

Europa-Universität Flensburg

Thesis im Studiengang Biologie (PO 2015)

Masterthesis

im Studiengang

M. Ed. Lehramt an Sekundarschulen mit dem Schwerpunkt

Sekundarstufe I

Das Sperrwerk als Maßnahme des Küstenschutzes für die norddeutsche Küste im Rahmen eines DBU-Projektes zum Klimawandel.

vorgelegt von:

Henrik Petschull

Master of Arts Bildungswissenschaften: Biologie/Deutsch

Matrikelnummer: 547787

Dorfstraße 329, 25920, Risum-Lindholm

Erstbetreuer:

Prof. Dr. Andreas Christian

Zweitbetreuerin:

Nicole Heuken

Abgabedatum:

30.06.2021

gefördert durch



www.dbu.de

(Materialkosten)

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	
1 EINLEITUNG	2
2 KÜSTENSCHUTZ IN DEUTSCHLAND	3
2.1 KÜSTENSCHUTZ IN SCHLESWIG-HOLSTEIN.....	6
2.2 DIE NORDSEEKÜSTE IM KLIMAWANDEL	12
3 SPERRWERKE	16
4 DAS EXPONAT	21
4.1 ZUR IDEE.....	22
4.2 DIDAKTISCHE VORÜBERLEGUNGEN	24
4.3 KONSTRUKTION.....	27
4.4 TECHNISCHE UMSETZUNG.....	32
4.4.1 3D-Druck.....	33
4.4.2 Arduino	36
4.5 DER EXPONATTRÄGER	40
4.6 ZUM EINSATZ IN DER SCHULE	43
4.7 BAUANLEITUNG.....	46
5 FAZIT	51
LITERATURVERZEICHNIS	
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	
TABELLENVERZEICHNIS	
EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG	

Danksagung

Ein Projekt wie es in dieser Masterthesis beschrieben und dokumentiert wird, wäre ohne den Einfluss, die Hilfestellung, den Beirat und die Betreuung folgender Personen so nicht durchführbar gewesen.

Als erstes bedanke ich mich herzlichst bei Herrn Professor Doktor Andreas Christian, der diese Masterarbeit betreut hat und stets mit offenen Ohren und konstruktive Kritik beratend zu Seite stand.

In diesem Zusammenhang geht mein Dank an die „Deutsche Bundesstiftung Umwelt“, in dessen Projektrahmen diese Arbeit entstanden ist.

Christan Weise, Mitstudent und Freund, möchte ich ganz besonders danken, da das gesamten Projekt mit ihm zusammen entstanden ist und wir uns gegenseitig wertvolle Ideen und Ratschläge zur Umsetzung der Exponate geben konnten.

Ein abschließender Dank geht an meine Freundin Melissa Körner, die mir stets beratend zur Seite steht und das Chaos, das ich im Rahmen des Konstruktionsprozesses immer wieder hinterlassen habe, ertragen hat

1 Einleitung

Der Küstenschutz ist schon seit Jahrhunderten ein essentielles und nicht zu unterschätzendes Thema für die Bewohner von Küstenregionen. Vor dem Hintergrund dieser Thematik ist es wichtig, Maßnahmen aufzuzeigen und diese den Menschen näherzubringen (Landesregierung Schleswig-Holstein, 2008). Die folgende Ausarbeitung mit dem Titel *„Das Sperrwerk als Maßnahme des Küstenschutzes für die norddeutsche Küste im Rahmen eines DBU-Projektes zum Klimawandel“*, befasst sich mit der Notwendigkeit von Küstenschutzmaßnahmen – speziell der Sperrwerke – vor dem Hintergrund des Meeresspiegelanstiegs und dem Klimawandel. Hiermit zusammenhängend wird in dieser Arbeit der Entwicklungsprozess eines interaktiven und modularen Exponates beschrieben und dokumentiert, welches zum einen als Ausstellungsstück gedacht ist und zum anderen zum Nachbauen und Weiterentwickeln anregen soll.

In Zusammenarbeit mit Christian Weise wurde hierfür ein Projekt entwickelt, welches in dieser Arbeit vorgestellt werden soll. Hierfür wird zunächst in den einführenden Kapiteln dieser Arbeit eine theoretische Grundlage geschaffen, welche den Küstenschutz und Deutschland und speziell in Schleswig-Holstein beinhaltet. Darüber hinaus wird auch der Klimawandel in diesem Zusammenhang thematisiert. Anschließend folgt eine Auseinandersetzung mit Sperrwerken als Küstenschutzmaßnahmen, welche dann zur Dokumentation des Exponatbaus überleitet. Diese Dokumentation beinhaltet ausführliche Vorüberlegungen, Prozesse der Ideenfindung und Umsetzungsstrategien die es ermöglichen, das Exponat als Ganzes oder in abgeänderter Form nachzubauen. Eine didaktische Auseinandersetzung gibt zudem Aufschluss über den Rahmen und die Anwendungsmöglichkeiten des Exponats. Darüber hinaus wird die Konstruktion als auch die technische Umsetzung beschrieben und letztendlich in einer Bauanleitung zusammengefasst. Ein abschließendes Fazit evaluiert dann den Entwicklungs- bzw. Bauprozess und gibt Anregungen für die Weiterarbeit mit dem Exponat.

2 Küstenschutz in Deutschland

Das Leben an und in niederen Küstenregionen geht stets mit der Gefahr einher, essentielles Hab und Gut – im schlimmsten Fall sogar das Leben, durch Überflutungen infolge einer Sturmflut bzw. starken Unwetters zu verlieren. Seitdem die tiefliegenden Marschgebiete an der Nordseeküste bewirtschaftet und besiedelt werden, sind auch schützende Maßnahmen gegen das Meer und die Sturmfluten notwendig. Während es zunächst nur möglich war Warften als Wohn-, Schutz- und Zufluchtsstätte aufzuschütten, um einzelne Häuser oder ganze Dörfer vor den Wassermassen zu verteidigen, wurden ca. 1000 n.Chr. und aufgrund des allmählichen Anstiegs des Meeresspiegels die ersten Deiche entlang der Nordseeküste erbaut (Koch, Eberhardt, Hartthaler, & Dette, 2003). Aufgrund naturbedingter Einflüsse und mangelnder Wartung befanden sich die Deiche nach dem 2. Weltkrieg in einem solch schlechten Allgemeinzustand, sodass Untersuchungen zur Sicherheit der Deiche gegen Sturmtiden an der Nordseeküste veranlasst wurden. Der 1949 gegründete „Küstenausschuss Nord- und Ostsee“ erarbeitete in fachlicher Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern und Verwaltungsfachleuten der Küstenländer sowie des Bundes notwendige Grundlagen für den Seebau sowie für den Küstenschutz, um diesen an die erhöhten Ansprüche und die neueren technischen Erkenntnisse anzupassen (ebd.).

Am 31. Januar sowie am 1. Februar 1953 wurde die Nordseeküste - insbesondere die Niederlande, Belgien und England, von einer schweren Orkanflut getroffen, welche verheerende Schäden verursachte und insgesamt knapp 2000 Opfer forderte. Obwohl das deutsche Küstengebiet weitestgehend verschont blieb, wurde die Orkanflut als deutliches Alarmsignal für die Küste Deutschlands angesehen (Koch, Eberhardt, Hartthaler, & Dette, 2003). Die im Anschluss an diese Orkanflut durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass ein sicherer Schutz vor dem Hintergrund der beobachteten Wasserstände und den daraus resultierenden Erkenntnissen und Erfahrungen in Bezug auf Höhe, Stärke als auch Zustand der Deiche und anderer Bauwerke nicht mehr gegeben sei und einer Sturmflut in den Ausmaßen der Februarflut 1953 nicht standhalten würden. Diese Erkenntnisse führten in den betroffenen Ländern der deutschen Nordseeküste zur Erstellung von Küstenschutzprogrammen mit einem

maßgebenden Sturmflutwasserstand, welcher sich nicht an den Tiden vergangener Sturmfluten orientierte, sondern vorausschauend und auf Grundlage von Berechnungen des säkularen Meeresspiegelanstiegs für zukünftig zu erwartende Sturmflutwasserstände beschlossen wurde. Diese, für etwas 100 Jahre vorausschauenden Maßnahmen der Küstenschutzprogramme wurden am 16. und 17. Februar 1962 obsolet, als die deutsche Nordseeküste von einer schweren Sturmflut mit verheerenden Folgen getroffen wurde. Diese bislang höchste bekannte Sturmflut beschädigte 532 km von insgesamt 1.600 km Deichen, Schöpfwerke als auch Uferdecken (Koch, Eberhardt, Hartthaler, & Dette, 2003).

Durch die aus der Sturmflut von 1962 resultierenden Erfahrungen wurde deutlich, dass der Küstenschutz keinesfalls als Einzelaufgabe zu verstehen ist und nicht in Form von Einzelvorhaben realisiert werden kann (ebd.). Die daraufhin entwickelten Generalpläne der Küstenländer legten Grundsätze zum Aufbau eines umfassenden Küstenschutzes fest (Ministerium für ländliche Räume, 2001).

Unter Küstenschutz wird in diesem Zusammenhang in erster Linie der Schutz von Menschen und Sachwerten vor den Zerstörungen verstanden, welche durch das Meer entstehen können. Hierbei ist es vor dem Terminus „Küstenschutz“ notwendig, zwischen Küstenhochwasserschutz und Küstensicherung zu differenzieren. Unter Küstenhochwasserschutz wird demnach der Schutz von Niederungsgebieten vor Meeresüberflutungen durch Deiche, Halligwarften oder Sperrwerke verstanden. Hierbei hat das Leben und die Unversehrtheit der Bevölkerung als höchstes Gut in der Gesellschaft oberste Priorität (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Nordfriesland, 2012). Auch wenn dieser Schutz eine zentrale Bedeutung für die Erfüllung der Grundbedürfnisse darstellt, so kann kein absoluter Schutz gewährleistet werden, da Küstenschutzanlagen, wie auch andere technische Bauwerke, stets ein Restrisiko aufweisen. Im Rahmen des Generalplans zum Küstenschutz in Schleswig-Holstein (2012) wird explizit auf dieses Restrisiko hingewiesen, welches unter Einbeziehen des Klimawandels und den daraus resultierenden Auswirkungen durch Sicherheitsstandards quantifiziert wird

(Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Nordfriesland, 2012).



Abbildung 1: Eidersperrwerk bei Tönning (Foto: C. Weise)

Der Küstensicherung hingegen unterliegen alle Angelegenheiten, welche die Küste gegen Uferrückgang und Erosion schützt. Der Bau von Deckwerken, Buhnen oder Sicherungsdämmen sind Maßnahmen, die diesen Problemen entgegenwirken sollen und unter diesem Terminus angesiedelt sind. Einige Küstenabschnitte außerhalb von Siedlungen sind noch sehr naturnah und nicht durch z.B. Deiche gesichert. Viele dieser Gebiete sind gesetzlich geschützt, da eine natürliche Dynamik in diesen Küstenabschnitten, auch unter Anbetracht der Stabilisierung der Nehrungsküsten, erwünscht ist. Vor diesem Hintergrund, als auch unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels ist es notwendig, diese Küstenabschnitte aufgrund von Küstenabbrüchen und zukünftigen Maßnahmen zum Küstenschutz vollständig freizuhalten. Daraus resultiert, dass die Sicherungsmaßnahmen maßgeblich zum Schutz von Siedlungen und wichtiger Infrastrukturen dient. Da der Verantwortungsbereich der Küstensicherung beim Land als auch bei Dritten liegt, ist es für Betroffene möglich, weiter Sicherungen von z.B. Flächen, Gebäuden oder Anlagen unter Berücksichtigung entsprechender Grundsätze, selbst durchzuführen (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Nordfriesland, 2012).

(Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, 2015). Generell lässt sich vor dem Hintergrund des Küstenschutzes sagen, dass die Ausführung der erforderlichen Maßnahmen stets unter der Prämisse steht, Natur und Umwelt geringstmöglich durch Neubauten bzw. Umbauverfahren zu belasten. Eingriffe in die Natur und Landschaft sind bei der Ausführung von Küstenschutzmaßnahme zwar nicht vermeidbar, jedoch gilt es diese Eingriffe so gering wie möglich zu halten. Küstenschutzanlagen sind zwar integraler Bestandteil des Küstenlandschaftsbildes, stehen jedoch in Bezug auf das Ziel einer natürlichen Wattenmeerlandschaft auch im Widerspruch. Daraus resultiert, dass naturverträgliche bzw. –freundliche Maßnahmen zu bevorzugen sind und eine ökologische Durchlässigkeit¹ der Bauwerke angestrebt werden soll (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Nordfriesland, 2012).

2.1 Küstenschutz in Schleswig-Holstein

Im März 2008 bekamen alle Haushalte in Schleswig-Holstein, maßgeblich jedoch die küstennahen Gebiete, eine aufklärende Postwurfsendung zum Thema Sturmfluten durch die Landesregierung Schleswig-Holstein, welche die Bürger(innen) rechtzeitig auf mögliche Gefahren hinweisen soll, über staatliche Vorsorgemaßnahmen informieren und Hinweise über ein korrektes Verhalten im Falle einer Sturmflut geben soll (Landesregierung Schleswig-Holstein, 2008). Fast ein Viertel von Schleswig-Holstein, das sind ca. 3.900 Quadratkilometer, zählen zu den überflutungsgefährdeten Küstenniederungen, in denen über 350.000 Menschen leben und Sachwerte in Höhe von über 49 Milliarden Euro vorhanden sind (Land Schleswig-Holstein, 2018).

Die in der Abbildung 2 markierten überflutungsgefährdeten Küstenregionen verlaufen entlang der gesamten Westküste und würden ohne die bestehenden Küstenschutzmaßnahmen überflutet werden. Die hier grün gekennzeichneten Bereiche der Karte stellen die Niederungsgebiete dar, in denen neben den 350.000 lebenden Menschen 172.000 Menschen arbeiten. Als sturmflutgefährdet gelten solche Gebiete

¹ Die Möglichkeit der ungehinderten Ausbreitung innerhalb ihres natürlichen Lebensraumes von aquatische Lebewesen (Reinboth, 2018)

der Nordsee, die weniger als 5m über dem Meeresspiegel (NN) liegen.

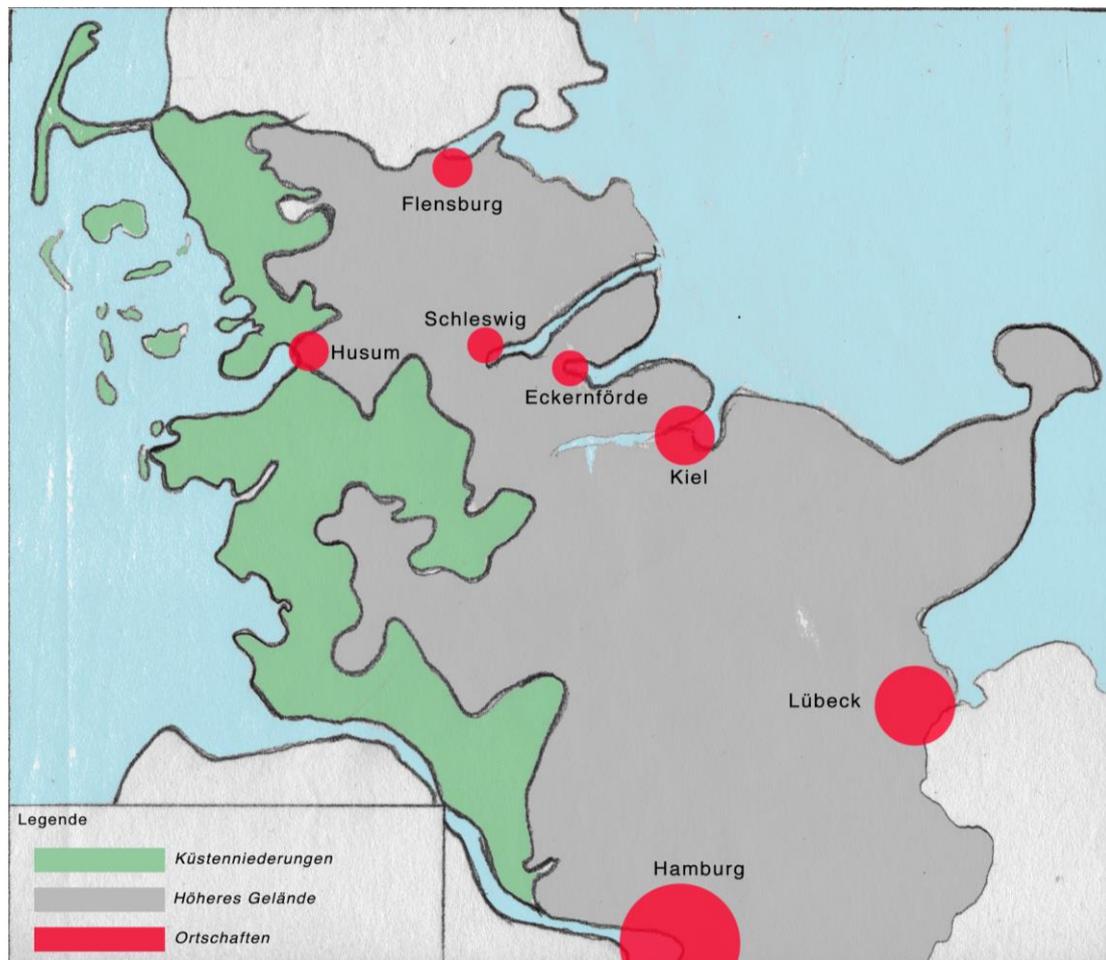


Abbildung 2: Überflutungsgefährdete Niederungsgebiete (H. Petschull, verändert nach (Landesregierung Schleswig-Holstein, 2008))

In diesen Bereichen würde es bei Extremsturmfluten zu einer vollständigen Überflutung kommen, wenn die Deiche nicht wären (Landesregierung Schleswig-Holstein, 2008).

Die nachfolgende Tabelle (Tabelle 1) veranschaulicht die Klassifizierung von Sturmfluten in ihren Schweregrad, wie sie vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) eingeteilt werden. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Werte der Tabelle auf das mittlere Hochwasser (MHW) beziehen. An der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste liegt das mittlere Hochwasser, je nach Region, zwischen 1,5 und 1,7m über Normalnull (NN) (BSH, 2018). Demnach liegt bei einer Höhe von 1,5 – 2,5 Metern über dem mittleren Hochwasser eine Sturmflut vor. Bei einer Höhe von 2,5 bis 3,5 Meter über

MHW liegt laut BSH eine schwere Sturmflut vor und bei Wasserständen über 3,5m über dem mittleren Hochwasser liegt eine sehr schwere Sturmflut vor.

Klassifizierung von Sturmfluten an der Nordseeküste Schleswig-Holsteins

	Nordseeküste (Wasserstand in Metern über MHW)
Sturmflut	1,5 – 2,5
Schwere Sturmflut	2,5 – 3,5
Sehr schwere Sturmflut	3,5 und höher

Tabelle 1: Klassifizierung von Sturmfluten an der Nordseeküste Schleswig-Holstein (verändert nach: BSH, 2018)

Damit jedoch überhaupt eine Sturmflut an der Nordseeküste entsteht, müssen drei wesentliche Faktoren zusammentreffen. Neben einer Mindesthöhe des Wasserstandes von 1,5m über MHW muss darüber hinaus der Sturm aus nordwestlicher Richtung kommen und der korrekte Zeitpunkt des Sturms vor und während des Hochwassers muss gegeben sein. Betrachtet man vor diesem Hintergrund und unter Rücksichtnahme der Tabelle 1 die Daten über das Aufkommen von Sturmfluten an der Nordsee des BSH, so wurden seit 1967 in der Nordsee 64 Sturmfluten mit Wasserständen über 2,5m über dem mittleren Hochwasser (schwere Sturmflut) gemessen. Von diesem 64 Sturmfluten wiesen 13 davon Wasserstände einer sehr schweren Sturmflut auf. Allein im Sturmflutjahr 2016/2017 wurden 6 Sturmfluten, hiervon zwei Schwere, aufgezeichnet. In der Sturmflutsaison 2018/2019 hat sich von insgesamt 11 Sturmfluten eine Schwere ereignet (BSH, 2018). Da jedoch die Windstärke maßgeblichen Einfluss auf die Höhe der Sturmflut hat, wird auch diese zur Einstufung der Sturmfluten in Klassen herangezogen. Hierzu nennt Peter Wieland (1990) drei Analogien zu den in Tabelle 1 aufgeführten Begriffen, nämlich:

Sturmflut	Windflut
schwere Sturmflut	Sturmflut
Sehr schwere Sturmflut	Orkanflut

Tabelle 2: Wortanalogien der Sturmfluten (verändert nach (Wieland, 1990))

Diese von Wieland beschriebene Einstufung muss jedoch für jeden Ort gesondert vorgenommen werden, da die aufstauende Wirkung gleicher Windkräfte aufgrund der unterschiedlichen natürlichen Gegebenheiten entlang der Küste verschieden stark ist (Wieland, 1990). Das jetzige Marschgebiet Schleswig-Holsteins, welches 3.404 Quadratkilometer umfasst und unterhalb von NN +5m liegt, wird heutzutage von einer ca. 408 km langen Deichlinie gesichert. Um das umliegende Gebiet zu entwässern, sind insgesamt 46 Siele, Schöpfwerke als auch Sperrwerke in den Landesschutzdeichen vorhanden. Diese Entwässerungsstrategien über die Außentiefs der Nordsee sowie die langfristige Gewährleistung ihrer Funktionalität haben, besonders unter Berücksichtigung des prognostizierten Anstiegs des Meeresspiegels (Kapitel 2.2), eine besondere Bedeutung (Ministerium für ländliche Räume, 2001). Prägend für die Westküste in Schleswig-Holstein ist eine sehr intensive Morphodynamik des Wattenmeeres, welche in kurzer Zeit zu massiven Veränderungen der Küstengestalt führen kann. Vor allem durch Änderungen im Meeresspiegelniveau, dem Windklima, in der Tide als auch im Sedimentvorkommen, werden langfristige morphologische Entwicklungen stark beeinflusst. Betrachtet man vor diesem Hintergrund die Entwicklung der jährlichen Höchstwasserstände am Beispiel von Husum, so ist der starke Anstieg der Jahreshöchstwasserstände um insgesamt etwa einen Meter seit 1875 auffällig. In Abbildung 3 wird dieser Anstieg durch die lineare Regressionsgerade gekennzeichnet, welche einen positiven Verlauf aufweist. Die Jahreshöchstwasserstände auf der Y-Achse sind in Zentimetern angegeben und beziehen sich auf einen Pegel über Normalnull. Somit wurde beispielsweise der höchste Wasserstand am 3. Januar 1976 mit NN +5,61 Metern gemessen (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Nordfriesland, 2012). Aufgrund dieses hier beschriebenen Anstiegs der Jahreshöchstwasserstände, als auch des Anstiegs des Meeresspiegels im Laufe der letzten hundert Jahre, haben die Sturmfluten an der Nordseeküste heutzutage ein höheres Ausgangsniveau und laufen höher auf (Umweltbundesamt, 2019). Betrachtet man, über die Pegelstandentwicklung hinaus, die Entwicklung der Windrichtungen in Schleswig-Holstein, so wird der in diesem

Kapitel beschrieben Faktor des Windes, welcher aus nordwestlicher Richtung kommen muss damit eine Sturmflut zustande kommt, erfüllt.

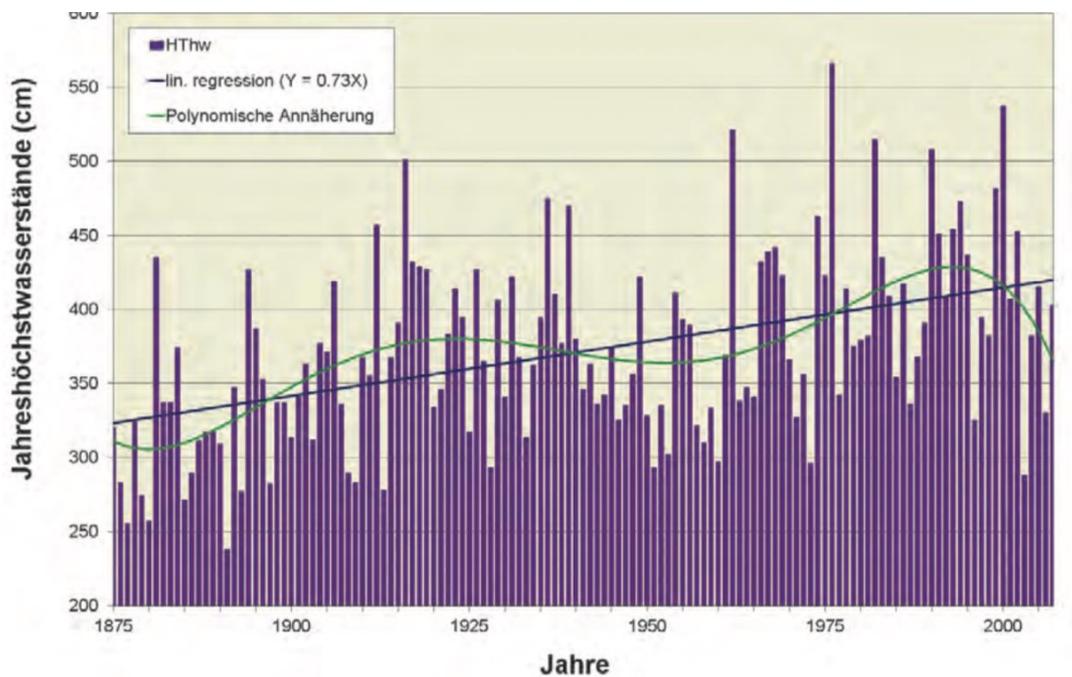


Abbildung 3: Entwicklung der Jahreshöchstwasserstände am Pegel von Husum seit 1875. (mit Erlaubnis von: (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Nordfriesland, 2012))

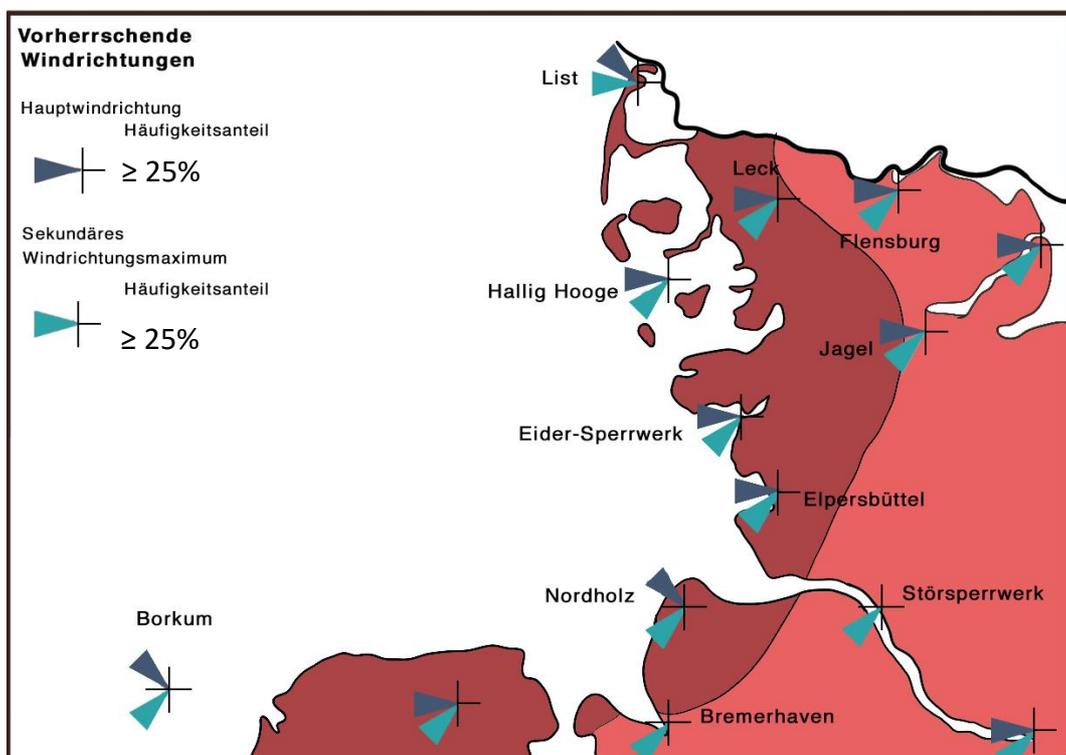


Abbildung 4: Bodennahe Windverhältnisse der Jahre 1976 bis 1995 in Norddeutschland (H. Petschull, verändert nach (Bürger, 2003))

Die Karte der bodennahen Windverhältnisse von 1976 bis 1995 in Schleswig-Holstein (Abbildung 4) verdeutlicht, dass der Wind mit einer Häufigkeit von größer gleich 25% maßgeblich aus westlicher bzw. nordwestlicher Richtung weht. Betrachtet man darüber hinaus die Färbung der einzelnen Gebiete so fällt auf, dass die gesamte Nordseeküste eine dunkelrote Färbung aufweist. Dies bedeutet, dass die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit in 10m Höhe und über Flächen mit geringer Rauigkeit in diesem Gebiet größer gleich 5 Metern pro Sekunde liegt und die Nordseeküste somit zu einer der windstärksten Regionen Deutschlands gehört (Bürger, 2003). Berücksichtigt man neuere Daten aus den Jahren 1981 bis 2015, so liegt die mittlere Windgeschwindigkeit im Gebiet der Nordseeküste bei 5,4 m/s und die Sturmintensität im Gebietsmittel über Land- und Meeresflächen bei 12,5 m/s (Helmholtz-Zentrum Geesthacht, 2021). Berücksichtigt man darüber hinaus noch die Windstärken (ohne Böen) während der Sturmfluten im Jahre 2019 und 2020, wie sie vom BSH in den Berichten zu den Nordsee-Sturmfluten dokumentiert wurden, so kommen auch hier die häufigsten Stürme aus den Windrichtungen West bzw. Nordwest mit einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit zwischen 7 und 8 Beaufort, was 13,9 bis 24,4 Metern in der Sekunde bzw. 50 bis 88 km/h entspricht (BSH, 2018).

Zusammenfassend lässt sich unter Berücksichtigung der in diesem Kapitel genannten Faktoren sagen, dass dem Küstenschutz für Schleswig-Holstein aufgrund der häufig auftretenden Westwinde als auch des Anstiegs des Meeresspiegels eine übergeordnete Bedeutung zukommt, um die Küstenregionen ausreichend und nachhaltig zu schützen. Aus diesem Grund ist eine flexible Schutzstrategie für die Wirksamkeit des Küstenschutzes an der Schleswig-holsteinischen Nordseeküste entscheidend (Dzuba & Brix, 2021). Diese Strategien und Maßnahmen sind im Generalplan Küstenschutz und den dazugehörigen Fortschreibungen verortet, in denen als Richtlinie auch ein Leitbild sowie Entwicklungs- als auch Handlungsziele (wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits thematisiert) definiert werden, um das Land Schleswig-Holstein, welches stark von seinen Küsten geprägt ist, zu schützen.

2.2 Die Nordseeküste im Klimawandel

Betrachtet man nun vor dem Hintergrund des Klimawandels die in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Daten in Bezug auf den Meeresspiegelanstieg, so wird man mit unterschiedlichen Werten und Vorhersagen, die diesen Anstieg prognostizieren, konfrontiert. Je nach zugrunde gelegtem Berechnungsmodell schwanken die Angaben teilweise stark. Die Wissensplattform ESKP vom Helmholtz-Institut schreibt in einem Grundlagenartikel, dass der Meeresspiegel zwischen 30cm und 100cm bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erhöhen kann. Ein solcher Anstieg würde zwangsläufig Auswirkungen auf zukünftige extreme Wetterereignisse wie z.B. Sturmfluten haben. In der Nordsee könnten die Sturmfluten durch den Anstieg der Meeresspiegel über einen Meter höher als normal ausfallen. Daraus würde resultieren, dass sich das vor Sturmfluten an der Nordseeküste zu schützende Gebiet um bis zu 10% vergrößert (Dzuba & Brix, 2021).

Eine Vielzahl, teilweise seit 1900 bestehende, Pegelmessstationen in der Nordsee geben Aufschluss auf die Veränderungen des Meeresspiegels. Aus diesen Daten geht laut Helmholtz-Institut hervor, dass höhere Gezeiten-Flutwellen und Geschwindigkeiten, verstärkte Erosion, Küstenabbrüche, stetige Überflutung von Wattflächen als auch Salzwiesen und landwirtschaftlichen Nutzflächen als Folge des Meeresspiegelanstiegs erwartet werden. Hiervon sind speziell Inseln, Halligen, flache Küstenregionen, als auch Städte an Meeresflüssen der Nordsee betroffen, da häufige Westwinde, wie in Kapitel 2.1. beschrieben, die Wassermassen landeinwärts drücken (ESKP, 2021)

Wie im Rahmen dieser Arbeit bereits beschrieben, sind Küstenregionen naturgemäß dynamische Systeme, welche von stetigen Veränderungen geprägt sind. Der Klimawandel als eine wesentliche Veränderung und die daraus resultierenden Folgen für die Ozeane und Küsten treten unter Anbetracht der trägen Reaktionszeit des Klimasystems jedoch erst verzögert ein, sodass Folgen der Emissionen vergangener Jahre erst in kommenden Jahrzehnten sichtbar werden. Darüber hinaus muss jedoch auch davon ausgegangen werden, dass sich bereits eingetretene und auswirkende Veränderungen des Klimasystems soziale, ökologische als auch ökonomische Folgen haben wird. Aus diesen Gründen und vor dem Hintergrund der in Kapitel 2 angeführten

Ziele des Küstenschutzes ist es notwendig, umfassende und flexible Strategien zu entwickeln bzw. anzupassen, um die Küsten zukünftig zu schützen (Hirschfeld, Hoffmann, & Welp, 2012). Die aktuellen Küstenschutzmaßnahmen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste sind nach Angaben des Helmholtz-Zentrums in Geesthacht bis zum Jahre 2030 noch genauso wirksam wie heute und werden den Sturmfluten bis dahin standhalten, da diese bis zum Jahr 2030 zwischen 10 und 30 Zentimetern höher auflaufen werden. Bis zum Ende des Jahrhunderts besteht allerdings aufgrund der erhöhten Sturmflutwasserstände Handlungsbedarf und die vorherrschenden Küstenschutzmaßnahmen müssen angepasst werden, um ausreichenden Schutz bei Sturmfluten zu gewährleisten (Meinke, Weiße, & von Storch, 2011), da diese in Zukunft öfter als auch höher auflaufen können (Deutsches Klima Konsortium, 2019). Auch der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) sieht den Anstieg der Meeresspiegel als eine gravierende Folge des vom Menschen beeinflussten Klimawandels an und schreiben in ihrem Bericht aus dem Jahre 2007 von einem Meeresspiegelanstieg von 18 bis 59cm in den kommenden hundert Jahren. Als Folge eines Anstiegs in dieser Größenordnung prognostiziert der IPCC die Erosion an Küsten sowie das Eindringen von Salzwasser in Süßwasserreserven. Des Weiteren häufen sich laut Bericht im zweiten Drittel des 21. Jahrhunderts die Überflutungen in den Küstengebieten, die darüber hinaus auch stärker als bisher ausfallen (Pachauri & Reisinger, 2008). Berücksichtigt man nun den Zusammenhang zwischen den langfristigen Änderungen des mittleren Meeresspiegels an der Nordsee und den damit zusammenhängenden Höhen der auftreffenden Sturmfluten so lässt sich sagen, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit von besonders hohen Sturmflutwasserständen sehr hoch ist und extreme Sturmfluten zukünftig eine nicht zu unterschätzende Gefährdung für die norddeutsche Küstenregion darstellt (Weiße & Meinke, 2017).

Abbildung 5 verdeutlicht diesen Zusammenhang mit Hilfe der Liniengrafik. Betrachtet man die Werte von Wittdün stellvertretend für die schleswig-holsteinische, die zusätzlichen Werte von Cuxhaven und Borkum stellvertretend für die gesamte deutsche Nordseeküste, so lässt sich erkennen, dass der Mittelwert der jährlichen höchsten (Tide) Hochwasserstände im Laufe der Jahre steigt.

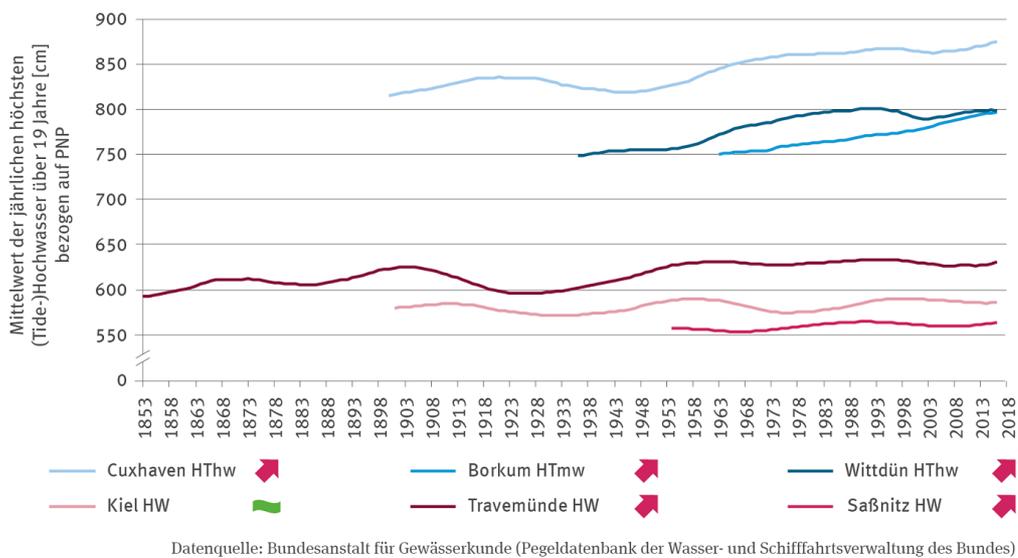


Abbildung 5: Mittelwerte der jährlichen höchsten Tidenmittelwasser (mit Erlaubnis von: (Umweltbundesamt, 2019))

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.1 erläuterten drei Faktoren trifft eine Sturmflut dann hoch auf, wenn auch das Tidenhochwasser eine entsprechende Höhe aufweist. Infolge der astronomischen Tide an der Nordseeküste tritt eine regelmäßige Erhöhung des mittleren Wasserspiegels ein. Extreme Wetterlagen wie z.B. hohe Windgeschwindigkeiten aus Westen führen in Form eines Windstaus dazu, das zusätzliche Wassermassen an die Küste gedrückt werden und sorgen somit zu einer weiteren Wasserstandserhöhung. Da sich der Windstau umgekehrt proportional zu der Wassertiefe verhält, laufen die Wassermassen besonders in flachen Küstenabschnitten hoch auf. Die Sturmfluthöhe ergibt sich demnach also aus der Addition von Windstau und Tidephase. Erhöht sich nun der mittlere Meeresspiegel durch thermische Ausdehnung und das Abschmelzen von Inlandeis, so muss von einer Erhöhung des Scheitelwertes zukünftiger Sturmflutwasserstände ausgegangen werden (Woth & von Storch, 2007). Im Rahmen der heutigen Erkenntnisse und Schätzungen, so wie sie auch im Bericht der IPCC von 2009 vorgenommen werden, kann der Anstieg des Meeresspiegels regional abweichen. Hierbei ist die Nordsee als ein Randmeer aufgrund der Änderungen der Dichte und der Zirkulation überproportional betroffen und weist im Vergleich zum globalen Mittel einen höheren Anstieg von 10 bis 15cm mehr auf. Wie jedoch eingangs in diesem Kapitel erwähnt, variieren die Berechnungen je nach zugrundeliegendem Modell und Einflussfaktoren. Einer der größten unsicher zu

prognostizierenden Einflussfaktoren ist das Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes, was die Einschätzung des Anstiegs des mittleren globalen Wasserstandes erschwert. Fest steht jedoch, dass das vollständige Abschmelzen mit einem Betrag von zusätzlichen sechs bis sieben Metern auf einigen hundert Jahren anzurechnen ist (Woth & von Storch, 2007). Zusammengefasst lässt sich also sagen, dass die langfristigen Folgen des Klimawandels an der schleswig-holsteinischen Küste eine ernstzunehmende Gefahr darstellt und zu erheblichen Schäden führen kann. Aufgrund der in diesem Kapitel beschriebenen Auswirkungen, werden die Küstenschutzanlagen als auch die Küsten selbst in Folge des Klimawandels wesentlich stärkeren hydrologischen Belastungen ausgesetzt sein und standhalten müssen. Aus diesem Grund ist es essentiell den Küstenschutz stets vor der Thematik des Klimawandels zu betrachten und nicht als zwei voneinander getrennte Gegebenheiten. Als Ergebnis des Sonderberichtes vom IPCC 2019 haben sich Bund und Länder auf die Verwendung des RCP8.5-Szenarios – ein Szenario, welches vor dem Hintergrund der Küstenschutzplanung die höchste Anpassungsnotwendigkeit mit sich bringt – geeinigt. Generell gilt, dass solche Anpassungsmaßnahmen bevorzugt werden sollten, welche zum einen flexibel und nachsteuerbar sind. Das beinhaltet eine Konzeption, die es ermöglicht, eine kostengünstige Anpassung der Maßnahmen vorzunehmen, um auch auf zukünftige, bisher unbekannte Folgen adäquat reagieren zu können. Zum anderen müssen die Maßnahmen dahingehend konzipiert sein, dass ihre Wirksamkeit bei einem weiten Spektrum von Klimafolgen gegeben ist (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Nordfriesland, 2020). Als Entwicklungsrahmen von konkreten Küstenschutzmaßnahmen wurde als eine wesentliche Anpassungs- und Küstenschutzoption der technische Hochwasserschutz vom Land Schleswig-Holstein genannt. Unter diese Kategorie fällt neben den Deichen auch der Bau bzw. die Instandhaltung von Sperrwerken, welche zur Kategorie der konstruktiven Hochwasserschutzanlagen gehören und im folgenden Kapitel am Beispiel des Eidersperrwerks näher erläutert werden (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Nordfriesland, 2020).

3 Sperrwerke

Im Rahmen des Küstenschutzes stellen Absperrbauwerke neben den Deichen eine wichtige Alternative dar. Die hierzu gehörenden Sperrwerke werden als Querbauwerke klassifiziert und sind im Mündungsbereich von Binnengewässern zum Küstengewässer lokalisiert (Dzuba & Brix, 2021). Zu unterscheiden gilt zunächst zwischen Tiden- sowie Sturmflutsperrwerken. Während Tidesperrwerke regelmäßig bei Flut geschlossen werden und zur Stauhaltung sowie zur Gewährleistung des Schiffverkehrs im Binnenland dienen, sollen Sturmflutsperrwerke die normalen Tidenströme nicht behindern. Sie werden bei bedrohlichen Anstiegen des Wasserspiegels – in der Regel bei Sturmfluten – geschlossen, um die gefährdeten Bereiche zu schützen (Wasserstraßen und Schifffahrtamt Elbe-Nordsee, 2021). Die Aufgaben der Sturmflutsperrwerke sind jedoch vielfältiger als nur der Schutz von tidebeeinflussten Niederungen vor Sturmfluten. Sie dienen darüber hinaus den Belangen der Wasserwirtschaft der betroffenen Gebiete, um die Anforderungen an die Schifffahrt angemessen zu berücksichtigen (Gätjen, 1979). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird ausschließlich auf Sturmflutsperrwerke eingegangen, weshalb der Terminus *Sperrwerk* nun vor dem Hintergrund eines Sturmflutsperrwerkes zu verstehen ist.

Die schweren Schäden durch in die Kapitel 2 genannten Sturmfluten führten schon früh zum Bau erster Absperrbauwerke. Die Treene wurde beispielsweise bereits im Jahr 1570 mit Sielbauwerken abgedämmt, um die umliegenden Niederungen vor Sturmfluten zu sichern. Bereits im ersten Generalplan Deichverstärkung, Deichverkürzung und Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein im Jahr 1963 war die Deichverkürzung durch Abdämmung von Flussmündungen gefordert (Ministerium für ländliche Räume, 2001), um die Deichverteidigung zu erleichtern, das Schadensrisiko zu vermindern und auch die Unterhaltungskosten so gering wie möglich zu halten. Um diese Verkürzung der Deiche zu realisieren, werden Sperrwerke möglichst im mündungsnahen Bereich eines Tidenflusses angelegt, um einen großen Speicherraum für das, während der Sperrung anfallende Wasser, zu gewinnen (Gätjen, 1979). Die genaue Funktionsweise sowie die dazugehörigen Betriebsformen werden im Folgenden am Beispiel des Eidersperrwerkes beschrieben. Darüber hinaus dient das Eidersperrwerk im weiteren Verlauf dieser Arbeit

als Referenzobjekt und wurde für die Konstruktion und die Erstellung des in Kapitel 4 beschriebenen Exponates herangezogen.



Abbildung 6: Eidersperrwerk (Foto: C. Weise)

Das in Abbildung 6 dargestellte Eidersperrwerk ist ein in der Eidermündung gelegenes Sturmflutsperrwerk in der Nähe von Tönning, welches zum Schutz der Niederungen der Eider vor Sturmfluten, zur Verbesserung der Vorflut des Einzugsgebietes und zur Aufrechterhaltung der Schifffahrt von 1967 bis 1972 errichtet wurde. Für diesen Zweck wurde das Sperrwerk mit fünf Durchflussöffnungen konstruiert, welche eine lichte Breite von je 40 Metern aufweisen. Diese Durchflussöffnungen sind mit zwei Stahlsegmentverschlussreihen ausgestattet, welche, je nach Betriebsform und Anwendungsbedarf, entsprechend geöffnet bzw. geschlossen werden können (Meurer, 2000). Jedes dieser Torsegmente ist ölhydraulisch angetrieben, hat, genau wie die Durchflussöffnungen auch, eine lichte Breite von je 40 Metern, wiegt 250 Tonnen und hat eine Fläche von über 400 Quadratmetern (Cordes, 1973). Um den großen einwirkenden Kräften standzuhalten, wurden für den Bau neben den 33.000 Kubikmetern Beton auch 7.000 Kubikmeter Spannbeton und darüber hinaus 9.000 Tonnen Beton- und Spannstahl verwendet, um den vertikalen als auch den großen auftretenden Horizontalkräften standzuhalten (ebd.).

Das Einzugsgebiet der Eider (gelbes Gebiet in Abbildung 7) welches vom Eidersperrwerk abgedämmt wird, umfasst über 2000 Quadratkilometer. Im Ästuar der Eider, welcher in der Abbildung 7 rot umkreist ist, fließen bei jeder Tide ca. 50 Millionen Kubikmeter Wasser mit dem Verlauf der Gezeit landeinwärts bzw. –auswärts. Hierbei kann es zu Strömungsgeschwindigkeit von bis zu drei Metern in der Sekunde kommen, weshalb das Eidersperrwerk einer Vielzahl von einwirkenden Kräften standhalten muss (Cordes, 1973). Aus diesem Grund ist bei Sperrwerken stets eine doppelte Torsicherheit notwendig, was bedeutet, dass in jeder Sielöffnung



Abbildung 7: Einzugsgebiet der Eider (H. Petschull, verändert nach (Wenzel, 1972)).

zwei unabhängig voneinander funktionierende Verschlüsse hintereinander vorhanden sind und somit beim Versagen des einen, der andere Verschluss einen Schutz bietet (Abbildung 14) (Gätjen, 1979).

Die Funktionsweise und Betriebsarten des Eidersperrwerks mit seinen doppelten Toren pro Sielsegment gehen jedoch über die einfache Funktion der doppelten Torsicherheit hinaus. Das Sperrwerk umfasst heutzutage vier Betriebsarten, welche in Abhängigkeit der meteorologischen als auch hydrologischen Einflüsse eingesetzt werden (Hollmer, 1992). In 80% aller Tiden läuft das Sperrwerk in seinem Normalbetrieb (auch: Tidebetrieb). Hierbei sind beide Tore geöffnet. Das Eider- als auch Nordseewasser kann ungehindert passieren und es findet keine Wasserregulierung zwischen Nordsee sowie Eider statt und die Wasserpegel verlaufen in etwa identisch mit dem Verlauf der Gezeiten (Abbildung 8).

Normalbetrieb ohne Flutdrosselung

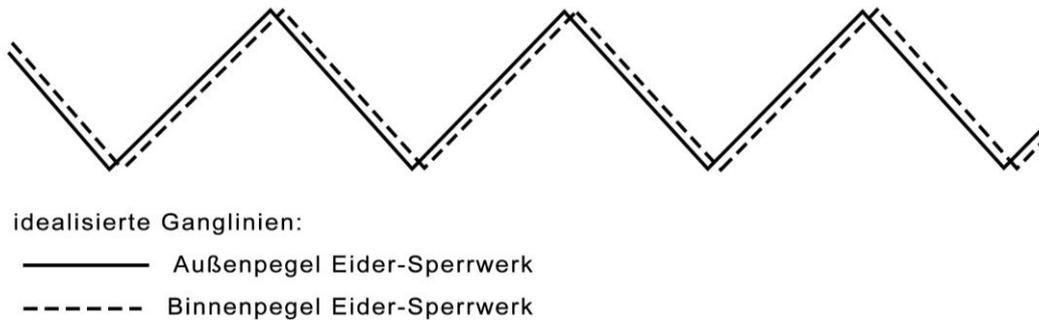


Abbildung 8: Normalbetrieb des Eidersperrwerks (H. Petschull, verändert nach (Hollmer, 1992))

1980 ist der Normalbetrieb des Sperrwerks um die Flutdrosselung erweitert worden (Hollmer, 1992). Der Normalbetrieb mit Flutdrosselung dient dazu, die Flut- und Ebbstromdauer anzugleichen und somit die Flutströmungsgeschwindigkeit zu reduzieren. Daraus resultiert eine Entschärfung des Versandungsproblems der Außeneider, indem nicht mehr so viel Sediment transportiert wird. Die Linien in Abbildung 9 zeigen, dass der Binnenpegel der Eider im Vergleich zum Außenpegel der Eider langsamer ansteigt und somit die Flut gedrosselt wird. Hierfür wird das Außentor des Sperrwerks teilweise abgesenkt, um die Strömungsintensität zu reduzieren (Wasserstraßen und Schifffahrtamt Elbe-Nordsee, 2021).

Normalbetrieb mit Flutdrosselung

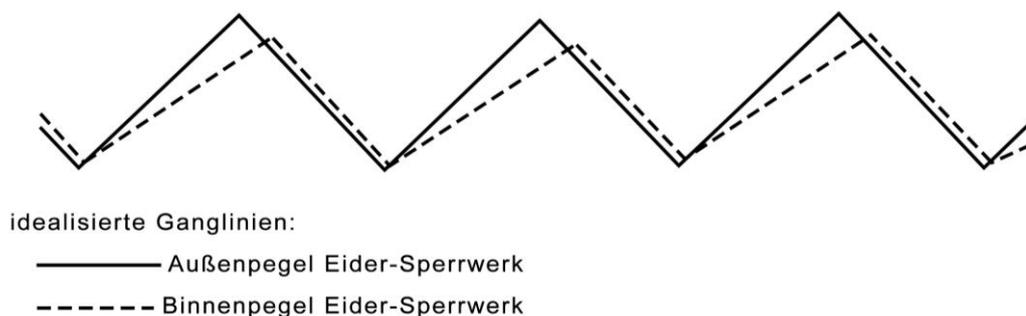


Abbildung 9: Normalbetrieb mit Flutdrosselung (H. Petschull, verändert nach (Hollmer, 1992))

Der vor 1980 angewandte Rückhalte- oder auch Spülbetrieb, welcher eine ähnliche Funktion wie die Flutdrosselung übernahm, wurde nach kurzer Betriebsdauer aufgrund von Protesten wieder eingestellt, da durch die Spülung die Fanggründe der Fischerei erheblich beeinträchtigt wurden. Bei diesem bis 1967 angewandtem Spülbetrieb

wurden die Sperrwerkstor bei Hochwasser geschlossen und das Wasser bis zu zwei Stunden nach Eintritt des Ebbstroms zurückgehalten. Durch das Öffnen der Tore ergab sich ein intensiver Spülstoß aufgrund des entstandenen Gefälles zur Außeneider, welcher es ermöglichte, einen großen Abschnitt der Außeneider vor Versandung freizuhalten (Dietz, 1995). Eine Weiter Betriebsart, welche bei ca. 6-8% der Tiden zum Einsatz kommt, ist der Sielbetrieb.

Sielbetrieb

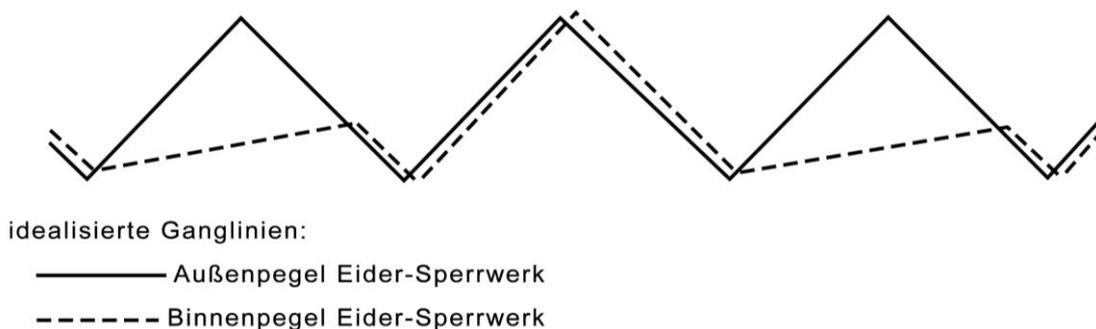


Abbildung 10: Sielbetrieb des Eider-Sperrwerks (H. Petschull, verändert nach (Hollmer, 1992))

Bei bedrohlichen Wasserständen im Binnenland wird das Außentor des Sperrwerks geschlossen und das Binnentor bleibt offen, um einen möglichst großen Speicherraum im Binnenland bereitzustellen. Für die tiefgelegenen Entwässerungsgebiete wird hierdurch die Sielzugzeit verlängert, weshalb dieser Betriebsart bei z.B. starken Niederschlägen eine große Bedeutung zukommt. Abbildung 10 zeigt deutlich den langsamen Anstieg des Binnenpegels, während der Außenpegel dem Verlauf der Tide folgt. Mit fortlaufendem Ebbstrom wird dann das Außentor geöffnet und somit das Binnenland entwässert (Dietz, 1995). Bei einer Sturmflut oder anderen extremen und bedrohlichen Wetterlagen sowie Betriebsstörungen und der dazugehörigen Überwachung sowie Unterhaltung der Betriebsanlagen, wird das Eider-Sperrwerk in den Sperrbetrieb bzw. Sturmflutbetrieb (Abbildung 11) geschaltet. Hierbei werden beide Tore des Sperrwerkes möglichst frühzeitig bei Niedrigwasser geschlossen, um das Binnenland zu schützen. In Abbildung 11 ist der Verlauf einer Sturmflut durch die durchgehende Linie gekennzeichnet, während der Binnenpegel durch die gestrichelte

Linie gekennzeichnet wird und einen gleichmäßig und nicht übermäßig steigenden Verlauf des Binnenpegel während einer Sturmflut aufzeigt (Wasserstraßen und Schifffahrtamt Elbe-Nordsee, 2021).

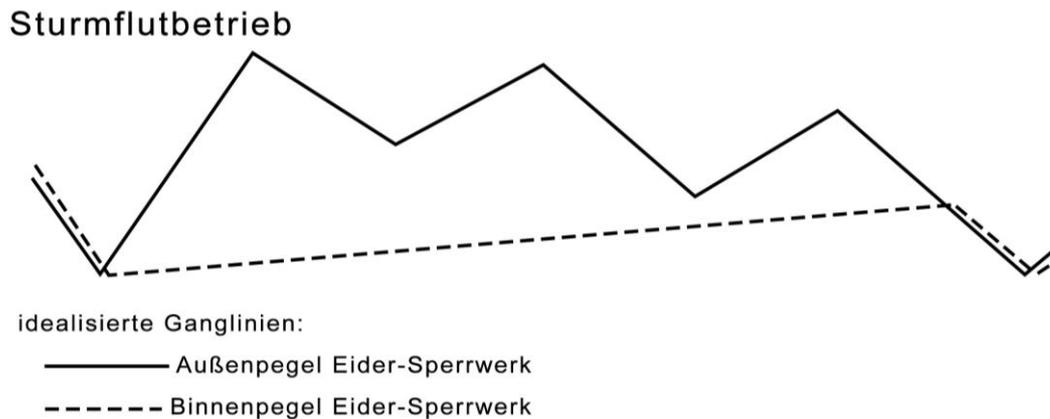


Abbildung 11: Sturmflutbetrieb (H. Petschull, verändert nach (Hollmer, 1992))

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass das Eider-Sperrwerk als größtes technisches Bauwerk an der deutschen Nordseeküste eine Mehrfachfunktion hat und keinesfalls ausschließlich dem Schutz vor Sturmfluten dient (Wieland, 1990). Nicht nur als ein massives Bauwerk des Küstenschutzes sondern auch als Sehenswürdigkeit ist das Eidersperrwerk ein fester Bestandteil des norddeutschen Küstenbildes, weshalb es sich aus mannigfaltigen Gründen als Referenzobjekt eines Exponates, so wie es im Folgenden beschrieben wird, dient.

4 Das Exponat

Exponate, definitorisch Grundsätzlich als ein Ausstellungsstück zu verstehen, können auf vielfältige Art und Weise Wissensinhalte vermitteln und darstellen. Streng genommen wird also im weiteren Verlauf dieser Arbeit der Entwicklungs- und Fertigungsprozess eines Modells beschrieben, da Modelle vereinfachte Repräsentanten von realen Objekten oder Systemen sind. Hierbei entsprechen sie in den wesentlichen Eigenschaften dem Original, um der Gewinnung und Vermittlung von Kenntnissen zu dienen (Killermann, Hierung, & Starosta, 2011). Dieses Modell, welches zukünftig als ein

Exponat dienen soll und im weiteren Verlauf dieser Arbeit auch als *Exponat* betitelt wird, soll über seine Interaktivität hinaus auch modular aufgebaut und nachbaubar sein. Die folgenden Kapitel veranschaulichen den Prozess von der ersten Idee über die Konstruktion, bis hin zum fertigen Exponat und zeigen Probleme als auch Lösungen auf, die während des Entwicklungsprozesses entstanden sind.

4.1 Zur Idee

Die grundlegende Idee zu einem interaktiven Exponat stammt aus der Zusammenarbeit mit dem Studenten Christian Weise der Europa-Universität-Flensburg. Im Herbstsemester 2020/2021 wurde im Rahmen des Kurses *Forschung und Präsentation* in einer Gruppenarbeit ein Modell entwickelt, welches die Funktionsweise von Deichen interaktiv veranschaulichte, indem Wasser in ein durchsichtiges, mit einem Deich besetzten Gebinde gepumpt und somit der Verlauf des Wassers durch den Deich als auch die unterschiedlichen Pegelstände auf den jeweiligen Deichseiten veranschaulicht wurden. In Fortsetzung und Reflexion zu diesem hier beschriebenen Deichmodell, entstand die Idee ein Exponat zum Küstenschutz zu erstellen, an dem interaktiv und im Sinne eines *Hands-On-Exponates* gearbeitet und ausprobiert werden kann.

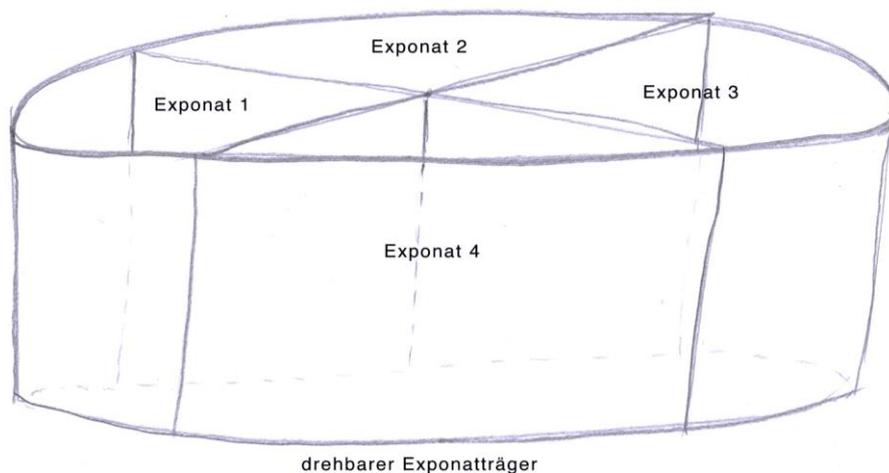


Abbildung 12: Ursprüngliche Idee zum drehbaren Exponatträger (H. Petschull)

Als ursprünglichste Idee ergab sich ein kreisrunder, in Viertel aufgeteilter und drehbarer Exponatträger (Abbildung 12), in dessen einzelnen Parzellen jeweils eine

Küstenschutzmaßnahme präsentiert wird. Diese reduzierte Variante, bestehend aus einer rechteckigen Grundplatte, beherbergt zwei Küstenschutzmaßnahmen, welche im Verbund, also einem Exponatträger, präsentiert werden, um ein realistisches Abbild einer Küstenregion darzustellen. Die Maßnahme und der Bau des Deiches als Küstenschutzmaßnahme wird ausführlich von Christian Weise in seiner Masterthesis (Weise, 2021) dokumentiert, während hier auf das oben beschriebene Eidersperrwerk Bezug genommen wird. Abbildung 13 zeigt eine skizzierte Idee des reduzierten Exponat-Designs.

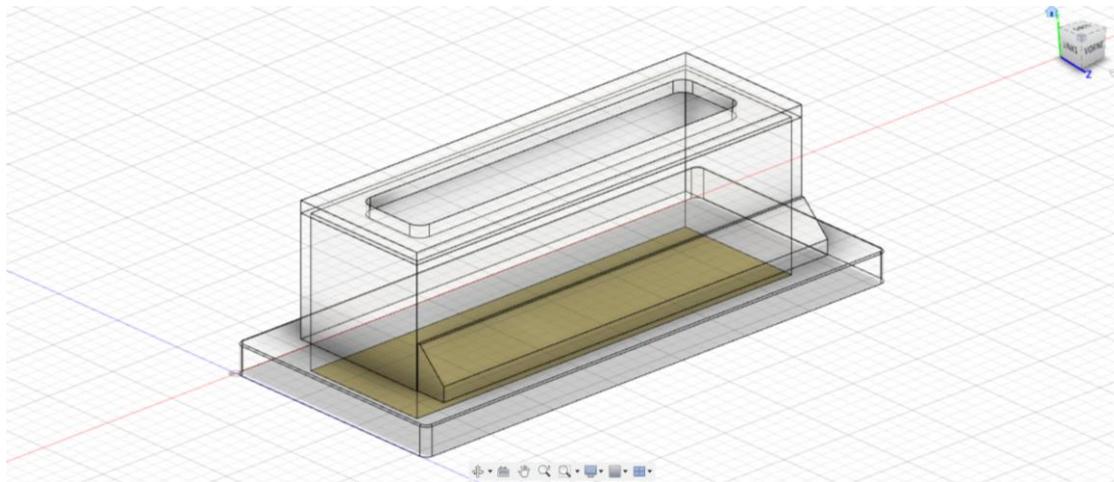


Abbildung 13: Skizze des Exponatträger-Entwurfes (H. Petschull)

Aufgrund der angestrebten Möglichkeit des Nachbaus für z.B. Schulklassen, wurde bei der Konstruktion darauf geachtet, dass jedes Modell einer Küstenschutzmaßnahme für sich alleine stehen oder aber im Verbund dargestellt werden kann. Darüber hinaus wurde auf eine möglichst einfache Umsetzung geachtet, die es Lernenden und Lehrenden in unterschiedlichen Klassenstufen ermöglicht, das Exponat oder Teile davon im Regelunterricht oder im Rahmen von Projekten nachzubauen. In diesem Fall wurde sich für einen gemeinsamen Exponatträger entschieden, dessen Aufbau im Kapitel 4.5 kurz erläutert und von Christian Weise (Weise, 2021) ausführlich thematisiert wird. Vor dem Hintergrund des Nachbaus wurde ausschließlich auf frei und kostenlos zugängliche bzw. Open-Source-Methoden zurückgegriffen.

Die grundlegende Idee vor dem Hintergrund der Interaktivität ist, dass der Exponatträger durch ein Pumpsystem auf Knopfdruck durch Lernende geflutet werden kann und somit eine Sturmflut simuliert wird. Mit Hilfe zweier Drehknöpfe können dann

die Tore des Sperrwerks unabhängig voneinander geöffnet bzw. geschlossen werden. Die unabhängige Öffnung bzw. Schließung der Tore ermöglicht es Exponatbenutzer(innen), die unterschiedlichen Betriebsarten des Eidersperrwerks (vgl. Kapitel 3) am Modell auszuprobieren, wobei der Fokus hier deutlich auf dem Sperr- bzw. Sturmflutbetrieb, also der Abwehr von Sturmfluten, liegt.

4.2 Didaktische Vorüberlegungen

In Anbetracht der Einsetzbarkeit im Schulunterricht wurden einige didaktische Vorüberlegungen angestellt, die es bei der Konstruktion und Umsetzung zu beachten gilt. Wie bereits beschrieben, handelt es sich bei Modellen um Repräsentanten von realen Objekten oder Systemen. Hierbei unterscheidet sich ein Modell vom Original anhand seiner Abstraktion, d.h. es findet eine Informationsreduktion statt. Für das Modell des Eidersperrwerks bedeutet das, dass wesentliche und für das Exponat relevante Eigenschaften hervorgehoben und nebensächliche Eigenschaften weggelassen werden (Killermann, Hiering, & Starosta, 2011). Konkret steht hier die Funktionsweise, das Bewegen der Sperrwerkstore, im Vordergrund, indem durch Drehen der Knöpfe diese bewegt werden und das Wasser abgehalten wird. Wichtige Mechanismen der Konstruktion und Funktionsweise wurden, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, vom Original übernommen oder adaptiert. Auf originalgetreues Aussehen, welches die Konstruktion nicht in der Funktion beeinflusst, wurde verzichtet bzw. lediglich rudimentär angedeutet. Darüber hinaus wird vor dem Hintergrund der Abstraktion lediglich einer von insgesamt fünf Sielverschlüssen dargestellt, da sich die Sielverschlüsse in ihrer Funktion gleichen und einer somit auf übersichtliche Weise das Funktionsprinzip darstellen kann. Darüber hinaus kommt es bei Modellen zu einer Umdimensionierung sowie zur Verwendung anderer Materialien (Killermann, Hiering, & Starosta, 2011). Die Dimensionen des Sperrwerks wurden im Verhältnis des zur Verfügung stehenden Druckbereiches des 3D-Druckers (4.4.1) angepasst, können jedoch, da die Dateien mit Hilfe eines kostenlos zugänglichen Konstruktionsprogramm entworfen wurden, zum Nachbauen je nach Belieben skaliert werden. Als Material wurde PLA-Filament, also Kunststoff verwendet, da dieses Material von allen 3D-

Druckern verarbeitet werden kann. Generell wurde sich für die Variante des 3D Drucks entschieden, da der dreidimensionale Ausdruck von Objekten für viele schulische Lernsituationen, die in den Fachanforderungen vieler Fächer angelegt sind, eine Bereicherung darstellt. Hierbei steht besonders die fächerübergreifende Anwendbarkeit im Vordergrund, was den Nachbau dieses Exponats prädestiniert für eine Projektwoche macht (QUA-Lis NRW, 2021). Durch die Bereitstellung der fertig konstruierten Druckdateien des Sperrwerks ist es möglich, das Modell zum einen so auszudrucken, wie es ursprünglich konstruiert wurde, oder aber im Rahmen einer Unterrichtseinheit Anpassungen vorzunehmen.

Durch strukturelle Reduktion und das Bemühen um Anschaulichkeit sollen Modelle zum besseren Verständnis des Originals beitragen. Der Einsatz von fertigen Modellen kann Strukturen bzw. Prozesse veranschaulichen, das Verständnis für Sachverhalte erleichtern und Abwechslung ins unterrichtliche Geschehen bringen. Die Erstellung eigener Modelle, so wie es bei dem Sperrwerk durch die Anpassungsmöglichkeit gegeben ist, unterstützt darüber hinaus auch die Erkenntnisgewinnung, da sich die Lernenden im Voraus mit den Abläufen des Originals vertraut machen müssen (Killermann, Hiering, & Starosta, 2011).

Die elektronische Steuerung des Exponats soll über die Open-Source-Plattform *Arduino* realisiert werden (4.4.2). Auch hier sind die für das Exponat geschriebenen Codes zur Steuerung der Sperrwerkstore frei zugänglich und können direkt verwendet werden, wenngleich die Möglichkeit für die Lernenden besteht, die Codes anzupassen und umzuschreiben. Auch hier besteht im Rahmen eines fächerübergreifenden Unterrichts oder einer Projektwoche die Möglichkeit, sich intensiv mit dem Themenfeld des Programmierens mittels Mikrocontroller zu beschäftigen. Zusammenfassend lässt sich aus didaktischer Perspektive sagen, dass der Bau dieses Exponats eine große Bandbreite an unterschiedlichen Fähigkeiten und Interessen ansprechen kann. Von der biologischen Perspektive über die technische Konstruktion bis zur Programmierung des Mikrocontrollers im Informatikunterricht bietet dieses Exponat eine Vielzahl an Handlungsfeldern, die aufgrund der Modularität des Exponates in Anspruch genommen werden können, jedoch nicht müssen und somit umfassende

Differenzierungsmöglichkeiten bieten. Modularität des Exponats bedeutet in diesem Zusammenhang auch, dass selbst entschieden werden kann, was aus dem fertigen Exponat und in welcher Art und Weise nachgebaut werden soll. Beispielsweise kann das Sperrwerk unabhängig vom Deich (Weise, 2021) und vom gewählten Exponatträger nachgebaut werden, da das Sperrwerk als eigenständiges, funktionales Exponat bzw. Modell gesehen werden kann.

Betrachtet man nun unter Berücksichtigung der in diesem Kapitel aufgeführten Vorüberlegungen einige Richtlinien zur Erstellung von Exponaten, so lassen sich viele hier aufgeführten Punkte auf die Richtlinien übertragen, die im Folgenden Aufgeführt sind (Wissenschaft im Dialog, 2021)):

- Intensive Auseinandersetzung mit dem Thema durch Interaktivität des Exponates.
- Interaktion mehrerer Besucher an einem Exponat.
- Mischung unterschiedlicher Vermittlungskanäle (visuell, haptisch).
- Leichte Bedienbarkeit

Die interaktive Auseinandersetzung mit dem Exponat ist mehrfach gegeben. Als reines Exponat bietet das Sperrwerk-Exponat den Besuchern die Möglichkeit den Exponatträger selbstständig per Knopfdruck zu fluten, um so eine Sturmflut zu simulieren. Darüber hinaus haben die Besucher interaktive Handlungsmöglichkeiten, indem sie mit Hilfe der Drehknöpfe die Stellung der Sperrwerkstore beeinflussen und die Auswirkungen beobachten können. Auf der Ebene des Nachbauens können die Nachbauenden ebenfalls miteinander interagieren, um das gewünschte Ziel eines fertigen Exponates zu erreichen. Darüber hinaus kann das Exponat von mehreren Besucher(innen) gleichzeitig bedient werden und bietet, aufgrund der Konstruktion des Exponatträgers (Kapitel 4.5 und (Weise, 2021)), eine Betrachtung von drei Seiten. Auf diese Weisen werden visuelle und haptische Vermittlungsformen in diesem Exponat kombiniert. Da das Bedienfeld des Exponates lediglich aus einem Knopf zur Simulation der Sturmflut und zwei Drehknöpfen für die Torsteuerung besteht, ist die Bedienung sehr simpel und kann von allen Altersgruppen verstanden werden.

Von größter Wichtigkeit ist jedoch bei Exponaten, vor allem bei solchen mit Technikeinsatz, dass folgende Kriterien berücksichtigt werden, um die Besucher zu schützen. Die Besucher(innen) dürfen zu keiner Zeit einer Gefahr durch die Bedienung des Exponates ausgesetzt sein. Neben einer stabilen Bauweise des Exponates, bei dem spitze Ecken und Kanten vermieden werden und alle Gegenstände fest verschraubt sein müssen, ist darüber hinaus darauf zu achten, dass die Technik für die Besucher nicht zugänglich ist (Wissenschaft im Dialog, 2021).

4.3 Konstruktion

Bei der Konstruktion des Sperrwerkexponates wurde im Rahmen der in Kapitel 4.2 genannten Kriterien zur Modellbildung zwar reduziert, jedoch das echte Eidersperrwerk als Referenzobjekt und Ausgangspunkt der Konstruktion herangezogen. Hierfür wurden bei einer Objektbegehung Fotos angefertigt, welche konstruktionstechnische Besonderheiten darstellen und in einem zweiten Schritt mit Hilfe des Programms *Autodesk Fusion 360* als 3D-Modell konstruiert, welches als cloudbasierte CAD-Software die Möglichkeit hierzu bietet. Dieses Programm bietet die Option zweidimensionale Skizze anzufertigen, welche in einem zweiten Schritt zu einem dreidimensionalen Körper extrudiert werden kann. Darüber hinaus ermöglicht diese Software die Erstellung der einzelnen Bauteile, welche anschließend als eine Baugruppe zusammengefügt und über Animationsmöglichkeiten auf Funktion geprüft werden kann (Junk, 2019).

Für diesen Zweck wurde das Sperrwerk grundlegend in vier Konstruktionsabschnitte unterteilt:

- a) Außenmauern des Sperrwerks
- b) Sperrwerkstore
- c) Torstreben
- d) Torhalterung



Abbildung 14: Außenmauer des Eidersperrwerkes (Foto: C. Weise)

Die Außenmauern des Sperrwerkes (Abbildung 14) erstrecken sich über die gesamte Länge einer Spielöffnung, von einem Tor zum anderen. Eine solche Länge ist zwar konstruierbar, jedoch durch den 3D-Drucker aufgrund des Druckbereiches von 20cm x 20cm x 20cm nicht als ein Bauteil druckbar, weshalb die Außenmauer in zwei gleiche Teile mit jeweils 19,5m Länge aufgeteilt wurden (Abbildung 15).

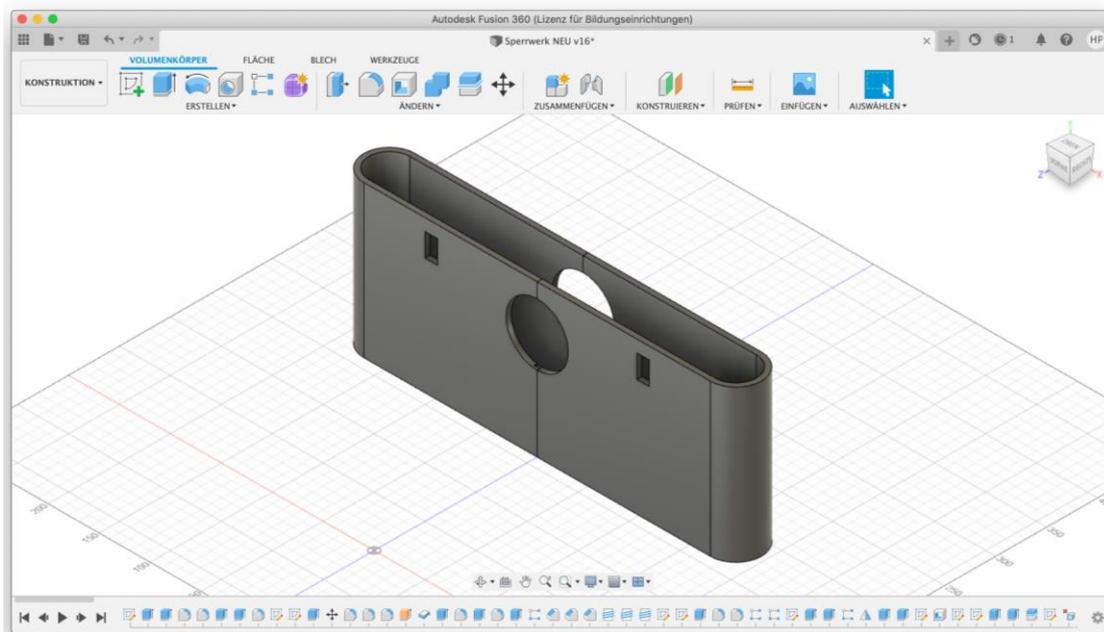


Abbildung 15: Konstruktion der Außenmauern in Fusion 360 (H. Petschall in Fusion 360)

Die Konstruktion wurde als Schale entworfen, damit diese im fertigen Exponat mit Sand oder Steinen beschwert werden kann, um einen Auftrieb bei Flutung des Exponatträgers zu verhindern. Des Weiteren wird die notwendige Technik im Inneren der Mauern verlaufen, weshalb diese im fertigen Exponat mit einem Deckel verschlossen werden.

Um die beiden konstruierten Mauerteile fest miteinander verbinden zu können, wurde an der Schnittkante ein Profil konstruiert, welches es ermöglicht, die beiden Mauerteile zusammenzustecken (Abbildung 16).

Die kreisrunde Öffnung in der Mauermitte

mit einem Durchmesser von 6cm bietet Platz für ein handelsübliches Kunststoffrohr und dient neben der Veranschaulichung des durch das Sperrwerk führenden Tunnels auch zur Stabilisierung der Konstruktion. Darüber hinaus können hier die Kabel entlang gelegt werden, die dann durch den Boden der Außenmauer unter das Exponat führen. Der kleine rechteckige Ausschnitt in jedem Segment der Außenmauer bietet Platz für einen Servomotor, der die Sperrwerkstore heben und senken soll. Dieses Funktionsprinzip wurde ebenfalls vom Original, wie in Abbildung 17 zu sehen ist, übernommen. Die Öffnung wurde exakt in der Größe der Servomotoren (12mm x 23mm) gestaltet, um einen optimalen Sitz und Kraftübertragung der Motoren zu gewährleisten.

Die Sperrwerkstore wurden ebenfalls unter Berücksichtigung des Originals nachgebaut. Mit einer Höhe von 17,5 cm kann es in einem Stück gedruckt werden, was für die Wasserundurchlässigkeit relevant ist (Abbildung 18). Die drei Löcher an der Torseite durchziehen den gesamten Körper mit einem Durchmesser von 4mm und dienen zum Einführen von Gewichtsstäben, die das Tor beschweren sollen und somit für eine

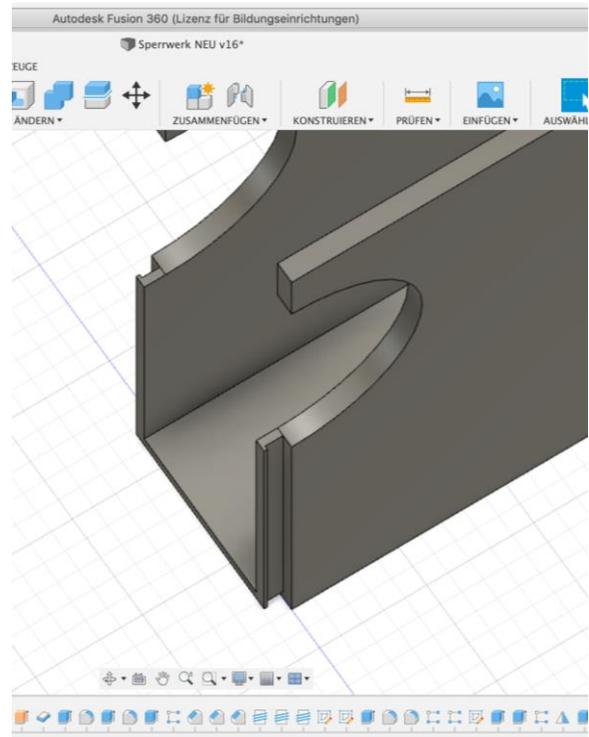


Abbildung 16: Steckprofil an der Schnittkante der konstruierten Außenmauern (H. Petschull)



Abbildung 17: Torantrieb des Eidersperrwerkes (Foto: H. Petschull)

erhöhte Wasserundurchlässigkeit am Grund des Tors sorgen. Zusätzlich sollen an den Seiten der Tore Gummilippen angebracht werden, welche ebenfalls für eine erhöhte Undurchlässigkeit des Wassers sorgen. Die Halteösen an den Torrändern sind mit einer 4mm Bohrung versehen, die ein M4 Gewinde aufweist, sodass die Bauteile direkt mit handelsüblichen Feingewindeschrauben zusammengebaut werden können.

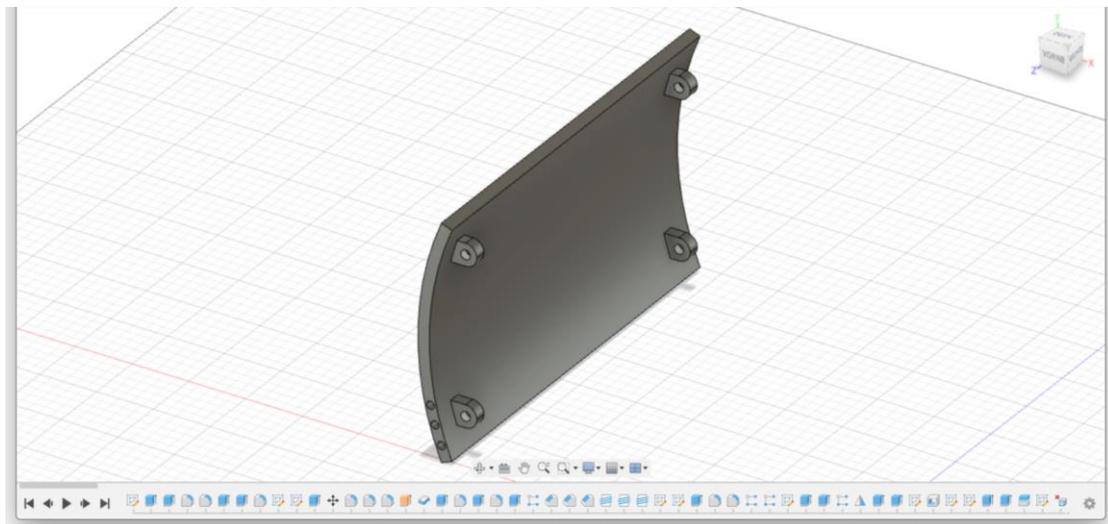


Abbildung 18: Konstruktion des Sperrwerktores (H. Petschull)

Den Drehpunkt der Tore bildet eine Torhalterung, die im Original nicht direkt vorhanden ist. Am Eidersperrwerk sind die Drehpunkte für die Sielöffnungen direkt an der Außenwand des Autotunnels angebracht. Vor dem Hintergrund der Vereinfachung wurden für diesen Zweck besondere Elemente entworfen, welchen jedoch das selbe Funktionsprinzip zugrunde liegt. Sie werden lediglich mit Hilfe der kreisrunden

Aussparung auf das Kunststoffrohr geschoben und jeweils an einer Außenmauer des Sperrwerkmodells befestigt. Die Wangen der beidseitig angebrachten Haltelippen an der Torhalterung (Abbildung 19) sind jeweils 5 mm stark und bilden den Drehpunkt, um den sich die Sperrwerkstore bewegen.

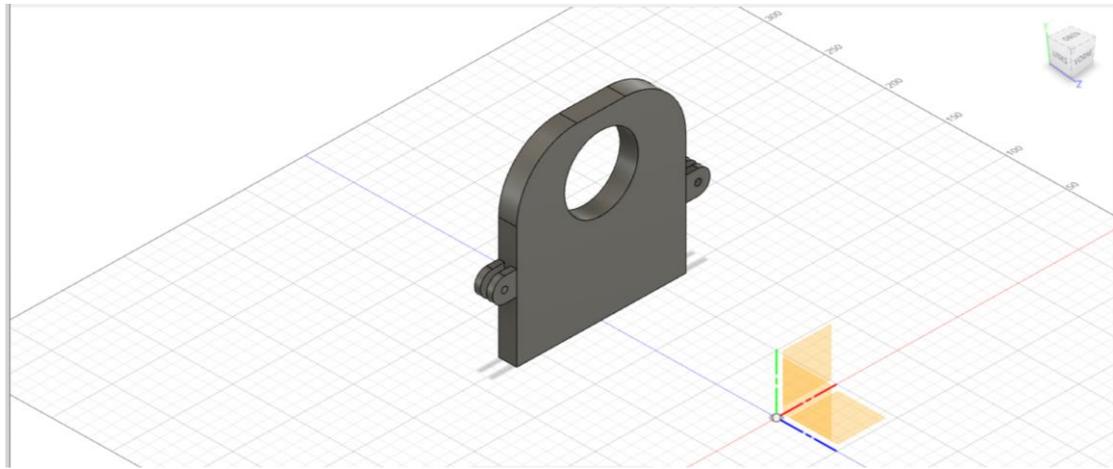


Abbildung 19: Torhalterung des Exponats (H. Petschull)

Als Verbindungselement zwischen der Torhalterung und den Toren dienen die in Abbildung 20 gezeigten Torstreben. Diese Streben sind auf der Seite des Tores mit M4-Gewindeschrauben verschraubt und erzeugen eine starre Verbindung. Auf der Seite der Torhalterung weisen die Torstreben kein Gewinde auf, damit eine Drehung um den Drehpunkt der Torhalterung gewährleistet ist. Die Lippe am oberen Ende der Torhalterung dient als Zugpunkt, an dem der Servomotor angebracht ist und letztendlich das Tor öffnet bzw. schließt.

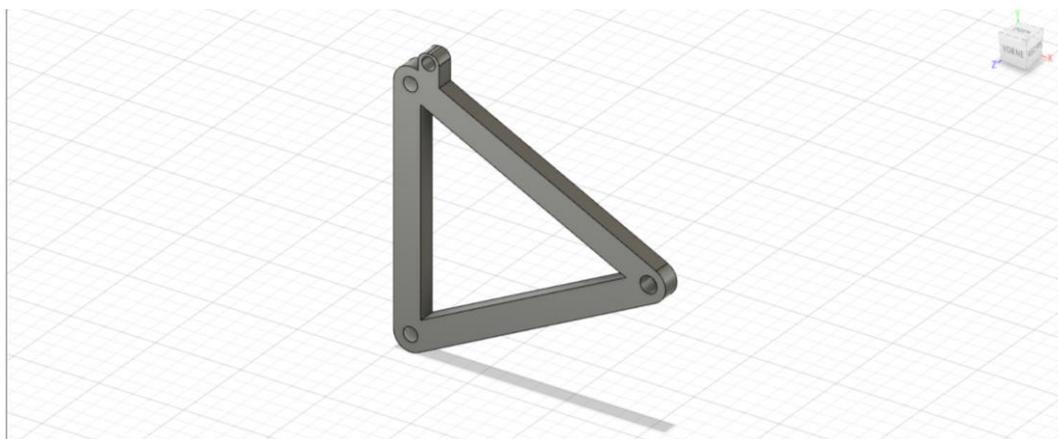


Abbildung 20: Torstreben des Sperrwerks-Exponats (H. Petschull)

Betrachtet man nun die hier beschriebenen einzelnen Bauteile im Verbund als 3D-Modell, so wird die Komplexität und das Zusammenspiel der hier beschriebenen Einzelkomponenten deutlich und veranschaulicht (Abbildung 21).

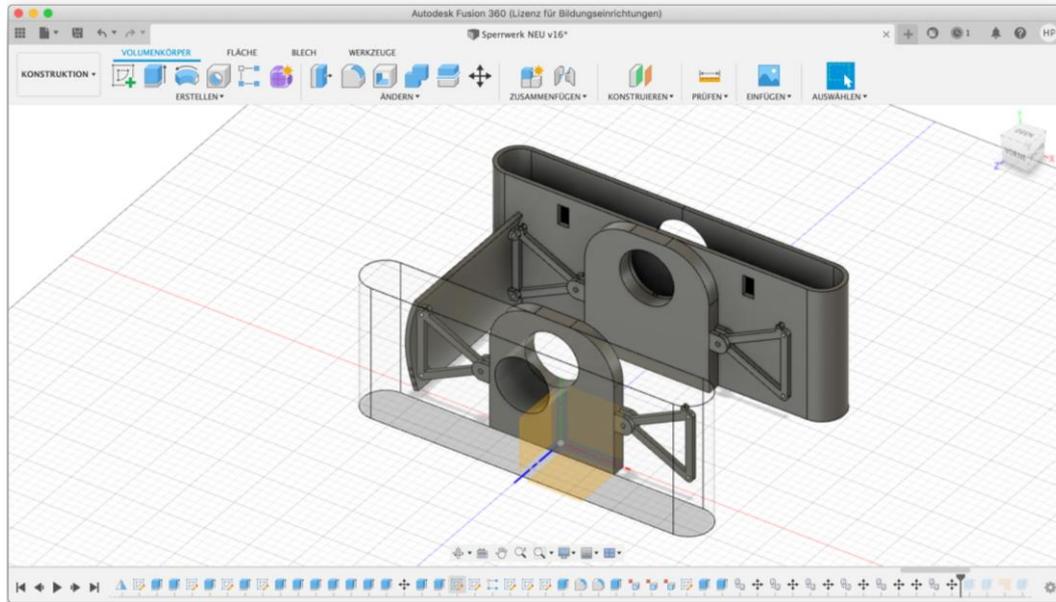


Abbildung 21: Konstruiertes Modell des Eidersperrwerks (H. Petschull)

Aus Gründen der Übersichtlichkeit und der Veranschaulichung wurde die eine Außenwand des Sperrwerks durchsichtig gestaltet, auf eine Darstellung des zweiten Sperrwerktores verzichtet als auch das Kunststoffrohr nicht dargestellt.

4.4 Technische Umsetzung

Für die technische Umsetzung des Exponates wurden maßgeblich zwei unterschiedliche Verfahren herangezogen. Die konstruktive Umsetzung der einzelnen Bauteile wird mit Hilfe des 3D-Druckverfahrens realisiert. Die hierfür benötigten Konstruktionen und Konstruktionsweisen wurden im vorangegangenen Kapitel (4.3) erläutert. Für die technische Umsetzung wurde die Plattform *Arduino* herangezogen. Beide Verfahren sollen nachfolgend beschrieben und erläutert werden.

4.4.1 3D-Druck

Durch die stetig fallenden Preise für 3D-Drucker, werden diese Geräte immer mehr Gesellschaftsrelevant und gewinnen auch für Bildungseinrichtungen an Bedeutung. Als beispielhafte Anwendungsbereiche gelten unter anderem das Produzieren von Bauelementen, das Erstellen von kleinen bis mittelgroßen Kunststoffprodukten in Kleinserien, als auch das Erstellen von Prototypen und Entwicklungsmodellen. Die hier aufgeführten Aspekte bedeuten für Bildungseinrichtungen einen immens hohen Lebensweltbezug und eine starke Zukunftsorientierung. Die meisten handelsüblichen Drucker, wie auch für den Druck dieses Exponates einer verwendet wurde, basieren auf dem FDM- bzw. FFF-Verfahren. Mit Hilfe einer beheizten Düse kann der Druckkopf auf drei Achsen bewegt werden und somit Objekte auf einer Druckplatte drucken, indem das Druckmaterial (Filament) durch das Erhitzen verflüssigt, aus der Düse herausgepresst wird und anschließend in seiner definierten Form erstarrt (QUA-Lis NRW, 2021)

Der für den Druck des Exponates angeschaffte Drucker ist ein *Anycubic i3 Mega S* mit einem Druckvolumen von 20cm x 20cm x 20cm (Abbildung 22) (Anycubic, 2021). Auf diesen Maßen basiert auch die Skalierung des Exponates, um nicht zu viele steckbare Einzelteile zu generieren und um späteren Abdichtungsproblemen vorzubeugen.



Abbildung 22: Anycubic i3 Mega S (Foto: H. Petschull)

Um nun ein konstruiertes Objekt druckfähig zu machen, müssen die entstandenen STL-Dateien mit Hilfe der Druckersoftware geöffnet werden. Durch diese Software werden Steuerdaten für den Drucker erstellt und Druckeinstellungen können vorgenommen werden. Besonders in Anbetracht der Druckzeiten ist es wichtig für jeden Drucker individuell funktionierende Einstellung zu finden, die ein optimales Druckergebnis in möglichst geringer Zeit erzielen. Tabelle 3

veranschaulicht die reinen Druckzeiten für das Sperrwerksexponat. Die gesamte Druckzeit von 60 Stunden und 10 Minuten ist nicht zu unterschätzen und muss im Zuge der Planung und des Baus berücksichtigt werden.

Objekt	Benötigte Anzahl	Druckzeit für ein Objekt	Druckzeit für die benötigte Anzahl	Filament (in Metern)	Filament (in Gramm)
Außenmauern + Deckel	4	11 Std.	44 Std.	236,92m	844g
Sperrwerkstore	2	3 Std. 15 Min.	6 Std. 30 Min.	39,92m	120g
Torstreben	4	25 Min	1 Std. 40 Min.	9,36m	28g
Torhalterung	2	4 Std.	8 Std	61,88	184g

Tabelle 3: Druckzeiten und Materialverbrauch des Sperrwerkexponates im Überblick (Daten entnommen aus der Drucksoftware „Ultimaker Cura“)

Darüber hinaus wurden für den Druck des Sperrwerkes insgesamt 348,08 Meter PLA-Filament benötigt, was einem Gewicht von 1,176 Kilogramm entspricht.

Zu beachten ist außerdem, dass die Druckzeit zunimmt, je mehr freischwebende Teile das Druckobjekt aufweist, da hierfür Stützstrukturen mitgedruckt werden müssen.

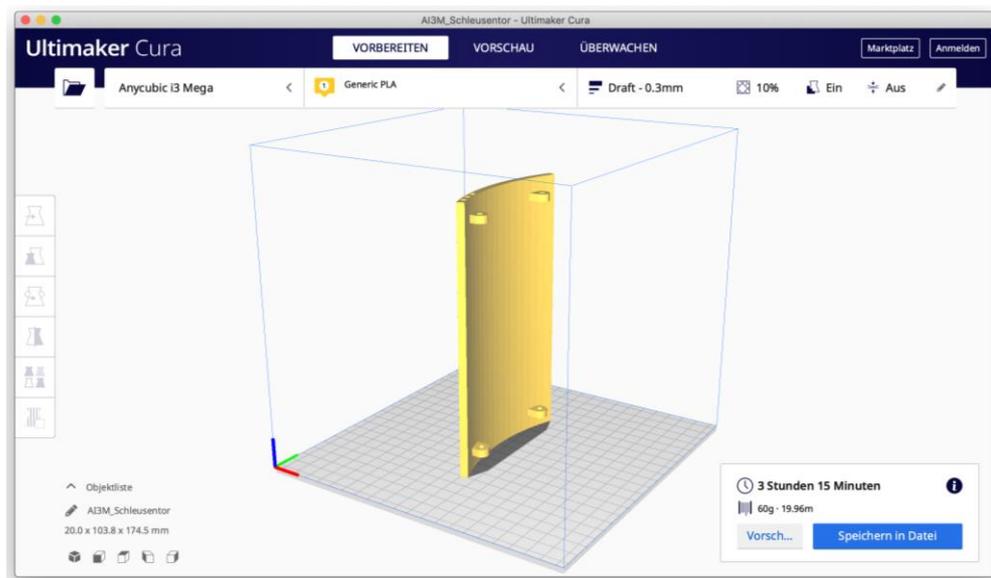


Abbildung 23: Druckfertiges Tor in der Druckersoftware "Ultimaker Cura" (H. Petschull)

Das in Abbildung 24 gezeigte Sperrwerkstor weist freischwebende Objekte auf (rot markiert), die im Druck gestützt werden, damit der Drucker nicht in die Luft drucken muss. Neben der Druckzeit muss hier auch eine sorgfältige Nachbearbeitung der Druckobjekte erfolgen, da die Stützstrukturen entfernt werden müssen.

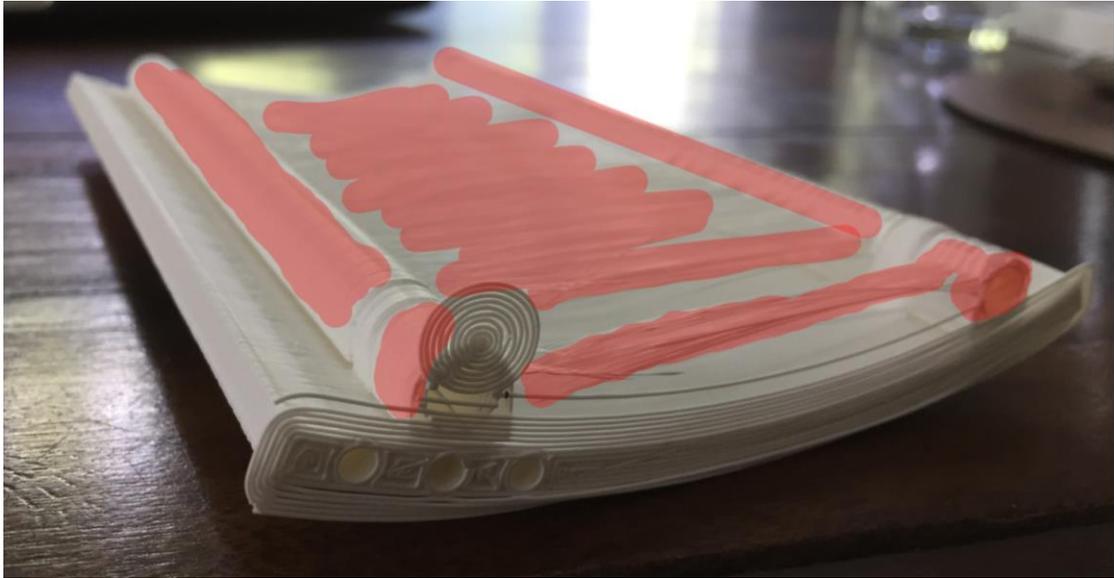


Abbildung 24: Stützstrukturen am Sperrwerkstor (Foto: H. Petschull)

4.4.2 Arduino

Die technischen Aspekte des Exponates werden mit Hilfe der hard- und softwarebasierten Physical-Computing-Plattform *Arduino* realisiert. Hierbei wird in der Entwicklungsumgebung des Arduinos ein sogenannter Sketch (der Code) geschrieben, welcher dann in diesem Fall über den Arduino Uno Mikrokontroller (Abbildung 25) ausgeführt wird und alle beteiligten Bauteile ansteuert.

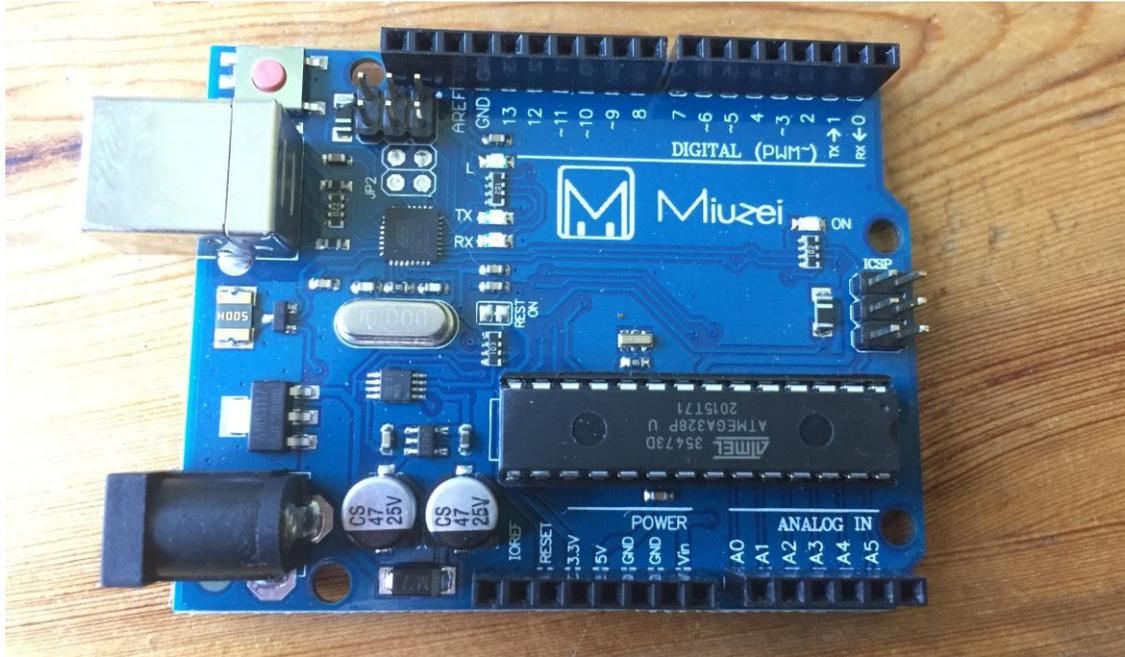


Abbildung 25: Arduino Uno (Foto: H. Petschull)

Über ein sogenanntes Entwicklungs- bzw. Breadboard kann die Schaltung zunächst als Prototyp vorgesteckt und auf Funktionalität geprüft werden. Der Prototyp der Sperrwerkstor-Steuerung ist in Abbildung 26 dargestellt.

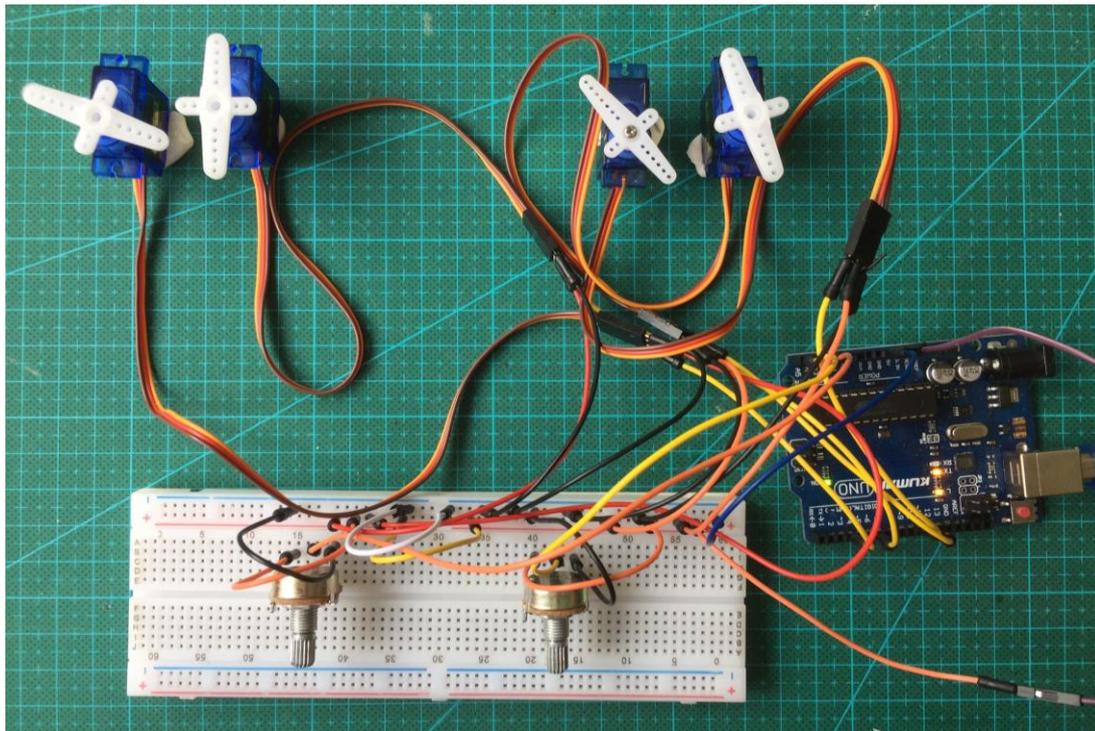


Abbildung 26: Prototyp der Sperrwerkssteuerung auf dem Arduino-Breadboard (Foto: H. Petschull)

Benötigt werden hierbei, neben einem Arduino-Starterset, welches alle notwendigen Komponenten für den Bau der Schaltung beinhaltet, vier Servomotoren, die die Tore des Sperrwerks anheben sollen und zwei Potentiometer, welche die Servomotoren ansteuern.

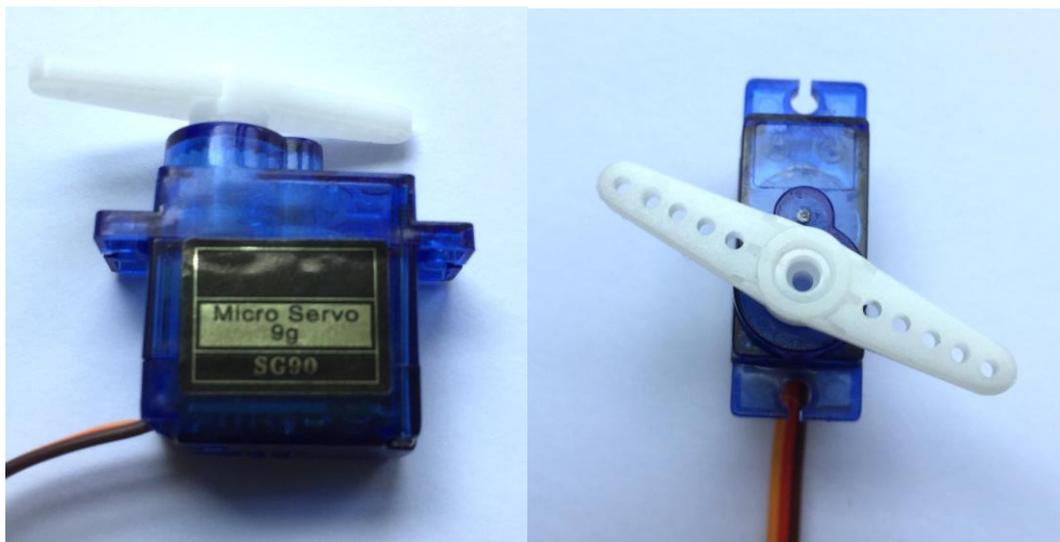


Abbildung 27: Servomotor (Foto: H. Petschull)

Pro Tor sind zwei Servomotoren vorgesehen. Hieraus ergibt sich in der Programmierung die Herausforderung, dass zwei Servomotoren durch ein Potentiometer angesteuert werden, jedoch jeweils in die entgegengesetzte Richtung laufen müssen, da die Servomotoren in dem Exponat für jeweils ein Sperrwerkstor spiegelverkehrt angeordnet sind. Der nachfolgende Sketch zeigt den selbstständig entwickelten Quelltext, der die Lösung der entgegengesetzten Drehrichtung der Servomotoren beinhaltet (Abbildung 28).

Zu Beginn des Sketches wird dem *Arduino* in der ersten Zeile mitgeteilt, dass die integrierte Servo-Bibliothek beansprucht werden soll und erlaubt dem

```
Servo_Potentiometer | Arduino 1.8.13
Servo_Potentiometer
#include <Servo.h>

Servo W1;
Servo W2;
Servo W3;
Servo W4;

int val1;
int val2;
int val3;
int val4;

void setup() {
  W1.attach(3);
  Serial.begin(9600);
  W2.attach(6);
  Serial.begin(9600);
  W3.attach(10);
  Serial.begin(9600);
  W4.attach(11);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  val1 = analogRead(5);
  val1 = map(val1, 0, 1023, 0, 180);
  Serial.println(val1);
  W1.write(val1);

  val2 = analogRead(5);
  val2 = map(val2, 0, 1023, 180, 0);
  Serial.println(val2);
  W2.write(val2);

  val3 = analogRead(3);
  val3 = map(val3, 0, 1023, 0, 180);
  Serial.println(val3);
  W3.write(val3);
}
```

Abbildung 28: Sketch für die Steuerung der Sperrwerkstore (H. Petschull)

Arduino, eine Vielzahl unterschiedlicher Servomotoren anzusteuern (Arduino, 2021). Im nächsten Schritt (grün markiert) werden den unterschiedlichen Servomotoren Bezeichnungen zugewiesen, mit denen im weiteren Verlauf programmiert werden kann. Anschließend werden, hier gelb markiert, vier Variablen mit dem Befehl „int“ erstellt. Diese Variablen dienen als ein Ort, an dem das Programm Daten zwischenspeichern kann, um im späteren Verlauf wieder auf sie zurückzugreifen (Golovok, 2018) Das „Void Setup“ (blau dargestellt) wird vom *Arduino* einmalig ausgelesen. Hier werden die

Zuweisungen der Pins vorgenommen, an denen Hardware am Mikrokontroller angeschlossen ist. Demzufolge ist Servomotor 1 (W1) an Pin 3 angeschlossen, Servomotor 2 (W2) an Pin 6, Servo 3 (W3) an Pin 10 und Servomotor 4 (W4) an Pin 11. Bei der Belegung der Signalpins der Servomotoren (hier: 3, 6, 10 und 11) ist zu beachten, dass diese PWM²-Fähig sind. Der Void-Loop (violett dargestellt) stellt den eigentlichen Code dar, welcher immer wieder durchlaufen wird. Wenn nun ein Wert am analogen Pin 5 (`analogRead5`) vom Potentiometer geschrieben wird, wird dieser Wert (`val1`) gemessen. Da der *Arduino* mit einem 10 Bit Konverter ausgestattet ist, *mapped* dieser, da die Eingangsspannungen zwischen 0V und 5V liegen, die Werte zwischen 0 bis 1023. Mit dem „`map(val1, 0, 1023, 0, 180)`“ konvertiert der *Arduino* die durch das Potentiometer geschriebenen Werte in Gradzahlen, die der Servomotor anfahren kann (Arduino, 2021). Da die für das Experiment verwendeten Servomotoren einen Wertebereich von 0 bis 180 Grad anfahren können, stimmen diese mit dem Sketch überein. Im nächsten Schritt des Loops wird nun der geschriebene und in der Variablen „`val1`“ zwischengespeicherte Wert ausgelesen und mit dem Befehl „`W1.write(val1)`“ an den ersten Servomotor gesendet. Damit nun der zweite Servomotor, der jedoch das gleiche Sperrwerkstor bewegt, die selbe, jedoch spiegelverkehrte Bewegung ausführt, wird nun der Wertebereich von 0 bis 1023 im weiteren Verlauf des Codes für den zweiten Motor (W2) entgegengesetzt des ersten Motors gemappt. Daraus resultiert eine Konvertierung der Werte von 0 bis 1023 beim ersten Motor in 0 – 180 Grad und beim zweiten Motor von 180 – 0 Grad. Genau dasselbe Verfahren wird dann für die Servomotoren W3 und W4 angewandt mit der Änderung, dass diese von einem anderen Potentiometer gesteuert werden, welches am analogen Pin 3 angeschlossen ist. Der erste Entwurf der Verkabelung der Hardware-Komponenten geht aus der Abbildung 26 hervor. Das Steckbrett dient jedoch lediglich zur mechanischen Befestigung der Komponenten in einer Versuchsschaltung und muss im weiteren Verlauf noch auf einer Leiterplatte verlötet werden. Um diesen Vorgang zu vereinfachen wurde auf Lötplatinen zurückgegriffen, die wie ein Breadboard aufgebaut sind (Abbildung 29).

² Pulsweitenmodulation

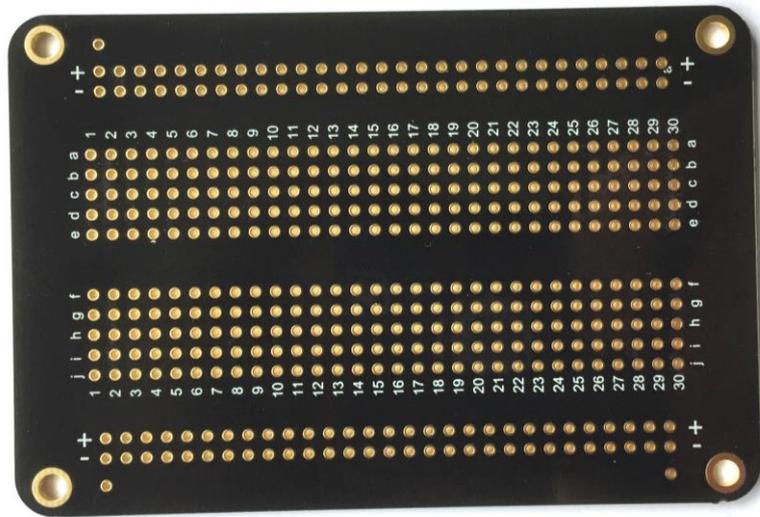


Abbildung 29: Lötplatine im Breadboard-Design (Foto: H. Petschull)

4.5 Der Exponatträger

Um das fertige Sperrwerkexponat und das von Christian Weise (Weise, 2021) angefertigte Deichmodell in einem Exponatträger zu kombinieren, wurde dieser dafür extra angefertigt. Eingangs soll erwähnt werden, dass der Exponatträger nicht fest mit den Exponaten im Zusammenhang steht und im Rahmen eines Nachbaus frei gewählt werden kann. Natürlich kann dieser speziell und den Anforderungen entsprechen angefertigt werden, jedoch ist es auch möglich, die einzelnen Exponate separat voneinander zu verwenden und in bereits bestehende Behältnisse einzuarbeiten. Aus diesem Grund ist die Konstruktion des Sperrwerks modular gestaltet, sodass die Konstruktionsdateien zugänglich sind und auch die Arduino-Steuerung vor dem Hintergrund der Open-Source-Anwendung bearbeitet, abgeändert und angepasst werden kann.

Als Trägerplatte für den Exponatträger wurde eine 2,5 cm dicke OSB-Platte mit den Maßen 125 cm x 72 cm verwendet. Da in dem Exponat Wasser steht, wurde diese mit Flächendichtanstrich bearbeitet. Um die Wände aus Plexiglas befestigen zu können, wurden mit Hilfe einer Oberfräse Nuten in die Grundplatte gefräst, in denen die Scheiben dann mit Montagekleber und Silikon fixiert werden können. Als Rückwand des Exponatträgers dient eine Siebdruckplatte, die aufgrund der Beschichtung mit

Phenolharz Wasserfest ist. In diese Rückwand wurden ebenfalls Nuten eingelassen, in denen die Plexiglasscheiben mit Montagekleber und Silikon fixiert werden (Abbildung 30).



Abbildung 30: Konstruktion des Exponatträgers (Foto: H. Petschull)

In einem nächsten Schritt wird der Exponatträger mit Polystyrolplatten ausgekleidet und die Küstenlandschaft mit Styropor geformt. In diesem Zuge wird auch der Wasserzulauf, der Ablauf als auch der Überlauf in den Exponatträger integriert und verklebt. Eine weitere Schicht Dichtanstrich schützt die Materialien und sorgt für die nötige Dichte des Exponatträgers. Anschließend werden die Exponate in den Exponatträger eingesetzt, verklebt und verkabelt. Hierbei werden alle nötigen Kabel durch ein Loch des Bodens unter das Exponat geleitet. Das Loch wird entsprechend abgedichtet und die Technik wird in einer Wasserfesten Box unter dem Exponatträger angebracht.

Die Befüllung bzw. die Simulation einer Sturmflut läuft ebenfalls, wie die Sperrwerkssteuerung auch, mit Hilfe einer Arduino-Steuerung ab. Über einen Schalter können die Besucher das Exponat fluten. Wird der Schalter gedrückt, so sendet der *Arduino* ein Signal an eine Pumpe, welche mit Hilfe eines Relais angesteuert wird (vgl. (Weise, 2021)). Hier ist zu erwähnen, dass diese Schaltung von einer qualifizierten Elektrofachkraft geprüft und abgenommen wurde. Damit das Exponat nicht überläuft, ist zum einen ein Überlauf integriert, der das überlaufende Wasser direkt zurück in den Wasservorratsbehälter leitet. Zum anderen verfügt die Schaltung zur Befüllung über einen Wassersensor, welcher die Pumpe ausschaltet, sobald dieser Kontakt mit Wasser

hat. Des Weiteren ist es nicht möglich den Knopf zur Befüllung erneut zu drücken, sofern der Sensor im Wasser steht. Durch diese Schutzschaltung ist es nicht möglich, das Exponat übermäßig zu fluten und somit zu beschädigen. Erst wenn das Wasser mit Hilfe des dafür vorgesehenen Ablaufs entfernt worden ist, ist es möglich, das Exponat erneut zu fluten. Genauere Information zur Steuerung der Pumpeinheit gibt Christian Weise in seiner Thesis (Weise, 2021). Um das Exponat darüber hinaus zu schützen wird ein Deckel angefertigt der zum einen für zusätzliche Stabilität sorgt und zum anderen verhindert, dass in das Exponat hereingegriffen werden kann. Abbildung 31 zeigt des ersten Prototypen des Exponates in der Endphase des Baus. Deutlich zu sehen ist hier das seitlich angebrachte Bedienfeld mit Sturmflut-Taster, Potentiometer für die Sperrwerkstore und der Entwässerungsknopf, die beiden Deichelemente (Weise, 2021) als auch das Sperrwerk-Modell.



Abbildung 31: Fertiger Prototyp des Exponates (H. Petschull)

4.6 Zum Einsatz in der Schule

Für den Einsatz in der Schule bietet dieses Exponat eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Integration in unterschiedliche Unterrichtsszenarien. Über die normale Funktion eines Exponates bzw. Modells hinaus, welches in der Regel als vereinfachter Repräsentant realer Objekte dient (Killermann, Hiering, & Starosta, 2011), soll dieses Exponat die Möglichkeit bieten, von Lernenden und Lehrkräften selbst nach- bzw. umgebaut werden zu können. Dies kann z.B. im Zusammenhang mit Projektunterricht, Projektwochen, Kursangeboten oder AGs geschehen. Durch den Umfang des Baus und die unterschiedlichen Fachbereiche, die für den Bau des Exponates notwendig sind, bietet sich darüber hinaus eine fächerübergreifende Zusammenarbeit an, die mannigfaltige Kompetenzen umfasst. Vor dem Hintergrund der Biologie kann dieses Exponat zunächst als Abbild realer Küstenschutzbauwerke über die Funktionsweise und Notwendigkeit dieser aufklären. Darüber hinaus bietet es weitere Anknüpfungspunkte zum Thema Küstenschutz und Klimawandel. Im Zuge der Konstruktion und des Drucks der Bauteile werden handwerkliche als auch technische Fähigkeiten gefördert und gefordert. Einen weiteren Vorteil bietet das Exponat vor diesem Hintergrund durch die Möglichkeiten der didaktischen Reduktion. Auf konstruktionstechnischer Ebene kann hier, je nach Klassenstufe und Lerngruppe reduziert werden, indem die Druckdateien, so wie sie zur Verfügung gestellt werden, einfach übernommen und ausgedruckt werden. Da die Druckdateien frei zugänglich und bearbeitbar sind, können sie allerdings auch nachbearbeitet werden. Dies fordert den Umgang mit entsprechender Software (Kapitel 4.3) und bildet somit eine differenzierte Alternative zum reinen Ausdruck. Innerhalb der Nachbearbeitung der Bauteile in einer Software kann weiterhin unterschieden werden, ob die Größen der Bauteile lediglich anders skaliert werden oder ob konstruktionstechnische Anpassungen am Objekt vorgenommen werden sollen.

Auch bei der Programmierung durch die Plattform *Arduino*, welche immer mehr Einzug in den Schulen findet (Caroli & Caroli, 2015), kann auf unterschiedliche Weise differenziert werden, sodass die Inhalte für unterschiedliche Klassen- und Altersstufen zugänglich gemacht werden können. Als einfachste Möglichkeit kann der für das Exponat geschriebene Programmcode, welcher frei zugänglich ist, direkt und ohne

Nachbearbeitung auf den *Arduino* überspielt werden. Da die Plattform open-source-basiert ist (Arduino, 2021), ist es jedoch auch möglich Anpassungen und Veränderungen an dem Code vorzunehmen und somit, z.B. im Fach Informatik Programmierfähigkeiten zu schulen. Als ein weiterer Schritt kann allerdings auch lediglich nur die Idee bestehen und ein ganz eigener Code von den Lernenden geschrieben werden. Hierzu gibt es, neben dem in Abbildung 28 gezeigtem Programmierfeld auch die Möglichkeit einer grafischen Programmierung des Arduinos. Hierbei können mit Hilfe des kostenlos verfügbaren Werkzeugs *Ardublock* visuell Programmblöcke aneinandergereiht werden. Programmblöcke mit unterschiedlichen Funktion weisen verschiedene Formen auf, sodass nur diejenigen Blöcke zusammenpassen, die auch als Code zusammen funktionieren würden Abbildung 32.

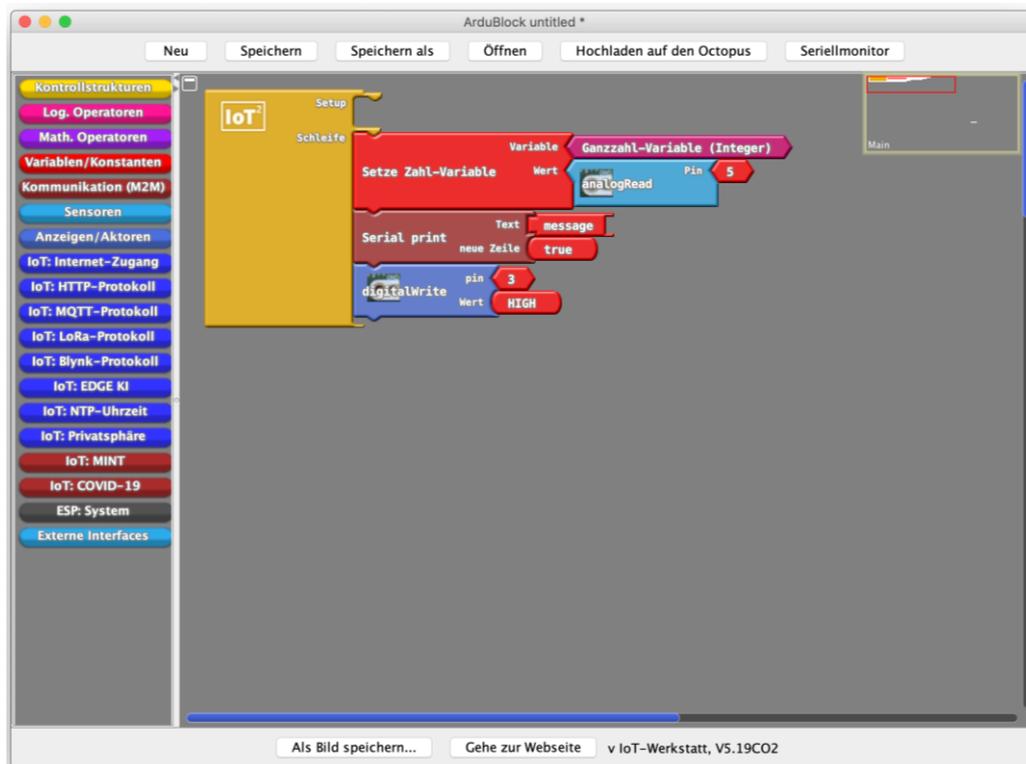


Abbildung 32: Beispiel-Code in der grafischen Programmierumgebung "Ardublock" (H. Petschull)

Hieraus entsteht eine Reduktionsmöglichkeit, die es den Lernenden erlaubt, auf visueller Ebene und ohne fundierte Kenntnisse in der Programmiersprache einen funktionierenden Code zu erstellen (Sander, 2021).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch den Bau des Exponates eine ausgedehnte fächerübergreifende Zusammenarbeit, vor allem in den MINT-Fächern,

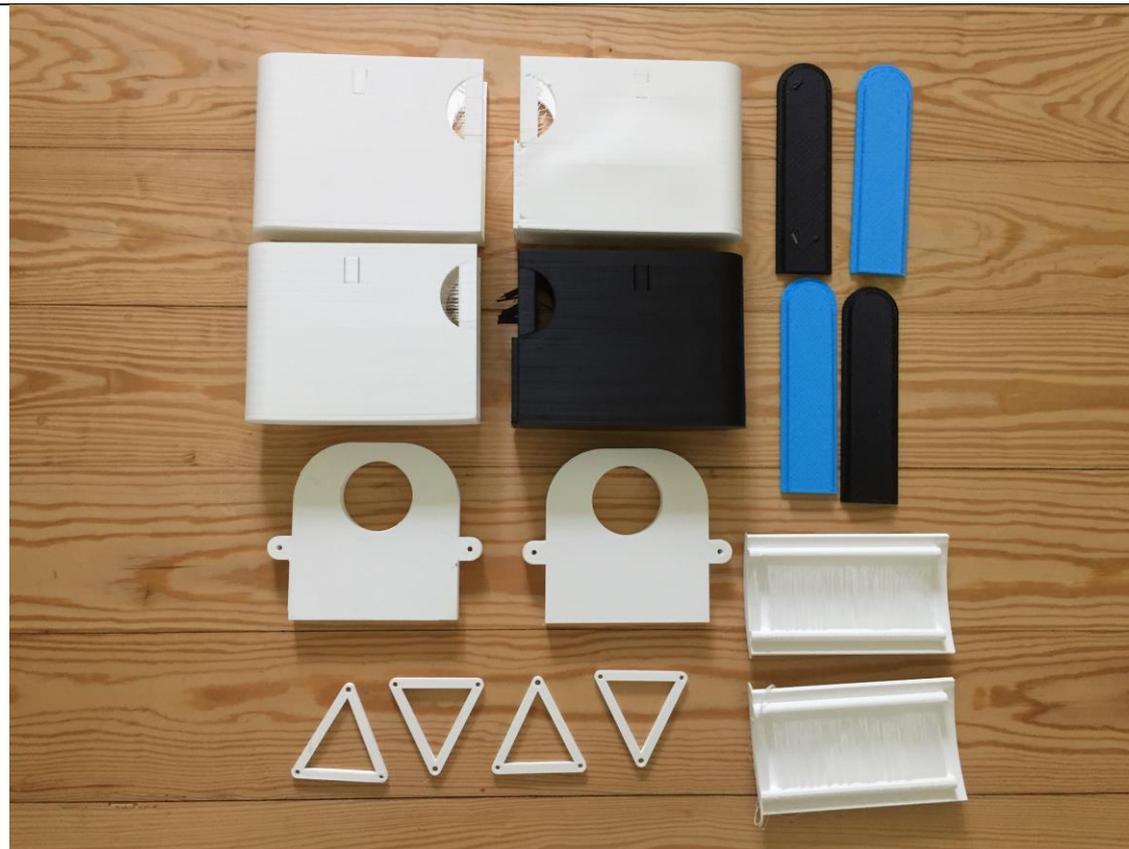
realisiert werden kann. Aufgrund der mannigfaltigen Differenzierungsmöglichkeiten ist auch der Einsatz in unterschiedlichen Jahrgangsstufen möglich und kann entsprechend der Lerngruppen angepasst werden.

4.7 Bauanleitung

Benötigte Materialien

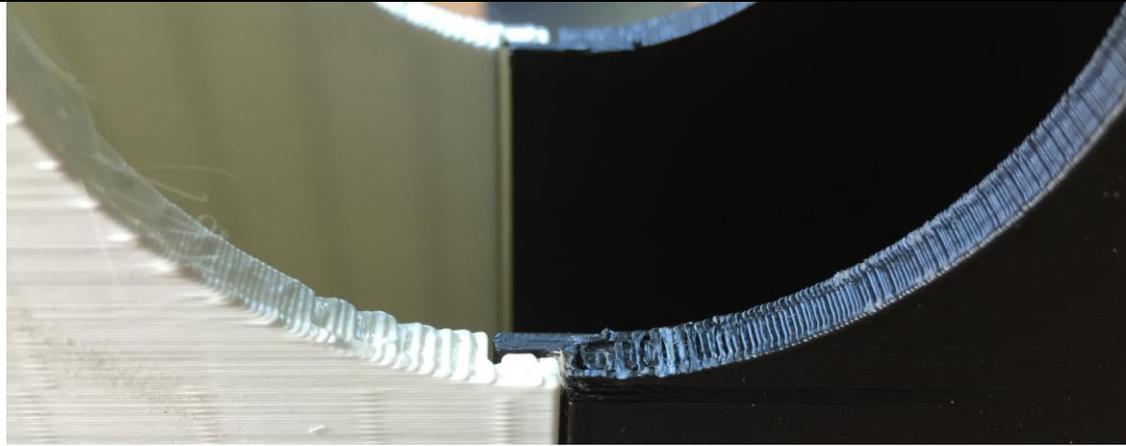
Sperrwerk:	- Bauteile aus dem 3D-Druck - M4 – Gewindeschrauben - Draht
Exponatträger:	- siehe (Weise, 2021)
Elektronik:	- Arduino Starter Kit - 4 Servomotoren - 2 Potentiometer - Lötplatine

Schritt 1 - Sperrwerk



- Als erstes müssen **alle** benötigten Druckteile für das Sperrwerk mit dem 3D-Drucker **ausgedruckt** werden.

Nach dem Druck der einzelnen Sperrwerks-Teile müssen die **Stützstrukturen** und anderen **Überstände** mit Hilfe einer Zange und eines Messers **entfernt** werden.

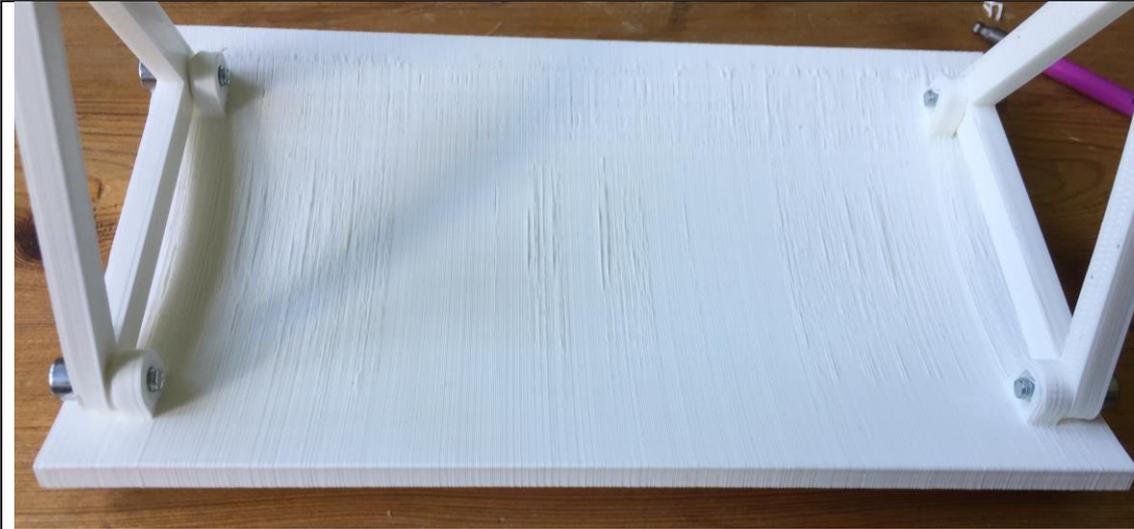


Als nächstes werden die **beiden Hälften** der Außenmauern über das **Stecksystem** **ineinandergesteckt** und miteinander verbunden.

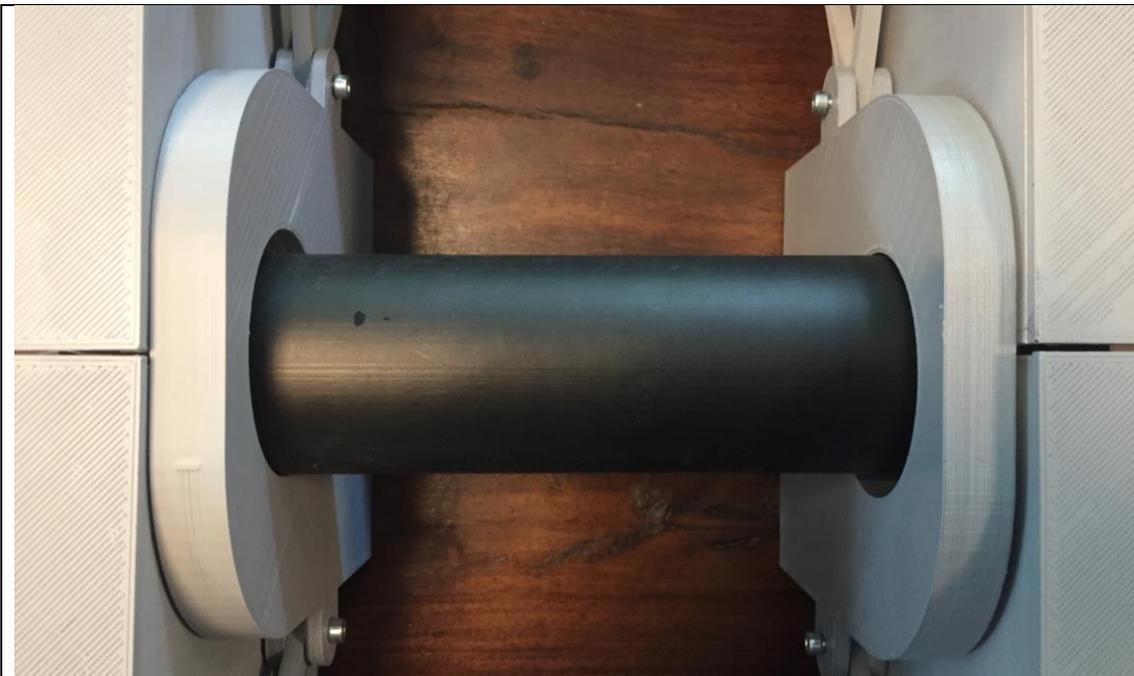


In die **rechteckigen Öffnungen** der Außenmauern wird jeweils ein **Servomotor** eingesetzt, mit Sekundenkleber verklebt und zusätzlich mit den beiliegenden Schrauben am Mauergehäuse fixiert.

Die Kabelführung der Servomotoren ist, je nach Exponatträger und Aufbau, variabel zu gestalten. Eine **Beschriftung** der Kabel erleichtert im Nachhinein das Verkabeln. Zu beachten ist, dass die Kabel **lang genug** sind und bis zur Steuereinheit des Arduino reichen.



Die **Torstreben** werden mit **M4-Gewindeschrauben** an den Toren von **außen** befestigt. Anschließend wird das Tor mit den Torstreben in die Torhalterung eingesetzt und verschraubt.
Hierbei ist auf eine gute Beweglichkeit zu achten!

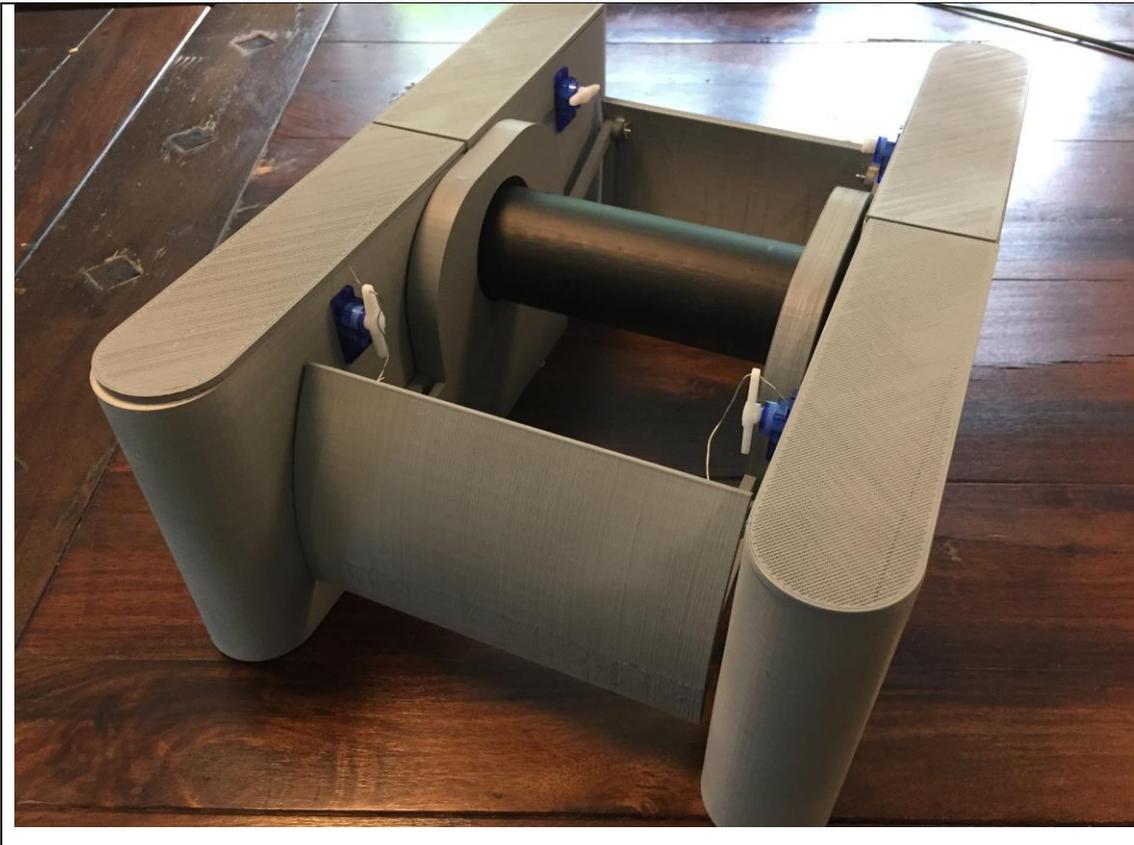


Das Kunststoffrohr wird nun **durch die Öffnungen** in den Außenmauern und den Öffnungen der Torhalterungen **geschoben** und **verklebt**.

Die **Servomotoren** werden mit einem Draht mit den **Torstreben verbunden**.

Abschließend können die **Deckel** auf die Außenmauern **gesetzt** und mit der Vorbereitung/dem Bau des Exponatträgers und der Verkabelung begonnen werden.

Optional: Das Sperrwerk **kann** nach Belieben **angemalt** bzw. **lackiert** werden



Schritt 2 – Der Exponatträger

(Wenn ein **eigener** Exponatträger benutzt wird, kann bei **Schritt 3** weitergemacht werden. Den genauen Bau des **Exponatträgers** und eine **detaillierte Bauanleitung** beschreibt **Christian Weise** in der Arbeit „*Deichbau als Maßnahme des Küstenschutzes für die norddeutsche Küste im Rahmen eines DBU-Projektes zum Klimawandel*“ (Weise, 2021)

Schritt 3 – Die Elektronik

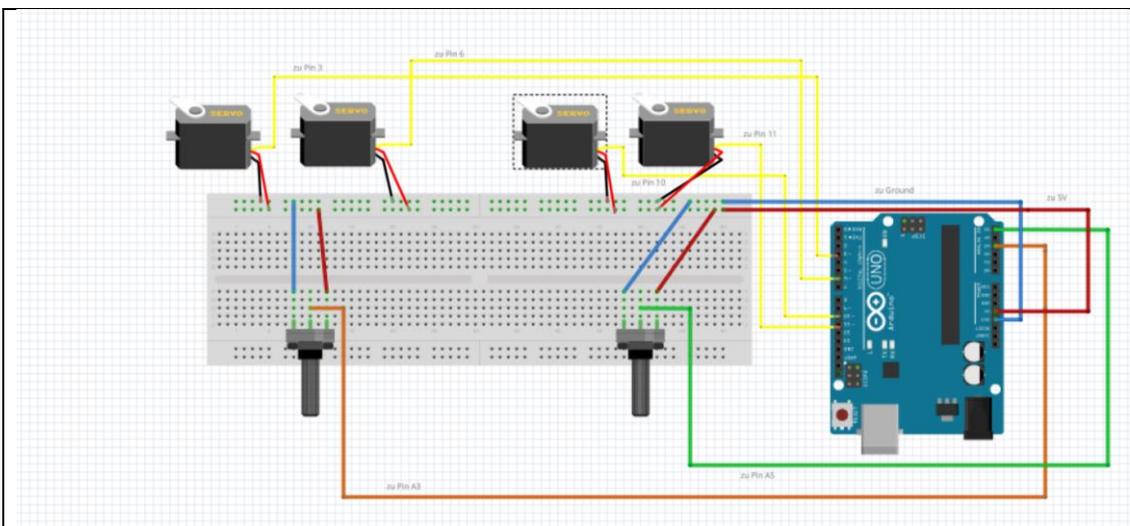


Abbildung 33: Schaltplan der Torsteuerung (H. Petschull)

Die einzelnen **Komponenten** für die Schaltung werden **entsprechend des Schaltplans** auf das **Breadboard gesteckt** und **angeschlossen**.

Der **Sketch** muss auf den Arduino **aufgespielt** werden. Nachdem der Sketch auf den Arduino übertragen wurde, muss dieser an eine **Stromquelle angeschlossen** werden, damit der Sketch **ausgeführt** werden kann. Hierzu ist es möglich:

- den Arduino per **USB am Computer angeschlossen** zu lassen
- den Arduino mit Hilfe einer **9V-Blockbatterie** zu betreiben
- den Arduino mit Hilfe eines **USB-Ladeadapters** an einer Netzsteckdose zu betreiben

Die Potentiometer können:

- nach **Belieben** platziert und angeschlossen werden.
- an einem **Bedienpanel** für das Exponat befestigt und angeschlossen werden.

Wenn alles verkabelt ist, muss die **Schaltung vor dem Einbau** auf ihre **Funktion geprüft** werden!

Wenn die Schaltung funktioniert, kann diese auf die **Lötplatine übertragen** werden.

Die **fertige Schaltung** kann nun mit dem Exponat **im Exponatträger verkabelt** und **untergebracht** werden!

(Alle Fotos und Bilder dieser Bauanleitung wurden von H. Petschull erstellt.)

5 Fazit

Im Rahmen dieser Masterthesis wurde der Entwicklungs- und Entstehungsprozess eines interaktiven Sperrwerksexponates beschrieben welches, zusammen mit einem Deichmodell, in einen Exponatträger integriert wurde, der speziell für diesen Zweck selbst angefertigt worden ist. Durch die Auseinandersetzung mit dem Thema und die intensive Arbeit an dem Exponat wurden sich viele Fähigkeiten und Kompetenzen angeeignet, die vor dem Bau des Exponates nicht bzw. wenig ausgeprägt waren. Für die Konstruktion des Exponates mussten sich konstruktionstechnische Grundlagen, als auch der adäquate Umgang mit der entsprechenden Software angeeignet werden, um die Bauteile zu erstellen. Darüber hinaus wurde sich mit der Thematik des 3D-Druckes auseinandergesetzt, welcher die Grundlage für die Erstellung der Bauteile bildet. Grundlegende Kenntnisse wurden sich darüber hinaus auch in der Elektrotechnik als auch im Arduino-System, sowie der dazugehörigen Programmiersprache angeeignet, um die elektronische Umsetzung des Exponates realisieren zu können.

Das fertige Exponat bietet auf interaktive Weise die Möglichkeit sich mit dem Thema des Küstenschutzes vor dem Hintergrund der Sturmfluten auseinanderzusetzen. Ich persönlich sehe in vielerlei Hinsicht einen großen Nutzen in diesem Exponat. Als Exponat in einer Ausstellung oder als Modell für den Schulunterricht bietet es die Möglichkeit der intensiven und interaktiven Auseinandersetzung mit dem Thema Küstenschutz, indem durch das Simulieren einer Sturmflut per Knopfdruck die Funktionsweise eines Deiches beobachtet und die Funktionsweise eines Sperrwerks haptisch erlebt und nachempfunden werden kann. Als Objekt des Nachbauens bietet das Exponat darüber hinaus ein intensiveres Auseinandersetzen mit der Thematik durch den Bau, was im Sinne der Modellbildung die Erkenntnisgewinnung unterstützt.

Für die Zukunft gilt es, dieses Exponat im realen Einsatz zu erproben und die sich daraus ergebende Schwachstellen zu analysieren, um das Exponat optimieren zu können. Darüber hinaus gilt es die Konstruktions- bzw. Bauprozesse weiterhin zu verbessern. Ein wesentlicher hier zu nennender Faktor ist die Druckzeit, die zum einen sehr lang ist und zum anderen stark, je nach Druckeinstellungen und Qualitätsausgabe, variiert. Mit den Druckeinstellungen einhergehend sind auch die Einstellungen des Druckers, wie der

Düsenabstand zum Druckbett, als auch die Nivellierung des Druckbettes, für eine gute Druckqualität entscheidend. Zukünftig muss also an einer Lösung gearbeitet werden, welche eine möglichst kurze Druckzeit bei gleichzeitig guter Druckqualität erzielt. Nichtsdestotrotz bietet der 3D-Druck eine Vielzahl an technischen und konstruktiven Möglichkeiten in Bezug auf das Erstellen von Modellen bzw. Exponaten. Mit einer guten Druckqualität können somit z.B. veranschaulichende und sehr detailgetreue Modelle für die Unterrichtspraxis in der Schule erstellt werden in dessen Zusammenhang Lernende auch noch technische Fähigkeiten durch den Prozess der Erstellung erlernen können. Ein weiterer wichtiger Schritt für die Zukunft vor dem Hintergrund des beschriebenen Exponates ist es, diesem und den dazugehörigen Materialien eine Plattform zu bieten, auf der sich an dem Exponat interessierte Personen informieren, sowie die Bauanleitung, Druckdateien und Programmcodes beziehen können. Für mein Referendariat im Fach Biologie ab August 2021 strebe ich an, dieses Exponat in meinen Unterricht zu integrieren, um die Lernenden für das Thema zu begeistern und um den Lerneffekt bei Schüler(innen) durch das Exponat beobachten zu können. Darüber hinaus würde ich dieses Exponat gerne im Rahmen einer Projektwoche mit den Schüler(innen) nachbauen, um auch hier zu prüfen, ob die Umsetzung so funktioniert, wie sie in dieser Arbeit beschrieben wurden ist und nicht zuletzt um zu sehen, ob der Bau den Schüler(innen) genau so viel Spaß bereitet wie er mir bereitet hat.

Literaturverzeichnis

- Anycubic. (2021). User Manual. Mega S.
- Arduino. (2021). *Sprach-Referenz*. Abgerufen am 31. 5 2021 von <https://www.arduino.cc/reference/en/>
- Arduino. (2021). *Was ist Arduino?* Abgerufen am 31. 5 2021 von <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Bürger, B. (2003). Bodennahe Windverhältnisse und windrelevante Reliefstrukturen. In L.-I. f. Länderkunde, *Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland – Klima, Pflanzen- und Tierwelt* (Bd. 3, S. 52 - 55). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- BSH. (2018). *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie*. Abgerufen am 4. 6 2021 von https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/sturmfluten_node.html
- Caroli, P., & Caroli, C. (2015). *Arduino Handbuch*. Haar: Franzis Verlag.
- Cordes, F. (1973). *Eiderdamm. Natur und Technik*. Hamburg: Hans Christiansen Verlag.
- Deutsches Klima Konsortium. (2019). *Zukunft der Meeresspiegel*. Berlin.
- Dietz, J. (1995). Strömungsverhältnisse, Kolkbildung und Sohlensicherung am Eider-Sperrwerk. In B. f. Wasserbau, *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau* (S. 27 - 110). Karlsruhe.
- Dzuba, K., & Brix, H. (2021). *ESKP - Earth System Knowledge Platform*. (Helmholtz-Zentrum, Herausgeber) Abgerufen am 8. 6 2021 von <https://www.eskp.de/grundlagen/klimawandel/kuestenschutzmassnahmen-in-deutschland-935637/>
- ESKP. (2021. 5 2021). *ESKP - Earth System Knowledge Platform*. Abgerufen am 8. 6 2021 von <https://www.eskp.de/klimawandel/meeresspiegelanstieg-an-den-nordseekuesten-935344/>
- Gätjen, B. (1979). Die Sturmflutsperrwerke an der deutschen Nordseeküste. Aufgaben, Planung und Bau. In A. Bolle, & R. Schwab, *Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft* (Bd. 36, S. 179 - 226). Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Golovok, D. (2018). *Variablen*. Abgerufen am 25. 5 2021 von Projektlabor Robotik MINTgrün: <https://www.mintgruen.tu-berlin.de/robotikWiki/doku.php?id=einleitung:variablen>
- Helmholtz-Zentrum Geesthacht. (6 2021). *norddeutscher Klimamonitor*. Abgerufen am 7. 6 2021 von <https://www.norddeutscher-klimamonitor.de/klima/1986-2015/jahr/mittlere-windgeschwindigkeit/norddeutschland/coastdat-2.html>
- Hirschfeld, J., Hoffmann, E., & Welp, M. (2012). *Themenblatt: Anpassung an den Klimawandel. Küstenschutz*. (U. K.K. Anpassung, Hrsg.) Dessau.

- Hollmer, U. (1992). *Eider und Eidersperrwerk. Vorgeschichte - Bau - Betrieb*. Garding: Eiderstedter Werbe- und Verlagsgesellschaft.
- Junk, S. (2019). *Fusion 360 - kurz und bündig. Praktischer Einstieg in Cloud-CAD mit Anwendungsbeispiel für 3D-Druck*. Vieweg: Springer.
- Killermann, W., Hiering, P., & Starosta, B. (2011). *Biologieunterricht heute. Eine moderne Fachdidaktik* (14. Auflage Ausg.). Donauwörth: Auer Verlag.
- Koch, B., Eberhardt, W., Hartthaler, S., & Dette, H. H. (2003). Küstenschutz und Hochwasserschutz in Deutschland. IX Materialband Kapitel 9 - Anhang 2. In R. Grajewski, *Halbzeitbewertung des Plans des Landes Hamburg zur Entwicklung des Ländlichen Raums. gem. Verordnung (EG) Nr. 1257/1999* (S. 1 - 30). Hamburg.
- Land Schleswig-Holstein. (2018). *Schleswig-Holstein. Der echte Norden*. Abgerufen am 3. 6 2021 von <https://www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/Themen/KuesteWasserMeer/Kuestenschutz/kuestenschutz.html>
- Landesregierung Schleswig-Holstein. (2008). *Sturmflut – wat geht mi dat an?. Sturmfluten – Wissenswertes und Hinweise zum Selbstschutz*. (U. u.-H. Ministerium für Landwirtschaft, Hrsg.) Kiel.
- Meinke, I., Weiße, R., & von Storch, H. (2011). Nordseesturmfluten im Klimawandel. In S. Fischer, K. Reise, & N. K.-Z. Geesthacht (Hrsg.), *Küstenmentalität und Klimawandel* (S. 131-140). Geesthacht: Oekom Verlag.
- Meurer, R. (2000). *Wasserbau und Wasserwirtschaft in Deutschland. Vergangenheit und Gegenwart*. Berlin: Parey Buchverlag.
- Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume. (2015). *Strategie für das Wattenmeer 2100*. Kiel.
- Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Nordfriesland. (2012). *Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2012*. Kiel.
- Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Nordfriesland. (2020). *Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2022. Entwurf*. Kiel.
- Ministerium für ländliche Räume, L. L.-H. (2001). *Generalplan Küstenschutz. Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein*. Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein, Kiel.
- Pachauri, K., & Reisinger, A. (2008). *Klimaänderung 2007. Synthesebericht*. (I. P. (IPCC), Hrsg.) Berlin.
- QUA-Lis NRW. (2021). *3-D-Druck in der Schule. Informationen und Orientierung für den Einstieg im Unterricht*. Abgerufen am 12. 6 2021 von QUA-Lis NRW. Schulentwicklung:

<https://www.schulentwicklung.nrw.de/cms/faecher/faecheruebergreifend/3d-druck-in-der-schule.html>

- Reinboth, C. (2018). *Die Wiederherstellung der ökologischen Durchlässigkeit in Holtemme und Zillierbach zwischen 1996 und 2011*. (H. Harz, Hrsg.) Köthen.
- Sander, B. (2021). *Didaktische Visualisierung*. Abgerufen am 20. 5 2021 von Ruhr-Universität Bochum: <https://dbs-lin.ruhr-uni-bochum.de/lehreladen/planung-durchfuehrung-kompetenzorientierter-lehre/didaktische-visualisierung/>
- Umweltbundesamt. (26. 11 2019). *Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. Abgerufen am 22. 6 2021 von Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/ww-i-9-das-indikator#ww-i-9-intensitat-von-sturmfluten>
- Wasserstraßen und Schifffahrtamt Elbe-Nordsee. (10. 3 2021). Informationstafel am Eidersperrwerk. *Eider-Sperrwerk*. Eiderstedt, Nordfriesland, Deutschland.
- Weiß, R., & Meinke, I. (2017). Meeresspiegelanstieg, Gezeiten, Sturmfluten und Seegang. In G. Brasseur, D. Jacob, & S. Schuck-Zöller, *Klimawandel in Deutschland* (S. 77 - 85). Berlin/Heidelberg: Springer Spektrum.
- Weise, C. (2021). *Deichbau als Maßnahme des Küstenschutzes für die norddeutsche Küste im Rahmen eines DBU-Projektes zum Klimawandel*. Flensburg: Europa-Universität Flensburg.
- Wenzel, R. (1972). *Eiderabdämmung*. Münsterdorf: Hansen & Hansen.
- Wieland, P. (1990). *Küstenfibel*. Heide: Verlag Boysen & Co.
- Wissenschaft im Dialog. (17. 6 2021). *Leitfaden für die Erstellung interaktiver Exponate*. (B. f. Forschung, Hrsg.) Abgerufen am 18. 6 2021 von MS-Wissenschaft: https://ms-wissenschaft.de/documents/163/WiD-MSWissenschaft_Leitfaden_Exponaterstellung.pdf
- Woth, K., & von Storch, H. (2007). *Klima im Wandel: Mögliche Zukünfte des Norddeutschen Küstenklimas*. Abgerufen am 13. 6 2021 von Hans von Storch: <http://www.hvonstorch.de/klima/pdf/woth-storch.dithmarschen.2007.pdf>

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: EIDERSPERRWERK BEI TÖNNING (FOTO: C. WEISE)	5
ABBILDUNG 2: ÜBERFLUTUNGSGEFÄHRDETE NIEDERUNGSGEBIETE (H. PETSCHULL, VERÄNDERT NACH (LANDESREGIERUNG SCHLESWIG-HOLSTEIN, 2008))	7
ABBILDUNG 3: ENTWICKLUNG DER JAHRESHÖCHSTWASSERSTÄNDE AM PEGEL VON HUSUM SEIT 1875. (MIT Erlaubnis von: (MINISTERIUM FÜR ENERGIEWENDE, LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND LÄNDLICHE RÄUME DES LANDES NORDFRIESLAND, 2012)).....	10
ABBILDUNG 4: BODENNAHE WINDVERHÄLTNISSE DER JAHRE 1976 BIS 1995 IN NORDDEUTSCHLAND (H. PETSCHULL, VERÄNDERT NACH (BÜRGER, 2003))	10
ABBILDUNG 5: MITTELWERTE DER JÄHRLICHEN HÖCHSTEN TIDENMITTELWASSER (MIT Erlaubnis von: (UMWELTBUNDESAMT, 2019))	14
ABBILDUNG 6: EIDERSPERRWERK (FOTO: C. WEISE)	17
ABBILDUNG 7: EINZUGSGEBIET DER EIDER (H. PETSCHULL, VERÄNDERT NACH (WENZEL, 1972)).	18
ABBILDUNG 8: NORMALBETRIEB DES EIDERSPERRWERKS (H. PETSCHULL, VERÄNDERT NACH (HOLLMER, 1992)).....	19
ABBILDUNG 9: NORMALBETRIEB MIT FLUTDROSSELUNG (H. PETSCHULL, VERÄNDERT NACH (HOLLMER, 1992))	19
ABBILDUNG 10: SIELBETRIEB DES EIDER-SPERRWERKS (H. PETSCHULL, VERÄNDERT NACH (HOLLMER, 1992)).....	20
ABBILDUNG 11: STURMFLUTBETRIEB (H. PETSCHULL, VERÄNDERT NACH (HOLLMER, 1992))	21
ABBILDUNG 12: URSPRÜNGLICHE IDEE ZUM DREHBAREN EXPONATTRÄGER (H. PETSCHULL)	22
ABBILDUNG 13: SKIZZE DES EXPONATTRÄGER-ENTWURFES (H. PETSCHULL)	23
ABBILDUNG 14: AUßENMAUER DES EIDERSPERRWERKES (FOTO: C. WEISE)	28
ABBILDUNG 15: KONSTRUKTION DER AUßENMAUERN IN FUSION 360 (H. PETSCHULL IN FUSION 360)	28
ABBILDUNG 16: STECKPROFIL AN DER SCHNITTKANTE DER KONSTRUIERTEN AUßENMAUERN (H. PETSCHULL).....	29
ABBILDUNG 17: TORANTRIEB DES EIDERSPERRWERKES (FOTO: H. PETSCHULL)	30
ABBILDUNG 18: KONSTRUKTION DES SPERRWERKTORES (H. PETSCHULL)	30
ABBILDUNG 19: TORHALTERUNG DES EXPONATS (H. PETSCHULL).....	31
ABBILDUNG 20: TORSTREBEN DES SPERRWERKS-EXPONATS (H. PETSCHULL)	31
ABBILDUNG 21: KONSTRUIERTES MODELL DES EIDERSPERRWERKS (H. PETSCHULL)	32
ABBILDUNG 22: ANYCUBIC I3 MEGA S (FOTO: H. PETSCHULL)	33
ABBILDUNG 23: DRUCKFERTIGES TOR IN DER DRUCKERSOFTWARE "ULTIMAKER CURA" (H. PETSCHULL)	34
ABBILDUNG 24: STÜTZSTRUKTUREN AM SPERRWERKSTOR (FOTO: H. PETSCHULL)	35
ABBILDUNG 25: ARDUINO UNO (FOTO: H. PETSCHULL)	36
ABBILDUNG 26: PROTOTYP DER SPERRWERKSSTEUERUNG AUF DEM ARDUINO-BREADBOARD (FOTO: H. PETSCHULL).....	37
ABBILDUNG 27: SERVOMOTOR (FOTO: H. PETSCHULL)	37
ABBILDUNG 28: SKETCH FÜR DIE STEUERUNG DER SPERRWERKSTORE (H. PETSCHULL).....	38
ABBILDUNG 29: LÖTPLATINE IM BREADBOARD-DESIGN (FOTO: H. PETSCHULL).....	40
ABBILDUNG 30: KONSTRUKTION DES EXPONATTRÄGERS (FOTO: H. PETSCHULL).....	41

ABBILDUNG 31: FERTIGER PROTOTYP DES EXPONATES (H. PETSCHULL)	42
ABBILDUNG 32: BEISPIEL-CODE IN DER GRAFISCHEN PROGRAMMIERUMGEBUNG "ARDUBLOCK" (H. PETSCHULL)	44
ABBILDUNG 33: SCHALTPLAN DER TORSTEUERUNG (H. PETSCHULL)	50

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: KLASSIFIZIERUNG VON STURMFLUTEN AN DER NORDSEEKÜSTE SCHLESWIG-HOLSTEIN (VERÄNDERT NACH: BSH, 2018)	8
TABELLE 2: WORTANALOGIEN DER STURMFLUTEN (VERÄNDERT NACH (WIELAND, 1990))	8
TABELLE 3: DRUCKZEITEN UND MATERIALVERBRAUCH DES SPERRWERKEXPONATES IM ÜBERBLICK (DATEN ENTNOMMEN AUS DER DRUCKSOFTWARE „ULTIMAKER CURA“)	34

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich ausdrücklich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Ich versichere insbesondere ausdrücklich, dass ich bei Anfertigung der vorliegenden Arbeit keine Dienstleistungen oder sonstigen Unterstützungsleistungen, gleich welcher Art, von Ghostwriter-Agenturen bzw. vergleichbaren Dienstleistungsanbietern oder sonstigen Dritten, gleich ob entgeltlich oder unentgeltlich, in Anspruch genommen habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus gedruckten, elektronischen oder anderen Quellen entnommene oder entlehnte Textstellen sind von mir eindeutig als solche gekennzeichnet worden.

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen diese Versicherung nicht nur zur Bewertung der vorgelegten Prüfungsleistung mit „nicht ausreichend (5,0)“, sondern in schwerer wiegenden Fällen zu weiteren Maßnahmen der Europa-Universität Flensburg bis zur Exmatrikulation führen können.

Mir ist bekannt, dass die Arbeit digital gespeichert und durch eine Anti-Plagiatssoftware überprüft werden kann. Sowohl mit der Datenspeicherung als auch mit der Überprüfung meiner Arbeit durch den Einsatz einer Anti-Plagiatssoftware erkläre ich mich einverstanden.

Mit einer Ausleihe meiner Arbeit bin ich einverstanden / nicht einverstanden.

Risum-Lindholm,



Unterschrift