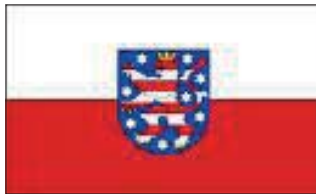




DEUTSCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG E.V.

ZfP-Sonderpreis der DGZfP beim Landeswettbewerb Jugend forscht

## THÜRINGEN



### **Pressure D.R.O.P. - Druckabfallraten in überwachten Rohren**

Johanna Berger  
Phi Nhung Nguyen Thi  
Nick Geisler

**Schule:**

Goethegymnasium Ilmenau



FACHARBEIT

# PRESSURE D.R.O.P.

PRESSURE DROP RATE IN OVERWATCHED PIPES

JOHANNA BERGER, PHI NHUNG NGUYEN THI, NICK GEISLER

21.03.2018



## Inhalt

<b>INHALT</b> .....	<b>1</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>2</b>
<b>2. GRUNDLAGEN</b> .....	<b>3</b>
1.1 TRINKWASSERSYSTEM .....	3
1.2 DRUCKMESSUNG .....	3
1.3 STRÖMUNGSLEHRE .....	4
1.4 BERNOULLI-GLEICHUNG .....	4
<b>2 UMSETZUNG</b> .....	<b>5</b>
2.1 GRUNDLEGENDES PROBLEM.....	5
2.2 MOMENTANE TECHNIK.....	6
2.3 UNSERE LÖSUNG: D.R.O.P .....	7
2.4 AUFTRETENDE PROBLEME.....	8
2.4.1 <i>Druckausgleich im Rohr</i> .....	9
2.4.2 <i>Verbraucher von Lecks unterscheiden</i> .....	10
2.4.3 <i>Viskosität</i> .....	10
2.5 VOR-/ NACHTEILE.....	10
<b>3 UNSER MODELL</b> .....	<b>12</b>
<b>4 AUSBLICK</b> .....	<b>13</b>
<b>5 ANHANG</b> .....	<b>14</b>
5.1 LITERATURVERZEICHNIS .....	14
5.2 EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....	14
5.3 DANKSAGUNG .....	15

## 1 Einleitung

Wasser wird jeden Tag genutzt, ohne dass darauf geachtet wird, wie viel überhaupt verbraucht wird. Jedoch steckt auch oft noch viel mehr Wasser in Nahrungsmittel oder anderen Produkten als wir denken, nämlich das virtuelle Wasser, welches zur Herstellung dieser benutzt wird. Da Wasser begrenzt vorhanden und als Trinkwasser für uns überlebenswichtig ist, sollte es nicht unbedacht verschwendet werden.

Besonders die Schwellenländer mit wirtschaftlichem und industriellem Aufschwung benötigen Hilfe beim effizienten Bau von Infrastruktur und damit auch von Wasserleitungen und Abwassersystemen. In diesen können trotzdem Lecks oder Verstopfungen auftreten und die Lecks sind ebenfalls unnötig verschwendetes Wasser, da ihre Lokalisierung aufwendig und teuer ist. Deshalb haben wir uns eine möglichst kostengünstige Lösung für dieses Problem überlegt.

Das Projekt mit dem Thema „pressure D.R.O.P. – pressure drop rate in overwatched pipes“ beginnt mit einer kurzen Einführung zu den Grundlagen der Strömungslehre sowie der wichtigen Bernoulli-Gleichung. Anschließend werden momentane Probleme genauer erläutert. Dann wird eine existierende Lösung dafür mit ihren Schwachstellen vorgestellt und eine ausführliche Erklärung unseres intelligenten Rohres folgt. Zum Schluss werden die Vor- und Nachteile dieses Systems behandelt.

## 2. Grundlagen

### 1.1 Trinkwassersystem

Bei einem Trinkwassersystem handelt es sich um ein technisches System zum Transport von Wasser über Wasserleitungen. In ihnen herrscht grundsätzlich ein bestimmter Druck, damit das Wasser zu den Verbrauchern transportiert werden kann und auch über Wasserhähne oder ähnliches entnommen werden kann. Um diesen Druck gewährleisten zu können, werden Pumpen oder Hochbehälter verwendet. Die Hochbehälter befinden sich an höher gelegenen Standorten und durch den Schweredruck des darin enthaltenen Wassers herrscht ein bestimmter Druck im Rohrsystem.

Zur Steuerung der Pumpen kommen zwei Methoden zum Einsatz:

Bei der Zweipunktregelung wird, abhängig vom Wasserstand im Hochbehälter, Wasser hinzu gepumpt. In der zweiten Variante wird der Wasserdruck im Versorgungsnetz durch Ein- bzw. Ausschalten der Pumpen oder durch eine Änderung ihrer Drehzahl reguliert.

Für die Wasserrohre gibt es sehr verschiedene Materialien. Früher wurden sehr oft Bleirohre verwendet. Heute sind sie weitestgehend aus dem Netz entfernt worden, da Blei als Schwermetall schädlich für den menschlichen Körper ist. Aktuell werden Materialien wie verzinkter Stahl, Edelstahl, Kunststoffe oder Kupfer verwendet. Das verwendete Material beeinflusst die Reibung zwischen Rohr und Wasser.

### 1.2 Druckmessung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten den Druck in Rohren zu messen. Ziel ist es die Krafteinwirkung pro Fläche analog oder digital auszugeben. Hierzu gibt es 3 Möglichkeiten der Messung: kapazitive Verfahren (Messen der Volumenänderung), induktive Verfahren (Induktion von Spannung) und piezoresistive Verfahren (Druckempfindliche Halbleiter).

Zudem gibt es mehrere Bezugssysteme: Zum einen kann man eine Absolutmessung vornehmen. Hierbei bezieht man sich auf ein Vakuum als Normaldruck. Zum anderen kann man Relativdruckmessung vornehmen. Hierbei wird der Druck der Atmosphäre an der jeweiligen Stelle als Ausgangswert genommen.

### 1.3 Strömungslehre

In der Strömungslehre werden die Gesetzmäßigkeiten der Bewegung aller fluiden Medien abgehandelt. Es gibt große Unterschiede zwischen den fluiden Medien (z.B. Dämpfe, reine Flüssigkeiten...) hinsichtlich der hydrodynamischen Parameter wie Dichte, Viskosität und Kompressibilität. Die Strömungslehre kann grundlegend in Hydrostatik (keine Bewegung) und in Hydrodynamik eingeteilt werden. Letztere kann man noch in die Strömung von kompressiblen Medien (Gase) und in die Strömung von inkompressiblen Medien (Flüssigkeiten) einteilen.

### 1.4 Bernoulli-Gleichung

Die Bernoulli-Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen dem statischen Druck, der Fließgeschwindigkeit und der Höhendifferenz.

Die Herleitung erfolgt über den Energieerhaltungssatz. In jedem Punkt im druckabhängigen System ist die Summe aller Energien gleich. Es gilt:

$$E_{Ges1} = E_{Ges2}$$

Die Gesamtenergie setzt sich aus der kinetischen und der potentiellen Energie sowie der Druckenergie zusammen.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_{pot} = h \cdot m \cdot g$$

$$E_p = V \cdot p$$

$$E_{Ges1} = E_{kin1} + E_{pot1} + E_{p1}$$

$$E_{Ges1} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 + h_1 \cdot m \cdot g + V \cdot p_1$$

Um die Formel nun nicht in Abhängigkeit von V zu betrachten, wird mit V dividiert.

$$E_{Ges1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{V} \cdot v_1^2 + h_1 \cdot \frac{m}{V} \cdot g + \frac{V}{V} \cdot p_1$$

$$\frac{m}{V} = \rho$$

$$E_{Ges1} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + h_1 \cdot \rho \cdot g + p_1$$

Es gilt also insgesamt:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + h_1 \cdot \rho \cdot g + p_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + h_2 \cdot \rho \cdot g + p_2$$

## 2 Umsetzung

### 2.1 Grundlegendes Problem

Die Erde - der blaue Planet - wird nicht ohne Grund so genannt. Die Landfläche und damit auch die Wohnfläche des Planeten macht nur 29% seiner Oberfläche aus, die anderen 71% sind Wasser. Somit kommt die Frage auf, ob nicht doch genug Wasser vorhanden ist. Dies ist nicht so, da das meiste Wasser auf der Erde Salzwasser ist, welches wir kaum nutzen. Nur ca. 2,5% des gesamten Wassers auf dem Planeten sind Süßwasser und werden verwendet.

Es gibt Länder wie Deutschland, die genug Wasser bzw. genug Geld haben, um Wasser zu importieren. Dennoch gibt es auch in reichen Gegenden Wassermangel. Ein wichtiges Beispiel dafür ist Kapstadt in Afrika. Kapstadt ist eine reiche Stadt, jedoch ist der Wasserverbrauch eindeutig zu hoch. Seit Ende 2017 wurde das Wasser in Rationen von 40 Liter pro Person und pro Tag

eingeteilt, da es ansonsten dazu führen kann, dass die bequeme Wasserversorgung aus dem Wasserhahn nicht mehr möglich ist. Hier kann man erkennen, wie wichtig ein sorgsamer Umgang mit dem wertvollen Rohstoff Wasser ist.

Eine Ursache des Wasserverlustes sind Lecks in den Rohren der Wasserleitungen. In manchen Schwellenländern existiert ausreichend Trinkwasser. Dieses wird aber in veralteten Wasserleitungen bzw. neuen Rohren ohne die nötige Technik, um Lecks schnell aufzufinden, transportiert. Wenn die defekten Stellen nicht schnell ermittelt werden, kann der Verlust sehr schnell stark ansteigen. Da Schwellenländer wenig Geld haben, können sie nicht die nötige und sehr teure Technik verwenden. Somit wird der Wasserverlust immer größer und die Wasserknappheit steigt noch weiter.

## 2.2 Momentane Technik

Das momentan verwendete System funktioniert mit Einsatz von magnetisch induktiven Durchflussmessern (kurz MID), welche die Fließgeschwindigkeit innerhalb des Rohres messen können. Durch Vergleich der gemessenen Werte mit der Kontinuitätsgleichung ( $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$ ) wird nun überprüft, ob das Volumen pro Zeiteinheit, welches in das Rohr hineinströmt auch gleich dem Volumen ist, das pro Zeiteinheit aus dem Rohr hinausströmt. Ist dies nicht der Fall, hat das Rohr ein Leck oder eine Verstopfung.

Jedoch hat diese Technik einige Nachteile:

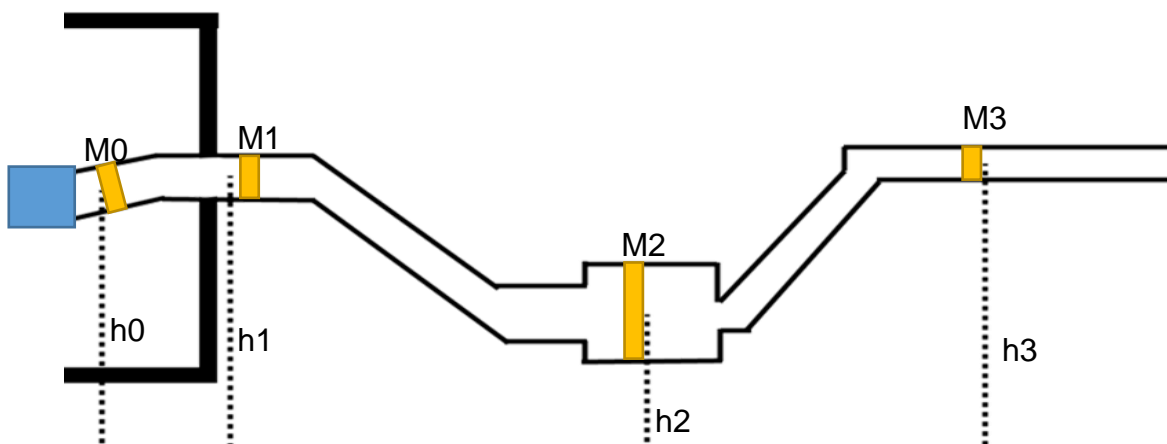
- Durch Wirbelströme an Rohrverengungen oder Rohrvergrößerungen gibt es an solchen Punkten nicht berechenbare Geschwindigkeitsunterschiede. Aus diesem Grund muss man beim Installieren der Sensoren sich deren Lage genau überlegen.
- Die Reibung zwischen Wasser und Rohrwand verursacht einen immer auftretenden Geschwindigkeitsunterschied zwischen dem innen und dem außen strömenden Wasser.



- Die genannten Sensoren sind sehr teuer. Der Stückpreis liegt bei ca. 1.000 €. Würde man beispielsweise die Stadt Ilmenau (Gesamtröhrlänge = 860 km) in 1 km lange Segmente unterteilen, würde das etwa 860.000 € kosten. Die Preise für Datensammlung und -verarbeitung sowie die nötige Mikroelektronik sind noch nicht eingerechnet.

## 2.3 Unsere Lösung: D.R.O.P

Anstelle von MID's werden in frei wählbaren Abständen Drucksensoren angebracht. Das erste Segment muss mit einem MID ausgestattet werden. Mit der Gleichung (siehe 2.2) lässt sich nun aus dem gemessenen Druck  $p_1$  und  $p_2$  sowie der einmalig berechneten Fließgeschwindigkeit  $v_1$  und der einmalig beim Einbau des Sensors zu messenden Höhe des Rohres (Abstand vom tiefsten Punkt des Rohrsystems bis zum Mittelpunkt des Rohres) die Fließgeschwindigkeit  $v_2$  berechnen. Die Dichte des Wassers und die Fallbeschleunigung werden als konstant und gegeben betrachtet.



$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + 2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + \frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}}$$

In der Skizze des Rohrsystems werden stellen die orangenen Rechtecke die Messtationen mit Drucksensoren dar. Das blaue Rechteck am Anfang ist der genannte MID. Ob sich ein Leck im Rohr befindet, lässt sich nun folgendermaßen feststellen:

Man berechnet  $v_1$ , mit  $v_0$  als Startwert (Von Messstation 0 zu Messstation 1 (kurz M0 → M1)). Als nächster Schritt wird nun aus dem berechneten Wert  $v_1$  die Geschwindigkeit  $v_2$  berechnet. Außerdem wird der Wert von  $v_2$  direkt von M0 → M2 berechnet.

Man hat nun also 2 Werte für  $v_2$ :

$v_2$  berechnet aus M0 → M2 =  $v_{2A}$

$v_2$  berechnet aus M0 → M1 → M2 =  $v_{2B}$

Durch den Vergleich beider Werte lässt sich nun feststellen, ob im Segment M0 → M1 ein Leck oder eine Verstopfung aufgetreten ist.

Im Normalzustand müssten beide Werte identisch sein. Ist jedoch der Wert  $v_{2B}$  kleiner als der Wert  $v_{2A}$  muss das Zwischenergebnis bei  $v_{2B}$  kleiner sein (denn beide unterscheiden sich nur durch dieses Zwischenergebnis). Eine solche Verringerung des Zwischenergebnisses ist nur möglich, wenn der gemessene Druck an Sensor 2 verringert hat. Ein Druckabfall wiederum bedeutet: Leck!

Das Ganze gilt auch umgekehrt: Ist der Wert von  $v_{2B}$  größer als der Wert von  $v_{2A}$  bedeutet das eine Druckzunahme, also eine Verstopfung.

Diese Rechenschritte lassen sich für eine beliebige Anzahl Rohrsegmente wiederholen. Man geht nacheinander alle Segmente durch und rechnet mit dem vorhergehenden Wert für die Geschwindigkeit weiter.

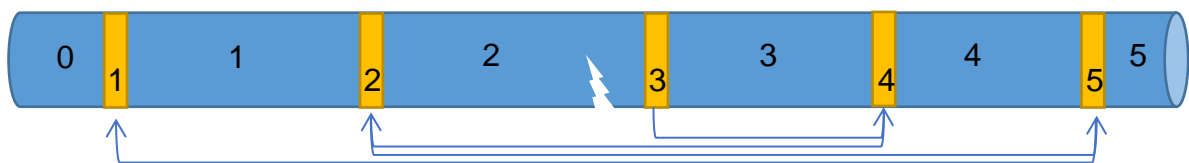
## 2.4 Auftretende Probleme

Das beschriebene Verfahren hat noch einige Probleme, die beachtet werden müssen.

### 2.4.1 Druckausgleich im Rohr

Die Rechenschritte sind nur dann möglich, wenn an einem Sensor ein Druckabfall gemessen wird. Der Druckunterschied bleibt jedoch nicht im jeweiligen Segment eingesperrt. Nach einiger Zeit wird der Druckabfall auch an umliegenden Sensoren messbar sein.

Der Druckabfall breitet sich also im System aus. Nacheinander werden folgende Messtationen ein Leck anzeigen:



Allerdings wird immer nur genau ein Leck gefunden, wie man in dieser (theoretischen) Tabelle sehen kann. Das liegt daran, dass, nachdem sich der Druck auf 2 Stationen ausgeglichen hat, bei diesen kein Leck mehr angezeigt wird.

Druckverlauf	Ergebnisverlauf	Messwertverlauf
Druck überall normal	alles normal	alles OK
Druckabfall Sensor 3	$v_3$ wird kleiner	Leck in Segment 2
Druckabfall Sensor 2	$v_3$ gleicht sich aus $v_2$ wird kleiner	Leck in Segment 1
Druckabfall Sensor 4	$v_4$ wird kleiner	Leck in Segment 3
Druckabfall Sensor 1	$v_2$ gleicht sich aus $v_1$ wird kleiner	Leck in Segment 0

Man muss also lediglich den Druckabfall zurückrechnen auf das Epizentrum des Druckabfalls (Druck breitet sich wellenartig aus) um das Segment mit dem Leck zu ermitteln.

#### 2.4.2 Verbraucher von Lecks unterscheiden

Um Verbraucher von Lecks zu unterscheiden, muss ein weiterer Drucksensor an jedem Abzweig zu einem Verbraucher angebracht werden. Im Gegensatz zum System mit den MID's stellt das jedoch kein großes Problem dar, da die Kosten nur wenig ansteigen. Die Verbraucherstationen müssen lediglich alle registriert sein. Dann kann man im Falle einer Druckabnahme sagen, ob diese vom Segment des Verbrauchers ausgeht (= normaler Verbrauch) oder nicht (= Leck).

#### 2.4.3 Viskosität

In der strömenden Flüssigkeit treten Reibungskräfte auf. Die Reibung der einzelnen Wassermoleküle an sich nennt sich Viskosität. Außerdem gibt es noch Reibung zwischen Wasser und Rohrwand.

All diese Kräfte wirken sich auch auf den Druck im Rohr aus. Druck ist definiert mit Kraft pro Fläche, die Reibungskraft wirkt immer entgegen der Normalkraft und somit wird, nur durch das Fließen des Wassers, der Druck stetig kleiner. Doch diesen Druckabfall kann man berechnen.

Es muss nur die Länge, das Material und der Durchmesser des Rohrsegmentes bekannt sein, um den Standarddruckverlust zu ermitteln und zu subtrahieren.

### 2.5 Vor-/ Nachteile

Die eben erläuterte Möglichkeit hat einige entscheidende Vorteile:

- Es spielt keine Rolle wo und in welchen Abständen die Sensoren angebracht werden.
- Wirbelströmungen und Geschwindigkeitsunterschiede durch Reibung sind keine maßgebliche Fehlerquelle, sondern verfälschen die Werte nur minimal.

- Durch die deutlich geringeren Stückpreise (ca. 50 €) ist das Verfahren sehr kostengünstig.
- Da die Gleichung universell für jedes inkompressible, strömende Medium gilt, lässt sich die Methode 1:1 beispielsweise auch auf Ölpipelines anwenden.

Dies sind einige sehr entscheidende Vorteile, gerade gegenüber dem momentan verwendeten System. Jedoch gibt es auch einige Nachteile, gerade was den Einbau des Systems betrifft:

- Um einen Sensor am Rohr anzubringen, muss man das Rohr freilegen. (Es wäre natürlich sinnvoll das Rohrnetzwerk Stück-für-Stück zu erneuern.)
- Die Sensoren brauchen eine Energieversorgung die möglicherweise noch hinzugefügt werden muss (normalerweise verlaufen Frischwasserleitungen nicht parallel zu Stromkabeln).
- Zwar können die Sensoren an jeder beliebigen Stelle angebracht werden, an dieser müssen dann aber auch alle 3 Komponenten (Abstand zum letzten Sensor, Rohrhöhe, Verbraucher [ja/nein]) registriert werden.

### 3 Unser Modell

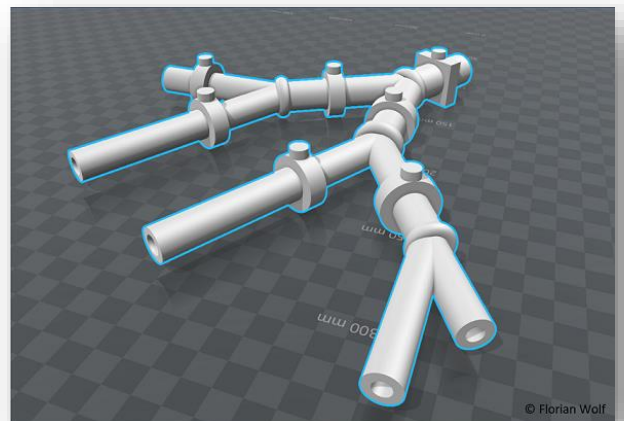
Um unser Projekt möglichst anschaulich nachzubauen, haben wir beschlossen ein Rohrsystem so gut wie möglich nachzubauen. Wir verwenden durchsichtige PVC Schläuche (3/4 Zoll) und Ventile für den Wassertransport und Ventile als Simulation für Verbraucher oder Lecks. Mit Drucksensoren, die wir von der TU-Ilmenau zur Verfügung gestellt bekommen haben, und einigen Arduino Nanos lesen wir mit 10 Messwerten pro Sekunde den Druck im Schlauch aus. Hinter jedem Rohrsegment befindet sich ein LED-Streifen. Dieser wird durch die Arduinos in dem Segment in dem ein Leck auftritt auf Rot geschaltet.

Um die Funktionsfähigkeit zu demonstrieren, verwenden wir bei der Programmierung den oben erläuterten Algorithmus zum Ausfindigmachen des Lecks. Allerdings wird die Rohrreibung und die Viskosität aufgrund der geringen Strecke vernachlässigt.

## 4 Ausblick

In Zukunft ist es unser Wunsch, dass Projekt unter realen Bedingungen zu testen um es weiterhin zu verbessern (Grenzwerte ermitteln, Messwerte auslesen, unbedachte Fehlerquellen finden, etc.) um es als fertiges Produkt zu veröffentlichen.

Hierzu befinden wir uns momentan in Zusammenarbeit mit der TU Ilmenau und BN Automation AG. Wir wollen die dortigen Anlagen nutzen, um den exakten Druckverlauf zu messen und um die berechneten Druckunterschiede durch Reibung zu überprüfen.



Bewährt sich das System, hoffen wir, dass es regional und auch global Verwendung findet und allmählich nachgerüstet wird. Da ein gutes Wasserrohr etwa 50 Jahre alt wird, könnte bis 2080 (sollte bis dahin nicht ein noch effizienteres System entwickelt werden) unser System in den Wasserversorgungen dieser Welt Einsatz finden und den leckbedingten Wasserverlust zumindest teilweise reduzieren.

## 5 Anhang

### 5.1 Literaturverzeichnis

Professor Dr. Axel Brehm, „**Universität Oldenburg - Praktikum der Technischen Chemie Strömungslehre**“, kein Datum angegeben, [online].

Verfügbar unter:

<http://www.gmehling.chemie.uni-oldenburg.de/Praktikum/Stroemungslehre.pdf>

[Zugriff am 15.01.2018]

Dr. R. Göbel, E. Eichler, H. Buscherowsky, Dr. H. Menschel, W. Steinrück, W. Damm, P. Glatz „**Physik in Übersichten**“, 1972, Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin; 10. Auflage

kein Autor angegeben, „**Virtuelles Wasser**“, kein Datum angegeben, [online].

Verfügbar unter:

<https://www.water-for-africa.org/de/wassermangel/articles/virtuelles-wasser.html>

[Zugriff am 15.01.2018]

<http://www.meisinger-ingenieurleistungen.de/trinkwasserinstallation-rohrleitungsmaterialien-im-vergleich/>

[Zugriff am 17.03.18]

<https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserverteilungssystem>

[Zugriff am 17.03.18]

### 5.2 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichern wir, dass wir die vorliegende Facharbeit selbstständig verfasst haben und keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen verwendet haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.



Nick Geisler

Phi Nhung Nguyen Thi

Johanna Berger

### 5.3 Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei allen bedanken, die uns bei der Anfertigung der Facharbeit unterstützt haben. Wir möchten uns recht herzlich bei Computer System GmbH für die Unterstützung in Hinsicht des gesponserten 3D Druckers für die Schule bedanken. Weiterhin bedanken wir uns bei unseren Fachlehrern Herrn Tobias Kellner und Frau Bianca Krämer für ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung. Außerdem bedanken wir uns direkt bei Florian Wolf für die Bereitstellung des 3D Modells. Zuletzt bedanken wir uns noch bei unseren Familien, Freunden und am meisten bei unserem FLL-Team für ihre Unterstützung und Geduld.