



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorarbeit

Raimund Struck

## Strömungserzeugung in einem Wellenkanal

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

# **Raimund Struck**

## **Strömungserzeugung in einem Wellenkanal**



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*



**Fraunhofer**

**IFF**

Bachelorarbeit eingereicht von  
Raimund Struck,  
Matrikelnummer [REDACTED],  
im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau und Produktion  
mit der Studienrichtung Energietechnik  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF  
Energiesysteme und Infrastrukturen  
Sandtorstraße 22  
39106 Magdeburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Torsten Birth-Reichert  
Zweitprüfer: Dr. rer. nat. Wolfram Heineken

Abgabedatum: 10.09.2024

# **Zusammenfassung**

**Raimund Struck**

## **Thema der Bachelorthesis**

Strömungserzeugung in einem Wellenkanal

## **Kurzzusammenfassung**

Die Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Strömungserzeugung in einem Wellenkanal. Ziel ist es, ein Strömungssystem im Wellenkanal der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg zu entwickeln und zu simulieren. Dabei werden theoretische Grundlagen, wie Druckverluste in Rohrleitungen und resultierende Kräfte, analysiert. Im praktischen Teil wird die Strömung mithilfe einer Pumpe erzeugt und durch numerische Simulationen optimiert. Die Ergebnisse dienen der Untersuchung und Validierung hydrodynamischer Phänomene, mit besonderem Fokus auf nachhaltige Energiequellen wie die Wasserkraft.

**Raimund Struck**

## **Topic of the thesis**

Flow Generation in a Wave Channel

## **Abstract**

This bachelor's thesis focuses on the flow generation in a wave channel. The aim is to design and simulate a flow system in the wave channel at the Hamburg University of Applied Sciences. Theoretical foundations, such as pressure losses in pipelines and resulting forces, are analyzed. In the practical part, the flow is generated using a pump and optimized through numerical simulations. The results contribute to the investigation and validation of hydrodynamic phenomena, with a particular focus on sustainable energy sources like hydropower.

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                       |             |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                                                     | <b>1</b>    |
| <b>2</b> | <b>Theoretische Grundlagen zur Auslegung einer Strömung in einem Wellenkanal</b>      | <b>5</b>    |
| 2.1      | Druckverluste und Pumpleistung in Rohrleitungssystemen . . . . .                      | 5           |
| 2.2      | Resultierende Kräfte auf Rohrleitungen durch Richtungsänderung der Strömung . . . . . | 8           |
| 2.3      | Notwendigkeit für die numerische Berechnung komplexer Strömungssysteme . . . . .      | 11          |
| 2.4      | Physikalische und numerische Randbedingungen . . . . .                                | 14          |
| 2.5      | Diskretisierung und Berechnungsverfahren . . . . .                                    | 15          |
| 2.6      | Stand der Technik im Bereich der gezielten Strömungserzeugung . . . .                 | 18          |
| <b>3</b> | <b>Auslegung und Simulation</b>                                                       | <b>20</b>   |
| 3.1      | Überschlägige Pumpenleistung im Rohrsystem . . . . .                                  | 23          |
| 3.2      | Kraft im Rohrbogen und Haltemoment . . . . .                                          | 25          |
| 3.3      | CFD - Analyse zur Bestimmung der idealen Ein- und Ausströmungspositionen . . . . .    | 27          |
| 3.4      | Konstruktive Umsetzung . . . . .                                                      | 38          |
| <b>4</b> | <b>Validierung und Bewertung der Ergebnisse</b>                                       | <b>41</b>   |
| <b>5</b> | <b>Ausblick</b>                                                                       | <b>44</b>   |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                                                          | <b>II</b>   |
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b>                                                            | <b>III</b>  |
|          | <b>Abkürzungsverzeichnis</b>                                                          | <b>IV</b>   |
|          | <b>Formelzeichen</b>                                                                  | <b>IV</b>   |
|          | <b>Literatur</b>                                                                      | <b>VII</b>  |
|          | <b>Anhang</b>                                                                         | <b>VIII</b> |

# 1 Einleitung

In der aktuellen Zeit, in der Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit eine immer größere Rolle in der globalen Energieversorgung spielen, gewinnt auch die energetische Nutzung fließender Gewässer zunehmend an Bedeutung. Das grundlegende Prinzip, die Strömungsenergie von Wasser zur Erzeugung elektrischen Stroms zu nutzen, ist dabei nicht neu. Es ist vielmehr bereits seit Beginn der 1990er Jahre ein Teil nachhalti-

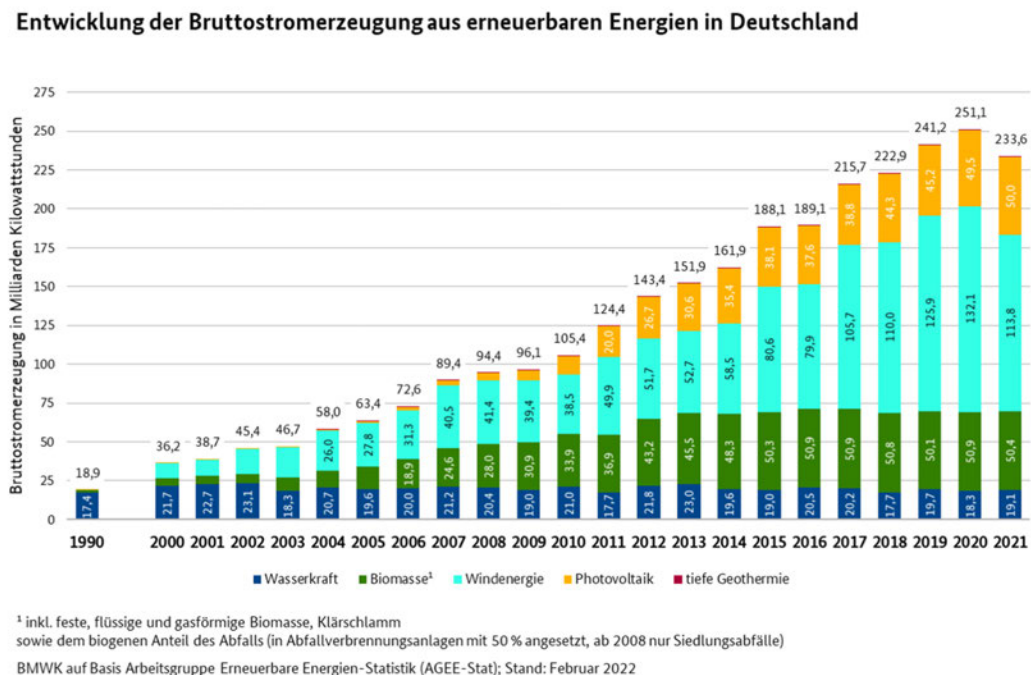


Abbildung 1.1: Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien 1990 und 2000 bis 2021 [3]

ger Energieerzeugung [3]. Zu dieser Zeit stellt die Wasserkraft noch fast die gesamte nachhaltig erzeugte Energie bereit. Zehn Jahre später, im Jahr 2000, betreten andere Akteure das Spielfeld, sodass trotz einer Steigerung der Absolutmenge, der durch Wasserkraft gewonnenen elektrischen Energie, diese nach Abbildung 1.1 nur noch etwa zwei Drittel der nachhaltig gewonnenen elektrischen Energie ausmacht. Interessant ist im weiteren zeitlichen Verlauf nach Abbildung 1.1, dass trotz steigender Bemühungen den gesamten elektrischen Energiebedarf Deutschlands mit nachhaltigen

Energiequellen zu versorgen, die Menge der durch Wasserkraft abgedeckten Energie in etwa konstant bleibt und sich damit nur unwesentlich gesteigert hat seit dem Jahr 1990 bis ins Jahr 2021 [3]. Gleichzeitig ist die erzeugte Energiemenge aus Windenergie, Biomasse und Photovoltaik über die letzten 20 Jahre stark gestiegen. Dagegen stagniert die Entwicklung in der Nutzung von Wasserkraft. Dabei sind einige Fragestellungen im Bereich der erneuerbaren Energien im Bereich der Wasserkraft deutlich besser zu beantworten. Allen voran steht die Volatilität, die eine der größten Herausforderungen in der Nutzung von Windkraft und auch beim Einsatz von Photovoltaik bzw. Solarthermie auftreten. Volatilität bedeutet, dass etwa im Falle von Windkraftanlagen der zu nutzende Wind nicht konstant und auch nicht planbar genug weht. Dadurch hängt die Energiegewinnung stark von nicht kontrollierbaren Umweltfaktoren ab. Gleiches gilt bei der Nutzung solarer Energie. Auch diese wird stark eingeschränkt bei Verschattung durch Wolken oder gar Regen. Auch Wasserkraft unterliegt einer gewissen Volatilität, etwa durch saisonale Unterschiede in der Wassermenge, die von Flüssen geführt wird, welche wiederum mit der Niederschlagsmenge in unterschiedlichen Regionen zusammenhängt. Allerdings kann im Allgemeinen davon ausgegangen werden, dass die Schwankungen deutlich geringer ausfallen als in anderen Bereichen der Gewinnung nachhaltiger Energie. [18] Um im Bereich der Wasserkraftnutzung voranzuschreiten

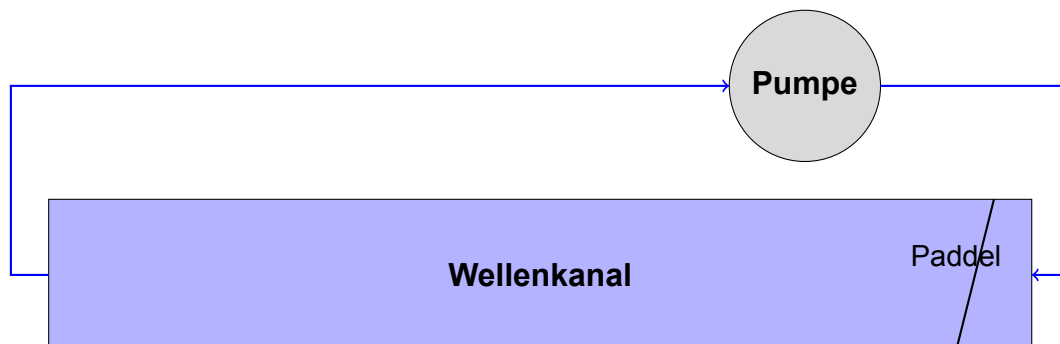


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung des Strömungskonzeptes [eigene Darstellung]

werden immer mehr Forschungsansätze verfolgt, die sich mit Fragestellungen rund um die energetische Nutzung von fließenden Gewässern beschäftigen. Exemplarisch dafür ist das Konzept „River Flow Electrolysis System Platforms“ (RFESP), dessen Ziel es ist, eine infrastrukturunabhängige Plattform zu entwickeln, welche innerhalb eines fließenden Gewässers schwimmt und aus der sie umgebende Strömung elektrischen Strom erzeugt. Mit diesem Strom soll dann lokal grüner Wasserstoff erzeugt werden. Die direkte Nutzung des elektrischen Stroms ist in diesem Projekt nicht vorgesehen. Dies bringt zwar Wandlungsverluste bei der Elektrolyse mit sich, hat aber den Vorteil, dass keine direkte Anbindung der Plattform an das elektrische Verbundnetz erfolgen muss. Der erzeugte Wasserstoff kann eingespeichert werden und etwa durch Versorgungsschiffe abtransportiert werden. Für die Entwicklung einer solchen Plattform ist

zur Erprobung eines Prototypen im Modellmaßstab eine definierte und reproduzierbare Wasserströmung mit offenliegender Oberfläche notwendig. An einer solchen Strömung können dann Erprobungen und Messungen unter Ausschluss von Umwelteinflüssen durchgeführt werden.

Die Erzeugung von Strömungen in hydrodynamischen Testeinrichtungen ist von zentraler Bedeutung in der experimentellen Hydrodynamik und im Küsteningenieurwesen. Verschiedene Techniken und Systeme ermöglichen die Schaffung kontrollierter Strömungsbedingungen zur Untersuchung und Analyse hydrodynamischer Phänomene sowie zur Optimierung maritimer Konstruktionen. So können neben der Erprobung eines Prototypen im Rahmen der RFESP Entwicklungen hier auch vielfältige weitere Anwendungen verwirklicht werden. Der Wellenkanal stellt nach Abschluss dieser Arbeit durch die Kombination von Strömung in Verbindung mit der gleichzeitigen Erzeugung von Wellen einen idealen Versuchsraum für verschiedenste technische Entwicklungen dar, die in einem späteren, realen Einsatz einmal auf fließenden Gewässern zum Einsatz kommen sollen.

Eine für solche Zwecke nutzbare Strömung soll im Rahmen dieser Arbeit in den Wellenkanal der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg) implementiert werden. Dieser bietet eine ideale Basis für die geplanten Vorhaben. Neben dem Ausschluss äußerer Umweltbedingungen durch seinen Standort in der Maschinenhalle des Zentrum für Energietechnik (ZET) kann auch die Visualisierung von strömungsmechanischen Effekten während der Durchführung von Tests durch seine Bauweise aus Glaselementen gut gewährleistet werden. Es können im Rahmen dessen nicht nur Beobachtungen aus einer Perspektive oberhalb der Wasseroberfläche erfolgen. Auch unterhalb der Wasseroberfläche kann in das Wasser geschaut werden. Außerdem bietet der Wellenkanal entsprechend seiner Bezeichnung auch die Möglichkeit, definierte und reproduzierbare Wellen zu erzeugen. So kann perspektivisch auch der Einfluss von Wellen mit untersucht werden. Entsprechend des in Abbildung 1.2 gezeigten ersten Entwurfsschemas soll als Ziel dieser Arbeit eine Strömung in dem Wellenkanal erzeugt werden.

Im Verlauf dieser Arbeit soll zunächst ein Strömungssystem auf Basis des in Abbildung 1.2 gezeigten Schemas entworfen und ausgelegt werden. Neben der reinen Auslegung der Anlagenkomponenten, die für die Strömungserzeugung dem Wellenkanal hinzugefügt werden müssen, soll die Strömung innerhalb des Kanals mittels CFD-Analysen optimiert werden. Auf Basis aller so erlangten Erkenntnisse soll dann ein detailliertes CAD-Modell des Entwurfes angefertigt werden, was als Basis für den dann folgenden Bau dient. Anschließend sollen die Anlagenkomponenten an dem Wellenkanal angebracht werden. Abschließend soll eine Inbetriebnahme sowie ein Funktionstest erfolgen.



Abbildung 1.3: Wellenerzeugung im Wellenkanal der HAW

In Abbildung 1.3 ist der Wellenkanal der HAW in seinem Ursprungszustand zu sehen. Gut erkennbar ist dabei die Bauweise aus einem Edelstahlrahmen, in den insgesamt 22 Glassegmente eingeklebt sind. So können gute Einblicke in das Verhalten unterhalb der Wasseroberfläche erlangt werden ohne die Lichtbrechungseffekte der Oberfläche. Auf der rechten Seite ist das Wellenpaddel, welches zur Wellenerzeugung um einen unten liegenden Drehpunkt vor und zurück bewegt wird. Auf der linken Seite ist ein Teil der Arbeitsbühne zu sehen. Von hier aus können Versuchsträger in den Wellenkanal eingesetzt werden. Auch das Verhalten der Wellen und der zu erzeugenden Strömung kann hier von der Oberfläche aus betrachtet werden.



## 2 Theoretische Grundlagen zur Auslegung einer Strömung in einem Wellenkanal

Für die Umsetzung der Auslegung werden unterschiedliche Wissensbereiche benötigt, die innerhalb dieses Abschnittes eingeführt werden. Dabei handelt es sich zunächst um die analytische Betrachtung von Rohrströmungen, insbesondere der Druckverluste aufgrund von Reibung und der daraus resultierenden Verlustleistung an der Pumpe sowie der Gesamtleistung der Pumpe für das Durchströmen von Rohrleitungssystemen. Weiterhin wird gezeigt, wie resultierende Kräfte aus der Richtungsänderung von strömenden Fluiden analytisch bestimmt werden können. Folgend wird die Numerik als Lösungsmethode komplexer Strömungszustände eingeführt. Dabei wird eingangs die Notwendigkeit für numerische Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen beleuchtet. Folgend wird weiter ins Detail gegangen, indem für die numerische Berechnung getroffene Vereinfachungen in Form von Turbulenzmodellen vorgestellt werden. Weiterhin wird der Blick auf notwendige Randbedingungen für die Berechnung gelenkt. Auch die Ansätze der Lösungsalgorithmen werden dargestellt. Abschließend wird der Stand der Technik im Bereich des Erzeugens von Strömungen gezeigt.

### 2.1 Druckverluste und Pumpleistung in Rohrleitungssystemen

Für die Auslegung von Rohrleitungssystemen spielt die Fluidströmung innerhalb von Rohrleitungen eine zentrale Rolle. Zur Charakterisierung solcher Rohrströmungen wird die Reynoldszahl  $Re$  als dimensionslose Kenngröße nach Surek und Stempin [13, Seite 32] benötigt. Die Reynoldszahl wird entsprechend der Darstellung von Strybny für kreisrunde Querschnitte mithilfe des Durchmessers  $d$  als charakteristische Länge, der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  sowie der kinematischen Viskosität des strömenden Fluides  $\nu$  bestimmt.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (2.1)$$

So kann einerseits das charakteristische Strömungsverhalten innerhalb der Rohrleitung mit anderen Systemen anderer Dimensionen vergleichbar gemacht werden und andererseits mithilfe des entsprechenden Moody-Diagramms für die weitere analytische Betrachtung der entsprechende Rohrreibungsbeiwert  $\lambda$  bestimmt werden. Für Rohrströmungen innerhalb kreisrunder Innenquerschnitte gilt ein linearer Zusammenhang zwischen dem Rohrreibungsbeiwert  $\lambda$  und der Reynoldszahl  $Re$ , solange die Strömung laminares Verhalten aufweist. Dieses Verhalten tritt immer auf, sobald die Reynoldszahl  $Re$  kleiner als die kritische Reynoldszahl  $Re_{krit} \approx 2300$  [13, Seite 54] ist. Es ergibt sich also folgender lineare Zusammenhang.

$$\lambda_{laminar} = \frac{64}{Re} \quad (2.2)$$

Die kritische Reynoldszahl  $Re_{krit}$  bildet dabei die Grenze zwischen laminarer und turbulenter Strömung und wird von einem Übergangsbereich umgeben, in dem laminare und turbulente Anteile der Strömung gleichzeitig vorliegen können [9, Seite 141]. Ist die Reynoldszahl  $Re$  größer als die kritische Reynoldszahl  $Re_{krit}$ , fließt die Rohrströmung turbulent und zur Bestimmung des Rohrreibungsbeiwertes  $\lambda$  wird neben dem hydraulischen Durchmesser  $d_{hyd}$  auch die relative Oberflächenrauheit  $k$  der Innenseite der Rohrleitung benötigt [13]. Im turbulenten Bereich ergibt sich ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Reynoldszahl  $Re$  und Rohrreibungsbeiwert  $\lambda$ , hier wird auf das Moody-Diagramm zurückgegriffen, sodass nach Colebrook-White die gesuchten Größen abgelesen werden können [13, Seite 57]. Mithilfe des Quotienten aus hydraulischem Durchmesser  $d_{hyd}$ , der für runde Querschnitte dem Durchmesser  $d$  entspricht, und der Oberflächenrauheit  $k$  kann eine der empirisch bestimmten Kurven gewählt werden. Anschließend wird mit der Reynoldszahl  $Re$  der Rohrreibungsbeiwert  $\lambda$  auf der linken Diagrammachse abgelesen. Für genauere analytische Betrachtungen gibt es zahlreiche empirische Gleichungen für verschiedene Anwendungsfälle [9, Seite 141].

Für den Übergangsbereich zwischen laminarem und turbulentem Verhalten ist nach Sigloch [9] zu beachten, dass der Rohrreibungsbeiwert  $\lambda$  analytisch nur implizit durch Formeln beschrieben werden kann, was aufwändige iterative Näherungslösungen nach sich zieht [9, Seite 142/143].

Durch die innerhalb der Rohrleitungen auftretenden Reibungseffekte dissipiert Energie entlang der Rohrströmung in Form eines Verlustes an Druck innerhalb des strömenden Fluids. Dieser Druckverlust  $\Delta p_v$  wird für geometrisch gerade verlaufende Rohrleitungen nach Surek/Stempin [13, Seite 61] und Sigloch [9, Seite 143] mithilfe des Rohrreibungsbeiwertes  $\lambda$ , dem Quotienten aus Rohrlänge und hydraulischem Rohrdurchmesser  $\frac{l}{d}$  sowie der Dichte  $\rho$  und der mittleren Fließgeschwindigkeit  $v$  des Fluids folgendermaßen berechnet.

$$\Delta p_{v_{gerade}} = \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \frac{l}{d} \quad (2.3)$$

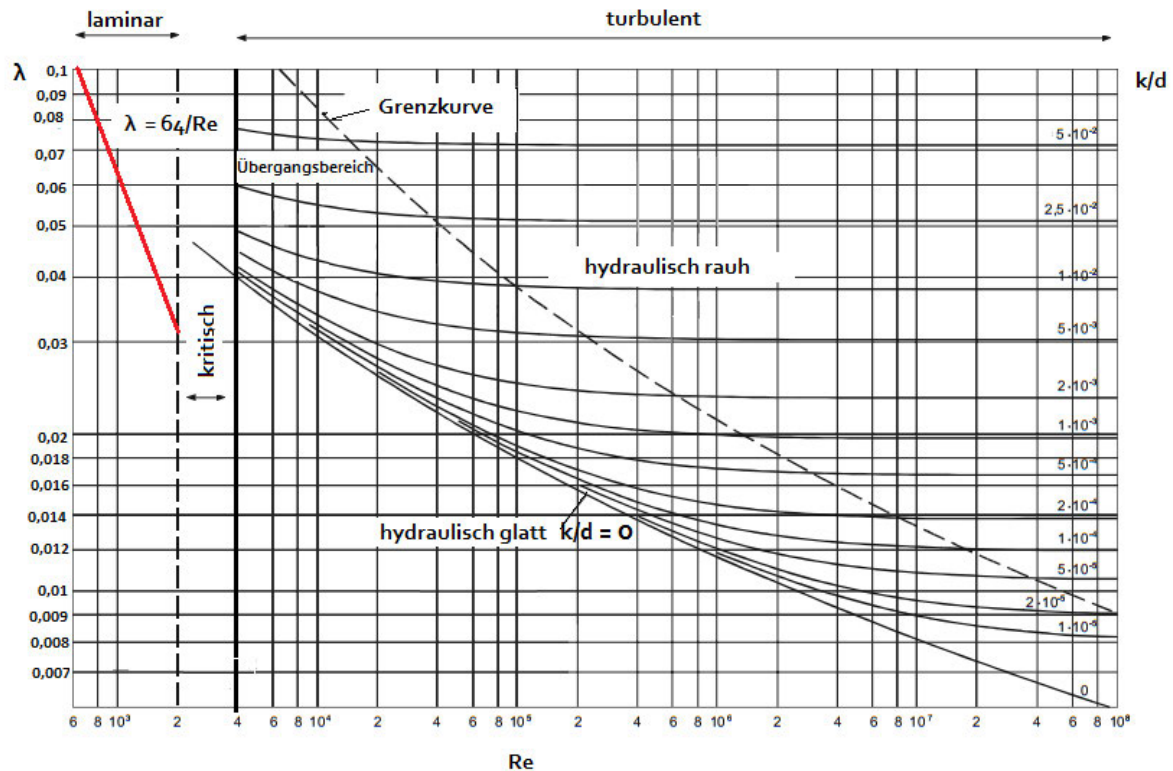


Abbildung 2.1: Moody-Diagramm [10]

Dabei sind Innendurchmesser und hydraulischer Durchmesser für runde Röhre äquivalent. Wird dieser Zusammenhang nach dem Rohrreibungsbeiwert  $\lambda$  aufgelöst, kann auch über die Messung zweier Absolutdrücke  $p_1$  und  $p_2$  in der Strömung ein Druckverlust  $\Delta p_v$  indirekt gemessen werden.

$$\Delta p_v = |p_2 - p_1| \quad (2.4)$$

Wird zusätzlich die Euler-Zahl als weitere dimensionslose Kennzahl eingeführt,

$$Eu = \frac{\Delta p_v}{\rho \cdot v^2} \quad (2.5)$$

kann der Ausdruck stark vereinfacht werden [9, Seite 143] [12, Seite 255].

$$\lambda = 2 \cdot \frac{d}{l} \cdot Eu \quad (2.6)$$

Werden neben gerade verlaufenden Rohrleitungen auch Rohrbögen zur Richtungsänderung der Rohrströmung eingesetzt, so treten innerhalb dieser Abschnitte ebenfalls Reibungseffekte und damit Druckverluste auf. Die Größe der dabei auftretenden Sekundärströmungen, also Strömungsanteile deren Richtung von der Hauptströmung abweicht, können in Abhängigkeit der umlenkenden Geometrie des Rohrbogens teils große Druckverluste  $\Delta p_v$  verursachen [13, Seite 73]. Das Verhalten der Strömung ist

in solchen Bereichen analytisch nur unter großem Aufwand zu bestimmen, sodass für häufig verwendete Rohrleitungsgeometrien Druckverlustbeiwerte  $\zeta_i$  empirisch bestimmt worden sind, welche für die analytische Berechnung aus Tabellenwerken herangezogen werden können. Häufig werden von Herstellern, die Armaturen oder Rohrleitungselemente anbieten, diese Werte direkt mit bereitgestellt. Der Druckverlust  $\Delta p_v$  über einen Abschnitt mit bekanntem Druckverlustbeiwert  $\zeta$  kann mittels Dichte  $\rho$  und mittlerer Fließgeschwindigkeit  $v$  bestimmt werden [13].

$$\Delta p_{v\zeta} = \frac{1}{2} \cdot \zeta \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2.7)$$

Um für ein ganzes System aus Rohrleitungen und Rohrkrümmern den Druckverlust zu berechnen, werden die Druckverluste der einzelnen Abschnitte des Systems addiert, sodass sich ein gesamter Druckverlust einstellt. Zur Bestimmung der erforderlichen Pumpenleistung  $P_P$  ist neben dem Druckverlust als Resultat der Rohrreibung auch der Druckverlust infolge der zu überwindenden Höhendifferenz  $\Delta h$  zu berücksichtigen. Die reine Pumpenleistung wird dann als Produkt aus der Summe aller auftretenden Druckverluste  $\Delta p_{ges}$  und dem Volumenstrom  $\dot{V}$  gebildet [12].

$$P_P = \Delta p_{ges} \cdot \dot{V} \quad (2.8)$$

$$P_{El} = \frac{P_P}{\eta_{Pumpe}} \quad (2.9)$$

Für die elektrisch aufzuwendende Leistung  $P_{El}$  muss noch entsprechend der Gleichung 2.9 der Pumpenwirkungsgrad  $\eta_{Pumpe}$  berücksichtigt werden.

## 2.2 Resultierende Kräfte auf Rohrleitungen durch Richtungsänderung der Strömung

Bei der Umlenkung fließender Medien kommt es durch die Massenträgheit des Fluides zu resultierenden Kräften auf die Wandflächen des Rohrleitungssystems. Die so auftretenden Kräfte auf die durchströmten Rohrleitungselemente können analytisch für einfache Geometrien bestimmt werden. Dabei müssen die Größen für den Druck, die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung sowie die Flächen und deren ungefähre Rauigkeiten bekannt sein [9, Seite 194].

Zur Berechnung der Kräfte, die durch die Umlenkung eines strömenden Fluides auftreten, wird der Impulssatz herangezogen. Weiterhin soll die Betrachtung so erfolgen, dass die Strömung reibungsfrei und als ideales Fluid betrachtet wird. Dadurch kann gezielt

die für die Richtungsänderung aufzubringende Kraft als Wandkraft  $F_W$  in dem Krümmer berechnet werden. Dabei werden konstante Fließgeschwindigkeiten über den Ein- und Austritt des Rohrelementes vorausgesetzt und weiterhin die aus der Schwerkraft resultierende Druckänderung vernachlässigt. Diese hat einen nur geringen Einfluss auf das Verhalten bei einem vertikalen Krümmer, ist dieser horizontal angeordnet, entfällt die Druckänderung durch seine Lage bereits.

Zur Berechnung muss eine Bilanzgrenze gewählt und freigeschnitten werden, sodass an beiden Schnittufern die ein- und ausströmenden Größen wie die Fließgeschwindigkeiten  $v_i$ , die Druckkräfte  $F_{p_i}$  und die Impulsströme  $\dot{I}_i$  bekannt sind und entsprechend der Abbildung 2.2 angetragen werden können [17]. Zur Berechnung der resultierenden

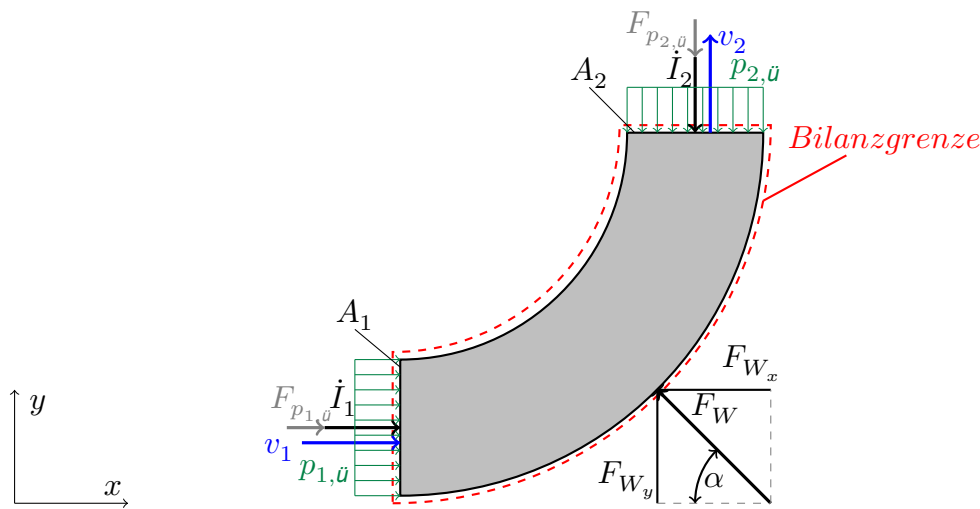


Abbildung 2.2: Resultierende Kräfte auf einen Rohrkrümmer [eigene Darstellung nach [9, Seite 195]] und [17]

Kräfte auf die Krümmerwand werden aus den ein- und ausströmenden Parametern der Strömung die resultierenden Kräfte bestimmt. Dabei ergibt das Produkt aus Dichte  $\rho$ , Fließgeschwindigkeit  $v$  und Fläche des Querschnittes  $A$  den Massenstrom  $\dot{m}$ . Wird dieses Produkt nochmals mit der Fließgeschwindigkeit  $v$  multipliziert, ergibt sich der Impulsstrom bzw. die Kraft der Strömung [2].

$$\dot{I} = \dot{m} \cdot v = \rho \cdot v \cdot A \cdot v = \rho \cdot v^2 \cdot A = F_{Impuls} \quad (2.10)$$

Eine weitere Kraftkomponente der Strömung resultiert aus vorliegendem Überdruck gegenüber der Umgebung. Mittels dieses Druckes und der wirkenden Querschnittsfläche am Ein- und Austritt des Bilanzraumes kann diese Kraft ebenfalls formuliert werden.

$$F_{\bar{u}} = p_{\bar{u}} \cdot A \quad (2.11)$$

Mit den wirkenden Kräften wird ein Kräftegleichgewicht in x- Richtung aufgestellt, sodass mit den bekannten, richtungsabhängigen Größen die Wandkraft  $F_{Wx}$  bestimmt werden

kann [17].

$$\sum F_x \stackrel{!}{=} 0 = -F_{W_x} + F_{Impuls_1} + F_{p_{1,\hat{u}}} \implies F_{W_x} = F_{Impuls_1} + F_{p_{1,\hat{u}}} \quad (2.12)$$

Werden die zugrunde liegenden Größen eingesetzt, ergibt sich für die x-Komponente der Wandkraft  $F_{W_x}$  folgender Zusammenhang. Der Zusammenhang ist in der Abbildung 2.3 grafisch dargestellt. Hier sind die jeweils eintretenden Kräfte bzw. Impulsströme relativ zueinander maßstäblich dargestellt, sodass durch ihre trigonometrische Beziehung zueinander die resultierende Größen im Verhältnis grafisch abgebildet ist.

$$F_{W_x} = \underbrace{(\rho \cdot v_1 \cdot A_1)}_{\dot{m}_1} \cdot v_1 + p_{1,\hat{u}} \cdot A_1 \quad (2.13)$$

Analog dazu wird auch die y-Koordinatenrichtung betrachtet.

$$\sum F_y \stackrel{!}{=} 0 = F_{W_y} - F_{Impuls_2} - F_{p_{2,\hat{u}}} \implies F_{W_y} = F_{Impuls_2} + F_{p_{2,\hat{u}}} \quad (2.14)$$

Werden alle Größen der Strömung eingesetzt, ergibt sich  $F_{W_y}$ .

$$F_{W_y} = \underbrace{(\rho \cdot v_2 \cdot A_2)}_{\dot{m}_2} \cdot v_2 + p_{2,\hat{u}} \cdot A_2 \quad (2.15)$$

Aufgrund der zweidimensionalen Strömungsführung kann hier auf das Kräftegleichgewicht in z-Richtung verzichtet werden. Für die Strömung eines inkompressiblen Fluids mit  $\rho = const.$  kann nun die Kontinuitätsgleichung angewandt werden.

$$\rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2 \iff \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (2.16)$$

Sind die Querschnittsflächen ebenfalls gleich groß, entsprechen auch die Fließgeschwindigkeiten unter den genannten Voraussetzungen einander.

$$A_1 = A_2 \implies v_1 = v_2 \quad (2.17)$$



Abbildung 2.3: Kräftedreieck an einem Rohrkrümmer [eigene Darstellung nach [9, Seite 195]]

Abschließend kann die aus den Einzelkomponenten resultierende Kraft nach deren Betrag und Richtung bestimmt werden. Dazu wird der Satz des Pythagoras angewandt, da die Kräfte entsprechend der Abbildung 2.3 zu einem rechtwinkligen Dreieck kombiniert werden können.

$$|F_W| = \sqrt{F_{W_x}^2 + F_{W_y}^2} \quad (2.18)$$

Um auch die räumliche Richtung der resultierenden Kraft zu bestimmen, kann ebenfalls die trigonometrische Beziehung aus Abbildung 2.3 herangezogen werden. Mit der Umkehrfunktion des Tangens ergibt sich dann der Winkel, um den die Richtung von der x-Richtung abweicht.

$$\alpha = \arctan \left( \frac{F_{W_y}}{F_{W_x}} \right) \quad (2.19)$$

Die jetzt bekannte Kraft nach Betrag und Richtung greift an dem Rohrkrümmer direkt in der außen liegenden Wand an. Der Kraftangriffspunkt ist dabei genau mittig zwischen ein- und ausströmender Grenze des Bilanzraumes.

## 2.3 Notwendigkeit für die numerische Berechnung komplexer Strömungssysteme

Die analytischen Methoden zur Berechnung von Parametern innerhalb einer Fluidströmung können für einfache Geometrien und Strömungszustände zur überschlägigen Berechnung und Abschätzung von ersten Dimensionierungen gut verwendet werden. In der Realität auftretende Strömungen entsprechen oftmals nicht den analytisch berechenbaren einfachen Geometrien, sodass hier andere Verfahren als die analytischen Lösungen zur Bestimmung von Drücken, Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturen herangezogen werden müssen. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 2.4 dargestellt [16]. Die theoretische bzw. analytische Betrachtung ist nur ein Teil der Strömungsmechanik. Für Fragestellungen, die über die grundlegenden Strömungsprinzipien hinaus gehen, werden iterative, also numerische, Verfahren oder aber Experimente benötigt, um das Verhalten der Strömung zu erfassen. Um diese Größen an realen Strömungen zu bestimmen, können entweder Experimente durchgeführt werden und durch den Einsatz von Messtechnik untersucht werden oder durch die numerische Lösung der mathematischen Gleichungen, die die Strömung beschreiben berechnet werden [6] [16]. Da experimentell keine genaue Messung aller strömungstechnisch relevanten Bereiche gleichzeitig erfolgen kann, ohne das Strömungsverhalten durch die eingebrachte Messtechnik zu verfälschen, ist die numerische Berechnung realer Strömungssysteme ein gängiges Verfahren geworden [6].

Zur mathematischen Beschreibung strömender Gase oder Flüssigkeiten kommen physikalische Erhaltungsgleichungen zum Einsatz. Diese folgen allgemein der Erhaltung der physikalischen Größen von Masse, Impuls in alle drei Raumrichtungen und der Energie [1]. So ergeben sich fünf Erhaltungsgleichungen, die die Basis jeder Strömungsberechnung darstellen und damit Kern jeder CFD-Berechnungssoftware sind [6]. Die

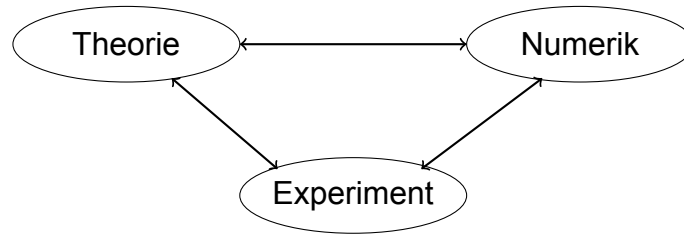


Abbildung 2.4: Einordnung der numerischen Strömungsberechnung in die Fluidmechanik [eigene Darstellung nach [6] [16]]

Erhaltungsgleichungen sind in zwei unterschiedlichen, direkt ineinander überführbaren Formen anwendbar. Auf der einen Seite steht die Integralform, die physikalische Effekte innerhalb des Kontrollvolumens anschaulicher darstellt, da immer über ein endlich großes Volumenelement die jeweilige Erhaltungsgröße integriert wird. Dabei ist die zeitliche Änderung der Strömungsgrößen im Inneren des Volumenelements gleich der Änderung der durch die Oberfläche des Volumenelements strömende Größen. Durch die vollständige Betrachtung des Volumenelements ist diese Form genauer, aber auch rechenintensiver durch die Verwendung von Integralen, die gelöst werden müssen [6]. Auf der anderen Seite steht die Differentialform, die auf der Betrachtung der Differenzen in den absoluten der Strömungsparameter an infinitesimal kleinen Volumenelementen betrachtet. Dadurch können die Gleichungen ohne Integrale aufgestellt werden, was die mathematische Anschaulichkeit verbessert, auf der anderen Seite wird die physikalische Anschaulichkeit verringert, da die Volumina jeweils gegen Null gehen [6].

Werden die Erhaltungsgleichungen an einem infinitesimalem Volumenelement aufgestellt, ergeben sich in kartesischer Darstellung die Navier-Stokes Gleichungen [1]. Dies sind partielle Differentialgleichungen, deren Lösungen die betrachtete Strömung vollständig beschreiben. Es ergeben sich insgesamt fünf Erhaltungsgleichungen, die die Masse (Gleichung 2.20), den Impuls in die drei kartesischen Raumesrichtungen (Gleichungen 2.21, 2.22, 2.23) und die Energieerhaltung (Gleichung 2.24) beschreiben [1] [6].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot w) = 0 \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot u \cdot v + p - \tau_{yx}) + \\ \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot u \cdot w + p - \tau_{zx}) - \rho \cdot g_x = 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$



$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot u \cdot v + p - \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \cdot v^2 + p - \tau_{yy}) + \\ \frac{\partial}{\partial z} (\rho \cdot v \cdot w + p - \tau_{zy}) - \rho \cdot g_y = 0 \quad (2.22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot w) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot u \cdot v + p - \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \cdot v \cdot w + p - \tau_{yz}) + \\ \frac{\partial}{\partial z} (\rho \cdot w^2 + p - \tau_{zz}) - \rho \cdot g_z = 0 \quad (2.23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \cdot \left( e + \frac{1}{2} \cdot \vec{v}^2 \right) \right] + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho \cdot u \cdot \left( h + \frac{1}{2} \cdot \vec{v}^2 \right) - (u \cdot \tau_{xx} + v \cdot \tau_{xy} + w \cdot \tau_{xz}) - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left[ \rho \cdot v \cdot \left( h + \frac{1}{2} \cdot \vec{v}^2 \right) - (u \cdot \tau_{yx} + v \cdot \tau_{yy} + w \cdot \tau_{yz}) - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \rho \cdot w \cdot \left( h + \frac{1}{2} \cdot \vec{v}^2 \right) - (u \cdot \tau_{zx} + v \cdot \tau_{zy} + w \cdot \tau_{zz}) - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right] \\ - \rho \cdot (u \cdot g_x + v \cdot g_y + w \cdot g_z) - \rho \cdot \dot{q}_s = 0 \quad (2.24) \end{aligned}$$

Diese vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen beinhalten das gesamte Verhalten der Strömung inklusive hoch- und niederfrequenten Schwingungen. Dadurch muss das Rechennetz zur numerischen Lösung so fein aufgelöst werden, dass kleinste Schwingungen abgebildet werden. Dies hat eine sehr hohe Rechenzeit zur Folge, da die entsprechenden Gleichungen für sehr viele Punkte im Raum gelöst werden müssen. Um dem entgegen zu wirken werden die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (Reynolds-Average-Navier-Stokes-Gleichungen bzw. RANS-Gleichungen) eingeführt [1] [6]. Die auftretenden Größen, die die Strömung in ihrer Charakteristik beschreiben werden hier durch die Summe aus ihrem nieder- sowie hochfrequentem Teil ersetzt. Die hochfrequenten Schwingungen werden wiederum aus den Gleichungen entnommen und durch verschiedene Turbulenzmodelle ersetzt, sodass die Navier-Stokes-Gleichungen nur noch die niederfrequenten Terme enthalten. Dadurch kann das Rechennetz weniger genau gewählt werden, da die Turbulenzen nicht mehr direkt aufgelöst werden müssen. Daraus resultieren deutlich verkürzte Rechenzeiten, was diesen Ansatz zu einer wichtigen Vereinfachung in der numerischen Strömungsberechnung macht [6].

Die durch diesen Vereinfachungsansatz vernachlässigten turbulenten Schwingungen innerhalb des Strömungsfeldes müssen durch die bereits erwähnten Turbulenzmodelle

abgebildet werden. Hier reicht die Bandbreite der eingesetzten Modelle von einfachen algebraischen Ansätzen bis hin zu komplexen Differentialgleichungssystemen 2. Ordnung. Ist etwa bekannt, dass eine rein laminare Strömung vorliegt, kann das laminare Modell gewählt werden, bei dem keine Turbulenz in der Berechnung auftaucht. Hier ist allerdings Vorsicht geboten, da schnell unphysikalische Lösungen auftreten können. Einfache Turbulenzmodelle stellen Wirbelviskositätsmodelle dar. Dabei werden keine, eine oder zwei Differentialgleichungen zur Modellierung der Turbulenzen herangezogen. Ein klassischer Ansatz ohne den Einsatz einer Differentialgleichung ist das Baldwin-Lomax-Modell, bei dem nur eine algebraische Gleichung angenähert wird. Das Spalart-Allmaras-Modell berechnet die turbulente kinetische Energie mithilfe einer Differentialgleichung. Für industrielle Anwendungen eignen sich allerdings jene Turbulenzmodelle, die zwei Differentialgleichungen zur Bestimmung der Wirbelviskosität verwenden. Üblicherweise kommen hier  $k - \varepsilon$ -,  $k - \omega$ - und Shear Stress Transport (SST) - Modelle zum Einsatz. Die Wahl eines geeigneten Turbulenzmodells hängt immer stark von der zu untersuchenden Strömung ab. So ist etwa für eine Untersuchung einer Strömung in Wandnähe das  $k - \omega$ -Modell dem  $k - \varepsilon$ -Modell vorzuziehen, um durch die Berechnung der turbulenten Frequenz  $\omega$  im Gegensatz zur turbulenten Dissipation  $\varepsilon$  genauere Ergebnisse zu erhalten. Bei der Untersuchung einer freien Strömung stellt sich dies entgegengesetzt dar [1] [6].

Die numerische Komplexität und die Rechenzeit hängen immer direkt zusammen, so dass auch beim Einsatz von Turbulenzmodellen durch eine steigende Zahl zu lösender Gleichungen bzw. Differentialgleichungen Rechenzeiten stark variieren können [6].

## 2.4 Physikalische und numerische Randbedingungen

Zur Berechnung der fünf unbekannten Größen,  $\rho, u, v, w, e$  eines Strömungsfeldes mittels der Navier-Stokes-Gleichungen werden für die Ränder des zu berechnenden Feldes bekannte Größen vorausgesetzt, um für die folgende iterative Lösung der Bestimmungsgleichungen einen Startwert zu erhalten [1] [6]. Erst durch die korrekte Wahl der Randbedingungen kann das Verhalten des untersuchten Strömungsfeldes physikalisch korrekt abgebildet werden [6].

Typischerweise kommen drei Formen der Berandung in Strömungsfeldern zum Tragen. Neben dem Zu- und Abströmrand, an denen der Massenstrom des strömenden Fluids in das Berechnungsfeld ein - bzw. austritt, zählen dazu auch feste Wände. Die Festkörperränder sind für die Strömung undurchlässig und beeinflussen diese nur durch die Umlenkung der Strömung [1] [6]. Direkt an der Wand gilt dadurch für newton'sche Fluide, dass die Geschwindigkeit in alle Raumesrichtungen gleich Null ist. [16]

Um die fünf unbekannten Größen der Bestimmungsgleichungen  $\rho, u, v, w, e$  bestimmen zu können, müssen also entsprechend viele Randbedingungen vorgegeben werden. Die Art der Berandung und der Strömung beeinflusst, wie viele Größen direkt, also als physikalische Randbedingungen (PRB) vorgegeben werden können. Dabei handelt es sich meist um gemessene Größen oder physikalisch berechnete Größen. Meist sind diese Drücke, Geschwindigkeiten, Massenströme oder Temperaturen. Alle nicht direkt angegebenen Randbedingungen müssen als numerische Randbedingungen (NRB) durch die Berechnungssoftware bestimmt werden. Dadurch wird das Berechnungsfeld mit den Rändern der Berechnung verknüpft [6]. Die Anzahl der Randbedingungen hängt von der Anzahl der Raumrichtungen ab, die für die Berechnung betrachtet werden. Für ein dreidimensionales Berechnungsfeld muss die Summe der physikalischen und numerischen Randbedingungen immer fünf ergeben. Entsprechend verringert sich diese Anzahl bei sinkender Dimension der Betrachtung durch das Wegfallen von Raumesrichtungen. Dadurch werden für zweidimensionale Berechnungen immer vier Randbedingungen benötigt und eindimensionale Berechnungen erfordern noch drei Randbedingungen [6].

Ob physikalische oder numerische Randbedingungen verwendet werden kann allgemein aus der Richtung bestimmt werden, aus der Charakteristika auf eine Berandung treffen. Liegt die Quelle der Charakteristika außerhalb des Berechnungsfeldes, werden physikalische Randbedingungen eingesetzt. Treffen die Effekte allerdings von innen auf eine Berandung, müssen numerische Randbedingungen verwendet werden. Dies gilt für Ausströmungsberandungen, teilweise für feste Wände, manchmal aber auch für Teile des Zustroms, wenn Effekte aus dem Berechnungsfeld sich bis zum Einstömrund auswirken [6].

## 2.5 Diskretisierung und Berechnungsverfahren

Die numerische Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen erfordert eine Umsetzung der partiellen Ableitungen aus den Differentialgleichungen in finite Differenzen, die dem Rechnernetz entsprechen. So wird aus dem Differential  $\frac{\partial U}{\partial x}$  eine finite Differenz  $\frac{\Delta U}{\Delta x}$ . Die Größe  $U$  ist dabei Platzhalter für alle verwendeten Größen, die die Strömung beschreiben [6] [16].

Diese finite Differenz kann als Differenzengleichung dargestellt werden, sodass Zähler und Nenner durch die Differenz zweier räumlicher Punkte dargestellt werden können. Die Schrittweite bleibt dabei immer gleich, sodass diese weiterhin als  $\Delta x$  beschrieben werden kann. Es können nun unterschiedliche Ansätze in der Wahl der räumlichen Punkte zur Bestimmung der Ableitung im Punkt  $P$  herangezogen werden (siehe Abbildung 2.5). Wird beispielsweise die Vorwärtsdifferenz, also die Punkte  $i$  und  $i + 1$

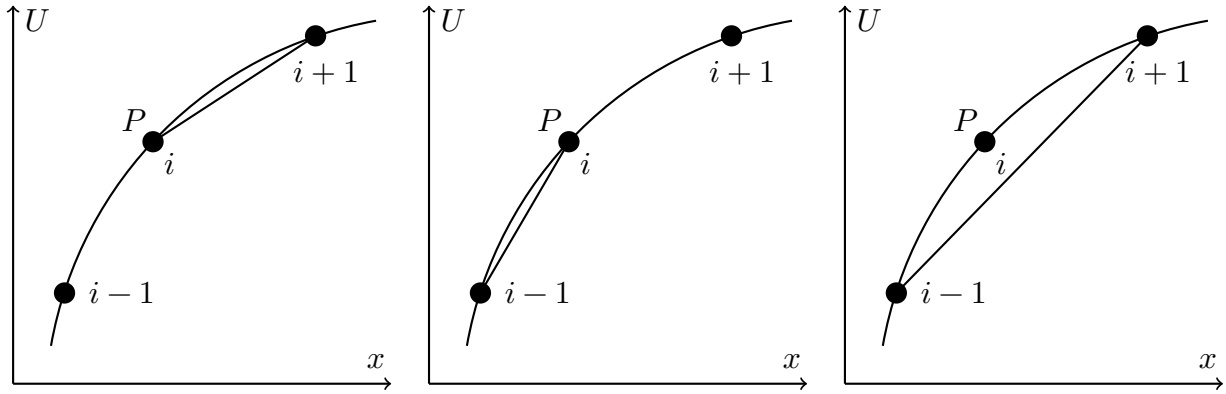


Abbildung 2.5: Räumliche Diskretisierung aus vorwärts, rückwärts und zentraler Differenz [eigene Darstellung nach [6]]

gewählt, ergibt sich für den partiellen Ableitungsterm folgender Zusammenhang [6].

$$\left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)_{i,j} \approx \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{x_{i+1,j} - x_{i,j}} = \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\Delta x} \quad (2.25)$$

Ziel ist es nun, die durch das Ungleichheitszeichen abgedeckte und in der Abbildung 2.5 sichtbare Ungenauigkeit so gering wie möglich zu halten. Über den Einsatz der Taylor-Reihenentwicklung [6] kann der Wert für  $U_{i+1,j}$  beliebig genau approximiert werden. Die Taylor-Reihenentwicklung wird allerdings noch vor der zweiten Ableitung abgebrochen und in die Differenzengleichung (Gleichung 2.25) eingesetzt. Die Terme der Ableitungen höherer Ordnung werden im weiteren Verlauf vernachlässigt und als Abbruchfehler bezeichnet [1] [6]. Dieser wird mit dem Formelzeichen  $O$  gekennzeichnet [6].

$$\left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)_{i,j} = \underbrace{\frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\Delta x}}_{\text{Finite Differenz}} - \underbrace{\frac{(\Delta x)}{2} \cdot \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right)_{i,j} + \frac{(\Delta x)^2}{6} \cdot \left( \frac{\partial^3 U}{\partial x^3} \right)_{i,j} + \dots}_{\text{Abbruchfehler } O(\Delta x)} \quad (2.26)$$

$$\left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)_{i,j} = \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (2.27)$$

Analog können auch die Rückwärtsdifferenz und die zentrale Differenz entwickelt werden. Dabei ergibt sich für den Abbruchfehler  $O(\Delta x)$  als größter Term nur ein von  $(\Delta x)^2$  abhängiger Term. Die Genauigkeit kann hier also entgegen der beiden anderen Fälle der 1. Ordnung als 2. Ordnung bezeichnet werden. Hier ist eine höhere Genauigkeit

zu erwarten [1] [16].

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_{i,j} = \begin{cases} \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\Delta x} + O(\Delta x) & \text{Vorwärts 1. Ordnung} \\ \frac{-3 \cdot U_{i,j} + 4 \cdot U_{i+1,j} - U_{i+2,j}}{2 \cdot \Delta x} + O(\Delta x)^2 & \text{Vorwärts 2. Ordnung} \\ \frac{U_{i,j} - U_{i-1,j}}{\Delta x} + O(\Delta x) & \text{Rückwärts 1. Ordnung} \\ \frac{3 \cdot U_{i,j} - 4 \cdot U_{i-1,j} + U_{i-2,j}}{2 \cdot \Delta x} + O(\Delta x)^2 & \text{Rückwärts 2. Ordnung} \\ \frac{U_{i+1,j} - U_{i-1,j}}{2 \cdot \Delta x} + O(\Delta x)^2 & \text{Zentral 2. Ordnung} \end{cases} \quad (2.28)$$

Auch die Vorwärts- und Rückwärtsdifferenz kann auf die Genauigkeit einer 2. Ordnung gebracht werden. Dazu muss noch ein weiterer Punkt in der Betrachtung mit berücksichtigt werden. Die unterschiedlichen Möglichkeiten sind in Gleichung 2.28 zusammengefasst [6]. Für die Betrachtung anderer Raumesrichtungen ergeben sich die Gleichungen analog unter der Verwendung einer anderen Laufvariable [1]. Neben der so geschaffenen Berechenbarkeit der partiellen Differentialgleichungen für Computersysteme ist es wichtig, die Qualität der Berechnungen bewerten zu können. Dafür sind die Begriffe „Konsistenz“, „Stabilität“ und „Konvergenz“ von zentraler Bedeutung.

Sind die Differenzengleichungen konsistent, ergeben sich bei beliebig kleinen Werten für die Laufvariablen wie  $\Delta x \rightarrow 0$  aus den Differenzengleichungen wieder die zugrundeliegenden Differentialgleichungen. Es werden also die Abbruchfehler beliebig klein, sodass sichergestellt ist, dass die Differenzengleichungen tatsächlich die physikalischen Differentialgleichungen und damit das physikalische Verhalten repräsentieren [6] [16].

Als stabil wird der numerische Lösungsprozess bezeichnet, wenn die auftretenden Abbruchfehler im Verlauf der Interaktionen immer kleiner wird. Störungen in den Berechnungsgrößen werden dabei gedämpft anstatt verstärkt zu werden [6] [16].

Die Konvergenz einer numerischen Lösung wird anhand des sogenannten Residuums bestimmt. Dies ist ein Zahlenwert, der für jede der verwendeten Differenzengleichungen angibt, wie weit deren Lösung von der Lösung der tatsächlichen Differentialgleichung entfernt ist. Um eine als konvergierend und damit als physikalisch korrekt geltende Lösung zu erhalten, muss dieser Wert während der Berechnung um mindestens 4 Zehnerpotenzen sinken [6] [16].

Um die Stabilität der Differenzengleichungen weiter zu steigern, kann mit der Upwind-Diskretisierung eine weitere Form der räumlichen Diskretisierung angewandt werden. Hierbei werden zu einem neuen Berechnungsschritt nicht nur die Informationen bezüglich des zu berechnenden Knotenpunktes berücksichtigt, sondern auch zu einem Teil

die nebenliegenden Punkte aus dem vorherigen Berechnungsschritt. Die Berechnungen selbst erfolgen analog zu den bereits gezeigten Differenzgleichungen. Daraus ergeben sich dann folgende Differenzgleichungen 1. Ordnung [1] [6] [16].

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot [E_{i+1}^n - E_i^n] \quad (2.29)$$

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot [E_i^n - E_{i-1}^n] \quad (2.30)$$

Auch bei dieser räumlichen Diskretisierung genügen die Gleichungen 1. Ordnung meist nicht den geforderten Genauigkeiten. Entsprechend ergeben sich auch Differenzgleichungen 2. Ordnung [1] [6] [16].

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta x} \cdot [-3 \cdot E_i^n + 4 \cdot E_{i+1}^n - E_{i+2}^n] \quad (2.31)$$

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta x} \cdot [3 \cdot E_i^n - 4 \cdot E_{i-1}^n + E_{i-2}^n] \quad (2.32)$$

Der größte Vorteil neben der verbesserten Stabilität liegt für die Upwind-Diskretisierung dabei darin, dass physikalische Störungen besser durch die eingesetzten einseitigen Vorwärts- und Rückwärtsdifferenzen berücksichtigt werden. [6]

## 2.6 Stand der Technik im Bereich der gezielten Strömungserzeugung

Die Erzeugung von Strömungen in kontrollierten Umgebungen findet in verschiedenen Bereichen Anwendung, von sportlichen Aktivitäten bis hin zu industriellen und wissenschaftlichen Anwendungen. Eine Vielzahl von Systemen, die Strömungen simulieren, also gezielt erzeugen, haben sich entwickelt, um gezielte Untersuchungen oder spezifische Nutzungen zu ermöglichen. Zwei bedeutende Technologien, die für diese Arbeit relevant sind, umfassen Gegenstromanlagen in Schwimmbädern und künstliche Surfanlagen.

### Gegenstromanlagen in Schwimmbädern

Gegenstromanlagen sind in vielen Schwimmbädern zu finden und bieten eine Strömung, die es den Schwimmern ermöglicht, auf der Stelle zu schwimmen, ohne vorwärts zu kommen. Diese Systeme erzeugen eine laminare Strömung, die in ihrer Stärke regulierbar ist und dem Schwimmer konstanten Widerstand bietet. Die Technik basiert

häufig auf leistungsstarken Pumpen, die Wasser durch schmale Düsen leiten, um einen gerichteten Fluss zu erzeugen. Solche Systeme werden nicht nur zu Trainingszwecken, sondern auch in Wellness-Einrichtungen für therapeutische Anwendungen genutzt. Sie haben Ähnlichkeit mit der in dieser Arbeit geplanten Strömungserzeugung, da sie darauf abzielen, eine gleichmäßige und kontrollierbare Strömung in einem definierten Raum zu erzeugen. [8]

### **Künstliche Surfanlagen**

Ein weiteres Beispiel für die gezielte Strömungserzeugung sind künstliche Surfanlagen, wie sie in modernen Wasserparks oder auf Kreuzfahrtschiffen zu finden sind. Hier wird eine starke Strömung erzeugt, die über eine geneigte Oberfläche geleitet wird, sodass eine Wellenform entsteht, auf der gesurft werden kann. Die zugrunde liegende Technik ist ähnlich der bei Gegenstromanlagen, allerdings mit dem Unterschied, dass die Strömung erheblich stärker und turbulenter ist. Solche Anlagen verwenden große Pumpen und eine komplexe Steuerung der Strömungsrichtung, um eine möglichst realistische Surferfahrung zu simulieren. [4]

### **Technologische Entwicklungen und wissenschaftliche Nutzung**

Im wissenschaftlichen und industriellen Bereich werden Strömungskanäle genutzt, um das Verhalten von Fluiden in verschiedenen Umgebungen zu simulieren. Solche Einrichtungen werden zur Optimierung von Designs, wie etwa von Schiffen oder Flugzeugen, verwendet. [19] Auch in der medizinischen Forschung können sie genutzt werden zum Beispiel zur Entwicklung von Rehabilitationsmaßnahmen. Diese Systeme sind oft in der Lage, sowohl laminare als auch turbulente Strömungen darzustellen, abhängig von den jeweiligen Anforderungen der Tests. [14]

In den letzten Jahren hat sich die Nutzung von Strömungssystemen auch in sportlichen Bereichen weiterentwickelt. Hochmoderne Anlagen erlauben es Sportlern, ihre Technik in kontrollierten Strömungen zu verfeinern. Beispiele hierfür sind Strömungstunnel für Ruderer oder spezielle Becken für Freiwasserschwimmer, die eine realistische Umgebung simulieren. Der Einsatz solcher Technologien zeigt das breite Spektrum der Anwendungen für Strömungserzeugung, das von der Freizeitnutzung bis zur wissenschaftlichen Forschung reicht. [8]

### 3 Auslegung und Simulation

Die Umsetzung der realen Anlage am Wellenkanal erfordert zu Beginn einer genauen Planung und Auslegung. Dazu wird das grundlegende Konzept, welches in Abbildung 1.2 dargestellt ist, zugrundegelegt. Dies sieht vor, dass an einem Ende des Wellenkanals Wasser entnommen, durch eine Pumpe geführt und auf der anderen Seite des Wellenkanals diesem wieder zugeführt wird. Zur genauen Planung und Auslegung der Komponenten wird eine Anforderungsliste nach [7] erstellt, siehe Tabelle 3.1, die durch die folgende Auslegung, Konstruktion und den Bau erfüllt werden soll. Die Strömungsgeschwindigkeit wird dabei so skaliert, dass mittels der Reynoldsähnlichkeit ähnliches Strömungsverhalten in den Testobjekten zu erwarten ist.

Tabelle 3.1: Anforderungsliste

| Nummer | Vorgabe/Ziel/Wunsch | Anforderung                                                                                                |
|--------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1      | Vorgabe             | keine bauliche Veränderung am WK                                                                           |
| 2      | Vorgabe             | feste Verbindung mit dem WK                                                                                |
| 3      | Ziel                | möglichst einfache Bedienbarkeit                                                                           |
| 4      | Ziel                | Einsatz möglichst vieler Zukaupteile                                                                       |
| 5      | Ziel                | Korrosionsbeständigkeit                                                                                    |
| 6      | Ziel                | Montage/Demontage durch eine Person ausführbar                                                             |
| 7      | Ziel                | Starten ohne Entlüften                                                                                     |
| 8      | Ziel                | Strömungsgeschwindigkeit der Strömung $\approx 0,1 \frac{m}{s}$ ( $\approx 1 \frac{m}{s}$ im realen Fluss) |
| 9      | Ziel                | höchste Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche                                                         |
| 10     | Wunsch              | einfache Variabilität der Zu- und Abflüsse                                                                 |

Daraus ergeben sich zwei grundlegende Bereiche, die an der Strömung teilhaben. Auf der einen Seite das Rohrleitungssystem, welches durch seinen Wassertransport mit der beinhalteten Pumpe ein strömendes Verhalten erst auslöst, und auf der anderen Seite die Strömung, die sich innerhalb des Wellenkanals einstellt und das Ziel der Anlage darstellt. Für die Planung und Auslegung muss als erstes der zu fördernde



Massen- bzw. Volumenstrom bestimmt werden. Auf Basis der gewählten Pumpe kann dann das Leitungssystem ausgelegt werden und so die Wahl der Pumpe verifiziert werden. Anschließend können Ein- und Ausströmpositionen innerhalb des Wellenkanals mithilfe einer CFD-Analyse bestimmt werden. Dazu wird nur die Strömung innerhalb des Wellenkanals betrachtet. Das Rohrleitungssystem ist für die Simulation der inneren Strömung nicht notwendig.

Die Strömungsgeschwindigkeit für den Wellenkanal wird mittels der Reynoldsähnlichkeit so skaliert, dass eine etwa 5 Meter lange Anlage, die mit etwa einem Meter pro Sekunde durchströmt wird, durch eine etwa 0,5 Meter lange Modellanlage nachgebildet werden kann. Dazu sollen die Reynoldszahlen der Realität  $Re_{Real}$  und die des Modells  $Re_{Modell}$  übereinstimmen.

$$Re_{Real} = Re_{Modell} \quad (3.1)$$

Da sowohl das Modell als auch der reale Fluss Wasser mit der gleichen kinematischen Viskosität haben, ergibt sich durch Einsetzen in Gleichung 2.1 folgender Zusammenhang.

$$\frac{v_{Real} \cdot l_{Real}}{\nu} = \frac{v_{Modell} \cdot l_{Modell}}{\nu} \quad (3.2)$$

Daraus ergibt sich, dass die Verhältnisse zwischen den Größen der charakteristischen Länge und der Fließgeschwindigkeit das gleiche Verhältnis bilden. Dieses Verhältnis entspricht dem maßstäblichen Verhältnis von etwa 1:10.

$$\frac{l_{Modell}}{l_{Real}} = \frac{v_{Modell}}{v_{Real}} \equiv \frac{1}{10} \implies v_{Modell} = \frac{1 \frac{m}{s}}{10} = 0,1 \frac{m}{s} \quad (3.3)$$

Durch die Auflösung nach der Strömungsgeschwindigkeit des Modells  $v_{Modell}$  ergeben sich für das Modell etwa 0,1 Meter pro Sekunde.

Um den 7. Punkt der Anforderungsliste (Tabelle 3.1) zu erfüllen wird die zum Wasser relative Position der Pumpe so gewählt, dass die Pumpe unterhalb der Wasseroberfläche angeordnet wird, sodass die Anlage, wenn sie einmal befüllt und in Betrieb genommen ist, dauerhaft mit Wasser gefüllt ist und somit ein entlüftungsfreies Starten der Anlage möglich wird. Das entsprechende Konzept dazu ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Die Abbildung ist dabei nicht maßstäblich und dient für erste Betrachtungen. Die enthaltenen Bemaßungen sind nur ungefähre Abschätzungen der Längenverhältnisse zur überschlägigen Berechnung.

Für die Auswahl der Pumpe wird der benötigte Volumenstrom so abgeschätzt, dass etwa ein Fünftel der Querschnittsfläche mit einer Geschwindigkeit von  $0,1 \frac{m}{s}$  durchströmt wird. Der Gesamtquerschnitt ergibt sich aus der Breite von etwa 0,97 Metern und dem Wasserstand von etwa 0,95 Metern.

$$A_{Stroemung} = 0,95 \text{ m} \cdot 0,97 \text{ m} \cdot \frac{1}{5} = 0,18 \text{ m}^2 \quad (3.4)$$

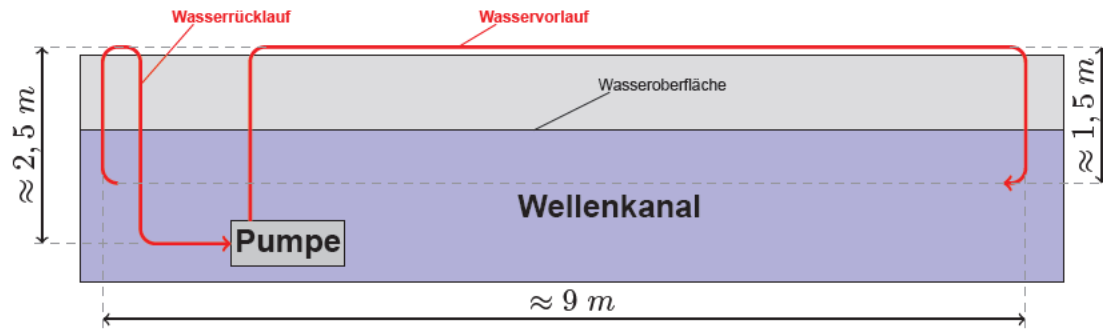


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Seitenansicht der geplanten Rohrleitungsführung [eigene Darstellung]

Daraus kann das Sollvolumen errechnet werden. Dies wird in die Einheit  $\frac{l}{min}$  umgerechnet, da die meisten Pumpen in den entsprechenden Datenblättern so angegeben werden.

$$\dot{V}_{soll} = 0,18 \, m^2 \cdot 0,1 \, \frac{m}{s} = 0,018 \, \frac{m^3}{s} = 1080 \, \frac{l}{min} \quad (3.5)$$

Um den geforderten Volumenstrom zu erreichen eignet sich am besten eine Kreiselpumpe von dem Anbieter SINNTEC [11]. Diese arbeitet mit dem Prinzip der Fliehkraft. Eintretendes Wasser trifft auf ein schnell rotierendes Laufrad, welches das Wasser stark beschleunigt und durch die Fliehkraft nach außen gedrückt (siehe Abbildung 3.2). So entsteht eine starke Steigerung des hydrodynamischen Drucks. Beim Auftreffen auf die Wassersäule in der Druckleitung wandelt sich dieser hydrodynamische Druck in hydrostatischen Druck, der dann an der Pumpe anliegt [15].

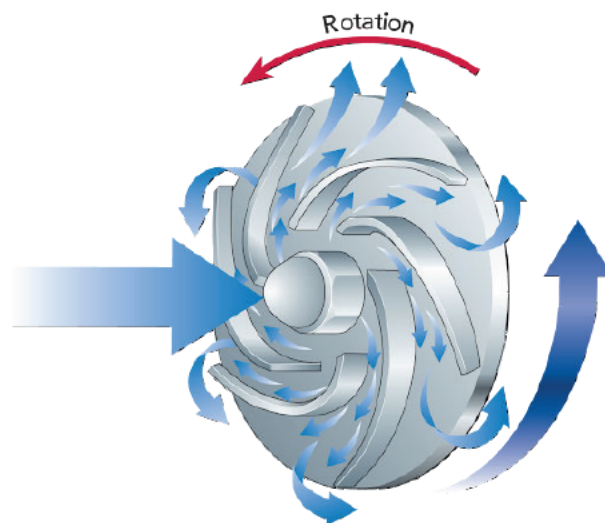


Abbildung 3.2: Funktionsprinzip einer Kreiselpumpe [15]

### 3.1 Überschlägige Pumpenleistung im Rohrsystem

Tabelle 3.2: Datenblatt der ausgewählten Pumpe aus dem Hause SINNTEC [11]

|                                          |                                                                          |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Typ                                      | Kreiselpumpe                                                             |
| Ausführung                               | Einphasig                                                                |
| Flüssigkeiten                            | Sauberes Wasser                                                          |
| Einsatzbereich                           | Industriell, Landwirtschaft                                              |
| Anwendungen                              | Wasserversorgungssysteme, Kühlsysteme, Bewässerung, Flüssigkeitstransfer |
| Pumpengehäuse                            | Gusseisen                                                                |
| Laufmaterial                             | Messing                                                                  |
| Stromspannung [V]                        | 230                                                                      |
| Stromaufnahme [A]                        | 10,8                                                                     |
| Stromleistung [kW]                       | 1,5                                                                      |
| Netzfrequenz [Hz]                        | 50                                                                       |
| Max. Fördermenge [ $\frac{l}{min}$ ]     | 200 bis 1.100                                                            |
| Max. manometrische Saughöhe [m]          | 7                                                                        |
| Max. Förderhöhe [m]                      | 5 bis 14,5                                                               |
| Max. Betriebsdruck [bar]                 | 10                                                                       |
| Max. Flüssigkeitstemperatur [°C]         | -10 bis +90                                                              |
| Max. Umgebungstemperatur [°C]            | +40                                                                      |
| Nennendurchmesser Stutzen 1 und 2 [Zoll] | 3                                                                        |
| Dauerbetrieb                             | Klasse S1                                                                |
| Thermischer Überlastschutz               | ja                                                                       |

Mit den Daten der ausgewählten Pumpe kann nun überschlägig berechnet werden, ob die Leistung ausreicht, um die Strömung so zu erzeugen, wie in der Anforderungsliste, siehe Tabelle 3.1, vorgegeben. Das wird entsprechend des in Kapitel 2.1 eingeführten Vorgehens durchgeführt. Der Volumenstrom wird für die Rechnung mit seinem maximal möglichem Wert von  $1.100 \frac{l}{min}$  bzw.  $0,01833 \frac{m^3}{s}$  angenommen, sodass der maximal auftretende Druckverlust und damit der minimal zu erreichende Volumenstrom bestimmt werden kann. Für die Leitungen wird ein Innendurchmesser von drei Zoll gewählt, was  $76,2 \text{ mm}$  entspricht. Dieser Durchmesser wird gewählt, da die Nennendurchmesser der Pumpenstutzen ebenfalls diesem Maß entsprechen (siehe Tabelle 3.2). So kann jetzt die Reynoldszahl  $Re$  für den gewählten Strömungszustand in den Leitungen mit Gleichung 2.1 berechnet werden. Die mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m$  ergibt sich dabei aus dem Volumenstrom.

$$v_m = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} \quad (3.6)$$

$$Re = \frac{v_m \cdot d}{\nu} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot d \cdot \nu} = \frac{4 \cdot 0,01833 \frac{m^3}{s}}{\pi \cdot 0,0762 m \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 306.279 \approx 3 \cdot 10^5 \quad (3.7)$$

Mithilfe der Reynoldszahl kann nun im Moody-Diagramm (Abbildung 2.1) der Strömungszustand bestimmt werden. Dabei ist deutlich erkennbar, dass diese Strömung im turbulenten Bereich liegt. Bei  $Re \approx 3 \cdot 10^5$  kann dann eine der Kurven verwendet werden, die näher an der Grenzkurve „hydraulisch rauh“ liegt. Es ergibt sich also durch Ablesen im Diagramm für den Rohrreibungsbeiwert  $\lambda \approx 0,025$ . Mithilfe der jetzt bekannten Größen kann nach Gleichung 2.3 und 3.6 der Druckverlust über die gerade verlaufenden Bereiche berechnet werden.

$$\begin{aligned} \Delta p_{v_{gerade}} &= \frac{16 \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \dot{V}^2 \cdot l_{gerade}}{2 \cdot \pi^2 \cdot d^5} \\ &= \frac{16 \cdot 0,025 \cdot 1.000 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(0,01833 \frac{m^3}{s}\right)^2 \cdot 17 m}{2 \cdot \pi^2 \cdot (0,0762 m)^5} = 45.054 Pa \approx 0,45 bar \quad (3.8) \end{aligned}$$

Die Länge der geraden Abschnitte wird dabei mithilfe von Abbildung 3.1 abgeschätzt.

$$l_{gerade} \approx 1,5 m + 2,5 m + 2,5 m + 1,5 m + 9 m = 17 m \quad (3.9)$$

Es werden in der Gleichung 3.9 erst von links nach rechts alle vertikalen Abschnitte addiert und als letztes die horizontale Länge.

Neben dem Druckverlust über die geraden Leitungsabschnitte müssen die Rohrbögen ebenfalls betrachtet werden. Das Verhältnis aus Durchmesser und Krümmung ergibt sich für die Bögen etwa so, dass die folgende Gleichung 3.10 gilt. Daraus kann mithilfe der Abbildung 3.3 direkt der Druckverlustbeiwert  $\zeta$  abgelesen werden.

$$r = 2 \cdot d \implies \zeta = 0,15 \quad (3.10)$$

Mit dem so bestimmten Wert kann die Gleichung 2.7 angewandt werden. Die Fließgeschwindigkeit wird wieder entsprechend Gleichung 3.6 bestimmt und direkt eingesetzt.

$$\begin{aligned} \Delta p_{v_{\zeta}} &= \frac{16 \cdot \zeta \cdot \rho \cdot \dot{V}^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot d^4} \\ &= \frac{8 \cdot 0,15 \cdot 1.000 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(0,01833 \frac{m^3}{s}\right)^2}{\pi^2 \cdot (0,0762 m)^4} = 1.212 Pa \approx 0,012 bar \quad (3.11) \end{aligned}$$

Der gesamte Druckverlust über die Rohrleitung ergibt sich damit aus der Summe aller auftretenden Teildruckverluste. Der Teil des Druckverlustes aufgrund von Höhenänderung kann hier vernachlässigt werden, da das Leitungssystem auf annähernd der gleichen Höhe beginnt und endet.

$$\Delta p_{v_{ges}} = \Delta p_{v_{gerade}} + \Delta p_{v_{\zeta}} + \Delta p_{v_h} = 0,45 bar + 0,012 bar + 0 bar = 0,462 bar \quad (3.12)$$

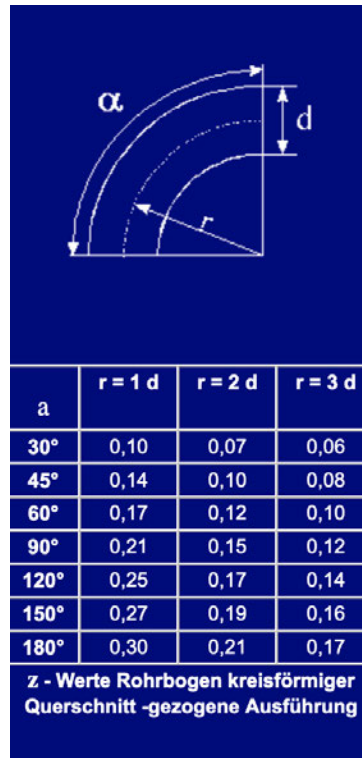


Abbildung 3.3: Tabellarische  $\zeta$  - Werte [5]

Aus dem Druckverlust kann jetzt auf die benötigte Pumpleistung durch Gleichung 2.8 geschlossen werden.

$$P_P = \Delta p_{ges} \cdot \dot{V} = 0,462 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 0,01833 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 846,85 \text{ W} \quad (3.13)$$

Mit dem Wirkungsgrad der Pumpe ergibt sich dann schlussendlich nach Gleichung 2.9 die benötigte elektrische Leistung. Der Pumpenwirkungsgrad wird dabei mit etwa 75 % angenommen.

$$P_{El} = \frac{P_P}{\eta_{Pumpe}} = \frac{846,85 \text{ W}}{0,75} = 1.129,13 \text{ W} \quad (3.14)$$

So wird deutlich, dass die ausgewählte Pumpe mit den angegebenen 1,5 kW über ausreichend Leistung verfügt, um die geforderte Strömung zu erzeugen.

## 3.2 Kraft im Rohrbogen und Haltemoment

Für den Entwurf der Haltekonstruktion für den Zu- und Ablauf wird zur Auslegung die aus dem Rohrbogen resultierende Kraft benötigt, um das Haltemoment zu bestimmen, dem

die Konstruktion entgegenwirken muss. Dazu wird davon ausgegangen, dass entsprechend der Leistungsdaten der Pumpe (siehe Tabelle 3.2)  $1.100 \frac{l}{min}$  bzw.  $0,01833 \frac{m^3}{s}$  durch den jeweiligen Bogen strömen. Die aus dem Impuls des Wassers resultierende Kraft  $F_{Impuls}$  kann mit Gleichung 2.10 und Gleichung 3.6 bestimmt werden.

$$\begin{aligned} F_{Impuls} &= \rho \cdot v^2 \cdot A = \rho \cdot \frac{\dot{V}}{A^2} \cdot A = \frac{4 \cdot \rho \cdot \dot{V}^2}{\pi \cdot d^2} \\ &= \frac{4 \cdot 1.000 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(0,01833 \frac{m^3}{s}\right)^2}{\pi \cdot (0,0762 m)^2} = 73,68 N \quad (3.15) \end{aligned}$$

Die Überdruckkraft kann aus dem hydrostatischen Druck und der Fläche berechnet werden (siehe Gleichung 2.11). Die Tiefe wird dabei mit etwa  $0,3 m$  unter der Wasseroberfläche angenommen.

$$\begin{aligned} F_{\dot{U}} &= p_{\dot{U}} \cdot A = \rho \cdot g \cdot h \cdot \pi \cdot r^2 \\ &= 1.000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,3 m \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,0762 m}{2}\right)^2 = 13,42 N \quad (3.16) \end{aligned}$$

Nach den Gleichungen 2.12 und 2.14 können die Wandkraftkomponenten in x-Richtung und y-Richtung als Summe der Impulskraft und Überdruckkraft gebildet werden. Diese sind nach ihrem Betrag gleich groß, da ein symmetrischer  $90^\circ$  Krümmer betrachtet wird. Die Wirkrichtungen sind in Abbildung 3.4 entsprechend ihrer Wirkrichtungen eingezeichnet.

$$F_{W_x} = F_{W_y} = F_{Impuls} + F_{\dot{U}} = 87,10 N \quad (3.17)$$

Wird nun ein Momentengleichgewicht um die Einspannung der Halterung aufgestellt, kann folgender Zusammenhang hergestellt werden.

$$\sum M \stackrel{!}{=} 0 = M_H + F_{W_x} \cdot l_y + F_{W_y} \cdot l_x \implies M_H = -F_{W_x} \cdot l_y - F_{W_y} \cdot l_x \quad (3.18)$$

Um das Haltemoment  $M_H$  genau zu bestimmen, müssen die Längen  $l_x$  und  $l_y$  bekannt sein bzw. sinnvoll abgeschätzt werden. Für die Auslegung werden diese so abgeschätzt, dass eher ein leicht größerer Wert angenommen wird, sodass das Haltemoment eher größer berechnet wird als es in der Realität sein wird. So soll sichergestellt werden, dass die Konstruktion auf jeden Fall das Moment aufnehmen kann. Die Längen werden mit  $l_x \approx 0,2 m$  und  $l_y \approx 1,5 m$  angenommen. Mit Gleichung 3.18 ergibt sich folgender Zahlenwert für das Haltemoment  $M_H$ .

$$M_H = -87,1 N \cdot 1,5 m - 87,1 N \cdot 0,2 m = -148,07 Nm \quad (3.19)$$

Das negative Vorzeichen zeigt dabei an, dass das Moment entgegen der eingezeichneten Wirkrichtung in die mathematisch negative Richtung wirkt. Dieses Moment muss später durch die Konstruktion gehalten werden.

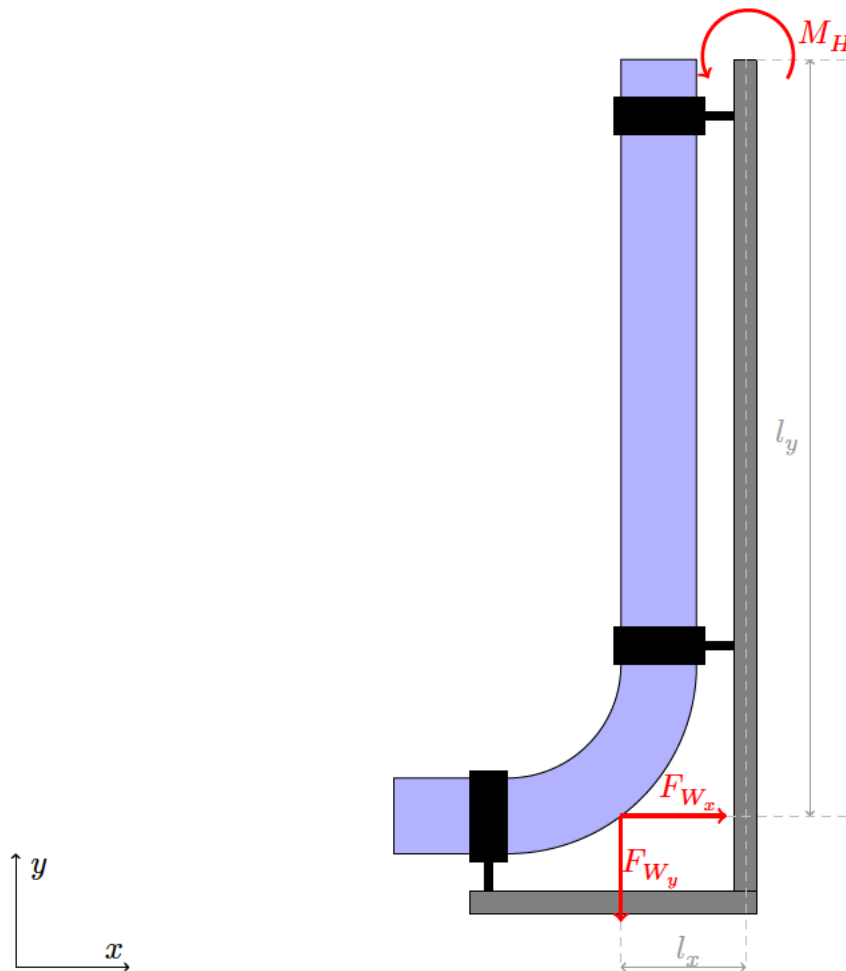


Abbildung 3.4: Moment auf die Haltekonstruktion durch Wandkraft im Rohrkrümmer  
[eigene Darstellung]

### 3.3 CFD - Analyse zur Bestimmung der idealen Ein- und Ausströmungspositionen

Für das Design und die Auslegung der Komponenten zur Strömungserzeugung wird mittels computergestützter numerischer Strömungsberechnung (CFD) das Strömungsverhalten innerhalb des Wellenkanals unter dem Einsatz verschiedener Kombinationen der Anströmung simuliert. Dabei kommt als Berechnungssoftware das Programm Fluent von der Firma Ansys zum Einsatz. Dieses wird innerhalb der Ansys Workbench verwendet. Diese bietet neben des eigentlichen Solvers, also dem Numerischen Lösungsprogramm, auch einige weitere hilfreiche Programme mit an, sodass ein vollständiger Arbeitsablauf zur numerischen Untersuchung einer Strömung dargestellt werden kann. Dieser Ablauf ist schematisch in Abbildung 3.5 dargestellt.

Jeder CFD-Analyse liegt eine Geometrie zugrunde, die die ersten Rahmenbedingungen

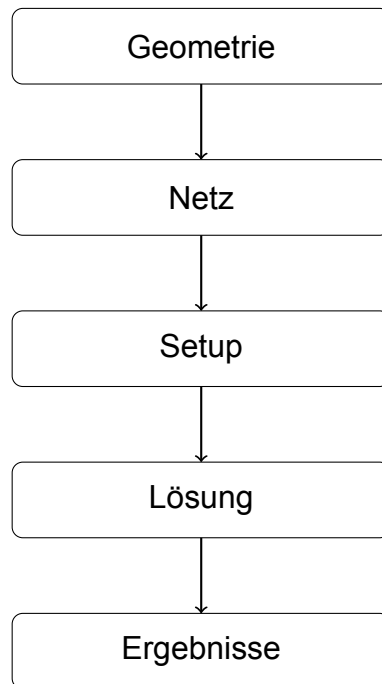


Abbildung 3.5: Ablauf einer CFD-Analyse [eigene Darstellung]

für die spätere Berechnung darstellt. Hier können unterschiedlichste Quellen genutzt werden. Allen voran sind die beiden Geometrieeditoren bzw. CAD-Systeme zu nennen, die bereits in Ansys Workbench enthalten sind: Space Claim und der Design Modeler. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die meisten Modelle mittels Design Modeler erstellt und bearbeitet. Daneben besteht auch die Möglichkeit, Modelle aus anderen CAD-Systemen zu importieren. Dabei werden die meisten gängigen Dateiformate unterstützt. Zur Analyse einer Strömung ist dabei nicht der Festkörper die benötigte dreidimensionale Information sondern vielmehr das durch das Fluid ausgefüllte Volumen, in dem wiederum die Strömung berechnet werden soll. Hier bieten Space Claim und der Design Modeler auch Funktionen, in denen der Festkörper importiert werden kann und dann die Räume des Fluids extrahiert werden. Anschließend kann der Festkörper ausgeblendet werden und spielt für die weitere Berechnung keine Rolle mehr.

Im Rahmen dieser Arbeit wird hauptsächlich mit dem Design Modeler direkt der Bereich des Fluides modelliert. Dabei werden einige Vereinfachungen getroffen, sodass Bereiche, in denen das Verhalten der Strömung nicht von Interesse ist, vernachlässigt werden. Dadurch wird das Wasser innerhalb des Wellenkanals als Quader dargestellt, in den an den Stirnseiten das Wasser zu- bzw. abgeführt wird. Diese Zu- bzw. Abläufe werden durch eine neue Fläche auf der bestehenden Fläche modelliert, sodass im späteren Verfahren diesen Bereichen gesondert Eigenschaften zugewiesen werden können. 3.6. Weiterhin wird an der Symmetrieebene längs zum Wellenkanal das Modell abgeschnitten, da ein symmetrisches Strömungsverhalten zu erwarten ist. Dadurch



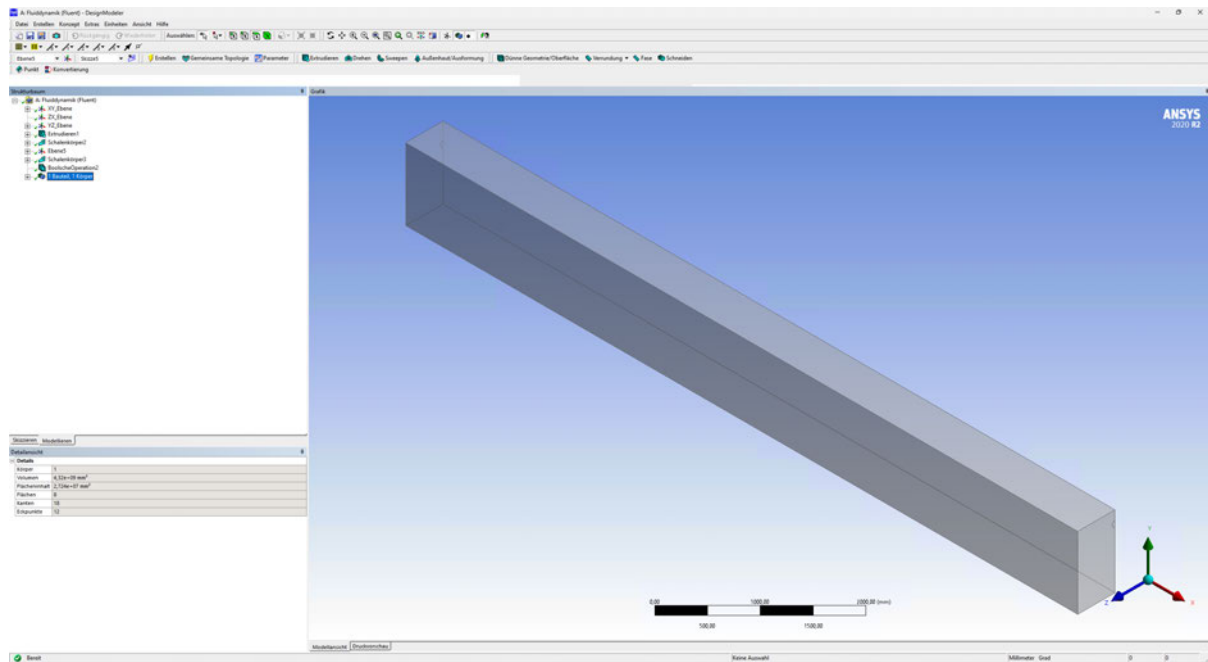


Abbildung 3.6: Symmetrisches Halbmodell im Design Modeler [eigene Aufnahme]

werden die Berechnungszeiten deutlich verringert. Wichtige Maße werden in diesem Schritt als Eingangsparameter gekennzeichnet, was eine spätere Variation deutlich vereinfacht. Dabei handelt es sich um die Länge der Strömungstrecke und die Tiefen der Zu- bzw. Abflüsse.

Um die Daten nach erfolgter Modellierung bzw. Bearbeitung des Modells an den in Abbildung 3.5 dargestellten nächsten Arbeitsschritt zu transferieren, bedarf es bei der Arbeit mit der Workbench von Ansys keiner komplizierten Wege. Das Projekt sollte einmal gespeichert werden, dann kann der Editor geschlossen werden und durch Doppelklicken auf den nächsten Schritt mit diesem fortgefahren werden.

Für die numerische Lösung wird ein Rechennetz benötigt, welches im jetzt folgenden Schritt erstellt wird. Dazu wird der Vernetzungseditor geöffnet, in dem das zuvor erstellte Modell bereits geladen wird. Hier können nun einige grundlegende Einstellungen bezüglich des Algorithmus eingestellt werden, wie etwa die angestrebte Netzgröße. Die Qualität des Netzes kann an dem maximalen Schiefewert innerhalb der Netzelemente bewertet werden. Ein Wert von 0 beschreibt dabei ein ideales Netzelement. Werden beispielsweise dreieckige Netzelemente verwendet ist ein Dreieck mit dem Schiefewert 0. In einigen Programmen wird dieser Wert auch mit dem Wort „Skewness“ bezeichnet. Ein Dreieck mit drei gleich langen Seiten und entsprechend auch gleich großen Winkeln stellt ein solches ideales Element dar. Je weiter von der idealen geometrischen Form der Netzelemente abgewichen wird, umso weiter erhöht sich dieser Wert. Eine ausreichende Qualität des Netzes stellt sich in den meisten Fällen ein, wenn kein Element innerhalb

des Rechennetzes einen Schiefewert von über 0,9 aufweist. Für Bereiche, in denen besonders genau gerechnet werden soll bzw. starke Strömungseffekte zu erwarten sind, kann hier durch das partielle Einfügen von lokal verfeinerter und gerichteter Vernetzung die Genauigkeit der Berechnung lokal vergrößert werden. Neben der Vernetzung wird in diesem Editor auch vorgesehen, wie sich die Flächen des Fluidkörpers grundlegend verhalten. Dazu werden diese entsprechend ihrer Funktion benannt. Gängige Benennungen können im folgenden Setup automatisch erkannt und angewendet werden. Es können auch mehrere Flächen zu einem Namen zusammengefasst werden, diese werden im späteren Verlauf dann auch immer gleichzeitig konfiguriert.

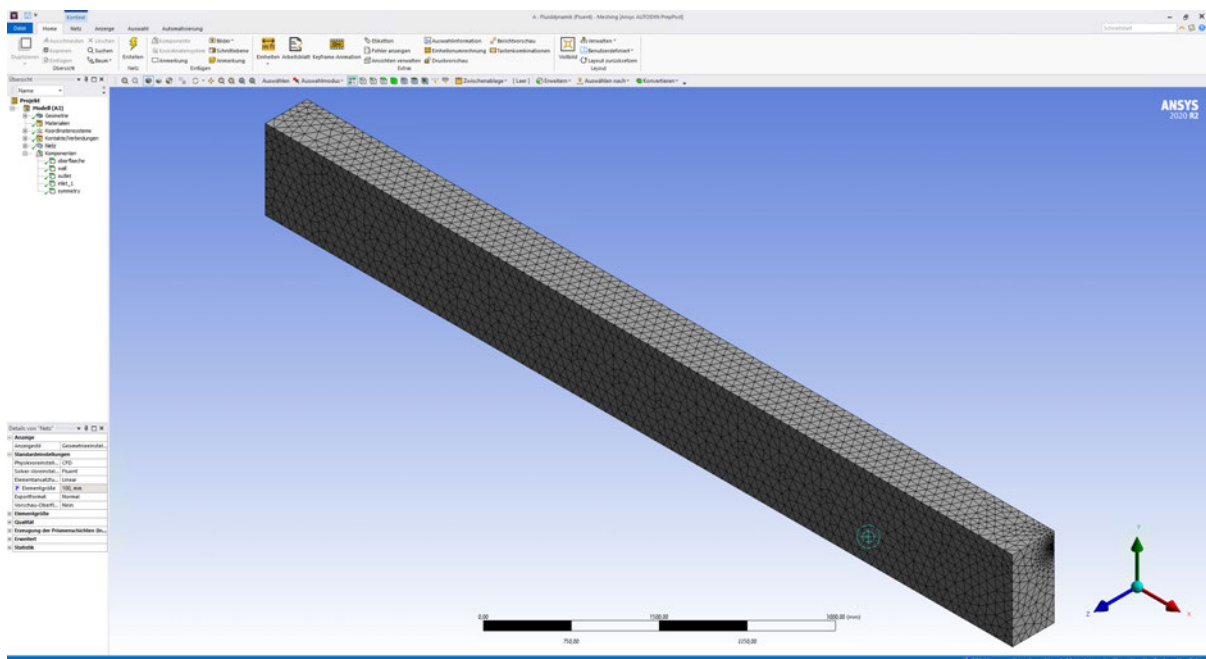


Abbildung 3.7: Vernetzung des symmetrischen Teilmodells und benannte Oberflächen  
[eigene Aufnahme]

Für diese Arbeit werden die Wandflächen zusammengefasst, da diese alle die gleichen Eigenschaften aufweisen sollen. Als Bezeichnung wird hier „wall“ verwendet, sodass die englischsprachige Software diese leicht zuordnen kann. Analog wird mit dem „inlet“, dem „outlet“ und der „surface“ verfahren. Diese sind auf der linken Seite der Abbildung 3.7 zu sehen. Bei der Vernetzung wird ein hexagonales Vernetzungsverfahren gewählt, da hier im Vergleich die besten Ergebnisse erzielt werden. Die vorgegebene Zielgröße der Gitterelemente wird als Eingabeparameter markiert, sodass dieser analog zu den Maßen aus dem vorangegangenen Schritt leicht verändert werden kann. Als Kontrollgröße wird der maximale Schiefewert mit ausgegeben, sodass die Qualität der Netzelemente immer im Blick behalten werden kann.

Auch aus diesem Editor werden die Daten über die Schnittstelle der Workbench automatisiert dem nächsten Schritt bereitgestellt. Es empfiehlt sich trotzdem vor dem

Beenden des Editors das Projekt zu speichern.

Die nun folgenden beiden Schritte des Setups und der Lösung sind eng miteinander verbunden und teilen sich auch ein Editorfenster. Hier liegt das eigentliche Herzstück, der Solver selbst. Beim Öffnen wird das vernetzte Flugmodell direkt geladen und es können alle zur Berechnung notwendigen Parameter eingestellt werden. Dabei bietet es sich an, die linke Seitenleiste von oben nach unten zu durchlaufen, da hier teilweise Einstellungen aufeinander aufbauen. Bei der Definition der Fluidparameter kann auf eine interne Datenbank mit den gängigsten technischen Fluiden zurückgegriffen werden. Die Werte können anschließend noch manuell bearbeitet werden. Neben dem genauen Verhalten der zuvor benannten Außenflächen und deren genauer Randbedingungen können auch Bereiche, in denen verschiedene Fluidbereiche aufeinandertreffen konfiguriert werden. Auch die anzuwendenden Lösungsverfahren wie Turbulenzmodelle und Berechnungsschemata werden in diesem Schritt ausgewählt. Anschließend können noch virtuelle Messwerte im Modell definiert werden, die während der Berechnung mit ausgegeben werden. Nachdem auch eventuelle Konvergenzkriterien festgelegt worden sind, kann das Modell initialisiert und anschließend nach der angegebenen Anzahl Iterationen berechnet werden. Die Konvergenzkriterien beenden die Berechnung vorzeitig, sollten die entsprechend angegebenen Größen durch die Residuen unterschritten werden. Bei der Berechnung werden die Residuen als Plot über die Anzahl der bereits berechneten Iterationen dargestellt. Diese geben Auskunft über den numerischen Fehler und sollten gegenüber dem Anfangszustand um drei bis vier Zehnerpotenzen fallen. Die Berechnung kann je nach Komplexität und vorgegebenen Iterationen einige Zeit in Anspruch nehmen.

In dieser Arbeit wird die Berechnung druckbasiert durchgeführt. Das bedeutet, dass in den partiellen Differentialgleichungen der Druck anstelle der Dichte als charakteristische Größe verwendet wird. Dies bietet sich bei flüssigen Fluiden an, da die Dichte dieser Fluide sich gar nicht oder sehr viel geringer als die von Gasen verändert. Die Formulierungen der Fließgeschwindigkeiten sollen als Absolutwerte erfolgen. Da ein stationärer Strömungszustand erreicht werden soll, kann die Berechnung auch als stationär durchgeführt werden. Dies spart viel Rechenzeit. Auch die wirkende Gravitation wird angegeben. Dabei ist wichtig zu beachten, in welche Raumesrichtung diese wirkt und ob das Vorzeichen der gewünschten Richtung entspricht. Für die durchgeführten Berechnungen wird ebenfalls die Energiegleichung vernachlässigt, da hier das Augenmerk auf der Charakteristik der Strömung liegt. Als Turbulenzmodell kommt hier das  $k - \varepsilon$  - Modell zum Einsatz, da der hauptsächlich zu untersuchende Strömungsanteil sich nicht in unmittelbarer Wandnähe befindet.

Um ein Gefühl für das Verhalten der Strömung zu erlangen, werden Messgrößen in der Simulation abgegriffen. Dabei handelt es sich um die maximal auftretende Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche sowie in der Querschnittsfläche 3 Meter vor

dem Ende des Wellenkanals. Außerdem wird die grundsätzliche Plausibilität überprüft, indem der Massenstrom, der als Eingangsgröße vorgegeben wird, ebenfalls gemessen wird. Dies wird sowohl am Zu- als auch am Ablauf gemacht. Hier sollten annähernd gleiche Größen festgestellt werden, da Wasser nicht kompressibel ist und dadurch immer die gleiche Masse Wasser innerhalb des Kontrollraumes sein muss.

Nachdem die Berechnung abgeschlossen ist, werden die Ergebnisse über den CFD Postprozessor über die Ergebnisspalte dargestellt, analysiert und exportiert. Hier können die Berechnungsergebnisse detailliert grafisch ausgewertet werden.

Für die vorliegende Analyse werden hier eine Darstellung der Kontrollfläche 3 Meter vor dem hinteren Ende des Kanals mittels eines Konturplots ausgewertet, um eine Darstellung der Fließgeschwindigkeiten über den Querschnitt der Strömung zu erhalten. In einer weiteren Darstellung wird die Symmetrieebene ebenfalls mittels einer Konturdarstellung dargestellt, sodass die Fließgeschwindigkeitsverteilung auch längs zum Wellenkanal erfolgen kann. In einer dritten Darstellung werden die Stromlinien ausgehend vom Zustrom dargestellt. So kann gezeigt werden, ob diese direkt Richtung Abfluss fließen oder sich davon abweichend verhalten. Anhand dieser Darstellungen und der aus dem Berechnungsprozess ausgegebenen Daten werden so die untersuchten Variationen bewertet und verglichen.

Es werden insgesamt vier grundlegend unterschiedliche Varianten betrachtet, die über einen, zwei, drei und vier Zuläufe verfügen. Die Anzahl der Abflüsse wird nicht variiert, da dieser so gut wie keinen Einfluss auf die Strömung hat. Innerhalb dieser vier Modelle werden die Höhen der Zuläufe so variiert, dass ein breiter Bereich abgedeckt wird. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden miteinander verglichen. Die dabei erlangten Erkenntnisse werden im Folgenden dargestellt.

Begonnen wird hier mit der Variante, bei der nur ein Zulauf zum Einsatz kommt. Dabei ist erkennbar, dass bei zu geringer Höhe des Zulaufes die Strömung früh nach unten absackt und dadurch im hinteren Bereich des Wellenkanals wenig direkte Strömung vorliegt.

Dies führt zu einer deutlichen Verringerung der Strömungsgeschwindigkeiten im Messbereich. (Siehe Abbildung 3.8 und 3.9) Auf dieser Basis kann festgestellt werden, dass die in Abbildung 3.15 und 3.16 dargestellte Variante ein Optimum zwischen der direkten Strömung und eines möglichst großen Bereiches von großen Strömungsgeschwindigkeiten an der Oberfläche darstellt.

Auf dieser Basis wird eine Version mit zwei Zuläufen betrachtet, die den gesamten Massenstrom ideal zwischen beiden Zuläufen aufteilt. Dabei ist ein grundsätzlich ähnliches Verhalten zu beobachten. Wird die Betrachtung allerdings aus der orthogonalen in eine isometrische Ansicht verändert, wird schnell deutlich, dass durch die erzeugte

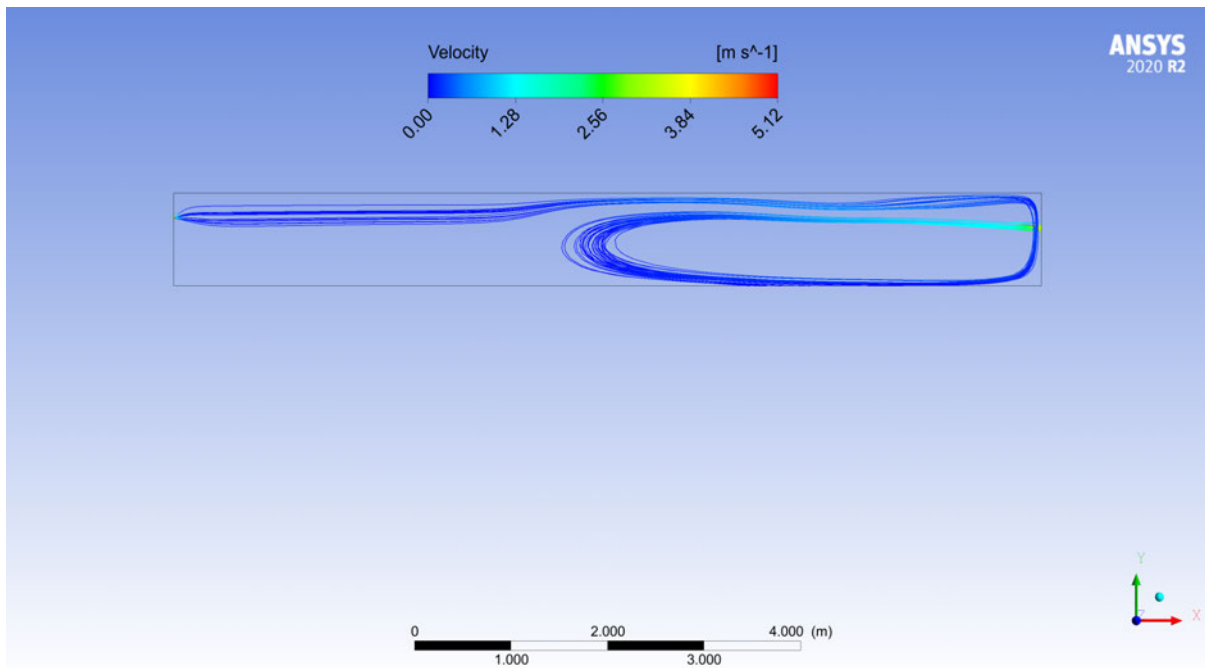


Abbildung 3.8: Stromlinien ohne direkte Durchstrahlenörmung des Wellenkanals  
[eigene Aufnahme]

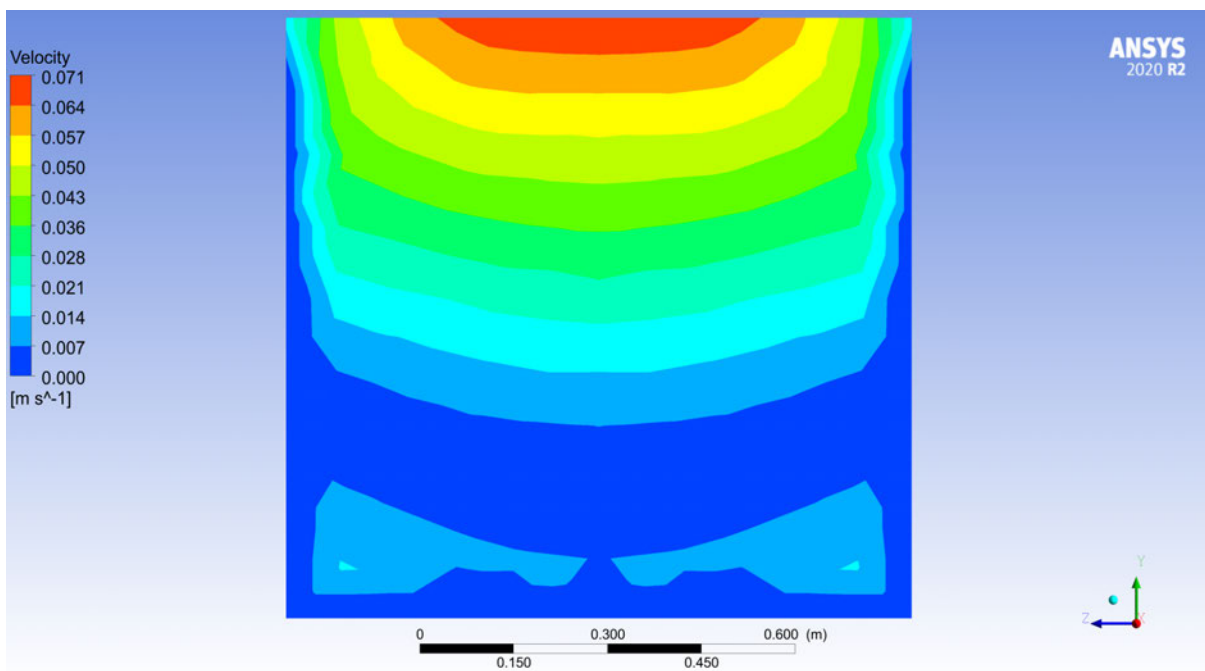


Abbildung 3.9: Strömungsgeschwindigkeiten ohne direkte Durchstrahlenörmung des  
Wellenkanals [eigene Aufnahme]

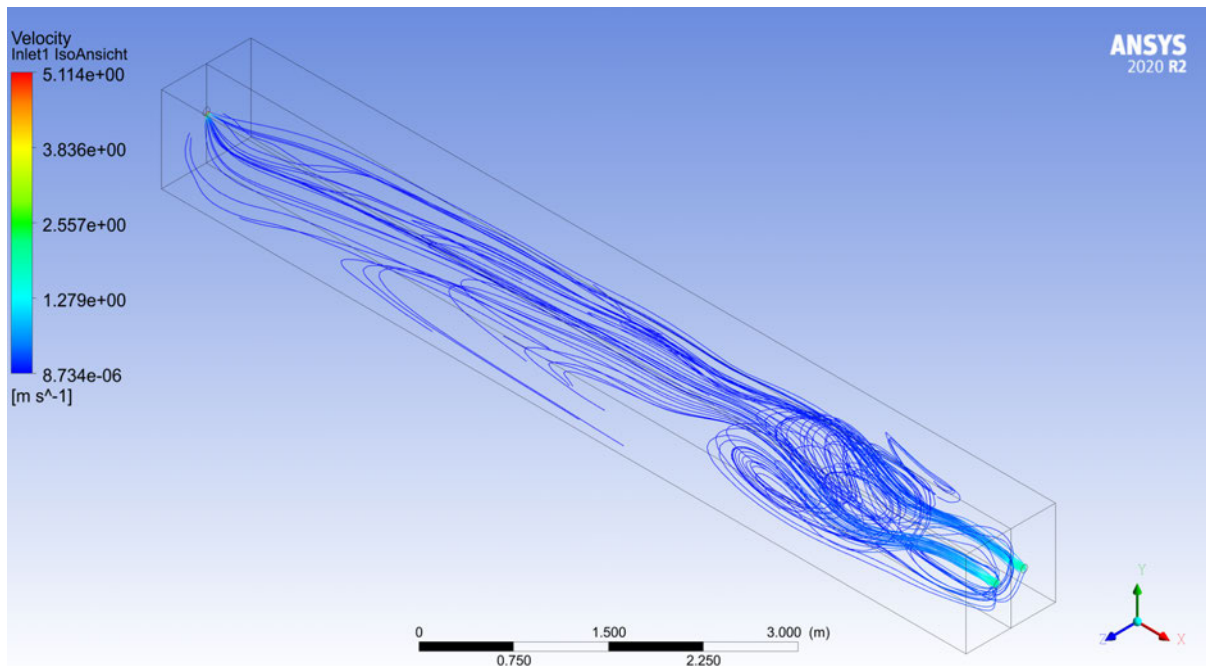


Abbildung 3.10: Stromlinien mit Turbulenzen bei 2 Zuläufen [eigene Aufnahme]

Rückströmung und deren Aufsteigen in der Nähe der Zuströmung deutlich stärkere Turbulenzen in diesem Bereich erzeugt werden als im Falle nur einer Zuströmung. (Siehe 3.10) Im weiteren Verlauf des Wellenkanals verringern sich diese Turbulenzen wieder deutlich und erzeugen einen breiteren Bereich gleicher Strömungsgeschwindigkeiten in der Auswertungsfläche quer zur Strömungsrichtung.

Bei geringer Variation der Einströmungshöhe tritt allerdings ein ungewolltes Verhalten der Strömung auf. Diese fällt dann weit vorn im Wellenkanal auf den Grund ab und wird erst durch die Abflussleitung Richtung Pumpe wieder nach oben gefördert. Dies ist wahrscheinlich eine Folge der abnehmenden Austrittsgeschwindigkeit aus der Leitung, da der Austrittsquerschnitt konstant bleibt, die Austrittsmasse allerdings auf zwei dieser Auslässe verteilt wird. (Siehe Abbildungen 3.11 und 3.12)

Werden ein dritter bzw. vierter Auslass unterhalb der oberen beiden Auslässe hinzugefügt, nimmt die Austrittsgeschwindigkeit weiter ab. Dies verringert nicht den Impuls der eintretenden Wasserströme, sondern trifft auch so auf die umlaufende Strömung, die sich durch mitgerissenes Wasser einstellt, sodass hier die Effekte keinen Mehrwert für die erzeugte Strömung liefern. Vielmehr werden starke Turbulenzen erzeugt, in denen die eingebrachte Energie dissipiert. (Siehe Abbildungen 3.13 und 3.14)

Die Variante mit vier Zuläufen wird exemplarisch einmal als genaues CAD-Modell geladen, sodass hier auch einmal die Rohrleitungen mit berechnet werden. Bei dieser Analyse stellen sich einige Probleme aufgrund der großen Unterschiede zwischen den

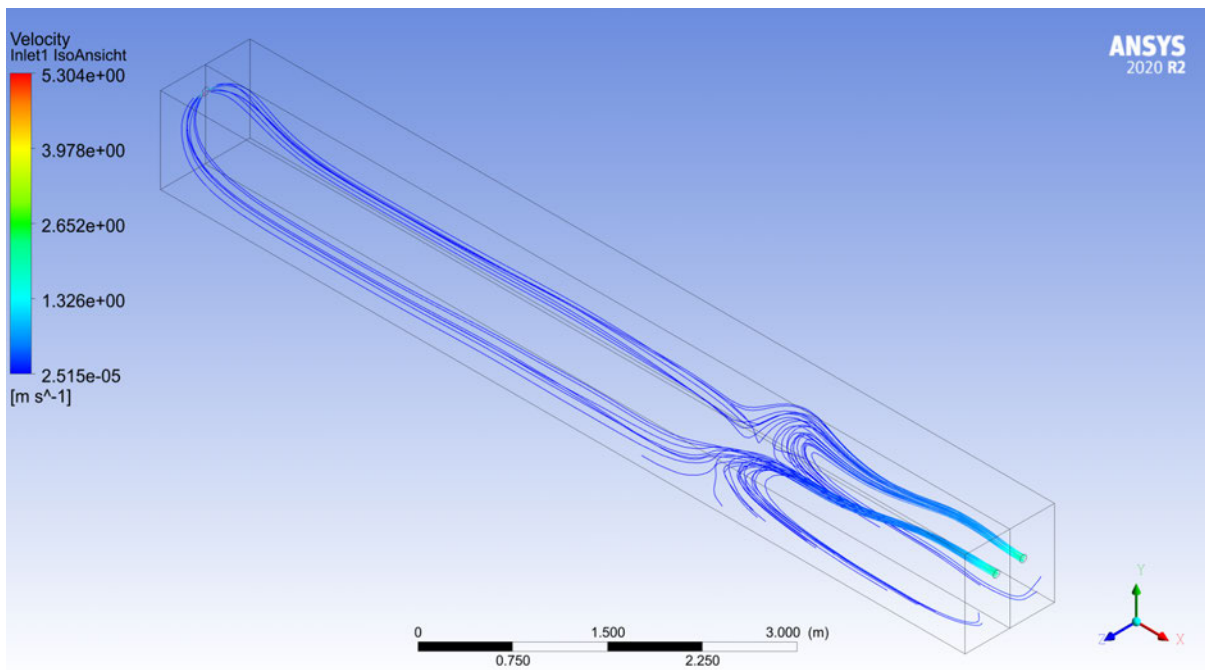


Abbildung 3.11: Abfallende Strömung bei nicht korrekten Maßen [eigene Aufnahme]

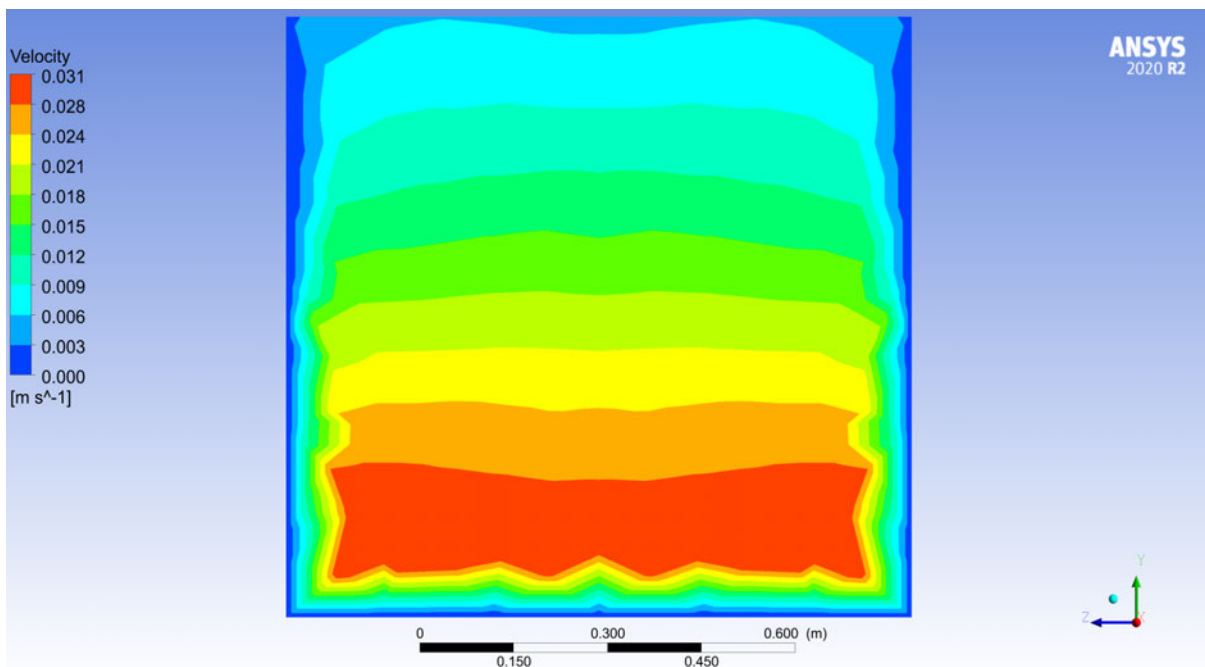


Abbildung 3.12: Durch abfallende Strömung ungewollte Strömungsverteilung [eigene Aufnahme]



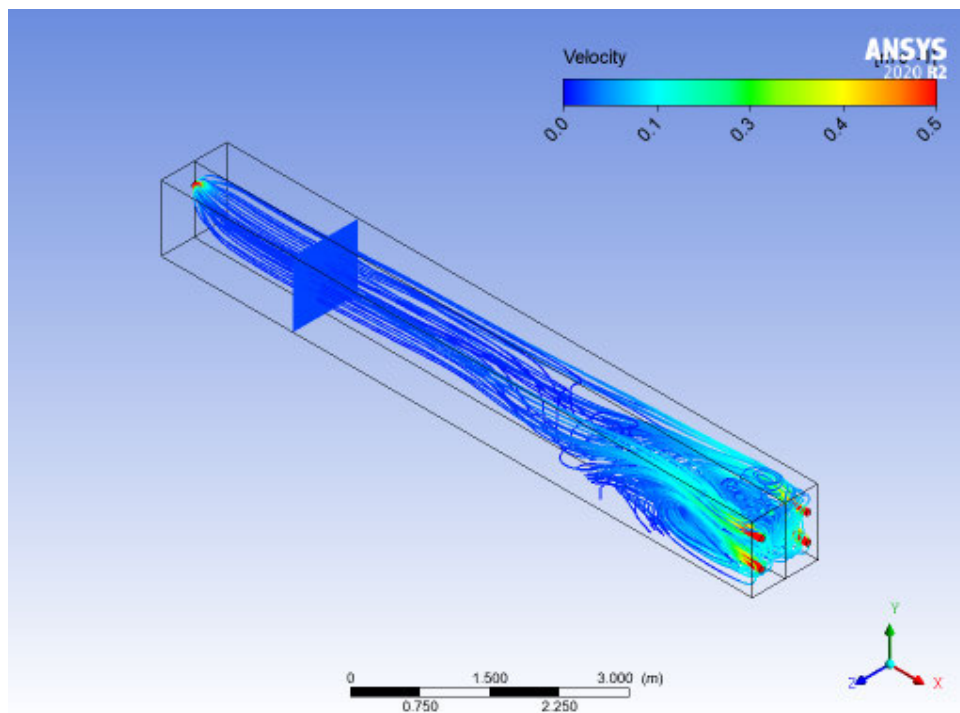


Abbildung 3.13: Turbulenzen bei vierfachem Einlass mit tiefen unteren Einlässen[eigene Aufnahme]

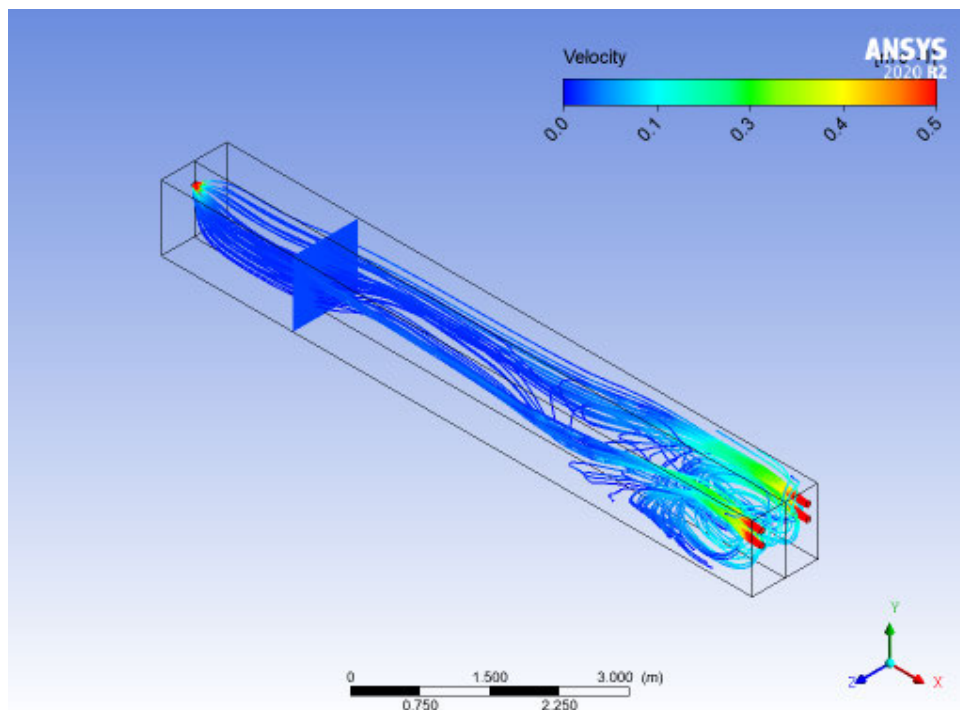


Abbildung 3.14: Turbulenzen bei vierfachem Einlass mit hohen unteren Einlässen [eigene Aufnahme]



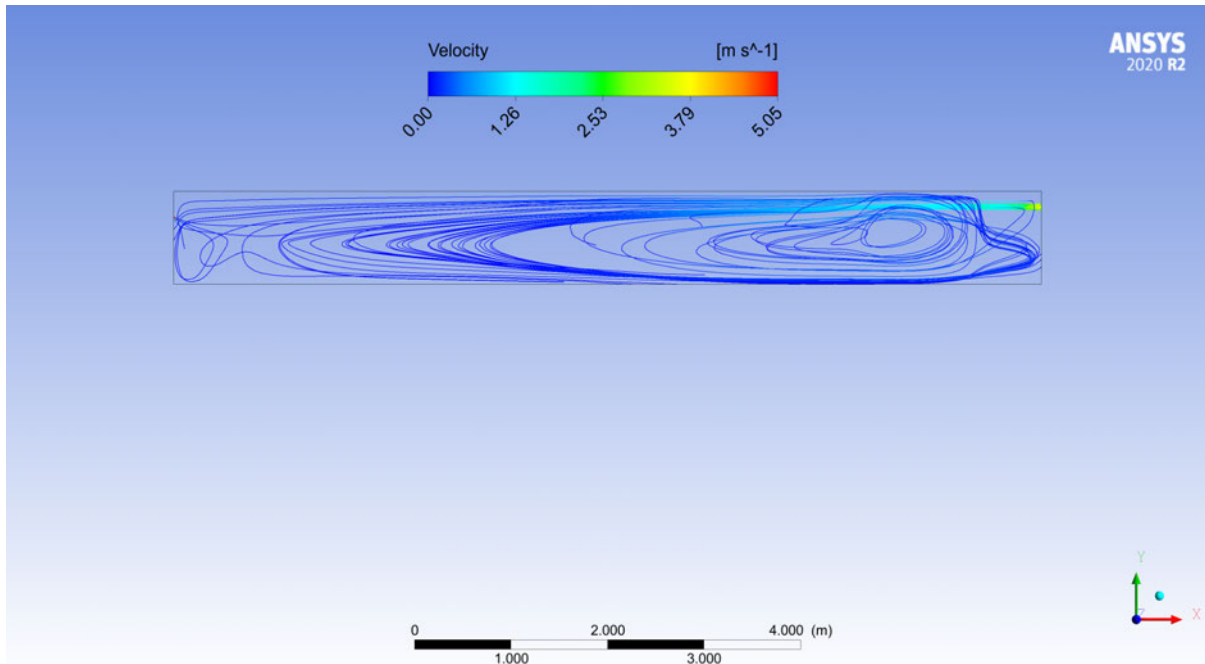


Abbildung 3.15: Stromlinien im Wellenkanal, Umsetzungskonzept [eigene Aufnahme]

Größenordnungen der verwendeten Maße dar. Auf der einen Seite sind die Netzelemente an kleinen Maßen wie Schraubenköpfen und ähnlichem sehr klein und fein aufgelöst, auf der anderen Seite wird versucht, die Elemente so klein wie nötig aber so groß wie möglich zu gestalten, sodass die Berechnungszeiten nicht zu lang werden. Hinzu kommt, dass die verwendete Bildungsversion von Fluent hier an die eingebaute Limitierung stößt.

An den Ergebnissen dieser Analyse wird schnell deutlich, dass entsprechend der bisherigen Annahme das Rohrsystem keinen maßüblichen Einfluss auf die erzeugte Strömung hat. Allerdings wird eine andere Problematik bei der Verwendung mehrerer Zuläufe deutlich. Bei Abzweigungen ist die Verteilung des Wassers von seinem vorherigen Impuls abhängig, sodass die abknickenden Leitungen mit weniger Massenstrom durchströmt werden als die in der Richtung der vorherigen Strömung liegenden Abzweigungen. Dadurch sind in diesem Fall die Massenströme aller vier Einlässe unterschiedlich.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wird für die Umsetzung am Wellenkanal die Variante mit einem Zulauf gewählt. Die verwendeten Maße entsprechen dabei der Berechnung, bei der die Höhe des Einlasses auf  $800 \text{ mm}$  über dem Grund angebracht ist und der Auslass auf  $700 \text{ mm}$  über dem Grund (siehe Abbildung ).

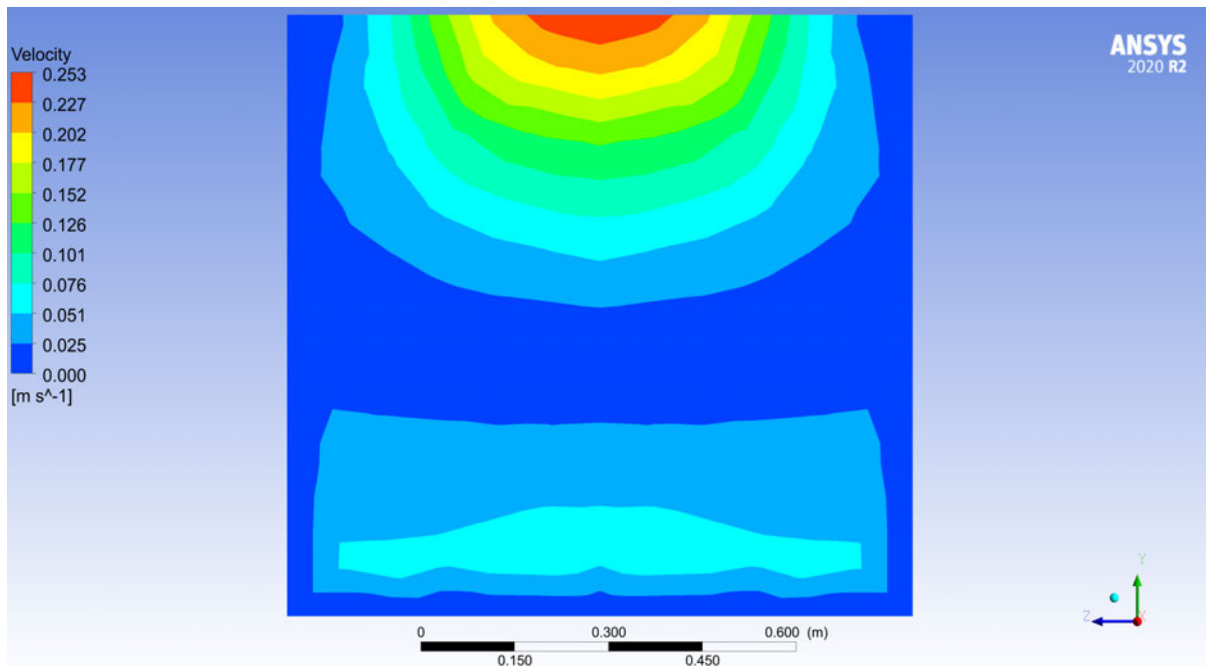


Abbildung 3.16: Strömungsverteilung in der Kontrollfläche des Resultats [eigene Aufnahme]

### 3.4 Konstruktive Umsetzung

Um die Leitungen zur Strömungserzeugung sicher und dauerhaft an den vorgesehenen Positionen zu halten, wird eine Haltevorrichtung konstruiert und gebaut. Diese soll korrosionsbeständig und ausreichend stabil sein. Weiterhin soll entsprechend der Anforderungsliste in Tabelle 3.1 die Montage und Demontage ohne Veränderungen am Wellenkanal erfolgen und durch eine Person ausführbar sein.

Um ein stabilen Punkt zum Anbringen der Haltestruktur, die in das Wasser ragt, zu erhalten wird initial eine Haltebrücke entworfen, die im Wesentlichen aus zwei Edelstahlprofilen besteht, die parallel zueinander horizontal über den Wellenkanal verlaufen. (Siehe Abbildung 3.17) Diese werden über kurze Verbinder und Durchschraubverbindungen zusammengehalten. An diesen Verbindungen werden weiterhin Winkel befestigt, die die Verbindung zum Wellenkanal herstellen. Diese werden entsprechend der technischen Zeichnung im Anhang aus einem Stahlblech gefertigt. Die Verbindung zum Wellenkanal wird von diesen Winkeln aus mittels Schraubklemmen realisiert, die eine feste Montage ermöglichen, aber auch einfach wieder demontiert werden können. Die Verbindung zwischen den Verbindungsprofilen und den Winkeln wird ebenfalls durch Durchschraubverbindungen realisiert. Die eigentliche Haltekonstruktion, an der die Schlauchschellen später befestigt werden, wird ebenfalls mittels Durchschraubverbindungen befestigt. Für die Umlenkung in die Horizontale wird ein 90° Winkel



Abbildung 3.17: Haltebrücken ohne Haltestruktur [eigene Aufnahme]

entsprechend Abbildung 3.18 hergestellt. Als Material wird hier ebenfalls das bereits verwendete Edelstahlprofil verwendet.

Der verwendete Schlauch ist ein mit Draht verstärkter Kunststoffschlauch mit 3 Zoll Innendurchmesser. Dieser wird durch handelsübliche Schlauch- bzw. Rohrschellen befestigt. Diese werden an der Haltekonstruktion mittels Gewindestiften und passender Muttern befestigt. Zur führung entlang des Wellenkanals kommen weiter Schlauchschellen zum Einsatz, die direkt mit Klemmverbindern an dem Wellenkanal befestigt sind. Auf der zuströmenden Seite werden in der Horizontalen zwei der Schellen voreinander mit geringem Abstand angebracht, sodass hier eine gerade Ausströmung realisiert werden kann. Über eine Variation der Längen der Gewindestifte kann hier zukünftig das Strömungsverhalten variiert werden. Auf der abfließenden Seite wird nur eine Schelle montiert, da hier die genaue Ausrichtung für die Strömung im Wellenkanal entsprechend der Erkenntnisse aus der CFD-Analyse nicht entscheidend ist.

Die Abstände der Schellen gerade im Bereich der Umlenkung sind so gewählt, dass der Mittelpunkt der Schlauches einen Kreisbogen beschreibt, der ungefähr dem doppelten Durchmesser des Schlauches entspricht, sodass die vorangegangene Berechnung ihre

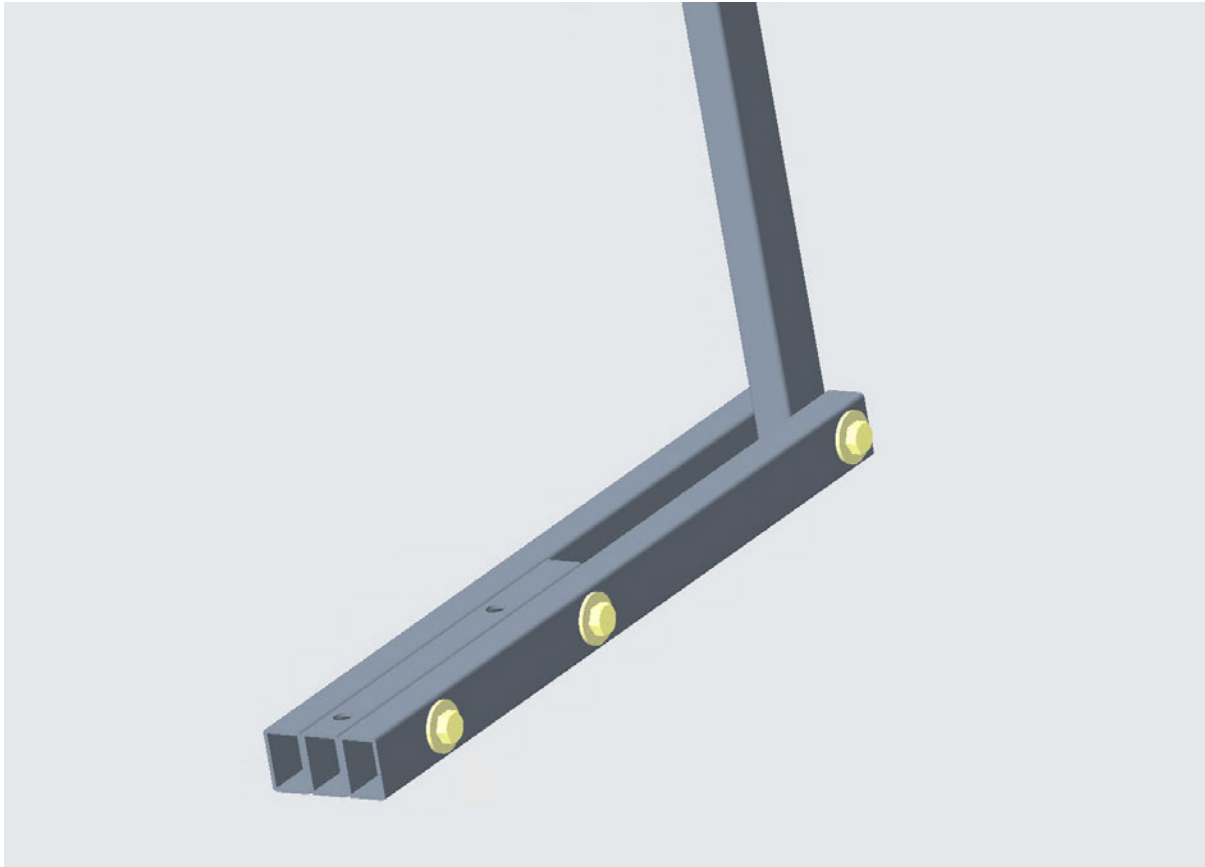


Abbildung 3.18: Winkel zur Umlenkung der Einstreuörmung [eigene Darstellung]

Gültigkeit behält (Siehe Abschnitt 3.1).

Die Längen der vertikalen Elemente, die von der Haltebrücke bis ins Wasser ragen, werden so gewählt, dass die Maße, die in der CFD-Analyse herausgearbeitet werden, erfüllt werden.

Zur Inbetriebnahme des Systems muss aufgrund der Bauart der Pumpe sichergestellt werden, dass diese nicht trocken läuft. Ist das System bereits bewässert, kann die Pumpe direkt eingeschaltet werden. Um das System bei leeren Leitungen in Betrieb zu nehmen, muss erst mithilfe einer anderen Pumpe oder Frischwasser über einen Schlauch so viel Wasser in das System eingebracht werden, dass der Großteil der darin befindlichen Luft verdrängt ist und die Pumpe Wasser fördern kann.



## 4 Validierung und Bewertung der Ergebnisse



Abbildung 4.1: Strömung im Wellenkanal  
[eigene Aufnahme]



Abbildung 4.2: Pumpe im Betrieb [eigene Aufnahme]

Für die Bewertung der Ergebnisse der Umsetzung wird anhand der Anforderungsliste in Tabelle 3.1 für jeden der aufgeführten Punkte das erreichte Resultat mit der dort fixierten Anforderung abgeglichen und diskutiert.

Zur Bewertung der ersten beiden Punkte „keine bauliche Veränderung am Wellenkanal“ und „feste Verbindung mit dem Wellenkanal“ kann als Ergebnis festgehalten werden, dass diese Punkte fast vollständig erfüllt sind. Durch den Einsatz von Klemmverbindern können alle Anbauten dauerhaft und stabil am Wellenkanal befestigt werden. Dabei wird allerdings entsprechend der Vorgabe keine bauliche Veränderung in Form von

Bohrungen oder Ähnlichem am Wellenkanal vorgenommen. Nur die Pumpe selbst ist nicht direkt mit dem Wellenkanal verbunden.

Die Zielvorgabe des dritten Punktes der Anforderungsliste „möglichst einfache Bedienbarkeit“ ist für den normalen Betrieb erfüllt. Die Pumpe kann bei befülltem System direkt ein- bzw. ausgeschaltet werden. Die Inbetriebnahme, also das Befüllen des Systems mit Wasser, stellt einen etwas größeren Arbeitsaufwand dar.

Der Punkt „Korrosionsbeständigkeit“ ist zwar mit dem eingesetzten Edelstahlprofil und entsprechenden Schrauben weitgehend erfüllt. Allerdings wurden nicht korrekte Unterlegscheiben eingesetzt. Diese bilden schon nach wenigen Stunden Wasserkontakt erste Korrosionserscheinungen.

Für die Montage und Demontage ist die Zielsetzung, dass diese durch eine Person durchführbar ist. Dies ist knapp noch eingehalten. Die Konstruktion in Verbindung mit dem eher steifen Kunststoffschlauch ist kaum durch eine einzelne Person in der entsprechenden Höhe, die zum Ein- und Ausbau in den Wellenkanal erforderlich ist, durchzuführen. Hier sollten die Arbeiten mindestens zu zweit ausgeführt werden.

Hingegen ist das Ziel „Starten ohne Entlüften“ voll erfüllt. Das Schlauch- und Pumpensystem ist so angeordnet, dass die Pumpe auch bei längeren Standzeiten nicht leer läuft. Dadurch ist jederzeit ein Startvorgang möglich zur kurzfristigen Nutzung der erzeugten Strömung.

Um die aus den Berechnungen und CFD-Analysen stammenden Daten für die Strömungsgeschwindigkeiten zu validieren, wird mithilfe einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme der Zufluss des Wassers aufgenommen, sodass anhand der Auswertung des Bildmaterials die eintretende Fließgeschwindigkeit validiert werden kann. Dabei ergeben sich Strömungsgeschwindigkeiten, die über den geforderten  $0,1 \frac{m}{s}$  liegen. Damit ist die Anforderung an die Strömungsgeschwindigkeit partiell übertroffen. Bei genauerer Betrachtung von beispielsweise Abbildung 3.16 ist erkennbar, dass im Bereich von etwa 10 bis 20 cm unter der Oberfläche die geforderte Geschwindigkeit erreicht wird. Für Wasserkraft nutzende Versuchstäger ist dies ein annehmbares Ergebnis.

Durch die korrekte Anordnung kann entsprechend der neunte Punkt „höchste Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche“ bestätigt werden. Wie in den CFD-Analysen sichtbar wird, hängt dies direkt mit der Position des Einlasses und indirekt von der Position des Auslasses ab. Dies spiegelt sich auch in der Strömung im Wellenkanal wieder. Diese ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Der Wunsch nach „einfacher Variabilität der Zu- und Abflüsse“ ist nur zum Teil erfüllt worden. Die Konstruktionen für Ein- und Auslass können längs des Wellenkanals an fast jede beliebige Position gesetzt werden. Diese sind nur limitiert durch dünne Verstrebungen des Wellenkanals, die im Abstand von etwa einem Meter liegen. Dabei

wird die Arbeitsbühne ebenfalls nicht durch die Konstruktion blockiert. Die Länge der vertikalen Halter ist allerdings nicht variabel gestaltet, sodass mit den vorliegenden Bauteilen lediglich die Längen der beiden Halter vertauscht werden könnten. Dazu müssen einige Schraubverbindungen gelöst werden.



Abbildung 4.3: Halterung und Ablauf des Wellenkanals Richtung Pumpe [eigene Aufnahme]

## 5 Ausblick

Zukünftig können zur Verbesserung und Erweiterung des Projektes weitere Maßnahmen umgesetzt werden. Kurzfristig könnten kleinere Mängel in der Konstruktion, wie etwa die durch Korrosion beschädigten Unterlegscheiben, ausgetauscht werden. Dies verbessert nicht nur die Langlebigkeit der Konstruktion, sondern trägt auch zur Verbesserung der Wasserqualität im Wellenkanal bei, indem potenziell schädliche Partikel entfernt werden. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Pumpe wichtig.

Bevor die Strömung selbst weiter bearbeitet und verändert wird, wäre es unter anderem auch für das RFESP-Projekt sinnvoll, die nun bestehende Möglichkeit für Untersuchungen in einer definierten Strömung für die Erprobung von schwimmenden Energiesystemplattformen, die zukünftig zur nachhaltigen Energieerzeugung in Flüssen eingesetzt werden könnten, zu nutzen. Die hier gewonnenen Erkenntnisse können dann in eine eventuelle spätere Anpassung der Anlage an die benötigten Gegebenheiten mit einfließen.

Weiterhin kann an der Strömung selbst eine Möglichkeit der Durchflussregelung integriert werden, sodass nicht nur eine statische Strömung zur Verfügung steht, sondern diese auch für unterschiedliche Untersuchungen im Wellenkanal angepasst werden kann. Diese würde die Flexibilität der Anlage deutlich steigern.

Zusätzlich ist es sinnvoll, die Geometrie der Einströmung weiter zu untersuchen. Insbesondere die Form und Querschnittsfläche der Einströmung könnten so optimiert werden, dass die erzeugte Strömung noch präziser gesteuert und modelliert werden kann. Eine genauere Modellierung der Strömung könnte für zukünftige Tests und Anpassungen im Wellenkanal wertvolle Daten liefern. Dies könnte nicht nur die Forschung im Bereich erneuerbarer Energien vorantreiben, sondern auch neue technische Anwendungen ermöglichen, die auf realen Gewässern eingesetzt werden könnten.

Durch diese Maßnahmen könnte das Projekt, sowohl im Hinblick auf technische Verbesserungen als auch auf neue Forschungs- und Testmöglichkeiten am Wellenkanal selbst, auf mehreren Ebenen weiterentwickelt werden.



# Abbildungsverzeichnis

|      |                                                                                                                   |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien 1990 und 2000 bis 2021 [3] . . . . .                               | 1  |
| 1.2  | Schematische Darstellung des Strömungskonzeptes [eigene Darstellung]                                              | 2  |
| 1.3  | Wellenerzeugung im Wellenkanal der HAW . . . . .                                                                  | 4  |
| 2.1  | Moody-Diagramm [10] . . . . .                                                                                     | 7  |
| 2.2  | Resultierende Kräfte auf einen Rohrkrümmer [eigene Darstellung nach [9, Seite 195]] und [17] . . . . .            | 9  |
| 2.3  | Kräfte Dreieck an einem Rohrkrümmer [eigene Darstellung nach [9, Seite 195]] . . . . .                            | 10 |
| 2.4  | Einordnung der numerischen Strömungsberechnung in die Fluidmechanik [eigene Darstellung nach [6] [16]] . . . . .  | 12 |
| 2.5  | Räumliche Diskretisierung aus vorwärts, rückwärts und zentraler Differenz [eigene Darstellung nach [6]] . . . . . | 16 |
| 3.1  | Schematische Darstellung der Seitenansicht der geplanten Rohrleitungsführung [eigene Darstellung] . . . . .       | 22 |
| 3.2  | Funktionsprinzip einer Kreiselpumpe [15] . . . . .                                                                | 22 |
| 3.3  | Tabellarische $\zeta$ - Werte [5] . . . . .                                                                       | 25 |
| 3.4  | Moment auf die Haltekonstruktion durch Wandkraft im Rohrkrümmer [eigene Darstellung] . . . . .                    | 27 |
| 3.5  | Ablauf einer CFD-Analyse [eigene Darstellung] . . . . .                                                           | 28 |
| 3.6  | Symmetrisches Halbmodell im Design Modeler [eigene Aufnahme] . . . . .                                            | 29 |
| 3.7  | Vernetzung des symmetrischen Teilmodells und benannte Oberflächen [eigene Aufnahme] . . . . .                     | 30 |
| 3.8  | Stromlinien ohne direkte Durchstrahlungsform des Wellenkanals [eigene Aufnahme] . . . . .                         | 33 |
| 3.9  | Strömungsgeschwindigkeiten ohne direkte Durchstrahlungsform des Wellenkanals [eigene Aufnahme] . . . . .          | 33 |
| 3.10 | Stromlinien mit Turbulenzen bei 2 Zuläufen [eigene Aufnahme] . . . . .                                            | 34 |
| 3.11 | Abfallende Strömung bei nicht korrekten Maßen [eigene Aufnahme] . . . . .                                         | 35 |
| 3.12 | Durch abfallende Strömung ungewollte Strömungsverteilung [eigene Aufnahme] . . . . .                              | 35 |

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.13 Turbulenzen bei vierfachem Einlass mit tiefen unteren Einlässen[eigene Aufnahme] . . . . . | 36 |
| 3.14 Turbulenzen bei vierfachem Einlass mit hohen unteren Einlässen [eigene Aufnahme] . . . . . | 36 |
| 3.15 Stromlinien im Wellenkanal, Umsetzungskonzept [eigene Aufnahme] . .                        | 37 |
| 3.16 Strömungsverteilung in der Kontrollfläche des Resultats [eigene Aufnahme]                  | 38 |
| 3.17 Haltebrücken ohne Haltestruktur [eigene Aufnahme] . . . . .                                | 39 |
| 3.18 Winkel zur Umlenkung der Einstreuörmung [eigene Darstellung] . . . . .                     | 40 |
| 4.1 Strömung im Wellenkanal [eigene Aufnahme] . . . . .                                         | 41 |
| 4.2 Pumpe im Betrieb [eigene Aufnahme] . . . . .                                                | 41 |
| 4.3 Halterung und Ablauf des Wellenkanals Richtung Pumpe [eigene Aufnahme] . . . . .            | 43 |

## Tabellenverzeichnis

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Anforderungsliste . . . . .                                      | 20 |
| 3.2 Datenblatt der ausgewählten Pumpe aus dem Hause SINNTEC [11] . . | 23 |

# Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung        | Bedeutung                                           | Beschreibung                                                                                                                     |
|------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CAD              | Computer Aided Design                               | Englische Bezeichnung für computer-gestütztes Konstruieren und erstellen von Zeichnungen                                         |
| CFD              | Computational Fluid Dynamics                        | Englische Bezeichnung für numerische Strömungsmechanik                                                                           |
| HAW Hamburg      | Hochschule für angewandte Wissenschaften in Hamburg | Hochschule an der diese Arbeit durchgeführt wird                                                                                 |
| NRB              | Numerische Randbedingungen                          | Berechnete Randbedingungen zur Lösung von Strömungsdifferenzengleichungen                                                        |
| NS-Gleichungen   | Navier-Stokes-Gleichungen                           | Differentialgleichungssystem zur Beschreibung von Fluidodynamik                                                                  |
| PRB              | Physikalische Randbedingungen                       | Randbedingungen aus physikalischen Umgebungsbedingungen                                                                          |
| RANS-Gleichungen | Reynolds-Average-Navier-Stokes-Gleichungen          | vereinfachtes Differentialgleichungssystem zur Beschreibung von Fluidodynamik ohne hochfrequente Turbulenzen                     |
| RFESP            | River Flow Electrolysis Platforms                   | Projekt zur Entwicklung von infrastrukturunabhängigen Schwimmplattformen zur Erzeugung von grünem Wasserstoff aus Fließgewässern |
| SST              | Shear-Stress-Transport                              | Turbulenzmodell auf Basis der auftretenden Scherspannungen                                                                       |
| WK               | Wellenkanal                                         |                                                                                                                                  |
| ZET              | Zentrum für Energietechnik                          | Gebäude an der HAW Hamburg, in dem sich alles rund um die Energietechnik dreht                                                   |

# Formelzeichen

| Formelzeichen  | Einheit                  | Beschreibung                                                      |
|----------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| $A$            | $m^2$                    | Flächeninhalt                                                     |
| $d$            | $m$                      | Durchmesser                                                       |
| $d_{hyd}$      | $m$                      | Hydraulischer Durchmesser                                         |
| $E$            | —                        | Platzhaltervariable zur Demonstration des Rechenweges             |
| $Eu$           | —                        | Euler-Zahl, dimensionslose Kenngröße                              |
| $e$            | $J$                      | Energie                                                           |
| $F_{Impuls}$   | $N$                      | Impulskraft                                                       |
| $F_P$          | $N$                      | Druckkraft                                                        |
| $F_{\ddot{U}}$ | $N$                      | Überdruckkraft                                                    |
| $F_W$          | $N$                      | Wandkraft                                                         |
| $g$            | $\frac{m}{s^2}$          | Erdbeschleunigung                                                 |
| $h$            | $m$                      | Höhe                                                              |
| $\dot{I}$      | $\frac{kg \cdot m}{s^2}$ | Impulsstrom                                                       |
| $k$            | $\mu m$                  | Oberflächenrauheit                                                |
| $l$            | $m$                      | Länge                                                             |
| $M$            | $Nm$                     | Drehmoment                                                        |
| $M_H$          | $Nm$                     | Haltemoment                                                       |
| $\dot{m}$      | $\frac{kg}{s}$           | Massenstrom                                                       |
| $O$            | —                        | Abbruchfehler                                                     |
| $P$            | —                        | Punkt                                                             |
| $P_{El}$       | $W$                      | Elektrische Leistung                                              |
| $P_P$          | $W$                      | Pumpenleistung                                                    |
| $p$            | $Pa$                     | Druck                                                             |
| $p_{\ddot{U}}$ | $Pa$                     | Überdruck                                                         |
| $p_v$          | $Pa$                     | Druckverlust                                                      |
| $\dot{q}$      | $\frac{J}{m^2 \cdot s}$  | Flächenspezifischer Wärmestrom                                    |
| $Re$           | —                        | Reynolds-Zahl, dimensionslose Kenngröße                           |
| $Re_{krit}$    | —                        | Wert für die Kenngröße zwischen laminier und turbulenter Strömung |
| $r$            | $m$                      | Radius                                                            |
| $t$            | $s$                      | Zeit                                                              |
| $U$            | —                        | Platzhaltervariable zur Demonstration des Rechenweges             |

| Formelzeichen       | Einheit          | Beschreibung                               |
|---------------------|------------------|--------------------------------------------|
| $\dot{V}$           | $\frac{m^3}{s}$  | Volumenstrom                               |
| $v$                 | $\frac{m}{s}$    | Strömungsgeschwindigkeit                   |
| $v_m$               | $\frac{m}{s}$    | Mittlere Strömungsgeschwindigkeit          |
| $x$                 | —                | Variable                                   |
| $\alpha$            | °                | Angriffswinkel der Wandkraft               |
| $\varepsilon$       | —                | Turbulente Dissipation                     |
| $\eta_{Pumpe}$      | —                | Pumpenwirkungsgrad                         |
| $\lambda$           | —                | Rohrreibungsbeiwert                        |
| $\lambda_{laminar}$ | —                | Rohrreibungsbeiwert bei laminarer Strömung |
| $\nu$               | $\frac{m^2}{s}$  | Kinematische Viskosität                    |
| $\rho$              | $\frac{kg}{m^3}$ | Dichte                                     |
| $\tau$              | $Pa$             | Scherspannung                              |
| $\zeta$             | —                | Druckverlustbeiwert                        |
| $\omega$            | —                | Turbulente Frequenz                        |

# Literatur

- [1] Bengt ANDERSSON, Ronnie ANDERSSON und Love HAKANSSON. *COMPUTATIONAL fluid dynamics for engineers*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. ISBN: 978-1-107-01895-2.
- [2] Benedikt Flurl. *BERNOULLI-Gleichung*. URL: <https://www.leifiphysik.de/mechanik/stroemungslehre/grundwissen/bernoulli-gleichung>.
- [3] Bundesnetzagentur. *Stromerzeugung*. 2024. URL: <https://www.smard.de/page/home/wiki-article/446/636>.
- [4] Flow Rider. *TECHNOLOGY & INNOVATION*. URL: <https://www.flowrider.com/our-technology/>.
- [5] Jacob - Rohre. *Zetawerte für Umlenkungen*. URL: <http://www.jacob-rohre.com/web/berechnu/zeta8/umlenkun/umlenkun.htm>.
- [6] Stefan Lecheler. *Numerische Strömungsberechnung: Schneller Einstieg durch ausführliche praxisrelevante Beispiele*. Vieweg + TeubnerStudium. Wiesbaden: Vieweg, 2009. ISBN: 978-3-8348-0439-6.
- [7] Netz Konstrukteur. *Anforderungsliste/Lastenheft*. URL: <https://netzkonstrukteur.de/konstruktionsmethodik/anforderungsliste/>.
- [8] Serapool. *Was ist ein Pool-Gegenstromsystem?* 2023. URL: <https://serapool.com/de/newsletter/was-ist-ein-pool-gegenstromsystem#:~:text=Die%20Logik%20der%20Pool%20Gegenstromanlage,Ort%20und%20Stelle%20zu%20schwimmen>.
- [9] Herbert Sigloch. *Technische Fluidmechanik*. 9. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, 2014. ISBN: 978-3-642-54291-6.
- [10] Simon Julius Dücker. *Strömungslehre - Moody-Diagramm*. [www.ingenieurkurse.de](http://www.ingenieurkurse.de), 2018. URL: <https://www.ingenieurkurse.de/stroemungslehre/hydrodynamik/reibungsbehaftete-stroemungen/verluste-in-rohrleitungen-streckenabhaengige/moody-diagramm.html>.
- [11] SINNTEC Schmiersysteme GmbH. *Kreiselpumpe - für sauberes Wasser - 230 Volt - 200 bis 1100 l/min - 10 bar - 5 bis 14,5 Meter - 3 Zoll - Laufrad: Messing*. URL: <https://sinntec.de/Kreiselpumpe-fuer-sauberes-Wasser-230-Volt-200-bis-1100-l-min-10-bar-5-bis-145-Meter-3-Laufrad-Messing>.

- [12] Jann Strybny. *Ohne Panik Strömungsmechanik! Ein Lernbuch zur Prüfungsvorbereitung, zum Auffrischen und Nachschlagen mit Cartoons von Oliver Romberg*. 5. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag, 2012. ISBN: 978-3-8348-1791-4.
- [13] Dominik Surek und Silke Stempin. *Technische Strömungsmechanik: Für Studium, Examen und Praxis; mit 56 Tabellen, 44 Beispielen, 67 Aufgaben und 31 Modellklausuren*. 2., überarb. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-658-06061-9.
- [14] Technisches Zentrum Leipzig. *Forschung und Entwicklung*. URL: <https://www.tz-leipzig.com/forschung-und-entwicklung.html>.
- [15] Tetra Pak. *Dairy Processing Handbook - Anforderungen an Pumpen*. Hrsg. von Tetra Pak 2024. URL: <http://www.dairyprocessinghandbook.tetrapak.com/public/de/chapter/pumpen>.
- [16] John F. Wendt und John D. Anderson JR. *Computational fluid dynamics: An introduction*. Third ed. Berlin: Springer, 2009. ISBN: 978-3-540-85055-7.
- [17] Wenger Engineering. *Impulssatz - Strömung berechnen*. Hrsg. von Your Business LLC. URL: <https://www.stroemung-berechnen.de/anwendung-des-impulssatzes-am-durchstroemten-krueemmer/#>.
- [18] Werner Adrion. *Wasserkraft ist besser als Windkraft*. Hrsg. von Südkurier. 2018. URL: <https://www.suedkurier.de/region/schwarzwald/blumberg/Werner-Adrion-Wasserkraft-ist-besser-als-Windkraft;art372508,9645042>.
- [19] Wüstenrot Stiftung. *Umlauftank 2 von Ludwig Leo in Berlin*. URL: <https://wuestenrot-stiftung.de/umlauftank-2-ludwig-leo-berlin/>.

## Anhang

Im folgenden Anhang finden sich alle für diese Arbeit erzeugten und verwendeten technischen Zeichnungen und weitere für diese Arbeit wichtigen Dokumente. Diese sind alle mit entsprechenden Über- bzw. Unterschriften gekennzeichnet. Technische Zeichnungen sind in den dafür vorgesehenen Feldern benannt.

## Aufgabenstellung für eine Bachelorarbeit

**Thema:** Strömungserzeugung in einem Wellenkanal

**Hintergrund:** Wellenkanäle werden in der Hydrodynamik und Ozeanographie verwendet, um das Verhalten von Wellen unter kontrollierten Bedingungen zu untersuchen. Sie finden Anwendung in der Forschung und Entwicklung, um z.B. das Verhalten von Schiffen, Offshore-Strukturen oder Küstenschutzmaßnahmen zu analysieren. Neben der Wellenerzeugung ist die Strömungserzeugung für viele Untersuchungen notwendig. Diese muss sowohl präzise als auch zuverlässig sein, um realistische und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen.

Zur Strömungserzeugung in Wellenkanälen können unterschiedliche Konzepte verwendet werden, die sich in ihrer Effizienz, Komplexität und Anpassungsfähigkeit unterscheiden. Die Entwicklung und Analyse eines geeigneten Konzepts zur Strömungserzeugung stellt daher eine zentrale Herausforderung dar, die sowohl theoretische als auch praktische Kenntnisse in den Bereichen Computer-Aided Design (CAD) und Computational Fluid Dynamics (CFD) erfordert.

**Ziele der Arbeit:** Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Entwicklung, Analyse und Umsetzung eines Konzepts zur Strömungserzeugung in einem Wellenkanal. Dies umfasst folgende Schritte:

1. Entwicklung eines Konzepts mittels CAD.
2. Analyse und Optimierung des Konzepts durch CFD-Simulationen.
3. Praktische Umsetzung des Konzepts.
4. Durchführung von Messungen zur Validierung des entwickelten und umgesetzten Konzepts.

**Schwerpunkte der Arbeit:**

1. **Literaturrecherche und Analyse bestehender Konzepte:**
  - o Untersuchung verschiedener Methoden zur Strömungserzeugung in Wellenkanälen.
  - o Identifikation der Vor- und Nachteile der bestehenden Konzepte.
2. **Konzeptentwicklung mittels CAD:**
  - o Erstellung eines detaillierten CAD-Modells des Strömungserzeugungskonzepts.
  - o Berücksichtigung relevanter Parameter und Anforderungen.
3. **Simulation und Analyse mittels CFD:**
  - o Durchführung von CFD-Simulationen zur Analyse der Strömungsverhältnisse.
  - o Optimierung des Konzepts basierend auf den Simulationsergebnissen.
4. **Praktische Umsetzung des Konzepts:**
  - o Bau eines Prototyps basierend auf dem entwickelten CAD-Modell.
  - o Sicherstellung der Funktionsfähigkeit und der technischen Realisierbarkeit.
5. **Messungen und Validierung:**
  - o Durchführung von Messungen im Wellenkanal.
  - o Vergleich der Messergebnisse mit den Simulationsergebnissen zur Validierung des Konzepts.
6. **Dokumentation und Präsentation der Ergebnisse:**
  - o Detaillierte Dokumentation des Entwicklungsprozesses und der Ergebnisse.
  - o Erstellung eines Abschlussberichts mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse und einer Diskussion der Ergebnisse.



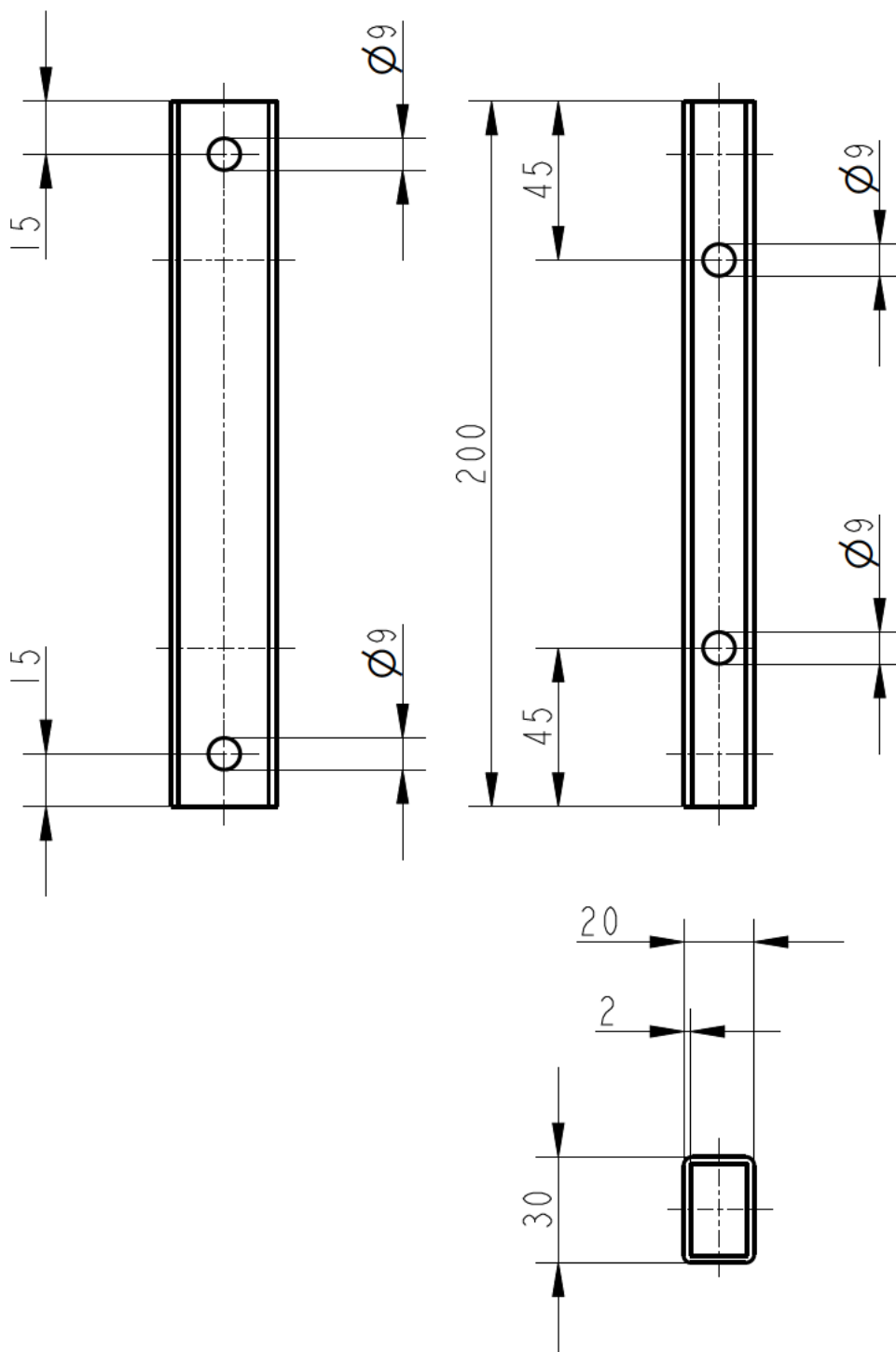
### Erwartete Ergebnisse:

- Ein detailliertes CAD-Modell eines effizienten und zuverlässigen Strömungserzeugungskonzepts.
- Erkenntnisse aus den CFD-Simulationen zur Strömungsverteilung und Effizienz des Konzepts.
- Ein funktionsfähiger Prototyp zur Strömungserzeugung.
- Validierte Messergebnisse, die die Funktionalität und Effizienz des entwickelten Konzepts bestätigen.

**Mögliche Anpassungen:** Die Schwerpunkte und Arbeitsschritte können in Absprache mit dem Betreuer individuell angepasst werden, um den aktuellen Arbeitsstand und notwendige Zwischenschritte zu berücksichtigen.

HH, 18.06

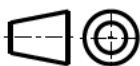
Ort, Datum, Unterschrift Student: [REDACTED]



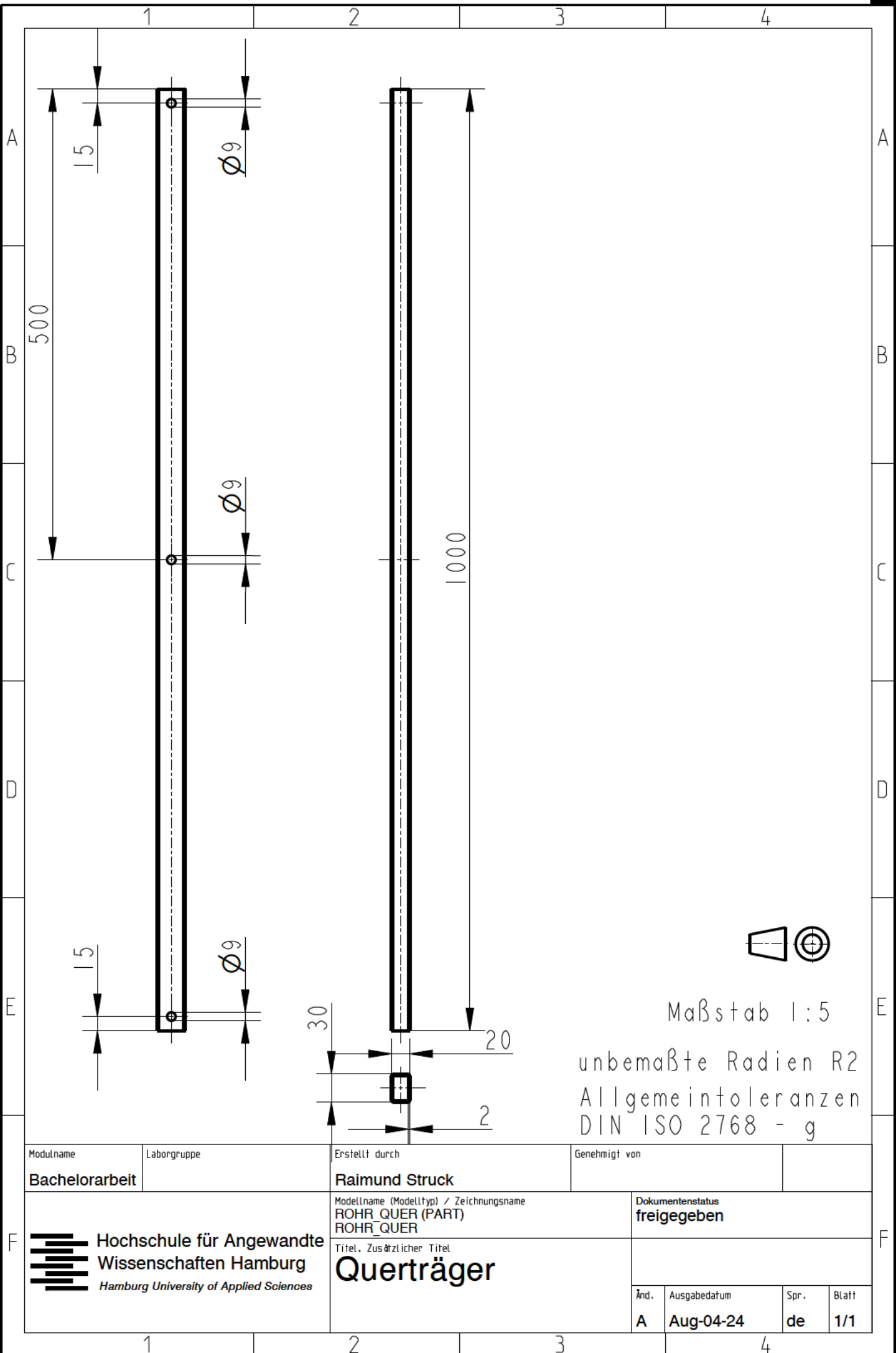
Maßstab 1:2

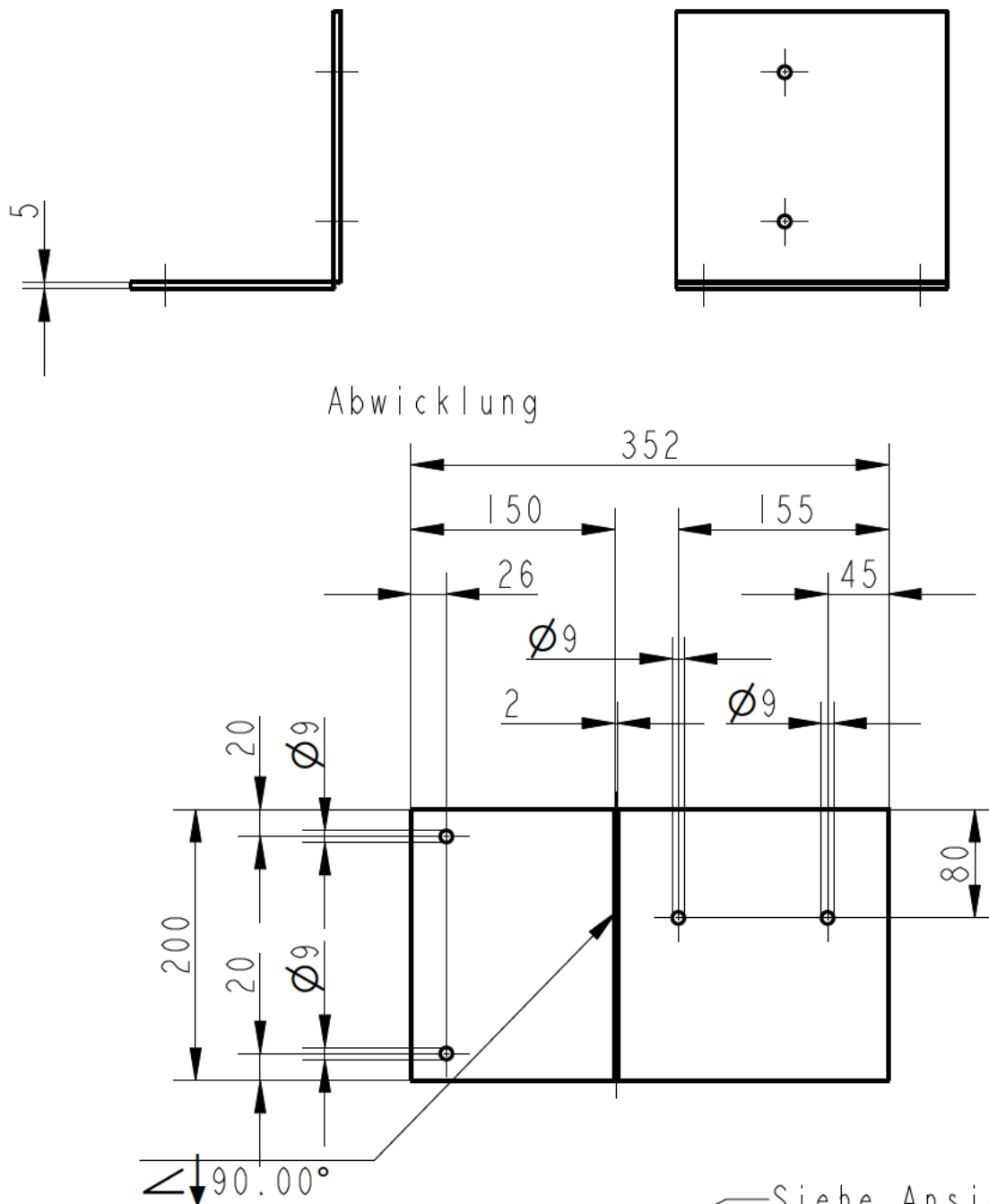
unbemaßte Radien R2

Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - g



|                                                                                                                                                                                           |              |                                         |                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------|------------------|
| Modulname                                                                                                                                                                                 | Laborgruppe  | Erstellt durch                          | Genehmigt von    |
| Bachelorarbeit                                                                                                                                                                            |              | Raimund Struck                          |                  |
|  <b>Hochschule für Angewandte<br/>Wissenschaften Hamburg</b><br>Hamburg University of Applied Sciences |              | Modellname (Modelltyp) / Zeichnungsname | Dokumentenstatus |
|                                                                                                                                                                                           |              | ROHR_HOCH (PART)<br>ROHR_HOCH           | freigegeben      |
|                                                                                                                                                                                           |              | Titel, Zusätzlicher Titel               |                  |
|                                                                                                                                                                                           |              | <b>Verbinder</b>                        |                  |
| Änd.                                                                                                                                                                                      | Ausgabedatum | Spr.                                    | Blatt            |
| A                                                                                                                                                                                         | Aug-05-24    | de                                      | 1/1              |





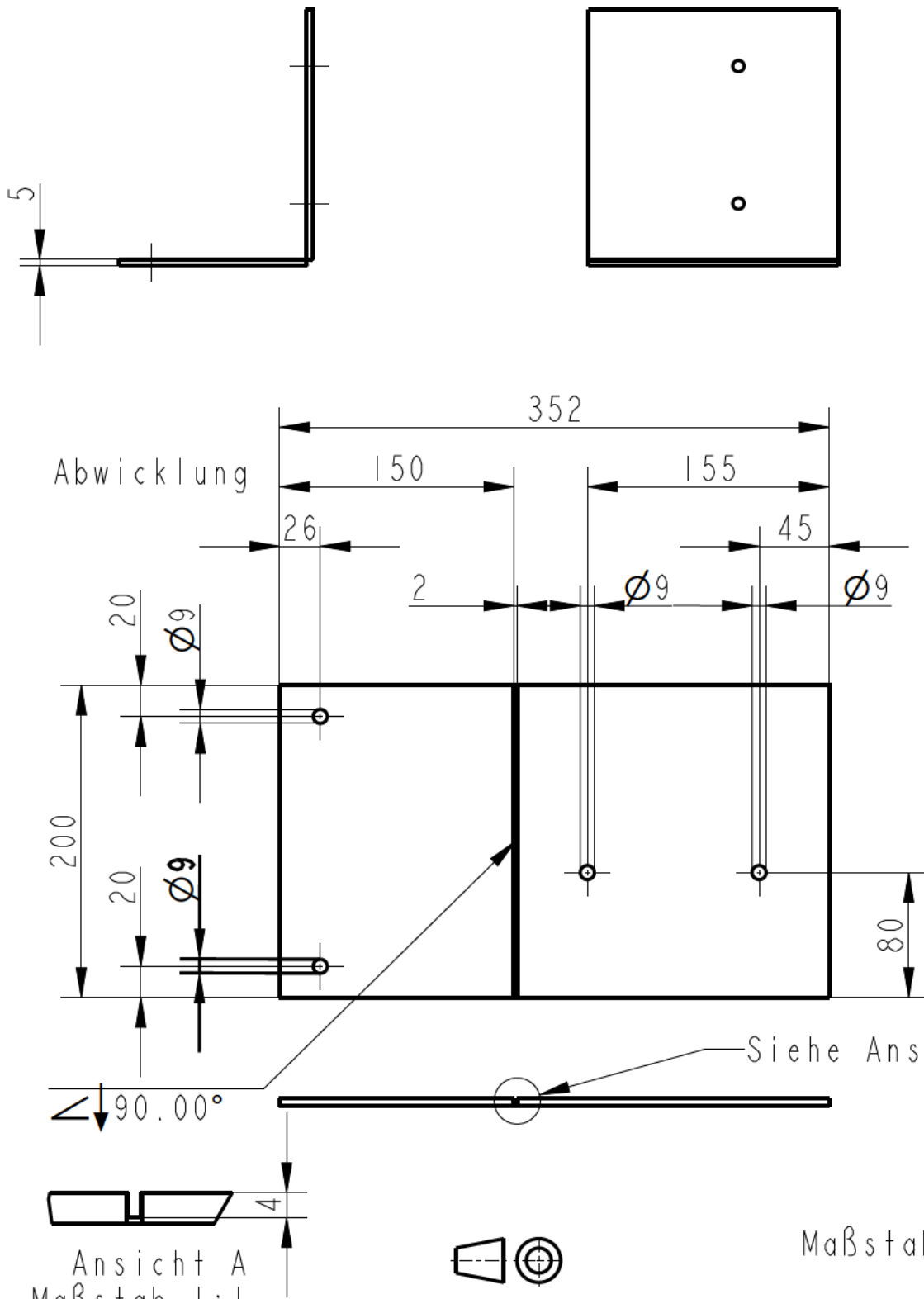
Sicht A  
Maßstab 1:1



Maßstab 1:5

Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - g

|                                                                                                                                                                                           |             |                                                                                              |                   |                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------|
| Modulname<br><b>Bachelorarbeit</b>                                                                                                                                                        | Laborgruppe | Erstellt durch<br><b>Raimund Struck</b>                                                      | Genehmigt von     |                                        |
|  <b>Hochschule für Angewandte<br/>Wissenschaften Hamburg</b><br>Hamburg University of Applied Sciences |             | Modellname (Modelltyp) / Zeichnungsname<br><b>WINKELBLECH1 (PART)</b><br><b>WINKELBLECH1</b> |                   | Dokumentenstatus<br><b>freigegeben</b> |
|                                                                                                                                                                                           |             | Titel, Zusätzlicher Titel<br><b>Winkelblech</b><br><b>Version A</b>                          |                   | And.<br><b>A</b>                       |
|                                                                                                                                                                                           |             | Ausgabedatum<br><b>Aug-05-24</b>                                                             | Spr.<br><b>de</b> | Blatt<br><b>1/1</b>                    |

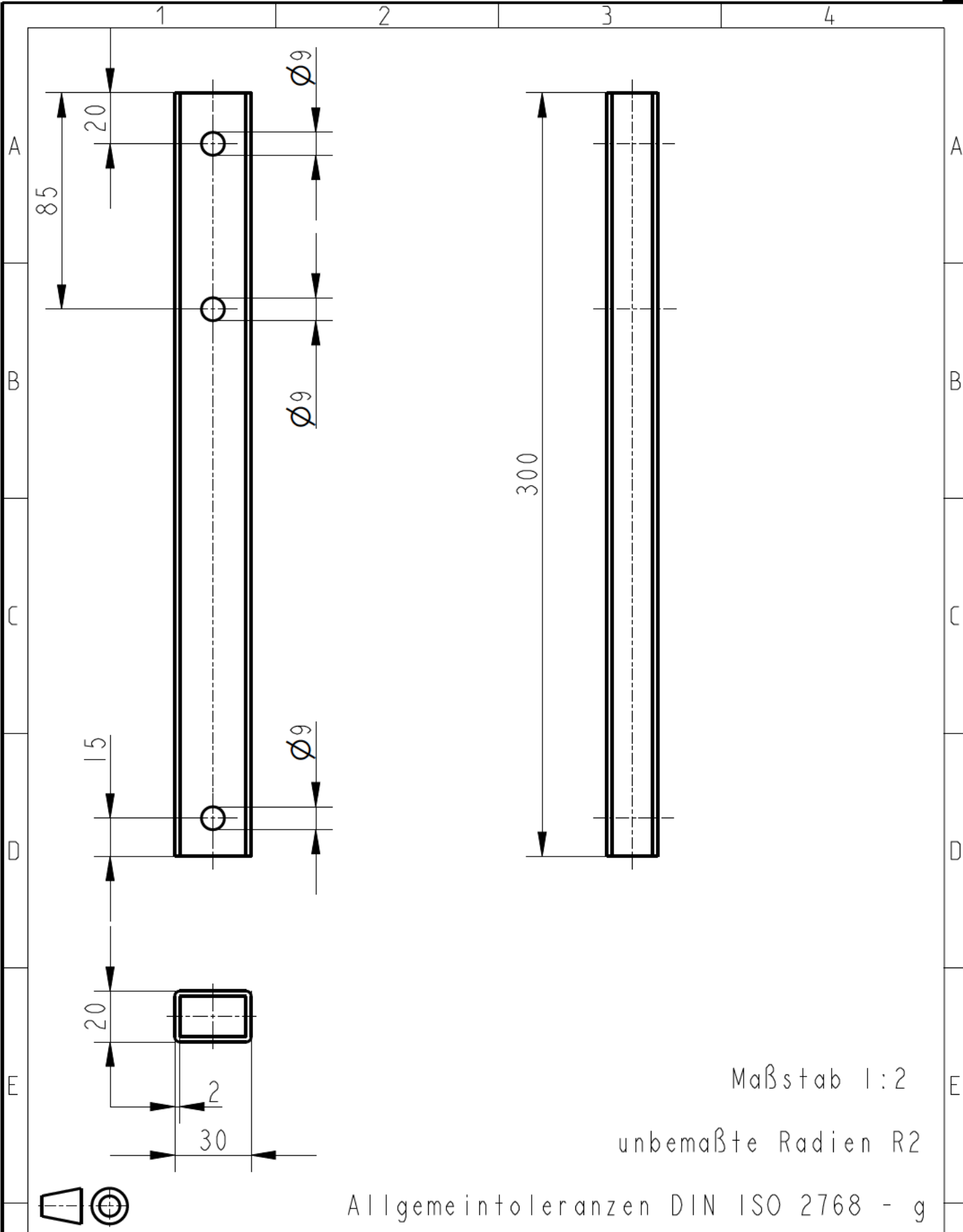


Ansicht A  
Maßstab 1:1

Maßstab 1:5

Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - g

|                                                                                                                                                                                           |             |                                                                                        |                   |                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------|
| Modulname<br><b>Bachelorarbeit</b>                                                                                                                                                        | Laborgruppe | Erstellt durch<br><b>Raimund Struck</b>                                                | Genehmigt von     |                                        |
|  <b>Hochschule für Angewandte<br/>Wissenschaften Hamburg</b><br>Hamburg University of Applied Sciences |             | Modellname (Modelltyp) / Zeichnungsname<br><b>WINKELBLECH2 (PART)<br/>WINKELBLECH2</b> |                   | Dokumentenstatus<br><b>freigegeben</b> |
|                                                                                                                                                                                           |             | Titel, Zusätzlicher Titel<br><b>Winkelblech<br/>Version B</b>                          |                   | And.<br><b>A</b>                       |
|                                                                                                                                                                                           |             | Ausgabedatum<br><b>Aug-05-24</b>                                                       | Spr.<br><b>de</b> | Blatt<br><b>1/1</b>                    |



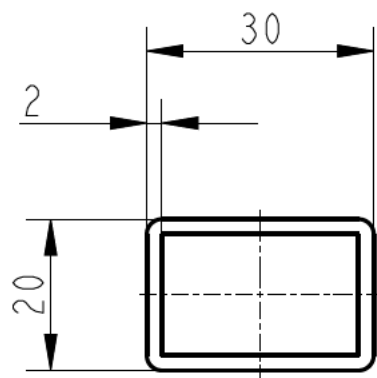
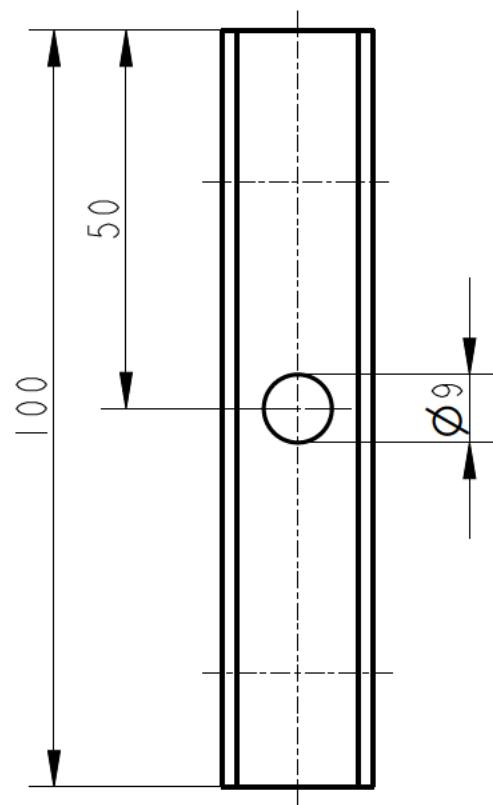
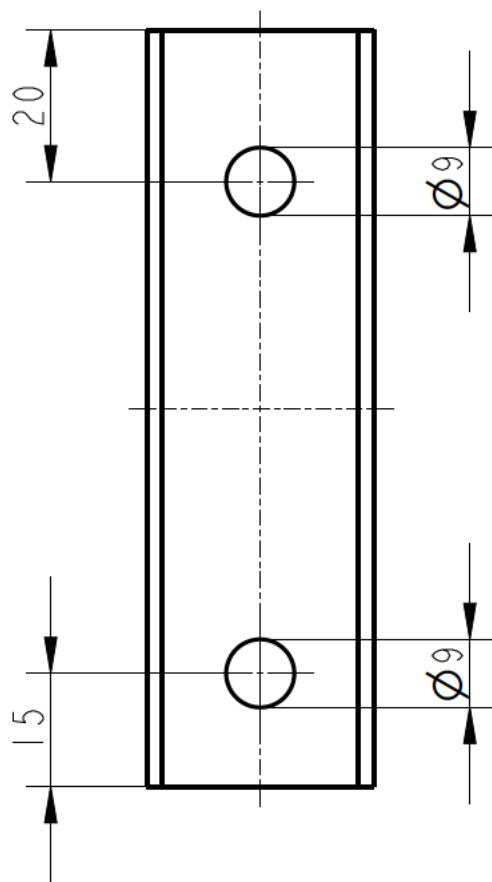
Maßstab 1:2

unbemaßte Radien R2

Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - g

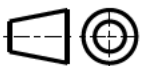


|                                                                                                                                                                                                  |              |                                         |               |                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------|---------------|------------------|
| Modulname                                                                                                                                                                                        | Laborgruppe  | Erstellt durch                          | Genehmigt von |                  |
| Bachelorarbeit                                                                                                                                                                                   |              | Raimund Struck                          |               |                  |
|  <b>Hochschule für Angewandte<br/>Wissenschaften Hamburg</b><br><i>Hamburg University of Applied Sciences</i> |              | Modellname (Modelltyp) / Zeichnungsname |               | Dokumentenstatus |
|                                                                                                                                                                                                  |              | ABLAUF_FUSS_AUSSEN (PART)               |               | freigegeben      |
|                                                                                                                                                                                                  |              | Titel, zusätzlicher Titel               |               |                  |
|                                                                                                                                                                                                  |              | <b>Fuß außen</b>                        |               |                  |
|                                                                                                                                                                                                  |              | <b>Abfluss</b>                          |               |                  |
| Änd.                                                                                                                                                                                             | Ausgabedatum | Spr.                                    | Blatt         |                  |
| A                                                                                                                                                                                                | Aug-06-24    | de                                      | 1/1           |                  |



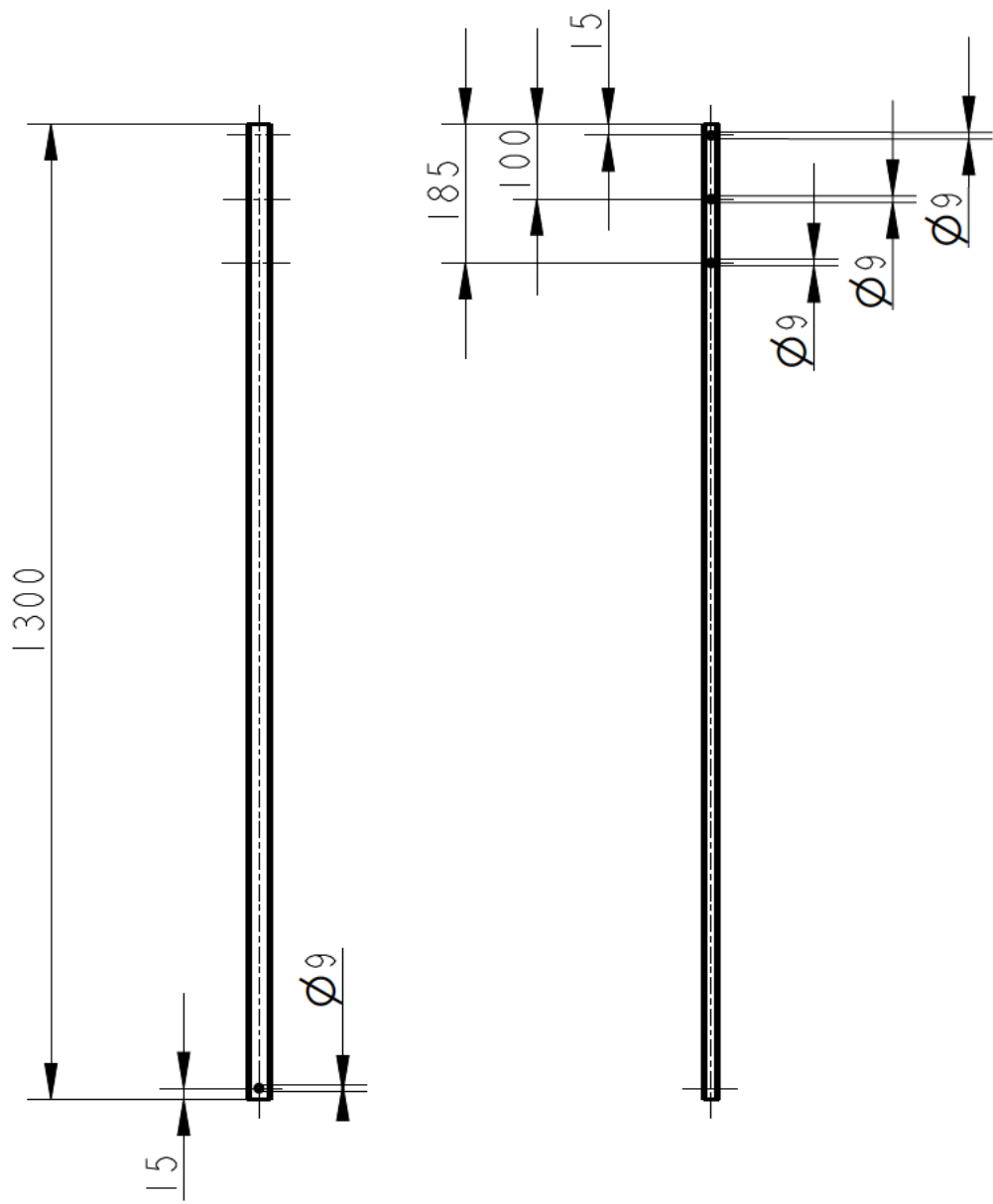
Maßstab 1:1

unbemaßte Radien R2

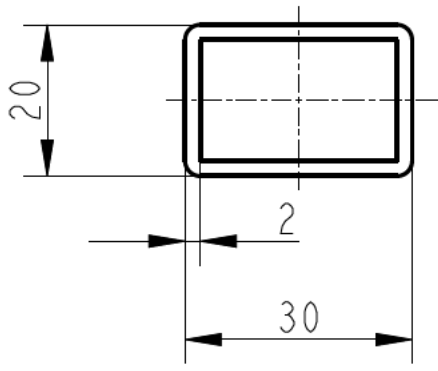


Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - g

|                                                                                                                                                                                                       |             |                                                                                          |                                 |                           |            |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|------------|--------------|
| Modulname                                                                                                                                                                                             | Laborgruppe | Erstellt durch                                                                           | Genehmigt von                   |                           |            |              |
| Bachelorarbeit                                                                                                                                                                                        |             | Raimund Struck                                                                           |                                 |                           |            |              |
|  <div>Hochschule für Angewandte<br/>Wissenschaften Hamburg<br/><i>Hamburg University of Applied Sciences</i></div> |             | Modellname (Modelltyp) / Zeichnungsname<br>ABLAUF_FUSS_INNEN (PART)<br>ABLAUF_FUSS_INNEN | Dokumentenstatus<br>freigegeben |                           |            |              |
|                                                                                                                                                                                                       |             | Titel, Zusätzlicher Titel<br>Fuß innen<br>Ablauf                                         |                                 |                           |            |              |
|                                                                                                                                                                                                       |             |                                                                                          | Änd.<br>A                       | Ausgabedatum<br>Aug-06-24 | Spr.<br>de | Blatt<br>1/1 |

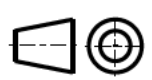


Maßstab 1:1



Maßstab 1:10

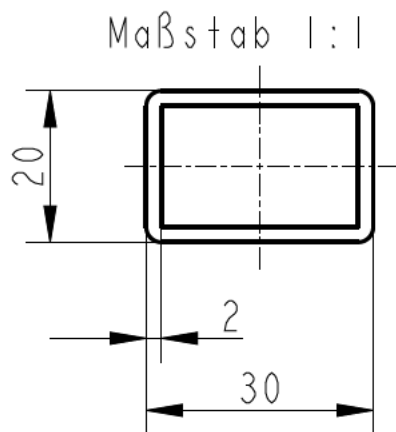
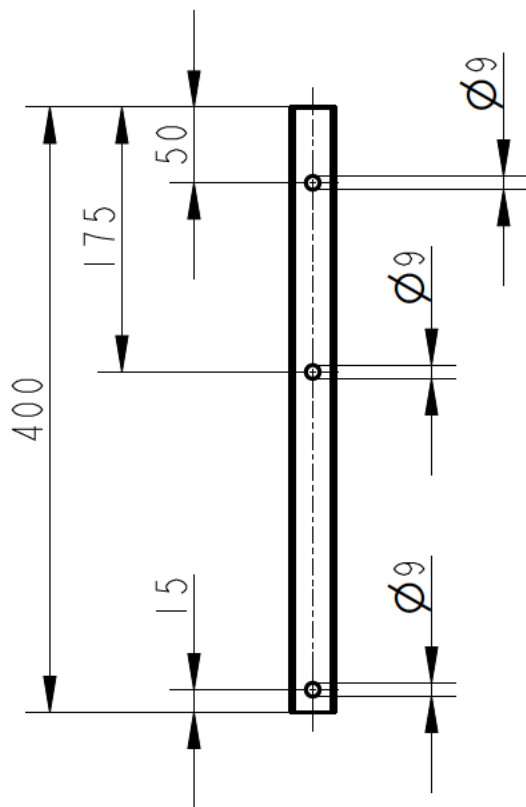
unbemaßte Radien R2



Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - g

|                                                                                                                                                                                           |              |                                         |               |                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------|---------------|------------------|
| Modulname                                                                                                                                                                                 | Laborgruppe  | Erstellt durch                          | Genehmigt von |                  |
| Bachelorarbeit                                                                                                                                                                            |              | Raimund Struck                          |               |                  |
|  <b>Hochschule für Angewandte<br/>Wissenschaften Hamburg</b><br>Hamburg University of Applied Sciences |              | Modellname (Modelltyp) / Zeichnungsname |               | Dokumentenstatus |
|                                                                                                                                                                                           |              | ABLAUF_VERTIKAL (PART)                  |               | freigegeben      |
|                                                                                                                                                                                           |              | Titel, Zusätzlicher Titel               |               |                  |
|                                                                                                                                                                                           |              | <b>Halter vertikal</b>                  |               |                  |
|                                                                                                                                                                                           |              | <b>Ablauf</b>                           |               |                  |
| Änd.                                                                                                                                                                                      | Ausgabedatum | Spr.                                    | Blatt         |                  |
| A                                                                                                                                                                                         | Aug-06-24    | de                                      | 1/1           |                  |





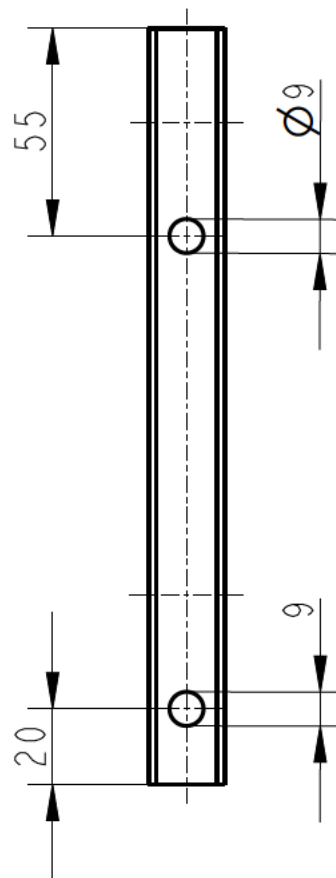
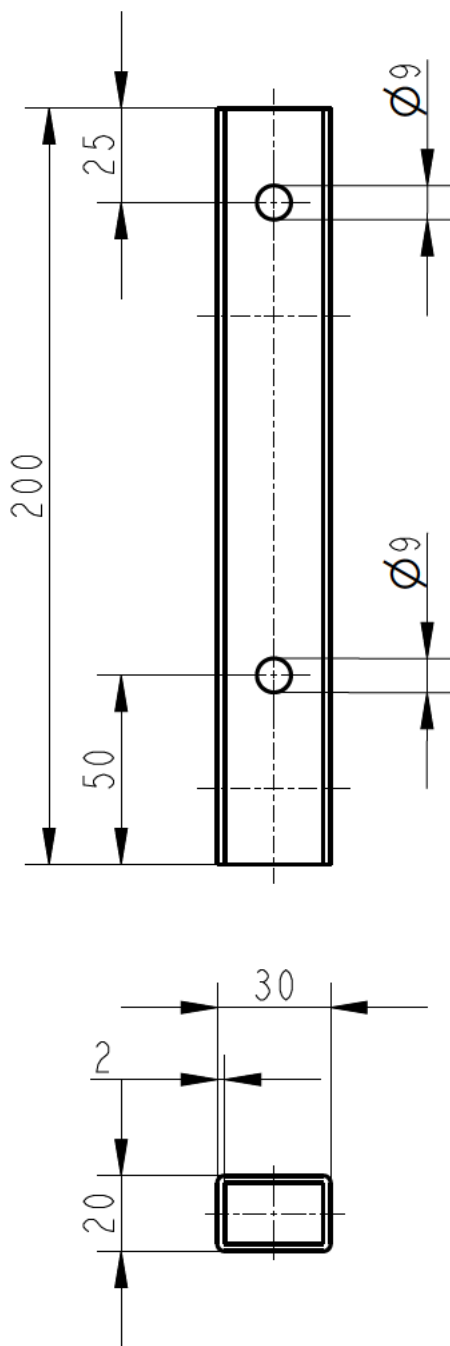
Maßstab 1:5

unbemaßte Radien R2



Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - g

|                                                                                                                                                                                           |             |                                                                                                    |                                  |                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|
| Modulname<br><b>Bachelorarbeit</b>                                                                                                                                                        | Laborgruppe | Erstellt durch<br><b>Raimund Struck</b>                                                            | Genehmigt von                    |                                        |
|  <b>Hochschule für Angewandte<br/>Wissenschaften Hamburg</b><br>Hamburg University of Applied Sciences |             | Modellname (Modelltyp) / Zeichnungsname<br><b>ZULAUF_FUSS_AUSSEN (PART)<br/>ZULAUF_FUSS_AUSSEN</b> |                                  | Dokumentenstatus<br><b>freigegeben</b> |
|                                                                                                                                                                                           |             | Titel, Zusätzlicher Titel<br><b>Fuß außen<br/>Zulauf</b>                                           |                                  |                                        |
|                                                                                                                                                                                           |             | Änd.<br><b>A</b>                                                                                   | Ausgabedatum<br><b>Aug-06-24</b> | Spr.<br><b>de</b>                      |
|                                                                                                                                                                                           |             |                                                                                                    |                                  | Blatt<br><b>1/1</b>                    |



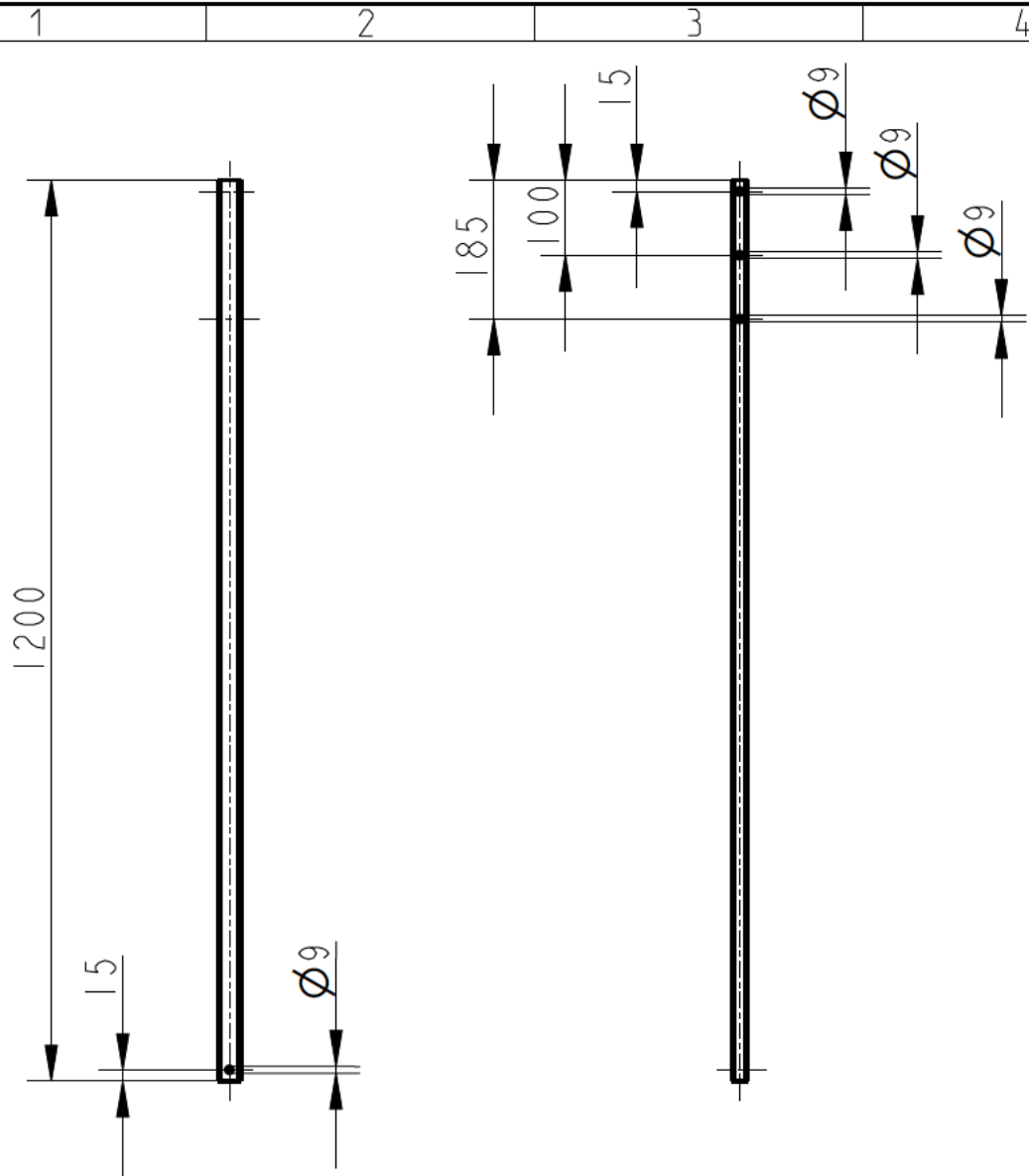
Maßstab 1:2

unbemaßte Radien R2

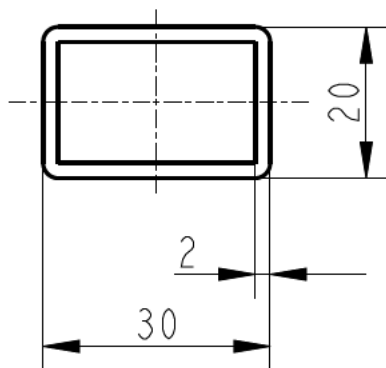


Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - g

|                                                                                                                                                                                                  |             |                                                                                                  |                                  |                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|
| Modulname<br><b>Bachelorarbeit</b>                                                                                                                                                               | Laborgruppe | Erstellt durch<br><b>Raimund Struck</b>                                                          | Genehmigt von                    |                                        |
|  <b>Hochschule für Angewandte<br/>Wissenschaften Hamburg</b><br><i>Hamburg University of Applied Sciences</i> |             | Modellname (Modelltyp) / Zeichnungsname<br><b>ZULAUF_FUSS_INNEN (PART)<br/>ZULAUF_FUSS_INNEN</b> |                                  | Dokumentenstatus<br><b>freigegeben</b> |
|                                                                                                                                                                                                  |             | Titel, Zusätzlicher Titel<br><b>Fuß innen</b><br><b>Zulauf</b>                                   |                                  |                                        |
|                                                                                                                                                                                                  |             | Änd.<br><b>A</b>                                                                                 | Ausgabedatum<br><b>Aug-06-24</b> | Spr. Blatt<br><b>de 1/1</b>            |



Maßstab 1:1



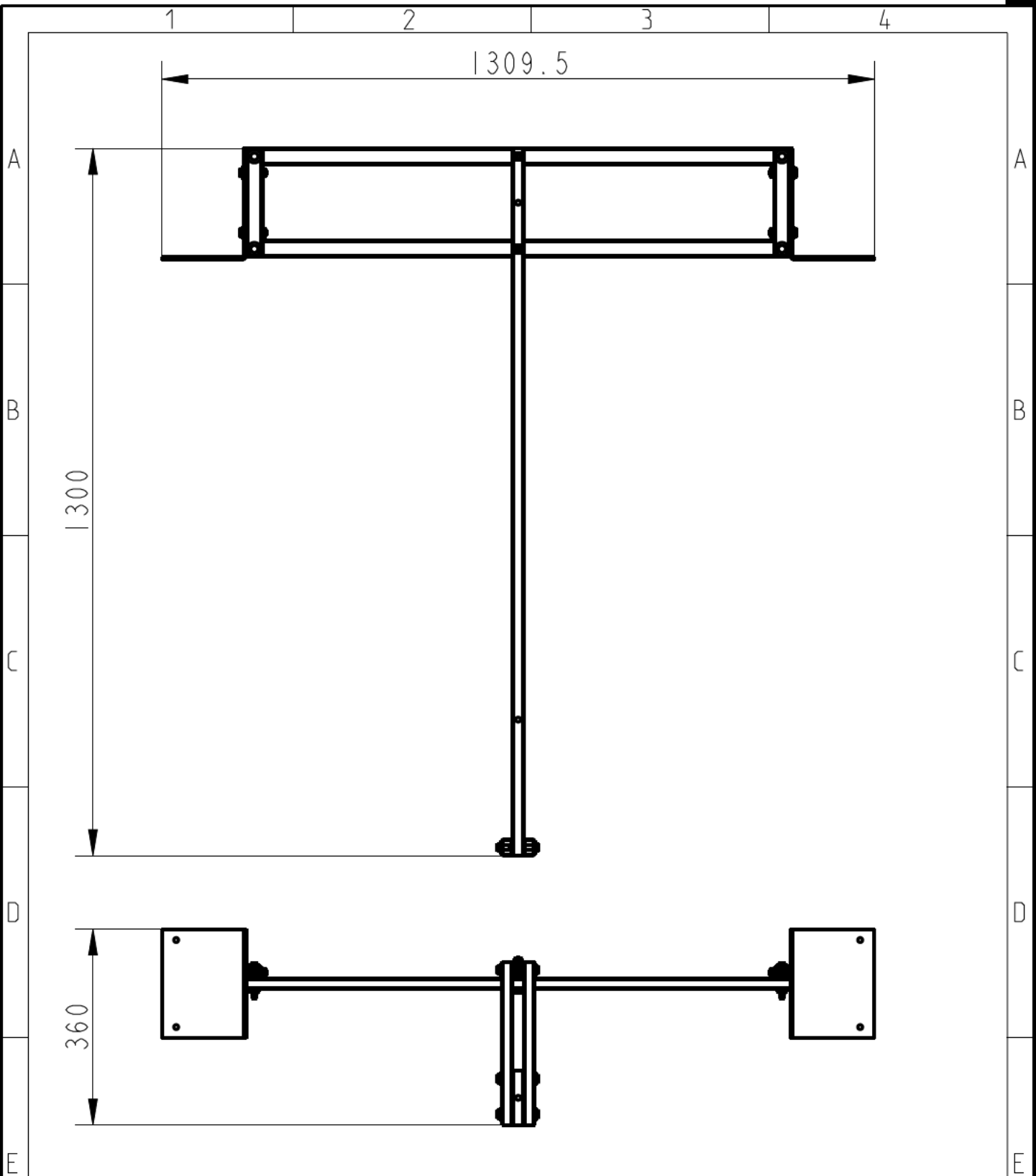
Maßstab 1:10

unbemaßte Radien R2



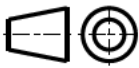
Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - g

|                                                                                                                                                                                           |             |                                                                                              |                                        |                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|
| Modulname<br><b>Bachelorarbeit</b>                                                                                                                                                        | Laborgruppe | Erstellt durch<br><b>Raimund Struck</b>                                                      | Genehmigt von                          |                                  |
|  <b>Hochschule für Angewandte<br/>Wissenschaften Hamburg</b><br>Hamburg University of Applied Sciences |             | Modellname (Modelltyp) / Zeichnungsname<br><b>ZULAUF VERTIKAL (PART)<br/>ZULAUF_VERTIKAL</b> | Dokumentenstatus<br><b>freigegeben</b> |                                  |
|                                                                                                                                                                                           |             | Titel, Zusätzlicher Titel<br><b>Halter vertikal<br/>Zulauf</b>                               | Änd.<br><b>A</b>                       | Ausgabedatum<br><b>Aug-06-24</b> |
|                                                                                                                                                                                           |             |                                                                                              | Spr.<br><b>de</b>                      | Blatt<br><b>1/1</b>              |

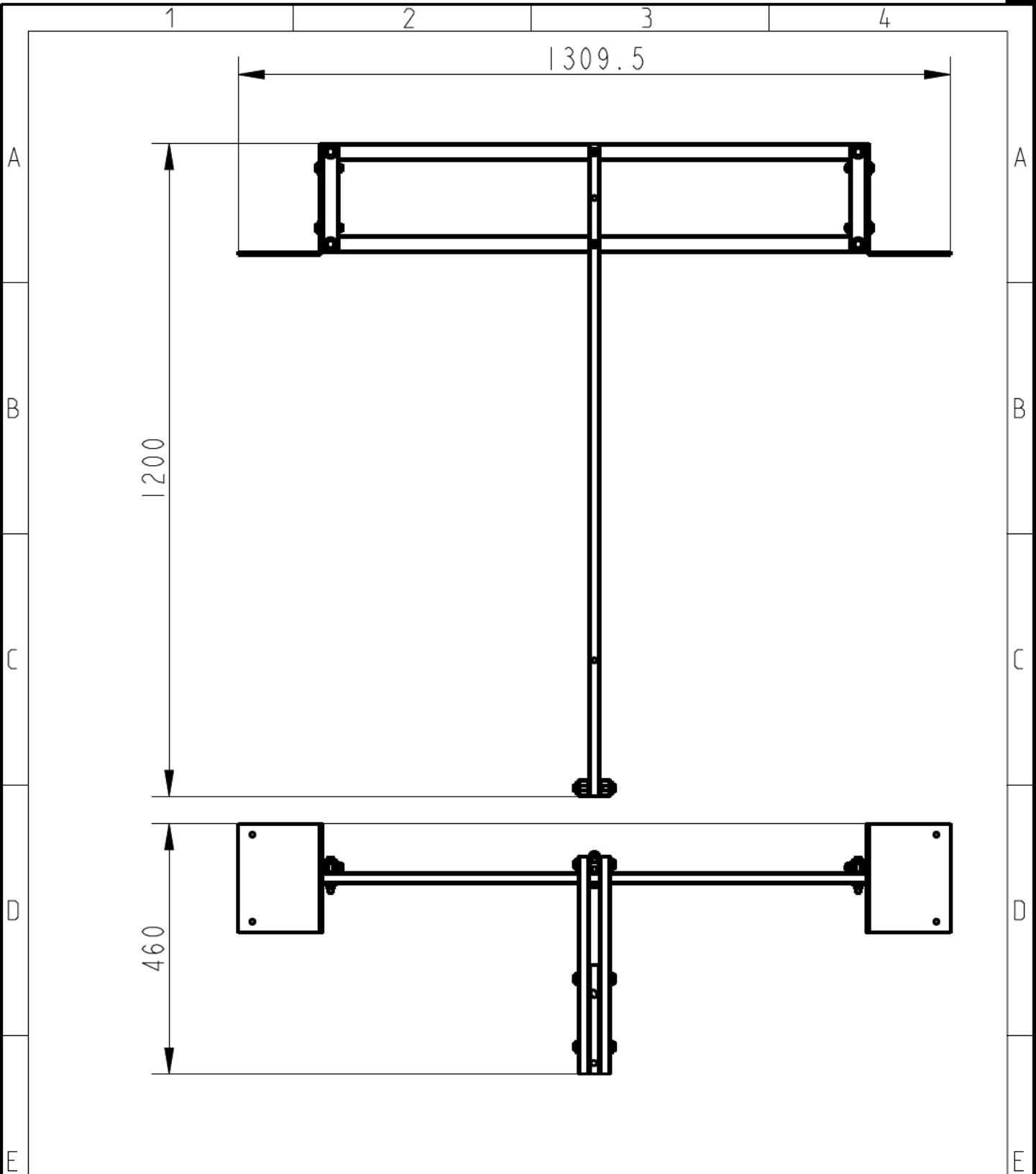


Schrauben DIN 931 8.8 M8  
 Muttern DIN 934 8 M8  
 Unterlegscheiben ISO 7093 8

Maßstab 1:10



|                |                                                                                                                                                                                                       |             |      |                                                                     |   |               |                                 |  |  |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------|---------------------------------------------------------------------|---|---------------|---------------------------------|--|--|
| Modulname      |                                                                                                                                                                                                       | Laborgruppe |      | Erstellt durch                                                      |   | Genehmigt von |                                 |  |  |
| Bachelorarbeit |                                                                                                                                                                                                       |             |      | Raimund Struck                                                      |   |               |                                 |  |  |
| F              |  <div>Hochschule für Angewandte<br/>Wissenschaften Hamburg<br/><i>Hamburg University of Applied Sciences</i></div> |             |      | Modellname (Modelltyp) / Zeichnungsname<br>ABLAUF (ASSEM)<br>ABLAUF |   |               | Dokumentenstatus<br>freigegeben |  |  |
|                |                                                                                                                                                                                                       |             |      | Titel, Zusätzlicher Titel<br>Ablauf<br>Zusammenbau                  |   |               |                                 |  |  |
|                |                                                                                                                                                                                                       |             |      |                                                                     |   |               |                                 |  |  |
|                |                                                                                                                                                                                                       |             | Änd. | Ausgabedatum                                                        |   | Spr.          | Blatt                           |  |  |
|                |                                                                                                                                                                                                       |             | A    | Aug-06-24                                                           |   | de            | 1/1                             |  |  |
| 1              |                                                                                                                                                                                                       |             | 2    |                                                                     | 3 |               | 4                               |  |  |



Schrauben DIN 931 8.8 M8  
 Muttern DIN 934 8 M8  
 Unterlegscheiben ISO 7093 8

Maßstab 1:10



|                                                                                                                                                                                                  |             |                                                                             |                                  |                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|
| Modulname<br><b>Bachelorarbeit</b>                                                                                                                                                               | Laborgruppe | Erstellt durch<br><b>Raimund Struck</b>                                     | Genehmigt von                    |                                        |
|  <b>Hochschule für Angewandte<br/>Wissenschaften Hamburg</b><br><i>Hamburg University of Applied Sciences</i> |             | Modellname (Modelltyp) / Zeichnungsname<br><b>ZULAUF (ASSEM)<br/>ZULAUF</b> |                                  | Dokumentenstatus<br><b>freigegeben</b> |
|                                                                                                                                                                                                  |             | Titel, Zusätzlicher Titel<br><b>Zulauf<br/>Zusammenbau</b>                  |                                  |                                        |
|                                                                                                                                                                                                  |             | Änd.<br><b>A</b>                                                            | Ausgabedatum<br><b>Aug-06-24</b> | Spr.<br><b>de</b>                      |
|                                                                                                                                                                                                  |             |                                                                             |                                  | Blatt<br><b>1/1</b>                    |

# **Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel

## **Strömungserzeugung in einem Wellenkanal**

selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, 10. September 2024

---

Raimund Struck