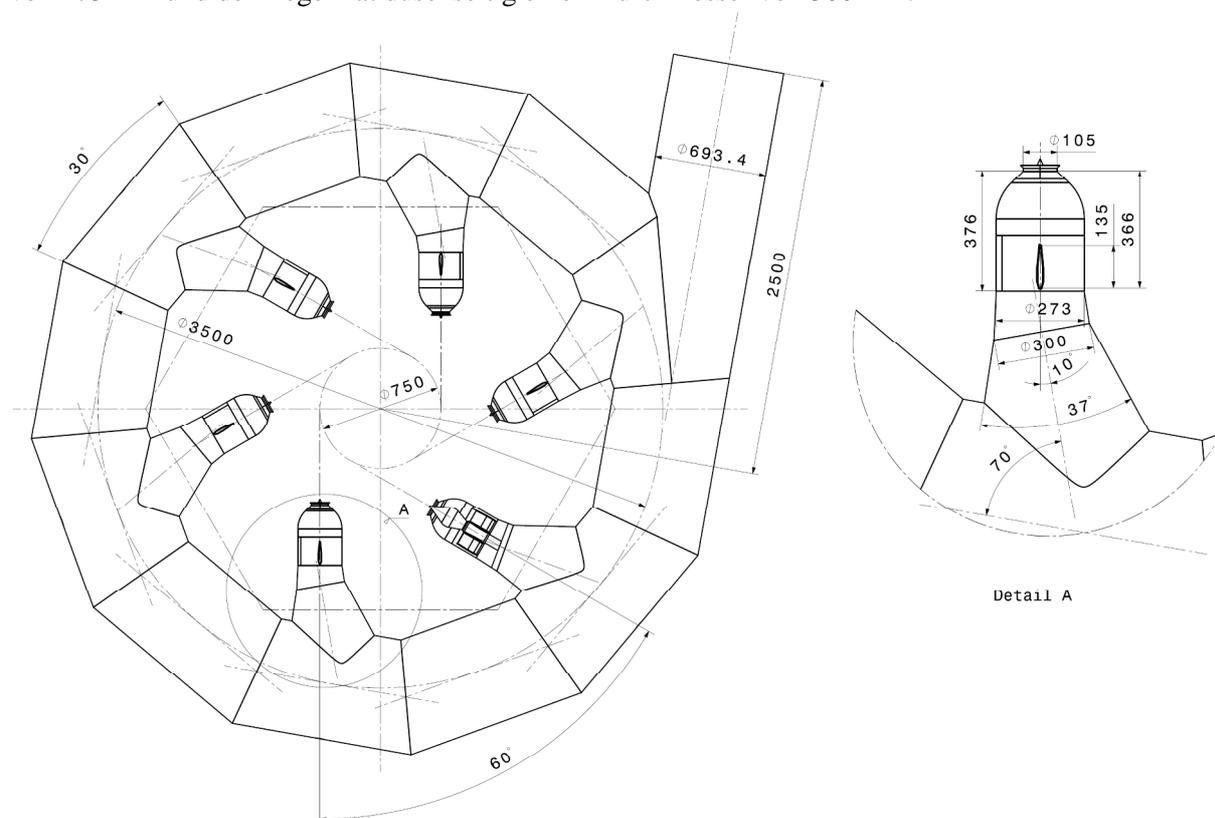


Abbildung 26: Konstruktion VRL neu Version 3 offen außenreguliert mit Detail des Abzweigers und der Düse

5.3.1.2. Meshing, Solver-Setup

Die Leitung wurde außen unstrukturiert mit 6 Wandschichten vergittert und die dreiflügelige Nadelstütze wurde separat unstrukturiert vergittert. Jener Bereich nach der Nadelstütze wurde mit einer O-Grid Struktur vergittert, wobei auch hier die Wandschichten feiner gestaltet wurden. Der strukturiert vergitterte Austrittsbereich und die unstrukturiert vergitterte Nadelstütze sind in Abbildung 27 zu sehen.

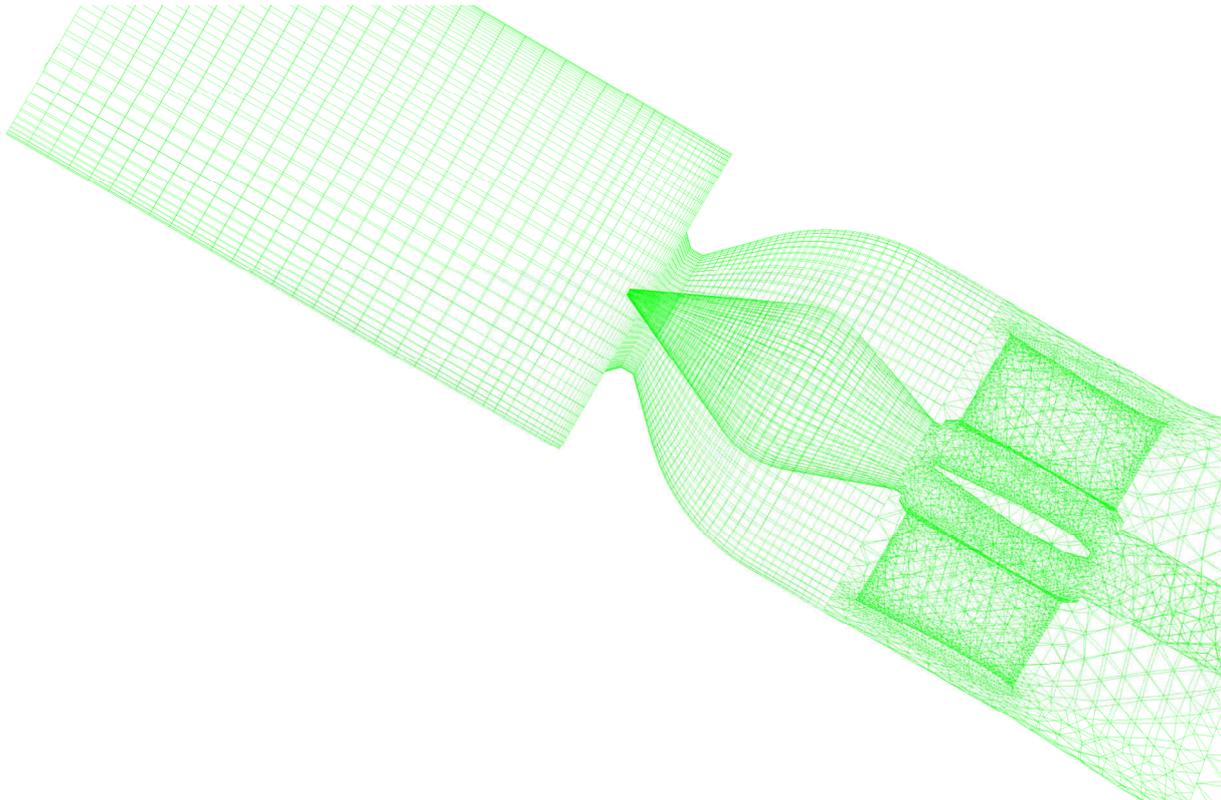


Abbildung 27: Meshing VRL neu Version 3

Die drei separaten Gitter wurden mit einem Interface (GGI) miteinander verbunden. Bei dieser Rechnung wurde beim Austritt die Randbedingung „opening – static pressure and direction“ gewählt. Bei der Auswertung dieser Rechnung trat ein Fehler auf. An der Mantelfläche des Austrittszylinders traten Geschwindigkeiten bis zu 650 m/s auf, was physikalisch nicht möglich ist, wenn beim Austritt der Düse Geschwindigkeiten von ca. 50 m/s herrschen. Diesem Fehler wurde entgegengewirkt, indem man die düsenseitige Stirnwand des Austrittszylinders mit der Randbedingung „free slip wall“ anstatt von „opening – static pressure and direction“ definierte. Tabelle 7 fasst das Solver-Setup der offen außenregulierten Version 3 zusammen.

Tabelle 7: Solver-Setup VRL neu Version 3 offen außenreguliert

Gitterart	Unstrukturiertes Gitter mit 6 Wandschichten O-Grid Struktur im Bereich des Austritts
Turbulenzmodell	SST
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet 1495,5 kg/s
Randbedingung am Austritt	static pressure and direction static pressure = 1 bar
einphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

5.3.1.3. *Auswertung*

Zusätzlich zu den Auswertungsebenen der einzelnen Düsen wurden in der Ringleitung zwischen jeder Düse Kontrollebenen (siehe Abbildung 28) erzeugt und in diesen der Durchfluss ausgewertet.

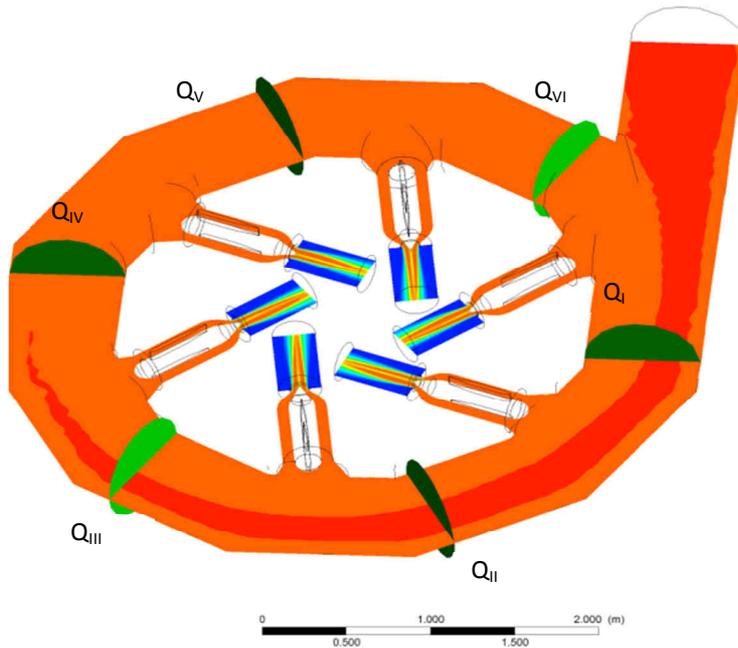


Abbildung 28: Kontrollebenen in der Ringleitung

In Tabelle 8 weisen die Durchflüsse Q_I , Q_{II} und Q_{III} höhere Werte auf als der am Eintritt vorhandene Durchfluss. Das bedeutet, dass bei dieser offenen Version eine erhebliche Menge an Wasser im Kreis transportiert wird. Dieser „zusätzliche“ Massenstrom erzeugt höhere Verluste.

Die Summe der Verlusthöhen beträgt 8,75 m. Das entspricht 7,25 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung.

Tabelle 8: Auswertung VRL neu Version 3 offen außenreguliert

Abweichung	Q	1500,00 l/s		
-0,21 %	Q_I	-249,48 l/s	Q_I	2134,42 l/s
-0,59 %	Q_2	-248,52 l/s	Q_{II}	1882,47 l/s
0,10 %	Q_3	-250,25 l/s	Q_{III}	1637,18 l/s
0,34 %	Q_4	-250,86 l/s	Q_{IV}	1388,39 l/s
-0,05 %	Q_5	-249,87 l/s	Q_V	1142,42 l/s
0,41 %	Q_6	-251,04 l/s	Q_{VI}	920,11 l/s
	Summe	-1500,00 l/s		

30 mm Versatz

V_{Eintritt}	4,03 m/s	h_{v1}	1,88 m	ζ_1	2,27
$V_{\text{Düse1}}$	-20,48 m/s	h_{v2}	1,72 m	ζ_2	2,07
$V_{\text{Düse2}}$	-20,40 m/s	h_{v3}	1,52 m	ζ_3	1,83
$V_{\text{Düse3}}$	-20,54 m/s	h_{v4}	1,31 m	ζ_4	1,59
$V_{\text{Düse4}}$	-20,59 m/s	h_{v5}	1,14 m	ζ_5	1,38
$V_{\text{Düse5}}$	-20,51 m/s	h_{v6}	1,17 m	ζ_6	1,41
$V_{\text{Düse6}}$	-20,60 m/s	$\varnothing h_v$	1,46 m	$\varnothing \zeta$	1,76

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q_{\dots}	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q_I bis $Q_6 \dots$	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q_I bis $Q_{VI} \dots$	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
$V_{\text{Eintritt}} \dots$	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
$V_{\text{Düse1}}$ bis $V_{\text{Düse6}} \dots$	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h_{v1} bis $h_{v6} \dots$	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
$\varnothing h_v \dots$	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ_1 bis $\zeta_6 \dots$	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
$\varnothing \zeta \dots$	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten

Die Geschwindigkeitsverteilung und Totaldruckverteilung in der Symmetrieebene der offen außenregulierten Version 3 sind in Abbildung 29 zu sehen.

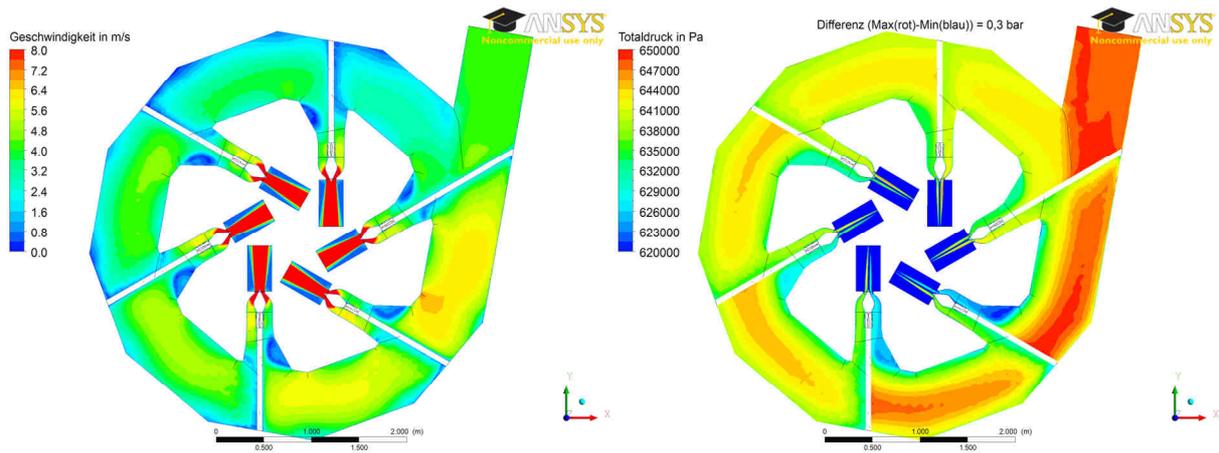


Abbildung 29: Auswertung VRL neu Version 3 offen außenreguliert

5.3.2. Geschlossen außenregulierte Leitung

5.3.2.1. Konstruktion

Bei der geschlossen außenregulierten Ausführung der Version 3 sind alle Abmessungen identisch mit den Abmessungen der offenen Ausführung (siehe Abbildung 30). Der einzige Unterschied in der Konstruktion liegt darin, dass die Außenrohrwand des Eintrittsrohrs das Ende der Verteilrohrleitung bildet und das Wasser hier komplett in die letzte Düse strömt. Bei der offenen Version hat das Wasser die Möglichkeit, im Kreis zu strömen.

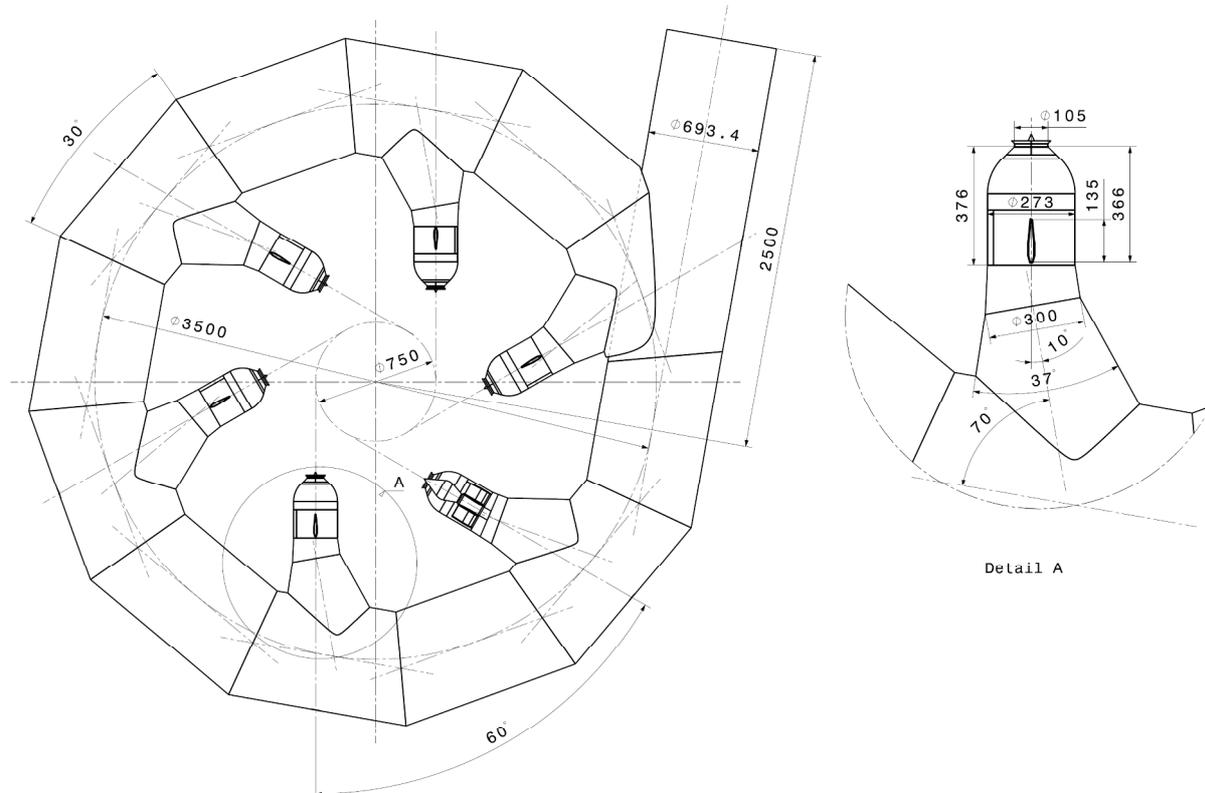


Abbildung 30: Konstruktion VRL neu Version 3 geschlossen außenreguliert mit Detail des Abzweigers und der Düse

5.3.2.2. Meshing, Solver-Setup

Bei dieser Version bleiben alle Parameter (siehe Tabelle 9) dieselben wie bei der offenen Version, nur dass hier die Ringleitung geschlossen ist und somit ein neues unstrukturiertes Gitter erzeugt werden muss.

Tabelle 9: Solver-Setup VRL neu Version 3 geschlossen außenreguliert

Gitterart	Unstrukturiertes Gitter mit 6 Wandschichten O-Grid Struktur im Bereich des Austritts
Turbulenzmodell	SST
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet 1495,5 kg/s
Randbedingung am Austritt	static pressure and direction static pressure = 1 bar
einphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

5.3.2.3. Auswertung

Tabelle 10 zeigt die Auswertungsergebnisse der geschlossen außenregulierten Version 3. Die Summe der Verlusthöhen beträgt 3,44 m. Das entspricht 2,85 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung.

Tabelle 10: Auswertung VRL neu Version 3 geschlossen außenreguliert

Abweichung	Q	1500,00 l/s
0,04 %	Q1	-250,11 l/s
-0,45 %	Q2	-248,88 l/s
0,14 %	Q3	-250,36 l/s
0,20 %	Q4	-250,49 l/s
-0,24 %	Q5	-249,39 l/s
0,31 %	Q6	-250,78 l/s
	Summe	-1500,00 l/s

30 mm Versatz

VEintritt	4,04 m/s	h _{v1}	0,73 m	ζ ₁	0,88
VDüse1	-20,53 m/s	h _{v2}	0,67 m	ζ ₂	0,80
VDüse2	-20,43 m/s	h _{v3}	0,59 m	ζ ₃	0,71
VDüse3	-20,55 m/s	h _{v4}	0,55 m	ζ ₄	0,66
VDüse4	-20,56 m/s	h _{v5}	0,47 m	ζ ₅	0,56
VDüse5	-20,47 m/s	h _{v6}	0,43 m	ζ ₆	0,52
VDüse6	-20,58 m/s	Øh _v	0,57 m	Øζ	0,69

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q ₁ bis Q ₆ ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q ₁ bis Q _{VI} ...	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
Øh _v ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
Øζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten

Abbildung 31 zeigt die Geschwindigkeits- und Totaldruckverteilung der geschlossen außenregulierten Version 3. Der Maximalwert der Geschwindigkeitsskala liegt hier bei 6 m/s, was auf die geschlossene Ausführung zurückzuführen ist.

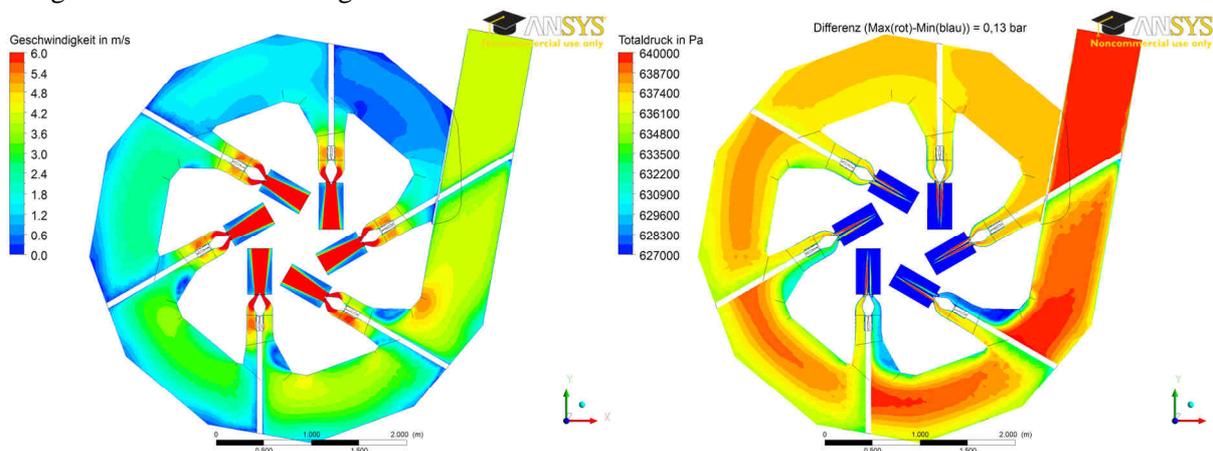


Abbildung 31: Auswertung VRL neu Version 3 geschlossen außenreguliert

5.3.3. Offen innenregulierte Leitung

5.3.3.1. Konstruktion

Abbildung 32 zeigt die offen innenregulierte Ausführung der dritten Version. Die Geometrie der innenregulierten Düse wurde mit CATIA V5 erzeugt. Als Vorlage diente die Zeichnung einer Düse, die von Herrn König zur Verfügung gestellt wurde. Da die innenregulierte Düse länger ist als die außenregulierte, musste der Verbindungskegel zwischen Ringleitung und Düse angepasst werden. Mit Ausnahme des Verbindungskegels und der Düse ist die offen innenregulierte Leitung identisch mit der offen außenregulierten Leitung. Der Kegel wurde mit einem Öffnungswinkel von 53° ausgeführt und liegt mit der Düse auf einer Achse.

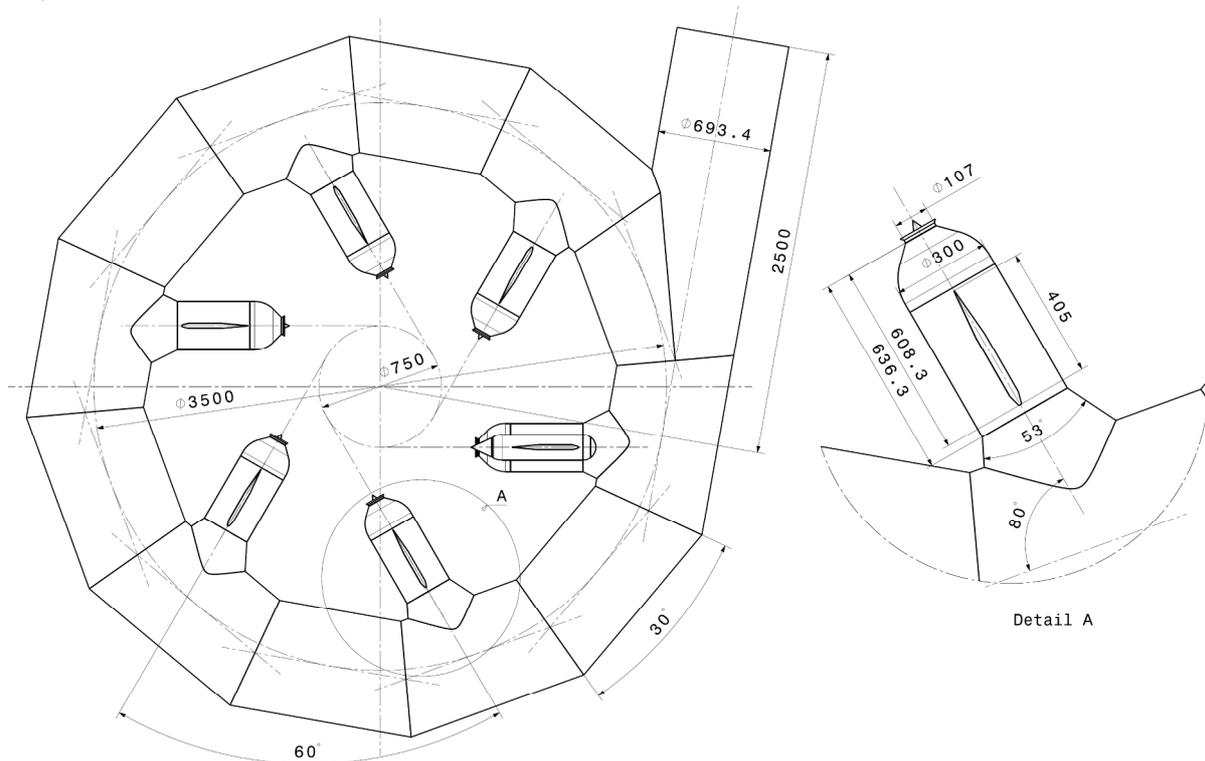


Abbildung 32: Konstruktion VRL neu Version 3 offen innenreguliert mit Detail des Abzweigers und der Düse

Abbildung 33 zeigt den Aufbau der innenregulierten Düse, die nach einer Vorlage in CATIA V5 konstruiert wurde.

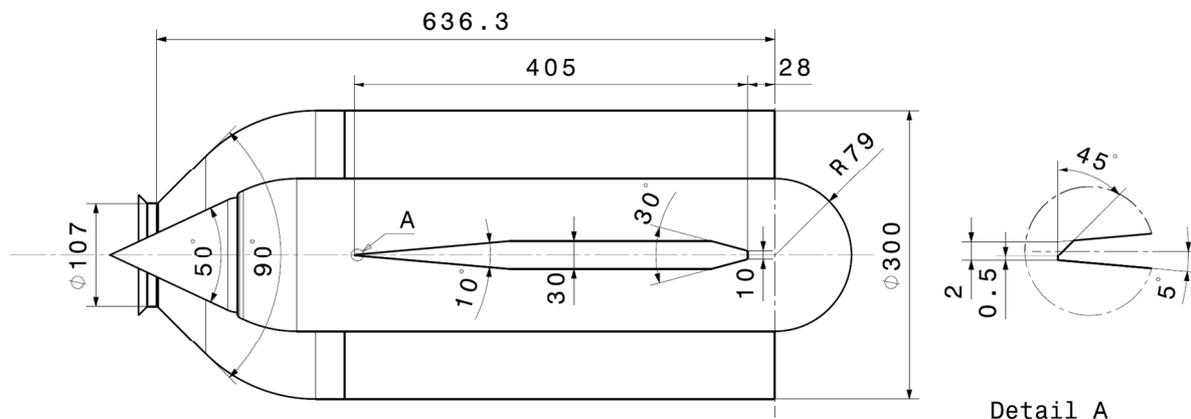


Abbildung 33: Konstruktion der innenregulierten Düse

5.3.3.2. Meshing, Solver-Setup

Die innenregulierte Düse wurde mit einer O-Grid-Struktur mit Verdichtung in Wandnähe vergittert. Die Ringleitung wurde wie schon zuvor unstrukturiert mit 6 wandnahen Prismenschichten vergittert. Abbildung 34 zeigt das strukturierte Gitter der Düse und den unstrukturierten Bereich der Ringleitung.

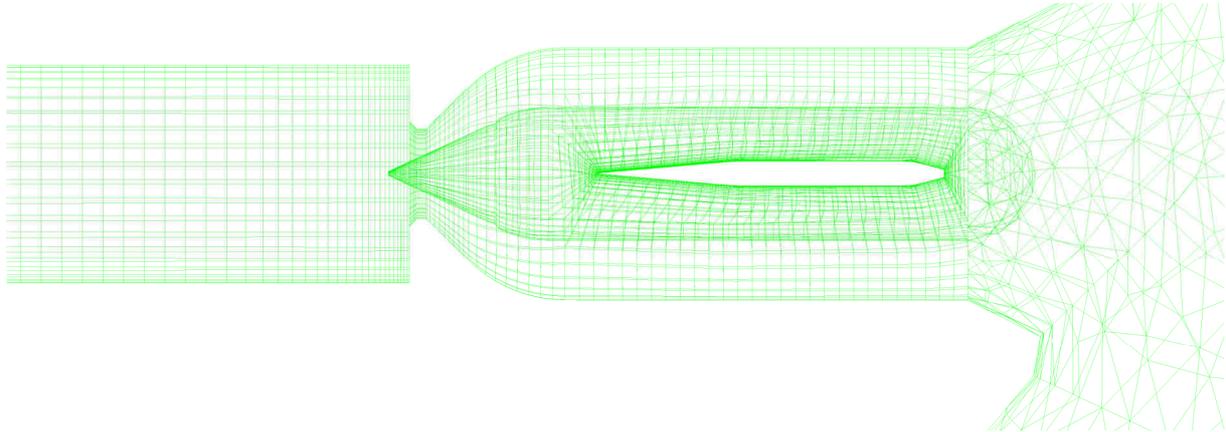


Abbildung 34: Meshing der innenregulierten Düse

Alle Parameter des Solver-Setups (Tabelle 11) bleiben wie bei den vorangegangenen Rechnungen der Version 3 unverändert.

Tabelle 11: Solver-Setup VRL neu Version 3 offen innenreguliert

Gitterart	Unstrukturiertes Gitter mit 6 Wandschichten O-Grid Struktur im Bereich der Düse
Turbulenzmodell	SST
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet 1495,5 kg/s
Randbedingung am Austritt	static pressure and direction static pressure = 1 bar
einphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

5.3.3.3. Auswertung

In Tabelle 12 sind die Auswertungsergebnisse der offen innenregulierten Version 3 zu sehen. Die Summe der Verlusthöhen beträgt 12,19 m. Das entspricht 10,11 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung.

Tabelle 12: Auswertung VRL neu Version 3 offen innenreguliert

Abweichung	Q	1500,00 l/s
-2,24 %	Q _I	-244,41 l/s
1,09 %	Q _{II}	-252,71 l/s
-0,62 %	Q _{III}	-248,45 l/s
-0,26 %	Q _{IV}	-249,35 l/s
1,08 %	Q _V	-252,70 l/s
0,95 %	Q _{VI}	-252,37 l/s
	Summe	-1500,00 l/s

30 mm Versatz

VEintritt	4,04 m/s	h _{v1}	2,30 m	ζ ₁	2,77
VDüse1	-20,85 m/s	h _{v2}	2,66 m	ζ ₂	3,20
VDüse2	-21,56 m/s	h _{v3}	2,33 m	ζ ₃	2,80
VDüse3	-21,20 m/s	h _{v4}	1,92 m	ζ ₄	2,31
VDüse4	-21,28 m/s	h _{v5}	1,64 m	ζ ₅	1,97
VDüse5	-21,56 m/s	h _{v6}	1,33 m	ζ ₆	1,60
VDüse6	-21,53 m/s	Ø _{h_v}	2,03 m	Ø _ζ	2,44

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
v _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
v _{Düse1} bis v _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
Ø _{h_v} ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
Ø _ζ ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten

Im Geschwindigkeitsplot in Abbildung 35 ist das höhere Niveau im Vergleich zur offen außenregulierten Version 3 (Abbildung 29) zu erkennen. Das ist darauf zurückzuführen, dass keine Düsenadeln vorhanden sind, die die Strömung in der Ringleitung bremsen. Der Maximalwert der Geschwindigkeitsskala liegt wie bei den zuvor ausgewerteten offenen Versionen bei 8 m/s.

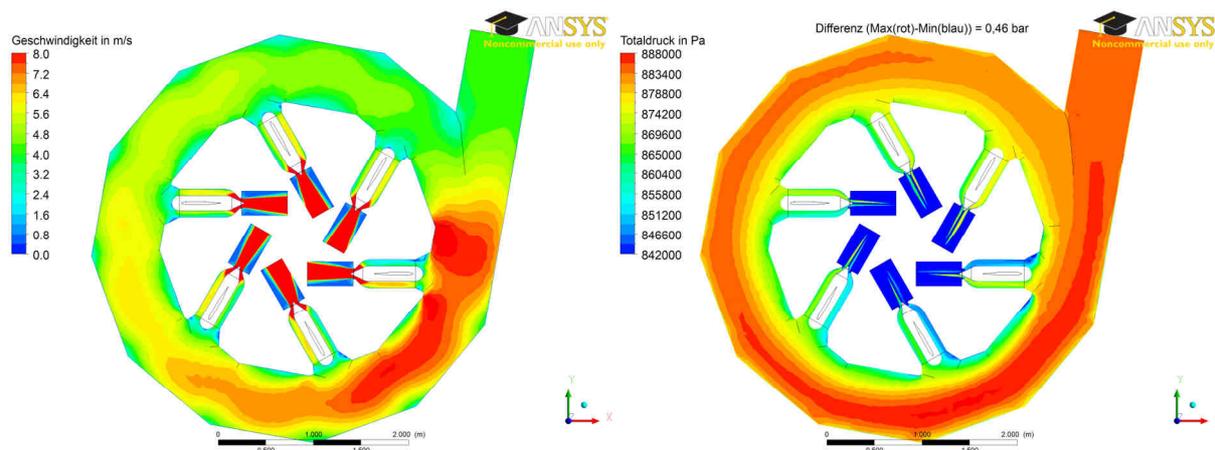


Abbildung 35: Auswertung VRL neu Version 3 offen innenreguliert

5.3.4. Geschlossen innenregulierte Leitung

5.3.4.1. Konstruktion

Bei der geschlossen innenregulierten Ausführung der Version 3 wird der letzte Rohrschuss bei einer Länge von 726mm mit einer geraden Wand verschlossen (siehe Abbildung 36). Die restliche Leitung und die Düsen sind identisch mit der offenen Ausführung.

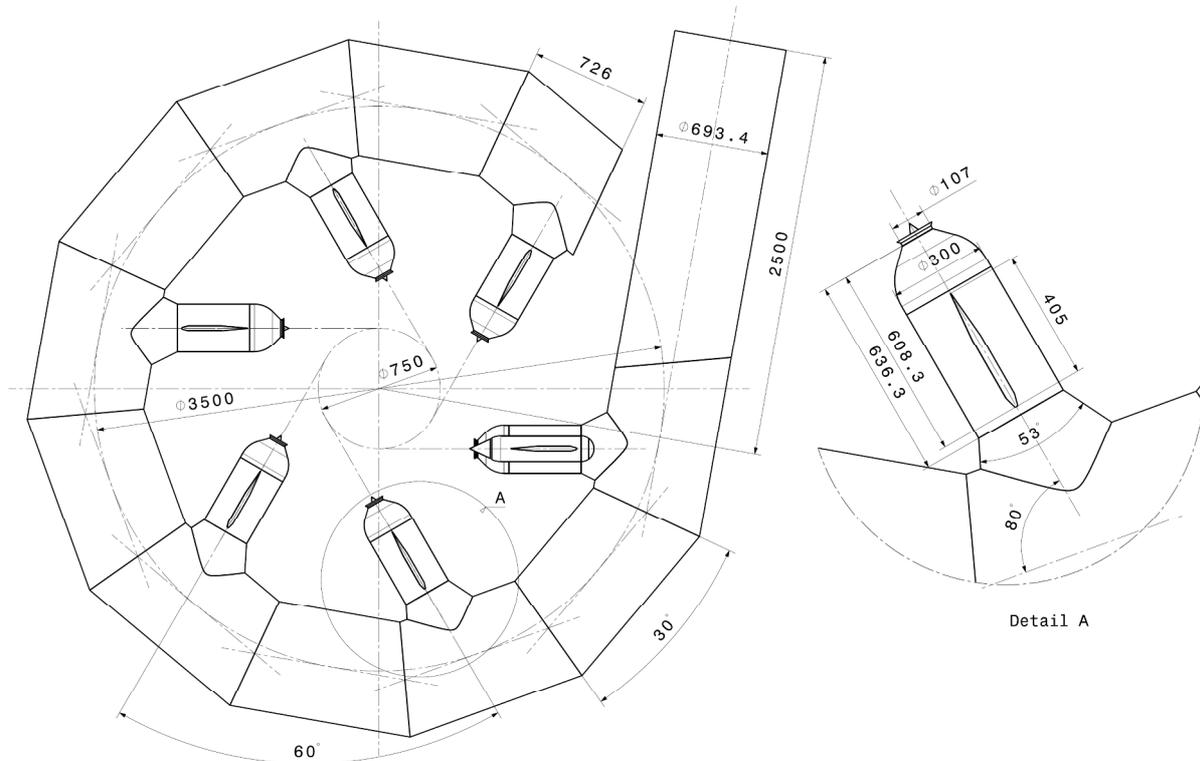


Abbildung 36: Konstruktion VRL neu Version 3 geschlossen innenreguliert mit Detail des Abzweigers und der Düse

5.3.4.2. Meshing, Solver-Setup

In Tabelle 13 werden die wichtigsten Parameter des Solver-Setups dargestellt. Wie bei der offen innenregulierten Version wurde die Ringleitung unstrukturiert vergittert und für die Düse wurde das Gitter mit O-Grid Struktur der offen innenregulierten Leitung verwendet. Alle weiteren Einstellungen bezüglich des Solvers sind erneut die gleichen wie zuvor.

Tabelle 13: Solver-Setup VRL neu Version 3 geschlossen innenreguliert

Gitterart	Unstrukturiertes Gitter mit 6 Wandschichten O-Grid Struktur im Bereich der Düse
Turbulenzmodell	SST
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet 1495,5 kg/s
Randbedingung am Austritt	static pressure and direction; static pressure = 1 bar
einphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

5.3.4.3. Auswertung

Die Summe der Verlusthöhen beträgt 2,83 m. Das entspricht 2,35 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. In den nachfolgenden Rechnungen wurde die Auswertungsebene auf einen Abstand von 100 mm nach innen verschoben, da die Werte auf dieser Position geringeren Schwankungen unterliegen. In Tabelle 14 wurde die Auswertung für die Auswertungsebene 30 mm durchgeführt, um diese Leitung mit den zuvor gerechneten Leitungen vergleichen zu können. Die Auswertung bei 100 mm wurde durchgeführt, um den Vergleich mit den darauffolgenden Rechnungen zu ermöglichen.

Tabelle 14: Auswertung VRL neu Version 3 geschlossen innenreguliert

Abweichung	Q	1500,00 l/s	
-2,42 %	Q _I	-243,96 l/s	Q _I 1434,88 l/s
0,85 %	Q _{II}	-252,13 l/s	Q _{II} 1195,30 l/s
0,93 %	Q _{III}	-252,31 l/s	Q _{III} 958,10 l/s
-2,79 %	Q _{IV}	-243,03 l/s	Q _{IV} 722,95 l/s
0,22 %	Q _V	-250,55 l/s	Q _V 486,49 l/s
3,21 %	Q _{VI}	-258,02 l/s	Q _{VI} 241,98 l/s
	Summe	-1500,00 l/s	

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{V1} bis h _{V6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
Øh _v ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
Øζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten

100 mm Versatz

V _{Eintritt}	4,04 m/s	h _{v1}	0,54 m	ζ ₁	0,65
V _{Düse1}	-6,04 m/s	h _{v2}	0,65 m	ζ ₂	0,78
V _{Düse2}	-6,24 m/s	h _{v3}	0,52 m	ζ ₃	0,62
V _{Düse3}	-6,25 m/s	h _{v4}	0,36 m	ζ ₄	0,44
V _{Düse4}	-6,02 m/s	h _{v5}	0,31 m	ζ ₅	0,37
V _{Düse5}	-6,20 m/s	h _{v6}	0,28 m	ζ ₆	0,34
V _{Düse6}	-6,39 m/s	Øh _v	0,44 m	Øζ	0,53

30 mm Versatz

V _{Eintritt}	4,04 m/s	h _{v1}	0,56 m	ζ ₁	0,67
V _{Düse1}	-20,81 m/s	h _{v2}	0,70 m	ζ ₂	0,85
V _{Düse2}	-21,51 m/s	h _{v3}	0,56 m	ζ ₃	0,67
V _{Düse3}	-21,53 m/s	h _{v4}	0,37 m	ζ ₄	0,45
V _{Düse4}	-20,74 m/s	h _{v5}	0,33 m	ζ ₅	0,39
V _{Düse5}	-21,38 m/s	h _{v6}	0,31 m	ζ ₆	0,37
V _{Düse6}	-22,01 m/s	Øh _v	0,47 m	Øζ	0,57

Abbildung 37 zeigt die Contour-Plots für Geschwindigkeit und Totaldruck, wobei der Maximalwert der Geschwindigkeit aufgrund der geschlossenen Ausführung der Leitung wieder bei 6 m/s liegt.

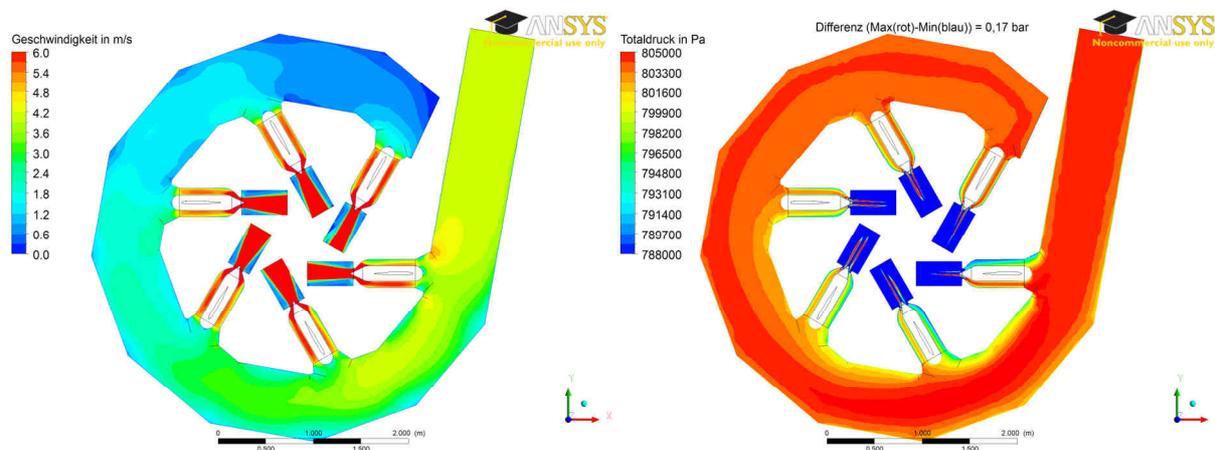


Abbildung 37: Auswertung VRL neu Version 3 geschlossen innenreguliert

6. Vergleich der einphasigen Rechnungen

Der Vergleich der zuvor einphasig berechneten Leitungen zeigt, dass die Version 3 in geschlossen innenregulierter Ausführung die geringsten Verluste erzeugt. Abbildung 38 zeigt die gemittelte Verlusthöhe aller einphasig gerechneten Leitungen im Vergleich. Dabei ist auffällig, dass die Versionen 1 und 2 sowie die offen außenregulierte als auch die offen innenregulierte Ausführung der Version 3 ein deutlich höheres Verlustniveau aufweisen als die Referenzleitung und die geschlossenen Ausführungen der Version 3. Diese vier Leitungen sind in offener Ausführung konstruiert, bei der das Wasser die Möglichkeit hat, nach der letzten Düse weiter in der Ringleitung zu strömen. Dadurch ergeben sich im Bereich der ersten beiden Düsen höhere Geschwindigkeiten als beim Eintritt. Aus dem höheren Geschwindigkeitsniveau der offenen Leitungen ergeben sich die größeren Verlusthöhen.

Somit wurde die Version 3 in geschlossen innenregulierter Ausführung zur weiteren Optimierung ausgewählt.

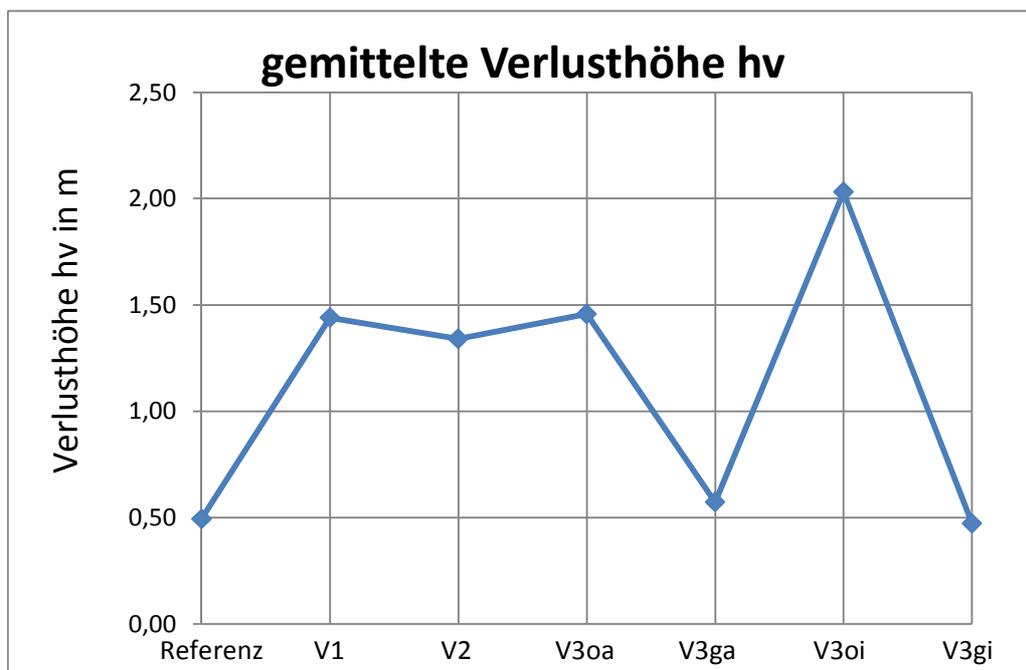


Abbildung 38: Vergleich der einphasigen Rechnungen

Alle Rechnungen wurden bisher nur einphasig durchgeführt. Das heißt, dass der Wasserstrahl aus der Düse in eine Umgebung aus Wasser strömt. In der realen Turbine strömt der Wasserstrahl in eine Umgebung mit Luft, da das Turbinengehäuse mit Luft bei Umgebungsdruck gefüllt ist. Somit müssen die Rechnungen zweiphasig durchgeführt werden (Wasser und Luft). Für eine zweiphasige Rechnung ist ein qualitativ hochwertiges Rechengitter erforderlich. Deshalb wurden die Ringleitungen aller folgenden Versionen und die Düsen mit einer O-Grid Struktur vergittert.

7. Zweiphasige Rechnungen der neuen Leitung

7.1. VRL neu Version 3

7.1.1. *Meshing, Solver-Setup*

Für die zweiphasige Rechnung der Version 3 der neuen Verteilrohrleitung wurde die Ringleitung, die für die einphasige Rechnung unstrukturiert vergittert worden ist, mit einer O-Grid Struktur vergittert (siehe Abbildung 39). In Wandnähe wurde das Gitter verdichtet, um die Strömung im Bereich der Wände besser zu erfassen.

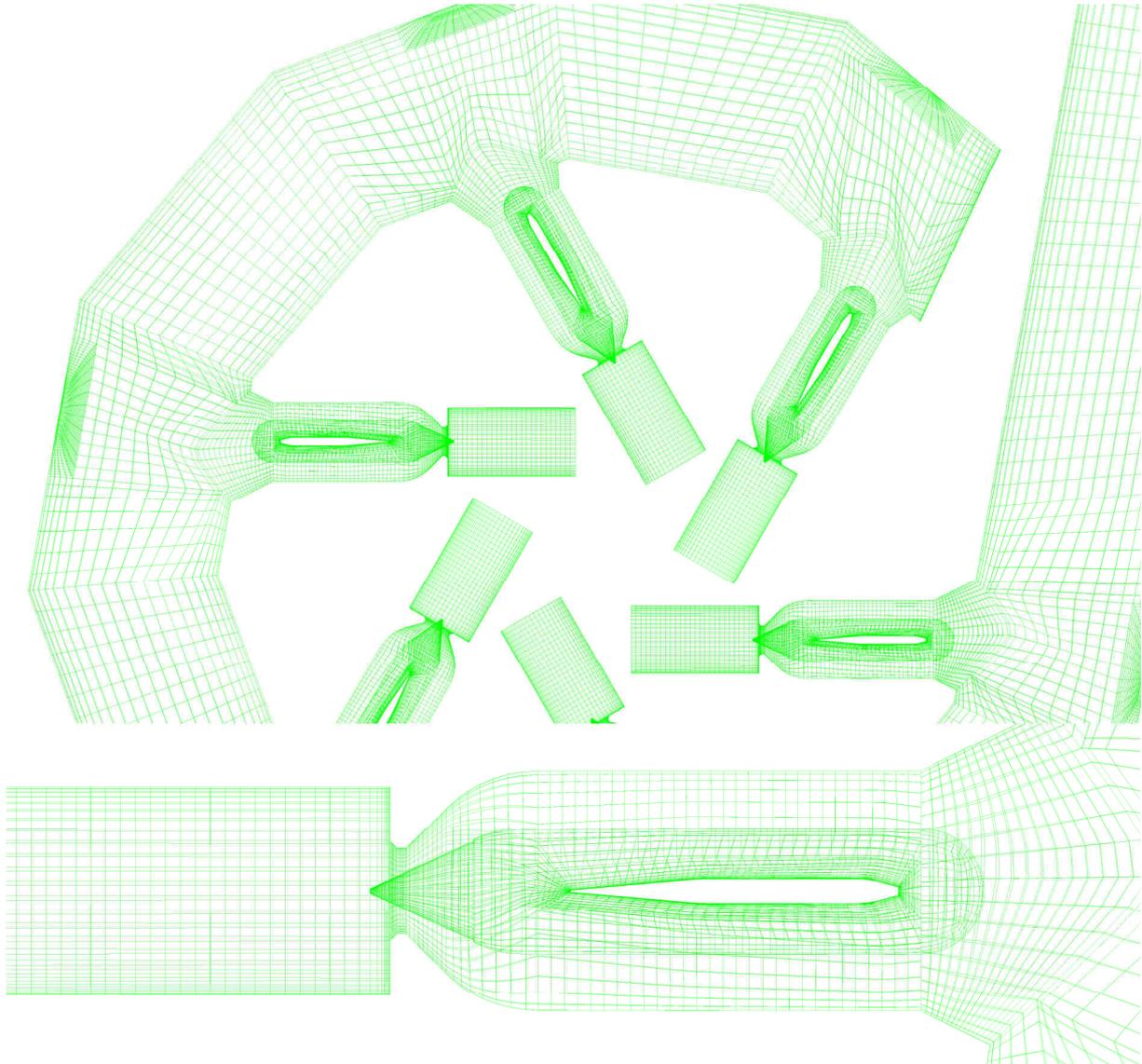


Abbildung 39: Meshing VRL neu Version 3 zweiphasig

An der Eintrittsfläche wurde zusätzlich zum Massenstrom die „air volume fraction“ definiert. Dieser Wert wurde beim Eintritt auf 0 gesetzt, das heißt, dass am Eintritt nur Wasser vorhanden ist. An den Mantelflächen des Austrittszylinders der einzelnen Düsen wurde dieser Wert auf 1 gesetzt, da dieser Wert das mit Luft gefüllte Turbinengehäuse definiert. An der Stirnfläche der Austrittszylinder wurde für die „air volume fraction“ die Bedingung „zero gradient“ definiert, da an dieser Fläche Luft und Wasser aus der Domain ausströmen. Die Bedingung „zero gradient“ bedeutet, dass der äußerste Knotenpunkt an dieser Fläche den gleichen Wert für die „air volume fraction“ besitzt wie der Domain-

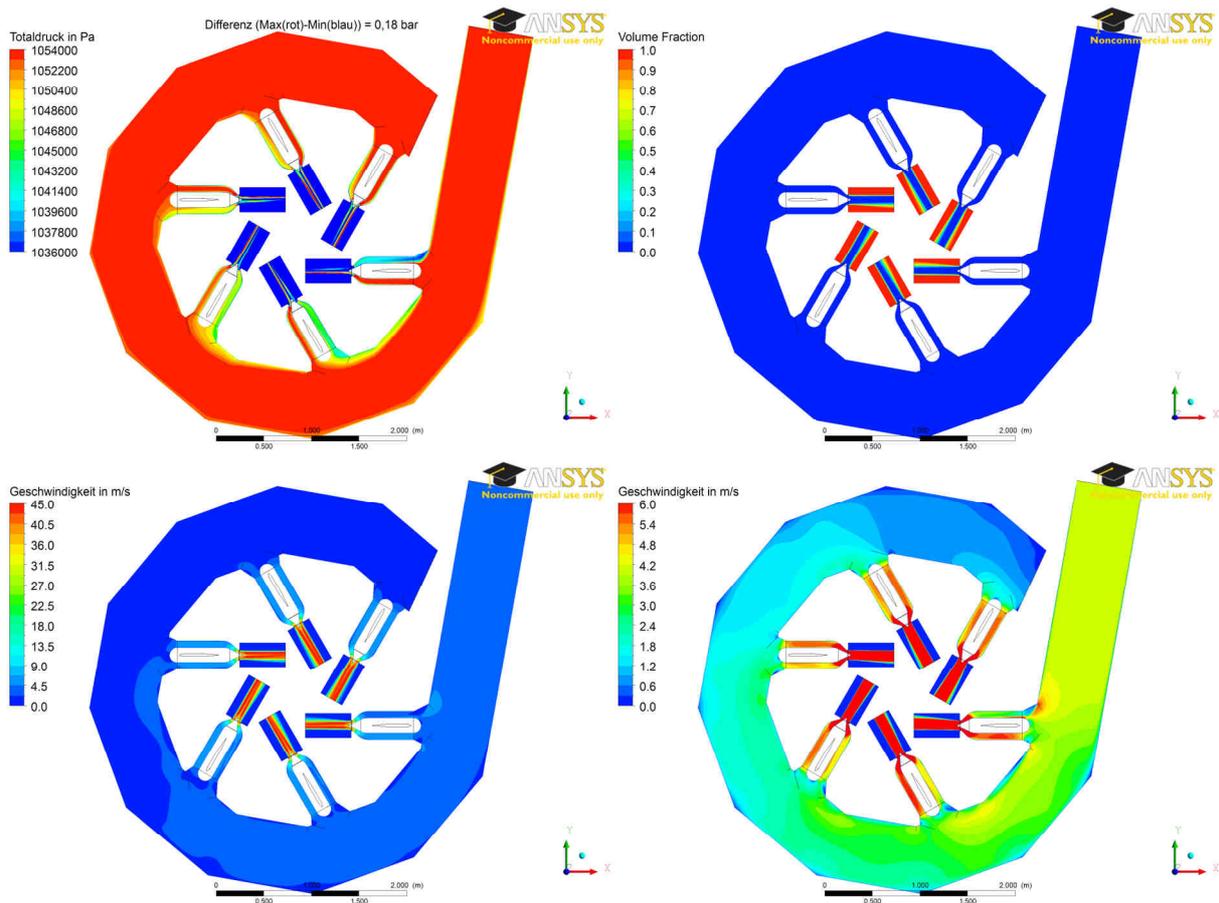


Abbildung 40: Auswertung VRL neu Version 3 zweiphasig

Die Summe der Verlusthöhen beträgt 1,74 m. Das entspricht 1,41 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. In Abbildung 40 links oben ist der Contour-Plot des Totaldrucks zu sehen. Bei den Düsen 1 bis 4 sind Zonen zu erkennen (blau bis grün), wo hohe Verluste erzeugt werden. Die Abzweiger der Version 3 müssen somit noch optimiert werden.

7.2. VRL neu Version 4

7.2.1. *Konstruktion*

Abbildung 41 zeigt die Konstruktion der Version 4, bei der die Abzweiger nicht als Konus sondern als gerade Rohrstücke ausgeführt wurden. Diese Rohrstücke haben den gleichen Durchmesser wie das Düsenrohr und dessen Achse ist um 35° zur Düsenachse versetzt. Alle übrigen Abmessungen der Leitung bleiben identisch mit jenen der geschlossen innenregulierten Ausführung der Version 3.

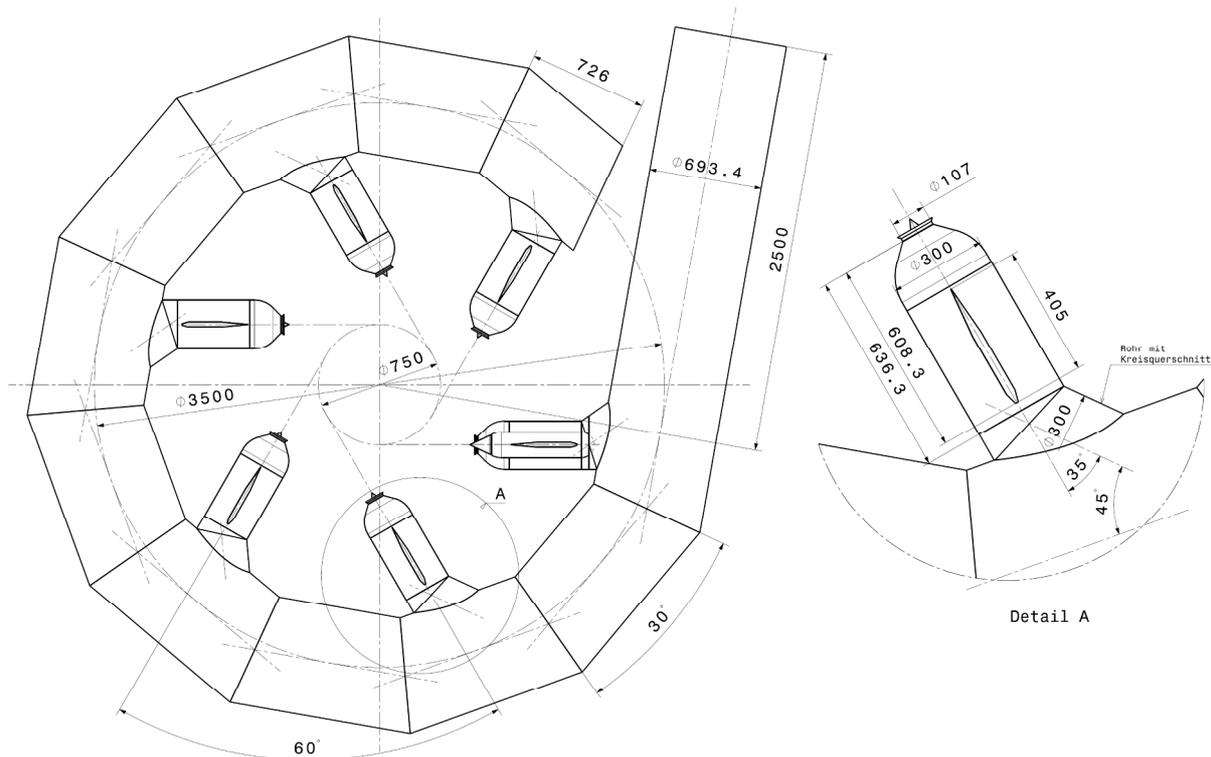


Abbildung 41: Konstruktion VRL neu Version 4 mit Detail des Abzweigers und der Düse

7.2.2. Meshing, Solver-Setup

Alle Einstellungen bei der Vergitterung und alle Parameter der Solver-Einstellungen bleiben dieselben wie bei der Version 3, um die Rechenergebnisse vergleichen zu können (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Solver-Setup VRL neu Version 4

Gitterart	O-Grid Struktur mit Wandverdichtung
Turbulenzmodell	SST
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet 1495,5 kg/s air volume fraction = 0
Randbedingung am Austritt	static pressure and direction; static pressure = 1 bar air volume fraction = 1 an der Mantelfläche des Austrittszylinders; volume fraction = zero gradient an der Stirnfläche des Austrittszylinders
zweiphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

7.2.3. Auswertung

Die Summe der Verlusthöhen beträgt 1,99 m. Das entspricht 1,65 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. In dieser Leitung treten starke Unterschiede bei der links- und rechtsseitigen Kanalströmung auf. In Abbildung 42 links oben (Contour-Plot für Totaldruck) sind bei den Düsen 1 bis 3 erhöhte Verluste in der linksseitigen Düsenströmung zu erkennen. Bei den Düsen 5 und 6 treten in der rechtsseitigen Strömung höhere Verluste auf. Dieser Effekt lässt sich in Tabelle 18 bestätigen, da bei den Düsen 1 und 2 eine positive Differenz zwischen links- und rechtsseitiger Strömung und bei den Düsen 5 und 6 eine starke negative Differenz zu erkennen ist.

Tabelle 18: Auswertung VRL neu Version 4

Abweichung	Q	1500 l/s		
-0,16 %	Q _I	-249,60 l/s	Q _I	1496,54 l/s
-0,75 %	Q _{II}	-248,13 l/s	Q _{II}	1246,05 l/s
-0,95 %	Q _{III}	-247,63 l/s	Q _{III}	999,07 l/s
-0,24 %	Q _{IV}	-249,40 l/s	Q _{IV}	752,41 l/s
1,15 %	Q _V	-252,86 l/s	Q _V	503,93 l/s
0,80 %	Q _{VI}	-251,99 l/s	Q _{VI}	251,73 l/s
	Summe	-1499,61 l/s		

100 mm Versatz

V _{Eintritt}	3,99 m/s	h _{v1}	0,30 m	ζ ₁	0,37
VDüse1	-6,18 m/s	h _{v2}	0,47 m	ζ ₂	0,58
VDüse2	-6,14 m/s	h _{v3}	0,37 m	ζ ₃	0,45
VDüse3	-6,13 m/s	h _{v4}	0,28 m	ζ ₄	0,35
VDüse4	-6,17 m/s	h _{v5}	0,28 m	ζ ₅	0,35
VDüse5	-6,26 m/s	h _{v6}	0,29 m	ζ ₆	0,36
VDüse6	-6,24 m/s	Ø _{hv}	0,33 m	Øζ	0,41

	links	rechts	Diff	Summe
Q _{Düse1}	125,99	123,56 l/s	2,43	249,55
Q _{Düse2}	129,50	118,58 l/s	10,92	248,08
Q _{Düse3}	123,78	123,82 l/s	-0,04	247,60
Q _{Düse4}	123,94	125,41 l/s	-1,46	249,35
Q _{Düse5}	123,82	129,01 l/s	-5,19	252,83
Q _{Düse6}	121,57	130,39 l/s	-8,82	251,95
Mittelwert	124,77	125,13 l/s	-0,36	249,89

P _{tot_max}	
in Symmetrieebene	12,49 bar
in gesamter Leitung	12,27 bar

Abweichung... *prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %*

Q... *Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s*

Q_I bis Q_{VI}... *Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s*

Summe... *Summe der Einzeldurchflüsse in l/s*

Q_I bis Q_{VI}... *Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s*

V_{Eintritt}... *Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s*

V_{Düse1} bis V_{Düse6}... *flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s*

h_{v1} bis h_{v6}... *Verlustrhöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m*

Ø_{hv}... *arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlustrhöhen in m*

ζ₁ bis ζ₆... *dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene*

Øζ... *arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten*

Q_{Düse1} bis Q_{Düse6}... *Durchfluss in den links- und rechtsseitigen Düsenkanälen in l/s*

Diff... *Differenz zwischen links- und rechtsseitigem Düsenkanal in l/s*

P_{tot_max}... *maximaler Totaldruck in Pa*

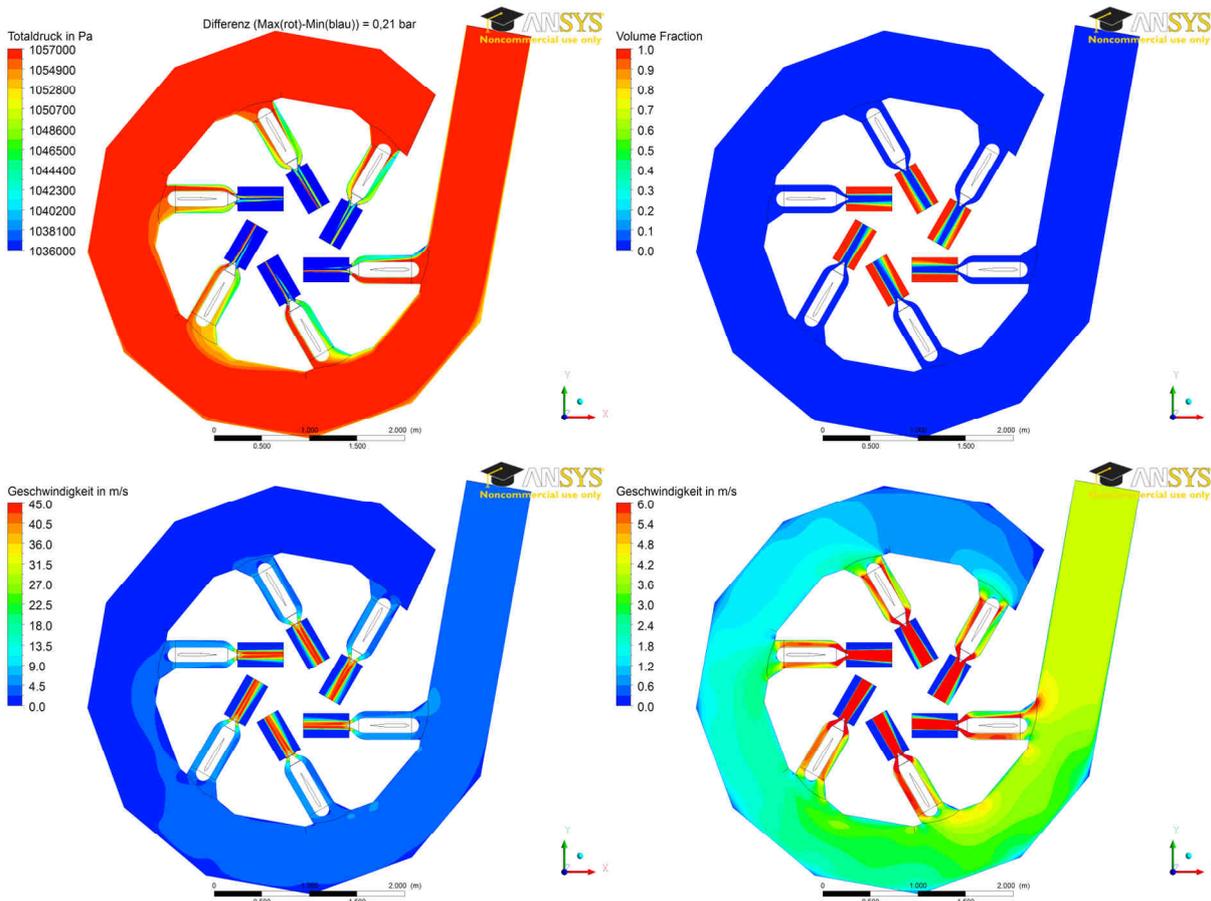


Abbildung 42: Auswertung VRL neu Version 4

7.3. VRL neu Version 5

7.3.1. *Konstruktion*

Da die Außenabmessung der Ringleitung beibehalten werden soll, um die Leitung eng am Turbinengehäuse anliegen zu lassen und die Position der Düsen als gegeben anzusehen ist, ergibt sich bei der Konstruktion eines Abzweigers ein Platzproblem. Dieses Problem wurde in Absprache mit Herrn König gelöst, indem die Düsenlänge gekürzt wurde. Die Gesamtlänge der Düse wurde um $\frac{1}{4}$ und die Länge der Düsenrippen um $\frac{1}{3}$ gekürzt. Abbildung 43 zeigt die Konstruktion der Version 5 mit der gekürzten Düse. Die Düse hat nun eine Gesamtlänge von 498,1 mm statt zuvor 636,3 mm und die Rippe in der Düse hat eine Länge von 270 mm statt 405 mm. Der Abzweiger wurde als schräg angestellter, gerader Konus ausgeführt. Der Öffnungswinkel des Konus beträgt 40° und der Winkelversatz zur Düsenachse beträgt 10° . Um eine Verbindung zwischen Düse und Kegel herzustellen, wird das Düsenrohr mit 5° schräg angeschnitten und zwischen Kegel und Düse ein Rohrstück mit 300 mm Durchmesser und 20 mm Länge eingebaut. Dieses Rohrstück ist düsenseitig ebenfalls mit 5° schräg angeschnitten.

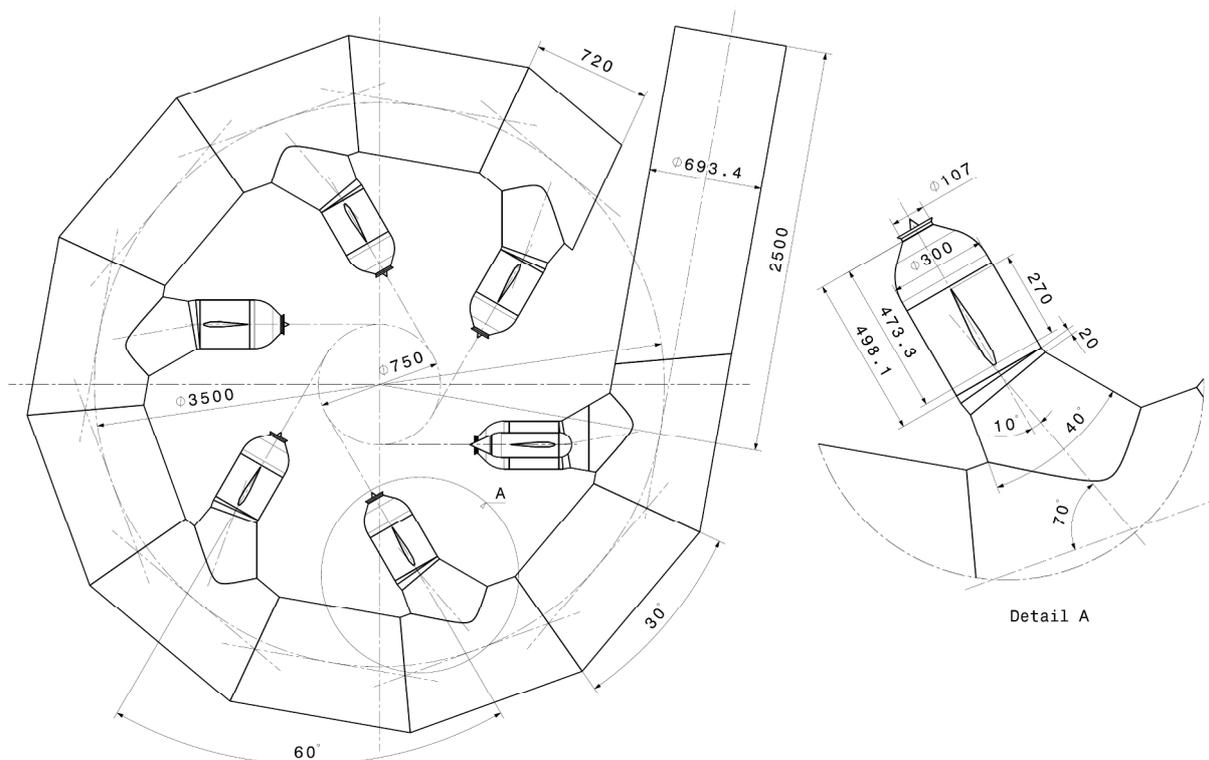


Abbildung 43: Konstruktion VRL neu Version 5 mit Detail des Abzweigers und der Düse

7.3.2. *Meshing, Solver-Setup*

In Tabelle 19 bleiben alle Einstellungen der Vergitterung und alle Parameter der Solver-Einstellungen gleich wie bei den Versionen 3 und 4, um die Rechenergebnisse vergleichen zu können.

Tabelle 19: Solver-Setup VRL neu Version 5

Gitterart	O-Grid Struktur mit Wandverdichtung
Turbulenzmodell	SST
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet 1495,5 kg/s air volume fraction = 0
Randbedingung am Austritt	static pressure and direction; static pressure = 1 bar air volume fraction = 1 an der Mantelfläche des Austrittszyllinders; volume fraction = zero gradient an der Stirnfläche des Austrittszyllinders
zweiphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

7.3.3. Auswertung

In Tabelle 20 ist die Auswertungstabelle für die Version 5 zu sehen. Die Summe der Verlusthöhen beträgt 1,47 m. Das entspricht 1,18 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. Diese Verlusthöhe entspricht einer Verbesserung zur Version 3 um etwa 15%, was vor allem durch die Kürzung der Düse und durch die verbesserte Konstruktion des Abzweigers zu erklären ist. In Abbildung 44 rechts unten (Contour-Plot für Geschwindigkeit) sind bei den Abzweigern rechtsseitig Ablösezone zu sehen, die nach Möglichkeit zu vermeiden sind.

Tabelle 20: Auswertung VRL neu Version 5

Abweichung	Q	1500,00 l/s		
-0,20 %	Q _I	-249,50 l/s	Q _I	1496,16 l/s
-0,36 %	Q _{II}	-249,09 l/s	Q _{II}	1245,98 l/s
-0,10 %	Q _{III}	-249,75 l/s	Q _{III}	998,58 l/s
-0,29 %	Q _{IV}	-249,28 l/s	Q _{IV}	749,45 l/s
0,39 %	Q _V	-250,99 l/s	Q _V	501,10 l/s
0,49 %	Q _{VI}	-251,23 l/s	Q _{VI}	250,41 l/s
	Summe	-1499,84 l/s		

100 mm Versatz					
V _{Eintritt}	3,99 m/s	h _{v1}	0,29 m	ζ ₁	0,36
VDüse1	-6,18 m/s	h _{v2}	0,43 m	ζ ₂	0,53
VDüse2	-6,17 m/s	h _{v3}	0,30 m	ζ ₃	0,37
VDüse3	-6,18 m/s	h _{v4}	0,20 m	ζ ₄	0,25
VDüse4	-6,17 m/s	h _{v5}	0,14 m	ζ ₅	0,17
VDüse5	-6,21 m/s	h _{v6}	0,12 m	ζ ₆	0,15
VDüse6	-6,22 m/s	∅ _{h_v}	0,25 m	∅ζ	0,30

	links	rechts	Diff	Summe
Q _{Düse1}	130,77	118,72 l/s	12,04	249,49
Q _{Düse2}	129,02	120,07 l/s	8,95	249,09
Q _{Düse3}	126,20	123,54 l/s	2,66	249,74
Q _{Düse4}	125,33	123,96 l/s	1,37	249,28
Q _{Düse5}	125,45	125,52 l/s	-0,08	250,97
Q _{Düse6}	124,96	126,26 l/s	-1,31	251,22
Mittelwert	126,95	123,01 l/s	3,94	249,96

P _{tot_max}	
in Symmetrieebene	12,65 bar
in gesamter Leitung	12,72 bar

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
∅ _{h_v} ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
∅ζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten
Q _{Düse1} bis Q _{Düse6} ...	Durchfluss in den links- und rechtsseitigen Düsenkanälen in l/s
Diff...	Differenz zwischen links- und rechtsseitigem Düsenkanal in l/s
P _{tot_max} ...	maximaler Totaldruck in Pa

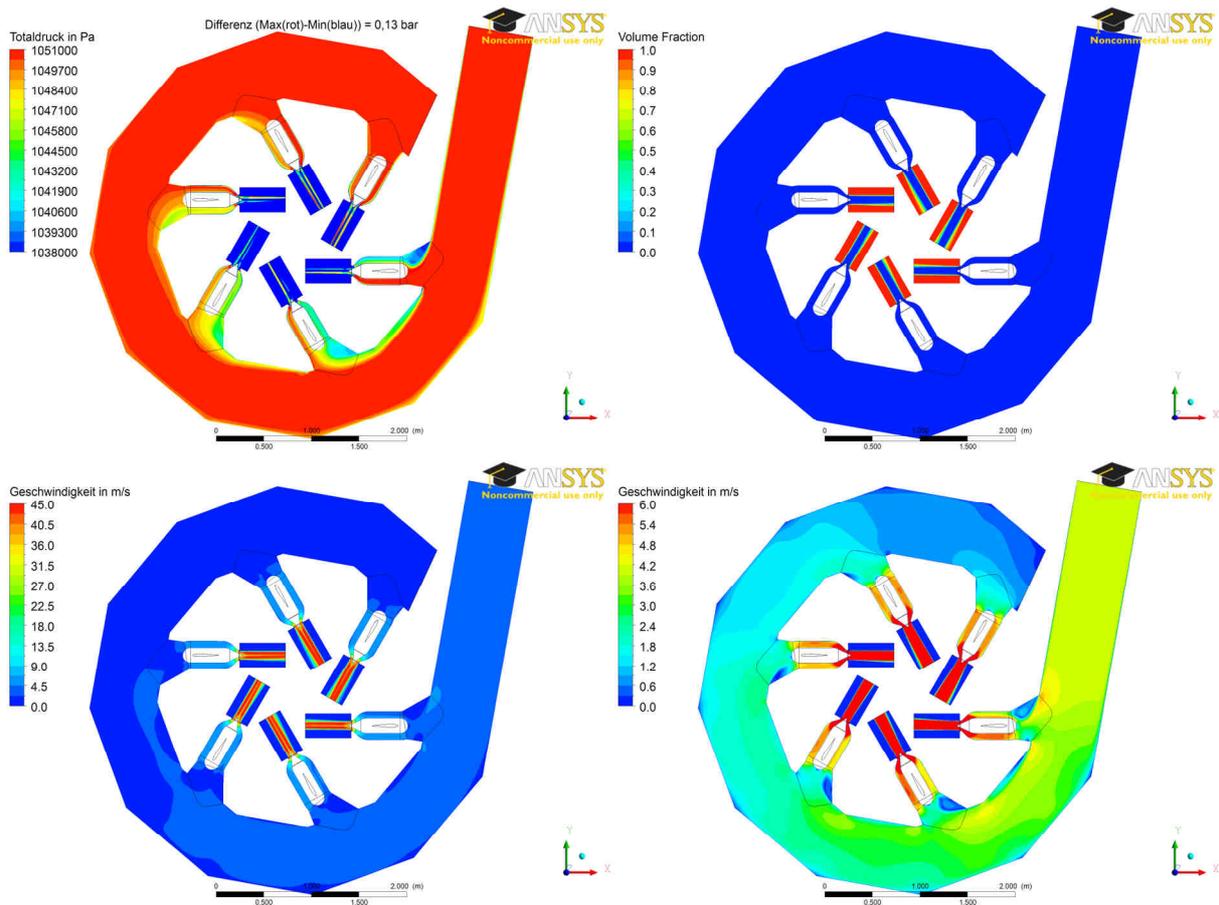


Abbildung 44: Auswertung VRL neu Version 5

7.4. Vergleich V3, V4 und V5

Um die bisherige Entwicklung der Verteilrohrleitung zu veranschaulichen, werden die Versionen 3, 4 und 5 untereinander verglichen. Der Vergleich umfasst die gemittelte Verlusthöhe, die Verlusthöhen der einzelnen Düsen und die Differenz zwischen links- und rechtsseitiger Düsenströmung, wie in den Abbildung 45, 46 und 47 zu sehen ist.

Die Kurve der gemittelten Verlusthöhe (Abbildung 47) zeigt, dass die Version 5 die niedrigsten Verluste und die Version 4 die höchsten Verluste aufweist.

Die Kurven der Verlusthöhen der einzelnen Düsen (Abbildung 45) veranschaulicht das niedrigere Verlustniveau der Version 5 im Vergleich zur Version 3. Die Version 4 erzeugt bei den höheren Düsennummern sehr hohe Strömungsverluste.

Das Diagramm der links- und rechtsseitigen Düsenströmung (Abbildung 46) zeigt, dass bei der Version 4 die Strömungsverhältnisse von Düse zu Düse sehr stark abweichen. Bei Düse 2 erkennt man eine stark positive Differenz und bei den Düsen 5 und 6 eine stark negative Differenz zwischen links- und rechtsseitiger Strömung.

Fasst man diesen Vergleich zusammen, sind die Versionen 3 und 4 zu verwerfen. Als neue Referenzleitung für die weiteren Versionen gilt nun die Version 5, da sie die geringsten Verluste erzeugt und das beste Verhalten bezüglich der links-rechtsseitigen Düsenströmung aufweist.

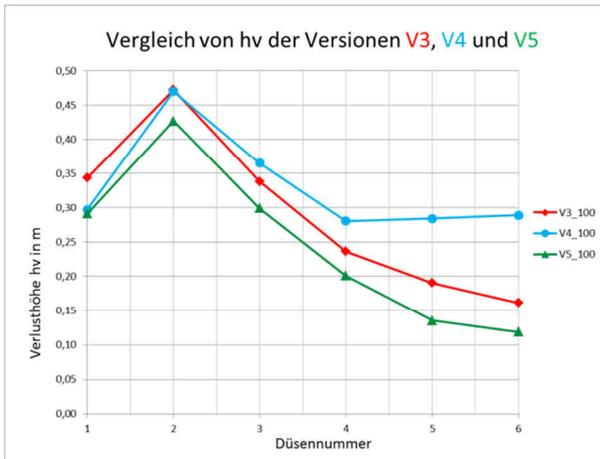


Abbildung 45: Vergleich Verlusthöhe V3, V4 und V5

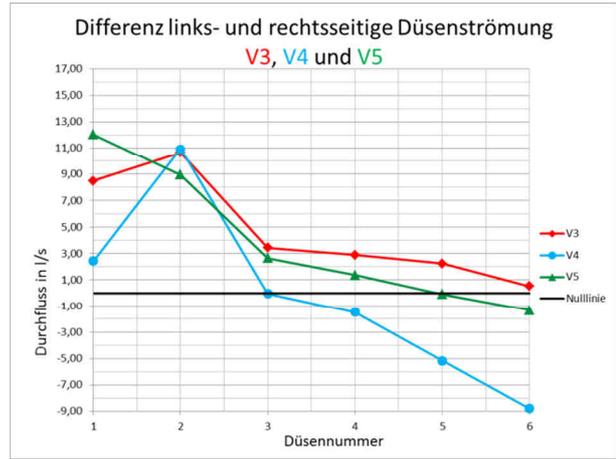


Abbildung 46: Vergleich Düsenströmung V3, V4 und V5

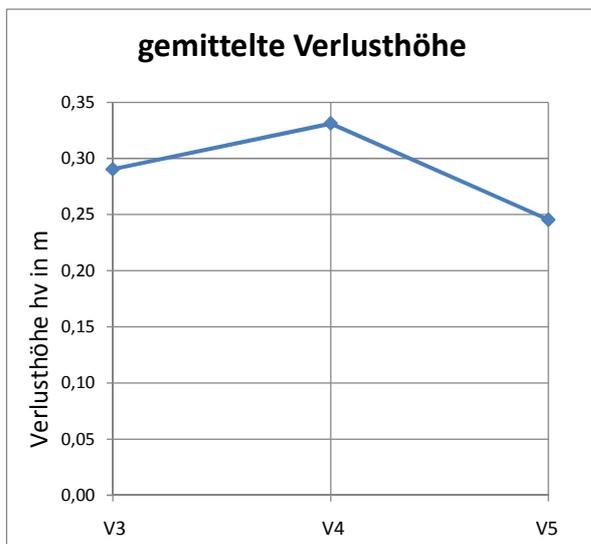


Abbildung 47: Vergleich gemittelte Verlusthöhe V3, V4 und V5

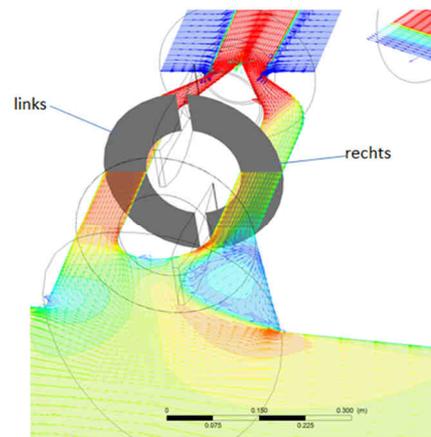


Abbildung 48: links- und rechtsseitige Düsenströmung

7.5. VRL neu Version 6

7.5.1. Konstruktion

Version 5 dient als Ausgangsbasis für Version 6, bei welcher der Öffnungswinkel des Abzweigers auf 22° verkleinert und der Winkelversatz der Kegelachse zur Düsenachse auf 20° vergrößert wurde (siehe Abbildung 49). Durch diese beiden Maßnahmen soll die Strömung im Abzweiger kleinere Ablösezone als in Version 5 ausbilden, da die Querschnittsfläche des Kegels verkleinert wird. Die restliche Geometrie der Verteilrohrleitung bleibt unverändert.

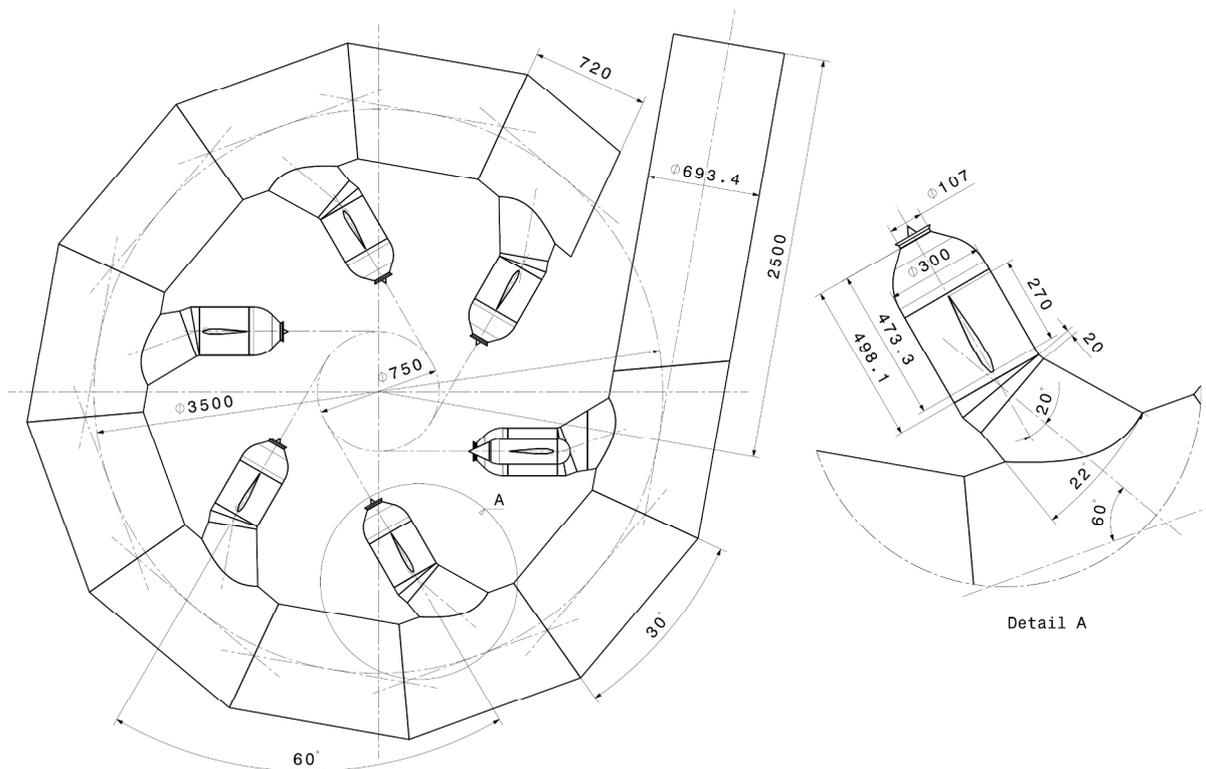


Abbildung 49: Konstruktion VRL neu Version 6 mit Detail des Abzweigers und der Düse

7.5.2. Meshing, Solver-Setup

Alle Einstellungen bei der Vergitterung und alle Parameter der Solver-Einstellungen in Tabelle 21 bleiben unverändert wie bei den zuvor zweiphasig gerechneten Versionen.

Tabelle 21: Solver-Setup VRL neu Version 6

Gitterart	O-Grid Struktur mit Wandverdichtung
Turbulenzmodell	SST
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet 1495,5 kg/s air volume fraction = 0
Randbedingung am Austritt	static pressure and direction; static pressure = 1 bar air volume fraction = 1 an der Mantelfläche des Austrittszynders; volume fraction = zero gradient an der Stirnfläche des Austrittszynders
zweiphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

7.5.3. Auswertung

Die Summe der Verlusthöhen beträgt 1,49 m. Das entspricht 1,20 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. Die Auswertung zeigt, dass die Version 6 eine leichte Erhöhung der Verluste um ca. 1 % im Vergleich zur Version 5 verursacht. Die Differenz zwischen links-rechtsseitiger Düsenströmung wurde verschlechtert und zeigt ein ähnliches Verhalten wie die Version 4. In Abbildung 50 rechts unten (Contour-Plot für Geschwindigkeit) sind kleinere Ablösezonen in den Abzweigern im Vergleich zu Version 5 zu erkennen, jedoch sieht man im Contour-Plot für den Totaldruck bei den Düsen 5 und 6 erhöhte Verluste in der linksseitigen Düsenströmung, ähnlich wie die Version 4. Dies lässt sich auch in Tabelle 22 bei der negativen Differenz zwischen links- und rechtsseitiger Düsenströmung für die Düsen 5 und 6 erkennen.

Tabelle 22: Auswertung VRL neu Version 6

Abweichung	Q	1500,00 l/s	Q _I	1493,78 l/s
0,64 %	Q _I	-251,59 l/s	Q _{II}	1245,01 l/s
-1,03 %	Q _{II}	-247,42 l/s	Q _{III}	998,33 l/s
-0,62 %	Q _{III}	-248,46 l/s	Q _{IV}	750,24 l/s
0,41 %	Q _{IV}	-251,03 l/s	Q _V	499,09 l/s
0,58 %	Q _V	-251,45 l/s	Q _{VI}	247,96 l/s
0,10 %	Q _{VI}	-250,26 l/s	Summe	-1500,21 l/s

100 mm Versatz

VEintritt	3,99 m/s	hv1	0,26 m	ζ ₁	0,32
VDüse1	-6,23 m/s	hv2	0,39 m	ζ ₂	0,48
VDüse2	-6,12 m/s	hv3	0,31 m	ζ ₃	0,38
VDüse3	-6,15 m/s	hv4	0,21 m	ζ ₄	0,26
VDüse4	-6,21 m/s	hv5	0,17 m	ζ ₅	0,21
VDüse5	-6,22 m/s	hv6	0,15 m	ζ ₆	0,19
VDüse6	-6,19 m/s	Øhv	0,25 m	Øζ	0,31

	links	rechts	Diff	Summe
QDüse1	129,54	122,08 l/s	7,46	251,62
QDüse2	129,04	118,40 l/s	10,64	247,44
QDüse3	124,63	123,85 l/s	0,78	248,47
QDüse4	125,29	125,76 l/s	-0,47	251,05
QDüse5	124,23	127,24 l/s	-3,01	251,46
QDüse6	122,24	128,03 l/s	-5,80	250,27
Mittelwert	125,83	124,23 l/s	1,60	250,05

p _{tot_max}	
in Symmetrieebene	12,49 bar
in gesamter Leitung	12,62 bar

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q _I bis Q ₆ ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
v _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
v _{Düse1} bis v _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlustrhöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
Øh _v ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlustrhöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
Øζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten
Q _{Düse1} bis Q _{Düse6} ...	Durchfluss in den links- und rechtsseitigen Düsenkanälen in l/s
Diff...	Differenz zwischen links- und rechtsseitigem Düsenkanal in l/s
p _{tot_max} ...	maximaler Totaldruck in Pa

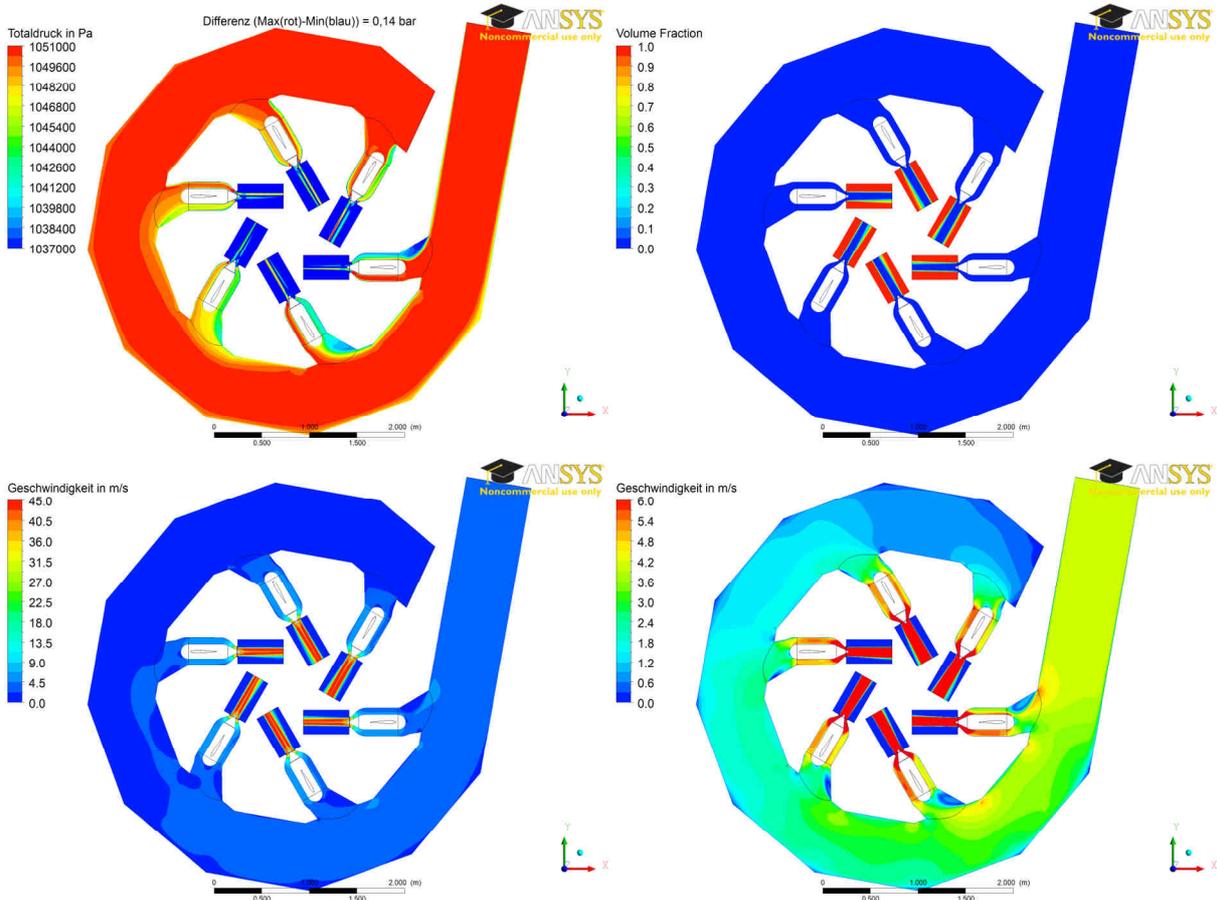


Abbildung 50: Auswertung VRL neu Version 6

7.6. VRL neu Version 7

7.6.1. Konstruktion

Der Abzweiger der Version 7 wurde als elliptischer Kegel mit einem Öffnungswinkel von 21° und einem Winkelversatz zur Düsenachse von 10° konstruiert. Die elliptische Form des Kegels ergibt sich aus dem Winkelversatz von 10° und dem direkten Anschluss an den Kreisquerschnitt des Düsenrohres. Der Rest der Leitung bleibt wie bei den vorigen Versionen unverändert. Abbildung 51 stellt die Konstruktion der Version 7 dar.

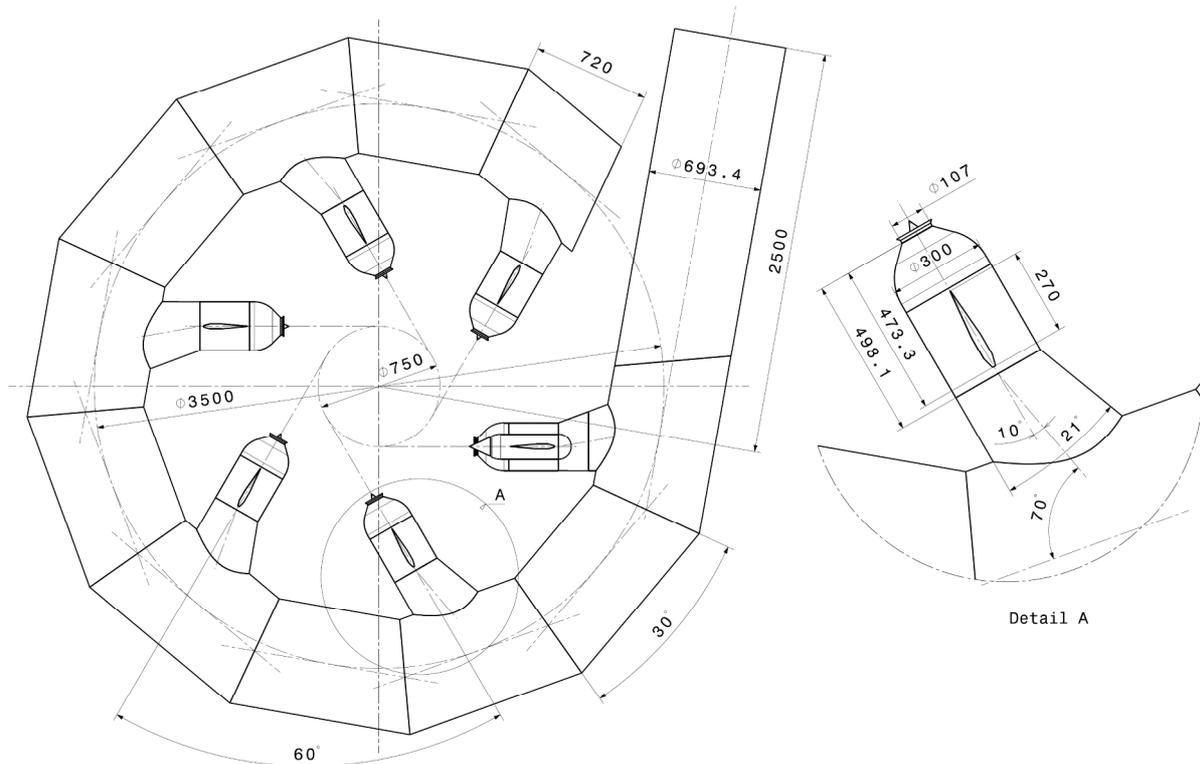


Abbildung 51: Konstruktion VRL neu Version 7 mit Detail des Abzweigers und der Düse

7.6.2. Meshing, Solver-Setup

In Tabelle 23 bleiben die Einstellungen der Vergitterung und die Parameter der Solver-Einstellungen unverändert wie bei den zuvor zweiphasig gerechneten Versionen.

Tabelle 23: Solver-Setup VRL neu Version 7

Gitterart	O-Grid Struktur mit Wandverdichtung
Turbulenzmodell	SST
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet 1495,5 kg/s air volume fraction = 0
Randbedingung am Austritt	static pressure and direction; static pressure = 1 bar air volume fraction = 1 an der Mantelfläche des Austrittszyllinders; volume fraction = zero gradient an der Stirnfläche des Austrittszyllinders
zweiphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

7.6.3. Auswertung

Die Auswertung der Version 7 ergibt eine Erhöhung der gemittelten Verlusthöhe im Vergleich zur Version 5 von 4,4 %. Die Summe der Verlusthöhen beträgt 1,54 m. Das entspricht 1,23 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. Weiters ist in Tabelle 24 eine deutliche Zunahme der Differenz der links-rechtsseitigen Düsenströmung vor allem bei den niedrigeren Düsennummern zu verzeichnen. In Abbildung 52 rechts unten (Contour-Plot für Geschwindigkeit) erkennt man bei den Düsen 1 und 2 Bereiche erhöhter Geschwindigkeit in den linken Strömungskanälen.

Tabelle 24: Auswertung VRL neu Version 7

Abweichung	Q	1500,00 l/s		
-0,96 %	Q _I	-247,60 l/s	Q _I	1496,26 l/s
0,00 %	Q _{II}	-250,00 l/s	Q _{II}	1247,56 l/s
-0,56 %	Q _{III}	-248,60 l/s	Q _{III}	998,49 l/s
0,49 %	Q _{IV}	-251,22 l/s	Q _{IV}	751,06 l/s
0,43 %	Q _V	-251,09 l/s	Q _V	500,74 l/s
0,59 %	Q _{VI}	-251,48 l/s	Q _{VI}	250,24 l/s
	Summe	-1499,99 l/s		

100 mm Versatz

VEintritt	3,99 m/s	hv1	0,31 m	ζ ₁	0,38
VDüse1	-6,13 m/s	hv2	0,41 m	ζ ₂	0,51
VDüse2	-6,19 m/s	hv3	0,31 m	ζ ₃	0,38
VDüse3	-6,15 m/s	hv4	0,21 m	ζ ₄	0,25
VDüse4	-6,22 m/s	hv5	0,16 m	ζ ₅	0,19
VDüse5	-6,21 m/s	hv6	0,14 m	ζ ₆	0,17
VDüse6	-6,22 m/s	∅hv	0,26 m	∅ζ	0,32

	links	rechts	Diff	Summe
QDüse1	131,92	115,68 l/s	16,25	247,60
QDüse2	131,69	118,31 l/s	13,38	250,00
QDüse3	126,05	122,56 l/s	3,49	248,60
QDüse4	126,90	124,32 l/s	2,58	251,22
QDüse5	125,86	125,23 l/s	0,63	251,09
QDüse6	125,12	126,36 l/s	-1,24	251,48
Mittelwert	127,92	122,08 l/s	5,85	250,00

p _{tot_max}	
in Symmetrieebene	12,57 bar
in gesamter Leitung	12,72 bar

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{V1} bis h _{V6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
∅h _v ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
∅ζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten
Q _{Düse1} bis Q _{Düse6} ...	Durchfluss in den links- und rechtsseitigen Düsenkanälen in l/s
Diff...	Differenz zwischen links- und rechtsseitigem Düsenkanal in l/s
p _{tot_max} ...	maximaler Totaldruck in Pa

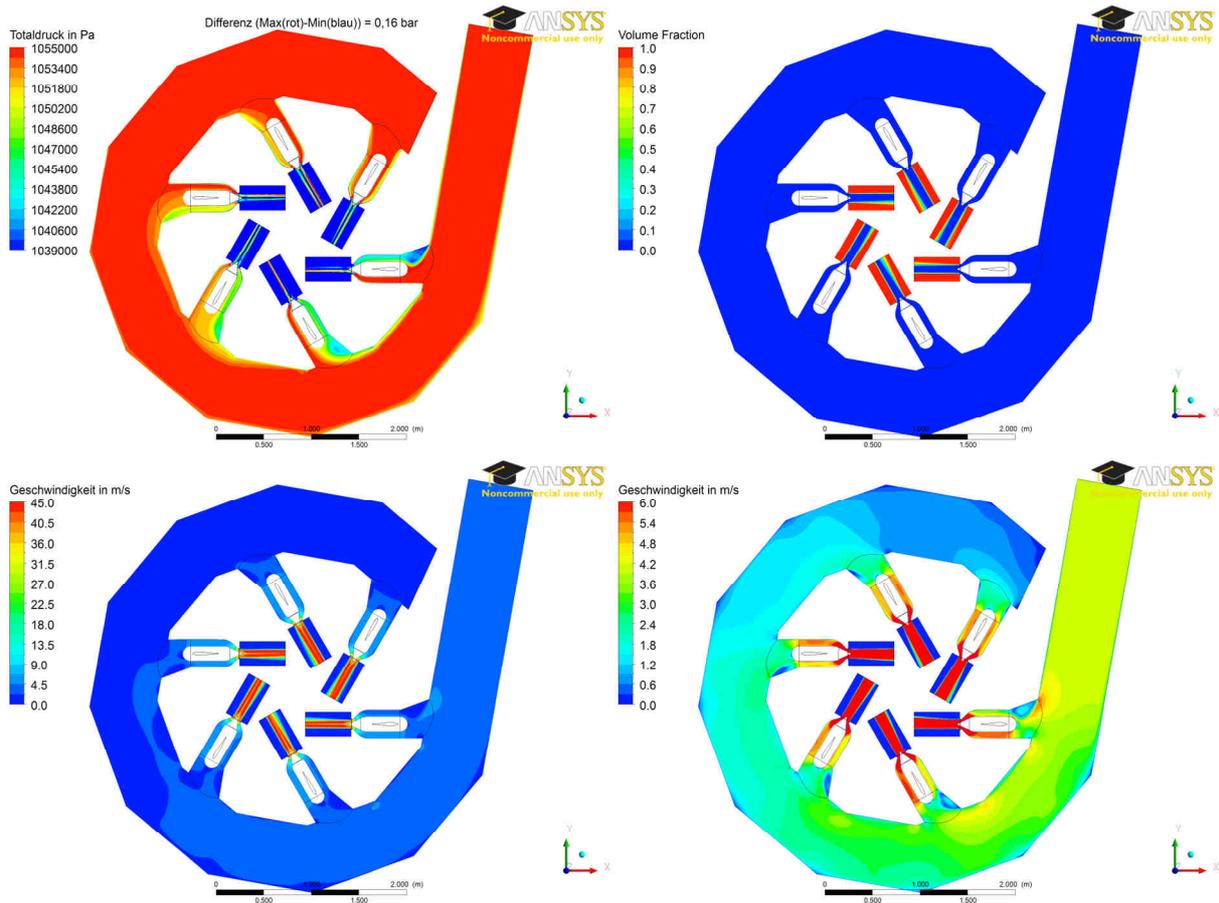


Abbildung 52: Auswertung VRL neu Version 7

7.7. Vergleich V5, V6 und V7

Der Vergleich der Versionen 5, 6 und 7 (Abbildung 53, 54 und 55) zeigt die gemittelte Verlusthöhe, die Verlusthöhen der einzelnen Düsen und die Differenz der links- und rechtsseitigen Düsenströmung.

Das Diagramm der gemittelten Verlusthöhe (Abbildung 55) zeigt keine Verbesserung ausgehend von Version 5, sondern vielmehr eine leichte Erhöhung der Verluste.

Im Vergleich der Verlusthöhen der einzelnen Düsen (Abbildung 53) sieht man, dass die Version 6 bei Düse 1 und 2 die niedrigsten und bei den Düsen 5 und 6 die höchsten Verluste aufweist. Version 7 erzeugt im Vergleich zu Version 5 bei allen Düsen bis auf Düse 5 und 6 dieselben Verluste. Bei Düse 5 und 6 liegen die Verluste höher als bei Version 5.

Dieser Vergleich zeigt, dass durch die Versionen 6 und 7 keine Verbesserung zu Version 5 zu verzeichnen ist. Version 7 scheidet auch wegen der großen Differenz der links-rechtsseitigen Düsenströmung bei Düse 1 und 2 aus. Version 6 weist bei den Düsen 5 und 6 eine hohe negative Differenz auf und scheidet daher ebenfalls aus. Deshalb bleibt die Version 5 weiterhin als Referenz für die weiteren Rechnungen bestehen.

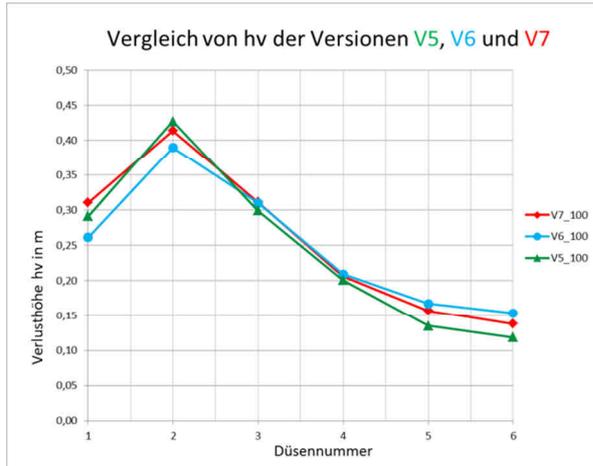


Abbildung 53: Vergleich Verlusthöhe V5, V6 und V7

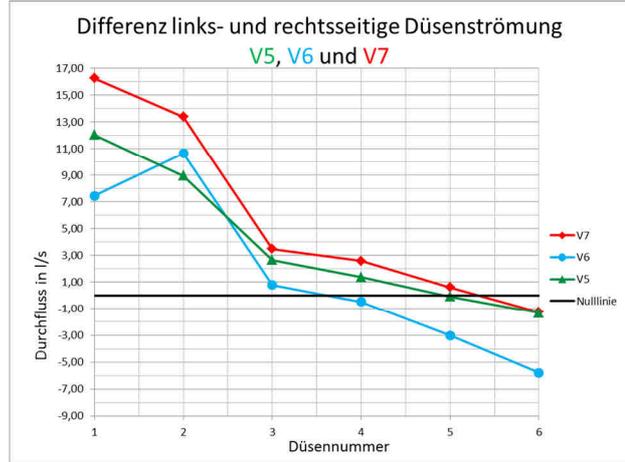


Abbildung 54: Vergleich Düsenströmung V5, V6 und V7

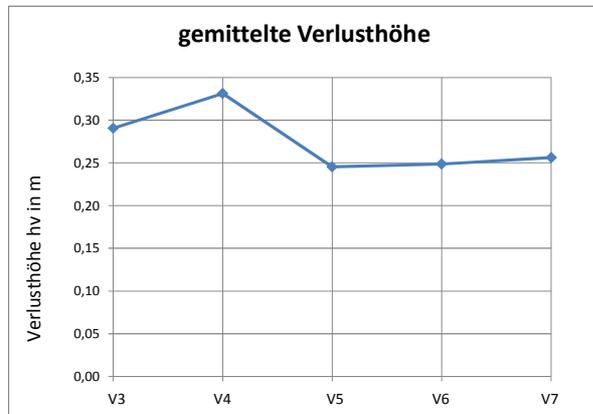


Abbildung 55: Vergleich gemittelte Verlusthöhe V5, V6 und V7

7.8. VRL neu Version 8

7.8.1. Konstruktion

In Abbildung 56 ist die Konstruktion der Version 8 der neuen Verteilrohrleitung zu sehen. Diese wurde ausgehend von Version 5 konstruiert. Der Öffnungswinkel des Konus mit 40° und der Winkelversatz zur Düsenachse von 10° bleiben wie bei Version 5 gleich. Das gerade Rohrstück mit Winkelversatz wurde auf 120 mm Länge vergrößert und der anschließende Konus somit verkürzt. Der letzte Rohrschuss wurde bei einer Länge von 650 mm mit einer geraden Wand verschlossen.

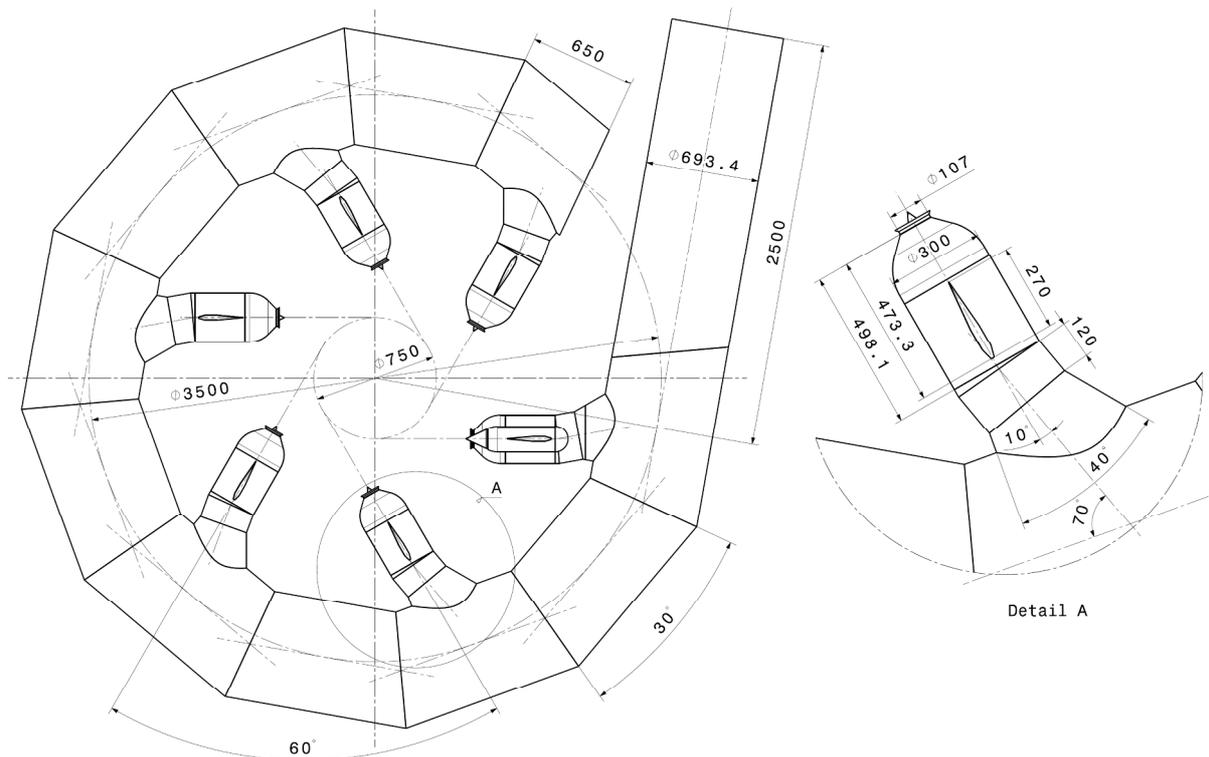


Abbildung 56: Konstruktion VRL neu Version 8 mit Detail des Abzweigers und der Düse

7.8.2. Meshing, Solver-Setup

Alle Einstellungen bei der Vergitterung und alle Parameter der Solver-Einstellungen bleiben unverändert wie bei den zuvor zweiphasig gerechneten Versionen, um die Vergleichbarkeit der Versionen zu bewahren (siehe Tabelle 25).

Tabelle 25: Solver-Setup VRL neu Version 8

Gitterart	O-Grid Struktur mit Wandverdichtung
Turbulenzmodell	SST
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet 1495,5 kg/s air volume fraction = 0
Randbedingung am Austritt	static pressure and direction; static pressure = 1 bar air volume fraction = 1 an der Mantelfläche des Austrittszynders; volume fraction = zero gradient an der Stirnfläche des Austrittszynders
zweiphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

7.8.3. Auswertung

In Tabelle 26 ist die Auswertungstabelle der Version 8 zu sehen. Die Berechnung ergab eine Senkung der gemittelten Verlusthöhe von 3,3 % im Vergleich zur Version 5. Die Summe der Verlusthöhen beträgt 1,43 m. Das entspricht 1,15 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. Weiters wurde das Verhalten der links-rechtsseitigen Düsenströmung verbessert. Bei Düse 1 wurde die Differenz im Vergleich zu Version 5 deutlich gesenkt (siehe Abbildung 59). Version 8 erzeugt bei den Düsen 1 und 2 deutlich geringere Verluste als Version 5 (in Abbildung 58 zu sehen). Der Contour-Plot für Geschwindigkeit (Abbildung 57 rechts unten) weist im Vergleich zu Version 5 kleinere Ablösezone in den Abzweigern auf, was auf den kleineren Eintrittsquerschnitt des Kegels zurückzuführen ist.

Tabelle 26: Auswertung VRL neu Version 8

Abweichung	Q	1500,00 l/s	Q _I	1498,05 l/s
0,34 %	Q ₁	-250,84 l/s	Q _{II}	1245,42 l/s
-0,10 %	Q ₂	-249,75 l/s	Q _{III}	996,57 l/s
-0,76 %	Q ₃	-248,09 l/s	Q _{IV}	749,31 l/s
-0,73 %	Q ₄	-248,19 l/s	Q _V	501,93 l/s
0,25 %	Q ₅	-250,62 l/s	Q _{VI}	251,86 l/s
0,96 %	Q ₆	-252,41 l/s	Summe	-1499,90 l/s

100 mm Versatz

VEintritt	3,99 m/s	h _{v1}	0,27 m	ζ ₁	0,33
VDüse1	-6,21 m/s	h _{v2}	0,39 m	ζ ₂	0,48
VDüse2	-6,18 m/s	h _{v3}	0,30 m	ζ ₃	0,37
VDüse3	-6,14 m/s	h _{v4}	0,20 m	ζ ₄	0,24
VDüse4	-6,14 m/s	h _{v5}	0,15 m	ζ ₅	0,18
VDüse5	-6,20 m/s	h _{v6}	0,12 m	ζ ₆	0,15
VDüse6	-6,25 m/s	Ø _{h_v}	0,24 m	Øζ	0,29

	links	rechts	Diff	Summe
Q _{Düse1}	129,96	120,87 l/s	9,09	250,83
Q _{Düse2}	130,02	119,72 l/s	10,30	249,74
Q _{Düse3}	124,76	123,32 l/s	1,43	248,08
Q _{Düse4}	124,63	123,55 l/s	1,08	248,18
Q _{Düse5}	125,09	125,53 l/s	-0,44	250,62
Q _{Düse6}	125,49	126,91 l/s	-1,43	252,40
Mittelwert	126,66	123,32 l/s	3,34	249,97

p _{tot_max}	
in Symmetrieebene	12,67 bar
in gesamter Leitung	12,70 bar

Abweichung... *prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %*

Q... *Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s*

Q_I bis Q₆... *Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s*

Summe... *Summe der Einzeldurchflüsse in l/s*

Q_I bis Q_{VI}... *Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s*

V_{Eintritt}... *Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s*

V_{Düse1} bis V_{Düse6}... *flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s*

h_{v1} bis h_{v6}... *Verlustrhöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m*

Ø_{h_v}... *arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlustrhöhen in m*

ζ₁ bis ζ₆... *dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene*

Øζ... *arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten*

Q_{Düse1} bis Q_{Düse6}... *Durchfluss in den links- und rechtsseitigen Düsenkanälen in l/s*

Diff... *Differenz zwischen links- und rechtsseitigem Düsenkanal in l/s*

p_{tot_max}... *maximaler Totaldruck in Pa*

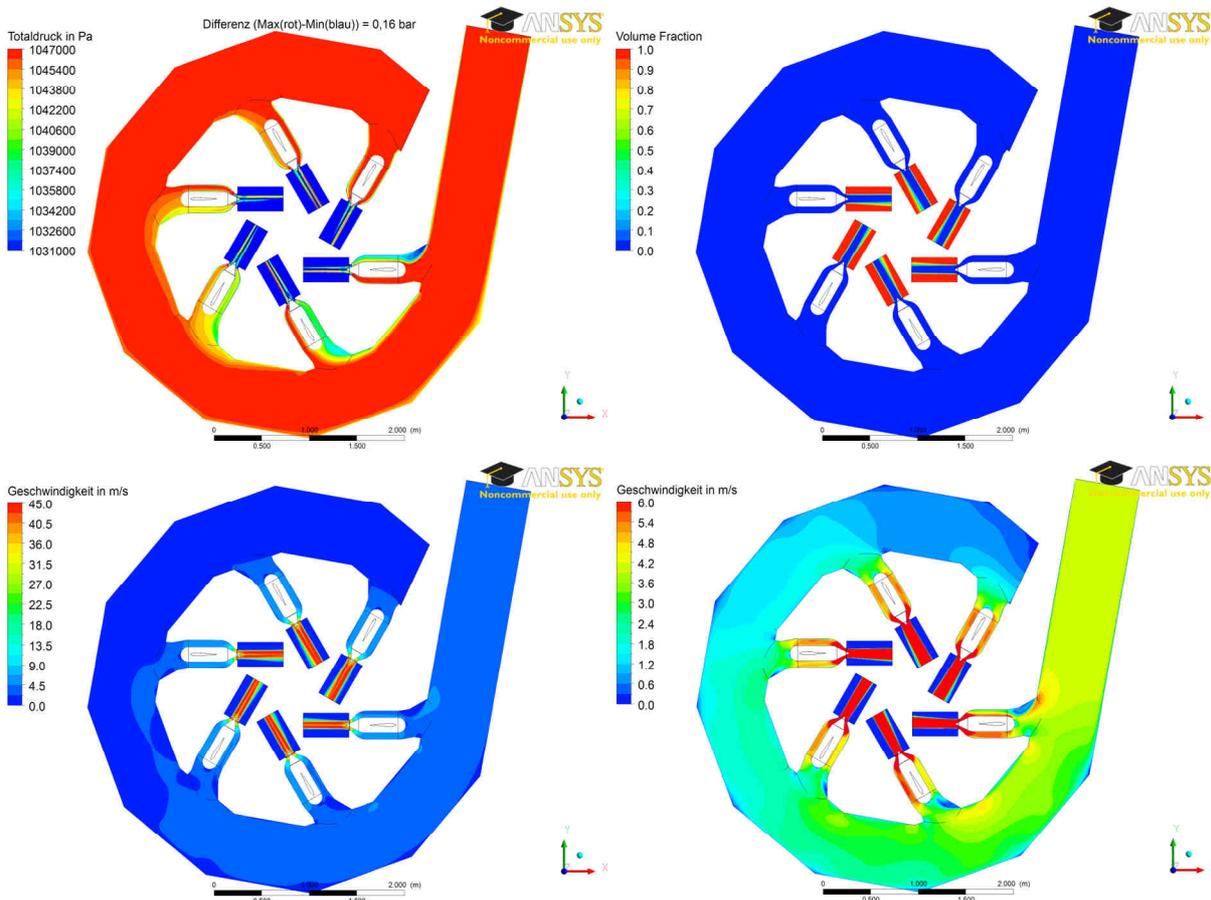


Abbildung 57: Auswertung VRL neu Version 8

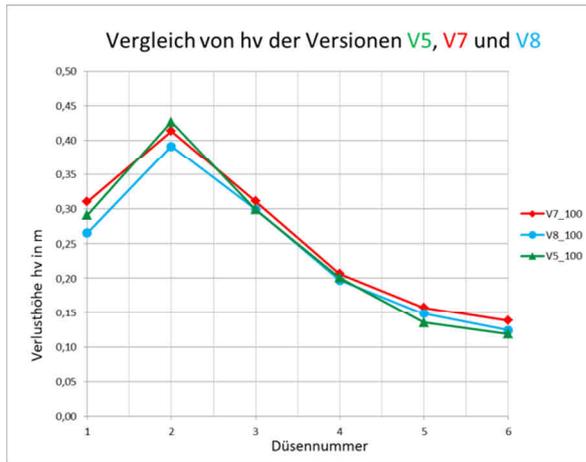


Abbildung 58: Vergleich Verlusthöhe V5, V7 und V8

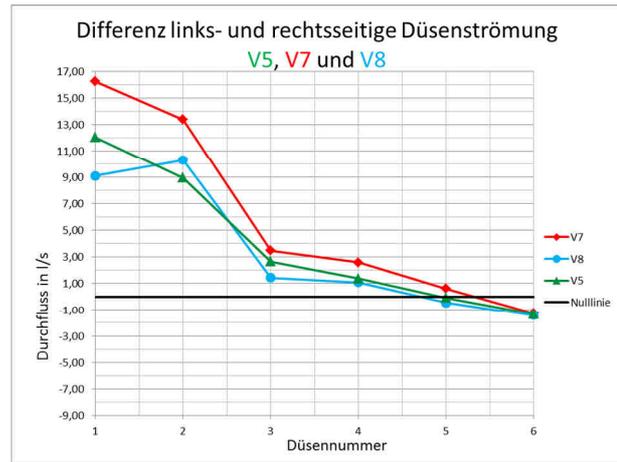


Abbildung 59: Vergleich Düsenströmung V5, V7 und V8

8. Vergleich der zweiphasigen Rechnungen

In Abbildung 60 sind die gemittelten Verlusthöhen für alle zweiphasigen Rechnungen der Versionen 3 bis 8 gegenübergestellt. Wie dieser Verlauf zeigt, erzeugt Version 8 die niedrigsten Verluste.

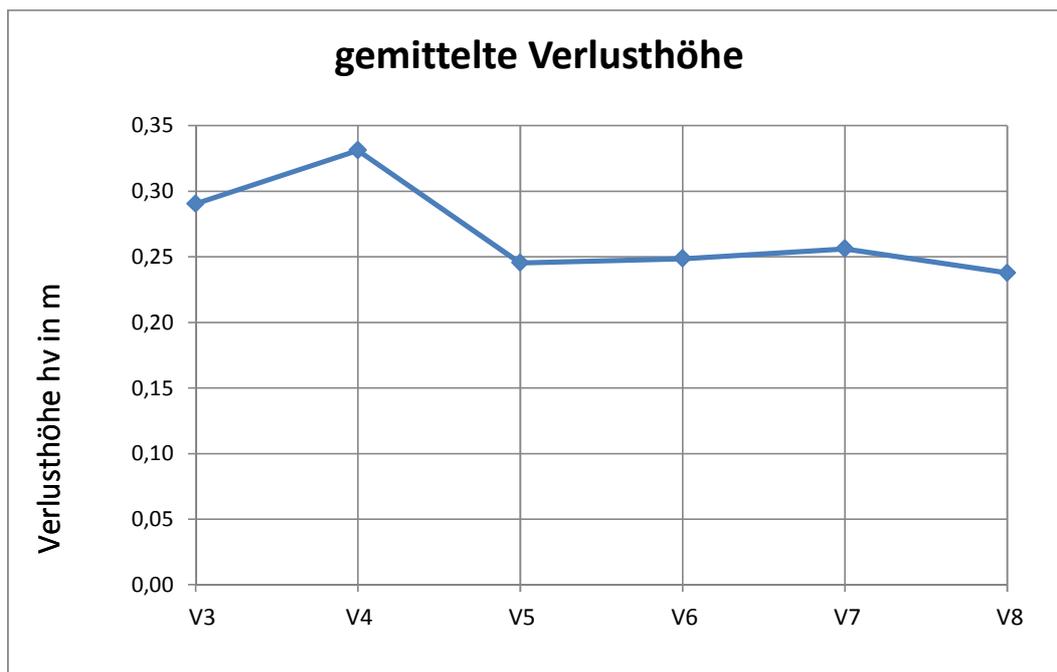


Abbildung 60: Vergleich der zweiphasigen Rechnungen

Somit wurde mit der Version 8 eine Leitung konstruiert, die im Vergleich mit allen vorangegangenen Versionen die niedrigsten Verluste aufweist und deren Verhalten bezüglich der links- und rechtsseitigen Differenz der Düsenströmung im Vergleich am besten ist.

9.1.2. Auswertung

Bei der Auswertung des 4-düsigen Teillastfalles wurde in der Leitung im Bereich der fünften Düse Luft festgestellt (siehe Abbildung 62 links oben). Auch beim 3-düsigen, 2-düsigen und 1-düsigen Teillastfall wurde Luft in der Verteilrohrleitung festgestellt (air volume fraction > 0). Als Ursache dafür wurde zunächst angenommen, dass sich in den Austrittsräumen der geschlossenen Düsen Luft sammelt und diese aufgrund der dort vorherrschenden geringen Geschwindigkeiten nicht komplett aus den Austrittsräumen transportiert wird.

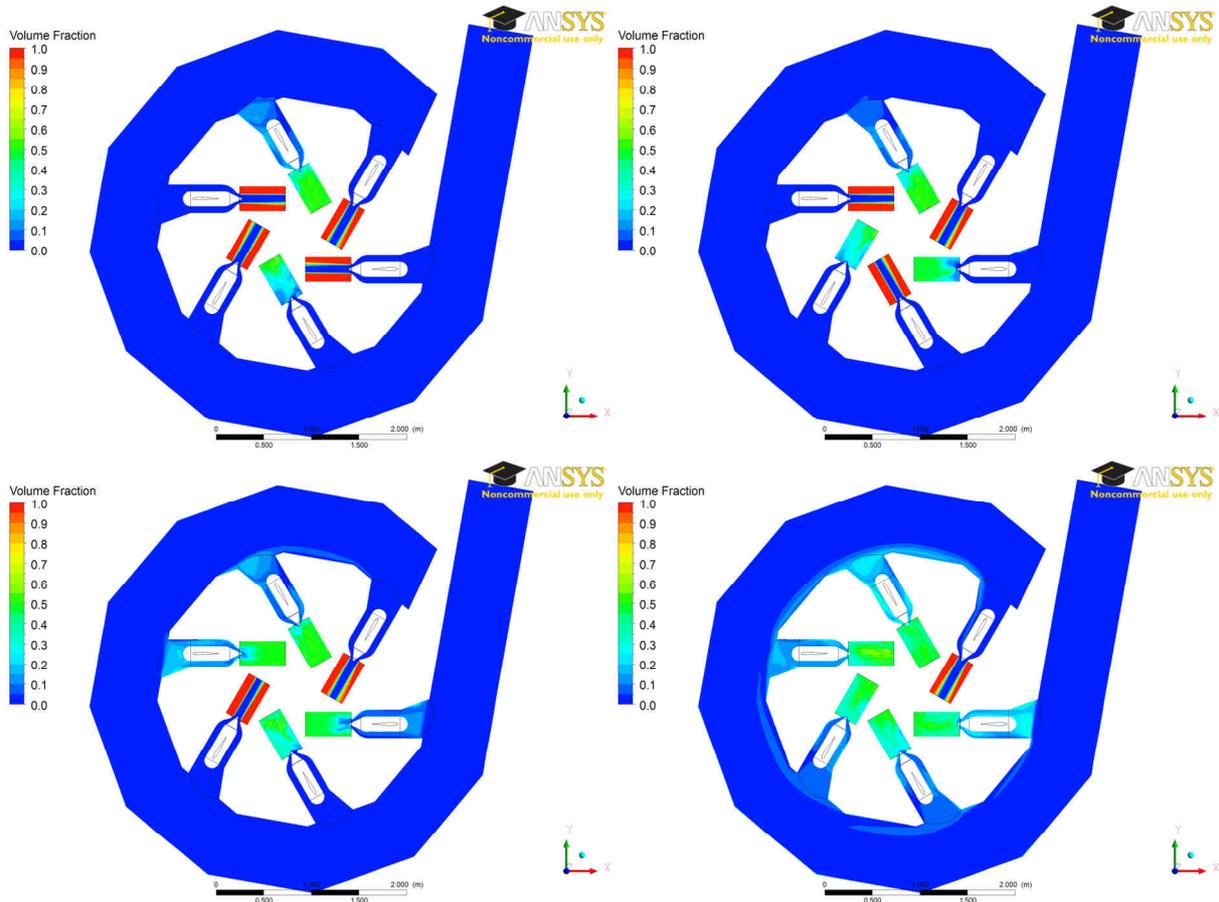


Abbildung 62: Volume Fraction Teillastfälle Version 7

Zur Lösung des Problems wurde der Austrittszylinder bei den geschlossenen Düsen entfernt und die Düsenaustrittsfläche mit einer Wand verschlossen. Durch diese Maßnahme soll die Luft besser aus den Düsen gespült werden. An diesem Punkt soll noch erwähnt werden, dass hier noch von einem physikalischen Problem ausgegangen wurde, was sich aber im nächsten Kapitel aufklären wird. Die folgenden Teillastfälle wurden mit der Version 8 gerechnet, da diese (wie in Kapitel 7.8.3 gezeigt) geringere Verlusthöhen aufweist.

9.2. Teillastfall Version 8

9.2.1. Meshing, Solver-Setup

Für die geschlossenen Düsen wird ein neues Gitter benötigt, bei dem der Austrittszylinder nicht vorhanden ist. Hierzu wird die Düse an der Austrittskante des Wasserstrahls mit einer Wand verschlossen.

Die Düsenaustrittsfläche wurde mit der Randbedingung „Wall“ versehen. Die restlichen Parameter des Solver-Setups bleiben wie bei den Teillastfällen der Version 7 unverändert wie in Tabelle 28 zu sehen ist.

Tabelle 28: Solver-Setup VRL neu Version 8 Teillastfälle

Gitterart	O-Grid Struktur mit Wandverdichtung
Turbulenzmodell	SST
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet: 1246,25 kg/s (5-düsig); 997 kg/s (4-düsig); 747,75 kg/s (3-düsig); 498,5 kg/s (2-düsig); 249,25 kg/s (1-düsig); air volume fraction = 0
Randbedingung am Austritt	static pressure and direction; static pressure = 1 bar air volume fraction = 1 an der Mantelfläche des Austrittszyndlers; volume fraction = zero gradient an der Stirnfläche des Austrittszyndlers
Randbedingung bei geschlossener Düse	no slip wall an der Düsenaustrittsfläche
zweiphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

9.2.2. Auswertung

Der 5-düsige Teillastfall weist bei der Auswertung keine Luft auf. Bei allen anderen Teillastfällen ist in der Verteilrohrleitung Luft zu erkennen (air volume fraction > 0). Dies muss ein numerischer Fehler sein, da die Bereiche, wo Luft zu erkennen ist, erst nach einigen Iterationsschritten auftreten. In Abbildung 63 und 64 werden die Konvergenzverläufe für die „volume fraction“ beim 5-düsigen, 4-düsigen, 3-düsigen und 2-düsigen Teillastfall gezeigt. Die Kurve der „volume fraction“ steigt beim 4-düsigen, 3-düsigen und 2-düsigen Teillastfall nach etwa 100 Iterationen wieder an. Somit brachte das Verschließen der Düse keine Besserung hinsichtlich der Luft in der Leitung. Die Tatsache, dass diese Maßnahme keine Besserung brachte, zeigt umso mehr, dass dies kein physikalisches, sondern vielmehr ein numerisches Problem ist.

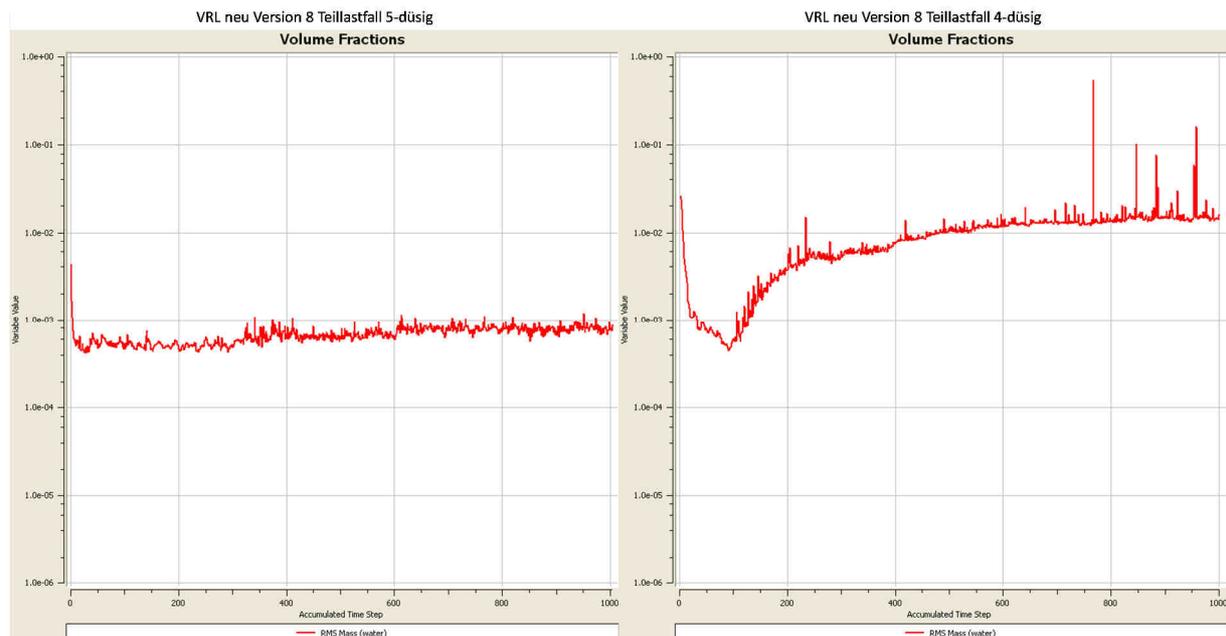


Abbildung 63: Konvergenzverläufe Volume Fraction 5-düsige und 4-düsige

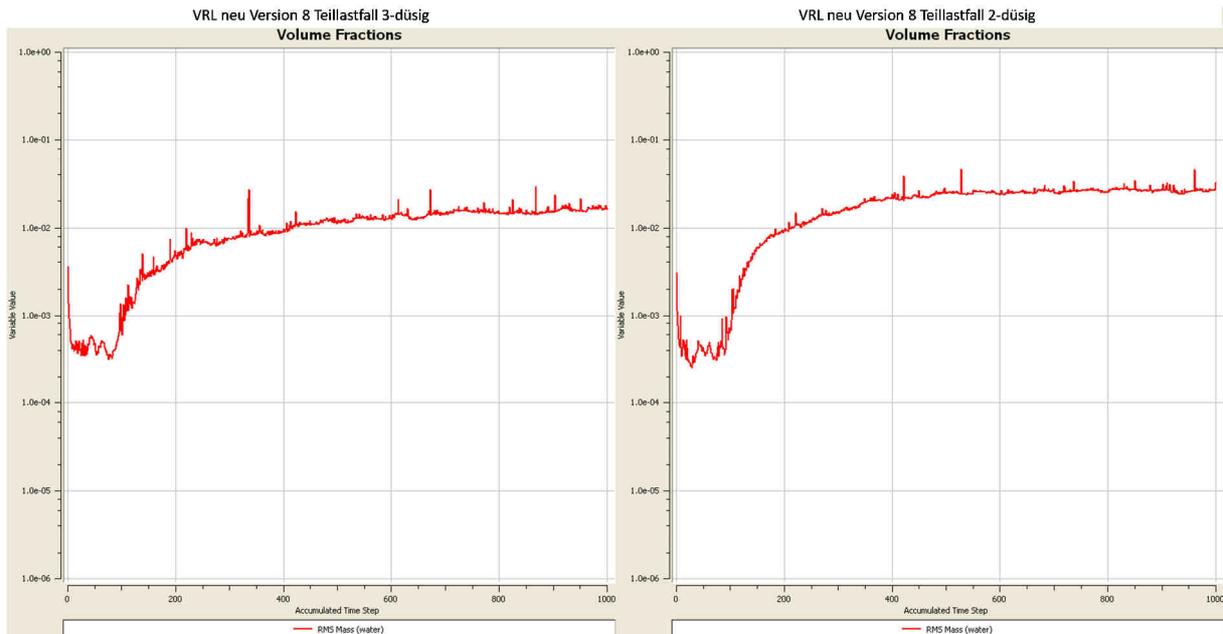


Abbildung 64: Konvergenzverläufe Volume Fraction 3-düsig und 2-düsig

9.2.3. Weitere Maßnahmen zur Vermeidung der Luft in der Verteilrohrleitung

Als weitere Maßnahme wird als Initialisierung der Rechnung in der gesamten Geometrie eine „air volume fraction“ mit dem Wert 0 definiert. Dies bedeutet, dass im ersten Iterationsschritt in der gesamten Leitung inklusive der Austrittszylinder nur Wasser vorhanden ist. Eine Rechnung für den 4-düsig Fall zeigt jedoch wieder einen ähnlichen Verlauf der „volume fraction“, bei dem die Kurve bei etwa 100 Iterationen wieder ansteigt.

In den weiteren Rechnungen wird die Initialisierung des vorigen Schritts beibehalten. Für den 1-düsig Fall wird anstatt einer undurchlässigen Wand ein Volumenstrom von 1 l/s für die geschlossenen Düsen 1 bis 5 als Randbedingung definiert. Diese Maßnahme zeigt jedoch auch keinen Fortschritt. Die Kurve der „volume fraction“ beginnt nun schon bei ca. 40 Iterationen anzusteigen.

Anstatt eines Volumenstroms von 1 l/s wird an der Austrittsfläche der geschlossenen Düsen eine Geschwindigkeit von 1 m/s als Randbedingung definiert. Auch diese Rechnung bringt keinen konvergierenden Verlauf der „volume fraction“.

Im nächsten Schritt werden Rechnungen mit unterschiedlichen Turbulenzmodellen gestartet. Alle zuvor durchgeführten Rechnungen wurden mit dem SST-Turbulenzmodell gerechnet. Für den eindüsig Fall werden Rechnungen mit folgenden Turbulenzmodellen durchgeführt: BSL Reynolds Stress, SSG Reynolds Stress und k- ϵ .

Die Rechnung mit dem BSL Reynolds Stress Modell zeigt im Solver-Manager einen Anstieg der „volume fraction“ ab ca. 80 Iterationen. Das SSG Reynolds Stress Modell zeigt einen ganz ähnlichen Verlauf wie das BSL Reynolds Stress Modell. Das k- ϵ -Modell verzeichnet zwar auch einen Anstieg der „volume fraction“, jedoch kann im CFX Post festgestellt werden, dass die Bereiche der Luft in der Leitung um ein vielfaches kleiner sind als bei allen anderen Turbulenzmodellen. Eine weitere Rechnung mit dem k- ϵ -Modell für den 4-düsig Fall wird durchgeführt und die Auswertung dieser Rechnung ergibt einen konvergierenden Verlauf der „volume fraction“ bis dieser bei ca. 300 Iterationen wieder anzusteigen beginnt. Im CFX Post ist erst bei einer Auflösung der „volume fraction“ von 0,000 bis 0,001 Luft feststellbar. Es werden noch der 5-düsig, 3-düsig und 2-düsig Teillastfall gerechnet. Bei einer Auflösung der „volume fraction“ von 0,000 bis 0,001 sind bei allen Teillastfällen große Bereiche mit Luft zu erkennen. Dieses numerische Problem konnte also mit dem k- ϵ -Modell nicht gelöst werden.

Somit kann daraus geschlossen werden, dass das $k-\varepsilon$ -Modell im Vergleich zum SST-Modell eine leichte Verbesserung hinsichtlich der „volume fraction“ bringt, jedoch ist das Ergebnis noch immer nicht zufriedenstellend, da vor allem im 3-düsigen und 2-düsigen Teillastfall immer noch große Bereiche mit Luft auftreten. Bei allen weiteren Rechnungen wird mit dem $k-\varepsilon$ -Modell gerechnet.

Bei allen vorangegangenen Rechnungen wurde beim Solver-Setup in der Solver Control im Bereich „Fluid Timescale Control“ die Default-Einstellung „Auto Timescale“ verwendet. Diese Einstellung wird auf „Physical Timescale“ geändert. In der „out-file“ der bereits durchgeführten Rechnungen konnte man den „Automatic Timescale“ ablesen. In der Regel hatte dieser einen Wert um 0,05 sec. Also wurde versuchsweise ein „Physical Timescale“ mit 0,005 sec gewählt.

Mit diesem Timescale konvergiert die „volume fraction“, jedoch schwanken die Werte für ζ bei den einzelnen Düsen etwas stärker als zuvor. Um diese Schwankungen zu reduzieren, wird für den 2-düsigen Teillastfall versuchsweise eine Rechnung mit einem „Physical Timescale“ von 0,01 sec durchgeführt. Bei dieser Rechnung konvergiert die „volume fraction“ nicht mehr. Also wird der „Physical Timescale“ von 0,005 sec beibehalten und die leichten Schwankungen von ζ um einen konstanten Wert werden in Kauf genommen.

Somit ist das numerische Problem mit der Luft in der Verteilrohrleitung gelöst. Nun werden die Lastfälle Volllast, 5-düsige, 4-düsige, 3-düsige, 2-düsige und 1-düsige mit dem $k-\varepsilon$ -Modell und einem „Physical Timescale“ von 0,005 sec durchgeführt. Bei allen Rechnungen konvergiert der Verlauf der „volume fraction“ und im Contour-Plot der „volume fraction“ ist auch bei einer sehr hohen Auflösung von 0,000 bis 0,001 keine Luft mehr in der Leitung festzustellen.

In Tabelle 29 sind die Parameter des Solver-Setups zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 29: Solver-Setup VRL neu Version 8 Volllast und Teillastfälle

Gitterart	O-Grid Struktur mit Wandverdichtung
Turbulenzmodell	$k-\varepsilon$
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet: 1495,5 kg/s (6-düsige); 1246,25 kg/s (5-düsige); 997 kg/s (4-düsige); 747,75 kg/s (3-düsige); 498,5 kg/s (2-düsige); 249,25 kg/s (1-düsige); air volume fraction = 0
Randbedingung am Austritt	static pressure and direction; static pressure = 1 bar air volume fraction = 1 an der Mantelfläche des Austrittszylinders; volume fraction = zero gradient an der Stirnfläche des Austrittszylinders
Randbedingung bei geschlossener Düse	no slip wall an der Düsenaustrittsfläche
physical timescale	0,005 sec
zweiphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

In Kapitel 9.2.4 wird die Auswertung der Teillastfälle inklusive des Volllastfalles mit dem in Tabelle 29 angeführten Solver-Setup behandelt.

9.2.4. Auswertung Teillastfälle Version 8

1-düsiger Lastfall

Die Summe der Verlusthöhen der geöffneten Düsen beträgt 0,13 m. Das entspricht 0,11 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. Die in Tabelle 30 rot angeführten Einträge sind die Werte der geschlossenen Düsen. In Abbildung 65 sind die Contour-Plots für die Geschwindigkeit und für den Totaldruck zu sehen.

Tabelle 30: Auswertung Lastfall 1-düsig

Abweichung	Q	250,00 l/s		
-100,00 %	Q _I	0,00 l/s	Q _I	249,52 l/s
-100,00 %	Q _{II}	0,00 l/s	Q _{II}	249,10 l/s
-100,00 %	Q _{III}	0,00 l/s	Q _{III}	249,06 l/s
-100,00 %	Q _{IV}	0,00 l/s	Q _{IV}	249,09 l/s
-100,00 %	Q _V	0,00 l/s	Q _V	249,17 l/s
0,06 %	Q _{VI}	-250,15 l/s	Q _{VI}	249,05 l/s
	Summe	-250,15 l/s		

100 mm Versatz

V _{Eintritt}	0,67 m/s	h _{v1}	0,02 m	ζ ₁	0,97
V _{Düse1}	0,00 m/s	h _{v2}	0,03 m	ζ ₂	1,38
V _{Düse2}	0,00 m/s	h _{v3}	0,04 m	ζ ₃	1,56
V _{Düse3}	0,00 m/s	h _{v4}	0,04 m	ζ ₄	1,58
V _{Düse4}	0,00 m/s	h _{v5}	0,04 m	ζ ₅	1,67
V _{Düse5}	0,00 m/s	h _{v6}	0,13 m	ζ ₆	5,75
V _{Düse6}	-6,19 m/s	Øh _v	0,13 m	Øζ	5,75

	links	rechts	Diff	Summe
Q _{Düse1}	1,86	-1,86 l/s	3,72	0,00
Q _{Düse2}	1,65	-1,65 l/s	3,30	0,00
Q _{Düse3}	1,66	-1,66 l/s	3,33	0,00
Q _{Düse4}	1,67	-1,67 l/s	3,33	0,00
Q _{Düse5}	1,59	-1,59 l/s	3,17	0,00
Q _{Düse6}	123,58	126,50 l/s	-2,93	250,08
Mittelwert	123,58	126,50 l/s	-2,93	250,08

p _{tot_max}	
in Symmetrieebene	11,58 bar
in gesamter Leitung	12,00 bar

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q _I bis Q ₆ ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
Øh _v ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
Øζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten
Q _{Düse1} bis Q _{Düse6} ...	Durchfluss in den links- und rechtsseitigen Düsenkanälen in l/s
Diff...	Differenz zwischen links- und rechtsseitigem Düsenkanal in l/s
p _{tot_max} ...	maximaler Totaldruck in Pa

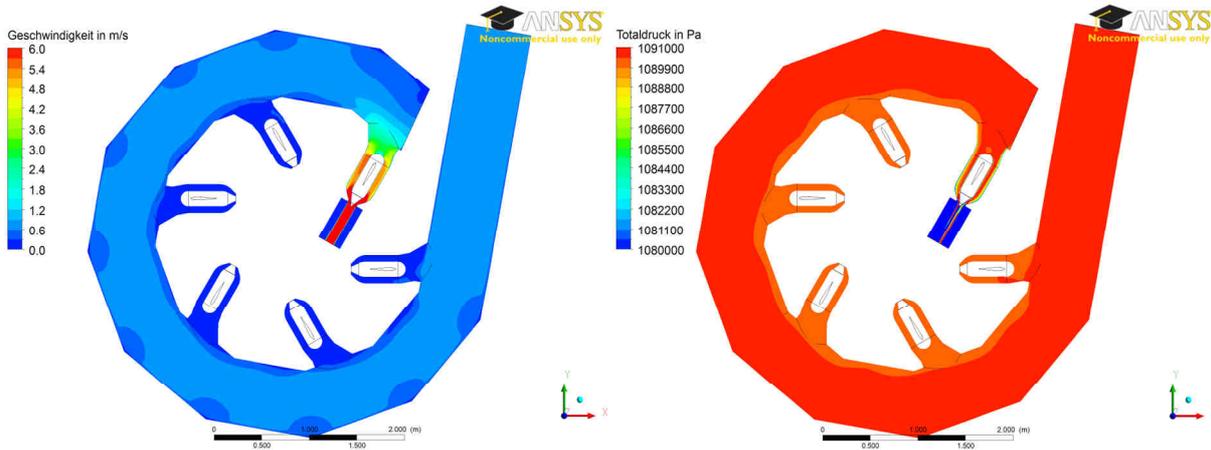


Abbildung 65: Auswertung Lastfall 1-düsig

2-düsiger Lastfall

In Tabelle 31 sind die Zahlenwerte der Auswertung und in Abbildung 66 sind die Geschwindigkeitsverteilung und die Totaldruckverteilung in der Symmetrieebene der Verteilrohrleitung zu sehen. Die Summe der Verlusthöhen der geöffneten Düsen beträgt 0,27 m. Das entspricht 0,23 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung.

Tabelle 31: Auswertung Lastfall 2-düsiger

Abweichung	Q	500,00 l/s		
-100,00 %	Q _I	0,00 l/s	Q _I	498,85 l/s
-100,00 %	Q _{II}	0,00 l/s	Q _{II}	498,26 l/s
-0,04 %	Q _{III}	-249,91 l/s	Q _{III}	498,34 l/s
-100,00 %	Q _{IV}	0,00 l/s	Q _{IV}	249,46 l/s
-100,00 %	Q _V	0,00 l/s	Q _V	249,31 l/s
0,01 %	Q _{VI}	-250,02 l/s	Q _{VI}	249,21 l/s
	Summe	-499,93 l/s		

100 mm Versatz

V _{Eintritt}	1,33 m/s	h _{v1}	0,09 m	ζ ₁	1,02
V _{Düse1}	0,00 m/s	h _{v2}	0,13 m	ζ ₂	1,40
V _{Düse2}	0,00 m/s	h _{v3}	0,15 m	ζ ₃	1,69
V _{Düse3}	-6,19 m/s	h _{v4}	0,04 m	ζ ₄	0,46
V _{Düse4}	0,00 m/s	h _{v5}	0,04 m	ζ ₅	0,45
V _{Düse5}	0,00 m/s	h _{v6}	0,12 m	ζ ₆	1,28
V _{Düse6}	-6,19 m/s	∅ _{h_v}	0,13 m	∅ _ζ	1,48

	links	rechts	Diff	Summe
Q _{Düse1}	5,79	-5,79 l/s	11,59	0,00
Q _{Düse2}	4,58	-4,58 l/s	9,16	0,00
Q _{Düse3}	124,37	125,53 l/s	-1,15	249,90
Q _{Düse4}	1,24	-1,24 l/s	2,48	0,00
Q _{Düse5}	1,27	-1,27 l/s	2,54	0,00
Q _{Düse6}	123,54	126,47 l/s	-2,93	250,01
Mittelwert	123,96	126,00 l/s	-2,04	249,95

p _{tot_max}	
in Symmetrieebene	11,89 bar
in gesamter Leitung	12,00 bar

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q _I bis Q ₆ ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
∅ _{h_v} ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
∅ _ζ ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten
Q _{Düse1} bis Q _{Düse6} ...	Durchfluss in den links- und rechtsseitigen Düsenkanälen in l/s
Diff...	Differenz zwischen links- und rechtsseitigem Düsenkanal in l/s
P _{tot_max} ...	maximaler Totaldruck in Pa

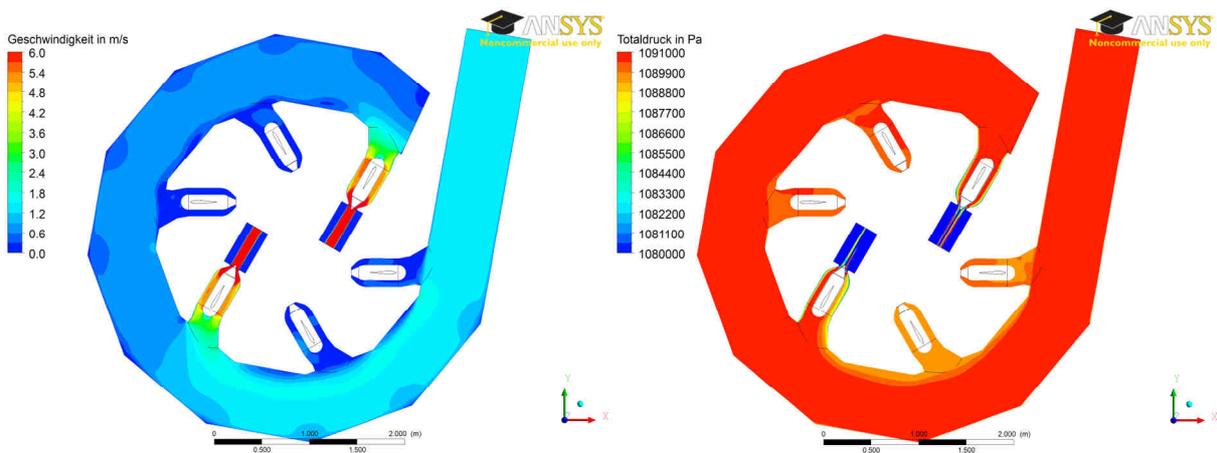


Abbildung 66: Auswertung Lastfall 2-düsiger

3-düsiger Lastfall

Tabelle 32 zeigt die Auswertungstabelle des 3-düsigen Lastfalls und Abbildung 67 die zugehörigen Contour-Plots für Geschwindigkeit und Totaldruck. Die Summe der Verlusthöhen der geöffneten Düsen beträgt 0,46 m. Das entspricht 0,39 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung.

Tabelle 32: Auswertung Lastfall 3-düsiger

Abweichung	Q	750,00 l/s	Q _I	748,25 l/s
-100,00 %	Q ₁	0,00 l/s	Q _{II}	747,37 l/s
-0,02 %	Q ₂	-249,95 l/s	Q _{III}	498,08 l/s
-100,00 %	Q ₃	0,00 l/s	Q _{IV}	498,44 l/s
0,12 %	Q ₄	-250,31 l/s	Q _V	248,65 l/s
-100,00 %	Q ₅	0,00 l/s	Q _{VI}	248,70 l/s
-0,04 %	Q ₆	-249,90 l/s		
	Summe	-750,16 l/s		

100 mm Versatz

V _{Eintritt}	2,00 m/s	h _{v1}	0,20 m	ζ ₁	0,98
V _{Düse1}	0,00 m/s	h _{v2}	0,21 m	ζ ₂	1,02
V _{Düse2}	-6,19 m/s	h _{v3}	0,12 m	ζ ₃	0,58
V _{Düse3}	0,00 m/s	h _{v4}	0,13 m	ζ ₄	0,65
V _{Düse4}	-6,20 m/s	h _{v5}	0,04 m	ζ ₅	0,18
V _{Düse5}	0,00 m/s	h _{v6}	0,12 m	ζ ₆	0,61
V _{Düse6}	-6,19 m/s	Ø _{h_v}	0,15 m	Øζ	0,76

	links	rechts	Diff	Summe
Q _{Düse1}	7,97	-7,97 l/s	15,93	0,00
Q _{Düse2}	126,05	123,92 l/s	2,13	249,96
Q _{Düse3}	4,47	-4,47 l/s	8,94	0,00
Q _{Düse4}	124,68	125,65 l/s	-0,97	250,34
Q _{Düse5}	1,47	-1,47 l/s	2,95	0,00
Q _{Düse6}	123,50	126,42 l/s	-2,92	249,92
Mittelwert	124,74	125,33 l/s	-0,59	250,07

P _{tot_max}	
in Symmetrieebene	11,98 bar
in gesamter Leitung	12,09 bar

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q ₁ bis Q ₆ ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
Ø _{h_v} ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
Øζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten
Q _{Düse1} bis Q _{Düse6} ...	Durchfluss in den links- und rechtsseitigen Düsenkanälen in l/s
Diff...	Differenz zwischen links- und rechtsseitigem Düsenkanal in l/s
P _{tot_max} ...	maximaler Totaldruck in Pa

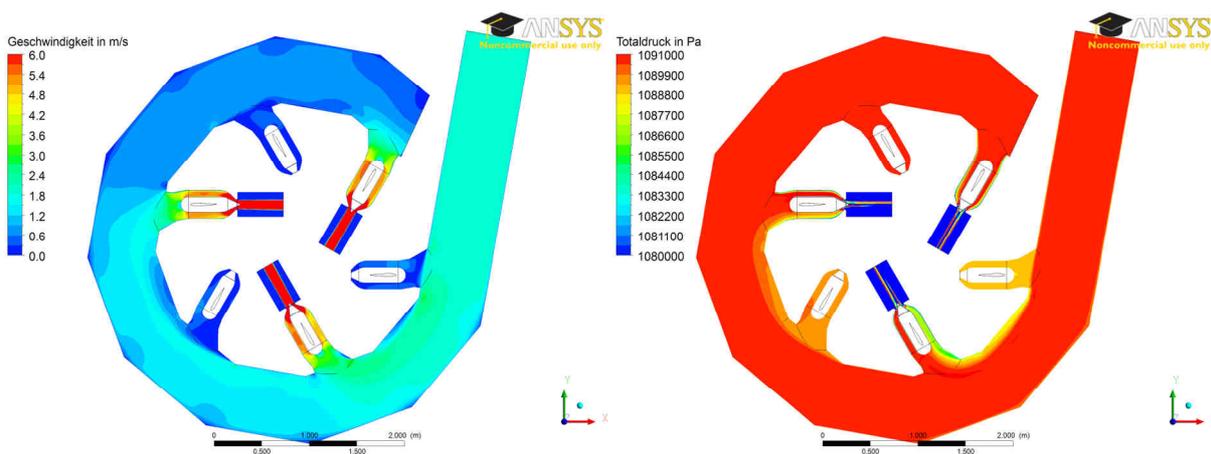


Abbildung 67: Auswertung Lastfall 3-düsiger

4-düsiger Lastfall

Die Summe der Verlusthöhen der geöffneten Düsen beträgt 0,93 m. Das entspricht 0,79 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. Zu beachten ist in Tabelle 33 auch der relativ hohe links- und rechtsseitige Volumenstrom in der geschlossenen Düse 2. In Abbildung 68 (links) ist dieser Volumenstrom als hellblaue Bereiche in Düse 2 zu erkennen.

Tabelle 33: Auswertung Lastfall 4-düsiger

Abweichung	Q	1000,00 l/s	Q _I	997,79 l/s
0,10 %	Q _I	-250,25 l/s	Q _{II}	746,59 l/s
-100,00 %	Q ₂	0,00 l/s	Q _{III}	746,96 l/s
-0,17 %	Q ₃	-249,57 l/s	Q _{IV}	498,26 l/s
0,11 %	Q ₄	-250,28 l/s	Q _V	248,52 l/s
-100,00 %	Q ₅	0,00 l/s	Q _{VI}	248,71 l/s
0,00 %	Q ₆	-250,01 l/s	Summe	-1000,10 l/s

100 mm Versatz

V _{Eintritt}	2,66 m/s	h _{v1}	0,13 m	ζ ₁	0,35
V _{Düse1}	-6,19 m/s	h _{v2}	0,29 m	ζ ₂	0,81
V _{Düse2}	0,00 m/s	h _{v3}	0,30 m	ζ ₃	0,84
V _{Düse3}	-6,18 m/s	h _{v4}	0,25 m	ζ ₄	0,69
V _{Düse4}	-6,19 m/s	h _{v5}	0,13 m	ζ ₅	0,36
V _{Düse5}	0,00 m/s	h _{v6}	0,25 m	ζ ₆	0,69
V _{Düse6}	-6,19 m/s	∅h _v	0,23 m	∅ζ	0,64

	links	rechts	Diff	Summe
Q _{Düse1}	125,39	124,86 l/s	0,53	250,25
Q _{Düse2}	9,38	-9,38 l/s	18,75	0,00
Q _{Düse3}	125,60	123,97 l/s	1,63	249,57
Q _{Düse4}	124,85	125,46 l/s	-0,61	250,31
Q _{Düse5}	1,53	-1,53 l/s	3,06	0,00
Q _{Düse6}	123,55	126,49 l/s	-2,94	250,03
Mittelwert	124,85	125,19 l/s	-0,35	250,04

P _{tot_max}	
in Symmetrieebene	11,91 bar
in gesamter Leitung	12,02 bar

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q _I bis Q ₆ ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
∅h _v ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
∅ζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten
Q _{Düse1} bis Q _{Düse6} ...	Durchfluss in den links- und rechtsseitigen Düsenkanälen in l/s
Diff...	Differenz zwischen links- und rechtsseitigem Düsenkanal in l/s
P _{tot_max} ...	maximaler Totaldruck in Pa

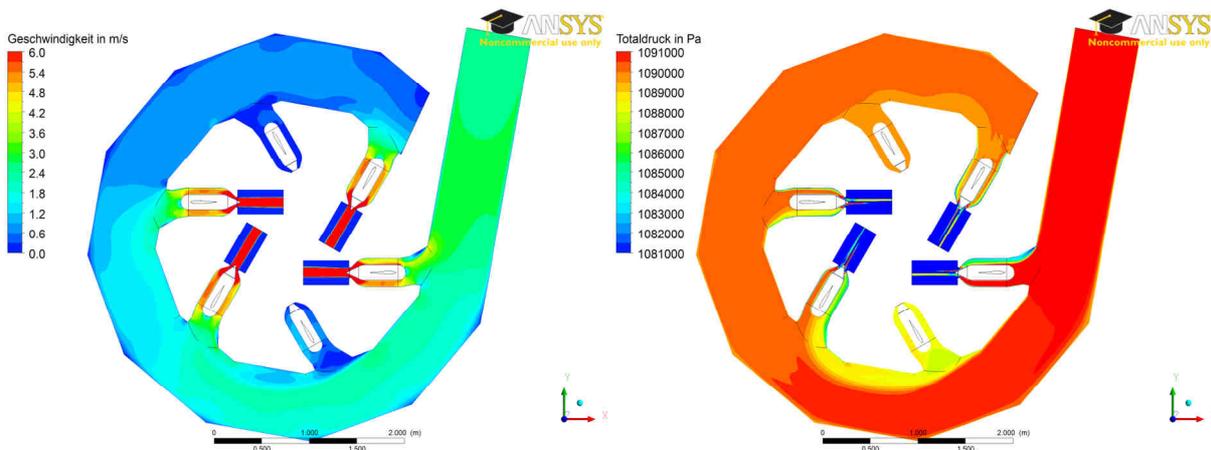


Abbildung 68: Auswertung Lastfall 4-düsiger

5-düsiger Lastfall

Die Summe der Verlusthöhen der geöffneten Düsen beträgt 1,15 m. Das entspricht 0,97 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. Auch hier ist in Tabelle 34 ein relativ hoher links- und rechtsseitiger Volumenstrom von ungefähr 15 l/s bei der geschlossenen Düse zu erkennen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Großteil des gesamten Volumenstroms an der geschlossenen Düse vorbei strömt und somit eine Zirkulation in der Düse verursacht. Dieser Effekt ist auch in Abbildung 69 im Geschwindigkeits-Plot zu sehen.

Tabelle 34: Auswertung Lastfall 5-düsiger

Abweichung	Q	1250,00 l/s	Q _I	1247,30 l/s
0,20 %	Q ₁	-250,50 l/s	Q _{II}	995,28 l/s
-100,00 %	Q₂	0,00 l/s	Q _{III}	996,22 l/s
-0,38 %	Q ₃	-249,05 l/s	Q _{IV}	748,24 l/s
0,04 %	Q ₄	-250,11 l/s	Q _V	499,08 l/s
0,02 %	Q ₅	-250,04 l/s	Q _{VI}	249,30 l/s
0,09 %	Q ₆	-250,23 l/s		
	Summe	-1249,93 l/s		

100 mm Versatz

V _{Eintritt}	3,33 m/s	h _{v1}	0,21 m	ζ ₁	0,38
V _{Düse1}	-6,20 m/s	h _{v2}	0,48 m	ζ ₂	0,85
V_{Düse2}	0,00 m/s	h _{v3}	0,47 m	ζ ₃	0,83
V _{Düse3}	-6,16 m/s	h _{v4}	0,20 m	ζ ₄	0,36
V _{Düse4}	-6,19 m/s	h _{v5}	0,12 m	ζ ₅	0,21
V _{Düse5}	-6,19 m/s	h _{v6}	0,15 m	ζ ₆	0,26
V _{Düse6}	-6,19 m/s	Ø _{h_v}	0,23 m	Øζ	0,41

	links	rechts	Diff	Summe
Q _{Düse1}	127,13	123,36 l/s	3,77	250,50
Q_{Düse2}	14,92	-14,92 l/s	29,84	0,00
Q _{Düse3}	124,73	124,32 l/s	0,41	249,05
Q _{Düse4}	126,36	123,75 l/s	2,61	250,10
Q _{Düse5}	124,47	125,56 l/s	-1,09	250,03
Q _{Düse6}	123,64	126,59 l/s	-2,95	250,23
Mittelwert	125,27	124,72 l/s	0,55	249,98

p _{tot_max}	
in Symmetrieebene	11,95 bar
in gesamter Leitung	12,04 bar

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q _I bis Q ₆ ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
Ø _{h_v} ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
Øζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten
Q _{Düse1} bis Q _{Düse6} ...	Durchfluss in den links- und rechtsseitigen Düsenkanälen in l/s
Diff...	Differenz zwischen links- und rechtsseitigem Düsenkanal in l/s
p _{tot_max} ...	maximaler Totaldruck in Pa

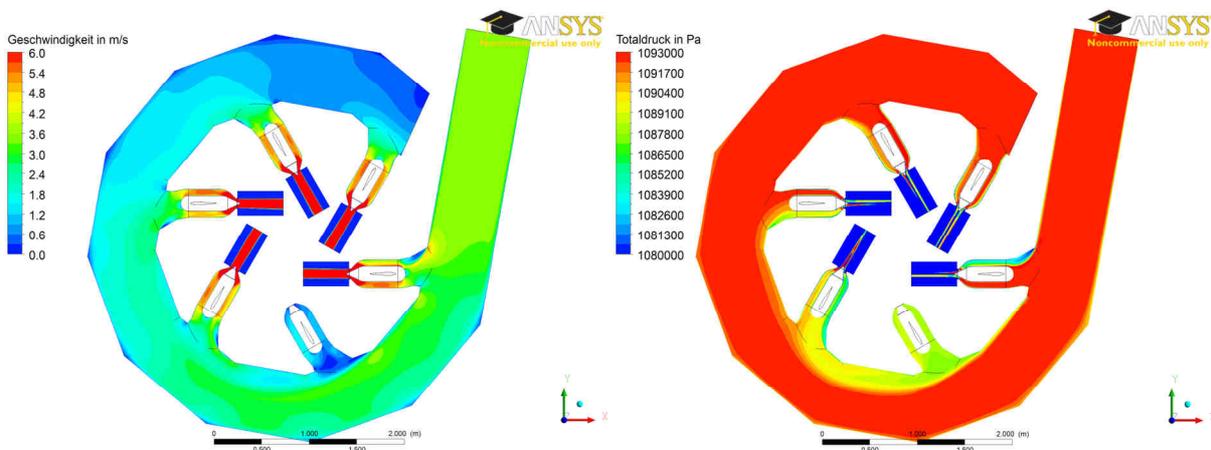


Abbildung 69: Auswertung Lastfall 5-düsiger

6-düsiger Lastfall

Tabelle 35 und Abbildung 70 zeigen die Zahlenwerte und die Geschwindigkeits- und Totaldruckverteilung des Volllastfalles der Version 8. Die Summe der Verlusthöhen der geöffneten Düsen beträgt 1,70 m. Das entspricht 1,42 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung.

Tabelle 35: Auswertung Lastfall 6-düsiger

Abweichung	Q	1500,00 l/s		
0,26 %	Q _I	-250,64 l/s	Q _I	1496,81 l/s
0,00 %	Q _{II}	-250,00 l/s	Q _{II}	1244,86 l/s
-0,20 %	Q _{III}	-249,51 l/s	Q _{III}	995,91 l/s
-0,08 %	Q _{IV}	-249,81 l/s	Q _{IV}	747,23 l/s
-0,01 %	Q _V	-249,96 l/s	Q _V	498,56 l/s
0,01 %	Q _{VI}	-250,03 l/s	Q _{VI}	249,06 l/s
	Summe	-1499,96 l/s		

100 mm Versatz

V _{Eintritt}	3,99 m/s	h _{v1}	0,27 m	ζ ₁	0,33
VDüse1	-6,20 m/s	h _{v2}	0,42 m	ζ ₂	0,52
VDüse2	-6,19 m/s	h _{v3}	0,36 m	ζ ₃	0,44
VDüse3	-6,18 m/s	h _{v4}	0,25 m	ζ ₄	0,30
VDüse4	-6,18 m/s	h _{v5}	0,20 m	ζ ₅	0,25
VDüse5	-6,19 m/s	h _{v6}	0,20 m	ζ ₆	0,25
VDüse6	-6,19 m/s	∅ _{h_v}	0,28 m	∅ζ	0,35

	links	rechts	Diff	Summe
Q _{Düse1}	129,81	120,83 l/s	8,98	250,64
Q _{Düse2}	130,66	119,34 l/s	11,32	250,00
Q _{Düse3}	125,83	123,67 l/s	2,16	249,50
Q _{Düse4}	125,19	124,61 l/s	0,58	249,81
Q _{Düse5}	124,85	125,11 l/s	-0,26	249,96
Q _{Düse6}	124,57	125,46 l/s	-0,89	250,03
Mittelwert	126,82	123,17 l/s	3,65	249,99

p _{tot_max}	
in Symmetrieebene	11,98 bar
in gesamter Leitung	12,22 bar

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
∅ _{h_v} ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
∅ζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten
Q _{Düse1} bis Q _{Düse6} ...	Durchfluss in den links- und rechtsseitigen Düsenkanälen in l/s
Diff...	Differenz zwischen links- und rechtsseitigem Düsenkanal in l/s
p _{tot_max} ...	maximaler Totaldruck in Pa

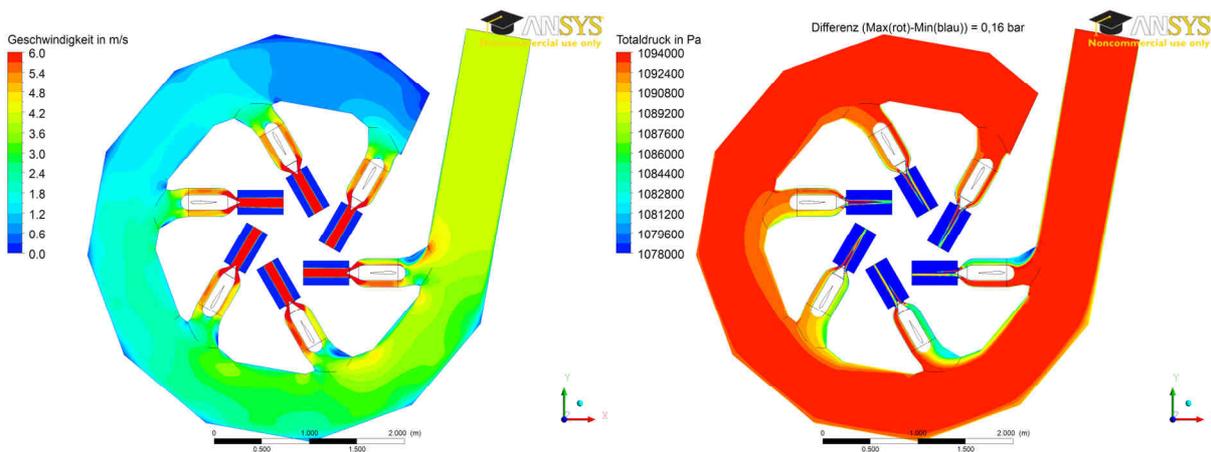


Abbildung 70: Auswertung Lastfall 6-düsiger

9.3. Teillastfälle mit veränderter Position der geöffneten Düsen

Die Position der offenen Düsen bei den unterschiedlichen Teillastfällen wurde aufgrund der Auswertungen des Volllastfalles ermittelt. Die Düsen mit den höchsten Verlusten wurden geschlossen. Weiters wurde auf eine symmetrische Lastverteilung des Laufrades geachtet. Somit ist zum Beispiel im 1-düsigen Fall die sechste Düse offen, wobei es eventuell besser wäre, die erste Düse offen zu lassen, weil dabei das Wasser nicht den gesamten Weg bis zur sechsten Düsen strömen muss. Ein Vergleich zur vorigen Rechnung ist durchzuführen, um zu sehen, ob dies eventuell noch eine Verbesserung der Verluste in den Teillastfällen bringen würde. Die Berechnung wird für den 1-düsigen und den 2-düsigen Teillastfall durchgeführt.

9.3.1. Meshing, Solver-Setup

Die Rechengitter dieser Berechnungen bleiben dieselben wie für die zuvor gerechneten Teillastfälle. Es wird beispielsweise beim 1-düsigen Fall die offene sechste Düse mit einem Gitter einer geschlossenen Düse ersetzt. Dasselbe passiert mit der Düse 1, nur wird hier das geschlossene Gitter mit einem offenen Gitter ersetzt. Die gleiche Vorgehensweise wird bei der 2-düsigen Rechnung angewandt.

Alle Parameter des Solver-Setups bleiben wie bei den zuvor gerechneten Teillastfällen gleich.

9.3.2. Auswertung 1-düsigen; Düse 1 geöffnet

Die Zahlenwerte in Tabelle 36 zeigen keine Verbesserung im Vergleich zu dem zuvor berechneten 1-düsigen Lastfall (siehe Tabelle 30). Die Summe der Verlusthöhen der geöffneten Düsen beträgt 0,13 m. Das entspricht 0,11 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. In Abbildung 71 ist auch keine Verbesserung zu erkennen.

Tabelle 36: Auswertung Lastfall 1-düsigen, D1 geöffnet

Abweichung	Q	250,00 l/s	Q _I	249,47 l/s	Q _{II}	0,00 l/s	Q _{III}	0,00 l/s	Q _{IV}	0,00 l/s	Q _V	0,00 l/s	Q _{VI}	0,00 l/s
0,01 %	Q ₁	-250,02 l/s	Q _I	249,47 l/s	Q _{II}	0,00 l/s	Q _{III}	0,00 l/s	Q _{IV}	0,00 l/s	Q _V	0,00 l/s	Q _{VI}	0,00 l/s
-100,00 %	Q ₂	0,00 l/s	Q _I	249,47 l/s	Q _{II}	0,00 l/s	Q _{III}	0,00 l/s	Q _{IV}	0,00 l/s	Q _V	0,00 l/s	Q _{VI}	0,00 l/s
-100,00 %	Q ₃	0,00 l/s	Q _I	249,47 l/s	Q _{II}	0,00 l/s	Q _{III}	0,00 l/s	Q _{IV}	0,00 l/s	Q _V	0,00 l/s	Q _{VI}	0,00 l/s
-100,00 %	Q ₄	0,00 l/s	Q _I	249,47 l/s	Q _{II}	0,00 l/s	Q _{III}	0,00 l/s	Q _{IV}	0,00 l/s	Q _V	0,00 l/s	Q _{VI}	0,00 l/s
-100,00 %	Q ₅	0,00 l/s	Q _I	249,47 l/s	Q _{II}	0,00 l/s	Q _{III}	0,00 l/s	Q _{IV}	0,00 l/s	Q _V	0,00 l/s	Q _{VI}	0,00 l/s
-100,00 %	Q ₆	0,00 l/s	Q _I	249,47 l/s	Q _{II}	0,00 l/s	Q _{III}	0,00 l/s	Q _{IV}	0,00 l/s	Q _V	0,00 l/s	Q _{VI}	0,00 l/s
	Summe	-250,02 l/s	Q _I	249,47 l/s	Q _{II}	0,00 l/s	Q _{III}	0,00 l/s	Q _{IV}	0,00 l/s	Q _V	0,00 l/s	Q _{VI}	0,00 l/s

100 mm Versatz		h _{v1}		ζ ₁	
V _{Eintritt}	0,67 m/s	h _{v1}	0,13 m	ζ ₁	5,80
V _{Düse1}	-6,19 m/s	h _{v2}	0,00 m	ζ ₂	0,18
V _{Düse2}	0,00 m/s	h _{v3}	0,00 m	ζ ₃	0,18
V _{Düse3}	0,00 m/s	h _{v4}	0,00 m	ζ ₄	0,17
V _{Düse4}	0,00 m/s	h _{v5}	0,00 m	ζ ₅	0,16
V _{Düse5}	0,00 m/s	h _{v6}	0,00 m	ζ ₆	0,16
V _{Düse6}	0,00 m/s	∅ _{h_v}	0,13 m	∅ _ζ	5,80

	links	rechts	Diff	Summe
Q _{Düse1}	123,16	126,86 l/s	-3,70	250,02
Q _{Düse2}	0,00	0,00 l/s	0,00	0,00
Q _{Düse3}	-0,02	0,02 l/s	-0,04	0,00
Q _{Düse4}	0,03	-0,03 l/s	0,06	0,00
Q _{Düse5}	0,06	-0,06 l/s	0,13	0,00
Q _{Düse6}	-0,03	0,03 l/s	-0,05	0,00
Mittelwert	123,16	126,86 l/s	-3,70	250,02

p _{tot_max}	
in Symmetrieebene	11,36 bar
in gesamter Leitung	11,64 bar

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
∅ _{h_v} ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
∅ _ζ ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten
Q _{Düse1} bis Q _{Düse6} ...	Durchfluss in den links- und rechtsseitigen Düsenkanälen in l/s
Diff...	Differenz zwischen links- und rechtsseitigem Düsenkanal in l/s
p _{tot_max} ...	maximaler Totaldruck in Pa

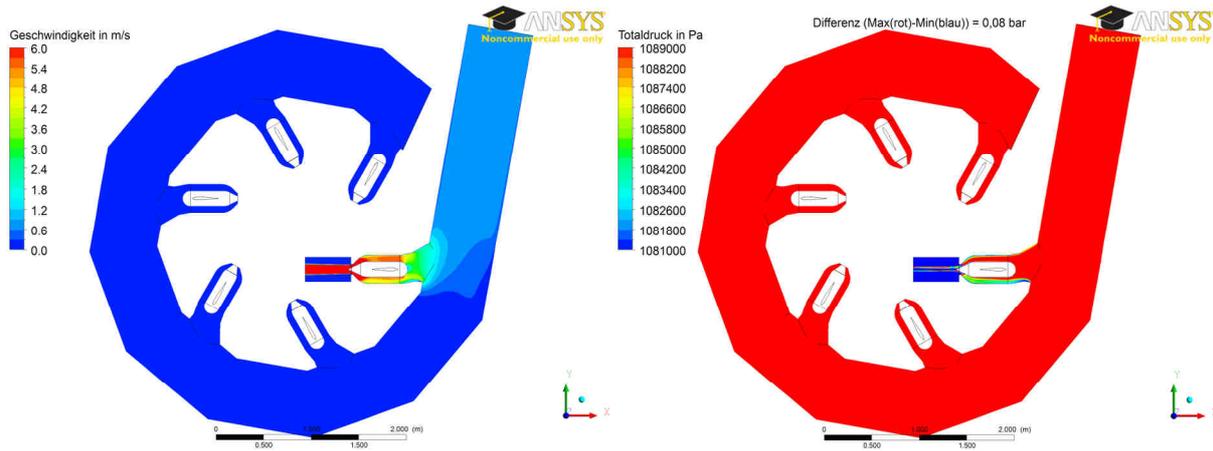


Abbildung 71: Auswertung Lastfall 1-düsige, Düse 1 geöffnet

9.3.3. Auswertung 2-düsige; Düse 1 und 4 geöffnet

Die Auswertung dieser Rechnung (siehe Tabelle 37 und Abbildung 72) brachte im Vergleich zum zuvor berechneten 2-düsigen Lastfall auch keine Verbesserung. Die Summe der Verlusthöhen der geöffneten Düsen beträgt 0,27 m. Das entspricht 0,23 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung.

Tabelle 37: Auswertung Lastfall 2-düsige, D1 und D4 geöffnet

Abweichung	Q	500,00 l/s	Q _I	498,95 l/s
0,00 %	Q ₁	-250,01 l/s	Q _{II}	249,40 l/s
-100,00 %	Q ₂	0,00 l/s	Q _{III}	249,12 l/s
-100,00 %	Q ₃	0,00 l/s	Q _{IV}	249,21 l/s
-0,02 %	Q ₄	-249,96 l/s	Q _V	0,00 l/s
-100,00 %	Q ₅	0,00 l/s	Q _{VI}	0,00 l/s
-100,00 %	Q ₆	0,00 l/s		
	Summe	-499,97 l/s		

100 mm Versatz

V _{Eintritt}	1,33 m/s	h _{v1}	0,11 m	ζ ₁	1,24
V _{Düse1}	-6,19 m/s	h _{v2}	0,04 m	ζ ₂	0,43
V _{Düse2}	0,00 m/s	h _{v3}	0,05 m	ζ ₃	0,51
V _{Düse3}	0,00 m/s	h _{v4}	0,15 m	ζ ₄	1,71
V _{Düse4}	-6,19 m/s	h _{v5}	0,02 m	ζ ₅	0,26
V _{Düse5}	0,00 m/s	h _{v6}	0,02 m	ζ ₆	0,26
V _{Düse6}	0,00 m/s	∅h _v	0,13 m	∅ζ	1,48

	links	rechts	Diff	Summe
Q _{Düse1}	123,62	126,38 l/s	-2,75	250,00
Q _{Düse2}	2,08	-2,08 l/s	4,16	0,00
Q _{Düse3}	2,09	-2,09 l/s	4,18	0,00
Q _{Düse4}	123,31	126,64 l/s	-3,33	249,95
Q _{Düse5}	0,17	-0,17 l/s	0,34	0,00
Q _{Düse6}	-0,16	0,16 l/s	-0,32	0,00
Mittelwert	123,47	126,51 l/s	-3,04	249,98

p _{tot_max}	
in Symmetrieebene	11,34 bar
in gesamter Leitung	11,64 bar

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q ₁ bis Q ₆ ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
Q _I bis Q _{VI} ...	Durchfluss in den einzelnen Kontrollebenen in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
∅h _v ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
∅ζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten
Q _{Düse1} bis Q _{Düse6} ...	Durchfluss in den links- und rechtsseitigen Düsenkanälen in l/s
Diff...	Differenz zwischen links- und rechtsseitigem Düsenkanal in l/s
p _{tot_max} ...	maximaler Totaldruck in Pa

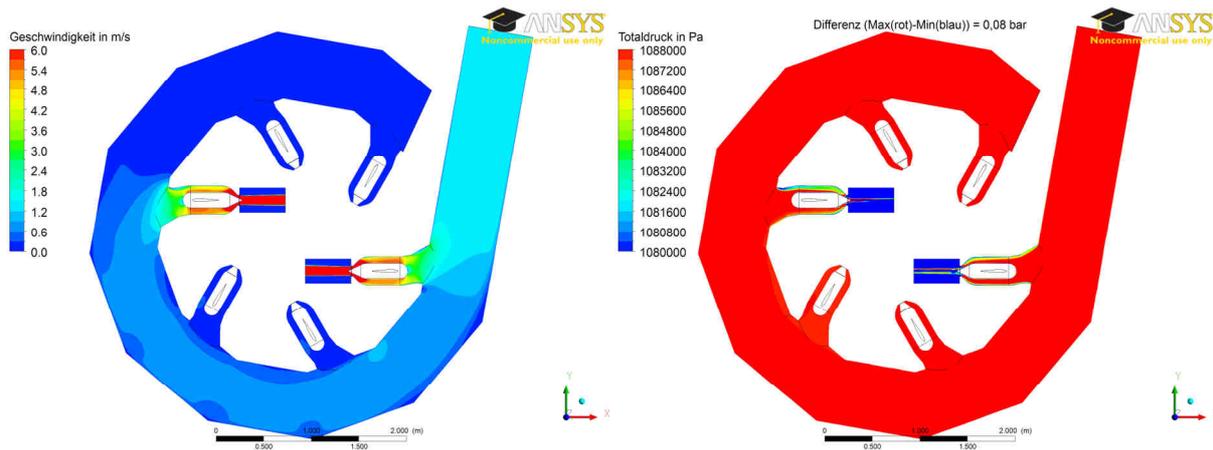


Abbildung 72: Auswertung Lastfall 2-düsiger, D1 und D4 geöffnet

Die Geschwindigkeiten beim 1-düsigen und 2-düsigen Lastfall sind in der Ringleitung sehr gering. Somit sind auch die Wandschubspannungen in der Ringleitung gering und deshalb bringt die Veränderung der Düsenposition keine Verbesserung hinsichtlich der Strömungsverluste.

10. Zweiphasige Rechnung der Referenzleitung

Die Referenzleitung wurde bisher nur einphasig gerechnet. Um die neue Verteilrohrleitung mit der Referenzleitung vergleichen zu können, muss diese ebenfalls zweiphasig und mit dem gleichen Solver-Setup gerechnet werden.

10.1.1. Meshing, Solver-Setup

Für die zweiphasige Rechnung der Referenzleitung wird das gleiche Rechengitter wie für die einphasige Rechnung verwendet. Für den Bereich des Austritts und für den Austrittszylinder ist ein Gitter mit O-Grid Struktur erzeugt worden. Die Einstellungen des Solver-Setups sind in Tabelle 38 zu sehen.

Tabelle 38: Solver-Setup VRL Referenzleitung zweiphasig

Gitterart	Unstrukturiertes Gitter mit 6 Wandschichten O-Grid Struktur im Bereich des Austritts
Turbulenzmodell	k-ε
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet: 1495,5 kg/s air volume fraction = 0
Randbedingung am Austritt	static pressure and direction; static pressure = 1 bar air volume fraction = 1 an der Mantelfläche des Austrittszylinders; volume fraction = zero gradient an der Stirnfläche des Austrittszylinders
physical timescale	0,005 sec
zweiphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

10.1.2. Auswertung

In Tabelle 39 ist das höhere Niveau der Verlusthöhe bei den höheren Düsennummern im Vergleich zur neuen Verteilrohrleitung Version 8 deutlich sichtbar. Dies wird in Kapitel 13 noch genauer

aufgezeigt. Die Summe der Verlusthöhen der einzelnen Düsen beträgt 2,91 m. Das entspricht 2,71 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung. Abbildung 73 zeigt links unten im Geschwindigkeits-Plot bei der ersten Düse einen großen Wirbelbereich.

Tabelle 39: Auswertung VRL Referenz zweiphasig

Abweichung	Q	1500 l/s
0,58 %	Q ₁	-251,45 l/s
0,96 %	Q ₂	-252,39 l/s
-2,63 %	Q ₃	-243,42 l/s
0,36 %	Q ₄	-250,90 l/s
0,89 %	Q ₅	-252,23 l/s
-2,78 %	Q ₆	-243,05 l/s
	Summe	-1493,44 l/s

100 mm Versatz

V _{Eintritt}	3,94 m/s	h _{v1}	0,29 m	ζ ₁	0,37
V _{Düse1}	6,69 m/s	h _{v2}	0,48 m	ζ ₂	0,61
V _{Düse2}	6,72 m/s	h _{v3}	0,54 m	ζ ₃	0,69
V _{Düse3}	6,48 m/s	h _{v4}	0,56 m	ζ ₄	0,71
V _{Düse4}	6,68 m/s	h _{v5}	0,56 m	ζ ₅	0,71
V _{Düse5}	6,71 m/s	h _{v6}	0,47 m	ζ ₆	0,60
V _{Düse6}	6,47 m/s	∅h _v	0,48 m	∅ζ	0,61

p _{tot_max}	
in Symmetrieebene	9,82 bar
in gesamter Leitung	10,92 bar

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q ₁ bis Q ₆ ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
∅h _v ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
∅ζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten
p _{tot_max} ...	maximaler Totaldruck in Pa

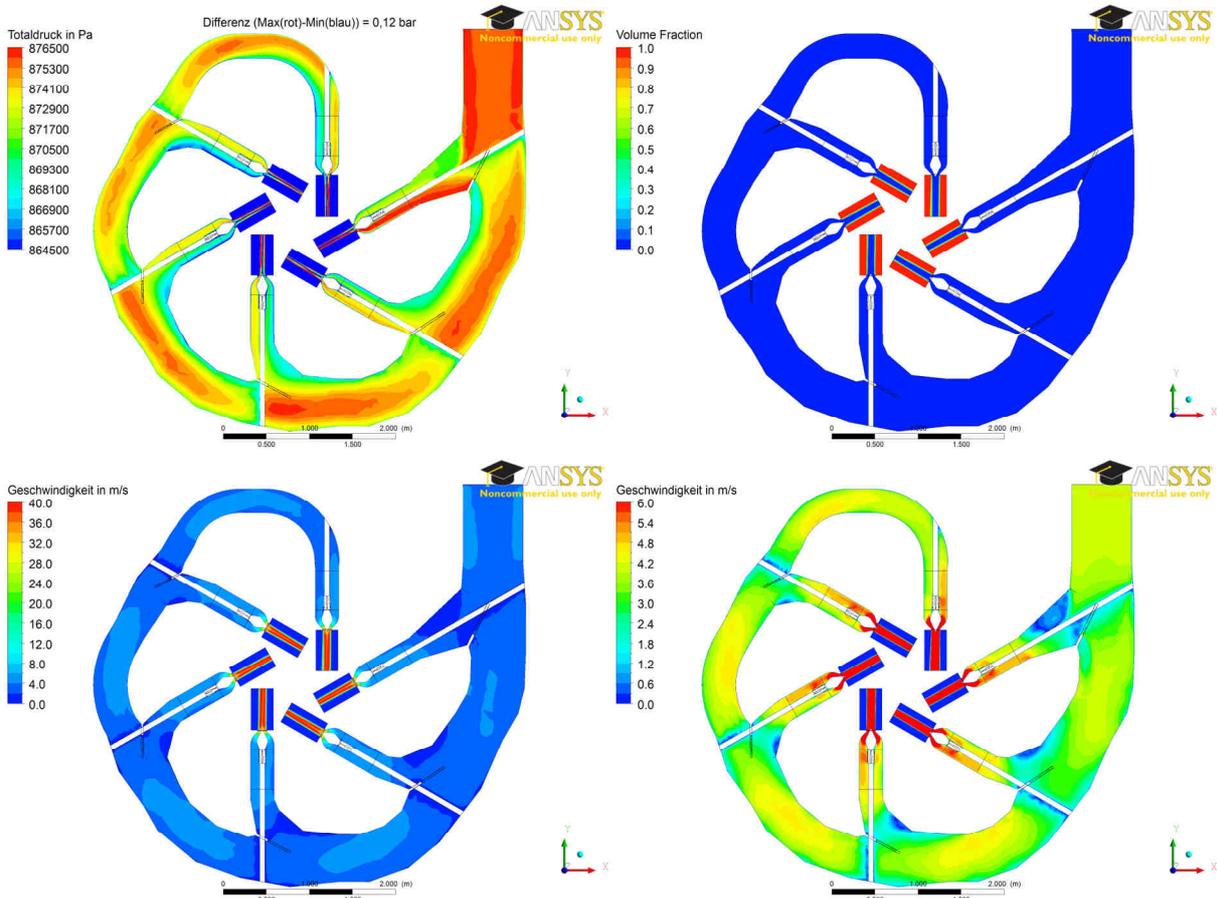


Abbildung 73: Auswertung Referenz-Verteilrohrleitung zweiphasig

11. Vergleich zwischen neuer Leitung und Referenz- Leitung

Abbildung 74 zeigt den Vergleich der Referenzleitung mit der Version 8 der neuen Verteilrohrleitung. Das Diagramm zeigt die Verlusthöhen der einzelnen Düsen und den daraus errechneten Mittelwert. Die Summe der Verlusthöhen der Referenzleitung beträgt 2,91 m, was 2,71 % der Nettofallhöhe entspricht. Die Summe der Verlusthöhen der neuen Verteilrohrleitung beträgt 1,70 m (1,42 % der Nettofallhöhe). Somit erzeugt die neue Verteilrohrleitung um 1,29 % weniger Verluste als die Referenzleitung.

Die rote Kurve in Abbildung 74 zeigt die Verluste der neuen Leitung. Im Vergleich zur blauen Kurve der Referenzleitung fällt die rote Kurve ab der zweiten Düse ab. Das lässt sich dadurch erklären, dass die neue Verteilrohrleitung im Unterschied zur Referenzleitung den Durchmesser des Verteilrohrentritts beibehält. Der Rohrleitungsdurchmesser der Referenzleitung verjüngt sich nach jeder Düse und somit herrschen im Vergleich zur neuen Verteilrohrleitung höhere Strömungsgeschwindigkeiten.

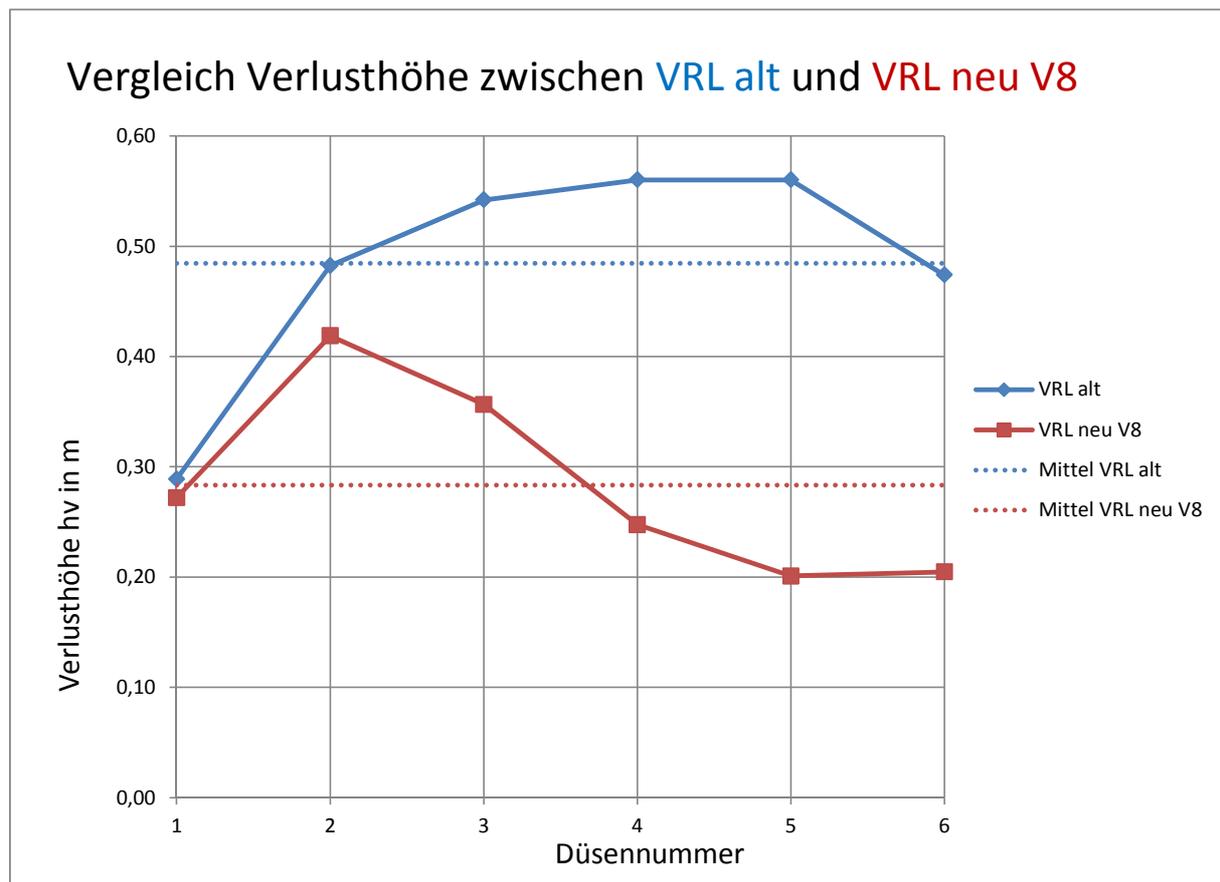


Abbildung 74: Vergleich Referenzleitung und neue Leitung

12. Zweiphasige Rechnung einer bestehenden optimierten Leitung

Um den Vergleich der neu konstruierten Verteilrohrleitung zu erweitern, wird eine weitere bestehende Verteilrohrleitung berechnet. Abbildung 75 und 76 zeigen die hydraulische Kontur der Verteilrohrleitung Tröpolach und eine Detailansicht des Abzweigers der ersten Düse. Die Geometrie dieser Leitung wurde von Herrn König im .stp Format zur Verfügung gestellt.

Die Pelton turbine Tröpolach besitzt folgende Eckdaten:

Nettofallhöhe: $H = 247,5 \text{ m}$
Durchfluss: $Q = 3485 \text{ l/s}$

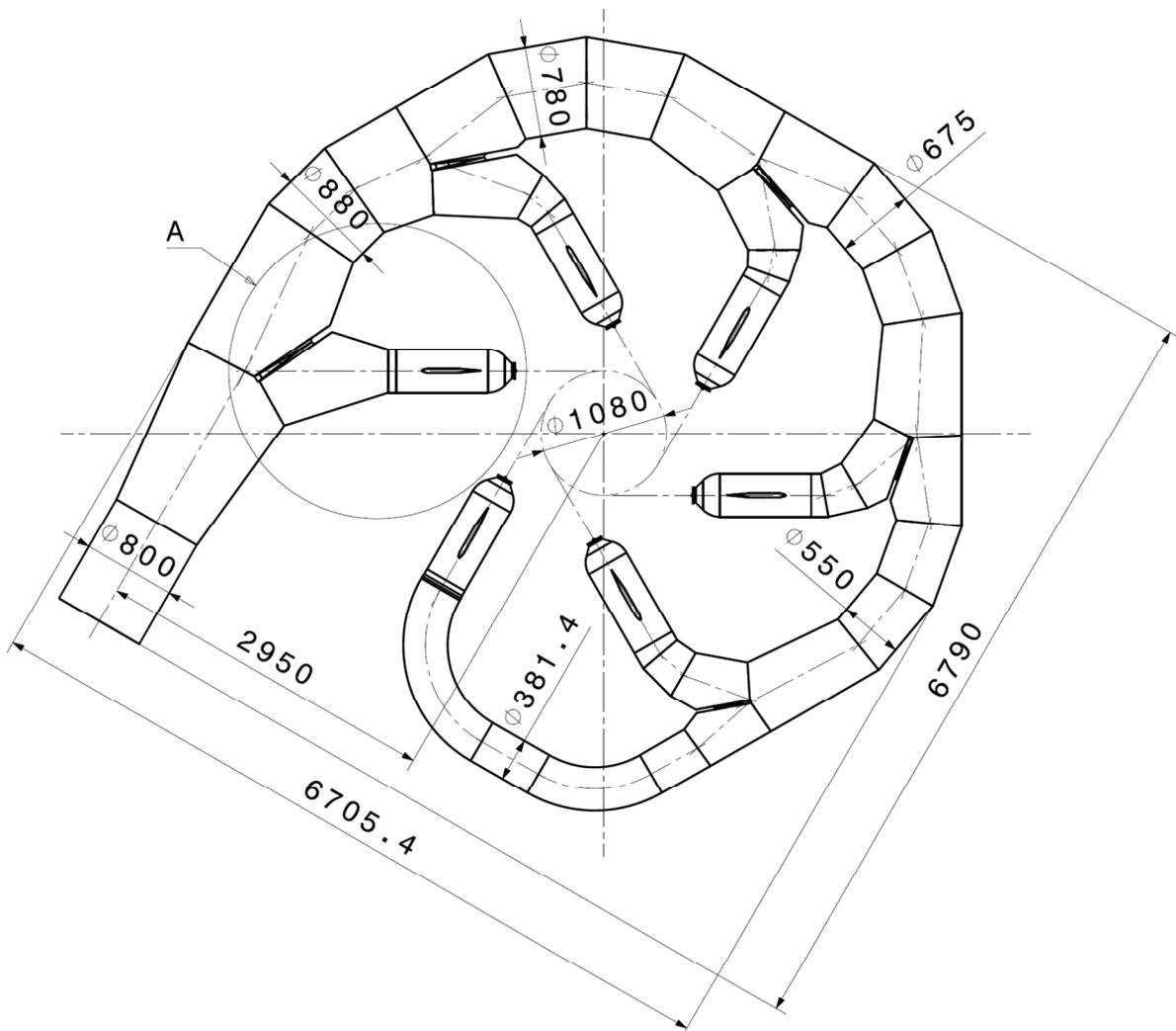
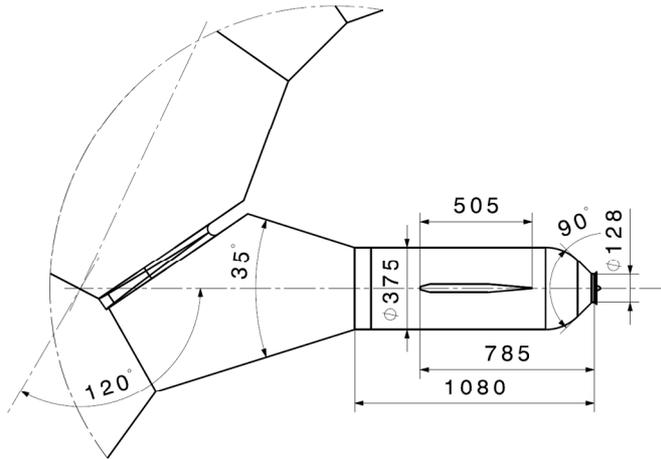


Abbildung 75: Hydraulische Kontur Verteilrohrleitung Tröpolach



Detail A

Abbildung 76: Hydraulische Kontur Verteilrohrleitung Tröpolach Detail A

12.1.1. Meshing, Solver-Setup

Für die zweiphasige Rechnung der Leitung Tröpolach wird die Zuströmung zu den Düsen unstrukturiert mit Wandverdichtung vernetzt. Für den Bereich des Austritts und für den Austrittszylinder, wo die höchsten Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsgradienten auftreten, ist ein Gitter mit O-Grid Struktur erzeugt worden. Die Einstellungen des Solver-Setups sind in Tabelle 40 zu sehen.

Tabelle 40: Solver-Setup VRL Tröpolach

Gitterart	Unstrukturiertes Gitter mit 6 Wandschichten O-Grid Struktur im Bereich des Austritts
Turbulenzmodell	k- ϵ
Randbedingung am Eintritt	massflow-inlet: 3474,55kg/s air volume fraction = 0
Randbedingung am Austritt	static pressure and direction; static pressure = 1 bar air volume fraction = 1 an der Mantelfläche des Austrittszylinders; volume fraction = zero gradient an der Stirnfläche des Austrittszylinders
physical timescale	0,005 sec
zweiphasige Rechnung	
stationäre Rechnung	

12.1.2. Auswertung

Die Zahlenwerte in Tabelle 41 sind nun nicht direkt mit allen zuvor berechneten Leitungen vergleichbar, weil diese Leitung mit einem Volumenstrom von 3485 l/s anstelle von 1500 l/s betrieben wird. Aus diesem Grund werden die Verlusthöhen auf die Nettofallhöhe der jeweiligen Leitung bezogen und die Verlusthöhe zusätzlich in % der Nettofallhöhe angegeben. Die Summe der Verlusthöhen der einzelnen Düsen dieser Leitung beträgt 4,11 m. Das entspricht jedoch nur 1,79 % der Nettofallhöhe der Verteilrohrleitung und damit kann diese Leitung in den Vergleich mit aufgenommen werden.

Tabelle 41: Auswertung VRL Tröpolach

Abweichung	Q	3485,00 l/s
-0,47 %	Q ₁	-578,09 l/s
-0,04 %	Q ₂	-580,62 l/s
-0,03 %	Q ₃	-580,69 l/s
-0,26 %	Q ₄	-579,32 l/s
0,07 %	Q ₅	-581,22 l/s
0,73 %	Q ₆	-585,09 l/s
	Sumr	-3485,02 l/s

100 mm Versatz

V _{Eintritt}	6,97 m/s	h _{v1}	0,60 m	ζ ₁	0,24
V _{Düse1}	-10,20 m/s	h _{v2}	0,73 m	ζ ₂	0,30
V _{Düse2}	-10,25 m/s	h _{v3}	0,88 m	ζ ₃	0,36
V _{Düse3}	-10,25 m/s	h _{v4}	0,73 m	ζ ₄	0,30
V _{Düse4}	-10,22 m/s	h _{v5}	0,64 m	ζ ₅	0,26
V _{Düse5}	-10,26 m/s	h _{v6}	0,52 m	ζ ₆	0,21
V _{Düse6}	-10,32 m/s	∅ _{h_v}	0,69 m	∅ζ	0,28

p _{tot_max}	
in Symmetrieebene	22,76 bar
in gesamter Leitung	23,40 bar

Abweichung...	prozentuelle Abweichung des Durchflusses vom theoretischen Mittelwert in %
Q...	Durchfluss am Eintritt in die Verteilrohrleitung in l/s
Q ₁ bis Q ₆ ...	Durchfluss der einzelnen Düsen in l/s
Summe...	Summe der Einzeldurchflüsse in l/s
V _{Eintritt} ...	Geschwindigkeit am Eintritt in die Verteilrohrleitung in m/s
V _{Düse1} bis V _{Düse6} ...	flächengemittelte Geschwindigkeit der einzelnen Düsen in der entsprechenden Auswertungsebene in m/s
h _{v1} bis h _{v6} ...	Verlusthöhe der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene in m
∅ _{h_v} ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Verlusthöhen in m
ζ ₁ bis ζ ₆ ...	dimensionsloser Druckverlustbeiwert der einzelnen Düsen vom Eintritt bis zur Auswertungsebene
∅ζ...	arithmetischer Mittelwert der einzelnen Druckverlustbeiwerten
p _{tot_max} ...	maximaler Totaldruck in Pa

In der Geschwindigkeitsverteilung (Abbildung 77 rechts unten) sind bei den Abzweigern der Düsen 1, 2 und 3 relativ große Ablösezone zu erkennen. Im Contour-Plot für den Totaldruck ist beim Abzweiger der Düse 3 eine Zone großer Verluste zu erkennen.

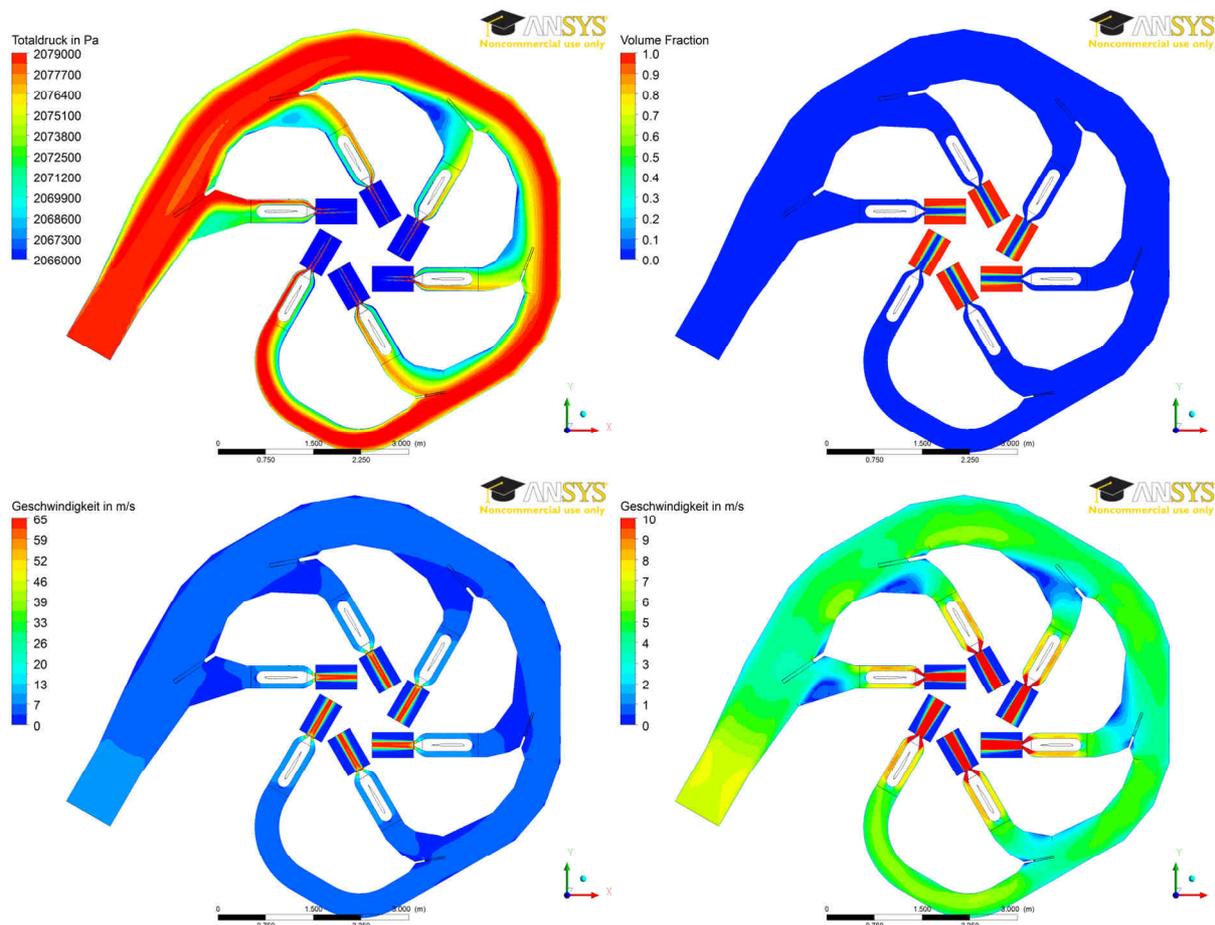


Abbildung 77: Auswertung Verteilrohrleitung Tröpolach

13. Vergleich zwischen neuer Leitung und optimierter Leitung

In Abbildung 78 ist der Vergleich zwischen der Referenzleitung, der neuen Verteilrohrleitung Version 8 und der Verteilrohrleitung Tröpolach zu sehen. Das Diagramm zeigt die Verlusthöhen der einzelnen Düsen und den daraus errechneten Mittelwert. Die Verteilrohrleitung Tröpolach hat eine Nettofallhöhe von 247,5 m und ist somit nicht direkt vergleichbar mit der Referenzleitung und der neuen Verteilrohrleitung Version 8, deren Nettofallhöhe 120,6 m beträgt. Um die Verlusthöhen dieser drei Leitungen vergleichen zu können, wurden diese auf die jeweilige Nettofallhöhe bezogen. Das Diagramm in Abbildung 78 zeigt die Verlusthöhe in % der Nettofallhöhe, was den Vergleich der drei Leitungen ermöglicht.

Die Summe der Verlusthöhen der neuen Verteilrohrleitung beträgt 1,70 m, was 1,42 % der Nettofallhöhe entspricht. Die Summe der Verlusthöhen der Referenzleitung beträgt 2,91 m (2,71 % der Nettofallhöhe) und die Summe der Verlusthöhen der Verteilrohrleitung Tröpolach beträgt 4,11 m (1,79 % der Nettofallhöhe). Somit erzeugt die neue Verteilrohrleitung um 1,29 % weniger Verluste als die Referenzleitung. Außerdem liegen die Verluste der neuen Verteilrohrleitung um 0,37 % niedriger als die Verluste der Verteilrohrleitung Tröpolach.

Die grüne Kurve in Abbildung 78 zeigt die Verluste der einzelnen Düsen der Verteilrohrleitung Tröpolach. Diese hat ihr Maximum bei Düse 3 und fällt in beide Richtungen beinahe linear ab. Im Vergleich dazu hat die neue Verteilrohrleitung ihr Maximum bei Düse 2. Im Vergleichsdiagramm sind außerdem die arithmetischen Mittelwerte der Leitungen als punktierte Linien zu erkennen. Die Mittelwertlinie der neuen Verteilrohrleitung liegt unter der Mittelwertlinie der Referenzleitung und der Leitung Tröpolach.

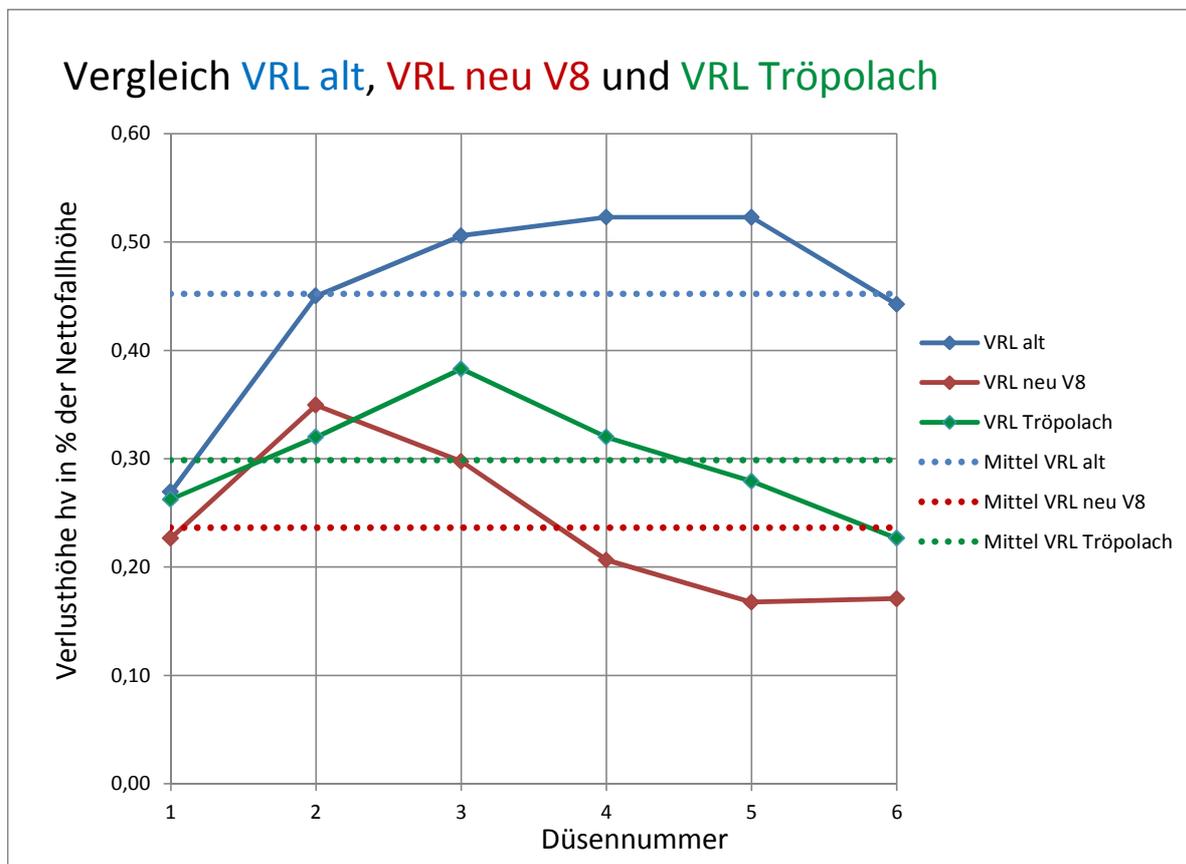


Abbildung 78: Vergleich Referenzleitung, neue Leitung und Leitung Tröpolach

14. Zusammenfassung und Ausblick

Wie in Kapitel 13 (Abbildung 78) zu sehen ist, wurde die Aufgabenstellung dieser Masterarbeit erfüllt. Es sollte eine konstruktiv einfache Verteilrohrleitung entwickelt werden, welche aus möglichst wenig unterschiedlichen Einzelteilen besteht und somit eine kostengünstige Lösung in der Fertigung darstellt. Die Verluste dieser Verteilrohrleitung sollten um maximal 2 % höher liegen als die Verluste einer Referenzleitung mit demselben Durchfluss und derselben Fallhöhe. Die neue Verteilrohrleitung wurde aus 12 gleichen Rohrschüssen mit konstantem Rohrdurchmesser konstruiert. Die Abzweiger der 6 Düsen wurden alle identisch ausgeführt. Die Verluste der neuen Verteilrohrleitung liegen um 1,29 % niedriger als die Verluste der Referenzleitung. Ein Grund dafür, dass die Verluste der neuen Leitung niedriger sind als die Verluste der Referenzleitung, ist, dass der Rohrdurchmesser der neuen Leitung konstant bleibt. Deshalb herrschen nach jeder Düse immer niedrigere Geschwindigkeiten im Vergleich zu einer Leitung, die nach jeder Düse den Rohrdurchmesser verringert. Niedrigere Geschwindigkeiten bringen auch geringere Verluste mit sich. Der Vergleich wurde erweitert, indem eine weitere Verteilrohrleitung (Tröpolach) als Referenz berechnet und mit den beiden anderen Leitungen verglichen wurde. Somit wurde das Ziel dieser Masterarbeit erfüllt.

Weiteres Optimierungspotential liegt bei den Abzweigern der Düsen 1, 2 und 3, da diese Düsen die höchsten Verluste aufweisen (siehe rote Kurve in Abbildung 78). Bei diesen Düsenpositionen herrschen in der Ringleitung höhere Geschwindigkeiten als bei den höheren Düsennummern. Eine Vergrößerung des Anstellwinkels des Abzweigers könnte bei den Düsen 1, 2 und 3 eine Verringerung der Verluste bringen. Jedoch würde dadurch der Kostenvorteil verloren gehen, dass alle Abzweiger aus identischen Einzelteilen gefertigt werden.

15. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Querschnitt eines Turbinengehäuses einer vertikalen Pelton turbine [1]	9
Abbildung 2: maximale Laufzahl für störungsfreien Wasseraustritt aus dem Laufrad mit vertikaler Achse [2]	10
Abbildung 3: Einsatzbereiche hydraulischer Strömungsmaschinen nach Giesecke [4]	10
Abbildung 4: Raumfestes Kontrollvolumen [5]	11
Abbildung 5: Rohrströmung eines realen inkompressiblen Fluides [6]	13
Abbildung 6: Strömungsprofil einer turbulenten Rohrströmung [6]	13
Abbildung 7: Rohrreibungsdiagramm [4]	14
Abbildung 8: Flexibilität und Genauigkeit der Diskretisierungsmethoden[7]	18
Abbildung 9: O-Grid-Struktur [7]	19
Abbildung 10: C-Grid-Struktur [7]	19
Abbildung 11: H-Grid-Struktur [7]	19
Abbildung 12: Blockstrukturiertes O-H-Gitter [9]	20
Abbildung 13: Unstrukturiertes Gitter mit Tetraedern und Prismen [9]	20
Abbildung 14: Netzverdichtung im wandnahen Bereich [7]	21
Abbildung 15: Einteilung der Turbulenzmodelle [10]	21
Abbildung 16: Vergleich von LES und DNS [9]	23
Abbildung 17: Einteilung der Lösungsverfahren [7]	23
Abbildung 18: Hydraulische Kontur der Referenz-Verteilrohrleitung	29
Abbildung 19: Einteilung hydraulischer Strömungsmaschinen über die spezifische Drehzahl [16]	30
Abbildung 20: Auswertungsebene 30 mm	31
Abbildung 21: Auswertung Referenz-Verteilrohrleitung	32
Abbildung 22: Konstruktion VRL neu Version 1 mit Detail des Abzweigers und der Düse	33
Abbildung 23: Auswertung VRL neu Version 1	35
Abbildung 24: Konstruktion VRL neu Version 2 mit Detail des Abzweigers und der Düse	36
Abbildung 25: Auswertung VRL neu Version 2	37
Abbildung 26: Konstruktion VRL neu Version 3 offen außenreguliert mit Detail des Abzweigers und der Düse	38
Abbildung 27: Meshing VRL neu Version 3	39
Abbildung 28: Kontrollebenen in der Ringleitung	40
Abbildung 29: Auswertung VRL neu Version 3 offen außenreguliert	41
Abbildung 30: Konstruktion VRL neu Version 3 geschlossen außenreguliert mit Detail des Abzweigers und der Düse	41
Abbildung 31: Auswertung VRL neu Version 3 geschlossen außenreguliert	42
Abbildung 32: Konstruktion VRL neu Version 3 offen innenreguliert mit Detail des Abzweigers und der Düse	43
Abbildung 33: Konstruktion der innenregulierten Düse	43
Abbildung 34: Meshing der innenregulierten Düse	44
Abbildung 35: Auswertung VRL neu Version 3 offen innenreguliert	45
Abbildung 36: Konstruktion VRL neu Version 3 geschlossen innenreguliert mit Detail des Abzweigers und der Düse	46
Abbildung 37: Auswertung VRL neu Version 3 geschlossen innenreguliert	47
Abbildung 38: Vergleich der einphasigen Rechnungen	48
Abbildung 39: Meshing VRL neu Version 3 zweiphasig	49
Abbildung 40: Auswertung VRL neu Version 3 zweiphasig	51

Abbildung 41: Konstruktion VRL neu Version 4 mit Detail des Abzweigers und der Düse.....	52
Abbildung 42: Auswertung VRL neu Version 4.....	53
Abbildung 43: Konstruktion VRL neu Version 5 mit Detail des Abzweigers und der Düse.....	54
Abbildung 44: Auswertung VRL neu Version 5.....	56
Abbildung 45: Vergleich Verlusthöhe V3, V4 und V5.....	57
Abbildung 46: Vergleich Düsenströmung V3, V4 und V5.....	57
Abbildung 47: Vergleich gemittelte Verlusthöhe V3, V4 und V5.....	57
Abbildung 48: links- und rechtsseitige Düsenströmung.....	57
Abbildung 49: Konstruktion VRL neu Version 6 mit Detail des Abzweigers und der Düse.....	58
Abbildung 50: Auswertung VRL neu Version 6.....	59
Abbildung 51: Konstruktion VRL neu Version 7 mit Detail des Abzweigers und der Düse.....	60
Abbildung 52: Auswertung VRL neu Version 7.....	62
Abbildung 53: Vergleich Verlusthöhe V5, V6 und V7.....	63
Abbildung 54: Vergleich Düsenströmung V5, V6 und V7.....	63
Abbildung 55: Vergleich gemittelte Verlusthöhe V5, V6 und V7.....	63
Abbildung 56: Konstruktion VRL neu Version 8 mit Detail des Abzweigers und der Düse.....	64
Abbildung 57: Auswertung VRL neu Version 8.....	65
Abbildung 58: Vergleich Verlusthöhe V5, V7 und V8.....	66
Abbildung 59: Vergleich Düsenströmung V5, V7 und V8.....	66
Abbildung 60: Vergleich der zweiphasigen Rechnungen.....	66
Abbildung 61: Teillastschema.....	67
Abbildung 62: Volume Fraction Teillastfälle Version 7.....	68
Abbildung 63: Konvergenzverläufe Volume Fraction 5-düsig und 4-düsig.....	69
Abbildung 64: Konvergenzverläufe Volume Fraction 3-düsig und 2-düsig.....	70
Abbildung 65: Auswertung Lastfall 1-düsig.....	72
Abbildung 66: Auswertung Lastfall 2-düsig.....	73
Abbildung 67: Auswertung Lastfall 3-düsig.....	74
Abbildung 68: Auswertung Lastfall 4-düsig.....	75
Abbildung 69: Auswertung Lastfall 5-düsig.....	76
Abbildung 70: Auswertung Lastfall 6-düsig.....	77
Abbildung 71: Auswertung Lastfall 1-düsig, Düse 1 geöffnet.....	79
Abbildung 72: Auswertung Lastfall 2-düsig, D1 und D4 geöffnet.....	80
Abbildung 73: Auswertung Referenz-Verteilrohrleitung zweiphasig.....	81
Abbildung 74: Vergleich Referenzleitung und neue Leitung.....	82
Abbildung 75: Hydraulische Kontur Verteilrohrleitung Tröpolach.....	83
Abbildung 76: Hydraulische Kontur Verteilrohrleitung Tröpolach Detail A.....	84
Abbildung 77: Auswertung Verteilrohrleitung Tröpolach.....	85
Abbildung 78: Vergleich Referenzleitung, neue Leitung und Leitung Tröpolach.....	86

16. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Solver-Setup Referenz-Verteilrohrleitung.....	31
Tabelle 2: Auswertung Referenz-Verteilrohrleitung.....	32
Tabelle 3: Solver-Setup VRL neu Version 1.....	34
Tabelle 4: Auswertung VRL neu Version 1.....	35
Tabelle 5: Solver-Setup VRL neu Version 2.....	36
Tabelle 6: Auswertung VRL neu Version 2.....	37
Tabelle 7: Solver-Setup VRL neu Version 3 offen außenreguliert.....	39
Tabelle 8: Auswertung VRL neu Version 3 offen außenreguliert.....	40
Tabelle 9: Solver-Setup VRL neu Version 3 geschlossen außenreguliert.....	42
Tabelle 10: Auswertung VRL neu Version 3 geschlossen außenreguliert.....	42
Tabelle 11: Solver-Setup VRL neu Version 3 offen innenreguliert.....	44
Tabelle 12: Auswertung VRL neu Version 3 offen innenreguliert.....	45
Tabelle 13: Solver-Setup VRL neu Version 3 geschlossen innenreguliert.....	46
Tabelle 14: Auswertung VRL neu Version 3 geschlossen innenreguliert.....	47
Tabelle 15: Solver-Setup VRL neu Version 3 zweiphasig.....	50
Tabelle 16: Auswertung VRL neu Version 3 zweiphasig.....	50
Tabelle 17: Solver-Setup VRL neu Version 4.....	52
Tabelle 18: Auswertung VRL neu Version 4.....	53
Tabelle 19: Solver-Setup VRL neu Version 5.....	55
Tabelle 20: Auswertung VRL neu Version 5.....	55
Tabelle 21: Solver-Setup VRL neu Version 6.....	58
Tabelle 22: Auswertung VRL neu Version 6.....	59
Tabelle 23: Solver-Setup VRL neu Version 7.....	60
Tabelle 24: Auswertung VRL neu Version 7.....	61
Tabelle 25: Solver-Setup VRL neu Version 8.....	64
Tabelle 26: Auswertung VRL neu Version 8.....	65
Tabelle 27: Solver-Setup VRL neu Version 7 Teillastfälle.....	67
Tabelle 28: Solver-Setup VRL neu Version 8 Teillastfälle.....	69
Tabelle 29: Solver-Setup VRL neu Version 8 Vollast und Teillastfälle.....	71
Tabelle 30: Auswertung Lastfall 1-düsig.....	72
Tabelle 31: Auswertung Lastfall 2-düsig.....	73
Tabelle 32: Auswertung Lastfall 3-düsig.....	74
Tabelle 33: Auswertung Lastfall 4-düsig.....	75
Tabelle 34: Auswertung Lastfall 5-düsig.....	76
Tabelle 35: Auswertung Lastfall 6-düsig.....	77
Tabelle 36: Auswertung Lastfall 1-düsig, D1 geöffnet.....	78
Tabelle 37: Auswertung Lastfall 2-düsig, D1 und D4 geöffnet.....	79
Tabelle 38: Solver-Setup VRL Referenzleitung zweiphasig.....	80
Tabelle 39: Auswertung VRL Referenz zweiphasig.....	81
Tabelle 40: Solver-Setup VRL Tröpolach.....	84
Tabelle 41: Auswertung VRL Tröpolach.....	85

17. Literaturverzeichnis

- [1] Raabe, J.: *Hydraulische Maschinen und Anlagen*, 2. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989
- [2] Zhang, Z.: *Freistrahlturbinen*, Springer, Berlin-Heidelberg, 2009
- [3] König, F.; Jehle, C.: *Bau von Wasserkraftanlagen*, 4. überarbeitete Auflage, C. F. Müller Verlag, Heidelberg, 2005
- [4] Giesecke, J.; Mosonyi, E.: *Wasserkraftanlagen*, 5. Auflage, Springer, Berlin-Heidelberg, 2009
- [5] Brenn, G.: *Vorlesungsskriptum für Strömungslehre*, korrigierte Auflage, Technische Universität Graz, 2007
- [6] Sigloch, H.: *Technische Fluidmechanik*, 8. Auflage, Springer, Berlin-Heidelberg, 2011
- [7] Lecheler, S.: *Numerische Strömungsberechnung*, 2. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2011
- [8] Benigni, H.: *Vorlesungsskriptum Rechnerische Simulation von Strömungsmaschinen und Anlagen*, Technische Universität Graz, 2011
- [9] Ferziger, J.H.; Perić, M.: *Numerische Strömungsmechanik*, 1. Auflage, Springer, Berlin-Heidelberg, 2008
- [10] Sanz, W.: *Vorlesungsskriptum Numerische Verfahren in der Energietechnik*, Technische Universität Graz, 2010
- [11] List, R.: *CATIA V5 – Grundkurs für Maschinenbauer*, 6. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012
- [12] Ansys Inc.: *ANSYS ICEM CFD User Manual, Release 12.1*, <http://ansys.com/>, Abfrage 19.11.2012
- [13] Ansys Inc.: *ANSYS CFX Pre User's Guide, Release 13.0*, <http://ansys.com/>, Abfrage 19.11.2012
- [14] Ansys Inc.: *ANSYS CFX Solver Manager User's Guide, Release 13.0*, <http://ansys.com/>, Abfrage 19.11.2012
- [15] Ansys Inc.: *ANSYS CFD-Post User's Guide, Release 13.0*, <http://ansys.com/>, Abfrage 19.11.2012
- [16] Jaberg, H.: *Vorlesungsskriptum Hydraulische Strömungsmaschinen*, Technische Universität Graz, 2012