



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences

**Ermittlung von tideabhängigen Gebietsentwässerungsdaten in baulich
unveränderbaren Pumpwerken**

Bachelorarbeit

im Studiengang

Umwelttechnik

Vorgelegt von

Jan Hörster



Itzehoe

am 01. Oktober 2021

Gutachter: Prof. Dr. Carsten Frank (HAW Hamburg)

Gutachter: Master of Science Martin Peters (Holcim (Deutschland) GmbH)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen zur Erhebung von Wasserhaushaltsdaten	3
2.1	Abfluss und Durchfluss	3
2.2	Wassereinzugsgebiet Pumpwerk Kronsmoor	3
2.3	Landschaftswasserhaushalt	5
2.4	Haude-Formel zur Berechnung der Evapotranspiration	6
2.5	Durchflussmessung.....	7
2.5.1	Auswahl Durchflussmesssysteme im offenen Gerinne.....	7
2.5.2	Auswahl Durchflussmesssysteme im Druckrohr	9
2.5.3	Vergleich der Ultraschallmessung nach Doppler- und Laufzeitdifferenzverfahren	10
2.5.4	Ultraschallmessung nach dem Laufzeitdifferenzverfahren	11
2.5.5	Störeinflüsse auf die Ultraschall-Laufzeitdifferenzmessung.....	13
2.6	Drucksonden zur Wasserstandsmessung.....	14
2.7	Microcontroller zur Pumpenlaufzeiterfassung.....	15
3	Messungen am Pumpwerk Kronsmoor	16
3.1	Technischer Aufbau Pumpwerk Kronsmoor.....	17
3.2	Durchführung der Kalibriermessung	18
3.2.1	Auswahl der Messstelle und Messanordnung	18
3.2.2	Messdurchführung mit dem Ultraschallmessgerät.....	19
3.2.3	Durchführungszeitraum der Messung	20
3.3	Ermittlung der Pumpenlaufzeiten	20
3.3.1	Messaufbau der Lichtschranke	20
3.3.2	Signalverarbeitung des Microcontrollers.....	21
4	Berechnungen und Ergebnisse	22
4.1	Erstellung der Kalibrierfunktion	22
4.1.1	Messintervall der Volumenströme.....	22
4.1.2	Erhebung der Wasserpegel	23
4.1.3	Erstellung der Kalibrierfunktionen	24
4.2	Überprüfung der Kalibrierfunktionen.....	25
4.3	Rückfluss aus der Stör.....	27

4.4	Durchflussbestimmung mittels Pumpenlaufzeiten	27
4.4.1	Ermittelte tägliche Pumpenlaufzeiten	27
4.4.2	Numerische Integration zur Berechnung der geförderten Volumenströme	28
4.5	Ermittlung des Volumenstromes auf Grundlage der Wasserspiegeldifferenzen.....	29
4.6	Niederschlag im Messzeitraum	31
4.7	Wasserhaushalt im Messzeitraum	32
5	Diskussion	33
	Fazit und Ausblick.....	37

Abkürzungsverzeichnis

LLUR-SH	Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein
MID	Magnetisch – induktive Durchflussmessung
NHN	Normal-Höhen-Null
WSP	Wasserspiegel

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich zwischen dem Laufzeitdifferenz- und Dopplerfahren bei Ultraschallmessgeräten	10
Tabelle 2: Auszug der Ergebnisse der Wasserpegelerhebung	24
Tabelle 3: Auszug der ermittelten Volumenströme in Abhängigkeit der Wasserpegel zur Erstellung der Kalibrierkurven.....	24
Tabelle 4: Auszug der Daten zur Überprüfung der Kalibrierfunktionen	26
Tabelle 5: Vergleich der Ergebnisse zur Überprüfung der Kalibrierfunktionen.....	26
Tabelle 6: Vergleich zwischen der Volumenstromermittlung durch Funktion 4.5 und 4.6.....	31
Tabelle 7: Vergleich der Funktionen 4.2 und 4.4 mit den Funktionen 4.3 und 4.5 bei Außenpegelständen im oberen Definitionsbereich	33
Tabelle 8: Betrachtung der Funktion 4.4 und 4.3 oberhalb des Definitionsbereiches	34
Tabelle 9: Wertepaare zur Ermittlung der Abhängigkeit zwischen der Tide und dem geförderten Volumenstrom	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wassereinzugsgebiet des Pumpwerkes Kronsmoor (in Anlehnung an [Deich- und Hauptsielverband Südwestholstein 2021])	4
Abbildung 2: Schematische Abflussbildung eines Einzugsgebietes [Eckhardt 2014]	5
Abbildung 3: Schallweg des Signals in Flussrichtung [Flexim 2020]	11
Abbildung 4: Durchstrahlanordnung des Sensorpaares [Flexim 2020]	13
Abbildung 5: Reflexanordnung des Sensorpaares [Flexim 2020]	13
Abbildung 6: Prinzip der Absolutdruckmessung [Morgenschweis 2018]	14
Abbildung 7: Schematischer Aufbau des Pumpwerkes mit den Drucksonden	16
Abbildung 8: Technische Zeichnung Pumpwerk Kronsmoor [Deich- und Hauptsielverband Südwestholstein 2021]	18
Abbildung 9: Messanordnung des Ultraschallmessgerätes am Steigrohr	19
Abbildung 10: Messaufbau der Lichtschranke an der Kupplung der Pumpe	21
Abbildung 11: Ermittlung der Wasserpegel	23
Abbildung 12: Kalibrierfläche der Funktion 4.2	25
Abbildung 13: Täglichen Pumpenlaufzeiten im Pumpwerk Kronsmoor	28
Abbildung 14: Vergleich der Volumenströme	29
Abbildung 15: Ermittlung der Funktion zur Berechnung der Volumenströme über die Pegeldifferenz	30
Abbildung 16: Tagesverteilung der Niederschläge	32
Abbildung 17: Wasserhaushalt im Einzugsgebiet des Pumpwerks Kronsmoor im Messzeitraum	32
Abbildung 18: Korrelation zwischen Niederschlag und gefördertem Volumenstrom	36

1 Einleitung

Die Gebietsentwässerung stellt ein Teilgebiet des Wasserbaus dar, deren Grundlage unter anderem die Hydrologie und Hydrometrie sind [[Gonsowski 2011](#)]. Im Allgemeinen lässt sich zwischen der Siedlungsentwässerung und der landwirtschaftlichen Entwässerung differenzieren. Das Ziel der Siedlungsentwässerung ist es, Abwasser aus Siedlungsgebieten in eine Abwasserreinigungsanlage oder eine Vorflut zu leiten. [[Gujer 2007](#)]. Die landwirtschaftliche Entwässerung wird durchgeführt, um Kulturpflanzen in Folge eines hohen Grundwasserspiegels oder einer ungenügenden Versickerung der Niederschläge in schwer durchlässigen Böden nicht durch übermäßige Bodennässe zu schädigen. Dies wird entweder durch Dränung oder eine Grabenentwässerung realisiert. Die Dränung ist ein verdecktes Entwässerungssystem, bei dem vergrabene Rohre zur Abführung des Wassers eingesetzt werden. Bei der Grabenentwässerung wird das Wasser in Beetgräben, die gleichmäßig zwischen den Feldern verteilt sind, gesammelt und über größere Sammelgräben in einen Vorfluter geleitet [[Gonsowski 2011](#)]. Liegt der Vorfluter höher als der Sammelgraben, werden oftmals Propellerpumpen für die Förderung von großen Volumenströmen in Entwässerungsanlagen eingesetzt [[Gulich 2013](#)]. Das überwiegend landwirtschaftlich genutzte Gebiet um das Pumpwerk Kronsmoor wird über ein Grabensystem entwässert. Das dem Pumpwerk zugeflossene Wasser wird über zwei Propellerpumpen in die tidebeeinflusste Stör gefördert.

Im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens für ein weiteres Kreideabbaugebiet der Holcim (Deutschland) GmbH ist es notwendig ein Grundwassermodell zu erstellen. Anhand dieses Modells lassen sich die Einflüsse solcher Baumaßnahmen auf das Grundwasser prognostizieren. Das Untersuchungsgebiet, welches über die Grenzen der Kreidegrube hinaus geht, wird dazu in mehrere kleine, untereinander verbundene Teilgebiete diskretisiert [[Ifu o. Angabe](#)]. Das Wassereinzugsgebiet des Pumpwerkes Kronsmoor ist eines dieser Teilgebiete. Die in dieser Arbeit ermittelten Gebietsentwässerungsdaten sind die Basis zur Berechnung des Wasserhaushaltes im Einzugsgebiet Kronsmoor, welcher wiederum im Kontext mit dem Grundwassermodell steht [[Ifu o. Angabe](#)].

Am Pumpwerk Kronsmoor werden die in die Stör geförderten Volumenströme bisher nicht gemessen. Bei der Ermittlung dieser Volumenströme ist eine Abhängigkeit zwischen dem geförderten Volumenstrom der Axialpumpe und dem Pegelstand in der Stör zu erwarten, da

die Pumpen unabhängig von der Tide immer am Leistungsmaximum arbeiten, sich jedoch die Wassersäule über dem Auslass ständig verändert. Der Einfluss des Innenpegelstandes auf die Pumpenleistung ist ebenfalls zu untersuchen. Zudem stellt der Deich- und Hauptsielverband Südwestholstein, Betreiber des Pumpwerkes, die Prämisse, dass keine baulichen Veränderungen der Anlage vorgenommen werden. Dementsprechend besteht die Herausforderung darin, eine nicht-invasive Volumenstrommessung vorzunehmen, welche den Einfluss der ständig verändernden Wasserpegel innen- und außendeichs berücksichtigt.

Da zu dieser sehr individuellen Problemstellung keine einschlägige Literatur verfügbar ist, dient die vorliegende Arbeit dazu, eine messtechnische Lösung vorzustellen, mit der sich die Volumenströme über einen langen Zeitraum mit einem vertretbaren Aufwand indirekt ermitteln lassen. Um aus den ermittelten Messdaten den Volumenstrom zu berechnen, stehen zwei verschiedene mathematische Verfahren zur Auswahl. Diese werden kritisch betrachtet, um für den vorliegenden Fall das geeignetste Verfahren zu bestimmen. Zudem werden die ermittelten Volumenströme mit einer Wasserhaushaltsbetrachtung auf Plausibilität geprüft. Die ermittelten Entwässerungsdaten dienen im weiteren als Grundlage zur Erstellung des Grundwassermodells im Teilgebiet. Die Erstellung des Grundwassermodells ist nicht Umfang dieser Arbeit.

Zunächst werden im zweiten Kapitel dieser Bachelorarbeit grundlegende Begriffe aus der Hydrometrie sowie Hydrologie definiert und die Prozesse im Wasserhaushalt erläutert. Außerdem wird auf die Auswahl des verwendeten Durchflusssystemes näher eingegangen und ein Grundwissen zu den genutzten messtechnischen Geräten geschaffen. Das dritte Kapitel thematisiert den Aufbau und die Durchführung der Messungen am Pumpwerk Kronsmoor. Kapitel [4](#) beinhaltet die Vorgehensweise zur Erstellung einer Kalibrierfunktion, auf deren Basis sich die geförderten Volumenströme in Abhängigkeit der Innen- und Außenpegel bestimmen lassen. Außerdem wird der Durchfluss auf Grundlage der aufgezeichneten Pumpenlaufzeiten und zuvor erstellten Kalibrierfunktion ermittelt. Weitergehend wird ein alternativer mathematischer Ansatz zur Ermittlung der Volumenströme vorgestellt und der Wasserhaushalt im Messzeitraum betrachtet. In Kapitel [5](#) wird der Einfluss des Innen- und Außenpegels auf den geförderten Volumenstrom der Pumpe belegt und die Plausibilität der gemessenen Volumenströme im Kontext des Wasserhaushalts bewiesen. Eine Zusammenfassung der Auswertung und eine Handlungsempfehlung für zukünftige Durchflusssysteme an Pumpwerken beschließen in Kapitel [6](#) diese Arbeit.

2 Grundlagen zur Erhebung von Wasserhaushaltsdaten

Nachfolgend werden die für diese Arbeit wichtigsten Begriffe aus der Hydrologie und Hydrometrie definiert, die Auswahl des verwendeten Messsystems erläutert und technisches Basiswissen zum Verständnis der verwendeten Messtechnik geschaffen.

2.1 Abfluss und Durchfluss

In der Hydrologie wird unter anderem zwischen dem Abfluss und dem Durchfluss unterschieden. Der Abfluss bezeichnet den gesamten Volumenfluss je Zeiteinheit, den das Einzugsgebiet ober- und unterirdisch verlässt. Der Durchfluss hingegen ist das Wasservolumen, das pro Zeiteinheit einen Oberflächengewässerquerschnitt durchfließt. Dementsprechend ist der Durchfluss als eine Teilkomponente des Abflusses zu verstehen [Dyck et al. 1983]. Beide Größen werden mit Q abgekürzt und erhalten in Abhängigkeit der Größe des Volumenstromes die gleiche Einheit $\frac{m^3}{s}$ oder $\frac{l}{s}$. Zur Berechnung des Durchflusses wird folgende Formel verwendet [Morgenschweis 2018]:

$$Q = V \cdot A \quad (2.1)$$

mit

$$Q = \text{Volumenstrom} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$V = \text{Fließgeschwindigkeit} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$A = \text{durchflossener Querschnitt} [m^2]$$

2.2 Wassereinzugsgebiet Pumpwerk Kronsmoor

Die beiden häufigsten hydrologischen Systeme sind abgrenzbare Gewässer(-teile), wie z.B. stehende Gewässer und Einzugsgebiete von Gewässern [Dyck et al. 1983]. Wassereinzugsgebiete sind definiert als das gesamte Gebiet, welches von einem Fluss- oder Grabensystem drainiert wird [Dracos 1980]. Begrenzt wird das Einzugsgebiet in der Regel durch Wasserscheiden. Ober- und unterirdische Wassereinzugsgebiete können dabei unterschiedliche Ausdehnungen aufweisen. Bei gegebenen Systemeingängen, wie beispielsweise Niederschlägen oder Strahlung, lassen sich die Systemausgänge wie Abfluss oder Verdunstung berechnen bzw. vorhersagen [Dyck et al. 1983].

Das Verbandsgebiet des Deich- und Hauptsielverbandes Südwestholstein wird in drei Duchten unterteilt. Einer der Duchten stellt das Wassereinzugsgebiet des Pumpwerkes Kronsmoor dar, welches in Abbildung 1 gelb hinterlegt ist. Es ist zu erkennen, wie das Wasser in den Beetgräben zwischen den Feldern gesammelt wird und über Sammelgräben zum Pumpwerk Kronsmoor geleitet wird. Die Stör, in die das Einzugsgebiet entwässert wird, stellt gleichzeitig die Grenze und den Systemausgang des Gebietes im Norden dar. Die Verbandsgrenze des Deich- und Hauptsielverbandes Südwestholstein ist im Osten die Grenze des Einzugsgebietes. Im südlichen und südwestlichen Teil wird das Gebiet durch den Breitenburger Kanal begrenzt. Die Duchtgrenze ist in dieser Karte zwar geradewegs durch die in Feld fünf befindliche Kreidegrube Saturn gezogen, jedoch ist diese Grenzziehung ungenau, da das gesamte Oberflächen- und Grundwasser der Kreidegrube über das Pumpwerk Breitenburg entwässert wird. Damit verringert sich das Wassereinzugsgebiet Kronsmoor um den östlichen Teil der Kreidegrube Saturn. Die Grenze des Einzugsgebietes verläuft abweichend von der Zeichnung in diesem Teilstück entlang der Grubenkante. Das gesamte Wassereinzugsgebiet Kronsmoor, abzüglich des Teilstückes der Grube Saturn, umfasst eine Fläche von $5,155 \text{ km}^2$. Diese Fläche wird auch für weitergehende Berechnungen in der vorliegenden Arbeit herangezogen.

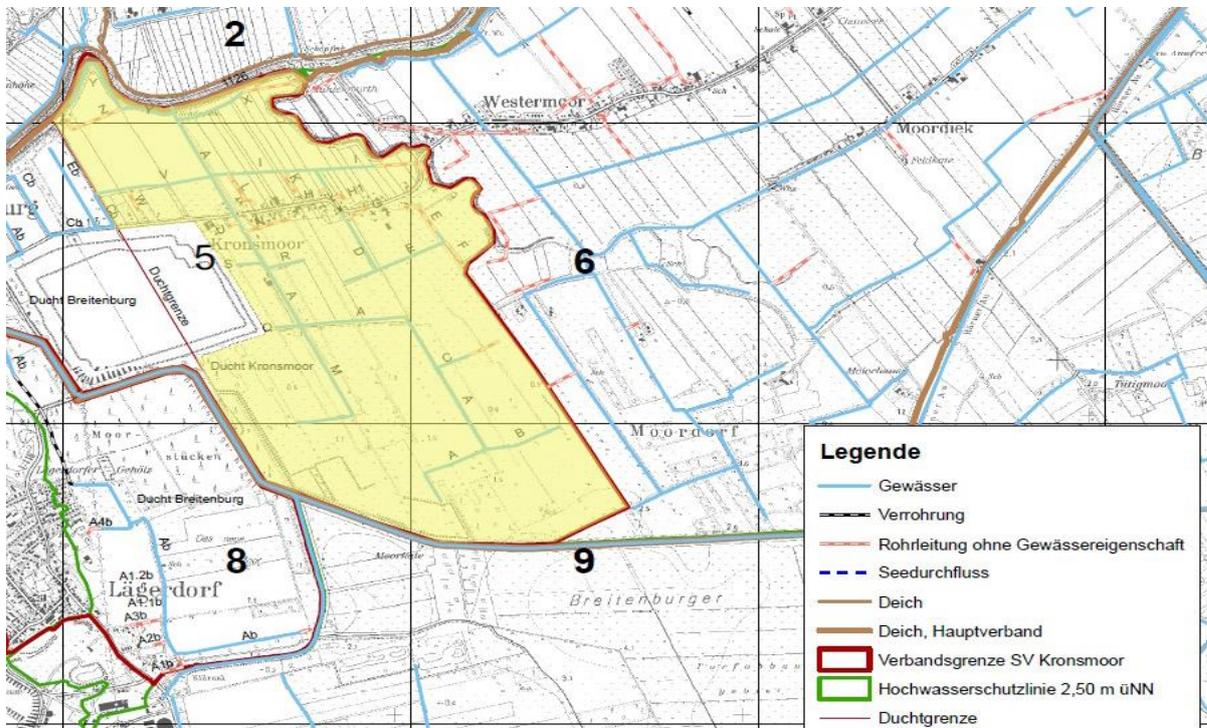


Abbildung 1: Wassereinzugsgebiet des Pumpwerkes Kronsmoor (in Anlehnung an [Deich- und Hauptsielverband Südwestholstein 2021])

2.3 Landschaftswasserhaushalt

Alle Prozesse, die Wasser in einer Landschaft bzw. in einem Einzugsgebiet erfährt, können unter dem Begriff Landschaftswasserhaushalt zusammengefasst werden [Eckhard 2014]. Der Wasserhaushalt beschreibt das Zusammenwirken vom Niederschlag, der Evapotranspiration, dem Abfluss sowie dem Speichervermögen des Bodens in einem Wassereinzugsgebiet [Dyck et al. 1983].

Der Wassereintrag in ein Einzugsgebiet erfolgt primär durch Niederschlag, beispielsweise in Form von Regen, Schnee oder Tau. Dieser trifft zunächst, wie in Abbildung 2 dargestellt, auf die über dem Erdboden befindliche Vegetationsdecke und benetzt diese oder bleibt in fester Form auf ihr liegen. Ein Teil dieses Niederschlages kann von dort aus durch Verdunstung oder Sublimation als Wasserdampf an die Atmosphäre zurückgegeben werden. Infolge dieses Vorganges, welcher als Interzeptionsverdunstung bezeichnet wird, erreicht nicht der gesamte Niederschlag den Boden. Hierbei wird zwischen dem Freiland- und Bestandsniederschlag differenziert. Mit ersterer ist der Niederschlag definiert, der oberhalb der Vegetationsdecke ohne Minderung durch die Interzeptionsverdunstung fällt. Der Bestandsniederschlag ist jener Niederschlag, welcher auf den Erdboden gelangt [Eckhard 2014].

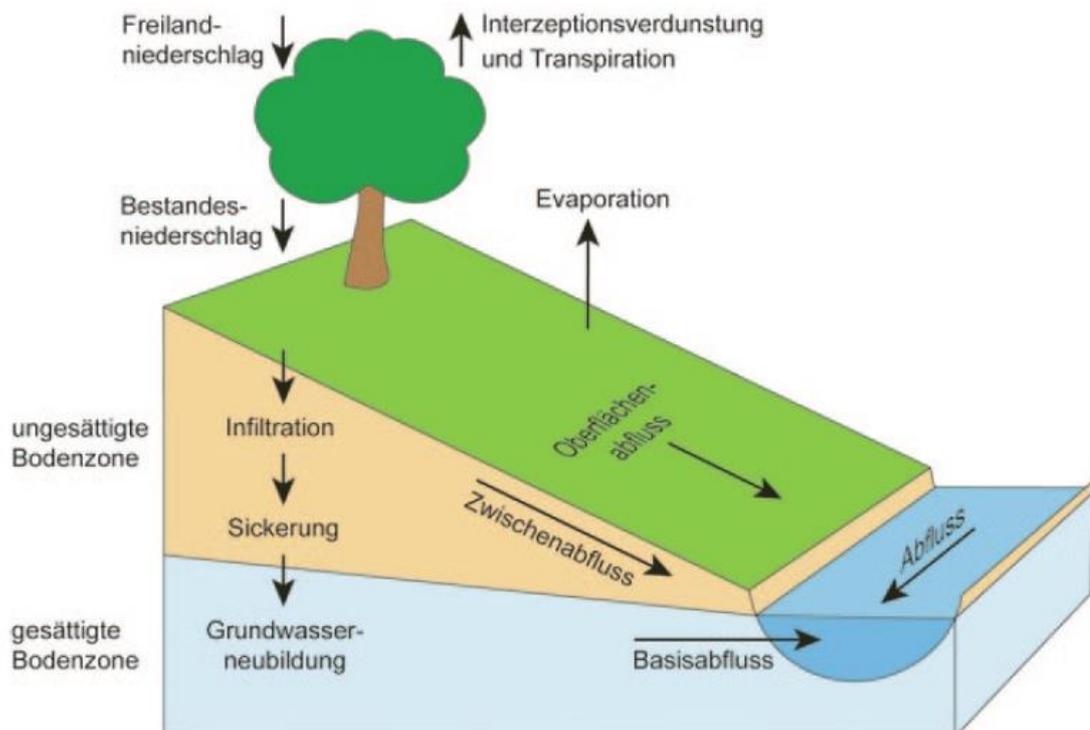


Abbildung 2: Schematische Abflussbildung eines Einzugsgebietes [Eckhardt 2014]

Die Bodenoberfläche stellt durch wassergefüllte Vertiefungen oder Schneedecken ebenfalls einen Wasserspeicher dar, von der sich bei geneigter Oberfläche ein Oberflächenabfluss durch Regen- oder Schmelzwasser bilden kann [[Eckhard 2014](#)].

Ein Teil des Bestandsniederschlags verdunstet, sublimiert oder fließt von der Bodenoberfläche ab, der andere infiltriert in die ungesättigte Bodenzone. Diese Erdschicht weist Porenräume auf, welche nicht vollständig mit Wasser gefüllt und daher ungesättigt sind. Entweder das Wasser wird in den Porenräumen gespeichert, sickert weiter in tiefer liegende Bodenzonen, fließt als Zwischenabfluss in ein Gewässer oder wird durch Pflanzenwurzeln aufgenommen und über die Blätter transpiriert [[Eckhard 2014](#)].

Unter der ungesättigten Bodenzone befindet sich die gesättigte Bodenzone. Diese zeichnet sich durch wassergefüllte Porenräume aus, dessen zusammenhängender Wasserkörper als Grundwasser bezeichnet wird. Somit stellt dasjenige Sickerwasser, welches diese Bodenzone erreicht, die Grundwasserneubildung dar. Allerdings kann durch den Kapillareffekt auch Grundwasser wieder in die ungesättigte Bodenzone gefördert werden. Da die Oberflächengewässer zumeist in Verbindung mit dem Grundwasser stehen, setzt sich dessen Abfluss aus den drei Komponenten Oberflächen-, Zwischen- sowie Grundwasserabfluss zusammen [[Eckhard 2014](#)]. Da das Gelände im Wassereinzugsgebiet Krons Moor als vollständig plan anzusehen ist, findet dort kein Zwischenabfluss statt [[Iwanoff 2021](#)].

Die Verdunstung von Oberflächen wie der Vegetationsdecke, des Bodens oder von Gewässern wird allgemein als Evaporation bezeichnet. Der Begriff Evapotranspiration umfasst die Evaporation und die Transpiration der Pflanzen. Aus den vorangegangenen Sachverhalten lässt sich folgende Beziehung aufstellen [[Eckhardt 2014](#)]:

$$\text{Abfluss} = \text{Freilandniederschlag} - \text{Evapotranspiration}$$

2.4 Haude-Formel zur Berechnung der Evapotranspiration

Für die Plausibilitätsprüfung der ermittelten Volumenströme des Wasserhaushaltes ist es nötig die Evapotranspiration zu berechnen. Die zur Berechnung nötigen Daten werden von einer Wetterstation aufgezeichnet. Zunächst wird mit Hilfe der um 14:00 Uhr gemessenen Temperatur der Dampfdruck e_s ermittelt [[Abteu 2013](#)]. Diese Größe ist nötig, um die Evapotranspiration nach der Haude-Formel zu berechnen [[Maniak 2016](#)]:

$$ET_H = f_H \cdot e_s \left(1 - \frac{r}{100}\right) \quad (2.1)$$

mit

$f_H = \text{Haude} - \text{Faktor} [-]$

$e_s = \text{Dampfdruck} [\text{mm Hg}]$

$r = \text{relative Luftfeuchte gemessen um 14:00 Uhr} [\%]$

Der Haude-Faktor ist eine empirisch bestimmte Größe und abhängig von der Jahreszeit und Vegetation des betrachteten Gebiets [[Maniak 2016](#)].

2.5 Durchflussmessung

Es ist nicht möglich, den Durchfluss direkt zu messen, sondern dieser muss aus einer anderen Messgröße indirekt ermittelt werden. Dementsprechend definiert der Begriff Durchflussmessung die Messung einer verfahrensspezifischen Messgröße mit anschließender Berechnung zur Ermittlung des Durchflusses [[Berger et al. 2013](#)].

Um eine systematische Auswahl des geeigneten Messverfahrens zu treffen, ist es zunächst nötig, die Anforderungen zu definieren. Der Durchfluss soll während des Pumpbetriebes im Pumpwerk oder Entwässerungsgraben gemessen werden. Im Fall einer Messung im Pumpwerk ist die oberste Priorität, dass weder die Pumpen- noch die Elektroanlage zum Einbau von Messgeräten oder anderen Bauteilen, wie Relais, verändert werden dürfen. Außerdem soll das Messsystem flexibel mit geringem Installationsaufwand an weiteren Pumpwerken oder Entwässerungsgräben einsetzbar sein. Der maximal 0,80 m tiefe Entwässerungsgraben ist ein stehendes Gewässer, welches selbst während des Pumpenbetriebes nur eine sehr geringe Fließgeschwindigkeit aufweist. Zudem ist es stark mit Algen und Wasserpflanzen bewachsen.

In den folgenden zwei Unterkapiteln werden verschiedene Durchflussmesssysteme für offene Gerinne und Druckrohre vorgestellt und bezüglich ihrer Anwendbarkeit in der vorliegenden Messsituation bewertet.

2.5.1 Auswahl Durchflussmesssysteme im offenen Gerinne

Ein sehr vielseitig einsetzbares Messgerät zur Durchflussermittlung ist der Messflügel. Bei jeder Flügelumdrehung pro Zeiteinheit detektiert die Zählvorrichtung einen Impuls und errechnet daraus über eine gerätespezifische Umrechnungsformel die Fließgeschwindigkeit [[Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser 2018](#)].

Ein weiteres Verfahren zur Ermittlung des Durchflusses ist die Tracermessung. Hierbei wird ein Markierungsstoff, der Tracer, in das Wasser eingebracht und der Durchfluss anhand des Verdünnungsgrades stromab ermittelt [[Berger et al. 2011](#)].

Eine Oberflächen-Radarmessung kann ebenfalls zur Durchflussermittlung dienen. Das nach dem Dopplereffekt arbeitende Messgerät sendet elektromagnetische Wellen aus und ermittelt die lokale Fließgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche aus der Differenz der abgestrahlten und reflektierten Frequenz [[Morgenschweis 2018](#)].

Akustische Verfahren nach dem Doppler- oder Laufzeitdifferenzverfahren, dessen Messprinzip in Kapitel [2.5.4](#) näher erklärt wird, messen den Durchfluss anhand von Ultraschallwellen, die entweder von Partikeln oder Gasblasen im Wasser reflektiert werden oder den gesamten Gewässerquerschnitt zweimal durchlaufen und eine Laufzeitdifferenz aufweisen [[Morgenschweis 2018](#)].

Messwehre, besonders der Dreiecksüberfall, eignen sich zur Messung von sehr kleinen Durchflüssen [[Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser 2018](#)]. Dabei wird der Wasserspiegel angehoben und der Durchfluss lässt sich auf Grundlage der Überfallhöhe bestimmen [[Dyck et al. 1983](#)].

Aus Gründen der Gewässereigenschaften des Sammelgrabens sind der Messflügel und die Oberflächen-Radarmessung nicht einsetzbar. Die geringe Wassertiefe und der starke Pflanzenbewuchs machen den Einsatz des Messflügels unmöglich, die für die Durchführung einer Oberflächen-Radarmessung notwendige Mindestfließgeschwindigkeit von ca. $0,3 \frac{m}{s}$ des Gewässers kann nicht gewährleistet werden [[Morgenschweis 2018](#)]. Die Tracermessung ist aus zeitlichen Gründen für die vorliegende Arbeit nicht durchführbar, da eine Antragstellung bei der zuständigen Wasserbehörde nötig ist. Die Ultraschallmessungen nach dem Doppler- und Laufzeitdifferenzverfahren sowie der Bau eines Dreiecksmesswehres erfordern einen zu hohen Vorbereitungs- und Installationsaufwand [[Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser 2018](#)]. Diese Messungen können nicht flexibel an Sammelgräben bzw. Pumpwerken durchgeführt werden.

2.5.2 Auswahl Durchflussmesssysteme im Druckrohr

Ein sehr genaues Messprinzip zur Durchflussmessung im Druckrohr ist die magnetisch-induktive Durchflussmessung. Diesem Messprinzip liegt das Faradaysche Induktionsgesetz zu Grunde, bei dem ein Magnetfeld senkrecht zur elektrisch leitenden Flüssigkeit aufgebracht wird. Durch Ladungstrennung induziert das Fluid an den Messelektroden eine Spannung, die der mittleren Fließgeschwindigkeit v_m proportional ist [[Morgenschweis 2018](#)].

Das Ultraschall-Dopplerverfahren nutzt zur Ermittlung der Geschwindigkeit den Doppler-Effekt. Das Messprinzip basiert auf der Annahme, dass die Bewegungsgeschwindigkeit der Teilchen näherungsweise der Fließgeschwindigkeit des Fluids, im dem sie sich befinden, entspricht [[Berger et al. 2011](#)]. Der Sender und Empfänger sind bei dieser Durchflussmessung in der Regel stationär und in einer Sonde verbaut. Ein vom Sender mit einer konstanten Frequenz f_1 ausgesendeter Ultraschallstrahl trifft im Wasser auf reflektierende Festkörper oder Gasblasen. Da sich diese bezogen auf den Sender bewegen, erfährt der Ultraschallstrahl eine Frequenzverschiebung und erreicht den Empfänger mit der Frequenz f_2 . Diese Frequenzverschiebung ist proportional zur relativen Geschwindigkeit zwischen dem reflektierenden Teil und dem Empfänger [[Morgenschweis 2018](#)].

Ein weiteres akustisches Verfahren ist die Ultraschallmessung nach dem Laufzeitdifferenzverfahren. Hierbei wird die Laufzeit von Ultraschallsignalen zwischen zwei Sonden gemessen. Die Signale durchlaufen den Querschnitt einmal von der Strömung unterstützt und einmal durch sie gehemmt. Daraus resultiert eine Laufzeitdifferenz, welche proportional zur mittleren Fließgeschwindigkeit v_m ist [[Morgenschweis 2018](#)].

Magnetisch-induktive Durchflussmessungen im vollgefüllten wie auch teilgefüllten Rohrquerschnitt erfordern einen hohen baulichen Aufwand, da das vorhandene Rohrsystem zur Installation aufgetrennt werden muss. Dies entspricht nicht der Anforderung einer nicht-invasiven Messung [[Berger et al. 2011](#)]. Die Ultraschallmessung nach dem Doppler- und Laufzeitdifferenzverfahren sind beide geeignet, um am Pumpwerk Krons Moor den Durchfluss zu bestimmen. Im folgenden Kapitel wird zur weiteren Auswahl ein Vergleich zwischen beiden Messprinzipien gezogen.

2.5.3 Vergleich der Ultraschallmessung nach Doppler- und Laufzeitdifferenzverfahren

Beide Messprinzipien, Doppler- sowie Laufzeitdifferenzverfahren, sind als Clamp-On Geräte (Aufschnallgeräte) verfügbar und können so flexibel auf unterschiedlichen Rohrquerschnitten angebracht werden. In Tabelle 1 ist eine unvollständige Auflistung der Unterschiede beider Messsysteme zu finden, auf die nachfolgend eingegangen wird.

Grundsätzlich wird die Fließgeschwindigkeit des Mediums über die Laufzeitdifferenz zweier Ultraschallwellen ermittelt, die mindestens einmal den gesamten Querschnitt durchlaufen, wodurch die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v_m einen Mittelwert für das gesamte Strömungsprofil darstellt [Lerch 2009]. Beim Dopplereffekt wird die mittlere Strömungsgeschwindigkeit näherungsweise empirisch auf Basis der reflektierten Doppler-Frequenzen ermittelt [Berger et al. 2011].

Messgeräte, die nach dem Laufzeitdifferenzverfahren arbeiten, können nur zur Durchflussmessung von Flüssigkeiten verwendet werden, wenn diese rein oder leicht verschmutzt sind. Zur Messung mit dem Dopplerverfahren ist es Voraussetzung, dass sich eine ausreichende Dichte an Partikeln in der Flüssigkeit befindet, damit diese den Ultraschall reflektieren bzw. streuen kann [Lerch 2009]. Allerdings kann auch hier eine zu hohe Schwebstoffdichte zu Störungen führen [Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser 2018].

Beim Laufzeitdifferenzverfahren werden zwei Sensoren auf der Rohrleitung angebracht. Je nach Messanordnung, lässt sich damit die Genauigkeit der Messung beeinflussen [Flexim 2020]. Das Dopplerverfahren arbeitet mit einem Sensor, in dem Sender und Empfänger vereint sind [Berger et al. 2011].

Beide Verfahren unterscheiden sich auch in der minimal zu messenden Fließgeschwindigkeit des Mediums. Mit dem Laufzeitdifferenzverfahren lassen sich bereits Fließgeschwindigkeiten von $0,001 \frac{m}{s}$ detektieren, für das Dopplerverfahren ist eine Geschwindigkeit von mindestens $0,01 \frac{m}{s}$ nötig [Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser 2018].

Tabelle 1: Vergleich zwischen dem Laufzeitdifferenz- und Dopplerverfahren bei Ultraschallmessgeräten

Kriterium/Merkmal	Laufzeitdifferenzverfahren	Dopplerverfahren
Messprinzip	Messung Laufzeitdifferenz zweier Signale	Dopplereffekt
Ermittlung V_m	direkt über gesamten Rohrquerschnitt bestimmt	Empirisch

Verschmutzungsgrad Fluid	Reine bis leicht verschmutzte Flüssigkeiten messbar	Mindestdichte an Partikeln erforderlich
Sensoren	Zwei Sensoren	Sender u. Empfänger kombiniert
V_{\min}	$0,001 \frac{m}{s}$	$0,01 \frac{m}{s}$

Auch dieser Vergleich der beiden Messprinzipien zeigt, dass beide Geräte für die Messsituation am Pumpwerk Kronsmoor geeignet sind. Zur Durchflussmessung wird ein Ultraschallmessgerät nach dem Laufzeitdifferenzverfahren gewählt, da ein solches Messgerät im Betrieb zur Verfügung steht.

2.5.4 Ultraschallmessung nach dem Laufzeitdifferenzverfahren

Als Ultraschallmessgerät nach dem Laufzeitdifferenzverfahren wird das Fluxus G601 von der Firma Flexim verwendet, welches aus einem Messumformer und dem zugehörigen Sensorpaar besteht. Die in den Sensoren verbauten Sender erzeugen Ultraschallwellen mittels inversen piezoelektrischen Effektes, welche eine Frequenz zwischen 20 kHz bis 10 GHz aufweisen [Kuchling 2011]. Neben Turmalin und Bariumtitanat ist Quarz das gebräuchlichste Piezomaterial, welches Anwendung in den Ultraschallsendern findet [Meschede 2015]. Eine an die Oberfläche des piezoelektrischen Kristalls angelegte elektrische Wechselspannung versetzt diesen in Schwingung. Die erzeugten mechanischen Schwingungen verursachen Druckschwankungen in Form von Ultraschall [Mücklich o. Angabe].

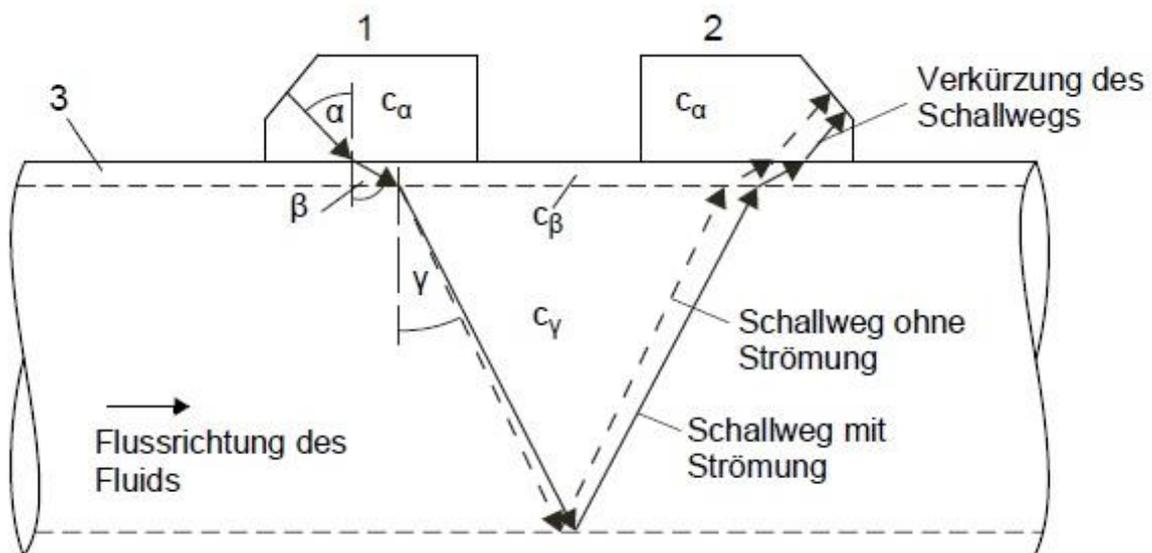


Abbildung 3: Schallweg des Signals in Flussrichtung [Flexim 2020]

Das Messprinzip des Ultraschall-Laufzeitdifferenzverfahrens basiert auf der direkten Messung der Laufzeit eines akustischen Signals zwischen einem Sensorpaar. Da beide Sensoren gleichzeitig als Sender und Empfänger arbeiten, werden die Ultraschallsignale abwechselnd mit und gegen die Fließrichtung des Wassers ausgesendet und empfangen. Signale, die sich mit dem Fluid ausbreiten, werden von diesem geführt. Die sich aus dieser Verschiebung ergebende Verkürzung des Schallweges ist in Abbildung 3 dargestellt. Ultraschallsignale, welche gegen die Strömung ausgesendet werden, weisen einen längeren Schallweg auf. Dementsprechend besitzt das Signal in Flussrichtung eine kürzere Laufzeit als in der entgegengesetzten Richtung. Die Laufzeitdifferenz ist dabei proportional zur Strömungsgeschwindigkeit, wie aus Formel 2.2 ersichtlich wird [[Flexim 2020](#)]:

$$v = k_{Re} \cdot k_a \cdot \frac{\Delta t}{2 \cdot t_y} \quad (2.2)$$

mit

$v =$ mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Fluids $\left[\frac{m}{s}\right]$

$k_{Re} =$ strömungsmechanischer Kalibrierfaktor $[-]$

$k_a =$ akustischer Kalibrierfaktor $[-]$

$\Delta t =$ Laufzeitdifferenz $[s]$

$t_y =$ Laufzeit im Fluid $[s]$.

Der akustische Kalibrierfaktor k_a ist ein Sensorparameter. Dieser ergibt sich aus der Schallgeschwindigkeit c innerhalb des Sensors und dem Einstrahlwinkel α auf das Rohr. Der strömungsmechanische Kalibrierfaktor k_{Re} ist eine vom Messumformer für jede Messung neu berechneter Wert, der von der Reynoldszahl sowie der Rauigkeit der Rohrwand abhängt [[Flexim 2020](#)].

Aus der gemessenen mittleren Strömungsgeschwindigkeit v und der bekannten Rohrquerschnittsfläche A lässt sich der Volumenstrom \dot{V} bestimmen [[Flexim 2020](#)]:

$$\dot{V} = v \cdot A \quad (2.3)$$

Grundvoraussetzung zur Messung mit diesem Verfahren ist ein vollgefüllter Rohrquerschnitt. Außerdem lässt sich bei der Messanordnung der Sensoren zwischen der Durchstrahl- und Reflexanordnung differenzieren. Bei der Durchstrahlanordnung befinden sich die Sensoren

auf gegenüberliegenden Seiten des Rohres und das Ultraschallsignal durchquert das Rohr nur einmal, wie in Abbildung 4 dargestellt. Diese Anordnung wird bei Belagsbildung auf der Rohrwand oder stark akustisch dämpfenden Fluiden gewählt. Sind die Sensoren auf derselben Seite des Rohres montiert und das Ultraschallsignal wird an der gegenüberliegenden Rohrwand reflektiert, dann liegt die Reflexanordnung vor. Diese, in Abbildung 5 dargestellte Messanordnung, weist eine höhere Messgenauigkeit als die Durchstrahlanordnung auf und kompensiert zudem Querströmeffekte, da die Ultraschallwelle das Rohr in zwei Richtungen durchquert [[Flexim 2020](#)].

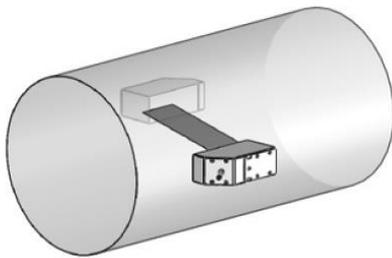


Abbildung 4: Durchstrahlanordnung des Sensorpaares
[Flexim 2020]

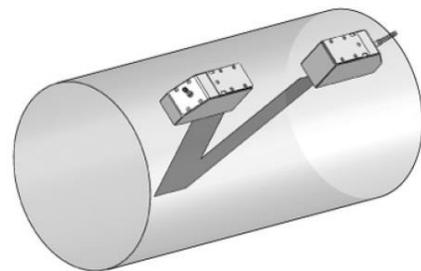


Abbildung 5: Reflexanordnung des Sensorpaares
[Flexim 2020]

2.5.5 Störeinflüsse auf die Ultraschall-Laufzeitdifferenzmessung

Es gibt verschiedene potenzielle Störeinflüsse auf die Ultraschallmessung nach dem Laufzeitdifferenzverfahren. Im Folgenden werden nur wenige der möglichen Einflüsse thematisiert.

Im Allgemeinen führt das Wasser im Entwässerungsgraben einen hohen Anteil an Feststoffen. Diese und mögliche Luftblasen infolge des Pumpvorganges können die Ultraschallmessung nach dem Laufzeitverfahren negativ beeinflussen, da sie das Ultraschallsignal beim Durchstrahlen des Wassers hindern [[Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser 2018](#)].

Die Rauigkeit der Rohrwand wurde anhand des Werkstoffes und dessen Erscheinungsbildes mit Hilfe einer Tabelle aus dem Handbuch des Ultraschallmessgerätes approximiert. Sie lässt sich aus konstruktionstechnischen Gründen vor Ort nicht ermitteln. Die Rauigkeit besitzt jedoch Einfluss auf das Strömungsprofil des Wassers und wird zur Ermittlung des Profilkorrekturfaktors verwendet. Die Profilkorrektur ermöglicht die Ermittlung einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit über die gesamte Rohrquerschnittsfläche, die wiederum, wie in Kapitel [2.5.4](#) thematisiert, zur Berechnung des Volumenstromes nötig ist [[Flexim 2020](#)].

Zudem stellen ein gestörtes Strömungsprofil und Störschall negative Einflüsse auf die Messung dar. Verschiedene Rohrelemente, wie beispielsweise Krümmen oder Reduzierungen, verzerren lokal das Strömungsprofil, sodass dieses nicht mehr axialsymmetrisch im Rohr ausgebildet ist. Außerdem breiten sich die von den Sensoren ausgesendeten Ultraschallwellen auch in der Rohrwand aus, wo sie an Flanschen reflektiert werden. Diese beiden Aspekte wirken sich negativ auf die Messung aus, lassen sich allerdings in Bezug auf den in Kapitel [3.2.2](#) beschriebenen Messaufbau nicht quantifizieren [[Flexim 2020](#)].

2.6 Drucksonden zur Wasserstandsmessung

Zur Messung des Wasserstandes werden Drucksonden verwendet, die in Schutzrohre knapp

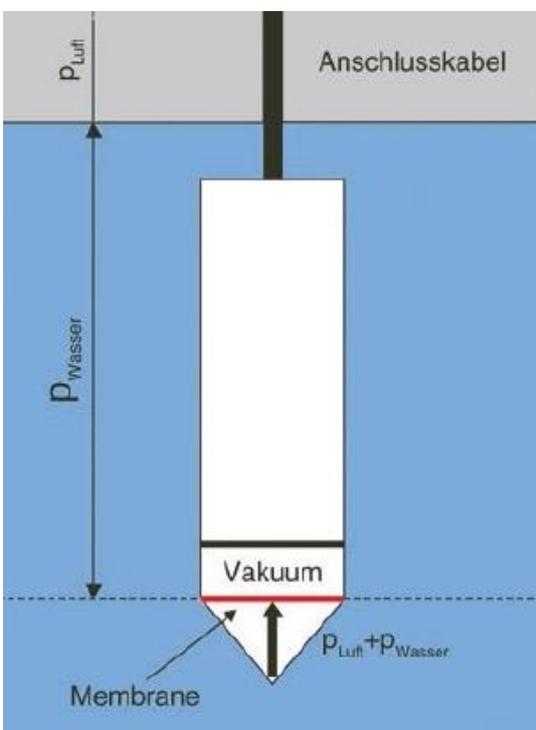


Abbildung 6: Prinzip der Absolutdruckmessung [[Morgenschweis 2018](#)]

über dem Grund hängend eingelassen sind und die erfassten Daten auf einem internen Speicher ablegen. Die verwendeten Sonden *TD-Diver* von der Firma Hydrosens arbeiten nach dem Prinzip der Absolutdruckmessung, wie in [Abbildung 6](#) dargestellt [[Hydrosens 2017](#)]. Dabei setzt sich der ermittelte Druckwert aus der Summe des hydrostatischen Druckes der über ihnen befindlichen Wassersäule P_{Wasser} und dem atmosphärischen Druck P_{Luft} zusammen. Zur Ermittlung der Wasserhöhe muss der getrennt erfasste atmosphärische Druckwert berücksichtigt werden. Anschließend besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem hydrostatischen Druck und der Flüssigkeitshöhe, wie [Gleichung 2.4](#)

verdeutlicht [[Morgenschweis, 2018](#)]:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.4)$$

mit

$P = \text{hydrostatischer Druck [mbar, hPa]}$

$\rho = \text{Dichte des Wassers } \left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$g = \text{Erdbeschleunigung } \left[\frac{m}{s^2}\right]$

$h = \text{Wasserstand [m]}$.

Nach der Umformung lässt sich aus den bekannten Größen die Höhe des Wasserstandes bestimmen.

In den verwendeten Drucksonden ist in der Front eine piezoresistiv-keramische Membran verbaut. Bei diesen Sensoren verursacht eine Druck- bzw. Wasserstandsänderung eine Durchbiegung der aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) hergestellten Membran, in die eine Wheatstonesche Messbrücke eindiffundiert ist. Diese erfährt infolgedessen eine Widerstandsänderung, welche unter Berücksichtigung der sensorspezifischen Daten in einem Microcontroller zu einem elektrischen Signal verarbeitet wird [[Morgenschweis, 2018](#)].

Die verwendeten Drucksonden messen zudem parallel die Wassertemperatur mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Dies ist relevant, da die Dichte von Wasser, und damit der gemessene hydrostatische Druck, von der Wassertemperatur abhängig ist. Diesen Temperatureinfluss kompensieren die *TD-Diver* kontinuierlich. Die mit dem verwendeten Modell maximal messbare Wassersäule beträgt $10 \text{ mH}_2\text{O}$. Diese wird mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5 \text{ cmH}_2\text{O}$ und Auflösung von $0,06 \text{ cmH}_2\text{O}$ gemessen [[Hydrosens 2017](#)].

2.7 Microcontroller zur Pumpenlaufzeiterfassung

Um die Pumpenlaufzeiten über einen längeren Zeitraum aufzuzeichnen, wird ein Microcontroller in Verbindung mit einer IR-Lichtschanke verwendet. Die verwendete Mikrocontroller-Plattform nennt sich Arduino und besteht aus einem Mikrocontroller-Board sowie der Programmierumgebung Arduino IDE. Das verwendete Microcontroller Board Arduino UNO verfügt über 14 digitale Ein- und Ausgabepins sowie sechs analoge Eingänge. Der verbaute ATMEGA328P-Mikrocontroller, das Herzstück des Arduino-Boards, arbeitet die programmierten Befehle ab und übernimmt arithmetische Berechnungen [[Schreiter 2019](#)].

Zur Erfassung des Betriebszustandes der Pumpe wird eine reflektierende IR-Lichtschanke genutzt. Diese vereint in einem Gehäuse als IR-Quelle eine Lumineszenzdiode und als Detektor einen Phototransistor. Die Lumineszenzdiode emittiert infrarote Strahlung mit einer Wellenlänge von 950 nm , diese kann an verschiedenen Materialien reflektiert werden und anschließend vom Fototransistor verarbeitet werden [[Vishay 2009](#)].

3 Messungen am Pumpwerk Kronsmoor

Das Vorgehen zur Ermittlung der Volumenströme am Pumpwerk Kronsmoor wird in zwei Messungen unterteilt. Zunächst werden mit einer Kalibrierung die geförderten Volumenströme der Pumpe in Abhängigkeit der Pegelstände innen- und außendeichs ermittelt. Im nachfolgenden Schritt werden die Pumpenlaufzeiten mit Hilfe der Arduino-Schaltung aufgezeichnet, um auf Basis dieser Daten den Durchfluss zu ermitteln. In beiden Fällen werden parallel zur Messung des Volumenstromes und der Pumpenlaufzeiten die Wasserstände mit Drucksonden aufgezeichnet. Diese sind innen- und außendeichs am Ein- bzw. Auslauf des Pumpwerkes, wie in Abbildung 7 dargestellt, montiert und zeichnen den Wasserstand minütlich auf.

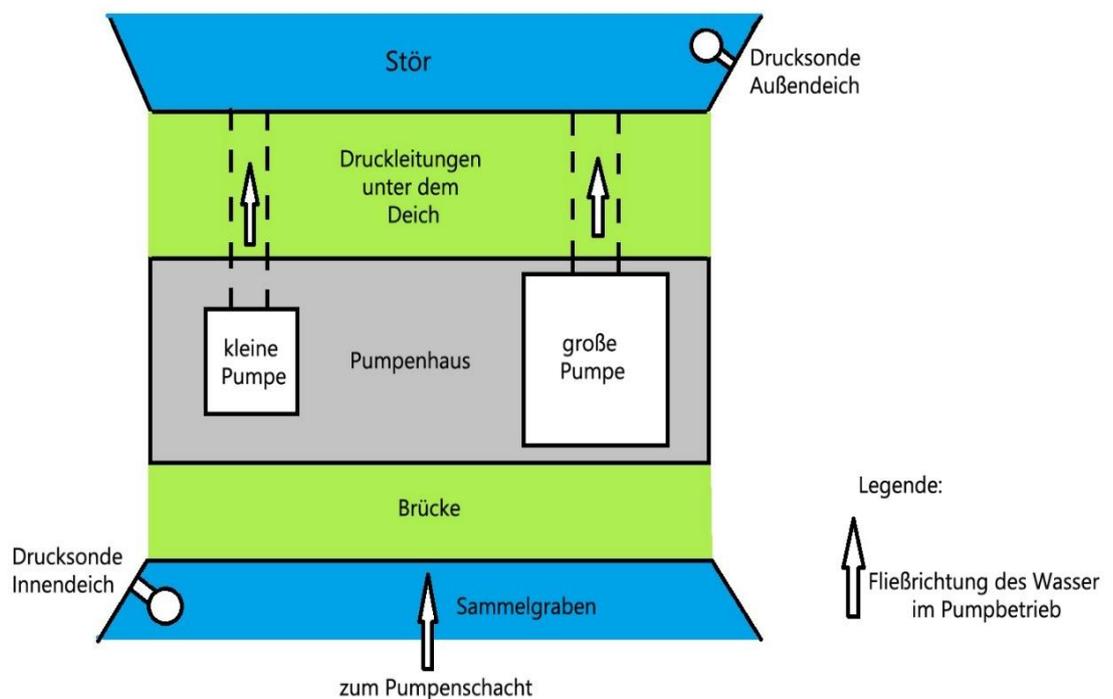


Abbildung 7: Schematischer Aufbau des Pumpwerkes mit den Drucksonden

Im ersten Unterkapitel wird der technische Aufbau des Pumpwerkes Kronsmoor anhand einer Schnittzeichnung näher beschrieben. Die Durchführung der Kalibrierung sowie die Ermittlung der Pumpenlaufzeiten sind in Kapitel [3.2](#) bzw. [3.3](#) thematisiert.

3.1 Technischer Aufbau Pumpwerk Kronsmoor

Das Pumpwerk Kronsmoor, historisch auch als „Schöpfwerk Kronsmoor“ bezeichnet, liegt in der gleichnamigen Gemeinde im Südwesten Schleswig-Holsteins. In dem Gebäude, welches im Jahr 1958 erbaut wurde, werden zwei verschieden große Propellerpumpen jeweils über einen Motor angetrieben und fördern das Wasser unabhängig voneinander über getrennte Auslassrohre in die Stör [[Köster 2018](#)]. Ein Parallelbetrieb beider Pumpen ist möglich, allerdings wird im regulären Pumpbetrieb abhängig von der Jahreszeit immer nur eine der beiden Pumpen eingeschaltet. In den niederschlagsarmen Monaten wird die kleine, im Herbst und Winter die große Pumpe in Betrieb genommen. Jede Pumpe wird im Automatikmodus über die Position eines Schwimmers im Pumpenschacht ein- bzw. ausgeschaltet. Ein Handbetrieb, bei dem die Pumpen zu einem beliebigen Zeitpunkt ein- und ausgeschaltet werden können, ist auch möglich. Im Folgenden werden nur die technischen Details der großen Pumpe genannt, da aus messtechnischen Gründen keine Durchflussermittlung an der kleinen Pumpe möglich war.

Der technischen Schnittzeichnung in Abbildung 8 ist der schematische Aufbau des Pumpwerkes zu entnehmen. Demnach gelangt das Wasser durch den Rechen, der zur Abscheidung von groben Inhaltsstoffen dient, in den Pumpenschacht. Die verbaute Propellerpumpe besitzt gemäß Typenschild eine maximale Förderleistung von $3402 \frac{m^3}{h}$ und pumpt das Wasser $2,95 m$ in die Höhe. Zudem ist die einstufige Pumpe nicht mit verstellbaren Schaufeln ausgestattet [[Köster 2018](#)]. Der Motor weist eine Leistungsaufnahme von $55 kW$ und eine Drehzahl von $585 \frac{1}{min}$ auf. Da dieser nicht frequenz geregelt ist, wird dauerhaft am jeweiligen Leistungsmaximum gefördert. Zwischen Krümmer und Auslass ist für mögliche Wartungsarbeiten ein Schieber verbaut. Der Auslass in die Stör ist durch eine Rückschlagklappe realisiert.

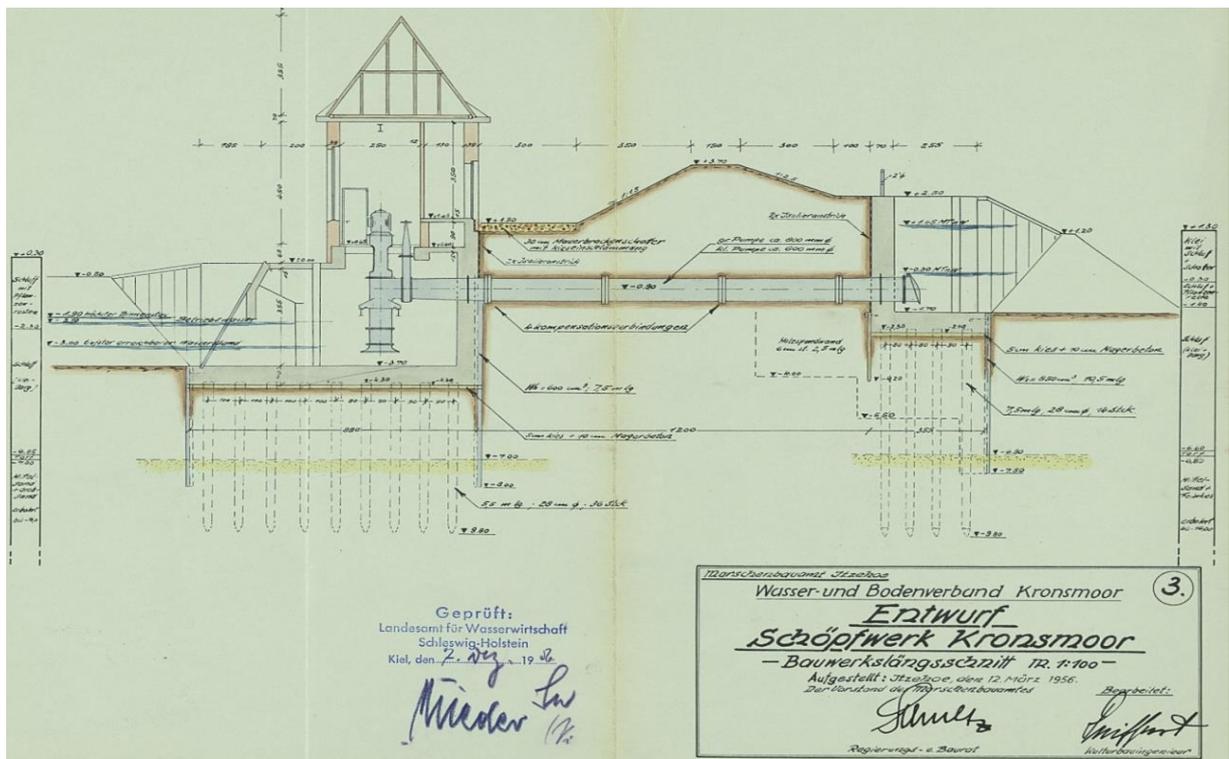


Abbildung 8: Technische Zeichnung Pumpwerk Kronsmoor [Deich- und Hauptsielverband Südwestholstein 2021]

3.2 Durchführung der Kalibriermessung

In den folgenden Unterkapiteln wird die Auswahl der Messstelle und die Messdurchführung im Pumpenschacht zur Kalibriermessung erläutert. Eine Messung der Volumenströme mittels Ultraschallgerät an der kleinen Pumpe führte zu keinen plausiblen Messwerten, da möglicherweise Störschall in Folge von starker Motorvibrationen die Messung negativ beeinflusst. Aus diesem Grund konnten die nachfolgenden Messungen nur an der großen Pumpe erfolgen. Da wie im Kapitel zuvor beschrieben nur eine Pumpe für die Entwässerung genutzt wird, sind mit dieser Messung alle nötigen Ausgangsdaten erfasst.

3.2.1 Auswahl der Messstelle und Messanordnung

Als Messort für das Clamp-on Durchflussmessgerät wurden die Rohre zwischen Pumpensumpf und Krümmer gewählt. In dieser Steigleitung ist ein vollgefüllter Querschnitt gewährleistet und es können sich keine störenden Anlagerungen auf der Innenseite des Rohres absetzen. Außerdem wird zur höheren Genauigkeit der Messung das Ultraschallmessgerät in der Reflexanordnung betrieben [Flexim 2020]. Als mögliche Messstrecke käme auch das Rohr vom Absperrschieber bis zur Betonwand des Pumpenschachtes in Betracht, wie in Abbildung 8 zu sehen. Jedoch weist dieses Rohr äußerlich große Unebenheiten in Folge starker Korrosion auf und daher ist ein korrektes Senden und Empfangen der Schallsignale ausgeschlossen.

3.2.2 Messdurchführung mit dem Ultraschallmessgerät

Zur Durchführung der Messung ist es wichtig, dass in Rohrbereichen, in dem die Sensoren positioniert werden, die obere Zunder- und Rostschicht zur besseren Durchstrahlbarkeit des Materials entfernt wird. Außerdem wird mit einem Wanddickemessgerät die Stärke der Rohrwandung ermittelt [Flexim 2020].

Das Ultraschallgerät wird durch Eingabe der Werte für Rohrumfang, -dicke, -material, -auskleidung, -rauigkeit, Medium und der Medientemperatur parametrisiert. Als Rohrrauigkeitswert wird der typische Wert für leicht verrostete Rohre aus dem Handbuch des Ultraschallgerätes herangezogen. Außerdem wird im Messgerät eine Dämpfung von Zehn Sekunden eingestellt. Das bedeutet, dass bei einer Ablagerate von einer Sekunde ein gleitender Mittelwert über die letzten Zehn Messwerte erstellt wird. Schwankende Werte in Folge einer dynamischen Strömung werden dadurch verhindert. Eine vollständige Übersicht aller eingestellten Parameter befindet sich im Anhang. Auf Grundlage der eingegeben Daten



Abbildung 9: Messanordnung des Ultraschallmessgerätes am Steigrohr

ermittelt das Durchflussmessgerätes einen Sensorabstand von 434 mm. Damit ist die Länge des unteren Rohrstückes als Messstrecke nicht ausreichend. Aus diesem Grund ist es erforderlich, einen Sensor über dem Flansch auf dem oberen Rohr zu befestigen, wie in Abbildung 9 dargestellt. Die Positionierung beider Sensoren widerspricht der Vorgabe des Herstellers, die Sensoren in einem Abstand zu derartigen Störschallstellen zu positionieren, der mindestens dem dreifachen Rohrdurchmesser entspricht. Vom Messumformer wird kontinuierlich die Signalqualität, welche das entscheidende Kriterium zum Durchführen einer Messung

darstellt, detektiert und angezeigt. Sollte die Signalqualität nicht ausreichen, erscheint als Wert im Display „UNDEF“. Trotz der Störeinflüsse wurde vom Messumformer in der

beschriebenen Messanordnung eine ausreichende Signalqualität ermittelt, weshalb diese Anordnung gewählt wurde [[Flexim 2020](#)].

3.2.3 Durchführungszeitraum der Messung

Die Messungen wurden in der Phase der Springtide durchgeführt. In dieser Zeit ist der Tidenhub in der Stör besonders groß [[Bahr et al. 2013](#)]. Die erste Messreihe wurde am 11. August 2021 in der Zeit von 07:20 Uhr bis 14:55 Uhr durchgeführt. Da Schäden an der Pumpe in Folge eines niedrigen Wasserstandes im Entwässerungsgraben zu vermeiden waren, musste diese unterbrochen werden. Die Messung wurde am Folgetag von 02:50 Uhr bis 07:53 Uhr fortgeführt, um zwei gesamte Tidenhübe aufzuzeichnen.

3.3 Ermittlung der Pumpenlaufzeiten

Im Folgenden wird der detaillierte Messaufbau während der Ermittlung der Pumpenlaufzeiten mittels Lichtschranke beschrieben und die programmierte Signalverarbeitung des Microcontrollers erläutert.

3.3.1 Messaufbau der Lichtschranke

Unterhalb des Motors befindet sich eine Kupplung, die in Rotation versetzt wird, sobald der Motor startet bzw. die Pumpe beginnt zu arbeiten. Auf dieser Kupplung wurde ein Neodym-Eisen-Bor-Magnet (NdFeB) angebracht. Dieser ist für den vorliegenden Anwendungsfall prädestiniert, da er die besten hartmagnetischen Eigenschaften aufweist und somit auch bei großen Fliehkräften auf der Kupplung verbleibt [[Wellmann 2019](#)].

Der Fototransistor der verwendeten Lichtschranke besitzt einen Arbeitsbereich von $0,2\text{ mm}$ bis maximal 15 mm , der sich über ein Potentiometer auf der Rückseite einstellen lässt. [[Vishay 2009](#)]. Die Lichtschranke wurde so ausgerichtet und eingestellt, dass sie das von der Kupplung reflektierte infrarote Licht nicht detektiert, jedoch das des hervorstehenden Neodym-Eisen-Bor-Magnetes, wie Abbildung 10 zeigt.



Abbildung 10: Messaufbau der Lichtschranke an der Kupplung der Pumpe

3.3.2 Signalverarbeitung des Microcontrollers

Der Microcontroller ermittelt im Sekundentakt den Status der Pumpe. Wenn der Motor eingeschaltet wird bzw. die Kupplung sich zu rotieren beginnt, dann sendet die Lichtschranke ein digitales High, sobald sie den Neodym Magneten detektiert. Beim darauffolgenden Wechsel von High auf Low wird ein Timer gestartet, der die Zeit in Millisekunden bis zum Wechsel auf das nächste High-Signal zählt. Ist diese Zeit länger als Zehn Millisekunden, dann ermittelt der Microcontroller den Pumpenstatus „eingeschaltet“. Bei einer Motordrehzahl von $585 \frac{1}{min}$ dauert jede Umdrehung minimal 100 ms . Allerdings besitzt der Timer auch ein Timeout-Funktion, um den Pumpenzustand „ausgeschaltet“ zu erfassen. Erfolgt innerhalb von 2000 ms kein High nach dem Wechsel von High auf Low, wird vom Microcontroller der Status „ausgeschaltet“ gesetzt. Mit Hilfe dieser Bedingung lässt sich auch der Stillstand der Pumpe ermitteln, sollte der Magnet vor der Lichtschranke zum Stehen kommen.

4 Berechnungen und Ergebnisse

Im ersten Unterkapitel wird das Messintervall zur Aufnahme der Kalibrierdaten sowie deren Auswertung beschrieben. Auf Basis dieser Daten lassen sich mehrere Kalibrierfunktionen erstellen. Des Weiteren werden die aufgestellten Funktionen überprüft und ein gemessener Rückfluss aus der Stör in Kapitel [4.2](#) bzw. [4.3](#) thematisiert. Auf Grundlage der Kalibrierfunktionen und der ermittelten Pumpenlaufzeiten aus Kapitel [4.4.1](#) lässt sich der Durchfluss bestimmen. Eine mögliche Ermittlung des Volumenstromes über die Wasserspiegeldifferenzen wird in Kapitel [4.5](#) dargestellt. Abschließend wird das Ergebnis über die Niederschläge im Messzeitraum vorgestellt und eine Wasserhaushaltsbetrachtung für das Einzugsgebiet aufgestellt.

4.1 Erstellung der Kalibrierfunktion

Zunächst wird auf die Messintervalle zur Erhebung der Kalibrierdaten näher eingegangen. Außerdem wird die Auswertung der aufgezeichneten Gesamtdrucke der Drucksonden innen- und außendeichs beschrieben und das Vorgehen zur Erstellung der Kalibrierfunktionen erläutert.

4.1.1 Messintervall der Volumenströme

Am ersten Messtag wurde die Pumpe alle 30 *min* im Handbetrieb eingeschaltet. Während der fünfminütigen Messfolge wurde alle 30 *s* der zugehörige Volumenstrom gemessen. Das halbstündige Messen der Volumenströme ist ausreichend, da sich ein Tidenhub von ca. 2 *m* über 6 *h* erstreckt. Beim Stillstand der Pumpe ist die Messung im Fünfminutentakt weitergeführt worden, da ein Rückfluss aus der Stör in den Entwässerungsgraben besteht.

Um einen ausreichenden Wasserstand über den Messzeitraum sicherzustellen, wurde am zweiten Tag der Messungen die Pumpe nur jeweils drei Minuten lang alle 30 *min* in Betrieb genommen. Die Erfassung der Messdaten fand ebenfalls alle 30 *s* statt. War die Pumpe ausgeschaltet, wurde auch hier der Rückfluss jeweils im Fünfminutentakt aufgezeichnet.

4.1.2 Erhebung der Wasserpegel

Zur Bestimmung des Wasserpegels ist es nötig, dass bei der Installation der Drucksonde die

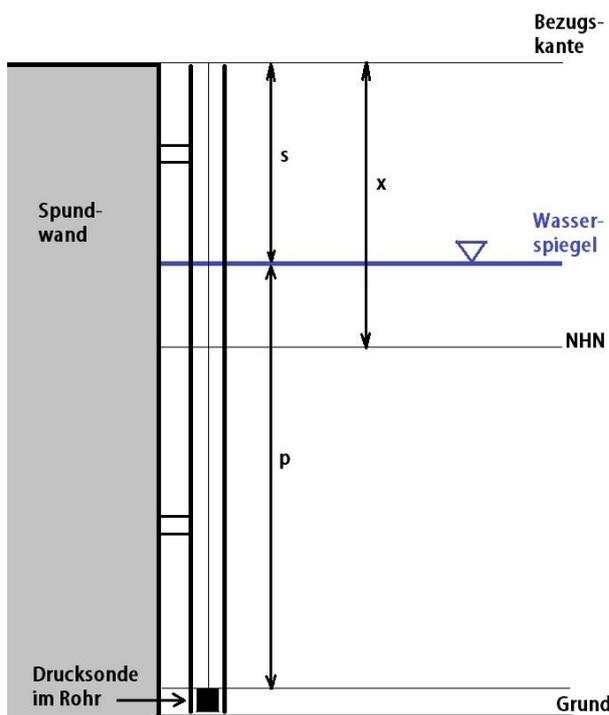


Abbildung 11: Ermittlung der Wasserpegel

Differenz zwischen Wasserspiegellage und einer Bezugskante, im vorliegenden Fall der Oberkante einer Spundwand, gemessen wird. Diese Differenz nennt sich Abstich [Morgenschweis 2018]. Die von den Drucksonden minütlich ermittelten Gesamtdrücke werden um die atmosphärischen Drücke korrigiert. Der erste korrigierte Druckwert, welcher dem hydrostatischen Druck entspricht, wird mit dem gemessenen Abstich gleichgesetzt. Um den darauffolgenden Abstich zu ermitteln, wird angenommen, dass eine Änderung der Wassersäule um einen Meter einer

Druckänderung von 100 mbar entspricht. Um den aktuellen minütlichen Abstich zu ermitteln, wird folgende Formel angewendet:

$$S_{x,errechnet} = S_{x-1,errechnet} + \frac{p_{x-1} - p_x}{d_{Annahme}} \quad (4.1)$$

mit

$s = \text{Abstich [m]}$

$p = \text{Druck der Wassersäule über dem Diver [mbar]}$

$d = \text{Druckänderung unter Wasser } \left[\frac{\text{mbar}}{\text{m}}\right]$.

Diese Rechnung wird für den gesamten Messzeitraum zwischen zwei manuell ermittelten Abstichen bzw. zwei Auslesevorgängen der Drucksonden durchgeführt. Die Differenz zwischen dem letzten errechneten Abstich und dem gemessenen Abstich beträgt innendeichs 0,02 m und außendeichs 0,01 m. Diese Abweichungen, welche für diese Betrachtungen in einer unerheblichen Größenordnung vorliegen, werden für die Dauer vom 04.08 bis zum 13.08 nachfolgend gleichmäßig auf den gesamten Zeitraum verteilt. Um die auf NHN bezogenen Wasserpegel zu ermitteln, werden die jeweiligen minütlichen Abstiche von der Differenz

zwischen Bezugskante und NHN , in der Abbildung 11 als x dargestellt, subtrahiert. Ein Auszug der Ergebnisse zur Erhebung der Wasserpegel ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Auszug der Ergebnisse der Wasserpegelerhebung

Uhrzeit	Gesamtdruck [mbar]	Atmosphärischer Druck [mbar]	Hydrostatischer Druck p [mbar]	Abstich s [m]	WSP Innen [mNHN]
13:09	1137,3	1036,4	100,9	2,51	-2,75
13:10	1136,1	1036,4	99,7	2,52	-2,76
13:11	1135,5	1036,4	99,1	2,53	-2,77

4.1.3 Erstellung der Kalibrierfunktionen

Im letzten Schritt zur Erstellung der Kalibrierfunktion wird zu jedem Pumpvorgang die gemittelte Uhrzeit, der gemittelte Wasserstandspegel innen- und außendeichs bezogen auf NHN sowie der Mittelwert des gemessenen Volumenstromes \bar{Q} in eine Tabelle eingetragen. Ein Ausschnitt dieser Daten ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Auszug der ermittelten Volumenströme in Abhängigkeit der Wasserpegel zur Erstellung der Kalibrierkurven

Uhrzeit	WSP Innen gemittelt [mNHN]	WSP Außen gemittelt [mNHN]	Wasserspiegel- differenz [m]	\bar{Q} [$\frac{m^3}{h}$]
7:23	-2,79	1,60	4,39	1445,27
7:52	-2,81	1,53	4,34	1459,55
8:22	-2,81	1,37	4,18	1490,55
8:52	-2,81	1,23	4,04	1533,33
9:22	-2,83	1,05	3,88	1622,27
9:52	-2,83	0,88	3,71	1765,82
10:22	-2,85	0,72	3,58	1942,27

Auf Grundlage dieser Daten wird mit Hilfe der Software Matlab eine dreidimensionale Kalibrierfläche sowie die zugehörige mathematische Funktion aufgestellt. In der Abbildung 12 ist auf der x -Achse der Wasserpegel innendeichs, auf der y -Achse der Wasserpegel außendeichs sowie auf der z -Achse der geförderte Volumenstrom aufgetragen. Die schwarzen

Messpunkte aus der Abbildung 12 werden von der polynomischen Funktion, dessen x- und y-Term quadratisch sind, möglichst vollständig abgedeckt.

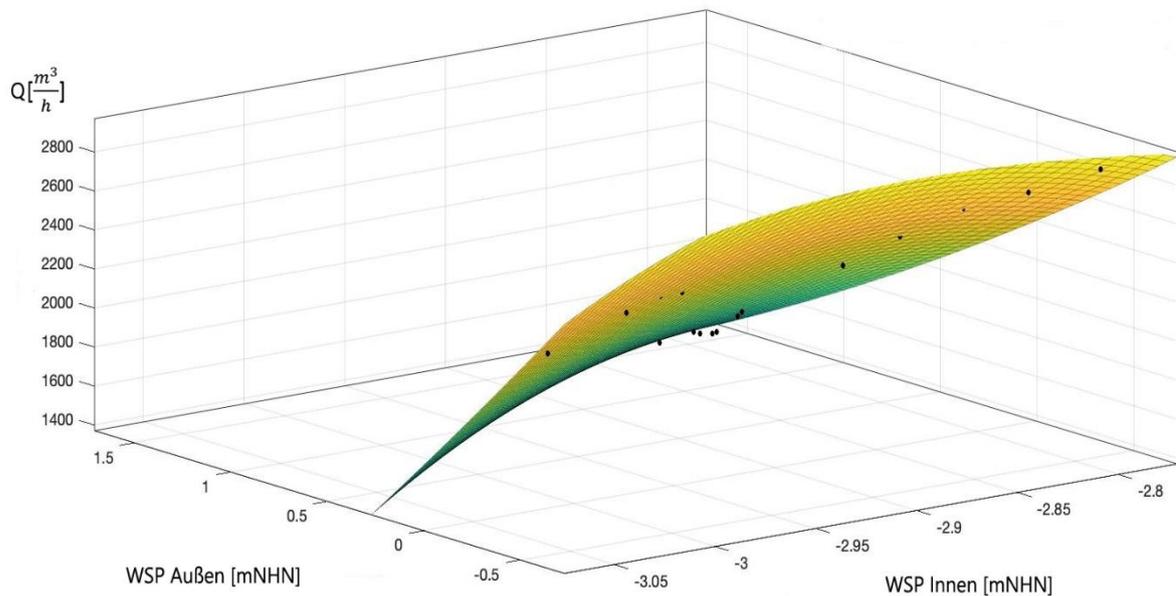


Abbildung 12: Kalibrierfläche der Funktion 4.2

Die von der Kalibrierfläche beschriebene mathematische Funktion lautet:

$$Q = -1,256 \cdot 10^5 - 8,986 \cdot 10^4 x + 4239y - 1,576 \cdot 10^4 x^2 + 1786xy + 51,88y^2 \quad (4.2)$$

Es lassen sich auf Basis der Daten aus Tabelle 3 auch eine lineare und weitere polynomische Kalibrierfunktionen erstellen. Die Funktion 4.3 ist linear. In der Funktion 4.4 ist der Innendeichspegel, die Variable x, als quadratische Komponente gewählt, in der Funktion 4.5 hingegen der Außendeichspegel, die Variable y.

$$Q = 6214 + 1326x - 714y \quad (4.3)$$

$$Q = -9,366 \cdot 10^4 - 6,789 \cdot 10^4 x + 3920y - 1,198 \cdot 10^4 x^2 + 1653xy \quad (4.4)$$

$$Q = 5900 + 1215x - 1729y - 363,4xy - 9,337y^2 \quad (4.5)$$

Die grafischen Darstellungen dieser Funktionen sind im Anhang verfügbar.

4.2 Überprüfung der Kalibrierfunktionen

Die Kalibrierfunktionen 4.2 bis 4.5 lassen sich anhand der Daten, die während der Kalibriermessung erfasst werden, überprüfen. Dazu muss zunächst als Referenzwert das gesamte Volumen bestimmt werden, welches während der Pumpvorgänge gefördert wird. Da

die Daten zu den Wasserspiegeln nur im Minutentakt aufgezeichnet werden, können zur weiteren Berechnung auch nur minütliche Volumenströme errechnet werden.

Die vom Ultraschallmessgerät erfassten Volumenströme werden wie in Tabelle 4 gezeigt durch $60 \frac{\text{min}}{\text{h}}$ dividiert. Die erhaltenen Volumenströme je Minute werden für einen Pumpvorgang summiert. Das gesamte Pumpvolumen der Kalibrierung entspricht der Summe aller geförderten Volumina je Pumpvorgang.

Tabelle 4: Auszug der Daten zur Überprüfung der Kalibrierfunktionen

Uhrzeit	WSP Innen [mNHN]	WSP Außen [mNHN]	WSP-Differenz [m]	Volumenstrom $[\frac{\text{m}^3}{\text{h}}]$	Kalibrier-Volumenstrom $[\frac{\text{m}^3}{\text{min}}]$	Geförderte Volumen je Pumpvorgang $[\text{m}^3]$
07:20	-2,76	1,54	4,30	1435,00	23,92	120,27
07:21	-2,76	1,54	4,30	1431,00	23,85	
07:22	-2,78	1,58	4,36	1444,00	24,07	
07:23	-2,79	1,60	4,39	1458,00	24,30	
07:24	-2,80	1,60	4,39	1448,00	24,13	

Zur Berechnung der Volumenströme, die sich aus den Funktionen errechnen lassen, wird numerisch integriert. Die gleichzeitig zur Kalibrierung minütlich aufgezeichneten Wasserpegel innen- und außendeichs werden in die entsprechende Funktion eingesetzt. Um aus dem so ermittelten Volumenstrom das gesamte Volumen zu ermitteln, wird genauso vorgegangen, wie oben beschrieben.

Wie in Tabelle 5 gezeigt, wird während der gesamten Kalibrierung ein Referenzvolumen von $3899,82 \text{ m}^3$ gefördert. Die Volumina, welche über die Funktionen errechnet werden, weichen im Mittel um 0,49 % von diesem Wert ab. Die maximale Abweichung in Höhe von 0,97 % besitzt die Funktion 4.4. Die geringste Abweichung von 0,04 % weist die Funktion 4.5 auf, weshalb diese als weitere Berechnungsgrundlage herangezogen wird.

Tabelle 5: Vergleich der Ergebnisse zur Überprüfung der Kalibrierfunktionen

Verwendete Funktion	Kalibrierdaten	4.2	4.3	4.4	4.5
Geförderte Volumen $[\text{m}^3]$	3899,82	3866,62	3902,88	3937,74	3901,41
Betrag der Abweichung [%]	-	0,85	0,08	0,97	0,04

4.3 Rückfluss aus der Stör

Während der Messungen mit dem Ultraschallmessgerät wurde in den Ruhezeiten der Pumpe festgestellt, dass Wasser aus der Stör in den Entwässerungsgraben zurückfließt. Nach Rücksprache mit dem Deich – und Hauptsieverband Südwestholstein wurde mitgeteilt, dass die Rückschlagklappe einen Defekt aufweist. Wie die Messergebnisse zeigen, ist die zurückgeflossene Wassermenge nicht abhängig vom Wasserstand im Tidegewässer, da diese im gesamten Messzeitraum nur gering schwankt. Über den gesamten Messzeitraum gemittelt ergibt sich ein Rückfluss im Betrag von $108 \frac{m^3}{h}$. Für weitere Berechnungen wird dieser Wert zu Grunde gelegt.

4.4 Durchflussbestimmung mittels Pumpenlaufzeiten

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Pumpenlaufzeiten ausgewertet. Diese dienen als Basis, um mit Hilfe der numerischen Integration im darauffolgenden Kapitel die geförderten Volumenströmen zu berechnen.

4.4.1 Ermittelte tägliche Pumpenlaufzeiten

Aus dem Pumpenstatus und dem zugehörigen Zeitstempel aus der Arduino lässt sich die Summe der täglichen Pumpenlaufzeiten ermitteln, welche in Abbildung 13 als blauer Graf dargestellt sind. Außerdem ist dem roten Grafen dieser Abbildung die durchschnittliche tägliche Pumpenlaufzeit entnehmbar. Die tägliche durchschnittliche Gesamtpumpzeit beträgt $2\ h$ und $23\ min$, die durchschnittliche Dauer pro Pumpvorgang beträgt $31\ min$ bei 5 täglichen Pumpvorgängen im Mittel. Die Dauer je Pumpvorgang variiert zwischen minimal $7\ min$ und maximal $1\ h\ 8\ min$. Besonders hervorzuheben ist am Verlauf des Grafens der sprunghafte Anstieg der Laufzeiten ab dem 17.08. An diesem und dem darauffolgenden Tag ist die Pumpe insgesamt für $4,45$ bzw. $4,25 \frac{h}{d}$ eingeschaltet. Dieser und der weitere Anstieg am 25.08 lassen sich nur mit einem erhöhten Wasseraufkommen im Sammelgraben erklären. Die durchschnittliche Pumpenlaufzeit je Tag beträgt zwischen $0,34$ und $0,9\ h$ und schwankt über den Messzeitraum nur gering. Der einzige große Anstieg ist am 24.08 zu sehen.

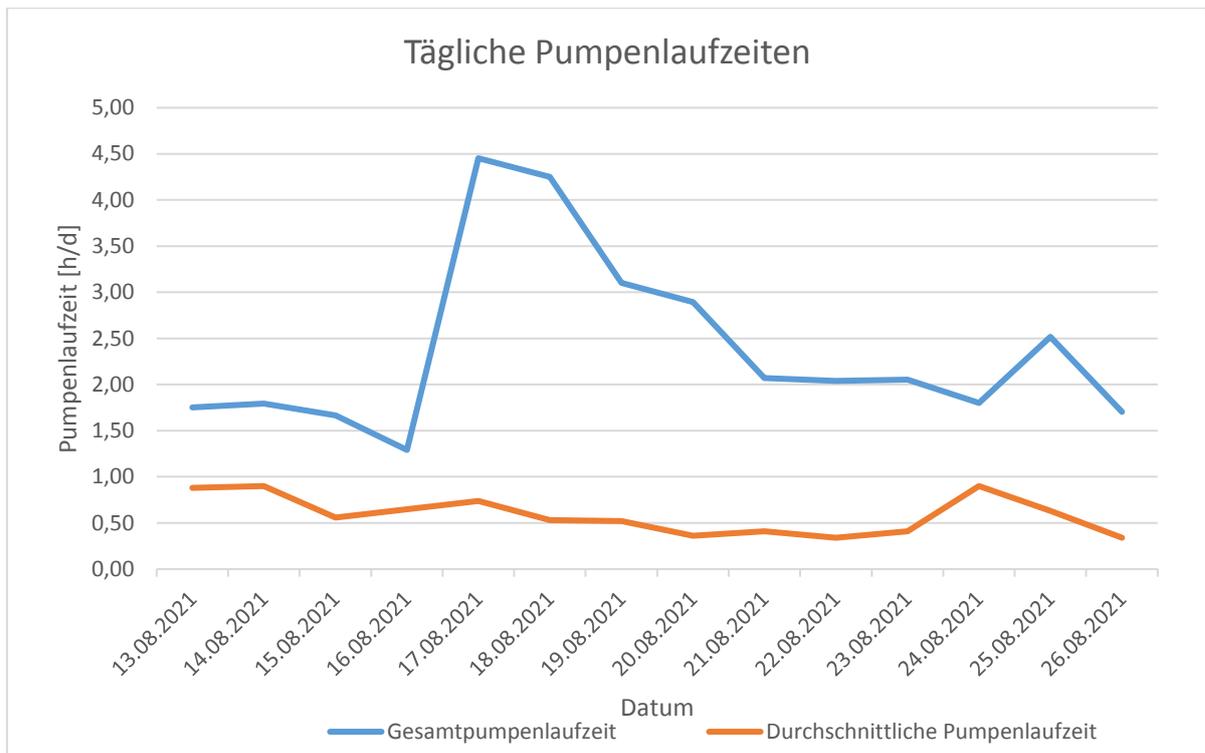


Abbildung 13: Täglichen Pumpenlaufzeiten im Pumpwerk Kronsmoor

4.4.2 Numerische Integration zur Berechnung der geförderten Volumenströme

Mit Hilfe der Funktion 4.5 und den ermittelten Pumpenlaufzeiten lassen sich die täglich geförderten Volumenströme ermitteln. Dazu wird, wie in Kapitel 4.2, die numerische Integration durchgeführt. Als Werte für die x- und y-Variable werden die Wasserpegel innen- und außendeichs eingesetzt, die gleichzeitig zu den Pumpenlaufzeiten aufgezeichnet werden. Der Verlauf des so ermittelten Gesamtvolumenstromes pro Tag ist in Abbildung 14 als blauer Graph dargestellt. Der Gesamtvolumenstrom, der aus dem Sammelgraben gepumpt wird, setzt sich aus der Summe von Oberflächen- und Grundwasserabflusses sowie dem Betrag des Rückflusses aus der Stör zusammen. Für weitergehende Betrachtungen ist es allerdings nötig, die Summe des Volumens aus dem Abfluss von Grundwasser und Gebietsoberfläche zu bestimmen. Dieser Nettovolumenstrom, berechnet aus Differenz von Gesamtvolumen und Rückfluss, ist hier als grauer Graf dargestellt. Der Rückfluss ist als roter Graph eingezeichnet.

Es wird im Folgenden ein Fokus auf die Werte des Nettovolumenstroms gelegt. Im gesamten Messzeitraum wurde ein Nettovolumen von insgesamt 27912 m^3 gefördert. Dies entspricht einem durchschnittlichen Volumenstrom von $1994 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$. Anhand des Verlaufes des Grafens für den Nettovolumenstrom in Abbildung 14 lässt sich erkennen, dass dieser in den ersten vier Tagen zweimal einen negativen Wert von $-4 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$ und $-87 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$ aufweist. Das bedeutet, dass

der Betrag des zurückgeflossenen Volumenstroms größer als die Summe aus dem Oberflächen- und Grundwasserabfluss in den Entwässerungsgraben ist. Hervorzuheben ist der sprunghafte Anstieg des Nettovolumenstromes am 17.08 bzw. 18.08 auf maximal $5645 \frac{m^3}{d}$. Danach setzt sich bis zum 24.08 ein stufenähnlicher Abwärtstrend der geförderten Nettovolumenströme ein. An den letzten drei Tagen zeigt der Graf ein ähnliches Auf- und Abwärtsverhalten wie zu Beginn der Messungen, ohne jedoch negative Werte anzunehmen. Die Differenz zwischen dem Gesamt- und Nettovolumenstrom ist auf Grund des nahezu konstanten Rückflusses über den gesamten Messzeitraum näherungsweise gleichbleibend.

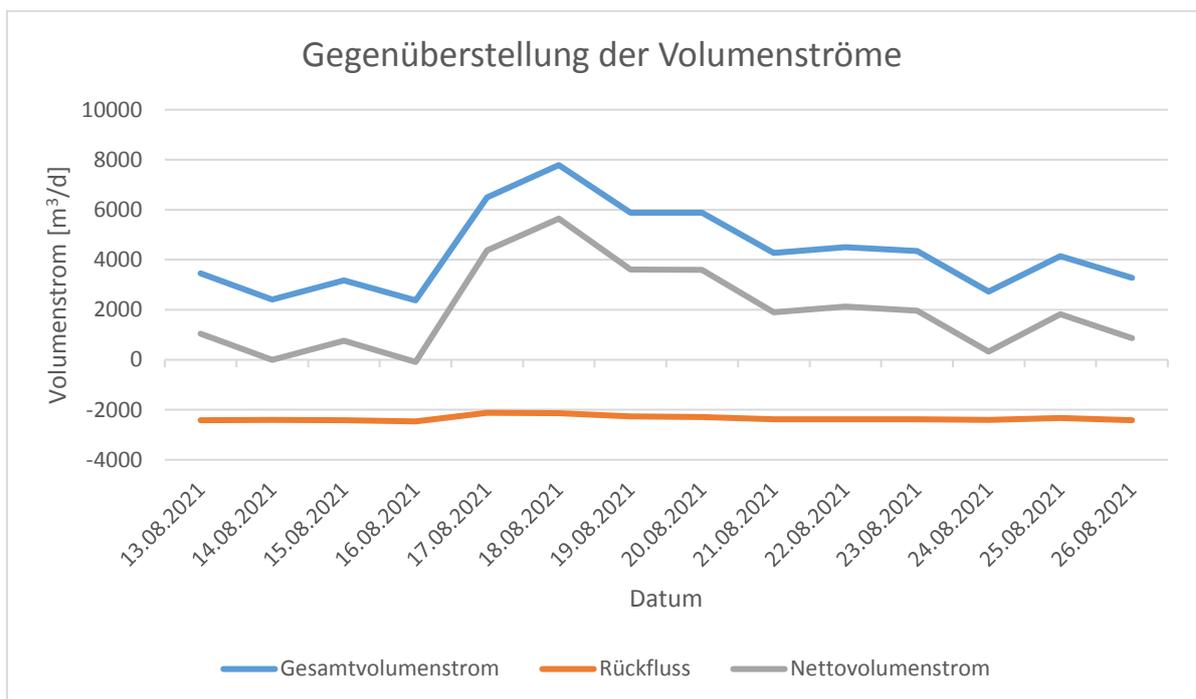


Abbildung 14: Vergleich der Volumenströme

4.5 Ermittlung des Volumenstromes auf Grundlage der Wasserspiegeldifferenzen

In diesem Kapitel wird untersucht, ob eine Berechnung der Volumenströme auch über die Differenz der Wasserstände innen- und außendeichs möglich ist. Hierfür werden zu allen gemessenen Volumenströmen aus Kapitel [4.1.3](#) die entsprechenden Pegeldifferenzen grafisch aufgetragen, siehe Abbildung 15.

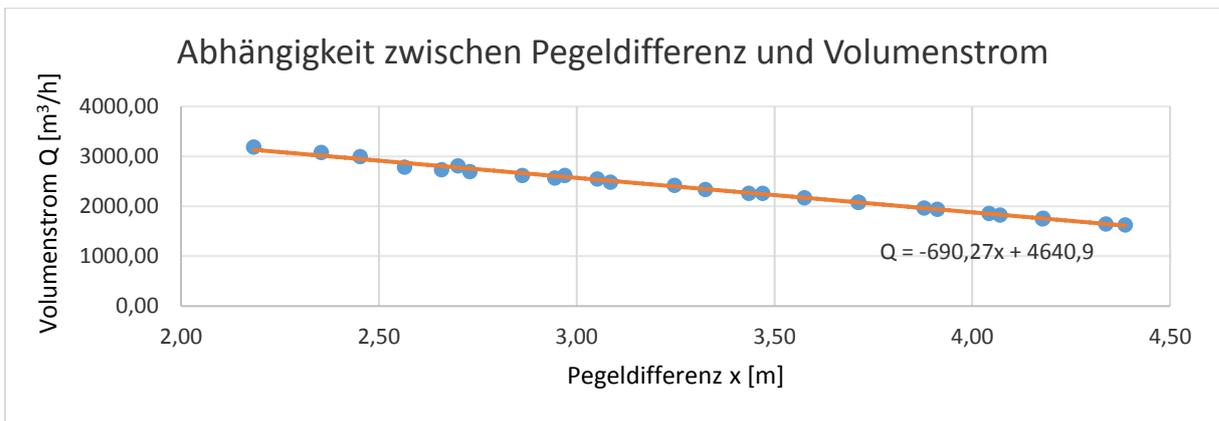


Abbildung 15: Ermittlung der Funktion zur Berechnung der Volumenströme über die Pegeldifferenz

Die lineare Trendlinie, welche als weitere Berechnungsgrundlage genutzt wird, besitzt einen Korrelationsfaktor von 0,9938 und kann durch folgende Funktion beschrieben werden:

$$Q = -690,27x + 4640,9 \quad (4.6)$$

Die Funktion 4.6 lässt sich, wie bereits in Kapitel [4.2](#) anhand der Funktionen 4.2 bis 4.5 durchgeführt, durch einen Vergleich mit dem Kalibriervolumen überprüfen. Das über die Wasserspiegeldifferenzen ermittelte Volumen von $4393,99 \text{ m}^3$ weicht im Betrag um 12,67 % vom Referenzwert ab. Damit weist die Funktion 4.6 deutlich höhere Abweichungen als die Funktionen 4.2 bis 4.5 auf.

Zur weiteren Betrachtung werden die Ergebnisse aus der Funktion 4.6 mit denen der Funktion 4.5 in Tabelle 6 verglichen. Dazu werden verschiedene Messwertpaare von Innen- und Außenpegelständen in die Funktionen eingesetzt. Die Differenz der Pegelstandsdifferenzen der ersten beiden Wertepaare beträgt lediglich 0,01 m. Allerdings liegen die Pegelstände des ersten Wertepaares deutlich höher als die des zweiten. Erwartungsgemäß ist die Differenz der beiden Volumenströme, welche über die Funktion 4.6 errechnet werden, mit $6,90 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ sehr gering. Werden die entsprechenden Wertepaare für Innen- und Außenpegel in die Funktion 4.5 eingesetzt, beträgt die Differenz beider Volumenströme $50,11 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$. Dasselbe Verhalten lässt sich auch bei geringeren Pegelstandsdifferenzen beobachten. Zwischen dem Wertepaar 3 und 4 beträgt die Differenz der Pegelstandsdifferenzen ebenfalls nur 0,01 m. Die mit Hilfe der Funktion 4.6 ermittelten Volumenströme in Höhe von $3046,38 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ bzw. $3053,28 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ weisen auf Grund der Linearität der Funktion wieder eine Differenz von $6,90 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ auf. Werden allerdings die Werte für Innen- und Außenpegel in die Funktion 4.5 eingesetzt, betragen die

Volumenströme $2909,73 \frac{m^3}{h}$ und $2714,31 \frac{m^3}{h}$. Darüber hinaus ist hervorzuheben, dass die errechneten Volumenströme aus der Funktion 4.6 besonders bei den Messwertpaaren 1 und 2 von denen aus der Funktion 4.5 abweichen.

Tabelle 6: Vergleich zwischen der Volumenstromermittlung durch Funktion 4.5 und 4.6

Messwert- paar-Nr.	WSP Innen x [mNHN]	WSP Außen y [mNHN]	Pegelstands- differenz [m]	Volumenstrom Funktion 4.6 $\left[\frac{m^3}{h}\right]$	Volumenstrom Funktion 4.5 $\left[\frac{m^3}{h}\right]$
1	-2,70	1,39	4,09	1817,69	1562,00
2	-3,14	0,96	4,10	1810,79	1511,89
3	-2,70	-0,39	2,31	3046,38	2909,73
4	-2,98	-0,68	2,30	3053,28	2714,31

4.6 Niederschlag im Messzeitraum

Zur Betrachtung des Wasserhaushaltes ist eine Messung der Niederschläge im Betrachtungszeitraum nötig. Dieser wird in einer Wetterstation erfasst, die Luftlinie ca. 5 km entfernt vom Pumpwerk Krons Moor steht. Auf Grund der örtlichen Nähe, wird angenommen, dass im Wassereinzugsgebiet dieselbe Niederschlagsmenge fällt. Die täglichen Niederschlagsmengen sind in Abbildung 16 zu erkennen. Anhand des Grafen ist zu erkennen, dass an 6 von 14 Tagen Niederschlag fällt und ein mehrtägiges Niederschlagsereignis vom 15.08 bis zum 19.08 vorliegt. Am 16.08. und 17.08 lassen sich die höchsten täglichen Niederschlagsmengen in Höhe von 14 bzw. 12 mm erkennen. Zudem sind dem Grafen zwei weitere eintägige Niederschlagsereignisse am 22.08 und 25.08 zu entnehmen, an denen 5 bzw. 2 mm Niederschlag fallen.

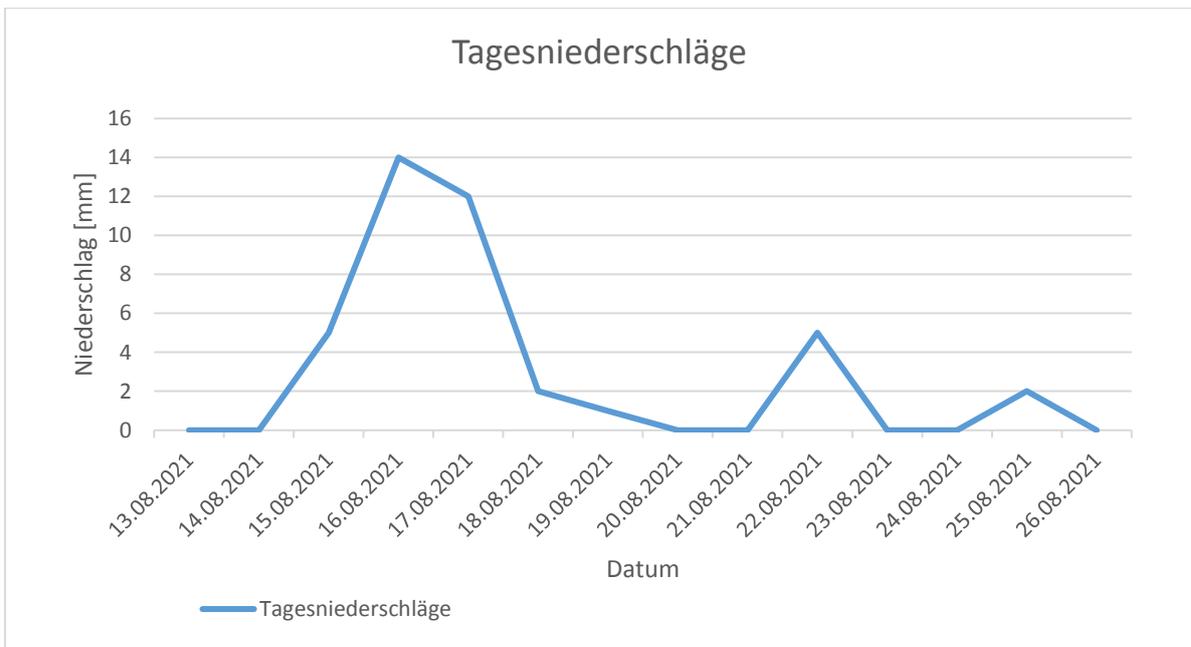


Abbildung 16: Tagesverteilung der Niederschläge

4.7 Wasserhaushalt im Messzeitraum

Der Wasserhaushalt im Einzugsgebiet des Pumpwerkes Kronsmoor innerhalb des Messzeitraumes ist in Abbildung 17 dargestellt. Insgesamt ist ein Niederschlag von 211355 m^3 gefallen. Wie in Kapitel [2.4](#) beschrieben, lässt sich auf Grundlage der ermittelten Wetterdaten errechnen, dass 176011 m^3 Wasser das Gebiet wieder in Form von Evapotranspiration verlassen. Die Pumpe hat einen Nettovolumenstrom von 27912 m^3 in den 14 Tagen gefördert. Dieses Volumen entspricht der Summe aus dem Oberflächen- und Grundwasserabfluss in das Grabensystem. Der Grundwasserzufluss entspricht der Differenz aus dem Niederschlag und der Summe von Evapotranspiration und Netto-Volumenstrom. Demnach stehen zur Grundwasserneubildung im Beobachtungszeitraum insgesamt 7432 m^3 zur Verfügung.

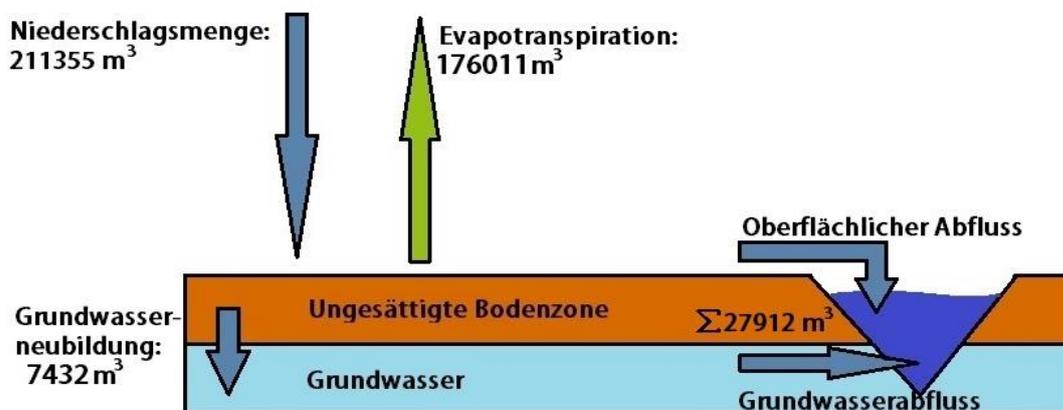


Abbildung 17: Wasserhaushalt im Einzugsgebiet des Pumpwerkes Kronsmoor im Messzeitraum

5 Diskussion

Im 14-tägigen Messzeitraum wurde ein gesamtes Nettovolumen von 27912 m^3 von der großen Pumpe gefördert. Für ein tägliches durchschnittliches Nettovolumen von 1994 m^3 sind die Pumpen im Schnitt 31 min pro Pumpvorgang in Betrieb gewesen. Die geringste prozentuale Abweichung vom Kalibriervolumen weist die Funktion 4.5 auf. Eine wichtige Erkenntnis ist zudem der gemessene Rückfluss aus der Stör in den Entwässerungsgraben, welcher aus der defekten Rückschlagklappe rührt. Außerdem konnte festgestellt werden, dass das Volumen, welches über die Wasserspiegeldifferenzen ermittelt wird, mit $12,67 \%$ stark vom Referenzvolumen der Kalibrierung abweicht.

Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse aus Tabelle 5 ist auffällig, dass die prozentualen Abweichungen der Funktionen 4.2 und 4.4 sowie 4.3 und 4.5 jeweils in der gleichen Größenordnung liegen. Die Kalibrierflächen der beiden Funktionen 4.2 und 4.4 sind stark gekrümmt, die der Funktion 4.3 ist eine ebene Fläche und Funktion 4.5 ist annähernd eine ebene Fläche. Bei Betrachtung der Gesamtdaten aus Tabelle 5 ist ersichtlich, dass die beiden Funktionen 4.2 und 4.4 sowie 4.3 und 4.5 nur dann eine große Differenz zueinander aufweisen, wenn Werte aus dem oberen Definitionsbereich für den Innen- und/oder Außenpegel eingesetzt werden, wie Tabelle 7 zeigt.

Tabelle 7: Vergleich der Funktionen 4.2 und 4.4 mit den Funktionen 4.3 und 4.5 bei Außenpegelständen im oberen Definitionsbereich

Messwertpaar-Nr.	WSP Innen [mNHN]	WSP Außen [mNHN]	Q Kalibrierreferenz [$\frac{\text{m}^3}{\text{min}}$]	Q Funktion 4.2 [$\frac{\text{m}^3}{\text{min}}$]	Q Funktion 4.3 [$\frac{\text{m}^3}{\text{min}}$]	Q Funktion 4.4 [$\frac{\text{m}^3}{\text{min}}$]	Q Funktion 4.5 [$\frac{\text{m}^3}{\text{min}}$]
1	-2,99	-0,54	41,75	46,54	43,88	46,31	43,49
2	-3,11	-0,50	37,90	34,59	40,67	36,57	40,19
3	-3,05	-0,25	39,75	36,47	39,20	37,59	39,21

Bei Messwertpaar-Nr. 1 ist der Wasserpegel außendeichs im oberen Definitionsbereich. Deutlich ist hier zu erkennen, dass die beiden Funktionen 4.3 und 4.5 nahezu identische Volumenströme aufweisen und geringere Abweichungen zum Kalibriervolumenstrom besitzen als die Funktionen 4.2 und 4.4. Auch wenn wie bei Messwertpaar-Nr. 2 oder

Messwertpaar-Nr. 3 beide Werte bzw. nur der Wert für den Innenpegel im oberen Definitionsbereich liegen, ist der gleiche Sachverhalt zu beobachten. Das zeigt, dass die Kalibrierfläche der Funktionen 4.3 und 4.5 die Messwerte in diesem Bereich deutlich besser abdeckt. Dieses Verhalten zeigen alle vier Funktionen im übrigen Definitionsbereich nicht, dort sind geringe Abweichungen zum Kalibriervolumenstrom zu erkennen.

Der Definitionsbereich der Funktionen 4.2 bis 4.5 erstreckt sich auf der y-Achse, dem Außenpegel, von $-0,61 \text{ mNHN}$ bis $1,60 \text{ mNHN}$. Allerdings sind die Pumpen im Rahmen der Laufzeitmessungen auch zu Pegelständen eingeschaltet gewesen, die außerhalb des oberen Definitionsbereiches liegen. Dies hat trotz Messung zur Springtide zwei Hauptgründe: Während der Aufnahme der Kalibrierkurve ist das Hochwasser auf Grund von Wettereinflüssen wie Wind niedriger als üblich zur Springtide ausgefallen. Aus dem gleichen Grund ist das Hochwasser während der Aufzeichnung der Pumpenlaufzeiten an einzelnen Tagen bis zu $2,07 \text{ mNHN}$ hoch gewesen. Tabelle 8 vergleicht das Verhalten der Funktionen 4.2 und 4.5 oberhalb des Definitionsbereiches.

Tabelle 8: Betrachtung der Funktion 4.4 und 4.3 oberhalb des Definitionsbereiches

WSP Innen x [mNHN]	WSP Außen y [mNHN]	Q nach Funktion 4.2 $[\frac{m^3}{h}]$	Q nach Funktion 4.5 $[\frac{m^3}{h}]$
-2,97	2,03	296,58	934,08
-3,00	2,06	37,98	899,45
-3,01	2,07	-48,24	888,05

Liegt der für den Außenpegelstand eingesetzte Wert oberhalb des Definitionsbereiches, dann führt dies bei Funktion 4.2 zu unplausiblen Volumenströmen. Der Grund für dieses Verhalten der doppelt quadratischen Funktion ist, dass die Kalibrierfläche am Rande des oberen Definitionsbereiches der y-Achse stark nach unten gekrümmt ist, wie in Abbildung 12 zu sehen. Anders hingegen verhält sich die Funktion 4.5, die zu keinen negativen Volumenströmen führt, da sie eine nahezu ebene Fläche mit positiver Steigung im Diagramm darstellt. Für die Gesamtbetrachtung ist der Fehler, der durch die Funktion 4.2 oberhalb des Definitionsbereiches entsteht, zu vernachlässigen, weil diese hohen Pegelstände während der Analyse der Pumpenlaufzeiten eine absolute Ausnahme darstellen.

Auch die in der Einleitung erwähnte Erwartung, dass der Wasserpegel innen- und außendeichs Einfluss auf den geförderten Volumenstrom besitzt, kann mit Hilfe der Tabelle 9 belegt werden. Die in der Tabelle aufgeführten Innen – und Außendeichspegelstände sind während der Ermittlung der Pumpenlaufzeiten aufgenommen worden. Die geförderten Volumenströme werden auf Basis der Funktion 4.5 berechnet. Das Messwertpaar-Nr. 1 zeigt den niedrigsten Innendeichs- und den maximalen Außendeichspegel. In diesem Fall wird ein geförderter Volumenstrom von $814,01 \frac{m^3}{h}$ ermittelt. Um den Einfluss des Innendeichspegel darzustellen, wird bei Messwertpaar-Nr. 2 der höchste gemessenen Pegelstand angenommen, der Außendeichspegel bleibt unverändert. Das Ergebnis ist mit $1290,14 \frac{m^3}{h}$ mehr als eine Verdopplung des vorherigen Wertes. Beim Messwertpaar-Nr. 3 wird der minimale Innendeichspegel aus dem ersten Fall mit dem minimalen Außendeichspegel kombiniert. Deutlich ist hier der große Anstieg des geförderten Volumenstroms auf $2492,85 \frac{m^3}{h}$ zu erkennen.

Tabelle 9: Wertepaare zur Ermittlung der Abhängigkeit zwischen der Tide und dem geförderten Volumenstrom

Messwertpaar-Nr.	Pegelstand Innendeich [mNHN]	Pegelstand Außendeich [mNHN]	Geförderter Volumenstrom Funktion 4.5 [$\frac{m^3}{h}$]
1	-3,17	2,07	814,01
2	-2,58	2,07	1290,14
3	-3,17	-0,78	2492,85

Der geförderte Volumenstrom einer Kreiselpumpe hängt von der zu erbringenden Druckdifferenz ab. Diese ist unter anderem proportional abhängig vom statischen Druckbedarf der Anlage und berücksichtigt die Differenz zwischen dem Druck am Eintritts- und Austrittsquerschnitt [Gulich 2013]. Der veränderliche Druck am Ein- und Auslauf wird durch die schwankende Wassersäule verursacht. Daraus folgt, dass die Ermittlung der Volumenströme über die Wasserspiegeldifferenzen, wie in Kapitel 4.5 vorgestellt, nicht möglich ist, weil die Funktion 4.6 die veränderliche Druckdifferenz zwischen dem Ein- und Auslass der Gesamtanlage nicht berücksichtigt.

Die Korrelation zwischen dem Niederschlag und den geförderten Volumenströmen lässt die erste Einschätzung zu, dass die ermittelten Volumenströme plausibel sind. In Abbildung 18

folgt dem vorangegangenen mehrtägigem Niederschlagsereignis vom 15.08 bis zum 18.08 ein starker Anstieg der geförderten täglichen Nettovolumenströme, der anschließend stufenweise sinkt. Außerdem führt der Niederschlag von 5 mm am 22.08 dazu, dass der Abwärtstrend des Nettovolumenstroms unterbrochen wird. Der Anstieg des Nettovolumenstromes am 25.08 lässt sich nicht mit dem Niederschlag erklären. Allerdings lässt sich aus den ersten beiden Sachverhalten der eindeutige zeitliche sowie quantitative Zusammenhang zwischen dem Niederschlag und dem geförderten Volumenstrom beweisen. Zudem kann die Aussage getroffen werden, dass der Niederschlag das Pumpwerk Kronsmoor mit einer Verzögerung von ca. einem Tag erreicht.

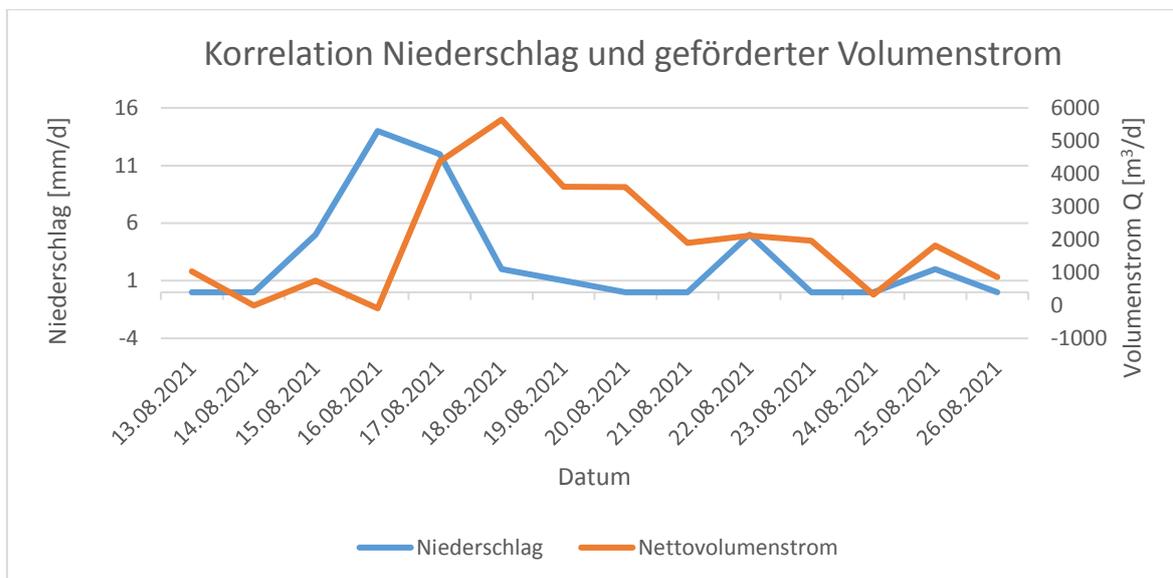


Abbildung 18: Korrelation zwischen Niederschlag und gefördertem Volumenstrom

Die durchgeführte Wasserhaushaltsberechnung aus Kapitel [4.7](#) lässt sich mit unabhängigen Vergleichsdaten kritisch betrachten. Für den Durchführungszeitraum wurde für die Grundwasserneubildung ein Volumen von 7432 m^3 ermittelt, auf ein Jahr hochgerechnet entsprechen dies $37,59 \text{ mm}$. Untersuchungen des LLUR zeigen, dass im Jahresmittel zwischen $50 \frac{\text{mm}}{\text{a}}$ und $150 \frac{\text{mm}}{\text{a}}$ Grundwasser im Gebiet Kronsmoor neu gebildet werden [[Landesportal Schleswig-Holstein 2021](#)]. Unter Berücksichtigung des kurzen Beobachtungszeitraumes und des trockenen Wetters in den Wochen vor der Messdurchführung, belegt dieser Werte des LLUR's die Richtigkeit der ermittelten Grundwasserneubildung. Aus diesem Fakt kann bei gemessener Niederschlagsmenge und berechneter Evapotranspiration belegt werden, dass der gemessene Nettovolumenstrom plausibel ist.

Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Bachelorarbeit konnte eine messtechnische Lösung für die eingangs beschriebene Problemstellung, der nicht-invasiven Ermittlung von tideabhängigen Gebietsentwässerungsdaten, vorgestellt werden. Mit Hilfe eines Ultraschall-Durchflussmessgerätes nach dem Laufzeitdifferenzverfahren lässt sich eine Kalibrierkurve über die Dauer einer Tide erstellen. Der Microcontroller hat zuverlässig die Pumpenlaufzeiten während des Durchführungszeitraumes aufgezeichnet, um über diese und die parallel aufgezeichneten Wasserstände die geförderten Volumenströme zu ermitteln. Da beide Geräte nicht-invasiv sind und sich mit geringem Installationsaufwand montieren lassen, wird diese messtechnische Lösung auch dem Anspruch gerecht, dass sie zur Langzeitmessung auf andere Pumpwerke übertragen werden kann. Als Basis zur mathematischen Auswertung der erfassten Daten kristallisiert sich eine quadratische Funktion heraus. Außerdem lassen sich mit dieser Funktion die Einflüsse der Pegelstände innen- sowie außendeichs bei der Berechnung der geförderten Volumenströme berücksichtigen. Zur Auswertung der geförderten Volumenströme auf Grundlage der quadratischen Funktion kann ausschließlich die numerische Integration der minütlichen Durchflusswerte herangezogen werden, eine Auswertung über die Wasserspiegeldifferenzen führt zu keinen repräsentativen Ergebnissen. Außerdem konnte die Plausibilität der ermittelten Durchflussdaten mit Hilfe von Wasserhaushaltsberechnungen belegt werden.

Wie die ergebnislosen Ultraschallmessungen nach dem Laufzeitverfahren an der kleinen Pumpe gezeigt haben, führen starke Vibrationen der Pumpe an Störstellen wie Flanschen oder Rohrbögen zu unplausiblen Messergebnissen. Ein Ultraschallmessgerät, welches nach dem Dopplerverfahren arbeitet, kann hier möglicherweise Abhilfe schaffen, da der gleichzeitige Sender und Empfänger möglichst weit von derartigen Störstellen positioniert werden kann [[Morgenschweis 2018](#)]. Auch ein Lanzen-MID kann als Alternative in Betracht kommen, da dieser völlig unbeeinflusst von dem erzeugten Störschall arbeitet [[Berger et al. 2011](#)]. Jedoch ist zur Installation der Lanze ein Kugelhahn auf der Rohrleitung nötig, welcher wiederum eine minimale bauliche Veränderung darstellt [[GWU-Umwelttechnik GmbH o. Angabe](#)].

Verbesserungspotenzial liegt auch in der Durchführung der Kalibriermessung, denn wie in Kapitel [5](#) festgestellt, liegen einzelne, während der Pumpenlaufzeiten ermittelte Außenpegelstände, außerhalb des Definitionsbereiches der Kalibrierkurve. Bei der Durchführung weiterer Messungen ist zu beachten, dass während der Aufnahme der

Kalibrierkurve für die Pumpe eine Messung des Durchflusses zu einem überdurchschnittlichen Hochwasser durchgeführt wird, damit möglichst alle während der Pumpenlaufzeit ermittelten Außenpegelstände in den Definitionsbereich der Funktion fallen. Dazu sind neben dem Zeitpunkt der Springtide auch Wettereinflüsse zu berücksichtigen.

Ein weiteres Problem im Zusammenhang mit der Kalibriermessung stellt eine Unterbrechung dar, wenn der Innenpegelstand im Entwässerungsgraben unter die Oberkante des Pumpensumpfes fällt. Zur Vermeidung dieser Unterbrechung innerhalb einer Tide ist zu beachten, dass die Dauer einer Messfolge bzw. die Laufzeit der Pumpe an die Pumpenleistung und das nachfließende Wasservolumen angepasst wird, sodass jederzeit ein ausreichender Wasserstand im Entwässerungsgraben gewährleistet ist.

Die Tatsache, dass trotz der in Kapitel [2.5.5](#) genannten Störeinflüsse eine ausreichende Signalqualität während der Kalibriermessung vorliegt, zeigt, dass deren Einfluss in einer geringen Größenordnung vorliegt. Der messtechnische Aufwand zur Verbesserung dieser Faktoren steht in keinem Verhältnis zum Ergebnis, weil sich darüber kein aussagekräftigeres Grundwassermodell erstellen lässt, da diese die Realität stark vereinfacht darstellen. Die Auflösung des Grundwassermodells ist abhängig von der Anzahl der hydrogeologischen Bohrungen zur Ermittlung der Bodenkennwerte wie Durchlässigkeit oder Speicherkoeffizienten. Können diese Werte nicht aus Messungen oder mittels Interpolation bestimmt werden, dann findet eine Schätzung auf Grundlage benachbarter Daten statt. Diese werden dann während der Modellierung verändert und angepasst, bis ein plausibles Gesamtmodell entsteht [[Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein 2002](#)]. Das Vorgehen bei der Erstellung von Grundwassermodellen verdeutlicht, dass diese auf Grund der großen Schwankungsbreite der Bodenkennwerte eine große Grundunsicherheit aufweisen.

Abschließend muss angemerkt werden, dass ein 14-tätiger Zeitraum zur Aufzeichnung der Pumpenlaufzeiten nicht ausreichend ist, um auf Grundlage dieser Daten ein detaillierte Wasserhaushaltsbetrachtung für das Untersuchungsgebiet Kronsmoor zu erstellen. Hier sollte ein Durchführungszeitraum von einem Jahr angestrebt werden, um auch die geförderten Volumenströme bei verschiedene Wetterereignisse wie Starkregen oder langanhaltenden Trockenzeiten aufzuzeichnen. Erst dann lassen sich auch fundierte Aussagen z.B. über das Speicherverhalten verschiedener Bodenzonen machen [[Iwanoff 2021](#)]. Mit der vorliegenden Ausarbeit ist bereits der Grundstein für diese nötigen Langzeituntersuchungen gelegt.

Literaturverzeichnis

- [1] Abte W.; Assefa M.: Evaporation and Evapotranspiration – Measurement and Estimations. Springer, 2013, DOI: 10.1007/978-007-4737-1.
- [2] Bahr, B.; Resag, J.; Riebe, K.: Faszinierende Physik – Ein bebildeter Streifzug vom Universum bis in die Welt der Elementarteilchen. 1. Auflage, Springer Spektrum, Berlin Heidelberg, 2013, DOI: 10.1007/978-3-642-37812-6.
- [3] Bayerisches Landesamt für Umwelt (lfu): Grundwassermodelle. Online verfügbar unter: <https://www.lfu.bayern.de/wasser/grundwassermodelle/index.htm>
- [4] Berger, C.; Dören, L.; Ertl, T.; Hollenberg, A.; Koch, J.; Libuda, J.; Milke, H.; Ristenpart, E.; Ruß, H-J.; Sitzmann, D.; Uhl, M.; Weiß, G.: Merkblatt DWA-M 181 Messungen von Wasserstand und Durchfluss in Entwässerungssystemen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 2011.
- [5] Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch. 5. Auflage, 2018.
- [6] Deich- und Hauptsiedlerverband Südwestholstein: 2021. Digitale Weitergabe von Zeichnungen und Übersichtskarten.
- [7] Dracos, T.: Hydrologie – Eine Einführung für Ingenieure. 1. Auflage, Springer-Verlag, Wien, 1980.
- [8] Dyck, S.; Peschke, G.: Grundlagen der Hydrologie. Ernst & Sohn, Berlin, 1983.
- [9] Eckhardt, K.: Hydrologische Modellierung – Ein Einstieg mithilfe von Excel. Springer Spektrum, Berlin Heidelberg, 2014, DOI: 10.1007/978-3-642-54095-0.
- [10] Flexim: Betriebsanleitung – Fluxus G60x. 2020. Verfügbar auf dem beigelegten USB-Stick.
- [11] Gonsowski, P.; Patt, H.: Wasserbau – Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen. 7. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg, 2011, DOI: 10.1007/978-3-642-11963-7.
- [12] Gujer, W.: Siedlungswasserwirtschaft. Springer, Berlin Heidelberg, 2007, 3. Auflage, 2007.
- [13] Gülich, J F.: Kreiselpumpen – Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb. Springer Vieweg, 4. Auflage, Berlin Heidelberg, 2013, DOI: 10.1007/978-3-642-40032-2
- [14] GWU-Umwelttechnik: Lanzen-MID Durchflussmessung für vollgefüllte Rohrleitungen. Online verfügbar unter: <https://www.wasser.gwu-group.de/index.php/produkte/durchflussmessung-2/vollfuellung/lanzen-mid.html>
- [15] Hydrosens: Wasserstandsmessung im Grundwasser Diver-Suite. Online verfügbar unter: <https://www.hydrosens.com/produkte/diver/td-diver/>
- [16] Iwanoff, A.: Persönliche Mitteilung vom 03.09.2021.

- [17] Köster: Köster – Maschinenfabrik und Gießerei. 2018. Online verfügbar unter: <https://www.koester-heide.de/de/service/download.php>
- [18] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik. 20. Auflage, Hanser, 2011.
- [19] Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein: Nutzbares Grundwasserdargebot in Südost-Holstein. 2002. Online verfügbar unter: <https://www.umweltdaten.landsh.de/nuis/wafis/grundwa/grundwasserdargebot.pdf>
- [20] Landesportal Schleswig-Holstein: Grundwasserdargebot. Online verfügbar unter: <https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/G/grundwasser/grundwasserdargebot.html>.
- [21] Lerch, R.; Sessler G.; Wolf D.: Technische Akustik – Grundlage und Anwendung. Springer, Berlin Heidelberg, 2009, DOI: 10.1007/978-3-540-49833-9.
- [22] Lindner, H.: Physik für Ingenieure. 19. Auflage, Hanser, 2014.
- [23] Mang, L-M.: Optische Sensorik – Lasertechnik, Experimente, Light Barriers. 1. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2012, DOI: 10.1007/978-3-8348-8308-7.
- [24] Maniak, U.: Hydrologie und Wasserwirtschaft – Eine Einführung für Ingenieure. 7. Auflage, Springer Vieweg, 2016, DOI: 10.1007/978-3-662-49087-7.
- [25] Meschede, D.: Gerthsen Physik. 25. Auflage, Springer Spektrum, Berlin Heidelberg, 2015, DOI: 10.1007/978-3-662-45977-5.
- [26] Morgenschweis, G.: Hydrometrie – Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen. 2. Auflage, Springer Vieweg, 2018, DOI: 10.1007/978-3-662-55314-5
- [27] Mücklich, F.: Inverser Piezoeffekt. Online verfügbar unter: http://www.wissenschaftschulen.de/sixcms/media.php/1308/Skript_Piezo.pdf
- [28] Nützmann, G.; Moser, H.: Elemente einer analytischen Hydrologie Prozess-Wechselwirkungen-Modelle. Springer Spektrum, 2016, DOI: 10.1007/978-3-658-00311-1
- [29] Schreiter, D.: Arduino-Kompendium. 1. Auflage, bmu Verlag, 2019.
- [30] Vishay: TCRT5000, TCRT5000L Reflective Optical Sensor with Transistor Output. 2009. Online verfügbar unter: <https://www.vishay.com/optical-sensors/list/product-83760/>
- [31] Wellmann, P.: Materialien der Elektronik und Energietechnik – Halbleiter, Graphen, Funktionale Materialien. 2. Auflage, Springer Vieweg, 2019, DOI: 10.1007/978-3-658-26992-0

Anhang

A Eingestellte Parameter Ultraschallmessgerät

Tabelle a: Parameter zur Durchflussmessung mit dem Flexim Fluxus

Parameter	Wert	Bemerkung
Rohraußendurchmesser	1950 mm	-
Rohrwanddicke	8 mm	
Rohrmaterial	Stahl	
Rohrauskleidung	Keine	
Rohrrauigkeit	0,15 mm	Gemäß Handbuch
Medium	Wasser	-
Medientemperatur	16,7 °C	-
Schallweg	2 NUM	Reflexmodus
Dämpfungszahl	10 sek.	Gleitender Mittelwert über 10 Sekunden
Ablagerate	1 sek.	-

B Kalibrierflächen der ermittelten Funktionen

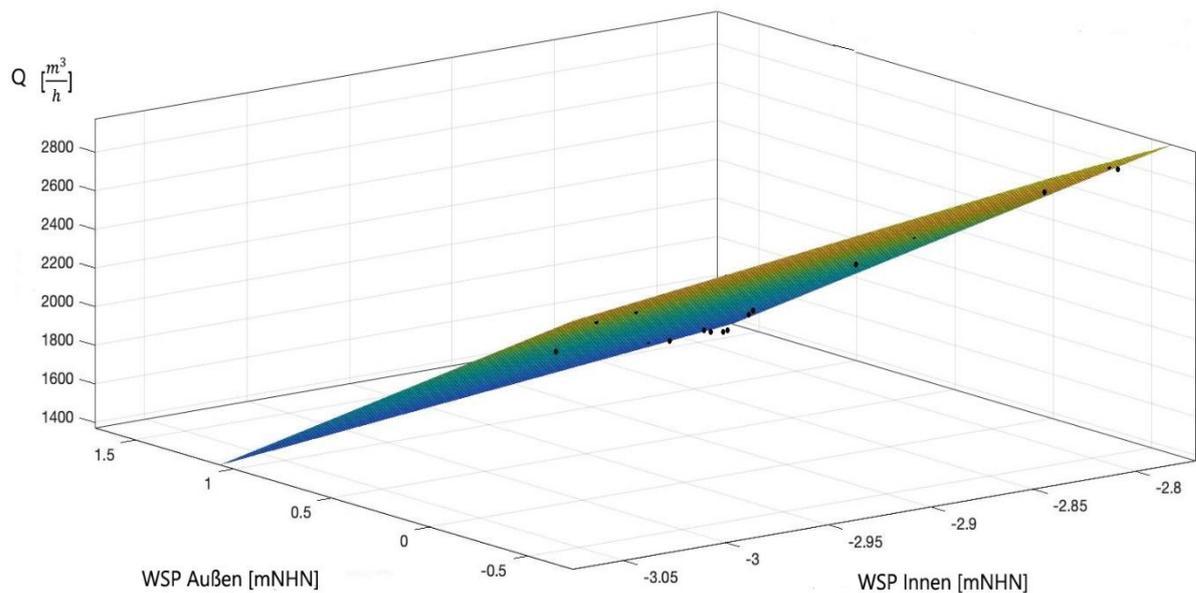


Abbildung a: Kalibrierfläche der Funktion 4.3

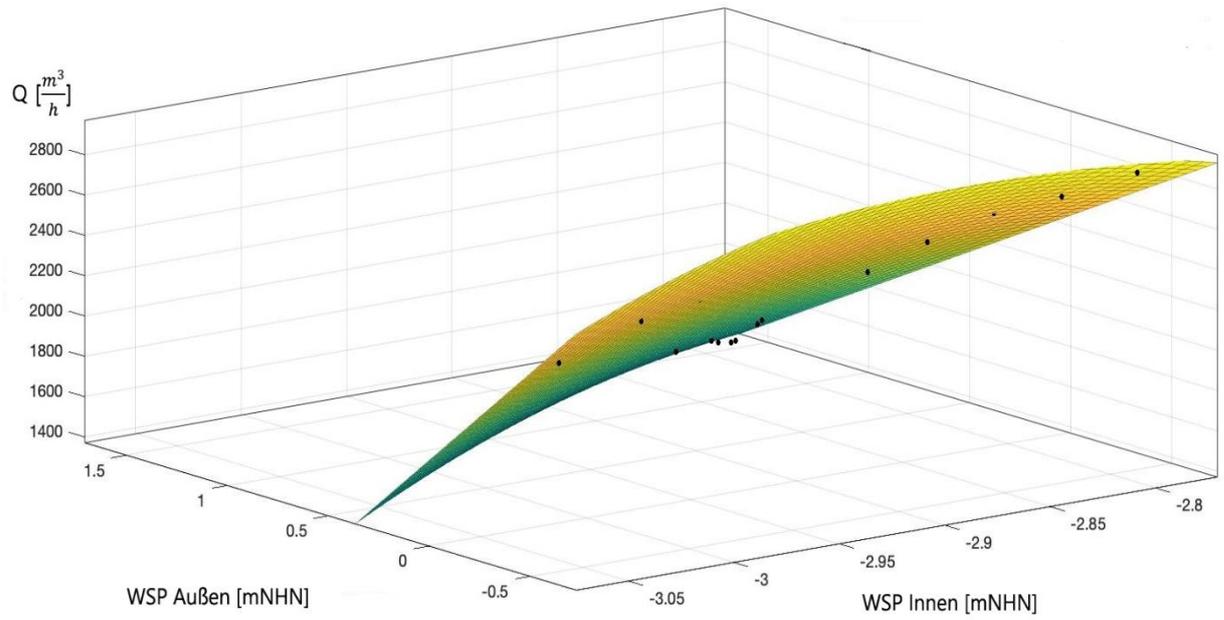


Abbildung b: Kalibrierfläche der Funktion 4.4

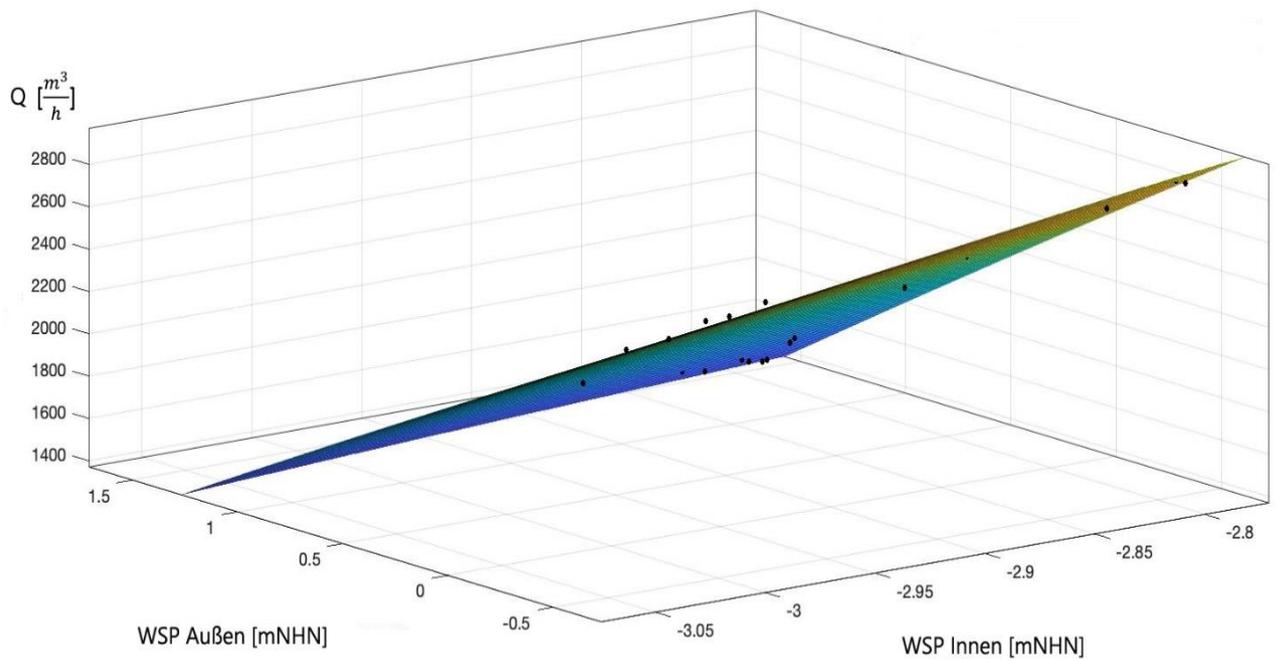


Abbildung c: Kalibrierfläche der Funktion 4.5