

Schweizerische Fachschule TEK0

Bau einer mobilen Windturbine

Diplomarbeit Techniker HF Maschinenbau 2024
Öffentlich



Antenori Remo / Schellenberg Joel
23.10.2024

Inhaltsverzeichnis

MANAGEMENT SUMMARY	3
AUFGABENSTELLUNG	6
LASTENHEFT	6
ZIELDEFINITION	7
<i>Terminplan</i>	7
<i>Projektrisiken</i>	9
ERNEUERBARE ENERGIEN	10
ENTWICKLUNG DER WIND- UND WASSERKRAFT	11
WIND- UND WASSERRÄDER	11
WINDTURBINEN	11
TURBINENARTEN	11
<i>Horizontale Windturbine</i>	11
<i>Vertikale Windturbine</i>	12
SCHNELLÄUFER UND LANGSAMLÄUFER	13
NUTZUNG DER WINDKRAFT	13
<i>Die Physik dahinter</i>	13
<i>Widerstandsläufer</i>	14
<i>Auftriebsläufer</i>	15
<i>Welche Beanspruchungen treten bei einer Windturbine auf?</i>	16
<i>Welche Kräfte und Momente treten im Rotor auf?</i>	17
<i>Anzahl der Rotorblätter</i>	18
WASSERTURBINEN	19
TURBINENARTEN	19
<i>Gleichdruckturbinen</i>	19
<i>Überdruckturbinen</i>	20
DIE PHYSIK DAHINTER	21
ENERGIEPRODUKTION VON WASSERKRAFTANLAGEN	22
<i>Ausnutzbares Gefälle</i>	22
<i>Energieumwandlung in der Turbine</i>	22
<i>Kavitation</i>	22
GEEIGNETE STANDORTE	23
WINDKRAFT	23
<i>Referenzgebiet</i>	23
WASSERKRAFT	26
<i>Referenzgebiet</i>	26
EINSATZGEBIET UNSERER TURBINE	27
FESTLEGUNG DER REFERENZPARAMETER	28
UNSERE IDEE	29
EINSATZMÖGLICHKEITEN UND AKTIVITÄTEN	29
<i>Umgebungen und Bedingungen</i>	29
ENERGIEWANDLUNG	30
PRÄFERENZMATRIX	30
VORHANDENE SYSTEME	31
<i>WaterLily und WindLily</i>	31
<i>Windturer</i>	32
SKIZZEN	32
<i>Windturbine</i>	33
<i>Wasserrad</i>	33
<i>Wasserturbine</i>	34

Generator mit Energiebox	34
UMSETZUNG	35
UNTERSCHIED DER BEIDEN FLUIDE	35
FESTLEGUNG DER SCHNELLAUFAHLE UND DES C_p -WERT	37
VORBEREITUNG UND VORGEHEN	38
WINDTURBINE	38
<i>Berechnung der Windturbinendrehzahl und Leistung</i>	39
KAPLANTURBINE	39
<i>Das 3D-Modell</i>	39
<i>Berechnung der Kaplanurbinendrehzahl und Leistung</i>	40
MOTORWAHL	41
<i>Bedingungen</i>	41
<i>Recherche und Festlegung</i>	42
<i>Schutzart IP68</i>	42
<i>Technische Angaben und Berechnungen</i>	43
<i>Spannungswandler</i>	44
<i>Drehstrom</i>	44
<i>Radial und Axialkräfte</i>	45
PROTOTYPING	46
<i>Materialisierung Prototyp</i>	47
<i>Rotorblätter</i>	47
<i>Rotornabe</i>	48
<i>Kaplanurbinen</i>	49
<i>Gehäuse</i>	50
<i>Energiebox</i>	51
<i>Windfang</i>	53
<i>Drehsockel</i>	54
<i>Halterung</i>	54
KLEINTEILE UND SONSTIGES MATERIAL	55
PRODUKTION DES PROTOTYPS	56
PRODUKTIONSZEITEN	56
3D-DRUCK	57
DICHTHEITSPRÜFUNG IP68	58
LABORTEST	59
FELDTTEST	62
PFLICHTENHEFT	65
OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN	66
KOSTEN- UND BAUTEILELISTE	68
MECHANISCHE WERKSTATT AM NMZ	68
QUELLENANGABEN	70
LITERATURVERZEICHNIS	70
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	71
REFLEXION	74
LESSONS LEARNT	75
NUTZUNG VON KÜNSTLICHER INTELLIGENZ	75
SCHLUSSWORT	76
KLASSIFIZIERUNG UND EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG	77
ANHÄNGE	78

Management Summary

In dieser Arbeit setzen wir uns mit Wind-, sowie auch mit Wasserturbinen auseinander. Ziel ist es, eine Turbine zu entwickeln, die als Wind- und als Wasserturbine verwendet werden kann. Sie ist für den Outdoorbereich gedacht und soll daher in einen Rucksack reinpassen. Es soll möglich sein, mit der Turbine Handys, Taschenlampen und Powerbanks zu laden.

Wir informierten uns über die physikalischen Gegebenheiten und legten dadurch Parameter für unsere Turbine fest, wie zum Beispiel die Form der Wasserturbine oder die Anzahl Blätter der Windturbine. Wir entwarfen ein Elektroschema und zeichneter die Windturbine, welche wir zum grössten Teil mithilfe des 3D Drucks bauten.

Wir testeten elektrische Komponenten, um aus verschiedenen Drehzahlen 5 Volt zu generieren. Die berechneten Drehzahlen decken sich mit den Resultaten aus unseren Messungen. Die Spannungen sind daher mit unseren Komponenten erreichbar.

Die Turbine ist wasserdicht und konnte dadurch auf die Funktionen Wind wie auch Wasser geprüft werden. Sie lässt sich leicht auf- und abbauen und passt gut in einen Rucksack.

Vorwort

Das Thema Energiegewinnung hat uns schon vor dieser Diplomarbeit begeistert. Wir durften uns bei einer vorangehenden Semesterarbeit tiefer damit auseinandersetzen, wie kleinste Energiemengen gewonnen werden können. Hierbei haben wir uns in allen möglichen Richtungen Gedanken gemacht. Es war erstaunlich und inspirierend, welche Ideen dabei entstanden sind. Da uns das Gebiet der erneuerbaren Energie weiterhin beschäftigte, haben wir für eine andere Schularbeit eine kleine Windturbine für unterwegs gebaut. Während der Entwicklung dieser Windturbine haben wir festgestellt, wie interdisziplinär, komplex und weitläufig das Gebiet ist. Deshalb wollten wir nochmals in diese Richtung vorstossen und uns eingehender damit befassen. Zu wissen, dass auf der ganzen Welt viele Wissenschaftler und kluge Köpfe zu diesem Thema Forschung betreiben, machte die Sache noch spannender. Schon kleine Fortschritte und Erfolge führen dazu, dass das Bewusstsein für erneuerbare Energien wächst und wir zukünftig einer Lösung für das Energieproblem einen Schritt näherkommen könnten. Wir nutzen diese Diplomarbeit, um in ein Teilgebiet dieses komplexen Themas einzutauchen und um selbst einen kleinen Teil auf dieser grossen Reise beitragen zu können.

Einleitung

Die effiziente Nutzung der Energie, die in Wind und strömenden Wasser steckt, ist komplex. Die beiden Fluide besitzen sehr unterschiedliche Dichten und somit auch verschiedene Herangehensweisen, um sie nutzen zu können. In dieser Arbeit werden Möglichkeiten erörtert, um für unterwegs aus Wasserkraft und Wind elektrischen Strom zu gewinnen. Soweit möglich, wird die Nutzung dieser zwei Teilgebiete in einem mobilen System miteinander kombiniert. Das Verständnis, auf was zu achten ist, wenn man eine transportierbare Windturbine oder Wasserturbine entwickelt, soll erweitert werden. Welche Vorgehensweisen gibt es und wie kann man die gewonnenen Daten praktisch umsetzen? Die Ergebnisse werden in die Entwicklung eines funktionierenden Geräts einfließen und in der Praxis auf die Probe gestellt. Der ganze Prozess wird dokumentiert und von der Theorie bis zur Ausführung anschaulich dargestellt. Die Fachgebiete Maschinenbau, Elektrotechnik und Strömungslehre sind ein wesentlicher Bestandteil bei der Entwicklung einer solchen Turbine. Es ist klar, dass wir im Rahmen dieser Arbeit nicht alle Aspekte und Facetten behandeln konnten, da diese oft tief in die Materie gehen. Es mussten an einigen Stellen Annahmen getroffen und Abgrenzungen gemacht werden. Das Gerät soll für unterwegs eine Alternative zu Solarstrom und eine Ergänzung zur Powerbank sein, vor allem, wenn man sich abseits von bewohnten Gebieten aufhält.

Aufgabenstellung

Lastenheft

Zielsetzung und Zweck des Geräts

In der heutigen Zeit sind Alternativen zur Energiegewinnung gefragt. Jeder Schritt in diese Richtung trägt zu einer nachhaltigeren Umwelt bei. Es gibt viele interessante Möglichkeiten dafür. Da wir gerne Outdoor unterwegs sind, wollen wir eine Windturbine, die bequem in einem Rucksack mitgeführt werden kann. Das heisst, sie soll so kompakt und leicht wie möglich sein. Die Windturbine soll z.B. beim Camping, bei Ausflügen oder beim Wandern mitgeführt und verwendet werden können, um kleine Verbraucher wie Taschenlampen oder Akkus aufzuladen. Sie wird jedoch nicht konzipiert, um grössere Geräte mit elektrischem Strom versorgen zu können. Man sollte sich mit diesem Gerät in der Natur unabhängiger und für einen längeren Zeitraum aufhalten können. Die Windturbine soll bei Bedarf, mithilfe eines Adapters, in kurzer Zeit in eine Wasserturbine umgebaut werden können. So kann man je nach Begebenheiten vor Ort die Wind- oder Wasserkraft nutzen.

Technische Anforderungen

Die Ausgangsspannung soll 5V betragen, damit Akkus oder kleine Geräte per USB aufgeladen werden können. Der Motor und die elektronischen Bauteile sollen wasserdicht sein, damit der Betrieb unter Wasser keine Schäden verursacht. Die Leistung soll mindestens ausreichen um kleine Verbraucher wie Handys oder eine Powerbank aufzuladen. Das Aufladen soll im Wasser sowie auch im Wind funktionieren.

Funktionale Anforderungen

Das Produkt soll ein möglichst kompaktes Packmass haben, damit es gut in einem Rucksack transportiert werden kann. Wenn möglich soll eine auf das Produkt zugeschnittene Hülle entwickelt werden, welche die Turbine beim Transport vor Schäden schützt. Für den Betrieb der Wind- und Wasserturbine müssen die nötigen Halterungen und Befestigungsmöglichkeiten vorhanden sein, damit ein sicherer und stabiler Betrieb möglich ist. Der Aufbau und Wechsel der beiden Turbinen sollte unkompliziert und schnell möglich sein.

Umweltbedingungen

Die Turbine muss in Umgebungen betrieben werden können, in denen eine Luftfeuchtigkeit von 0 % bis 90 % und Temperaturen von -20 °C bis 45 °C vorherrschen. Sie sollte zudem unempfindlich gegenüber Regen, Schnee und Hagel sein und direkte Sonneneinstrahlung soll den Betrieb nicht beeinträchtigen. Die Windturbine muss starken Winden von bis zu 14 m/s (50 km/h) standhalten können.

Kosten

Die Kosten für den Prototyp sollen nicht mehr als 500 CHF betragen (exkl. Arbeitsstunden). In der ausgereiften Serienproduktion (ca. 50Stk) soll die Turbine dann insgesamt die Kosten von 600CHF (inkl. Arbeitsstunden) nicht überschreiten.

Die Entwicklung dieser Windturbine enthält auch die dazugehörige Halterung für den Betrieb an Land und im Wasser.

Zieldefinition

Für die Arbeit haben wir folgende drei Ziele definiert.

1. Wir bauen mindestens zwei funktionierende Varianten zur Energiegewinnung.
2. Eine Variante soll mit Hilfe eines Adapters elektrische Energie aus Wasserkraft gewinnen können.
3. Das ganze Konstrukt soll mit einem handelsüblichen Rucksack mitgeführt werden können.

Da wir uns bisher nur sehr begrenzt mit Strömungslehre befasst haben und es hier um Luft, wie auch um Wasser geht, wird unsere Arbeit viel Recherche und Berechnungen beinhalten. Da wir aber testen möchten, ob die Kombination zwischen Luft und Wasser Potential hat, werden wir eine Turbine entwickeln, welche für Luft, wie auch für Wasser geeignet ist. Diese soll kinetische Energie in elektrische umwandeln, mit der kleine Geräte wie Handys, Powerbanks oder Taschenlampen geladen werden können.

Terminplan

Zu Beginn der Arbeit möchten wir uns genügend Zeit für die Recherche nehmen. Obwohl wir schon ein bisschen Erfahrungen mit Motoren als Generatoren sammeln konnten, werden wir mit vielen neuen Themen konfrontiert. Wir werden vor der ersten Besprechung ein Lastenheft erstellen, welches unsere anzustrebenden Ziele enthält. Wir werden unseren ersten Prototypen zeichnen und anschliessend bauen. Dieser wird danach getestet und die anzupassenden Elemente werden bei der Konstruktion eines nachfolgenden Prototyps einfließen. Dieser wird wieder umgesetzt und anschliessend getestet. Obwohl kein dritter Prototyp gebaut wird, werden Optimierungsmöglichkeiten festgehalten. Mit den nun umgesetzten Eigenschaften wird ein Pflichtenheft erstellt. Zum Schluss werden unsere Erkenntnisse festgehalten. Der Soll Terminplan wurde auf dieser Basis erstellt (Abb. 1).

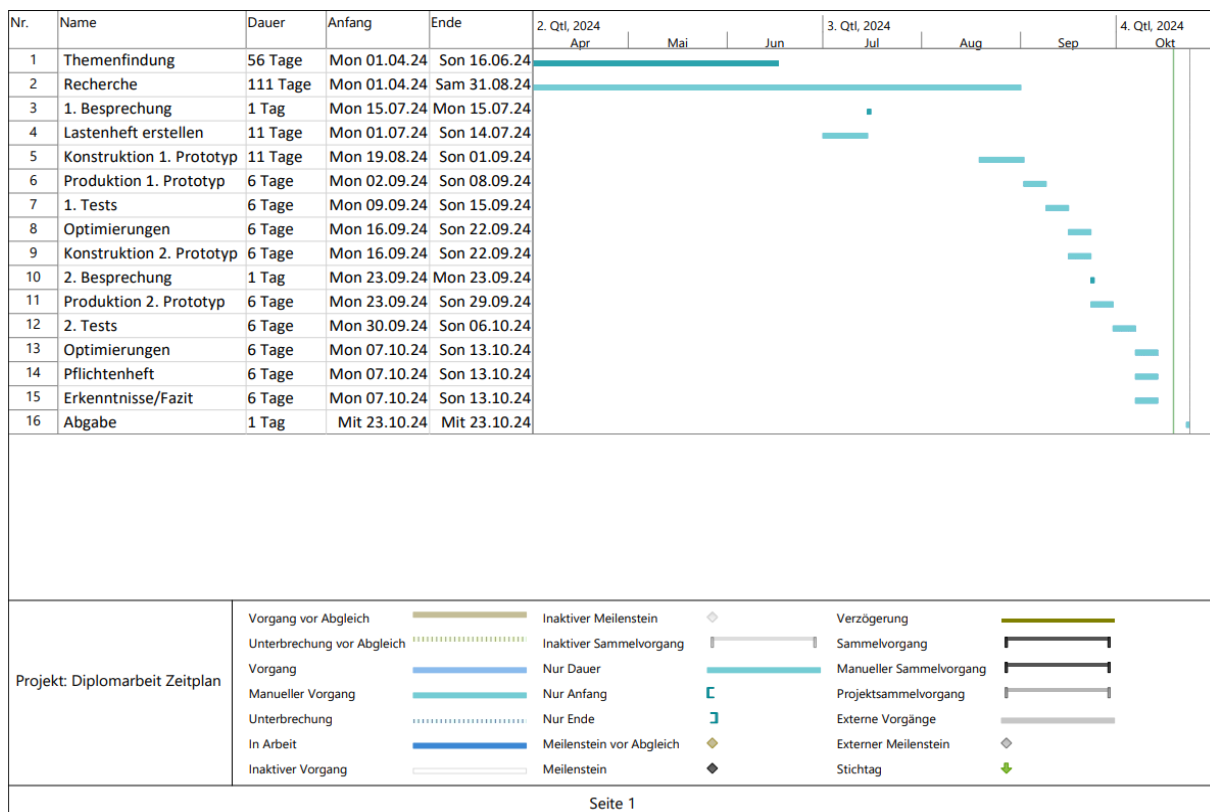


Abbildung 1: Terminplan Soll

Wie befürchtet, brauchten wir viel Zeit für die Recherche und später für die Berechnungen. Daher konnten wir erst spät die Teile bestellen und das Gehäuse konstruieren. Am meisten Zeit brauchten wir dabei, einen passenden Motor zu finden, welcher für Wind, wie auch für Wasser ausgelegt ist. Die Motorsuche war aber wichtig, da derjenige, den wir schlussendlich verbauten, sehr gute Werte liefert, was bei einem anderen nicht möglich gewesen wäre. Ursprünglich hätten wir gerne nach dem ersten Prototyp einen zweiten gebaut, was wir aber aus Zeitgründen lassen mussten. Daher wurden die dazugehörigen Zeitfenster im Soll-Ist Zeitplan gestrichen (Abb. 2). Wir haben aber nach dem Konstruieren des Erstentwurfes die Baugruppe nochmals angepasst, da wir mit einigen Eigenschaften noch nicht zufrieden waren. Der Hauptgrund war, das Gehäuse noch dichter zu machen, um den Motor im Wasser besser zu schützen. Die Dokumentation wurde aber während des ganzen Prozesses kontinuierlich weitergeführt, daher wurde nach den letzten Tests nicht mehr so viel Zeit benötigt, wie ursprünglich eingeplant.

Projektrisiken

Um eine bessere Übersicht auf anfallende Probleme zu haben, listeten wir diese auf und erstellten eine Risikomatrix (Abb. 3).

Risikoart	Aufzutretende Risiken
Personelle Risiken	R1: Jemand fällt länger krankheitsbedingt aus R2: Starke Berufliche Auslastung
Technische Risiken	R3: Die unseren Anforderungen entsprechenden Bauteile existieren nicht R4: Wir sind nicht in der Lage, Benötigtes zu fertigen und zu montieren R5: Turbine wird nicht wasserdicht R6: Turbine generiert keine elektrische Energie R7: Turbine hat zu viel Reibung
Projektmanagement Risiken	R8: Projektverzug nach Planung R9: Lange Recherchezeiten (Komplexes Thema)
Organisatorische Risiken	R10: Prototyp wird zu teuer R11: Die Arbeiten werden falsch aufgeteilt
Externe Risiken	R12: Lieferfristen sind zu lange R13: Produkte sind nicht verfügbar

Tabelle 1: Risikotabelle

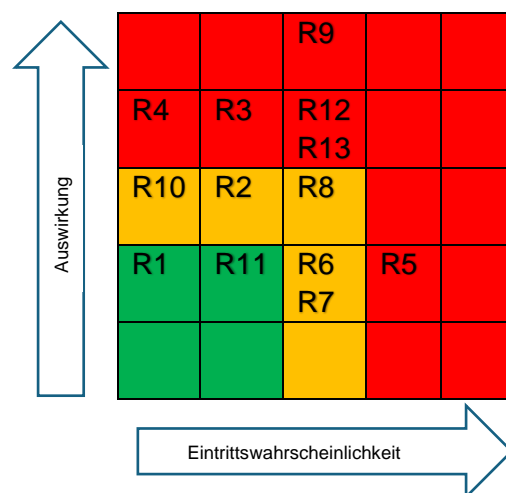


Abbildung 3: Risikomatrix

Personelle Risiken

Es ist möglich, dass jemand von uns für einige Tage krank wird. Dieser Umstand würde aber keinen grossen Einfluss auf das Projekt haben. Umständlicher wird es aber, wenn jemand beruflich bedingt während dieser Zeit viele Verpflichtungen hat. Dies würde bedeuten, dass jemand weniger Zeit und Energie für das Projekt hat. Die Wahrscheinlichkeit, dass dies in einem Ausmass eintritt, dass es zu grösseren Problemen führen könnte, halten wir für sehr gering.

Technische Risiken

Unsere Turbine sollte verschiedene technische Eigenschaften besitzen, die wir erreichen möchten. Es geht uns hauptsächlich um das Zusammenspiel der beiden Turbinenarten. Daher wäre es für uns nicht weiter schlimm, falls der Prototyp zum Beispiel nur sehr wenig Energie liefert oder die Rotorblätter im Wind nicht sehr gut laufen würden. Problematisch wäre es aber für uns, wenn wir nicht in der Lage sind, diese erst zu bauen oder es keine Teile dafür gäbe. Dass dies eintreten könnte, stufen wir jedoch als sehr gering ein.

Projektmanagement Risiken

Uns ist bewusst, dass die Themen Wind und Wasserenergie sehr anspruchsvoll sind und wir uns in denen noch nicht sehr gut auskennen. Es ist also sehr gut möglich, dass wir für die Recherchezeit und die Berechnungen mehr Zeit benötigen als erhofft.

Organisatorische Risiken

Wir haben ein Budget erstellt, das wir möglichst einhalten möchten. Werden die Bauteile viel zu teuer, würden wir sie nicht bestellen können. Daher sehen wir uns möglichst im günstigeren Sektor um und werden teils nicht industrielle Teile bestellen.

Externe Risiken

Es ist möglich, dass Teile, die wir benötigen, zwar existieren, aber sehr lange Lieferfristen haben oder auf unbestimmte Zeit nicht verfügbar sind. Wir bemühen uns deshalb, möglichst früh zu bestellen oder verschiedene Alternativen zu nutzen.

Erneuerbare Energien

Erneuerbare Energien sind Energiequellen, die sich durch natürliche Prozesse ständig erneuern und somit im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen unerschöpflich sind. Diese Energieformen tragen dazu bei, die Umwelt zu schützen, da sie bei ihrer Nutzung keine schädlichen Treibhausgase freisetzen. Zu den wichtigsten erneuerbaren Energiequellen gehören die Sonnenenergie, die durch Solaranlagen gewonnen wird, Windenergie, die durch Windkraftanlagen erzeugt wird, und Wasserkraft, bei der die Bewegung von Wasser zur Stromerzeugung genutzt wird. Weitere Beispiele sind Biomasse, bei der organisches Material wie Holz oder Pflanzenabfälle zur Energiegewinnung dient, und Geothermie, bei der die Wärme aus dem Erdinneren zur Stromerzeugung oder direkten Beheizung genutzt wird.

Erneuerbare Energien sind ein zentraler Bestandteil der Umstellung auf eine nachhaltige Energieversorgung, da sie helfen, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern und den Klimawandel zu bekämpfen. (Chat-GPT: Was sind Erneuerbare Energien?, 2024)

Entwicklung der Wind- und Wasserkraft

Die Windkraft ist die am längsten genutzte erneuerbare Energiequelle. Schon vor 5000 Jahren nutzten Schiffe auf dem Nil die Windenergie auf Schiffen in Form von Segeln zur Fortbewegung. Dies blieb bis weit in das 19. Jahrhundert die einzige Antriebsenergie für die Schifffahrt. Vor etwa 3000 Jahren vermutet man auch die Entwicklung der ersten Windmühlen in Ägypten. Die ersten Windmühlen funktionierten mit Mühlenflügel aus Stoff und eine vertikale Drehachse. Erst später traten Bauweisen mit horizontaler Achse in Erscheinung. Die Windmühlen verbreiteten sich dann zuerst in Asien und Persien aus. Das Wissen gelang dann wahrscheinlich mit Kreuzfahrern nach Europa, wo später um das 9. Jahrhundert die ersten Windmühlen gebaut wurden.

Die Wasserkraft wurde früh, ungefähr schon im 3. Jahrhundert v. Chr., von den Menschen genutzt. In Mesopotamien wurden Schöpfräder genutzt, um Felder zu bewässern und im Mittelalter wurden Wassermühlen genutzt, um Getreide zu mahlen. Die Menschen erkannten, dass sie die gewonnene mechanische Energie auch nutzen konnte, um handwerkliche Arbeiten auszuführen. So entstanden dann auch Poch-, Hammer- und Sägewerke. Auch im Bergbau wurde die Wasserkraft genutzt, um beispielsweise Wasser abzupumpen oder Erze zu fördern. (Hoffmann, 1990)

Wind- und Wasserräder

Wind- und Wasserräder nutzen die Drehbewegung gleich als solches, um beispielsweise eine Wasserpumpe anzutreiben und die Felder zu bewässern. Wind- und Wassermühlen hingegen werden diejenigen Anlagen bezeichnet, welche mit der Drehbewegung eingesetzt wurden, um das Mahlgut zu mahlen.

Windturbinen

Es gibt hauptsächlich zwei Bauformen von Windturbinen: die horizontale und die vertikale Bauform. Beide finden in der heutigen Zeit Verwendung und beide Bauformen haben ihre Vor- und Nachteile. Es gibt bei beiden Bauformen jeweils Langsam- sowie Schnellläufer.

Turbinenarten

Horizontale Windturbine

Bei horizontalen Windturbinen befindet sich die Drehachse des Rotors auf der horizontalen Ebene. Diese Windturbinen-Bauform kommt am häufigsten vor. Sie besteht aus dem Rotor mit den Rotorblättern, dem Gehäuse, in dem der Generator und die Elektronik verstaut ist und dem Windfang. Die Turbine sitzt auf einem vertikal angeordneten Turm / Mast und kann sich mit Hilfe einer geeigneten Lagerung darauf drehen. Diese Turbinenart besitzt die leistungsfähigeren Turbinen. Diese werden in offenen Gebieten mit eingesetzt, wo sich die Richtungsänderung des Windes in Grenzen hält. Man findet sie z.B. in Gebirgen oder in Offshore-Anlagen auf offener See, sowie in grossen Höhen, wo weniger Turbulenzen herrschen. Die leistungsstarken Turbinen sind alle Schnellläufer, während z.B. ein klassisches US-Windrad ein Langsamläufer ist. Die Schnellläufer haben durch die hohen Blattspitzgeschwindigkeit oft Lärmemissionen, die störend sein können. (Ramona Schmelmer, 2015)

Luvläufer und Leeläufer

Heutige Windturbinen werden praktisch immer als Luvläufer konzipiert, da bei den Leeläufer Leistungseinbussen durch den Windschatten des Turms oder Stativ entstehen. Ausserdem können bei Leeläufer auch periodische Schwankungen im Antriebsmoment entstehen. Bei den Leeläufer besteht die Gefahr, dass sich die Rotorblätter verformen und mit dem Turm oder Stativ kollidieren. Deshalb sollte man hier genügend Spielraum einbauen oder mit der Geometrie des Rotors, der Verformung durch die Kräfte, entgegenwirken (Abb. 4).

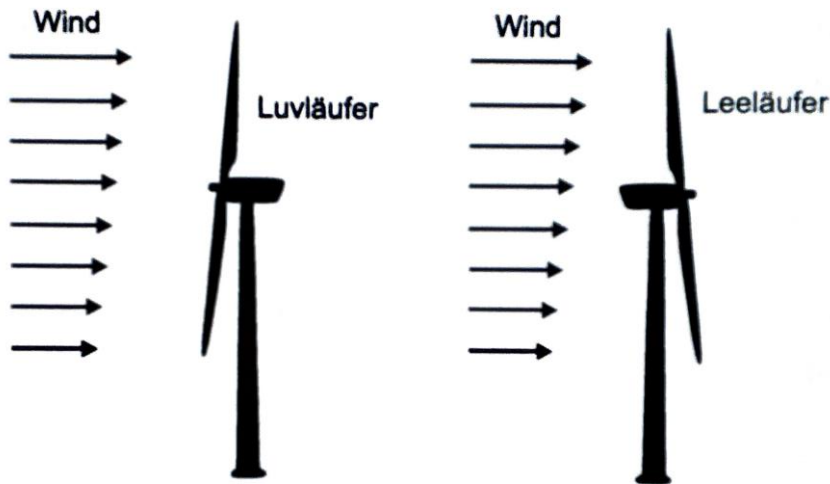


Abbildung 4: Luv- und Leeläufer (Quelle: Arne Kusiek, 2022)

Bei grossen modernen Windenergieanlagen richtet sich der Rotor mithilfe eines Azimutsystems zum Wind aus. Bei kleineren Windturbinen erfolgt die Ausrichtung zum Wind mithilfe eines Windfangs automatisch. Voraussetzung hierfür ist, dass der Schwerpunkt der Gondel zum Stativ richtig gesetzt ist und die Dimension und Form des Windfangs richtig gewählt ist. (Kusiek, 2022)

Vertikale Windturbinen

Bei der vertikalen Windturbinen ist die Drehachse des Rotors auf der vertikalen Ebene angeordnet. Es gibt verschiedene Bauformen bei den vertikalen Windturbinen (Abb. 5) Die Vertikalläufer haben den grossen Vorteil, dass sie mit Winden aus allen Richtungen klarkommen und daher keinen Windfang benötigen. Sie haben eine geringere Schnelllaufzahl als horizontale Windturbinen und deshalb auch eine geringere Lärmentwicklung. Deshalb, und weil sie mit Turbulenzen besser umgehen können, werden sie in Wohngebieten gegenüber den Horizontalläufern bevorzugt. Ausserdem kann man sie gut in Bodennähe installieren, wo man für Wartungsarbeiten gut hingelangt. (Ramona Schmelmer, 2015)

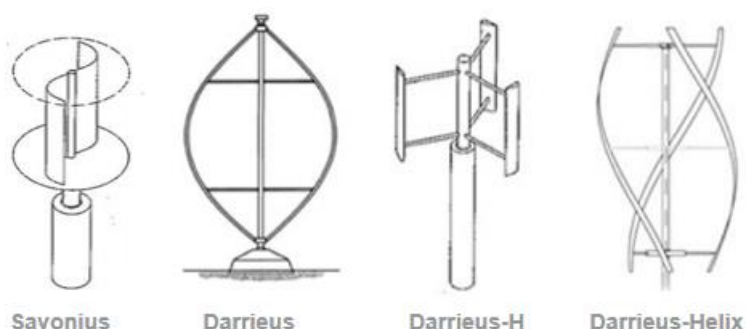


Abbildung 5: Vertikalen Turbinen (Quelle: Ramona Schmelmer, Petra Denk, 2015)

Schnellläufer und Langsamläufer

Das Verhältnis zwischen Umfangsgeschwindigkeit der Rotorblattspitze und der Windgeschwindigkeit wird als Schnelllaufzahl bezeichnet.

$$\lambda = \frac{\text{Umfangsgeschwindigkeit der Blattspitze } U}{\text{Windgeschwindigkeit } v_w}$$

In Fachkreisen besteht keine genaue Einigkeit, ab welcher Schnelllaufzahl eine Turbine als Schnellläufer oder Langsamläufer gilt. Man kann jedoch sagen, dass eine Turbine als Schnellläufer gilt, wenn die Schnelllaufzahl über 5 und beim Langsamläufer unter 3 liegt (Abb. 6). (Kusiek, 2022)

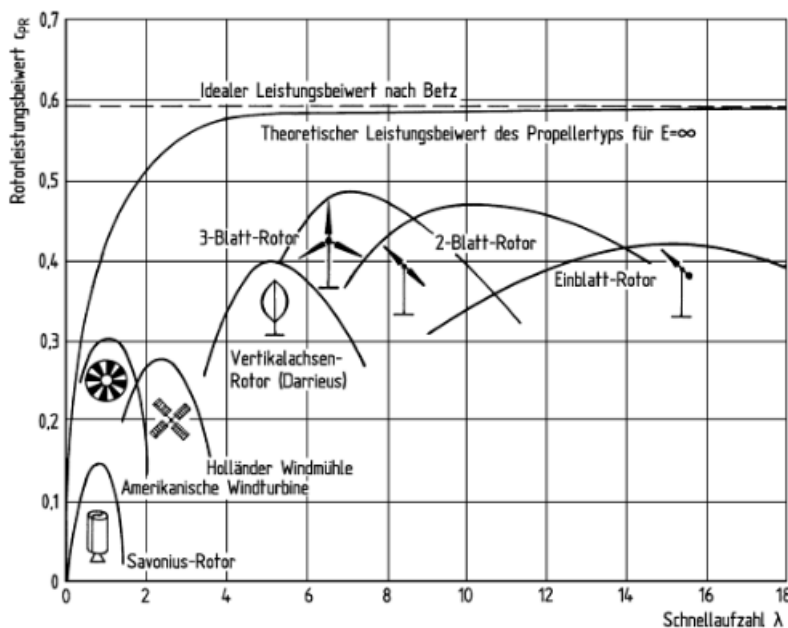


Abbildung 6: Schnelllaufzahlen und Leistungsbeiwerte (Quelle: Ramona Schmelmer, Petra Denk, 2015)

Nutzung der Windkraft

Die Physik dahinter

Wind ist ein Luftmassenstrom und entsteht aus einem Druckgefälle zwischen zwei Gebieten mit unterschiedlichem Luftdruck. Wenn der Wind durch den Rotor einer Windturbine strömt, treibt er diesen an und erzeugt die Drehbewegung, welche dann genutzt werden kann. Damit der Rotor ins Drehen kommt, müssen die Rotorblätter eine bestimmte Form haben. Es gibt grundsätzlich zwei physikalische Prinzipien, wie die Windkraft genutzt werden kann. Das Auftriebsprinzip und das Strömungswiderstandsprinzip. Bei Flugzeugflügel oder modernen Windturbinen wirkt das Auftriebsprinzip (Abb. 7).

Auftriebsläufer

Bei den Auftriebsläufer ist es ähnlich wie bei einem Flugzeugflügel. Die Rotorblätter erzeugen bei Wind eine Auftriebskraft. Diese entsteht dadurch, dass der Luftstrom auf der einen Seite des Blattes einen längeren Weg zurücklegen muss und dadurch der Luftdruck an dieser Stelle geringer ist als auf der anderen Seite des Blattes (Abb. 9). Die Auftriebskraft ΔF_A und die Strömungswiderstandskraft ΔF_W ergeben zusammen die Resultierende Strömungskraft ΔF (Abb. 10).

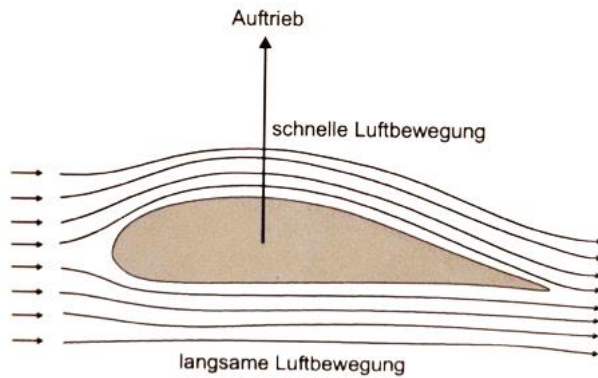


Abbildung 9: Strömungen am Flugzeugflügel (Quelle: Arne Kusiek, 2022)

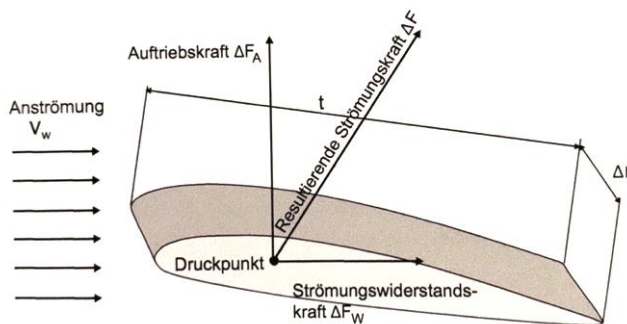


Abbildung 10: Kräfte am Flugzeugflügel (Quelle: Arne Kusiek, 2022)

Mit dem Anstellwinkel α können die Druckverhältnisse an beiden Seiten des Blattes verändert werden. Bei einer Veränderung der Druckverhältnisse verändert sich auch die Stärke sowie die Richtung des Auftriebs (Abb. 11).

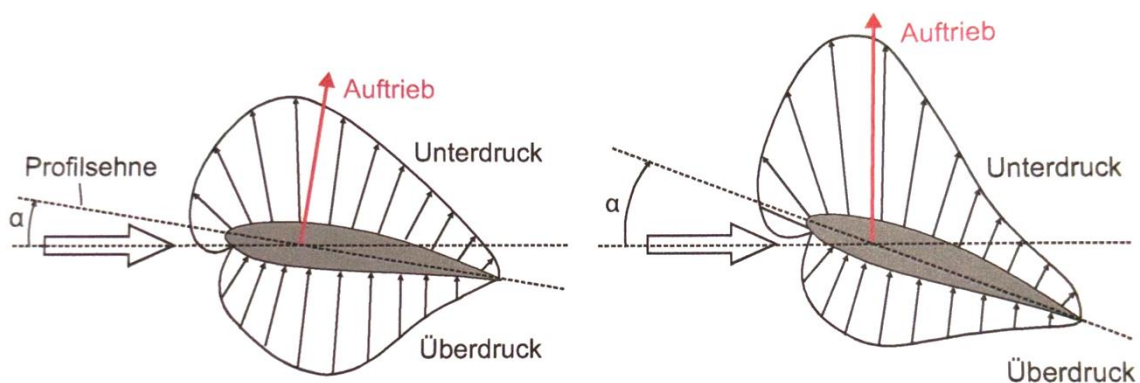


Abbildung 11: Druckverläufe bei unterschiedlichen Anstellwinkeln (Quelle: Arne Kusiek, 2022)

Der Anstellwinkel bei Rotorblättern findet man normalerweise nur bei grösseren Windkraftwerken. Bei kleineren Windturbinen ist die Blattform nicht verstellbar und hat eine starre Geometrie. Bei den meisten Rotorblättern sieht man im Gegensatz zu den Flugzeugflügeln eine Verwindung in der Blattachse. Die Anströmverhältnisse unterscheiden sich insofern voneinander, dass bei einer Windturbinen der Rotor um die eigene Achse dreht und auf dem Rotorblatt, je nach Radius zum Drehmittelpunkt, eine unterschiedliche Umfangsgeschwindigkeit gegeben ist. Die unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten am Blatt führen in der Summe von Widerstandskraft und Auftriebskraft zu Kraftvektoren mit einem anderen Winkel. Um diese Differenz auszugleichen, wird das Rotorblatt an die entsprechende Umfangsgeschwindigkeit angepasst und fliegend in der Blattachse gewunden. In der Abbildung (Abb. 12) kann man gut sehen, wie sich die Geometrie des Rotorblatts in Abhängigkeit zur Wind- und Umfangsgeschwindigkeit zur Spitze hin anpasst. Der Vektor der Umfangsgeschwindigkeit U_r wird mit grösserem Abstand zu Rotorachse immer grösser und beeinflusst somit massgebend die Winkel der Anströmgeschwindigkeit V_A . (Kusiek, 2022)

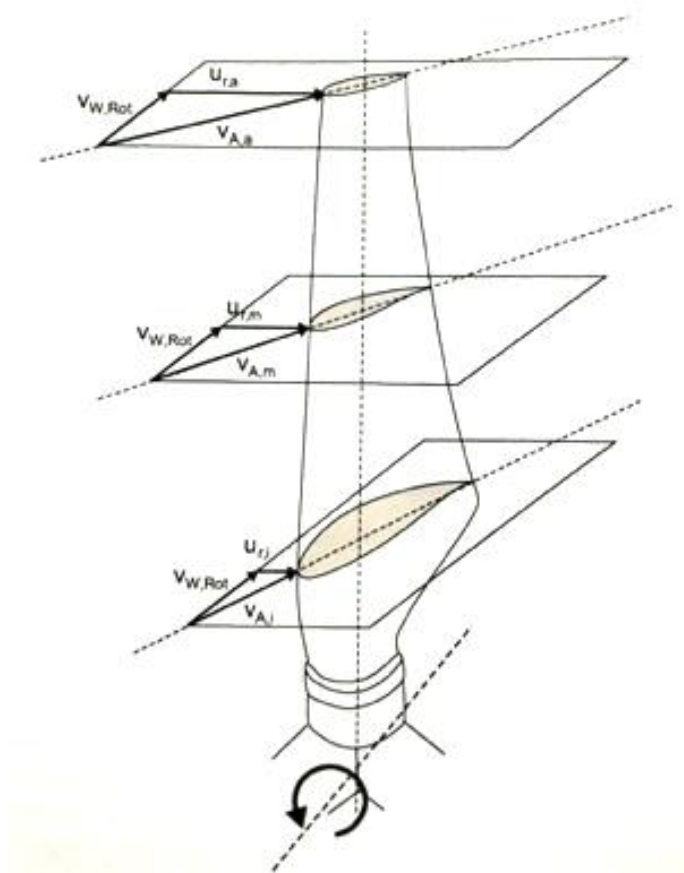


Abbildung 12: Geometrie Rotorblatt (Quelle: Arne Kusiek, 2022)

Welche Beanspruchungen treten bei einer Windturbinen auf?

Bei einer Windturbinen treten verschiedene Beanspruchungen auf. Die Turbinen sind äusseren Einflüssen und Belastungen ausgesetzt, welche kurzzeitig oder periodisch wiederkehrend auftreten. Die Windturbinen muss den extremen Belastungen, welche an dem Einsatzstandort auftreten können, standhalten. Zudem muss die Dauerbelastung der Bauteile für eine bestimmte Lebensdauer berücksichtigt werden. Denn hier wirken sich die dynamischen und periodisch wiederkehrenden Belastungen besonders aus. Auch die Steifigkeit der Komponenten sind zu beachten. Wenn diese aufeinander nicht abgestimmt sind, kann es zu unerwünschten Schwingungen und Resonanzen kommen.

Welche Kräfte und Momente treten im Rotor auf?

Am Rotor einer Windturbine entstehen viele Kräfte und Momente welche sich zum Teil überlagern. Sie haben mechanische sowie auch aerodynamische Ursachen. Die **Mechanischen Kräfte und Momente** entstehen durch die Gewichtskraft der Rotorblätter und dem Rotieren des Rotors. Die Rotorblätter erfahren bei jeder Umdrehung Zug- und Druckkräfte in Längsrichtung des Blattes sowie Biegemomente in beiden Richtungen um die Schwenkachse. (Abb. 13)

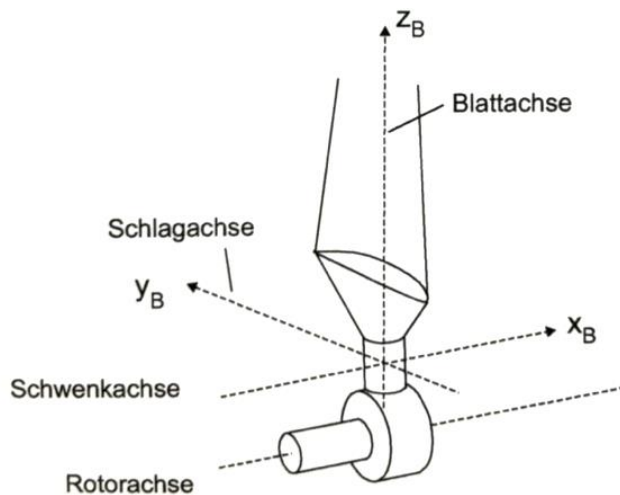


Abbildung 13: Kräfte und Momente am Rotorblatt (Quelle: Arne Kusiek, 2022)

Die **Aerodynamischen Kräfte** beinhalten die Schubkraftverteilung und die Umfangskraftverteilung. Die Schubkraftverteilung sind die Kräfte, welche in Windrichtung theoretisch im Schwerpunkt des Rotorblattes angreifen. Die Umfangskraftverteilung besteht aus den Kräften welche senkrecht zur Windrichtung wirken (Abb. 14). Es ist wichtig, dass man diese Kräfte und Momente bei der Konstruktion berücksichtigt damit möglichst keine Probleme beim Betrieb der Windturbine auftreten. Es muss beispielsweise darauf geschaut werden, dass der Schwerpunkt des Blattes auf der Blattachse liegt und auch die richtigen Toleranzen und Geometrien bei der Befestigung der Rotorblätter gewählt werden. Sonst kann es zu Unwuchten und zu unerwünschten Belastungen im Betrieb führen. (Kusiek, 2022)

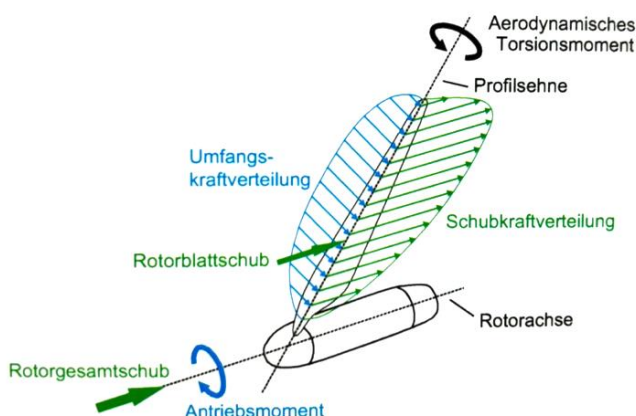


Abbildung 14: Aerodynamische Kräfte am Rotorblatt (Quelle: Arne Kusiek, 2022)

Anzahl der Rotorblätler

Es gibt Windturbinen mit einer unterschiedlichen Anzahl an Rotorblättern. Die meisten haben aber 2-, 3- oder 4-Blättrige Rotoren. Der Vorteil von Rotoren mit einer ungeraden Anzahl an Blättern besteht darin, dass diese Anlagen ruhiger laufen. Die Kräfte verteilen sich besser auf die Windturbine und es entstehen weniger Schwingungen oder Vibrationen. In modernen Windenergieanlagen aber auch bei kleinen Windturbinen trifft man deshalb oft nur Rotoren mit drei Blättern an. Dies hat vor allem bei grossen und teuren Anlagen Kosten- und Effizienzgründe. Der Leistungszuwachs von zwei auf drei Rotorblätler beträgt ca. 3-4%. Aber von drei auf vier Rotorblätler erhöht sich die Leistung gerade mal noch um ca. 1-2% (Abb. 15).

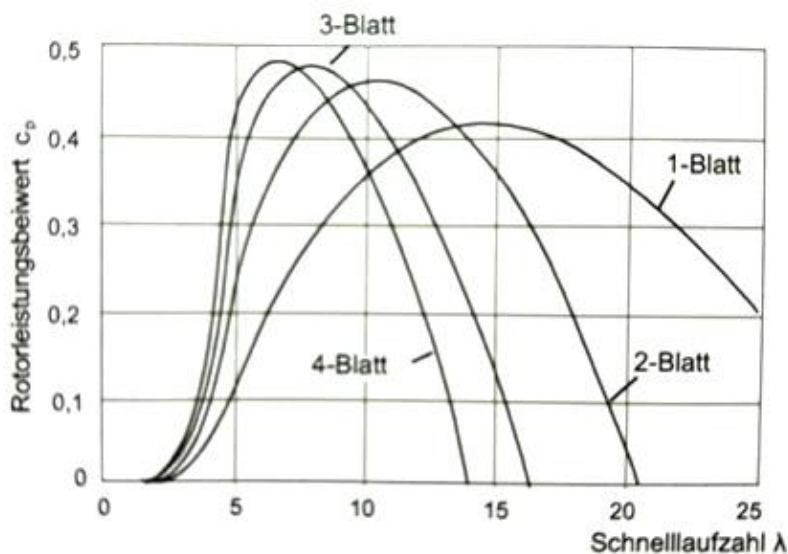


Abbildung 15: Rotorleistungsbeiwert zu Schnellaufzahl (Quelle: Arne Kusiek, 2022)

Die Profiltiefe eines Rotorblätters ist abhängig von der Schnellaufzahl λ . In der Abbildung (Abb. 16) sieht man, wie sich die Profiltiefe t mit der Anzahl Rotorblätler verändert. Bei Windturbinen mit einer kleineren Anzahl an Rotorblättern verkleinert sich die Profiltiefe. (Kusiek, 2022)

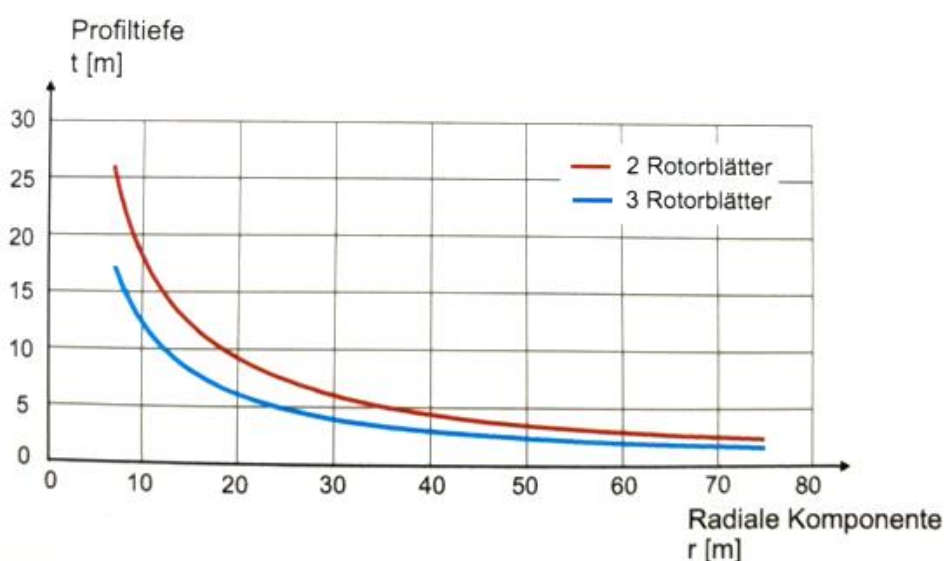


Abbildung 16: Profiltiefe zu Radiale Komponente (Quelle: Arne Kusiek, 2022)

Wasserturbinen

Turbinenarten

Es gibt viele verschiedene Wasserturbinenarten und jede wird in einem anderen Bereich eingesetzt. Auf dem Bild (Abb. 17) kann man sehen, dass die Fallhöhe ein wichtiges Kriterium ist.

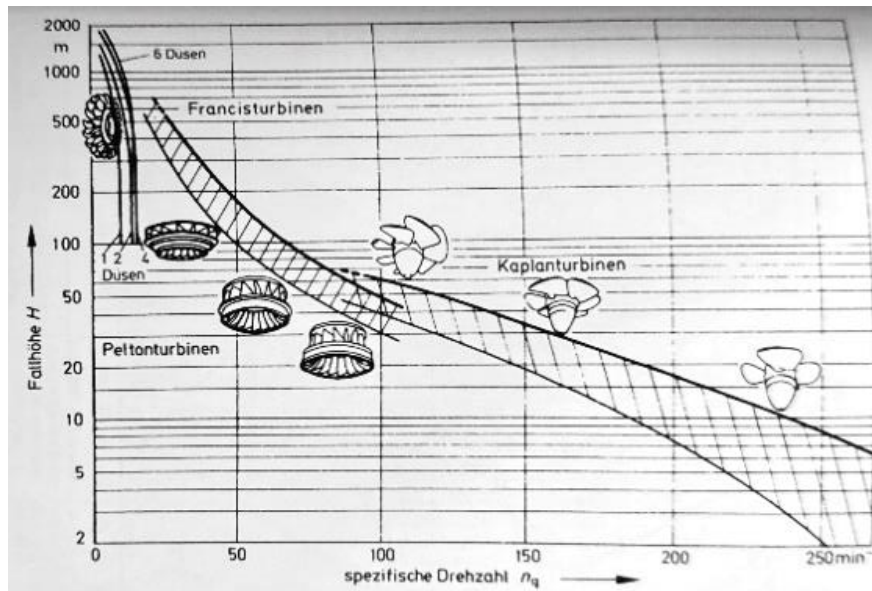


Abbildung 17: Wasserturbinentypen (Quelle: Wilfried J. Bartz, Hans-Joachim Mesenhöll, 2017)

Gleichdruckturbinen

Gleichdruckturbinen werden als solche bezeichnet, bei denen das Antriebswasser auf Umgebungsdruck stösst. Dadurch ist bei diesen der Reaktionsgrad Null.

Pelton turbine

Wird auch als Freistrahlturbine bezeichnet. Sie verwendet als kinetische Energie aufgestautes Wasser. Dieses trifft durch eine oder mehrere Düsen tangential auf die vielen Schaufeln des Wasserrades. Die Ablenkung beträgt fast 180 Grad, was eine sehr gute Kinetische Energieübertragung auf die Turbine verspricht. Diese eignet sich für grosse Fallhöhen, da diese von 20 bis 2000 Meter betragen können. Je grösser die Fallhöhe, desto grösser ist die kinetische Energie des Wasserstrahls. (Wasserkraftverband Deutschland, 2024)

Ossberger Turbine

Die Ossberger Turbine ist eine Durchströmturbine. Die Strömung fliesst durch das Rad und beschlägt dieses dadurch zweimal. Die Fallhöhen betragen von 2.5 bis zu 200 Metern. Sie ist in der Lage, bereits bei geringen Wasserströmen Energie zu liefern, wie auch bei schwankenden Wassermengen. (Ossberger, 2024)

Überdruckturbinen

Francisturbine

Die Francisturbine ist von den Wasserturbinen der am meisten verwendete Turbinentyp. Die Turbine wird von aussen nach innen durchströmt und wird bei Fallhöhen von circa 20 bis 700 Meter verwendet. (Bayerische Landeskraftwerke GmbH, 2024)

Kaplanurbine

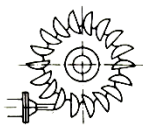

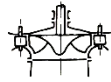
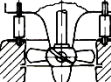
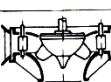
Diese Turbine wird von oben nach unten mit Wasser durchströmt. Die Lauf- und Leitrad-schaufeln sind verstellbar und dadurch für Wassermenge und Fallhöhe anpassbar. Da sie auch bei geringen Fallhöhen und schwankenden Durchflussmengen arbeiten, werden sie bei Flusskraftwerken eingesetzt. (VERBUND , 2024)

Dériazurbine

Sie wird als Diagonalturbine bezeichnet und wird bei Kleinkraftwerken mit Fallhöhen bis zu 80 Meter eingesetzt. Die tragflügelartigen Schaufeln sind meist verstellbar, was der Turbine zu einem hohen Wirkungsgrad verhilft. Sie funktioniert das ganze Jahr hindurch auch mit unterschiedlichen Wassermassen. Die Durchströmung erfolgt von aussen diagonal nach innen. Sie ist kavitationsunempfindlich, was bei Pumpen sehr vorteilhaft ist. (Geppert Hydro GmbH, 2024)

Auf den folgenden zwei Bilder (Abb. 18 + 19) kann man die Wirkungsweise und die Bauform der verschiedenen Wasserturbinen sehen.

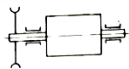
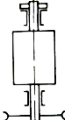
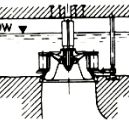
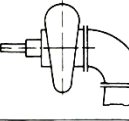
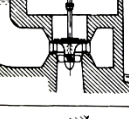
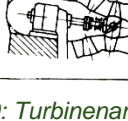
Tabelle 1.1: Einteilung der Wasserturbinen nach der Wirkungsweise (s.DIN 4320)

Gleichdruckturbinen			
gemeinsame Eigenschaften: Laufrad druckfrei durchströmt und teilbeaufschlagt			
Bezeichnung	Bild	Laufrad	Leitvorrichtung
Freistrahlturbine (Pelton-turbine)		Mit zahlreichen Doppelbechern besetzt, tangential angeströmt, nicht regelbar	1 bis 6 regelbare Nadeldüsen, Strahl-ableiter
Durchstrom-turbine, z.B. Ossberger-Turbine		Trommelförmiges, längliches Radialrad mit einfach gekrümmten Schaufeln. Die Strömung beaufschlagt 2mal die Schaufeln beim Durchgang durchs Rad	Eine oder mehrere Leitschaufeln
Überdruckturbinen			
gemeinsame Eigenschaften: Druck am Laufradeintritt größer als am Laufradaustritt. Laufrad voll beaufschlagt			
Bezeichnung	Bild	Laufrad	Leitvorrichtung
Francisturbine		einfach oder doppelt gekrümmte Radial-schaufeln. Von außen nach innen durchströmt. Nicht regelbar	regelbare, radiale Leitschaufeln
Kaplanurbine		Tragflügelartige Lauf-schaufelprofile. Axial durchströmt. Lauf-schaufeln verstellbar	regelbare, radiale oder axiale Leitschaufeln
Diagonal-turbine, z.B. Dériazurbine		Tragflügelartige Schaufeln, meist verstellbar. Durchströmung diagonal von außen nach innen	radiale oder diagonale, regelbare Leitschaufeln

Bohl

Abbildung 18: Turbinenarten 1/2 (Quelle: Wilfried J. Bartz, Hans-Joachim Mesenholl, 2017)

Tabelle 1.2: Einteilung der Wasserturbinen nach der Bauweise

Merkmal	Bild	Kurzbeschreibung
Wellenlage		Wellenlage horizontal bei Freistrahlturbinen bis 2 Düsen bei Einradturbinen, bis 4 Düsen bei Zwillingsturbinen
		Wellenlage vertikal bei Freistrahlturbinen mit mehr als 2 Düsen
Wasser-zuführung		Schachtturbinen bei kleinen Leistungen als Francis- oder Kaplanurbine Wasser strömt direkt aus einem Schacht in den Leitapparat
		Spiralturbinen Francis- und Kaplanurbine mit größeren Fallhöhen Wasser strömt in einer Blech- (oder Guß-) Spirale mit Kreisquerschnitten zum Leitrad
		Turbinen mit Betonspirale Kaplanurbine mit vertikaler Welle bei kleineren Fallhöhen
		Rohrturbinen Kaplanurbine kleinerer und mittlerer Leistung mit schräger oder horizontaler Wellenlage

Bohl

Abbildung 19: Turbinenarten 2/2 (Quelle: Wilfried J. Bartz, Hans-Joachim Mesenholl, 2017)

Die Physik dahinter

Impulsprinzip (Aktionsprinzip)

Bei Impulsturbinen (wie z.B. Pelton-Turbinen) wird die Energie durch den Impuls des Wasserstrahls auf die Turbinenschaufeln übertragen. Das strömende Wasser trifft mit hoher Geschwindigkeit auf die Schaufeln und gibt dabei seine Bewegungsenergie an die Turbine ab, was sie in Rotation versetzt. Hierbei ist die Geschwindigkeit des Wassers entscheidend (Abb. 20).

Reaktionsprinzip

Beim Reaktionsprinzip wird der Höhenunterschied ausgenutzt. Die Turbine wird in diesem Fall von dem Wasserdruck angetrieben. Als Beispiel kann man einen Rasensprenger herbeiziehen, welcher sich durch den Druck in Bewegung setzt. (gunt.de, 2024)


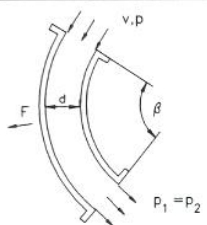

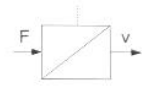
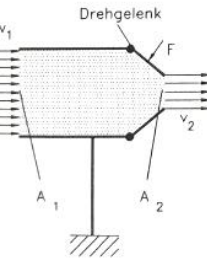

Impuls			
$\oint \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \sum \vec{F}$			
Elementarfunktion	Prinzipskizze	Gesetz	Technische Anwendung / Bemerkungen
		<p>Wenn reibungsfrei: $F = \frac{\pi d^2}{2} (p + \rho v^2) \sin(\beta/2)$</p>	Turbine
			
		<p>$v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2}$ (Für $\rho = \text{konstant}$)</p>	Kreiselpumpe, Seitenkanalpumpe, Verdichter
			

Abbildung 20: Impulsprinzip (Rudolf Koller, Norbert Kastrup, 1998)

Energieproduktion von Wasserkraftanlagen

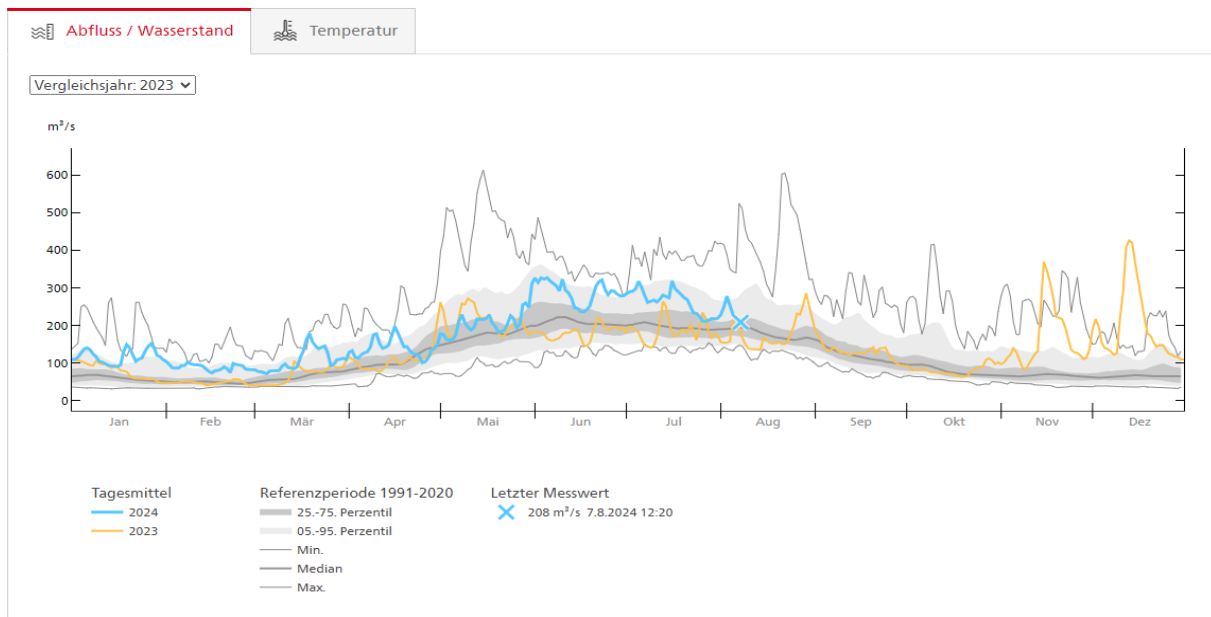


Abbildung 21: Abfluss und Wasserstand Aare-Bern, Schönau <https://www.hydrodaten.admin.ch/de/seen-und-fluesse/stationen-und-daten/2135#waterlevel-annual>

Das nutzbare Arbeitsvermögen eines Gewässers in Form von Wasser ist abhängig von der nutzbaren Wassermenge und dem Nutzgefälle. Wegen klimatischen und meteorologischen Gegebenheiten schwanken diese. Gerade in der Schweiz sind zwischen Sommer und Winter grosse Unterschiede feststellbar. So ist bei Betrachtung der Messwerte einer Messstation der Aare ersichtlich, dass der Median der Wassermenge über den Zeitraum 1991-2020 im Juni seinen Höhepunkt von 223 m³/s hat und im Februar seinen Tiefststand von 44 m³/s (Abb.21). (Palfy, 2017)

Ausnutzbares Gefälle

Wasserturbinen transformieren fluidmechanische Energie in mechanische um. Um gleichmässige mechanische Energie zu erhalten, wird normalerweise eine geordnete Strömung eingesetzt. Die Masse der Strömung in kg wird bei Turbineneintritt (E_E) in mWs und bei Austritt (E_A) auch in mWs angegeben. E_E ist durch auftretende Verluste immer kleiner als (E_A). Die Gesamtenergien (E_E) bei Ein- und Austritt können als Druck- Kinetische- und Lageenergie bestehen. Es müssen aber nicht alle diese Energien gleichzeitig auftreten. Die Turbine in dieser Situation entnimmt als Gesamtenergie das «ausgenützte Gefälle». (Palfy, 2017)

Energieumwandlung in der Turbine

Eine Wasserturbine funktioniert gegenteilig einer Pumpe. Hierbei wird die fluidmechanische Energie in mechanische Energie (Rotation) umgewandelt.

Kavitation

In der Strömung durch die Turbine sinkt der statische Innendruck ab, so dass dieser Dampfdruck erreicht. Dadurch wird die Strömung mit Dampfblasen angereichert. Gelangen sie in einen Bereich mit höherem Druck, implodieren diese. Dadurch können an diesen Stellen Drucke über mehrere 1000 Bar entstehen, was schlussendlich Bestandteile der Turbine beschädigt. Da kein Werkstoff existiert, welcher der Kavitation auf Dauer standhält, ist es wichtig, die Kavitation so gering wie möglich zu halten.

Geeignete Standorte

Windkraft

Die besten Standorte für eine Windturbine sind grundsätzlich dort, wo der Wind am meisten und am stärksten weht. Man kann sagen, dass der Wind stärker ist, je höher man geht. Dies gilt für die Höhe über Grund (Abb. 22) sowie auch für höhere Lagen wie z.B. in Bergregionen. Die Windgeschwindigkeit ist jedoch nicht nur von der Höhe über Grund oder Höhenlage abhängig, sondern es gibt noch andere Einflussfaktoren, welche die Windgeschwindigkeit beeinflussen können. Zum einen muss die Bodenbeschaffenheit / Rauheit berücksichtigt werden und zum anderen auch die Umgebung. Es macht z.B. einen Unterschied, ob der Wind über ein landwirtschaftliches Gelände bei einem Dorf zieht oder durch eine Grossstadt mit hohen Gebäuden. Moderne Windkraftanlagen nutzen den Wind in einer Höhe bis über 200 Meter. Für unser Projekt können wir sagen, dass die Windbedingungen nicht optimal sind, da unsere mobile Windturbine nicht weit über dem Boden aufgestellt wird. Wir versuchen jedoch, die dort vorhandene Windenergie effizient anzuzapfen und können somit die für unsere Anforderung benötigte Energie bereitstellen. Es gibt noch anzumerken, dass die Dichte der Luft nicht immer und überall gleich ist. Sie hängt von der Höhenlage, der Temperatur und auch von der Feuchtigkeit ab. Die Standardluftdichte wird mit $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ bei 15°C , Meereshöhe, normalem Druck und trockener Luft) angenommen. Da wir den häufigsten Einsatz in den Bergen sehen, nehmen wir für die Luftdichte $\rho = 1 \text{ kg/m}^3$ an. Diesen Wert nehmen wir folgend immer an, wenn es um die Luftdichte geht. (Kusiek, 2022)

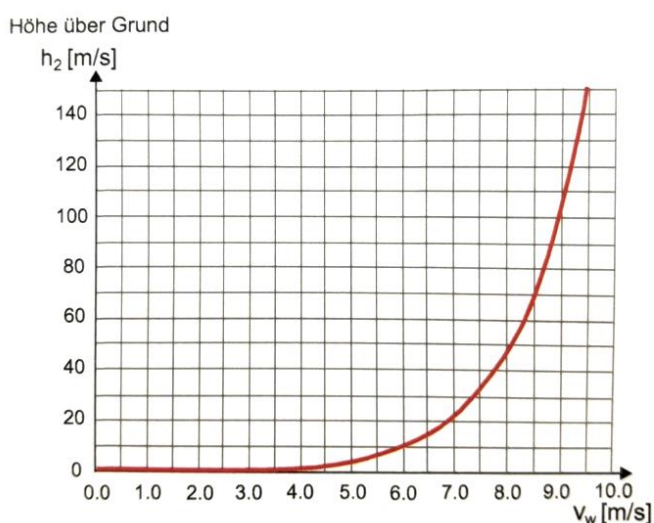


Abbildung 22: Geschwindigkeit zu Höhe über Grund (Quelle: Arne Kusiek, 2022)

Referenzgebiet

Auf der Website Global Wind Atlas findet man Winddaten für die ganze Welt. Auf der Karte können die gewünschten Gebiete angeschaut und die Daten dazu abgelesen werden (die niedrigste wählbare Höhe beträgt 10 Meter). Die Auswahl fällt in unserem Fall auf den Kanton Bern. Dieser verfügt über viel Wind, genügend Gewässer und auch über hohe Berge. Bern ist ausserdem ein sehr beliebter Ort für Leute, welche den Rückzug in die Natur suchen. Um uns auf einen Wert festlegen zu können, mussten wir eine Annahme treffen, denn die Winddaten beziehen sich hier auf den gesamten Kanton Bern (Abb. 23). Da wir aber davon ausgehen, dass wir die Turbine mehrheitlich oberhalb der Baumgrenze, also ca. über 2000 m ü. M. einsetzen werden, können wir nicht einfach die mittlere Windgeschwindigkeit für den gesamten Kanton nehmen. Denn je höher man geht, desto grösser werden auch die mittlere Windgeschwindigkeiten. (Global Wind Atlas, 2024)

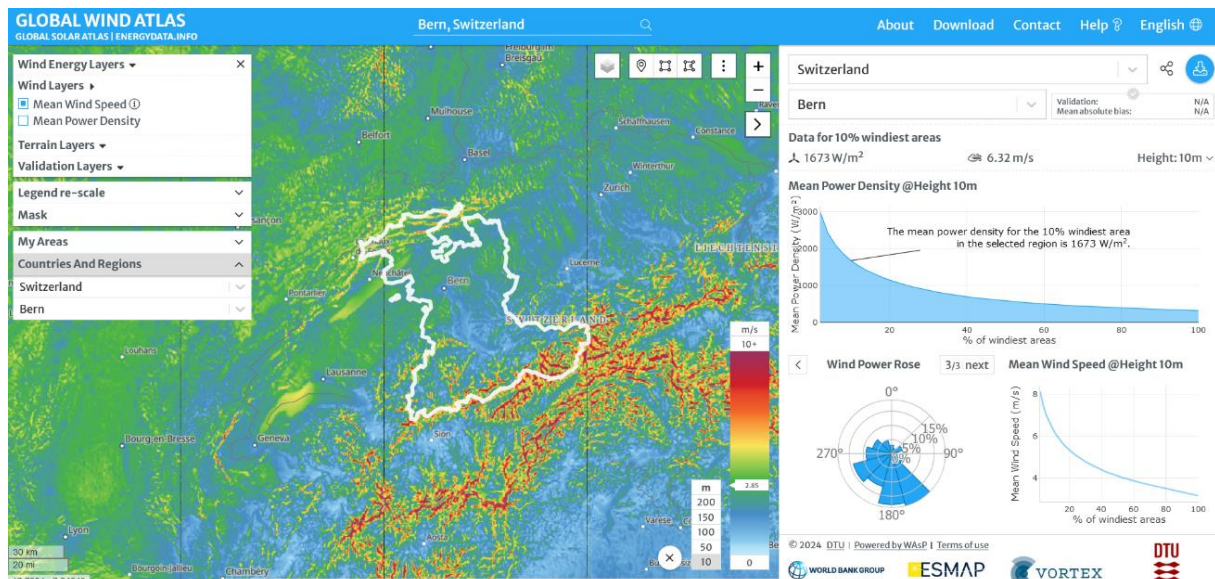


Abbildung 23: Windverhältnisse Kanton Bern (Quelle: <https://globalwindatlas.info/en>)

Zur Kontrolle haben wir auf der Windkarte an Orten über 2000 m ü. M. punktuell die mittlere Windgeschwindigkeit entnommen. Die Messwerte liegen ungefähr zwischen 4 und 7 m/s bei zehn Meter über Grund. Deshalb haben wir uns entschieden, die Werte für die 10% windigsten Regionen im Kanton Bern zu nehmen (Abb. 25). Diese betragen auf der Höhe von 10 Meter 6.32m/s. Da sich dieser Wert auf einer Höhe von zehn Meter über Grund bezieht, runden wir den Wert auf 6 m/s ab. Der Wert dient lediglich als Richtwert, da wir die Turbine an verschiedenen Standorten einsetzen. Um genaue Daten zu erhalten, müsste man natürlich vor Ort über einen längeren Zeitraum Messungen mit einem Anemometer durchführen. Die maximale Windgeschwindigkeit, bei welcher wir die Windturbine noch einsetzen, legen wir bei 14m/s fest, also 50.4km/h. Hier liegen wir im Beaufortgrad schon bei der Windstärke 7. Ab Windstärke 8 oder 17.2 m/s weht schon ein stürmischer Wind, der Zweige von Bäumen brechen kann. Deshalb haben wir entschieden, den Einsatzbereich nur bis zur Windstärke 7 auszulegen. Im Bild (Abb. 24) sieht man einen Auszug der Windstärketabelle (Beaufortgrade). Die Windstärken gehen von Grad 1 – 17. In diesem Auszug geht die Auflistung nur bis Windstärke 9.

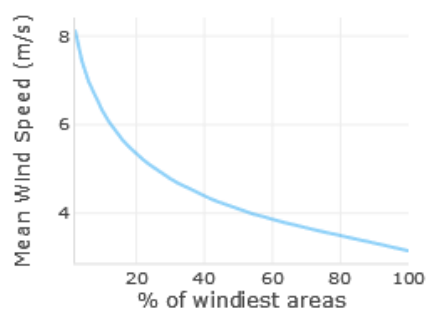


Abbildung 25: Mittlere Windgeschwindigkeiten (Quelle: <https://globalwindatlas.info/en>)

$ v_0 $ in m/s	Windstärke in Bg	Bezeichnung	Auswirkungen
0 - 0,2	0	Windstille	Der Rauch steigt gerade empor.
0,3 - 1,5	1	leichter Zug	Der Rauch zeigt Wind an.
1,6 - 3,3	2	leichte Brise	Die Windfahne bewegt sich.
3,4 - 5,4	3	schwache Brise	Der Wind streckt Wimpel.
5,5 - 7,9	4	mäßige Brise	dünne Äste in Bewegung
8,0 - 10,7	5	frische Brise	kleine Bäume in Bewegung
10,8 - 13,8	6	starker Wind	starke Äste in Bewegung
13,9 - 17,1	7	steifer Wind	ganze Bäume in Bewegung
17,2 - 20,7	8	stürmischer Wind	Der Wind bricht Zweige.
20,8 - 24,4	9	Sturm	Schäden am Haus

Abbildung 24: Windstärketabelle (Quelle: Arne Kusiek, 2022)

Auf dem Global Windatlas hat man die Möglichkeit, auch konkretere Daten über eine gewünschte Region zu erhalten. Für den Kanton Bern haben wir einige interessante Diagramme ausgewählt, die relevante Informationen zur Windverteilung in dieser Region liefern. Die Diagramme zeigen deutlich, dass die Windgeschwindigkeit sowohl im Tagesverlauf als auch über die verschiedenen Monate hinweg erheblichen Schwankungen unterliegt. Der Wind Speed Index zeigt die Windgeschwindigkeit im Vergleich zum langfristigen Durchschnittswert an. Der Wert 1 ist hierbei der Durchschnitt.

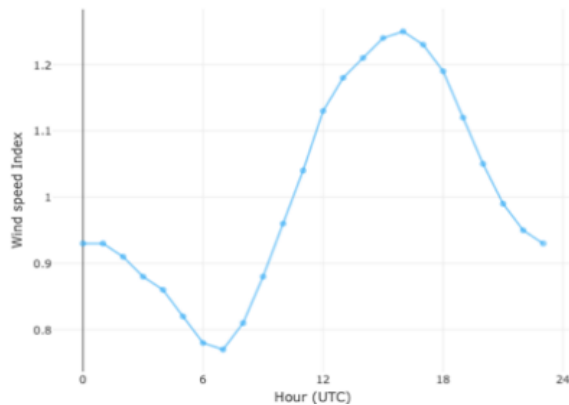


Abbildung 27: Windgeschwindigkeit Tagesverlauf
(Quelle: <https://globalwindatlas.info/en>)

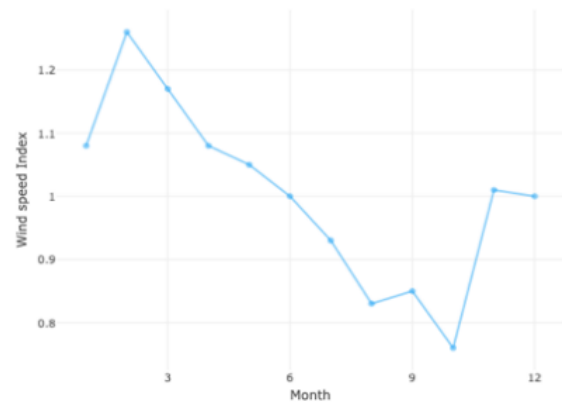


Abbildung 26: Windgeschwindigkeit Jahresverlauf
(Quelle: <https://globalwindatlas.info/en>)

Im oberen ersten Diagramm (Abb. 27) sieht man, dass sich die mittlere Windgeschwindigkeit im Tagesverlauf ab dem Morgen stetig erhöht und um 16 Uhr ihren Höhepunkt erreicht. Im zweiten Diagramm (Abb. 26) kann man erkennen, dass die mittlere Windgeschwindigkeit in den Monaten Januar bis Mai über dem Durchschnittswert liegt. Im Netzdiagramm (Abb. 28) sind die oberen beiden Diagramme kompakt in einem Diagramm kombiniert worden. Man stellt die grössten Ausschläge vor allem unten links fest. Also da, wo die Tagestemperatur im Verlauf des Tages am höchsten ist. Die Monate erkennt man anhand der jeweiligen Farben. Es gibt auch noch die Möglichkeit, Windrosen- Diagramme zu nutzen. Diese zeigen an, wie häufig oder wie schnell der Wind von welcher Richtung bläst. (Global Wind Atlas, 2024)

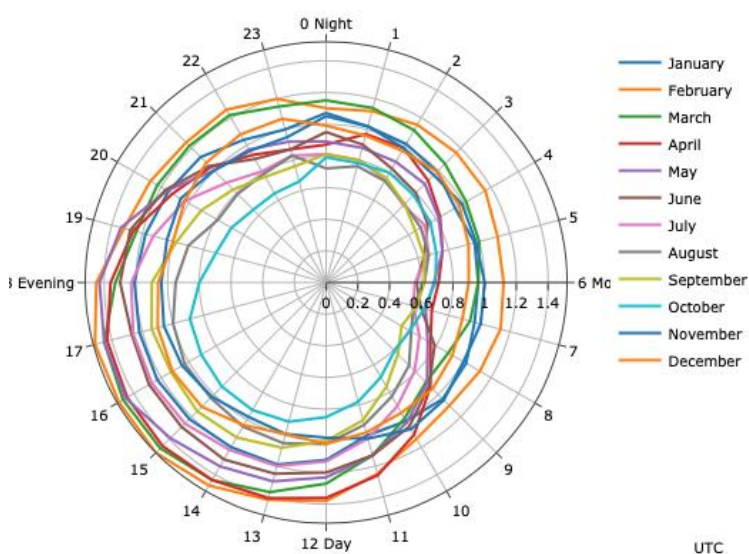
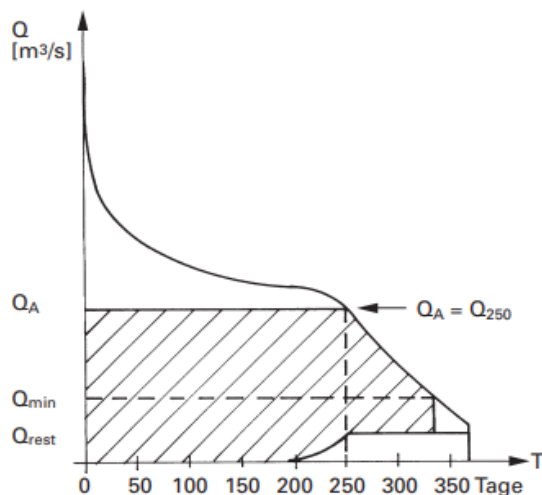


Abbildung 28: Netzdiagramm über 24h und Jahr (Quelle: <https://globalwindatlas.info/en>)

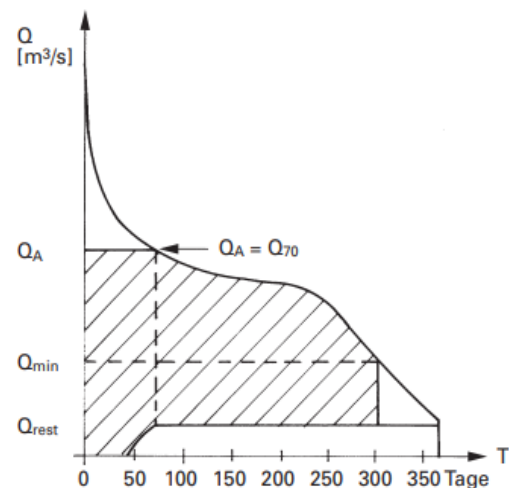
Wasserkraft

Da für die Energiegewinnung durch Wasser verschiedene Turbinenarten zur Verfügung stehen, sind die Anforderungen daher unterschiedlich. Bei Überdruckturbinen, wie die Franzis-, Kaplan- oder die Diagonalturbine, ist das gesamte Gefälle zwischen Ober- und Unterwasser wichtig. Bei Niederdruckanlagen hingegen kann der Unterwasserspiegel bei grossen Wassermengen stark ansteigen. Dies beeinflusst das Nutzgefälle. Vorgegeben ist die **Mindestrestwassermenge (Q_{rest})**, welche im Gewässer nach Wasserabnahme noch existieren muss. Dargestellt wird diese mittels Q_{347} , welche die über 10 Jahre durchschnittlich gemessene Abflussmenge, während 347 Tagen ist. Um die für die Turbine erlaubte **Nutzwassermenge Q** zu errechnen, muss die **Restwassermenge (Q_{rest})** von der **Zuflussmenge im Fließgewässer (Q_B)** abgezogen werden ($Q=Q_B-Q_{rest}$). Durch diese kann die **Ausbauwassermenge (Q_A)** definiert werden. Mit Q_A können die Energieproduktion und die Anlagekosten berechnet werden. Von diesen Regeln kann aber abgesehen werden, da wir nur eine ganz kleine Anlage verwenden, welche nicht fest installiert wird. Da diese möglichst mobil sein muss, sehen wir von einem Kanal ab. Deshalb ist für uns vor allem die Strömungsgeschwindigkeit relevant. Auf den unteren Bildern (Abb. 29 + 30) sieht man die unterschiedliche Wassermenge in den beiden Betriebsarten. (Hotz-Hart, 2024)



1) Inselbetrieb

Abbildung 29: Wassermenge Parallelbetrieb (Quelle: Hotz-Hart, 2024)



2) Parallelbetrieb

Abbildung 30: Wassermenge Inselbetrieb (Quelle: Hotz-Hart, 2024)

Referenzgebiet

Auch für die Wasserkraftnutzung brauchen wir Referenzdaten, mit denen wir im weiteren Verlauf unserer Arbeit rechnen können. Es hat sich als schwierig erwiesen, an Daten von Bergbächen zu kommen, welche wir miteinfließen lassen können. Auf den Schweizer Bundesseiten fanden wir hauptsächlich Daten und Werte zu grösseren Flüssen in tieferen Höhenlagen. Da wir, wie bereits erwähnt, mehrheitlich von einer Einsatzhöhe von über 2000 m ü. M. ausgehen, können wir diese nicht verwenden. Für einen Richtwert der Strömungsgeschwindigkeit von Bergbächen haben wir uns entschieden, chatgpt zu fragen:

Welche Fliessgeschwindigkeit kann in Bergbächen über 2000 m ü. M. angenommen werden?

Langsame bis mittlere Fließgeschwindigkeit (Abb. 33): In Bereichen mit moderatem Gefälle oder breiteren Bachbetten beträgt die Fließgeschwindigkeit etwa 0,5 bis 1,5 m/s. Dies ist typisch für flachere oder weniger steil abfallende Abschnitte.

Höhere Fließgeschwindigkeit (Abb. 32): In steileren Abschnitten oder bei engen, stark geneigten Flussbetten kann die Geschwindigkeit bei 1,5 bis 3 m/s liegen. Dies ist häufiger in Gebirgsregionen mit steileren Hängen und schnellem Wasserfluss der Fall.

Sehr hohe Fließgeschwindigkeit (Abb. 31): In extrem steilen Abschnitten, wie in kleinen Wasserfällen oder Stromschnellen, kann die Fließgeschwindigkeit über 3 m/s erreichen.



Abbildung 33: Flaches Gefälle (Quelle: Eigene Abbildung)



Abbildung 32: Mittleres Gefälle (Quelle: Eigene Abbildung)



Abbildung 31: Hohes Gefälle (Quelle: Eigene Abbildung)

Wir haben uns als Referenzwert für eine mittlere Wasserfließgeschwindigkeit von 2 m/s und eine maximale Fließgeschwindigkeit von 4m/s entschieden. Es gibt Möglichkeiten, wie man vor Ort die Fließgeschwindigkeit eines Baches messen kann. Die einfachste Methode wäre die Oberflächenmessung mithilfe eines treibenden Objekts. Oder man führt Messungen mit speziellen Messgeräten durch, wie z.B. einem Flügelrad-Strömungsmesser, welches die Strömungsgeschwindigkeit in unterschiedlichen Tiefen misst.

Auf den Bildern sieht man gut, dass es grosse Unterschiede bei Bergbächen gibt. Die Fließgeschwindigkeit eines Baches variiert je nach Gefälle und Strömungsvolumen. Im Frühjahr, wenn die Schneeschmelze einsetzt, haben wir beispielsweise ein grosses Strömungsvolumen. Je nach Bach oder Stelle, wo man die Turbine hineinlegt, haben wir sehr unterschiedliche Fallhöhen. Da unsere Turbine möglichst kompakt gebaut wird, also ohne Ansaugrohr, haben wir eine kurze axiale Länge, welche dementsprechend auch eine sehr kleine Fallhöhe ergibt. Die Fallhöhen bewegen sich im Bereich von 0.01m bis etwa 2m. Am häufigsten trifft man jedoch geeignete Stellen mit einer Fallhöhe von etwa 0.3m an. Deshalb legen wir die Referenzfallhöhe auf 0.3m fest.

Einsatzgebiet unserer Turbine

Um unsere Turbine zu berechnen und zu konstruieren, müssen wir zuerst wissen, wo diese eingesetzt wird. Erst dann können wir sie möglichst den Bedingungen beim Einsatzort anpassen und somit zumindest theoretisch die besten Resultate erzielen. Um die technischen Anforderungen festzulegen, muss ein Ort definiert werden, wo das Produkt am meisten eingesetzt wird. Es sind verschiedene Faktoren für das Einsatzgebiet zu berücksichtigen. Da sich die Kombination aus Wind- und Wasserturbine bestens für die Energieunabhängigkeit in den Bergen eignet und wir uns selbst auch gerne dort aufhalten, muss es deshalb ein attraktiver Ort zum Campen/Biwakieren sein. Auch muss dieser Ort über möglichst viel Wind

und fliessendes Wasser verfügen. Der Ort nach Attraktivität zu bestimmen, gestaltet sich als nicht einfach. In der Schweiz sind die Regeln beispielsweise zum Wildcampen sehr unterschiedlich und viele Kantone sind beliebt zum Wandern und zum Zelten. Da unsere Turbine wahrscheinlich am häufigsten während des Wildcampens zum Einsatz kommt, beeinflussen die Regeln des Wildcampens schlussendlich auch die Bedingungen.

Regeln, welche für das Wildcampen in der Schweiz grundsätzlich gelten:

- Einzelne Übernachtungen (nicht in Gruppen): Biwakieren oder Übernachten im kleinen Zelt **im Gebirge, oberhalb der Waldgrenze** (bei mehreren Übernachtungen tagsüber das Zelt wieder abbauen)
- Auf Privatgrundstücken mit Erlaubnis des Grundstückbesitzers
- Not-Biwakieren
- **Wichtig:** Informieren Sie sich über die Wetterlage und achten Sie auf mögliche Naturgefahren (TCS, 2024)

Da ausser einem Notfall nur oberhalb der Baumgrenze biwakiert werden darf, nehmen wir auch die dort vorhandenen Parameter für die Wasser- und Windkraft.

Festlegung der Referenzparameter

Wir haben die Referenzgeschwindigkeiten für die beiden Fluide festgelegt, die in den Einsatzgebieten unserer Turbine vorkommen. Diese brauchen wir, um eine Referenz in der Entwicklung und Konstruktion unserer Turbine zu haben, mit der wir im Normalbetrieb rechnen. Die Wind- und Fliessgeschwindigkeiten beeinflussen massgeblich die Dimensionen und Geometrien der beiden Rotoren.

Referenzwerte:	m/s
Mittlere Windgeschwindigkeit	6
Mittlere Fliessgeschwindigkeit	2

Tabelle 2: Referenzwerte

Es ist festzuhalten, dass es sich bei diesen Werten um die Strömungsgeschwindigkeiten handelt, welche wir in unserem ausgesuchten Gebiet (Kanton Bern) im Mittel erwarten können. Die Turbine kann und soll auch mit anderen Strömungsgeschwindigkeiten klarkommen und dabei Strom erzeugen. Bei der Entwicklung ist jedoch wichtig, die maximal erlaubte Drehzahl des Generators zu berücksichtigen, welche im Zusammenhang mit den maximalen Windgeschwindigkeiten vor Ort stehen. Die zu erwartenden maximalen Strömungsgeschwindigkeiten sind in der folgenden Tabelle festgehalten:

Referenzwerte:	m/s
Maximale Windgeschwindigkeit	14
Maximale Fliessgeschwindigkeit	4

Tabelle 3: Maximale Referenzwerte

Unsere Idee

Da wir unterwegs in der Natur möglichst unabhängig sein wollen, was die Energieversorgung betrifft, dachten wir, dass es am besten wäre, nicht nur von einer Energiequelle abhängig zu sein. Weil kleine und effiziente Solarpanels schon relativ günstig erhältlich sind, ist es ein logischer Schritt, auch noch die Wind- und Wasserkraft abzudecken und anzuzapfen. Wenn regelmässig elektrischer Strom benötigt wird (wie beispielsweise beim Fotografieren oder beim Betreiben verschiedener Geräte) kommt man mit der Ladung einer Powerbank schnell ans Limit, insbesondere, wenn man mehrere Tage keine Lademöglichkeit hat. Unter Umständen kann dies auch gefährlich werden, wenn man in eine Notsituation gerät und keine Möglichkeit hat, die Rettung zu alarmieren. Ausserdem funktioniert in der Nacht oder bei schlechtem Wetter das Solarpanel nicht oder nur bedingt. Damit wir für dieses Vorhaben aber nicht zwei Geräte mitnehmen müssen, dachten wir, es wäre das Beste, wenn wir die beiden Turbinentypen kombinieren könnten. Natürlich war uns klar, dass wir nicht ein gleich effizientes Resultat erhalten, wie wenn wir die beiden Turbinen separat auslegen würden. Wir mussten in diesem Fall Kompromisse eingehen, was folglich bedeutete, dass wir mit Leistungseinbussen rechnen müssen. In diesem Projekt setzen wir aber die Prioritäten anders, wie es bei einer herkömmlichen, statischen Wind- oder Wasserturbine gemacht werden würde.

Einsatzmöglichkeiten und Aktivitäten

Zu den verschiedenen Aktivitäten, für die man die Turbine einsetzen kann, gehören praktisch alle, bei denen man sich draussen aufhält: beim Wandern, Campieren, Strandferien, Fernreisen, Fahrrad- oder auf Bootstouren. Ferner können wir uns auch vorstellen, dass die Turbine auf Forschungsreisen oder in Katastrophengebieten hilfreich sein könnte. Wenn man nicht unterwegs ist, kann man die Turbine auch einfach im eigenen Garten oder auf der Terrasse betreiben.

Umgebungen und Bedingungen

Da die Turbine offensichtlich für den Ausseneinsatz gemacht wird, soll sie auch dementsprechend ausgelegt werden. Die Bedingungen sind sehr vielseitig und hängen von der Umgebung, Jahreszeit, Höhenlage und dem Wetter ab. Im Sommer knacken die Temperaturen im Flachland schnell einmal die 30°C Grenze und im Winter sinken sie vor allem in den Bergen oft auf bis zu -20°C. Dazu kommt noch die direkte Sonneneinstrahlung, welche die Oberflächen von Gegenständen extrem aufwärmen kann. Geräte und Materialien müssen solch unterschiedliche Temperaturen aushalten können, wenn sie für den Aussenbereich eingesetzt werden. Ausserdem kann es feucht oder trocken sein und es kann je nachdem regnen, schneien und auch gefrieren. Bei Aussenaktivitäten wie beim Wandern, ist man oft in steinigem und kargem Gebiet unterwegs, wo das Gelände uneben und hart ist. Da kann es schnell einmal passieren, dass etwas runterfällt und kaputt geht. Deshalb müssen auch Vorkehrungen für diese Fälle getroffen werden. Es ist deshalb wichtig, die verschiedenen Bedingungen und Umgebungen, in dem die Turbine eingesetzt wird, zu berücksichtigen und in die Entwicklung einfließen zu lassen.

Energiewandlung

Um das grundlegende Prinzip unserer Turbine vereinfacht darzustellen, bedienen wir uns einer Blackbox-Darstellung (Abb. 34). Hierbei vernachlässigen wir, was im Inneren der Box geschieht und sehen nur was rein- und rauskommt. In unserem Fall wird mechanische Energie in elektrische Energie gewandelt. Im Grundsatz wandelt die Turbine lediglich vorhandene Energie in elektrisch nutzbare Energie um.

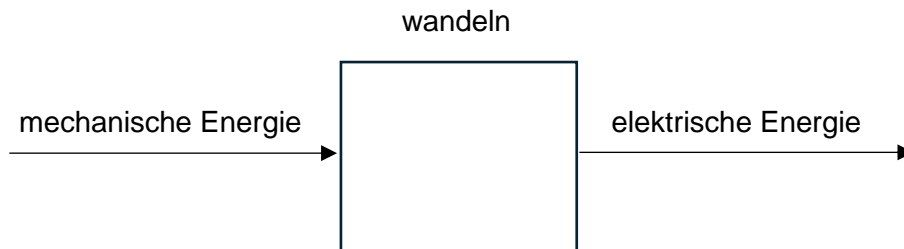


Abbildung 34: Energiewandlung

Präferenzmatrix

In der Präferenzmatrix (Tab.1) haben wir einige wichtige Punkte aufgelistet und gegeneinander abgewogen, um festzustellen, wo unsere Schwerpunkte liegen. Dies gibt uns mehr Übersicht und hilft uns bei der Entscheidungsfindung.

Wichtiger / als	Ausgangsspannung von 5 V	IP68 für Teile unter Wasser	Packmass nicht grösser als Rucksack	Stabile Halterungen für Turbinen	Luftfeuchtigkeit von 0-90%	Temperaturen von -20°C bis 45°C	Kosten von Max. 500 CHF	Einfache Montage	Wartungsmöglichkeiten	Summe	%
Ausgangsspannung von 5 V	1	0	0	0	1	1	0	1	1	4	11.11
IP68 für Teile unter Wasser	1	1	0	0	1	1	1	1	1	6	16.67
Packmass nicht grösser als Rucksack	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8	22.22
Stabile Halterungen für Turbinen	1	1	0	1	1	1	1	1	1	7	19.44
Luftfeuchtigkeit von 0-90%	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	2.78
Temperaturen von -20°C bis 45°C	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.00
Kosten von Max. 500 CHF	1	0	0	0	1	1	1	1	1	5	13.89
Einfache Montage	0	0	0	0	1	1	0	1	0	2	5.56
Wartungsmöglichkeiten	0	0	0	0	1	1	0	1	1	3	8.33

Tabelle 4: Präferenzenmatrix

Die verschiedenen in der Matrix aufgeführten Präferenzen haben wir gegeneinander abgewogen und die Wichtigkeit festgelegt. Das Packmass haben wir an die erste Stelle gesetzt. Ziel und Zweck ist es, dass die Turbine bei allen Ausflügen in die Natur mitgenommen wird. Daher sollte die Turbine nicht all zu gross und handlich sein. Sobald eine gewisse Grösse überschritten wird, kann die Turbine nicht mehr bequem transportiert werden und bleibt demzufolge zuhause. Bei der Auswahl der zweitwichtigsten Präferenz kamen wir auf die

Halterungen. Eine Turbine sollte in möglichst vielen Lagen und Situationen mühelos befestigt und genutzt werden können. An die dritte Stelle haben wir den IP68 Schutz zugewiesen. Dies ist notwendig, um den Wasserturbinaufsatz nutzen zu können, ansonsten würde das Projekt bei einer reinen Windturbine bleiben. Bleibt der Wind aus, so kann allenfalls ein fliessendes Gewässer genutzt werden. Für die Herstellung eines Prototyps haben wir ein Budget von 500 Franken als realistisch angenommen. An fünfter Stelle kommt schliesslich die gewünschte Ausgangsspannung von 5 Volt. Wie bereits erwähnt, sollte die Energiegewinnung je nach Möglichkeit entweder mit Wind oder Wasser erfolgen. Da es sich bei dieser Turbine um etwas Neuartiges handelt, können keine Erfahrungswerte von anderen Produkten übernommen werden. Wir stellten fest, etwas zu entwickeln, dass sich gleich von zu Beginn an in jedem Bereich bewährt, recht anspruchsvoll ist. Die Wartungsarbeiten haben wir auch nicht ausser Acht gelassen. Sollte die Turbine serienmässig für den Outdoormarkt erstellt werden, müsste sie systematisch und regelmässig geöffnet und auf den Zustand geprüft werden. Das Produkt sollte robust, anwenderfreundlich und wartungsarm sein. Die Montage oder Inbetriebnahme sollte zudem auch intuitiv, d.h. ohne schriftliche Anleitung möglich sein. Als selbstverständlich erachten wir, dass die Turbine bei grossen Temperatur- und unterschiedlichen Feuchtigkeitswerten absolut zuverlässig funktionieren sollte. Die Nutzung bei nur idealen Verhältnisse würde dazu führen, dass das Produkt keine grosse Akzeptanz erhalten würde. Auf diese Präferenzen legen wir im Moment keinen Wert, da diese erst bei einem sehr fortgeschrittenen Produkt zu tragen kommen und daher das korrekte Testen den Rahmen unserer Diplomarbeit sprengen würde.

Vorhandene Systeme

Um zu sehen, was schon entwickelt wurde, haben wir das Internet durchsucht und recherchiert. Auf dem Markt sind schon einige mobile Produkte vorhanden mit welchen die Wasserkraft oder Windkraft genutzt werden kann. Es sind Produkte die man zum Teil gut auf einen Ausflug oder zum Campieren mitnehmen kann. Man findet günstige und teurere Systeme, die man in Läden und Onlineshops kaufen kann. Ein Gerät, welches mit Wasser sowie auch im Wind betrieben kann, haben wir nur eines gefunden.

WaterLily und WindLily

Die WaterLily (Abb. 36) ist eine kleine Wasserturbine, mit der man 12Volt- und USB-Geräte aufladen kann. Die Turbine wird an einer geeigneten Stelle in einen Bach gelassen. Mit den integrierten Drähten wird die Turbine im Wasserstrom ausgerichtet und fixiert, sodass die Ausbeute der Wasserenergie möglichst am grössten ist. Die erzeugte elektrische Energie kommt durch ein Kabel an Land und kann dort dann genutzt werden. Die Hersteller haben auch ein Zubehör-Set entwickelt mit der die WaterLily zur WindLily (Abb. 35) umgebaut werden kann. Mit dem Zubehör-Set bekommt die Turbine einen Sockel und sechs Rotorblätter, welche den Wind schon bei niedrigen Geschwindigkeiten nutzen können. Die Water- und WindLily können somit bei Bedarf effizient im Wasser sowie auch im Wind eingesetzt werden. (earthtechproducts.com, 2024)



Abbildung 36: WaterLily Turbine (Quelle: www.earthtechproducts.com)



Abbildung 35: WindLily Turbine (Quelle: www.earthtechproducts.com)

Windturer

Die Windturbine «Windturer» (Abb. 38) ist eine Entwicklung von Adrian Cubas. Diese Windturbine hat vier Rotorblätter, lässt sich zusammenfalten und ist mit dem Volumen einer ca. 2-Liter PET-Flasche gut in einem Rucksack verstaubar (Abb. 37). Der Windturer erzeugt laut Cubas je nach Windgeschwindigkeit etwa 3 bis 15 Watt Leistung. Mit der erzeugten Energie lässt sich auf längeren Wanderungen ein Akku aufladen, auch wenn die Sonne mal nicht scheinen sollte. Mit der mitgelieferten Kurbel kann man den Generator im Notfall auch von Hand betreiben. Man findet auf der Website Instructables.com die Anleitung sowie auch die 3D-Teile, um die Turbine selbst zu drucken. (adriancubas, 2024)



Abbildung 38: Windturer



Abbildung 37: Windturer gefaltet

Skizzen

Die duale Verwendung eines Generators für Wind wie auch Wasser wirft einige Schwierigkeiten auf. Die Drehzahlen der Wasser- und die der Windturbine liegen weit auseinander. Der als Generator verwendete Elektromotor kann aber nicht ohne Weiteres einfach so umgestellt werden, um beiden Ansprüchen zu genügen. Demzufolge müssen die beiden Konstruktionen so dimensioniert werden, dass der Elektromotor möglichst für beide Varianten gut funktioniert. Weiter ist zu bedenken, dass die Turbine oder mindestens der Teil, welcher sich im Wasser befindet, diesem auch standhalten kann. Erfolgen kann dies durch IP 68 zertifizierte Komponenten. Diese sind aber im Normalfall sehr teuer und teils schwierig zu beschaffen. Alternativ können die Teile in einem von uns konstruierten wasserdichten Gehäuse platziert werden, was die Beschaffung von werksüblichen Teilen ermöglicht. Um die Abdichtung oder die Beschaffung von wasserdichten Teilen zu umgehen, haben wir uns überlegt, dass es auch möglich wäre, nur den Rotor der Kaplanturbine ins Wasser zu legen. Der Generator würde in diesem Fall durch eine flexible Welle (Abb. 39) verbunden und angetrieben werden. Da der Aufbau der Turbine so eher komplizierter wäre, haben wir uns dagegen entschieden. Denn eine flexible Welle hat ausserdem ein ordentliches Gewicht und obendrauf noch satte Verluste, die wir hierbei hinnehmen müssten.



Abbildung 39: Modell Turbine mit beweglicher Welle

Eine weitere Überlegung war, eine Art Wasserrad, statt Turbine zu benutzen. Dieses Rad würde dann nur teilweise in den Wasserstrom ragen und somit nur einen kleinen Teil der vorhandenen Energie nutzen. Die Rotorachse müsste senkrecht zur Fliessrichtung liegen, was das Stabilisieren des Geräts schwieriger macht, da die Kräfte des Wasserstroms radial auf die Welle wirken. Dieses Wasserrad ist auch schwieriger vor Ort zu installieren, wenn man bedenkt, dass bei Bergbächen das Ufer meist unförmig und steinig ist. Um unsere Idee in die Tat umsetzen zu können, tasten wir uns schrittweise heran und liessen uns von unterschiedlichen Geräten und Bauformen inspirieren. Wir haben unsere ersten Ideen

versucht, bildlich auf Skizzen sowie auch vereinfacht im CAD oder anderen Programmen darzustellen. Dies war sehr hilfreich, um sich die Funktion des Geräts besser vorstellen zu können. Auch Fehluberlegungen, welche man davor nicht bemerkt hatte, konnten so erkannt werden.

Windturbine

Bei der Windturbine stellte sich die grundlegende Frage, ob sich für die Kombiturbine eher eine horizontale oder eine vertikale Windturbine eignet.



Abbildung 42:
Windturbinenmodell

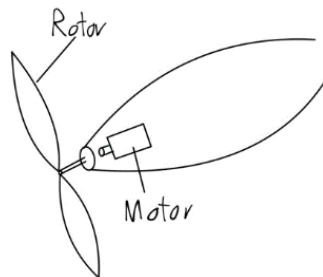


Abbildung 41: Skizze
Windturbine

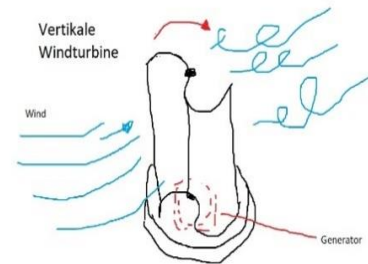


Abbildung 40: Vertikale Windturbine

Wasserrad

Das Wasserrad sticht durch seinen einfachen Aufbau vor. Die Rotationsachse wäre in diesem Fall senkrecht zur Strömung ausgerichtet.

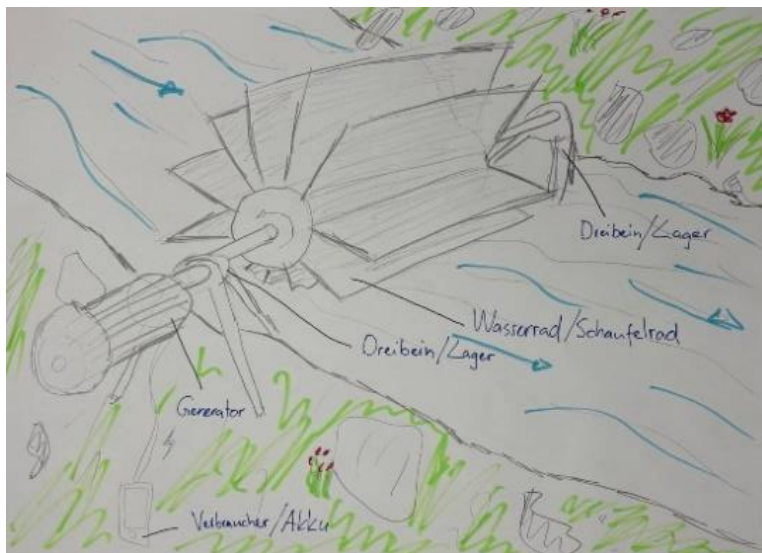


Abbildung 43: Skizze Wasserrad



Abbildung 44: Wasserrad

Wasserturbine

Die Wasserturbine wird vom Wasser durchstr6mt. Auch 6ber eine Variante mit flexibler Welle wurde nachgedacht. Die durchstr6mte Turbine wird mit Seilen in Position gebracht und gesichert.

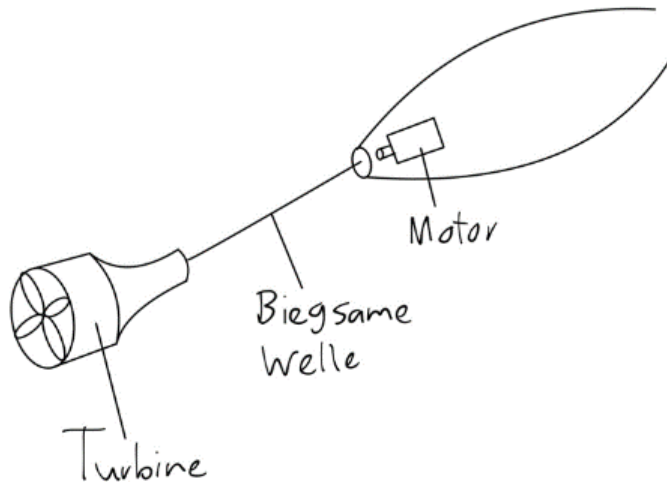


Abbildung 46: Skizze biegsame Welle

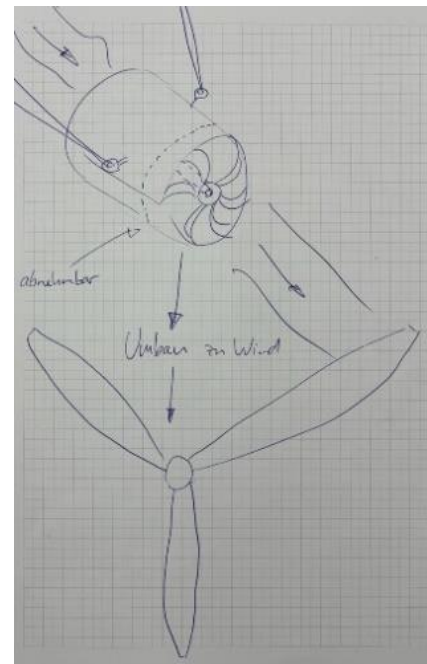


Abbildung 45: Skizze abnehmbare Module

Generator mit Energiebox

Die elektronischen Komponenten k6nnen in einer passenden Box untergebracht werden. Ein langes Aufladekabel erm6glicht Flexibilit6t beim Aufladen der Ger6te.

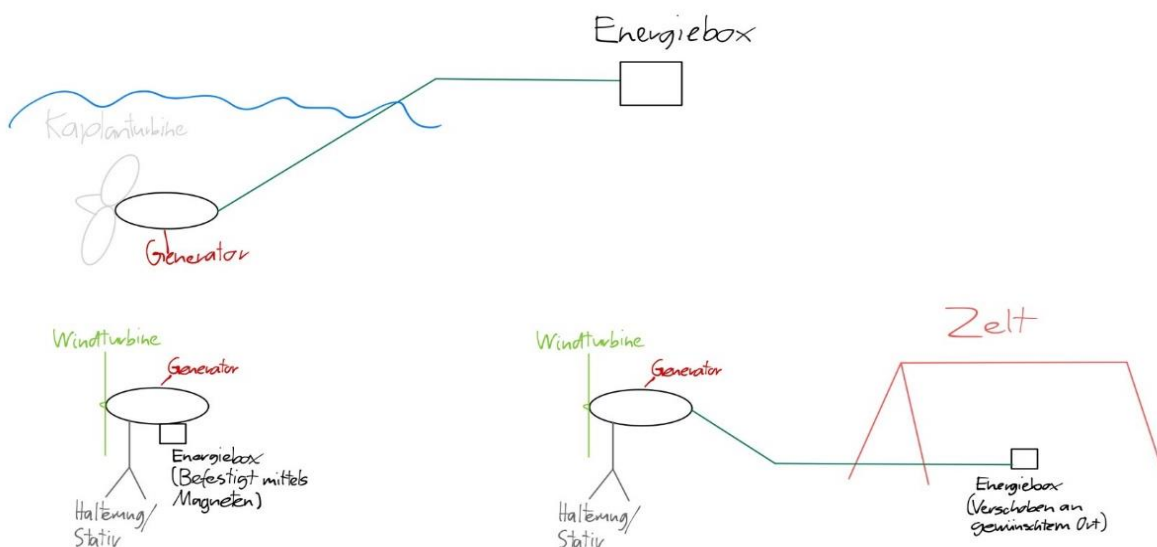
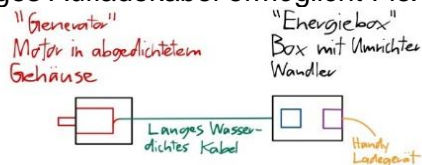


Abbildung 47: Skizze Turbine mit Energiebox

Umsetzung

Unterschied der beiden Fluide

Der Knackpunkt bei der Umsetzung unserer Idee sind die unterschiedlichen Eigenschaften der beiden Fluide. Die Turbine soll in beiden Fluiden betrieben werden können, was einen Kompromiss erfordert. Denn das Herzstück unserer Turbine, der Generator, bleibt in beiden Einsatzbereichen der gleiche. Wir müssen also schauen, dass der Generator in beiden Energiebereichen möglichst gut funktioniert. Denn die Dichte der beiden Stoffe sind sehr unterschiedlich:

Stoff	Dichte ρ bei 20°C
Luft	1 kg/ m ³
Luftfeuchte	1.204 kg/ m ³
Wasser	998 kg/ m ³

Tabelle 5: Stoffdichten

Referenzwerte:	m/s
Mittlere Windgeschwindigkeit	6
Mittlere Fliessgeschwindigkeit	2

Tabelle 6: Referenzwerte

Die Leistung eines Fluidstroms ergibt sich in Abhängigkeit der jeweiligen Dichte mit folgender Formel:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3$$

Im nachfolgenden Beispiel setzen wir die Leistung P der beiden Fluide gegenüber. Für den Vergleich nehmen wir für beide Fluide den gleichen Radius R = 0.5m und somit dieselbe Rotorfläche A an:

$$A = R^2 \cdot \pi$$

$$A = 0.5^2 m \cdot \pi = \mathbf{0.79m^2}$$

Eingesetzt mit unseren mittleren Referenzwerten für Wind- und Fliessgeschwindigkeit v ergeben sich mit dem Durchmesser D = 1.0m = 0.79m² folgende Resultate:

$$P_{Luft} = \frac{1}{2} \cdot 1kg/m^3 \cdot 0.79m^2 \cdot 6^3m/s = \mathbf{85.3W}$$

$$P_{Luftfeuchte} = \frac{1}{2} \cdot 1.204kg/m^3 \cdot 0.79m^2 \cdot 6^3m/s = \mathbf{102.7W}$$

$$P_{Wasser} = \frac{1}{2} \cdot 998kg/m^3 \cdot 0.79m^2 \cdot 2^3m/s = \mathbf{3153.7W}$$

Man sieht an diesem Beispiel, welche Leistung von dem jeweiligen Fluidstrom bereitgestellt wird. Bei gleichem Durchmesser und der jeweiligen Fliessgeschwindigkeit enthält der Wasserstrom um ein Vielfaches mehr Leistung als der Luftstrom. Deshalb müssen Windturbinen auch eine bestimmte Grösse haben, um genügend Energie erzeugen zu können. Dieser Vergleich macht deutlich, welche technischen Schwierigkeiten bestehen, wenn wir mit einem Generator beide Fluide für die Energieerzeugung nutzen wollen.

In unserem Fall generiert eine Wasserturbine mit dem Durchmesser von 0.2 Metern 119.8 Watt. Eine Windturbine mit dem gleichen Durchmesser nur 3.2 Watt (Abb. 48).

$$\frac{119.8W}{3.2W} = 37.4$$

Die Wasserturbine generiert in diesem Fall 37.4 mal so viel Energie.

Um herauszufinden, wie gross der Durchmesser der Windturbine sein müsste, können wir aber nicht einfach den Durchmesser mal 37.4 rechnen. Dies, da die Steigung exponentiell ist, was auf den Graphen ersichtlich ist. Um den Wert herauszufinden, muss die Formel umgestellt und nach dem Durchmesser aufgelöst werden.

$$A = 119.8 W : \left(\frac{1}{2} \cdot 1kg/m^3\right) : 6^3m/s = 1.1m^2$$

$$R = \frac{1.1m^2}{\pi} = 0.35m^2 \Rightarrow 0.59m$$

$$D = 2 \cdot 0.59 \cdot = 1.19m$$

Um die gleiche Leistung zu bekommen, muss das Blatt 1.19m sein. In diesem sind die Unterschiede noch gering. Da sich die Werte exponentiell verändern, kann es sein, dass wenn die Wasserturbine um einige Meter vergrössert wird, die Windturbine für die gleiche Leistung einen Durchmesser von über 100 Meter bräuchte.

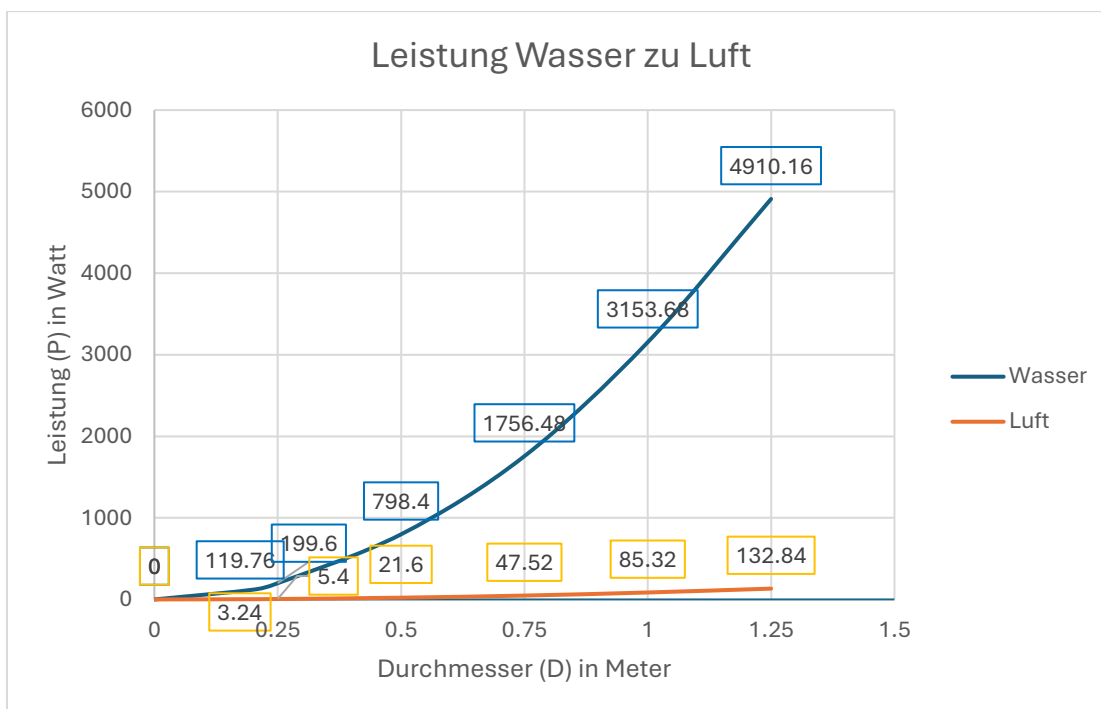


Abbildung 48: Diagramm Leistung Wasser zu Luft

Um die Exponentielle Steigung besser darzustellen, haben wir noch Luftfeuchte dargestellt, welche ähnliche Werte wie Luft besitzt. Im dazugehörigen Diagramm ist gut erkennbar, dass sich die zwei Graphen im Gegensatz zu Wasser und Luft nur sehr langsam entfernen (Abb. 49).

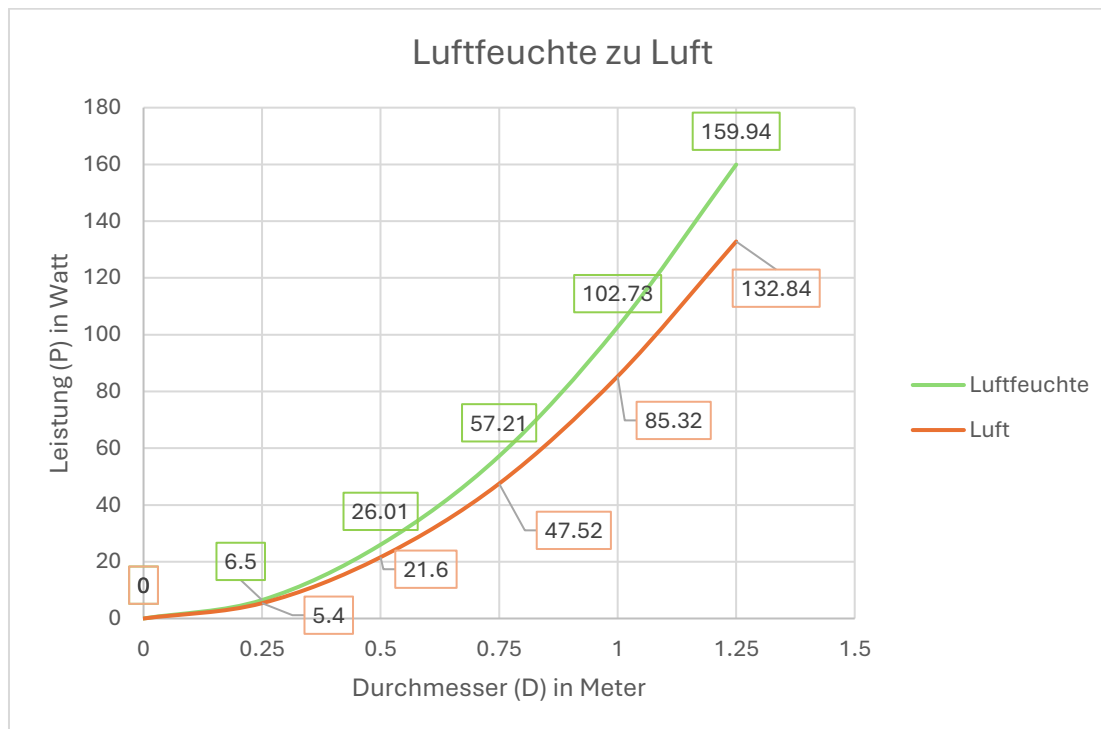


Abbildung 49: Diagramm Luftfeuchte zu Luft

Festlegung der Schnelllaufzahl und des C_p -Wert

Die oben erwähnte Leistung eines Fluidstroms kann in der Realität nicht vollständig genutzt werden. Nur schon aus physikalischer Sicht kann dem Wind nicht die ganze Energie entzogen werden, da die Windgeschwindigkeit nach der Rotorfläche sonst Null betragen müsste. Der Physiker Alfred Betz fand heraus, dass die theoretisch maximale Leistungsentnahme vom Wind 59.3% beträgt. Und dies auch nur wenn man annimmt, dass keine Verluste vorhanden sind. Dieser Wert wird auch als Leistungsbeiwert oder C_p -Wert bezeichnet. Die Verluste ergeben sich durch eine teils tangentielle Richtung des Luftstroms und durch Profilverluste an den Rotorblättern. Heutige moderne Windturbinen schaffen eine Leistungsentnahme, also C_p -Wert von ca. 30%-50%. Für unsere Windturbine nehmen wir einen C_p -Wert von 0.3 an, da wir nicht über perfekt optimierte Rotorblätter für unseren Fall haben. Um eine Annäherung an die Nenndrehzahl unserer Windturbine zu berechnen, brauchen wir die Schnelllaufzahl λ . Da wir uns dem ganzen zunächst theoretisch nähern, legen wir die Schnelllaufzahl λ fest. Da die Nenndrehzahl n_{nenn} im direkten Zusammenhang mit der Schnelllaufzahl λ steht, müsste man für deren genauen Berechnung spezielle Programme der Strömungslehre zur Hilfe nehmen. Dies würde den Rahmen unserer Arbeit sprengen, da dies tiefer in die Strömungslehre geht und es viel Zeit in Anspruch nehmen würde. Übliche Schnelllaufzahlen für moderne, horizontale Windturbinen liegen zwischen 6 und 8. Im Kapitel Schnellläufer und Langsamläufer (Abb. 6, S. 13) sieht man, dass Windturbinen, die auf dem Auftriebsprinzip beruhen wesentlich höhere Schnelllaufzahlen besitzen als z.B. Windräder. Für unsere Windturbine legen wir den Wert auf 5 fest, da wir eine 3-blättrige Windturbine bauen, welche den Auftrieb nutzt, aber doch nicht aerodynamisch optimal ausgelegt ist wie eine industrielle Windturbine. (Kusiek, 2022)

Vorbereitung und Vorgehen

Da wir diese Kombination aus Wind- und Wasserturbine auch wirklich bauen, mussten wir schauen, wie wir zu unseren Bauteilen kommen. Wir wollten so viel wie möglich selbst herstellen und brauchten hierbei verschiedene 3D-Drucker, welche uns zu Verfügung standen. Das Gehäuse der Turbine ergab sich mehr oder weniger durch die Auswahl des Generators, der Befestigungsmöglichkeit, sowie den elektronischen Bauteilen und liess sich gut umsetzen auf dem CAD. Um einiges komplizierter war jedoch die Umsetzung der aerodynamischen sowie fluidmechanischen Elemente der Turbine. Es gibt zwar Möglichkeiten, um beispielsweise die Rotorblätter von Grund auf selbst zu konstruieren. Die Geometrien und Berechnungen, die in die Konstruktion einfließen würden, waren jedoch zu kompliziert und umfangreich. Eine Entwicklung von Grund auf ist sehr aufwändig und braucht auch spezielle Computerprogramme für die Simulationen. Wir sind zwar auf eine genaue Anleitung für die Entwicklung eines Rotorblatts gestossen, haben es aber sein lassen, weil es den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Es gibt im Internet auch viele kostenlose 3D-Dateien von Rotorblättern, jedoch liessen uns die Bauformen zweifeln, ob sie effizient und für unsere Dimension passend wären. Also haben wir entschlossen die Rotorblätter in einem Onlineshop zu kaufen, wo es auch eine Auswahl an verschiedenen Grössen gab. Wahrscheinlich die beste Lösung für einen Prototyp im Rahmen dieser Arbeit. Die Nabe, mit der die Rotorblätter fixiert werden, entwickelten wir selbst und stellten sie dann mit dem 3D-Drucker her. Bei der Kaplanturbine haben wir uns für ein 3D-Modell aus dem Internet entschieden. Wir werden diese dann noch skalieren und im CAD später noch anpassen. Zudem kommt noch die Konstruktion des Windfangs und die Entwicklung eines Drehsockels mit vertikaler Rotationsachse hinzu, um die Ausrichtung zur Windrichtung zu ermöglichen. Der Drehsockel war gleichzeitig die Verbindung zu Stativ. Es ist darauf zu achten eine möglichst stabile Halterung zu konzipieren, die möglichst kein Spiel zulässt. Lager, Dichtungen, Verbindungselemente sowie andere mechanische Bauteile waren im weiteren Verlauf dieser Arbeit zu bestimmen.

Windturbine

Da der Rotor der Windturbine grösser dimensioniert werden muss als der Rotor der Wasserturbine, beabsichtigten wir die Konstruktion vom Windrotor her zu beginnen. Denn das Ziel, die Turbine in einem Rucksack transportieren zu können, würden wir nur erreichen, wenn wir ein bestimmtes Packmass nicht überschreiten. Die Rotorblätter an einer Windturbine sind im Normalfall die grössten Bauteile, sofern man sie nicht zusammenfalten kann. Wenn wir das Beispiel Biwakieren oder Wildcampen nehmen, braucht man dazu auch einen passenden Rucksack. Wanderrucksäcke eignen sich hierbei am besten, da sie oft höher sind, verschiedene Fächer haben und sich auch ausserhalb Ausrüstung festzurren lässt. Das Mindestvolumen eines solchen Rucksacks liegt üblicherweise bei etwa 35 Liter. Die entscheidende Angabe ist für uns aber die Höhenangabe des Rucksacks. Im Handel und Onlineshops findet man bei diesem Rucksackvolumen brutto Höhenangaben beginnend bei etwa 60cm. Da die Rucksäcke im Inneren aber kürzer sind und oft auch das Befüllen des Deckels die effektiv nutzbare Höhe noch reduziert, ziehen wir noch 5cm ab. Das bedeutet, dass die Rotorblätter eine maximale Länge von 55cm haben können, damit sie einzeln noch gut in den Rucksack passen. Der Durchmesser des Windturbinenrotors wird mit dieser Angabe insgesamt also über 100cm betragen, wenn man bedenkt, dass die Nabe auch noch einen Durchmesser von 0.12m hat. In einem Onlineshop haben wir für unsere Dimensionen geeignete Rotorblätter gefunden (dazu später noch mehr), welche eingebaut in der Nabe einen Radius der Rotorfläche von 0.54m ergibt. Das heisst, der Rotor hat einen definitiven Durchmesser von 1.08m. Das Gehäuse und die anderen Komponenten der Windturbine werden eher eine längliche Form haben, da alles möglichst stromlinienförmig sein soll, um die Strömung der Fluide nicht zu beeinträchtigen. Aus diesem Grund berücksichtigen wir hier nur die Höhe des Rucksacks.

Für die Wahl eines passenden Generators brauchen wir vorerst folgende Angaben:

- Die **Nenn Drehzahl** n_{nenn} , also die Drehzahl, welche wir bei unseren festgelegten mittleren Windgeschwindigkeit erwarten
- Die **maximale Drehzahl** n_{max} bei den hohen Windgeschwindigkeiten, wo die Windturbine noch eingesetzt wird
- Die effektiv nutzbare **Leistung** P_{nutz}

Berechnung der Windturbinendrehzahl und Leistung

Mit den vorhandenen und festgelegten Werten können wir n_{nenn} berechnen:

$$n_{nenn} = \frac{\lambda \cdot 60 \cdot v_w}{2\pi \cdot R_{Rot}} = \frac{5 \cdot 60 \cdot 6m/s}{2\pi \cdot 0.54m} = \mathbf{530.52min^{-1}}$$

Die maximale Drehzahl n_{max} , bei der höchsten Windgeschwindigkeit:

$$n_{max} = \frac{\lambda \cdot 60 \cdot v_w}{2\pi \cdot R_{Rot}} = \frac{5 \cdot 60 \cdot 14m/s}{2\pi \cdot 0.54m} = \mathbf{1237.87min^{-1}}$$

Um die Leistung P berechnen zu können, brauchen die Fläche A des Rotors (abzüglich des Nabendurchmessers r):

$$A = (R^2 - r^2) \cdot \pi$$

$$A = (0.54^2m - 0.06^2m) \cdot \pi = \mathbf{0.9m^2}$$

Die Formel für die theoretische Leistung P:

$$P_{Luft} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

$$P_{Luft} = \frac{1}{2} \cdot 1kg/m^3 \cdot 0.9m^2 \cdot 6^3m/s = \mathbf{97.2W}$$

Da wir aufgrund von physikalischen Gegebenheiten und nicht optimalen Geometrien mit Verlusten rechnen, wird die Leistung P noch mit dem C_p -Wert multipliziert:

$$P_{nutz} = P \cdot C_p = 97.2W \cdot 0.3 = \mathbf{29.16W}$$

Die Leistung, mit welcher wir rechnen können, liegt also bei 29.16W.

Kaplan turbine

Das 3D-Modell

Wie auch die Bauteile der Windturbine, sollen die Komponenten der Wasserturbine, nach Gewichtung unserer Präferenzen, gut in einen Wanderrucksack mit dem Mindestvolumen von 35L reinpassen. Deshalb haben wir wieder die Rucksäcke angeschaut und uns hier auf das limitierende Tiefenmass konzentriert. Denn dieses Mass ist praktisch immer das kleinste Mass bei den Rucksäcken. Die Länge und Höhe des Rucksacks spielen in diesem Fall keine Rolle, da der Rucksack hier ausreichend Platz bietet. In diesem Volumensegment haben wir bei den Produkten eine Mindesttiefe von etwa 18cm eruiert. Das 3D-Modell der Kaplan turbine, welche wir ausgesucht haben, hat einen Durchmesser von 200mm und eine axiale Höhe von ungefähr 140mm. Sie passt also gut in den Rucksack rein. Um zu sehen, ob sich dieser

Kaplanturbinenrotor für unsere angedachte Kombination eignet, müssen wir Berechnungen anstellen. Kaplanurbinen haben normalerweise Schaufelradwinkel von 10° bis 40° und diese lassen sich je nach Fliessgeschwindigkeit verstellen. Unsere ausgewählte Kaplanurbinen hat einen Schaufelradwinkel von 25° und ist somit eher für langsame Fliessgeschwindigkeiten geeignet.

Wir berechnen wie schon bei der Windurbinen folgende Werte für die Kaplanurbinen:

- Die **Nennurbinen** n_{nenn} , also die Drehurbinen, welche wir bei unseren festgelegten mittleren Fliessgeschwindigkeit erwarten
- Die **maximale Drehurbinen** n_{max} bei höchster Fliessgeschwindigkeit eines Wasserstroms
- Die effektiv nutzbare **Leistung** P_{nutz}

Berechnung der Kaplanurbinenurbinen und Leistung

Um die Drehurbinen n_{nenn} zu erhalten, müssen wir die effektive Rotorfläche (ohne Nabe) berechnen:

$$A_{Rotor} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4}$$

$$A = \frac{\pi \cdot (D^2_{Rotor} - d^2_{Nabe})}{4} = \frac{\pi \cdot (0.2^2m - 0.06^2m)}{4} = \mathbf{0.029m^2}$$

Mit der Bernoulli Gleichung können wir den Volumenstrom berechnen:

$$Q = A \cdot v = 0.029m^2 \cdot 2m/s = \mathbf{0.058m^3/s}$$

Mit den berechneten und festgelegten Werten können wir die Leistung berechnen. Den Wirkungsgrad haben wir auf 0.3 festgelegt:

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H = 0.3 \cdot 998kg/m^3 \cdot 9.81m/s^2 \cdot 0.058m^3/s \cdot 0.3m = \mathbf{51.1W}$$

Eine Annäherung für die Drehurbinen n_{nenn} bei Kaplanurbinen wird wie folgt berechnet:

$$n = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D}$$

$$n = \frac{60 \cdot 2m/s}{\pi \cdot 0.2m} = \mathbf{190.9min^{-1}}$$

Und die Annäherung für die Drehurbinen n_{max} :

$$n_{max} = \frac{60 \cdot 4m/s}{\pi \cdot 0.2m} = \mathbf{382min^{-1}}$$

(swissmallhydro.ch, 2024)

Motorwahl

In der unteren Tabelle sind die Leistung und die Drehzahlen bei den festgelegten mittleren Strömungswerten aufgelistet. Die maximale Drehzahl ist zusätzlich relevant für die Wahl des Generators. Denn die maximale Drehzahl n_{max} , welche bei einem Motor angegeben ist, darf nicht überschritten werden, da sonst die Motorkomponenten durch die hohen Fliehkräfte auseinandergerissen werden könnten.

	Windturbine	Kaplanturbine
P_{nenn}	29.16W	51.1W
n_{nenn}	530.5min ⁻¹	190.9min ⁻¹
n_{max}	1237.9min ⁻¹	382min ⁻¹

Tabelle 7: Leistung und Drehzahl

Mit diesen technischen Basisangaben konnten wir einen passenden Motor und weitere elektronische Komponenten aussuchen. Der Motor läuft im umgekehrten Prinzip und wird als Generator für beide Fluide eingesetzt. Nachdem uns schnell klar wurde, dass es noch weitere Faktoren gibt, die bei der Auswahl eine Rolle spielen und dass das Thema tiefer in die Elektrotechnik reicht, haben wir uns Unterstützung von Martin Märki, einem Elektroingenieur, geholt. Martin Märki hat uns aufgezeigt, welche wichtige Punkte zu beachten sind, wenn man einen Motor als Generator einsetzt und welche Möglichkeiten es hierzu gibt. Grundsätzlich eignet sich für unsere Anwendung ein Gleichstrom-Bürstenmotor (DC-Motor) und bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC-Motor) mit 2 Phasen oder 3 Phasen ein elektronisch kommutierter Drehstrommotor (EC-Motor). Wir haben uns bei der Suche auf die BLDC-Motoren konzentriert. Denn diese haben einen höheren Wirkungsgrad als die Bürstenmotoren, welche einen Reibungsverlust aufweisen.

Bedingungen

Folgende Punkte mussten wir bei der Wahl für unseren Motor beachten:

- Die Nennleistung des Motors soll grundsätzlich höher sein als die Leistung, welche von der Wind- oder Kaplanturbine aufgenommen wird. Sonst läuft der Motor Gefahr zu überhitzen und erleidet Schäden. Der Isolationslack der Wicklungen verträgt nur Temperaturen bis max. 125°C.
- Die Nennleistung des Motors soll höher liegen als die des Verbrauchers. Es ist zu berücksichtigen, dass diese Motoren einen ungefähren Wirkungsgrad von 80% haben. Ausserdem müssen mögliche Spannungsspitzen und Verluste in den übrigen elektronischen Bauteilen abgedeckt werden können. Es muss also ein Motor gewählt werden, dessen Nennleistung min. 25% höher liegt als die des Verbrauchers.
- Die maximale Drehzahl des Motors soll wie schon gesagt höher liegen als die maximale Drehzahl n_{max} (1237.87min⁻¹) welche mit der Windturbine erreicht werden könnte. Dies ist in den meisten Fällen gegeben, da fast alle Motoren in hohen Drehzahlen arbeiten.
- Der Motor und die elektronischen Komponenten sollen in der Lage sein, im Windbetrieb sowie auch im Wasserbetrieb elektrischen Strom auszugeben. Das heisst, der Motor soll eine möglichst niedrige Drehzahlkonstante haben (<100 Umdrehungen in min⁻¹/V), um auch bei niedrigen Drehzahlen genügend Spannung aufbauen zu können. Die niedrigere Drehzahl von 190.9min⁻¹ im Wasser ist hier die untere Grenze. Auch hier soll noch genügend Spannung erzeugt werden können: $\geq 5V$
- Das Anlaufmoment des Motors darf vor allem für die Windturbine nicht zu hoch sein, da sonst bei niedrigen Windgeschwindigkeiten der Rotor nicht zu drehen beginnt und keine Energie erzeugt wird.

Recherche und Festlegung

Mit diesen Eckdaten haben wir Online bei verschiedenen Firmen und Händler nach einem geeigneten Motor gesucht. Uns ist schnell klar geworden, dass sich die Suche extrem schwierig gestaltet, da fast alle erhältlichen Motoren für hohe Drehzahlen ausgelegt sind und bei vielen Händler oft wichtige Angaben für uns fehlten. Auf Empfehlung des Elektroingenieurs Martin Märki haben wir bei der Firma Maxon nachgefragt. Diese hat uns, auf dieser nicht ganz einfachen Recherche, geholfen und kompetent beraten und dann schlussendlich zwei bürstenlose DC-Motoren (BLDC) empfohlen:

- EC 45 flat Ø43.5 mm, bürstenlos, 80 Watt, Drehzahlkonstante: 62.8 min⁻¹/V
- EC 90 flat Ø90mm, bürstenlos, 260 Watt, Drehzahlkonstante: 33.4 min⁻¹/V



Abbildung 50: Maxon Motor

Die Auswahl fiel dann auf den **BLDC-Motor EC 90 flat 260W** (Abb. 50). Dieser Motor hat zwar einen relativ grossen Aussendurchmesser von 90mm, erfüllt aber sonst alle unsere Anforderungen. Der nächstkleinere BLDC-Motor EC 45 flat, den Maxon im Sortiment hat, wäre vom Durchmesser besser geeignet aber ist mit 80W Nennleistung zu schwach. Ausserdem hat der EC 90 flat die viel bessere Drehzahlkonstante, was in unserem Fall vorteilhaft ist, um die Mindestspannung zu erreichen (Abb. 50).

WERTE BEI NENNSPANNUNG	
Nennspannung	60 V
Leerlaufdrehzahl	1980 min ⁻¹
Leerlaufstrom	227 mA
Nennndrehzahl	1690 min ⁻¹
Nennmoment (max. Dauerdrehmoment)	972 mNm
Nennstrom (max. Dauerbelastungsstrom)	3.31 A
Anhaltmoment	9530 mNm
Anlaufstrom	47.1 A
Max. Wirkungsgrad	87 %
KENNDATEN	
Anschlusswiderstand	1.27 Ω
Anschlussinduktivität	1.63 mH
Drehmomentkonstante	286 mNm/A
Drehzahlkonstante	33.4 min ⁻¹ /V
Kennliniensteigung	0.149 min ⁻¹ /mNm
Mechanische Anlaufkonstante	7.91 ms
Rotorträgheitsmoment	5060 gcm ²

Abbildung 51: Maxon Motor Eigenschaften

Schutzart IP68

Um den Motor bei der Kaplan turbine unter Wasser betreiben zu können, muss dieser eine gewisse Schutzart erfüllen. In der unteren Tabelle (Abb. 52) kann man sehen, dass in unserem Fall die Schutzart IP68 geeignet wäre. Denn wir müssen davon ausgehen, dass der Motor dauernd unter Wasser sein wird. Deswegen haben wir uns bei der Motorensuche zuerst einmal auf Motoren mit IP68 konzentriert. Uns wurde aber schnell klar, dass solche Motoren auf unsere Anforderungen passend, schwer zu finden sind. Auch die Preise steigen mit diesem Kriterium zum Teil auf das Vierfache. Aus diesen Gründen haben wir uns entschieden einen Motor mit gewöhnlicher Schutzart zu nehmen und die Abdichtung selbst vorzunehmen.

Schutzarten elektrischer Betriebsmittel Protection of Electrical Equipment, IP-Code			
Alphanumerische Kennzeichnung zur Angabe der Schutzart			
Kennbuchstaben IP	Schutz gegen Berühren und gegen Eindringen von Fremdkörpern und Wasser. IP (International Protection) = Internationale Schutzart		
Erste Kennziffer	Berührungsschutz (Personenschutz) Fremdkörperschutz (für Betriebsmittel)	Zweite Kennziffer	Wasserschutz
IP 0X	Kein Berührungsschutz Kein Fremdkörperschutz	IP X0	Kein Wasserschutz
IP 1X	Handrückenschutz Schutz gegen Fremdkörper $\geq \varnothing 50$ mm	IP X1	Schutz gegen senkrecht fallendes Tropfwasser
IP 2X	Fingerschutz (Prüffinger, $\varnothing 12$ mm, $l = 80$ mm) Schutz gegen Fremdkörper $\geq \varnothing 12,5$ mm	IP X2	Schutz gegen schrägfallendes Tropfwasser (15° gegen die Senkrechte)
IP 3X	Werkzeugschutz (Zugangssonde, $\varnothing 2,5$ mm, $l = 100$ mm) Schutz gegen Fremdkörper $\geq \varnothing 2,5$ mm	IP X3	Schutz gegen Sprühwasser (bis 60° gegen die Senkrechte)
IP 4X	Drahtschutz (Zugangssonde, $\varnothing 1,0$ mm) Schutz gegen Fremdkörper $\geq \varnothing 1,0$ mm	IP X4	Schutz gegen Spritzwasser
IP 5X	Drahtschutz (wie IP 4X), staubgeschützt	IP X5	Schutz gegen Strahlwasser
IP 6X	Drahtschutz (wie IP 4X), staubdicht	IP X6	Schutz gegen starkes Strahlwasser
		IP X7	Schutz gegen zeitweiliges Untertauchen
		IP X8	Schutz gegen dauerndes Untertauchen
		IP X9K	Schutz gegen Hochdruck-, Dampfstrahlreinigung

Wird nur eine Kennziffer für den Schutzgrad gebraucht, so wird die andere durch ein X ersetzt.

Abbildung 52: Schutzarten IP

Technische Angaben und Berechnungen

Natürlich verringert sich, durch den grösseren Durchmesser, die nutzbare Rotorfläche der Kaplan turbine, da beim Austritt der Durchmesser des Gehäuses ein wenig grösser wird als er müsste. Die genaue Auswirkung hierbei werden wir in dieser Arbeit aber vernachlässigen.

Um zu berechnen, ob der Motor im Generatorbetrieb die nötige Spannung, im Arbeitsbereich der beiden Fluide (Drehzahl von $n_{nenn} 190.9min^{-1} - 1237.9min^{-1}$) erreicht, brauchen wir folgende Formel. In dieser wird auch gleich der Laststrom I_L einer mittelgrossen Powerbank berücksichtigt, welcher mit 1A angegeben wird. Der Anschlusswiderstand wird mit 1.27Ω angegeben und die Drehzahlkonstante des Motors liegt bei $33.4min^{-1}/V$:

$$U_t = \frac{n}{k_n} - R_{mot} \cdot I_L$$

Zuerst berechnen wir die erzeugte Spannung für die Wind turbine mit n_{nenn} :

$$U_t = \frac{530.5min^{-1}}{33.4min^{-1}} - 1.27\Omega \cdot 1A = \mathbf{14.6V}$$

Und einmal mit n_{max} :

$$U_t = \frac{1237.9min^{-1}}{33.4min^{-1}} - 1.27\Omega \cdot 1A = \mathbf{35.8V}$$

Jetzt berechnen wir die erzeugte Spannung für die Kaplan turbine:

$$U_t = \frac{190.9min^{-1}}{33.4min^{-1}} - 1.27\Omega \cdot 1A = \mathbf{4.4V}$$

Wir konnten feststellen, dass die nötige Spannung bei der Kaplan turbine knapp nicht erreicht wird und die Spannung im Windbetrieb viel höher liegt als die 5V welche wir benötigen. (Kafader, 2024)

Spannungswandler

Es ist vor allem bei der Windturbine mit grossen Spannungsschwankungen zu rechnen, da die Windgeschwindigkeit selten konstant bleibt. In diesem Fall sind wir gezwungen einen Spannungswandler einzubauen. Auch für den Kaplanbetrieb brauchen wir einen Spannungswandler, in diesem Fall ein sogenannter Aufwärtsrichter (Abb. 54). Dieser sorgt dafür, dass auch eine tiefere Spannung aufgenommen werden kann und die Ausgangsspannung immer konstant bleibt. Für die Windturbine brauchen wir auf der anderen Seite einen Abwärtsrichter (Abb. 53). Wir haben in unserer Recherche geschaut, ob wir einen Spannungswandler finden, welcher die Spannungsbereiche beider Turbinen aufnehmen kann und eine Ausgangsspannung von 5V hat, haben jedoch nichts Passendes gefunden. Wir werden es also so lösen, dass man zwischen beiden Spannungswandler für den jeweiligen Betrieb Umschalten kann. So können wir gewährleisten, dass der gesamte Spannungsbereich beider Turbinen aufgenommen werden kann.



Abbildung 54: Aufwärtsrichter



Abbildung 53: Abwärtsrichter

Drehstrom

Der Motor **EC 90 flat Ø90mm 260W** hat drei Phasen und zusätzliche Steuerungskabel um ihn als Motor betreiben zu können. Es wird im Motorbetrieb auch ein Steuerungsgerät benötigt, welches entweder Gleichstrom oder Wechselstrom abgestimmt auf die drei Phasen des Motors leitet. In unserem Fall wird das Gegenteil gemacht. Wir brauchen für den Generatorbetrieb ein sogenanntes 3-Phasenrichter um den Drehstrom, der erzeugt wird, in Gleichstrom zu wandeln. Unsere Ansprechperson bei der Firma Maxon hat uns diesbezüglich einen guten Tipp gegeben: Es gibt sogenannte «Windturbinenregler» (Abb. 55), welche genau für solche Anwendungen gebaut sind. Im Grunde genommen ist dieser «Windturbinenregler» nichts anderes als ein 3-Phasenrichter. Bei unserer Suche im Internet sind wir auf einen passenden «Windturbinenregler» gestossen. Dieser verfügt über einen 3-Phasen Eingang und 2-Phasen Ausgang. Mit diesem können wir somit auch den Drehstrom von unserem Motor in den benötigten Gleichstrom wandeln.



Abbildung 55: Windturbinenregler

Radial und Axialkräfte

Was wir noch zu berücksichtigen hatten, sind die Radial- und die Axialkräfte, die der Motor maximal aufnehmen kann (Abb. 56):

MECHANISCHE DATEN	
Lagerart	Kugellager
Grenzdrehzahl	5000 min ⁻¹
Axialspiel	{0} {1}, bei Radiallast {2} {3} {4}
	0.14 mm, bei Radiallast > 58 N
Max. axiale Belastung (dynamisch)	34 N
Max. axiale Aufpresskraft (statisch)	440 N
(statisch, Welle abgestützt)	8000 N
Max. radiale Belastung	130 N, 10 mm ab Flansch

Abbildung 56: Maxon Motor Eigenschaften

Zuerst berechnen wir die maximal auftretenden Kräfte beim Windturbinenrotor. Bei diesem spielt zum einen das Gewicht und zum anderen die angenommene maximale Windgeschwindigkeit eine Rolle. Als erstes haben wir die Radialkraft berechnet. Hierzu benötigen wir das Gewicht der Nabe und der Rotorblätter. Ein Rotorblatt, welches wir bestellt haben, wiegt 0.256kg. Die 3D-gedruckte Nabe hat mit den Verbindungsmittel ein ungefähres Gewicht von ca. 0.3kg. Die Radialkraft haben wir also wie folgt berechnet:

$$F_{Rotorblätter} = 3 \cdot 0.256kg \cdot 9.81m/s^2 = 7.53N$$

$$F_{Nabe} = 0.3kg \cdot 9.81m/s^2 = 2.94N$$

Wenn die beiden Kräfte addiert werden, ergibt dies:

$$F_{Radial} = 7.53N + 2.94N = \mathbf{10.47N}$$

Für die Berechnung der Axialkraft brauchen wir die Formel für die Gesamtschubkraft F_{Schub} :

$$F_{Schub} = \frac{\pi}{2} \cdot \rho_{Luft} \cdot R^2 \cdot v^2 \cdot C_t$$

Um den Schubkoeffizienten C_t annähernd zu erhalten, nehmen wir die folgende Formel:

$$C_t = C_p \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_{opt}} \right)$$

Den C_p -Wert haben wir am Anfang auf 0.3 und die Schnelllaufzahl λ auf 5 festgelegt. Die optimale schnelllaufzahl λ_{opt} ist höher als der tatsächliche Wert. Wir schätzen diesen anhand der Tabelle (Abb. 2.) auf 6 ein.

$$C_t = 0.3 \cdot \left(\frac{5}{6} \right) = \mathbf{0.25}$$

Mit diesen Angaben können wir jetzt F_{Schub} berechnen:

$$F_{Schub} = \frac{\pi}{2} \cdot \rho_{Luft} \cdot R^2 \cdot v^2 \cdot C_t$$

$$F_{Schub} = \frac{\pi}{2} \cdot 1 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.54^2 \text{ m} \cdot 14^2 \text{ m/s} \cdot 0.25 = \mathbf{22.4N}$$

Die Kräfte, welche bei der Windturbine auf die Motorenwelle wirken, liegen unter den maximal zulässigen Werten.

Die Formel für die Berechnung der Axialkraft lautet wie folgt:

$$F_{axial} = C_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{wasser} \cdot A \cdot v^2$$

Den C_t -Wert legen wir aufgrund von nicht idealen Strömungsbedingungen und nicht verstellbaren Schaufelblätter auf 0.3 fest. Die anderen Werte sind schon bekannt:

$$F_{axial} = 0.3 \cdot \frac{1}{2} \cdot 998 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.029 \text{ m}^2 \cdot 4^2 \text{ m/s} = \mathbf{69.46N}$$

Die theoretische Axialkraft übersteigt die zulässige Axialkraft der Motorwelle um das Doppelte. Wir können jedoch für die Kaplan turbine die Kräfte nicht genau berechnen, da sie mit unserer vorgesehenen Konstruktion eher horizontal im Wasser liegt und somit nie ganz im Eingriff ist. Auch wenn wir sie auf einer Stufe oder kleinen Wasserfall positionieren, wird die nutzbare Rotorfläche nie vollständig gefüllt sein, wie bei einer herkömmlichen Kaplan turbine, wo durch ein Ansaugrohr die komplette Turbine durchströmt wird. Auch die Radialkraft ist in unserem Fall schwierig zu berechnen. Da wir die Kaplan turbine im Normalfall horizontal in die Strömung legen und mit Seilen an mindestens drei Punkten befestigen, ist davon auszugehen, dass sich die Turbine immer der Strömung nach ausrichtet und somit den radialen Kräften nachgibt. Hier wäre es auf jeden Fall angebracht genau zu beobachten, wie sich der Motor und die Kaplan turbine beim Test verhalten. Es gibt auch Möglichkeiten, um Turbinen in einem Programm bei Strömung zu simulieren. Dies wäre für diese Arbeit aber zu aufwändig gewesen. Des Weiteren bestände die Möglichkeit mit der Firma Maxon Kontakt aufzunehmen und die Sache mit den Kräften noch genauer anschauen (The Engineering ToolBox, 2024).

Prototyping

Unsere Absicht war es, einen funktionierenden Prototyp zu bauen, womit erste Tests durchgeführt werden können. Das heisst, die Dimensionen und die Geometrien sind die, welche wir im Vorfeld berechnet haben. Mit diesem Prototyp wollten wir Folgendes herausfinden:

- Passen die Einzelteile zusammen
- Ist das Gehäuse wasserdicht (IP68)
- Funktioniert der Aufbau der beiden Turbinen wie gewünscht
- Funktionieren die Turbinen mechanisch
- Produziert die Turbine in beiden Bereichen elektrischen Strom
- Passt das Gerät in einen Wanderrucksack

Um diese Fragen zu beantworten, stellten wir einen Funktionsprototyp her. Dieser beinhaltete weitgehend schon alle wichtigen funktionalen Anforderungen eines Endprodukts. Es gab aber einige Stellen und Einzelteile, welche wir noch nicht bis ins Detail verfeinert haben. Da es der erste Prototyp dieses Projekts war, bestand die Wahrscheinlichkeit, dass noch bestimmte Teile angepasst und nochmals hergestellt werden mussten. Auch gab es einige Bauteile oder

Verbindungen, bei denen wir im Voraus partiell die Form- und Passgenauigkeit geprüft haben. Wir haben jeweils nur bestimmte Segmente eines ganzen Bauteils gedruckt, damit wir nicht jedes Mal das komplette Teil drucken mussten. Dadurch konnten wir Zeit und Kosten sparen.

Wichtig sind neben den mechanischen Tests auch das Testen der elektronischen Bauteile und das Zusammenspiel mit dem Motor. Vorgesehen sind zuerst Labortests unter kontrollierten Bedingungen und in einem zweiten Schritt Feldtests unter realen Bedingungen. Es war uns wichtig, zuerst die Hauptpunkte anzugehen und die Funktionalität des Geräts zu prüfen. Wenn diese Punkte erfüllt waren, möchten wir in Zukunft noch einen zweiten Prototyp mit allen Verbesserungen und Anpassungen herstellen, die uns aufgefallen sind.

Materialisierung Prototyp

Wir stellen den ersten Prototypen mittels 3D-Druck in PLA her (Abb. 57), um zu schauen, ob alles zusammenpasst, wie es geplant ist. PLA lässt sich leicht drucken und ist günstig in der Anschaffung. Wenn wir Korrekturen oder nötige Optimierungen vornehmen müssen, damit das Ganze funktioniert, werden wir auch diese wieder in PLA drucken. Erst wenn wir Gewissheit haben, dass alles wie geplant funktioniert, werden wir alle Bauteile in ASA drucken. ASA eignet sich perfekt für Aussenanwendungen, da es UV-beständig und witterungsfest ist. Zudem hält es Temperaturen bis etwa 90°C stand, ist auch bei tiefen Temperaturen schlagfest und behält seine Formgenauigkeit bei hoher Feuchtigkeit bei. Es ist jedoch teurer und um einiges schwieriger zu drucken, da es empfindlich auf Temperaturschwankungen reagiert und zu starkem Verzug neigt. Es sind hier einige Vorkehrungen zu treffen, damit der Druck zum gewünschten Erfolg führt. Da die Turbine draussen zum Einsatz kommt, haben wir beschlossen, alle Bauteile in einer hellen Farbe zu drucken. Diese reflektieren die Sonnenstrahlen am effizientesten, wodurch eine mögliche Überhitzung im Sommer vorgebeugt wird. Denn auch wenn die Sonne scheint, soll sich der Motor im Inneren des Gehäuses so wenig wie möglich erwärmen. (PRUSA RESEARCH, 2024)



Abbildung 57: PLA

Rotorblätter

Für die Windturbine wurden drei geeignete Rotorblätter gebraucht. Die Dimensionen der Rotorblätter wurden nach unseren Berechnungen und Annahmen festgelegt. In einem Onlineshop haben wir Rotorblätter (Abb. 58) in einer passenden Grösse für unser Windturbinenrotor gefunden. Es sind Rotorblätter aus einem nicht definierten Kunststoff in hellgrauer Farbe. Die Gesamtlänge des Rotorblatts beträgt 530mm. Eingebaut in der Nabe hat der Rotor einen effektiven Radius von 540mm. Die Rotorblätter haben am Ansatz je zwei Löcher für die Befestigung. Wir nehmen diese gleich als Vorlage für die Konstruktion der Nabe.



Abbildung 58: Rotorblatt

Rotornabe

Der Zusammenbau des Windturbinenrotors soll möglichst schnell und unkompliziert funktionieren. Deshalb wird der Windturbinenrotor so konstruiert, dass man die Rotorblätter radial steckt und danach mit dem Reindreuen der Spitze sichert (Abb. 62). Die Fixierung und Sicherung geschieht mit dem Einfahren der sechs Sperrbolzen (Abb. 61) in die Löcher der Blätter (Abb. 63). Die Rotornabe besteht aus drei Bauteilen (Abb. 60). Die Spitze ist mittels Gewindestange und Sicherungsscheibe mit dem Zwischenstück verbunden und kann sich frei drehen. Das Zwischenstück ist mit den sechs Bolzen bestückt und wird beim Eindrehen der Spitze an die Nabe gedrückt, wobei die Blätter durch die Sperrbolzen fixiert werden. Die Nabe wird auf die Motorwelle gesteckt und radial mit drei Gewindestiften gesichert. Die Gewindestange, welche die drei Teile verbindet, hat ein Linksgewinde. Da der Rotor im Uhrzeigersinn dreht (wenn von der Windrichtung aus geschaut wird) kann verhindert werden, dass sich die Spitze im Betrieb löst. Damit die Rotorblätter gut in die Nabe passen, musste die Konstruktion schrittweise angepasst werden. Die Form des Ansatzes ist speziell und kann nicht genau gemessen werden. Aus diesem Grund haben wir einfach ein Segment (Abb. 59) der Nabe im CAD isoliert und jeweils gedruckt und wieder angepasst, bis das Blatt gut sass und die Bolzen sich gut einführen liessen. Es ist wichtig, dass es hier nicht viel Spiel gibt, weil es sonst im Betrieb unrund laufen könnte. Die Rotorspitze wird von Hand aufgeschraubt und sollte deshalb griffig sein. Aus diesem Grund wurden am Umfang regelmässige Vertiefungen konstruiert.



Abbildung 59: Segment



Abbildung 63: Löcher der Blätter



Abbildung 61: Sperrbolzen



Abbildung 62: Spitze

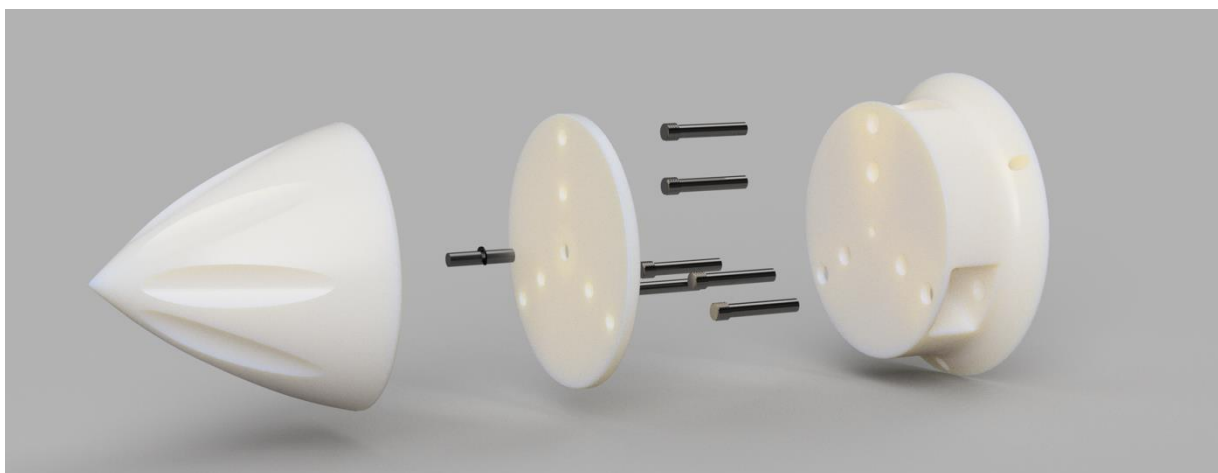


Abbildung 60: Rotornabe Bestandteile

Kaplanturbine

Das 3D-Modell für die Kaplanturbine haben wir online auf Thingiverse.com gefunden. Das Modell musste auf unser Turbinengehäuse angepasst werden und für die Befestigung auf der Motorenwelle brauchte es noch drei Radiallöcher und ein Loch für die Welle.

Die Vergrößerung des Durchmessers gegen hinten ist nicht ideal, da es die Strömung negativ beeinflussen kann. Für den Prototypen und die ersten Tests wird es uns aber wichtige erste Erkenntnisse liefern. Auf den Bildern (Abb. 65 + 67) sieht man die Originaldatei in blau und die abgeänderte Version mit dem grösseren Durchmesser in grau (Abb. 64 + 66 + 68).

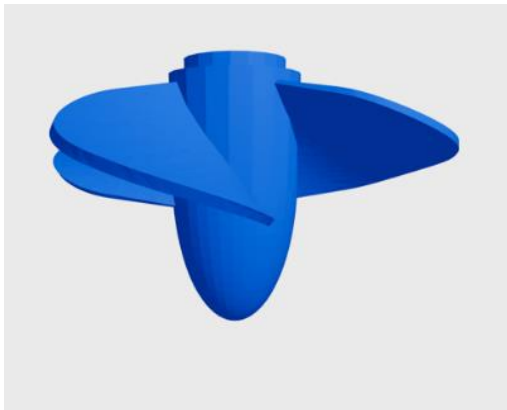


Abbildung 67: Kaplanturbine Original

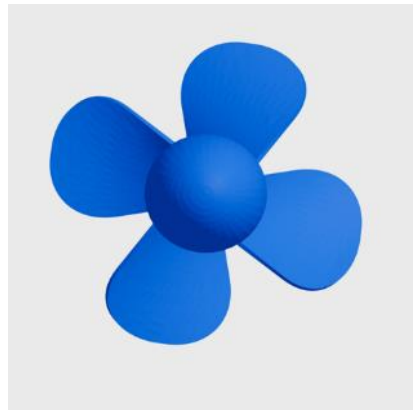


Abbildung 65: Kaplanturbine Original

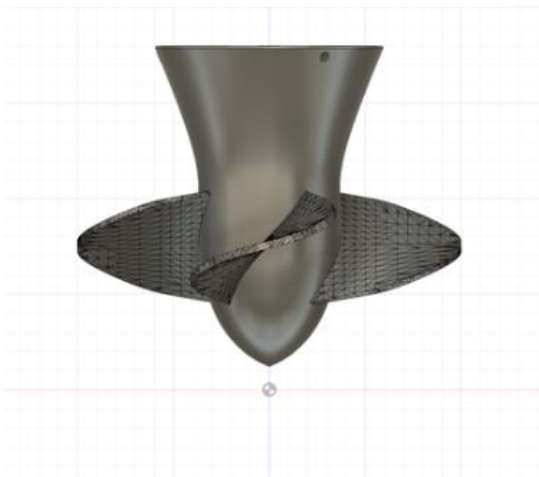


Abbildung 66: Kaplanturbine angepasst

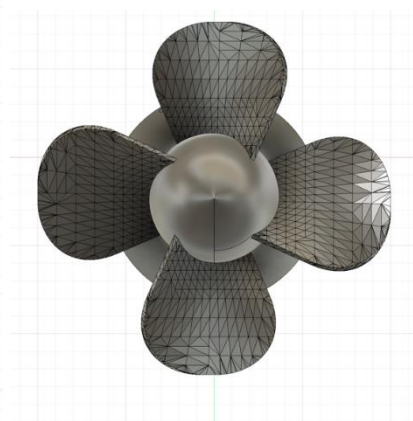


Abbildung 64: Kaplanturbine angepasst

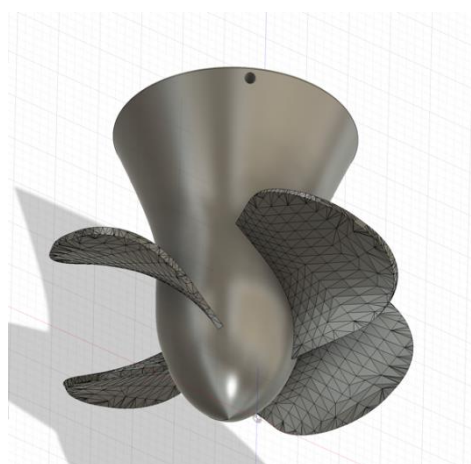
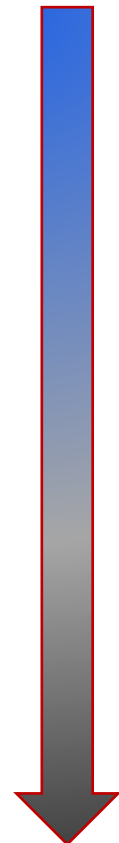


Abbildung 68: Kaplanturbine angepasst

Gehäuse

Da wir uns vorgenommen haben, möglichst wenig Technik in dem Gehäuse zu verbauen, das ins Wasser kommt, wird dort nur der Motor platziert. Dieser ist komplett im Gehäuse eingebaut, lediglich die Welle, an der die Rotorblätter oder die Windturbine platziert werden, ragt heraus. Er wird durch Schrauben (Abb. 69) am Gehäuse festgemacht. Der Leihmotor besitzt einige zusätzliche Kabel, welche wir nicht entfernen dürfen. Daher wird hinter dem Motor ausreichend Platz gelassen, damit diese dort verstaut werden können. Es muss auch die Möglichkeit gegeben sein, die von uns benötigten Kabel mit dem Verlängerungskabel zu verbinden, welches zur Box führt. Am hinteren Teil des Gehäuses kann das Aufsatzrohr darauf gesteckt und mittels Bajonettverschlusses arretiert werden. Ganz unten am Gehäuse wird der Drehsockel mit Schrauben montiert. Der Aufbau ist auf diese Weise sehr kompakt. Da das Gehäuse möglichst wasserdicht sein soll, beschlossen wir, nochmals grössere Anpassungen vorzunehmen, um eine bessere Dichtheit zu erreichen. Bei der ersten Variante ist das Gehäuse auf zwei Teile unterteilt, eines für die untere und das andere für die obere Hälfte. Dadurch kann es auch mit kleineren Druckern hergestellt werden und der Innenbereich ist nach erfolgtem Druck gut erreichbar, um allfälliges Stützmaterial herauszukratzen. An diesen beiden Auflageflächen, wo die beiden Teile aufeinanderliegen, kann aber gut Wasser eindringen. Solche Verbindungen sind deshalb möglichst zu vermeiden, damit das Gehäuse wasserdicht bleibt. Da wir einen gossen Drucker zu Verfügung haben, der mit einer neuen Stützstrukturenart sehr komplexe Teile drucken kann, beschlossen wir, das Gehäuse aus einem Druck zu fertigen. Da beim Gehäuse einfach der Motor mit den Kabeln wasserdicht sein soll, entschieden wir uns, einen wasserdichten Behälter zu zeichnen, welcher die Kabel und den Motor schützt. Dieser ist möglichst kompakt und seine Form ist nicht für die Strömungen optimiert. Auf diesem Behälter wird der Deckel montiert. Die Kontaktfläche zwischen dem Deckel und dem Behälter wird mittels einer Dichtschnur (Abb. 70) isoliert. Der Behälter selbst befindet sich in dem Gehäuse. Das Gehäuse ist mit Rundungen versehen, damit das Wasser oder auch die Luft möglichst nicht auf Widerstand stossen werden. Auch können bei diesem Gehäuse wie auch bei der ersten Variante der Drehsockel und der Windfang montiert werden. Der Behälter wird in das Gehäuse geschoben (Abb. 73). Der Deckel, der am Behälter montiert ist, dient gleichzeitig als Befestigung an das Gehäuse (Abb. 72), so dass der Behälter nicht herausrutschen kann. Der Deckel ist verschraubt, damit beim Testen das Gehäuse geöffnet und wieder geschlossen werden kann. Beim Zeichnen dieser zweiten Variante stellte sich heraus, dass mit nur wenigen Anpassungen auch das Aussengehäuse wasserdicht gemacht werden kann. Dafür mussten nur einige Öffnungen umschlossen und auch beim Aussengehäuse eine Dichtungsschnur angebracht werden. Das Verlängerungskabel dringt durch eine wasserdichte Kabelverschraubung (Abb. 71) in das Aussengehäuse, von dort gelangt es schliesslich durch eine weitere Kabelverschraubung in das Innere des wasserdichten Behälters.



Abbildung 70: Schraubverbindungen



Abbildung 69: Dichtschnur

Beim Zeichnen dieser zweiten Variante stellte sich heraus, dass mit nur wenigen Anpassungen auch das Aussengehäuse wasserdicht gemacht werden kann. Dafür mussten nur einige Öffnungen umschlossen und auch beim Aussengehäuse eine Dichtungsschnur angebracht werden. Das Verlängerungskabel dringt durch eine wasserdichte Kabelverschraubung (Abb. 71) in das Aussengehäuse, von dort gelangt es schliesslich durch eine weitere Kabelverschraubung in das Innere des wasserdichten Behälters.



Abbildung 73: Behälter im Gehäuse



Abbildung 72: Deckel an Gehäuse



Abbildung 71: Kabelverschraubung

Energiebox

In der Energiebox (Abb. 77 + 78) befinden sich die Elektronischen Bauteile, die den Drehstrom in Gleichstrom und die Spannung auf einen konstanten Wert von 5V wandeln. Die Box hat auf dem Deckel einen Schalter, mit dem der Stromkreis zum Motor unterbrochen werden kann. Sie wurde zweiteilig konstruiert und kann mit vier Schrauben (Abb. 76) und den eingepressten Gewindehülsen einfach geöffnet werden. An den schmalen Seiten hat es je eine Öffnung für das Motorenkabel und für die USB-Ladebuchse. Im Inneren der Box ist in der unteren Hälfte (Abb. 75) der Windrichter untergebracht. Eine eingelegte Zwischenplatte (Abb. 74) unterteilt die beiden Hälften und dient gleichzeitig als Montageplatte, worauf die zwei Platinen (Abb. 77) verschraubt sind.



Abbildung 76: Befestigung



Abbildung 75: Untere Hälfte



Abbildung 74: Zwischenplatte

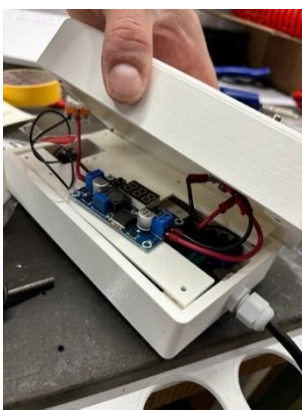


Abbildung 79: Platinen



Abbildung 78: Energiebox



Abbildung 77: Energiebox

Elektronische Bauteile

Aufwärtswandler



Abbildung 80:
Aufwärtswandler

Aufwärtswandler (Abb. 80) XL6009 wird gebraucht, um die niedrigen Spannungen zu erhöhen. Von einer Spannung ab 3V beginnt er, die Spannung zu erhöhen. Dieses Bauteil gibt keine konstante Spannung ab, sondern erhöht die Spannung je nach Eingangsspannung. Der Eingangsspannungsbereich liegt bei diesem Bauteil bei 3.5V – 32V. Dieser Aufwärtswandler wird vor dem Abwärtswandler in Serie geschaltet und ermöglicht, die Spannungen ab 3.5V zu nutzen.

Abwärtswandler



Abbildung 81:
Abwärtswandler

Der Abwärtswandler (Abb. 81) LM2596 wird vom XL6009 gespeist und wandelt diese Spannung exakt in 5V um, welche wir am eingebauten Potentiometer eingestellt haben. Es ist wichtig, dass diese konstant bleibt, damit Geräte an der USB-Buchse aufgeladen werden können und diese nicht mit hohen Spannungen beschädigt werden. Die minimale Eingangsspannung beträgt 4.5V, weshalb wir auch den XL6009 vor diesen Wandler geschaltet haben.

Windregler (3-Phasenrichter)

Der verwendete Motor EC 90 flat erzeugt beim Drehen einen Drehstrom mit drei Phasen. Der Windregler (Abb. 82) ermöglicht die Wandlung von 3-Phasen-Drehstrom in 2-Phasen-Gleichstrom, welcher für die meisten kleinen elektronischen Geräte benötigt wird. Er wandelt den Strom um und gibt ihn dem Aufwärtswandler ab.



Abbildung 82:
Windregler

IP68 Stecker

Für den Aufbau der Turbine und eine einfache Handhabung haben wir am Kabel, welches die Turbine und die Energiebox verbindet, eine Steckerverbindung montiert. Damit ausgeschlossen werden kann, dass die Stecker im Betrieb nass werden, haben wir einen IP68 Stecker (Abb. 83) ausgesucht (denn hauptsächlich beim Einsatz im Wasser oder bei Regen besteht die Gefahr von feuchten Kontakten).



Abbildung 83: IP68
Stecker

Schalter

Mit dem eingebauten Kippschalter (Abb. 84) kann der Stromkreis unterbrochen werden. Dies kann der Fall sein, wenn der Wind zu stark weht und die elektronischen Bauteile vor Überlastungen geschützt werden müssen. Auch bei Nichtgebrauch empfiehlt es sich, den Schalter auf «Aus» zu stellen.



Abbildung 84:
Kippschalter

Windfang

Da sich die Windturbine automatisch in den Wind drehen soll, entschlossen wir uns, einen Windfang zu zeichnen. Dieser beträgt nachteilig einiges zur Gesamtlänge bei. Daher zeichnen wir ihn so, dass er teleskopartig eingezogen (Abb. 85) und mit einer Rändelschraube befestigt werden kann. Es ist möglich, ihn abzumontieren, falls es die Situation erfordert. Alternativ wäre es möglich, einen kleinen Motor zu verbauen, welcher die Turbine in den Wind dreht. Da die Zeit aber zu knapp ist, um dafür eine Steuerung mit integriertem Speicher und Sensor zu installieren (und dies die Kosten ziemlich erhöhen würde) entschieden wir uns vorerst für diese Methode. Der Windfang lässt sich für den besseren Transport einfahren und für den Betrieb in ausgefahrenem (Abb. 86) Zustand arretieren. In der Schnittdarstellung (Abb. 87) sieht man die Bajonettverschlusse.

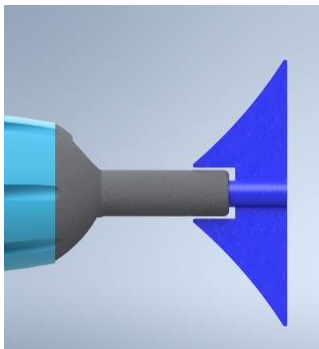


Abbildung 86: Windfang eingefahren

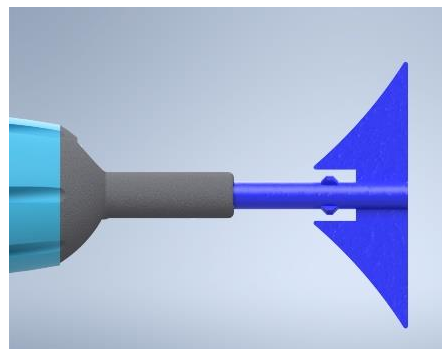


Abbildung 87: Windfang ausgefahren

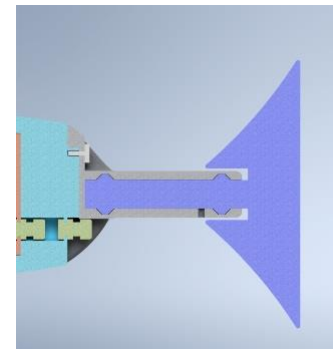


Abbildung 85: Windfang Schnittdarstellung

Um den Windfang zu montieren, schiebt man zuerst das Zwischenstück auf das Gehäuse (Abb. 90) und fixiert es mit der Rändelschraube (Abb. 89). Danach kann der Windfang eingefahren und fixiert werden (Abb. 88).



Abbildung 90: Windfang einschieben



Abbildung 89: Windfang Rändelschraube



Abbildung 88: Windfang fixiert

Drehsockel

Der Drehsockel (Abb. 91) ist die Verbindung zwischen Turbinengehäuse und Stativ. Er wird ausschliesslich im Betrieb der Windturbine eingesetzt. Für die Kaplan turbine muss man den Drehsockel abnehmen. Bei der Konstruktion musste bei der Positionierung des Drehsockels darauf geachtet werden, dass die Drehachse unter dem Schwerpunkt des Geräts liegt, damit die Turbine im Gleichgewicht ist und stabil bleibt. Das Bauteil besteht aus vier 3D-gedruckten Teilen: Verbindungsbolzen, Kugellager, Adapter und eine eingefasste Mutter für die Befestigung auf einem handelsüblichen Fotostativ. Das Kugellager wurde eingeklebt. Der Drehsockel wurde auf der Grundlage einer vorangegangenen Arbeit erstellt und modifiziert, damit er in das Turbinengehäuse eingesetzt werden kann.

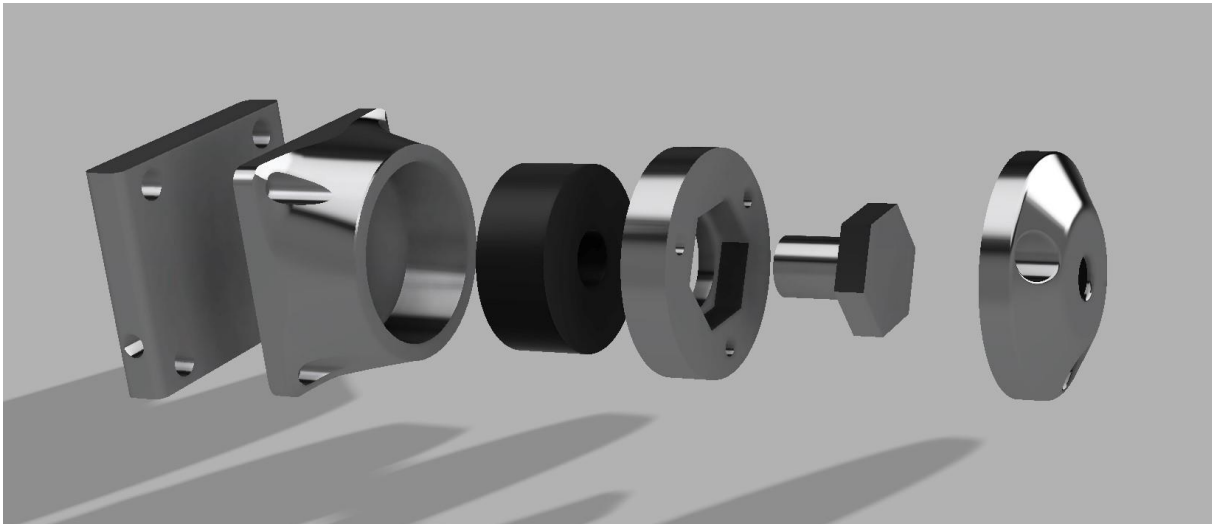


Abbildung 91: Drehsockel Bestandteile

Halterung

Windturbine

Die Windturbine wird auf einem Fotostativ (Abb. 92) der Marke Manfrotto aufgestellt. Weil die Windturbine nicht genügend hoch ist und die Rotorblätter die Beine des Stativs streifen würden, musste mit einer Verlängerung Abhilfe geschaffen werden. Die Verlängerung wird mit einem M10 Gewinde verbunden und erhöht die Windturbine um 150mm. Damit die Windturbine einen sicheren Stand hat, kann man sie mit drei Heringen und Schnüren im Boden sichern.



Abbildung 92: Fotostativ Halterung

Kaplan turbine

Für die Kaplan turbine wurde ein Aufsatzrohr (Abb. 94) konstruiert, welches am Gehäuse festgemacht wird. Die Turbine dreht sich in diesem Aufsatzrohr und ist deshalb auch geschützt gegen Schläge. Auf der Aussenseite des Rohres sind vier Ösen (Abb. 93) angebracht, mit welchen man die Kaplan turbine in Position bringen und fixieren kann. Man spannt die Schnüre mit Heringen am Ufer ab oder man zurt die Schnüre an Steinen in der Nähe an.



Abbildung 94: Aufsatzrohr



Abbildung 93: Befestigungsöse

Kleinteile und sonstiges Material

Gummischnur

Für die Abdichtung von Motorgehäuse und Deckel sowie die Abdichtung von Deckel und Turbinengehäuse wurde Gummischnur (Abb. 95) verwendet. Die Schnur wurde möglichst genau auf die Länge der Nut angepasst, damit es einen minimalen Übergang gab. Es wurden Nuten jeweils in beide Gehäuse konstruiert, worin sie eingelegt wurden.



Abbildung 95: Gummischnur

Wellendichtring

Der eingesetzte Wellendichtring von Maagtechnics (Abb. 96 + 97) eignet sich, um Flüssigkeiten abzudichten. Die zusätzliche Lippe verhindert den Eintritt von Schmutz, was für unsere Aussenanwendung vorteilhaft ist.



Abbildung 97: Schnitt von Wellendichtring mit 2 Lippen (maagtechnics.ch)



Abbildung 96: Wellendichtring (maagtechnics.ch)

Kugellager

Beim Drehsöckel haben wir ein einreihiges Schrägkugellager (Abb. 98) mit einer guten Dichtung eingebaut. Dieses kann radiale sowie auch axiale Kräfte in eine Richtung aufnehmen, welche im Betrieb vorkommen. Die Dichtung schützt gegen Wassereintritt und verhindert somit Korrosion.



Abbildung 98: Schrägkugellager (rs-online.com)

Gewindeinsätze

Gewindeinsätze oder auch Einpressmuttern (Abb. 99) genannt, sind einfach mittels LötKolben zu montieren. Der LötKolben erwärmt die Mutter, welche auf dem 3D gedrucktem Teil liegt und diese lässt sich dann ohne Widerstand in den Kunststoff drücken. Sie sind günstig und haben den Vorteil, dass man keine zusätzlichen Muttern braucht. Wir haben sie bei der Energiebox und in den Gehäuseteilen montiert.



Abbildung 99: Einpressmuttern (spiro.com)

Produktion des Prototyps

Produktionszeiten

Alle Bauteile, welche wir für den Prototyp entwickelt haben, wurden von uns hergestellt. In der untenstehenden Liste (Tab. 2) ist ersichtlich, auf welcher Maschine die Teile hergestellt wurden und wie lange die Bearbeitung jeweils auf der Maschine dauerte.

Name	Baugruppe	Maschine	Herstellungszeit / Druckzeit *
Turbinengehäuse	Turbinengehäuse	Prusa XL	1d 4h 46min
Motorgehäuse	Turbinengehäuse	Prusa i3 MK3	17h 20min
Motordeckel	Turbinengehäuse	Prusa i3 MK3S	4h 26min
Rotorspitze	Windturbine	Prusa XL	14h 56min
Zwischenstück	Windturbine	Prusa XL	14h 56min
Nabe	Windturbine	Prusa XL	14h 56min
Windfangverbindung	Windturbine	Prusa XL	1d 4h 46min
Windfang	Windturbine	Prusa XL	1d 4h 46min
Sperrbolzen	Windturbine	EMCO-Drehbank	1h 35min
Linksgewindestange M6	Windturbine	EMCO-Drehbank	40min
Gewindeaufnahme	Drehsockel	Prusa i3 MK3S	3h 52min
Zwischenstück	Drehsockel	Prusa i3 MK3S	3h 52min
Lagerstück	Drehsockel	Prusa i3 MK3S	3h 52min
Adapter für Drehsockel	Drehsockel	Prusa XL	1d 4h 46min
Drehbolzen	Drehsockel	EMCO-Drehbank	1h 50min
Rändelkopf	Drehsockel	Prusa i3 MK3	15min
Verlängerung	Drehsockel	Prusa i3 MK3	10h 38min
Kaplanaufsatz	Kaplanturbine	Prusa i3 MK3	1d 16h 48min
Aufsatzrohr	Kaplanturbine	Prusa XL	1d 15h 44min
Aufsatzrohrhalterung	Kaplanturbine	Prusa XL	1d 4h 46min
Energiebox Boden	Energiebox	Prusa i3 MK3S	19h 18min
Energiebox Deckel	Energiebox	Prusa i3 MK3S	19h 18min
Zwischenplatte	Energiebox	Prusa i3 MK3S	2h 5min

Tabelle 8: Produktionszeiten

* Unterschiedliche Bauteile, welche in einem Druckvorgang hergestellt wurden, sind mit gleicher Schriftfarbe deklariert.

3D-Druck

Die meisten unserer Bauteile wurden mit Filamentdrucker produziert. Wir haben sie im CAD konstruiert und als STL-Datei exportiert. Danach mussten wir die CAD-Dateien zuerst in einem Slicer-Programm (Abb. 100) vorbereiten. In diesem Programm kann man verschiedene wichtige Parameter einstellen, welche abhängig vom Einsatz und der Geometrie des Druckteils sind.

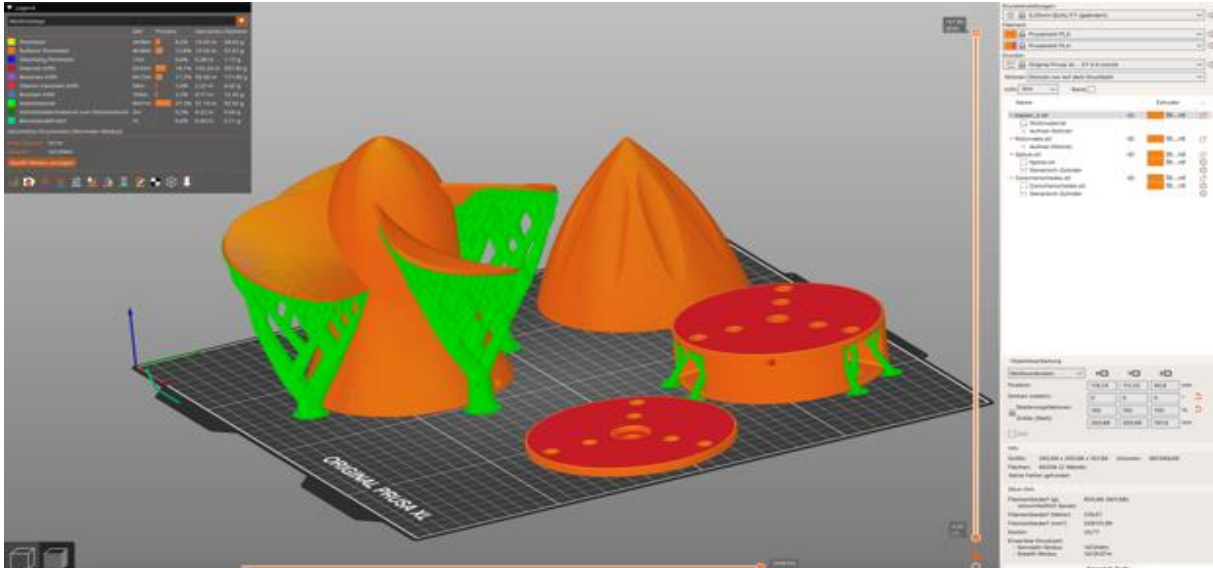


Abbildung 100: Slicer-Programm



Abbildung 101: Stützstruktur

Viele unserer Druckteile benötigen Stützstrukturen, um überhängende Geometrien erfolgreich drucken zu können. Bei der Einstellung dieser Stützstrukturen muss man einiges beachten. Je nach eingestellten Parametern lösen sich die Strukturen gut oder hinterlassen beim Abreissen Druckreste. Die Wahl der Stützstruktur kann auch einen grossen Einfluss auf die Druckzeit haben. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn die Stützstrukturen hoch sein müssen. Wir haben in diesem Projekt meistens mit organischen Stützstrukturen gearbeitet (Abb. 101). Diese ermöglichen in den meisten Fällen schnellere Drucke, lassen sich gut lösen und man spart damit erst noch Material ein. Eine organische Stützstruktur kann jedoch auch Nachteile haben. Für unser grösstes Bauteil, dem Aufsatzrohr, hätte der Druck mit normaler Stützstruktur zu 8h mehr Druckzeit geführt. Deshalb haben wir uns für die organische Stützstruktur entschieden. Jedoch haben wir nicht bedacht, dass diese baumförmige Struktur bei hohen Bauteilen instabil wird und mit den Bewegungen des Druckers schwankt. Dies hat bei diesem Druck zu einem Lösen der gesamten Stützstruktur geführt, wobei der Drucker dann zeitweise in der Luft gedruckt hat (Abb. 102). Das Bauteil konnten wir dennoch retten und es auch für den Test verwenden. Wenn man Bauteile auf dem 3D Drucker herstellt und die Passungen genau sein müssen, ist es ratsam, partiell ein paar Testdrucke zu machen. Nur so erhält man die Sicherheit, dass die Passungen wie gewünscht funktionieren, wenn man das Bauteil schliesslich komplett druckt. In unserem Fall mussten wir, wie schon in einem anderen Kapitel erwähnt, für die Passung der Rotorblätter das einzelne Segment testdrucken. Es musste vier Mal angepasst und wieder ausgedruckt werden, bis es gut sass. Für den Sitz der Nabe und des Kaplanrotors haben wir dasselbe gemacht. Damit diese gut auf der Motorenwelle gleiten, musste der Sitz perfekt sein. Sonst kann es sein, dass diese im Betrieb unruhig laufen.



Abbildung 102:
Losgelöste Stützstruktur

Dichtheitsprüfung IP68



Abbildung 105: Motordummy

Für eine erste Dichtheitsprüfung des Motorengehäuse wurde ein «Motordummy» (Abb. 105) hergestellt und mit einer 10mm Stange bestückt. Er hat die gleichen Dimensionen wie der Originalmotor. Den Dummy brauchte es, damit wir beim Dichtetest auch den Wellendichtring, welcher im Deckel montiert wird, getestet werden konnte. Wir wollten aus Sicherheitsgründen beim ersten Test nicht den Austauschmotor im Gehäuse haben, da dieser bei Wassereintritt sonst hätte beschädigt werden können. Im Gehäuse des Deckels wurde eine Nut konstruiert, in der man die Gummischnur einsetzen konnte. Da dieser Motor ein Aussenläufer ist, dreht sich das Gehäuse mit der Welle. Um ihn montieren zu können, befestigt man ihn mit den drei Schrauben im Sockel am Deckel des Motorengehäuses. Um auch diese Durchgangslöcher

im Deckel dicht zu bekommen, haben wir Unterlagscheiben aus Gummi ausgestanzt (Abb. 104). Es ist klar, dass die Flächen vom 3D-Drucker gerillt und somit schwierig abzudichten sind. Auch die Kabelabdichtung musste mit einem Stück Kabel bestückt werden (Abb. 103), damit von der Rückseite des Gehäuses kein Wasser eindringen kann. Hierfür haben wir ein Stück des Originalkabels verwendet. Der Deckel (Abb. 108) konnte jetzt vorsichtig auf das Gehäuse verschraubt werden (Abb. 105). Als alles gut verschraubt war, konnten wir den Test im Wasser wagen. Wir haben ein Gefäss mit Wasser gefüllt und das Gehäuse unter Wasser gehalten (Abb. 107). Wir haben schnell festgestellt, dass Luftblasen aufstiegen. Zudem konnten wir beim Drehen des Gehäuses auch ziemlich genau sehen, wo die undichten Stellen waren.



Abbildung 107: Gummischnur



Abbildung 106: Kabelabdichtung mit Kabel



Abbildung 108: Deckel



Abbildung 104: Deckel auf Gehäuse



Abbildung 103: Gehäuse unter Wasser

Eine undichte Stelle konnten wir direkt am Gehäuse, bei dem eckigen Teil am Umfang lokalisieren und eine andere lag beim Übergang der Gummischnur. Als wir das Gehäuse wieder geöffnet haben, war tatsächlich ein wenig Wasser eingedrungen (jedoch weniger als befürchtet). Das Motorgehäuse mit Motor und Deckel werden später als Einheit in das Turbinengehäuse eingebaut, welches nochmals auf die gleiche Art abgedichtet wird. Aufgrund der festgestellten Undichtigkeit haben wir das Motorgehäuse nochmals mit verbesserter Einstellung gedruckt. Wir haben das Bauteil mit der abzudichtenden Fläche nach unten gedruckt. So konnte beim Übergang verhindert werden, dass Lücken zwischen den einzelnen Schichten entstanden. Ausserdem haben wir die Fülldicke von 15% auf 60% erhöht und auch die Anzahl der Perimeter (Aussenwände) von zwei auf fünf erhöht. Mit diesen Verbesserungen errachteten wir es als zumutbar, den nächsten Test mit der kompletten Turbine und dem Originalmotor in einem Bach zu machen.

Labortest

Vor den Tests der Windturbine, testeten wir die Elektronik. Dafür verbanden wir die Bauteile nach dem vorgefertigten Schema (Abb. 110). Wir entschieden uns, möglichst wenig zu löten und die Kabel möglichst mit Aderendhülsen auszustatten, so dass diese wieder gelöst werden können. Um die Elektronik auf die Funktion zu testen, schlossen wir diese zuerst an einem Netzteil und nicht an den Generator an. Zuerst probierten wir die beiden verschiedenen Spannungsrichter aus. Um Last zu simulieren, schlossen wir am USB-Anschluss zuerst eine LED mit Vorwiderstand an. Diese stellte sich jedoch als ungeeignet heraus, da sie sensibel auf die Spannungen und Ströme reagierte. Stattdessen verwendeten wir eine 6 Volt Glühlampe, welche diese Bereiche besser abdecken konnte. Die schnell zu lösenden Kabel bewährten sich, da wir dadurch für die Strommessung einfach ein Messgerät dazwischen schliessen konnten. Die DC-DC Aufwärtswandler, die für unsere sehr tief zu erwartenden Spannungen erhältlich waren, erwiesen sich als nicht sehr effektiv, da bei den tiefen Spannungen nur ein sehr geringer Aufwärtssprung möglich war. Zudem wurden die in der Anwendung vorkommenden Spannungswechsel zum Problem. Wird der Motor beispielsweise in einer Standbohrmaschine (Abb. 109) eingespannt und dort mit der immer gleichen Drehzahl angetrieben, bleibt die Spannung konstant. Der Aufwärtswandler kann eingestellt werden und gibt die z.B. gewünschten 5 Volt heraus. Wird die Turbine im Wasser betrieben, trifft eine aus dem Gewässer resultierende Drehzahl auf. Dadurch verändert sich der Output. Dieser kann leider nicht einmalig auf die 5 Volt eingestellt werden, sondern muss jedes Mal, sobald sich die Eingangsspannung ändert, wieder angepasst werden. Die Abwärtswandler hingegen erfüllten unsere Erwartungen. Die Ausgangsspannung konnte durch einmaliges Einstellen auf die 5 Volt angepasst werden und verblieb daher auch bei Spannungswechseln auf diesem Wert (dies auch bei Spannungen z.B. auf 24 Volt).

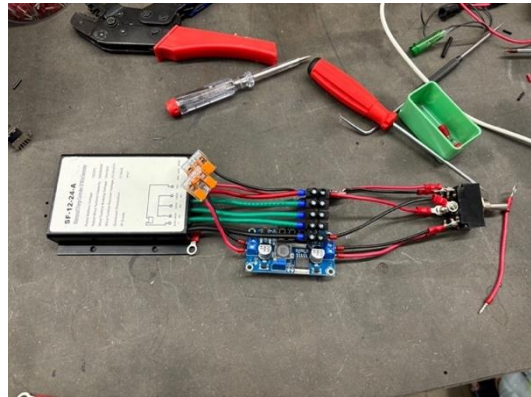


Abbildung 110: Verbundene Bauteile



Abbildung 109:
Standbohrmaschine

Als gut geeignet erwies sich auch der Motor, welcher anstatt ans Netzteil an die Schaltung angeschlossen wurde. Es war durch das Drehen per Hand an der Welle bereits die Erzeugung von einem Volt möglich, was im Hinblick auf die sehr ungünstige Bewegung beachtlich war. Eingespannt im Schraubstock und angetrieben mit einer Akkubohrmaschine, konnten die gewünschten Spannungen durch Erhöhen und Reduzieren der Drehzahl sehr gut erreicht werden.

Da wir verschiedene Spannungswandler (Abb. 111) bestellt haben, wollten wir die für unser Projekt am geeignetsten herausfinden. Dafür spannten wir den Motor mithilfe einer Vorrichtung an die Standbohrmaschine, bei welcher konstante Drehzahlen möglich sind. Die Energiebox, welche jeweils mit den unterschiedlichen Komponenten bestückt wurde, schlossen wir an den Motor an. Um herauszufinden, welchen Einfluss die Teile überhaupt auf die Spannung haben, testeten wir den Motor, um die jeweiligen Spannungen herauszumessen. Anschliessend wurde jedes einzelne Bauteil geprüft. Die Messungen sind in der Tabelle (Tab. 3) ersichtlich. Gewisse Drehzahlen wurden teils ausgelassen, da die Teile bei gewissen Spannungen nicht agierten oder sie sogar Schaden hätten nehmen können.

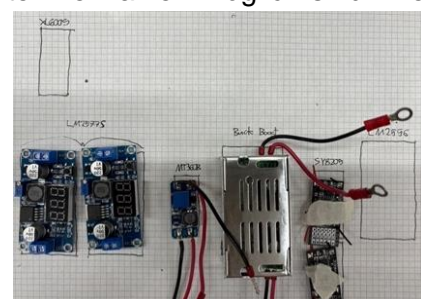


Abbildung 111: Spannungswandler

Drehzahl	Motor	Aufwärts- wandler	Aufwärts- wandler	Abwärts- wandler	Abwärts- wandler	Buck-Boost
	EC 90	LM2577	XL6009	SY8205	LM2596	DFR0946
105	1.8 V	1.7V	1.1V	-		-
210	4.8V	2.8V	5.0V	-	3.65V	-
350	8.7V	8.0V	14V	4.76V	5.0V	5.05
445	11.4	10.7V	-	4.76V	5.0V	5.05
700	18.6	17.8V	-	4.77V	5.0V	5.05
890	24.0	24.1V	-	4.77V	5.2V	5.05
1450	20.0	33V	-	-	5.2V	5.05

Tabelle 9: Spannungstest



Abbildung 113: Messungen

Bei den Messungen mit dem Motor trat ein unerwarteter Wert auf. Durch die Erhöhung der Drehzahl muss die Spannung steigen. Bei der höchsten Drehzahl aber war die Spannung geringer als bei der zweithöchsten Drehzahl. Wir nehmen an, dass dies Einflüsse des Windturbinenreglers waren, welcher für bestimmte Spannungsbereiche ausgelegt war. Bei den Messungen (Abb. 112) der anderen Bauteile konnten wir in diesem Sinne aber keine weiteren Einflüsse beobachten. Die Abwärtswandler, wie auch der Buck Boost, konnten permanent auf die 5 Volt eingestellt werden, daher waren die Werte trotz Änderung der Eingangsspannung nahezu konstant.

Da die Aufwärtswandler unterschiedliche Ausgangsspannungen herausgeben, entschlossen wir uns, hinter dem Aufwärtswandler einen Abwärtswandler zu schalten. Dadurch würden geringere Spannungen auf 5 Volt gewandelt werden. Werden diese 5 Volt nicht erreicht, wird keine Spannung herausgegeben. Hat der Aufwärtswandler hingegen einen Output von über 5 Volt, würden nach dem Abwärtswandler trotzdem nur 5 Volt herausgegeben. Unser Ziel ist es, dass aus der Energiebox nur 5 Volt herauskommen, nicht mehr, aber auch nicht weniger. (Abb. 113)

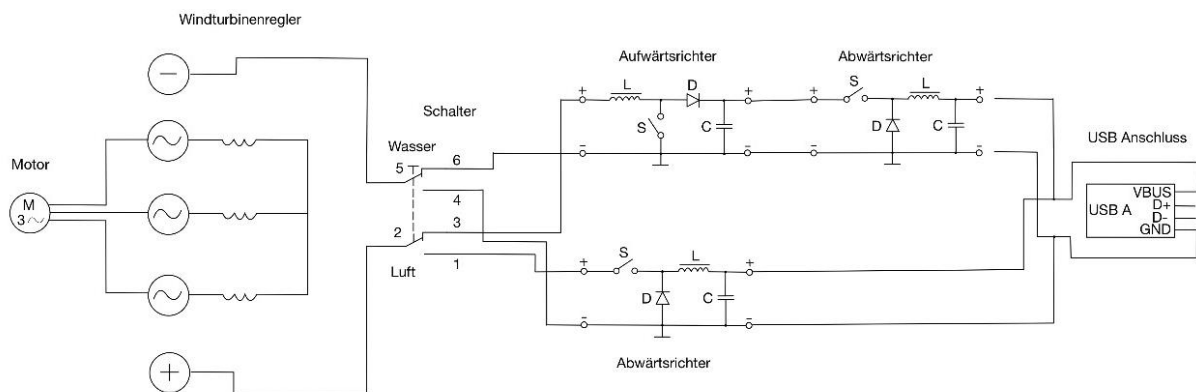


Abbildung 112: Schema mit Aufwärts- und Abwärtsrichter hintereinandergeschaltet

Nachdem die verschiedenen Komponenten getestet wurden, mussten wir uns für diejenigen entscheiden, welche wir tatsächlich verwenden wollten. Da die Preise der Bestandteile bloss geringfügig variieren und wir von der Bauform her ohnehin nur die für uns geeigneten Teile bestellt haben, hing die Entscheidung schliesslich davon ab, wie gut sie von den Werten her überzeugten. Der am überzeugendste Aufwärtswandler war der XL6009, da dieser im Bereich unter 5 Volt am meisten Spannung heraufwandeln konnte und der andere eher im Bereich über 5 Volt gut agierte, was aber für unsere Anwendung nicht benötigt wurde. Von den Abwärtswandlern kamen beide, wie auch der Buck Boost, in Frage. Von den Tests her waren

sie alle von den Ausgangsspannungen gleich gut geeignet. Wir testeten diese deshalb noch im Zusammenspiel mit dem Aufwärtswandler (Tab. 4) (Abb. 114).

Drehzahl	LM2596	SY8205	DFR0946
	XL6009	XL6009	XL6009
105	-	-	-
210	5V	4.8V	-
350	5.2V	-	5V
445	5.2V	-	5V
700	5.2V	-	5V
890	5.2V	-	5V
1450	5.2V	-	5V

Tabelle 10: Spannungswandler in Serie

Durch den Test fanden wir schnell heraus, dass der SY8205 hinter dem XL6009 nicht gut funktioniert. Die beiden anderen erfüllten aber ihren Zweck. Da der LM2596 schon von einer Eingangsspannung ab 4.5V funktioniert und der DFR0946 erst ab 6V, war dieser für uns besser geeignet. Zudem ist er kompakter und günstiger (was, wie bereits erwähnt, für uns eine sekundäre Rolle spielt) aber uns in der Entscheidung zusätzlich geholfen hat. Der Ursprungsgedanke war, dass ein Aufwärts- und ein Abwärtsrichter nebeneinandergeschaltet werden, um eine Funktion für eine geringe Drehzahl und eine für eine hohe Drehzahl zu haben. Da der Aufwärtswandler die Spannung der maximalen Drehzahl verarbeiten kann und die Arbeitsbereiche von Auf- und Abwärtsrichter überlappen, entschieden wir uns, das Schema nochmals anzupassen (Abb. 115). Es ist nur noch eine Funktion vorhanden, welche die Drehzahlen von Wind, wie auch von Wasser, deckt. Dadurch kann die Windturbine z.B. auch mit einer eher geringeren Drehzahl funktionieren. Den Schalter aber behielten wir dennoch bei. Als wir während eines Tests eine Powerbank angeschlossen haben und später die LEDs der Komponenten (auch nachdem der Motor nicht mehr rotierte) leuchteten, bemerkten wir, dass sich die Powerbank angeschlossen anfängt zu entladen, anstatt zu laden. Der Schalter fungiert daher nun als Ein- und Aus-Schalter. Dieser ist so angeschlossen, dass beide EIN-Positionen die Anlage in Betrieb nehmen.



Abbildung 114: Tests mit Aufwärtswandler

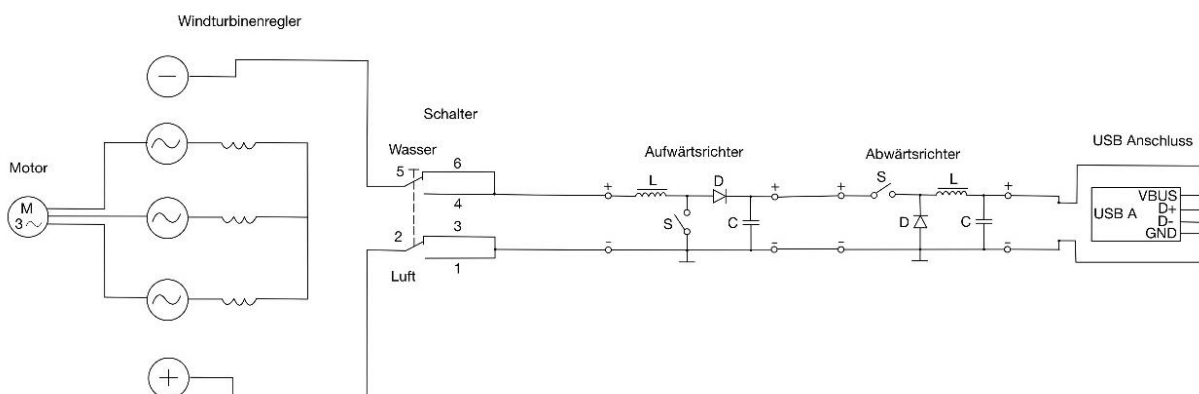


Abbildung 115: Finales Elektroschema

Feldtest

Wie im Labor haben wir den Feldtest mit dem Ausleihmotor gemacht. Der bestellte Motor war bis anhin leider noch nicht geliefert worden, weil er eine lange Lieferzeit hat. Da der Ausleihmotor eine höhere Nennleistung besitzt als der bestellte Motor, kann es sein, dass dieser auch ein höheres Drehmoment benötigt, welches auf die stärkeren Magnete zurückzuführen sind, die verbaut sind. Das bedeutet, dass der angedachte Motor bei den Tests schon bei geringerer Windgeschwindigkeit oder Fließgeschwindigkeit des Wassers zu drehen beginnen würde.

Transport

Die Turbine musste für den Feldtest transportiert werden. Für diesen Zweck haben wir einen Wanderrucksack mit 35 Liter Volumen genommen. Die einzelnen Bauteile (Abb. 117) haben alle gut in den Rucksack gepasst und liessen sich auch vom Gewicht her komfortabel transportieren. Der Rucksack war mit der Turbine nicht vollständig gefüllt, was noch Platz für weitere Ausrüstung ließ, welche z.B. für einen Campingausflug benötigt würde. (Abb. 116)

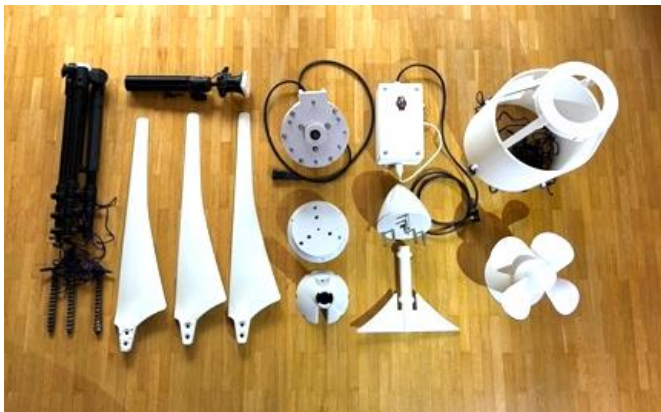


Abbildung 117: Auslegeordnung



Abbildung 116: Bauteile im Rucksack

Windturbine

Das Gerät musste nach dem erfolgreichen Labortest noch einem Test unter realen Bedingungen unterzogen werden. Da es aufgrund von Anpassungen und Fehlerrücken mit der Fertigstellung der Komponenten länger gedauert hat (Abb. 120), konnten wir für einen Test lediglich die nahe Umgebung aufsuchen. Zuerst haben wir die Windturbine im Garten aufgebaut. (Abb. 121) Der Aufbau verlief problemlos und alle Teile fügten sich wie angedacht. Der einzige Schwachpunkt war der Adapter des Fotostativs. Dieser war wacklig und wahrscheinlich nicht für ein Gewicht wie das der Turbine gedacht. Diesen müsste man für zukünftige Tests optimieren. Möglich wäre eine starre Verbindung ohne bewegliche Teile mit einer stabilen Schraubverbindung, die kein Spiel hat. Das Fotostativ wurde mit drei Heringen in der Erde gesichert (Abb. 119) und die Windturbine mit dem Adaptersystem angebracht. Mit dem Kugelgelenk am Adapter konnte man noch den genauen Winkel einstellen. Das ist wichtig, damit sich die Turbine ohne Widerstand zum Wind ausrichten kann, vor allem, wenn das Gelände uneben ist. Mit einem Laubbläser wollten wir testen, ob sich die Windturbine dreht. Wir haben aber schnell festgestellt, dass sich ein Laubbläser nicht gut eignet, um eine Windturbine anzutreiben. Der Luftstrahl ist zu klein und der Durchmesser des Rotors zu gross. Da es beinahe windstill war, haben wir beschlossen, noch einen Test auf einer höher gelegenen Stelle zu machen. Mit unserem Anemometer haben wir aber auch dort nur kurzzeitige Windgeschwindigkeiten von bis zu 2.5m/s messen können. Diese Windgeschwindigkeit hat noch nicht ausgereicht, um den Rotor in Drehung zu versetzen. Die Nenngeschwindigkeit des Windes liegt bei der Windturbine liegt bei 6m/s. Die Windturbine hat sich aber mithilfe des Windfangs sehr gut zur Windrichtung ausgerichtet. Für einen ersten Feldtest der Windturbine verlief dieser erfolgreich. Wir konnten den Transport im Rucksack testen, den Aufbau im Feld durchführen und prüfen, wie sich der Aufbau im Wind verhält. Der

nächste Schritt wäre, die Windturbine in einer höheren Lage auszutesten (Abb. 118), wo höhere Windgeschwindigkeiten vorkommen. Da die Windturbine mehrheitlich für Windbedingungen in den Bergen ausgelegt ist, müsste sie auch dort noch getestet werden. Eine weitere Variante wäre, die Turbine nach dem erfolgreichen Labortest in einem Windkanal unter kontrollierten Bedingungen zu testen. Dort könnte man bei verschiedenen



Abbildung 121: Auslegeordnung für Windturbine



Abbildung 120: Hering in der Erde



Abbildung 119: Aufbau in höherer Lage



Abbildung 118: Aufbau im Garten

Windgeschwindigkeiten testen und verlässliche Messungen durchführen.

Kaplanturbine

Für den Feldtest der Kaplanturbine haben wir einen nahegelegenen Bach im Wald aufgesucht. Er führte zwar nicht viel Wasser, trotzdem war es für uns einen Versuch wert, die Kaplanturbine zum ersten Mal draussen und vollständig zusammengebaut in strömendes Wasser zu legen. Es musste schliesslich auch die Dichtigkeit geprüft werden. Für den Aufbau der Kaplanturbine haben wir zuerst das Turbinengehäuse mit dem Rotor verschraubt (Abb. 123) und das Gehäuse dann in den Rohraufsatz gelegt. Danach wurden am Aufsatzrohr die Schnüre an den Ösen befestigt und das Kabel mit dem Kabel der Energiebox verbunden. Dank des IP68 Steckers mussten wir uns keine Sorgen machen, dass Wasser an die Kontakte kommen könnte. Wir legten schliesslich die Turbine ins Wasser und konnten sie mit den Schnüren in Position bringen (Abb. 122). Die Schnüre eigneten sich hervorragend für die genaue Ausrichtung und Fixierung. Die Turbine lag stabil im Wasser und schwenkte nicht. Die Strömung und die Wassermenge reichten in diesem Bach jedoch nicht aus, um den Rotor zum Drehen zu bringen. Deshalb wollten wir noch einen zweiten Test bei einer Wassermühle machen. Der Wasserkanal bei der Wassermühle führte deutlich mehr Wasser, war aber auch sehr breit. Auf dem Bild kann man sehen, dass das Wasserrad durch einen eigenen Kanal betrieben wird (Abb. 125). Wir haben also auch nach einer Stelle gesucht, bei der das Wasser möglichst konzentriert abfließt. Die Kaplanturbine wurde hier für den Test einfach von Hand an die bestmögliche Stelle gelegt. Der Rotor der Turbine hat sich hierbei gedreht und lief regelmässig, als das Wasser durchströmte (Abb. 126). Wir konnten bei dieser Strömungsgeschwindigkeit keine Spannung messen, denn diese lag schätzungsweise unter 1m/s. Unsere Turbine ist jedoch für eine Strömungsgeschwindigkeit von 2m/s ausgelegt. Wir

müssen also auch mit der Kaplan-turbine für weitere, aussagekräftigere Tests noch andere Wasserströme aufsuchen. Im besten Fall einen Bergbach mit ausreichender Fliessgeschwindigkeit und genügend Wassertiefe. Unterdessen haben wir festgestellt, dass die Wassertiefe auch ein wichtiger Punkt ist, den es zu berücksichtigen gibt. Insgesamt war auch dieser Test im Wasserkanal erfolgreich. Die Turbine lässt sich gut in einem 40 Liter Rucksack verstauen (Abb. 124). Wir haben den Transport und den Aufbau der Kaplan-turbine ohne Probleme durchführen können und haben gesehen, dass die Turbine funktioniert. Der Rotor dreht sich und braucht lediglich noch eine höhere Fliessgeschwindigkeit, um eine Spannung auszugeben. Auch hier wäre es ideal, wenn wir Zugang zu einem Wasserversuchslabor hätten, um unter kontrollierten Bedingungen zu testen und Messungen durchführen zu können.



Abbildung 125: Auslegeordnung Wasserturbine



Abbildung 124: Montage



Abbildung 122: Drehendes Rad



Abbildung 123: Turbine im Bach



Abbildung 126: Wasserrad mit Kanal

Pflichtenheft

Zweck der Turbine

Diese Turbine kann im Outdoorbereich ein hilfreiches Gerät sein. Sie ist eine Alternative oder Ergänzung zu Solarpanels, welche bei schlechtem Wetter nicht funktionieren. Vor allem bei langen Aufenthalten im Freien ist man mit einer Powerbank in der Kapazität limitiert. Mit dieser Turbine kann bei genügend Wind oder in Bächen elektrische Energie erzeugt werden. Sie ist in einem Rucksack verstaubar und lässt sich schnell und einfach aufbauen.

Technische Anforderungen

Die Turbine wandelt Spannungen von 3.5V bis 35V in 5V um. Dies geschieht in einem Drehzahlbereich von 116 min^{-1} bis 1169 min^{-1} . Der generierte Strom wird über ein 3-Phasen-Stromkabel zu einer Energiebox geleitet, wo alle elektronischen Komponenten untergebracht sind. Die 5V werden über eine USB-A Buchse bereitgestellt, welche sich an der Aussenseite der Energiebox befindet. Der Stromkreislauf kann über einen Kippschalter an der oberen Seite der Box unterbrochen werden. Das Stromkabel, welches die Turbine und die Energiebox verbindet, ist mit einem wasserdichten Stecker (IP68) ausgestattet. Dieser kann für den einfacheren Transport und für die Montage der Kaplan turbine mit dem Aufsatzrohr getrennt werden. Das Stromkabel hat eine Länge von 3m und kann, wenn gewünscht, mit einem Verlängerungskabel und der passenden Steckverbindung erweitert werden. Die Turbine ist für einen Nennstrom von 2A ausgelegt. Durch die Möglichkeit das Stativ im Boden verankern zu können, hält der ganze Aufbau der Wind turbine auch starken Winden bis zu 14m/s (50km/h) stand.

Funktionale Anforderungen

Die Turbine lässt sich leicht auf- und abbauen und für den Transport in einem 35-Liter Rucksack in ihre Einzelteile zerlegen. Beim Wind turbinenrotor werden mit dem Eindrehen der Rotor spitze in die Nabe die Rotorblätter fixiert. Das Eindrehen erfolgt von Hand im Gegenuhrzeigersinn und mithilfe der ergonomischen Aussparungen an der Rotor spitze. Die komplettierte Nabe wird auf die Motorwelle aufgesteckt und mit den drei radialen Gewindestiften gesichert. Die Wind turbine kann auf ein normales Fotostativ (1/4-Zoll-Gewinde) aufgeschraubt werden. Bei Bedarf kann man das Stativ mit drei Schnüren und Heringen im Boden fixieren. Nach dem Aufbau kann die Energiebox mit der Turbine verbunden und eingeschaltet werden. Für den Einsatz der Kaplan turbine muss der Wind rotor wieder abgebaut werden. Der Kaplan rotor wird auf die Motorwelle gesteckt und mit den drei radialen Gewindestiften gesichert. Danach wird das Stromkabel der Turbine in der Mitte durch das Aufsatzrohr geführt und das Aufsatzrohr auf das Turbinengehäuse gesteckt. Das Aufsatzrohr hat am Umfang vier Ösen, um Schnüre zu befestigen. Um die Kaplan turbine auszurichten und zu fixieren, kann man die Schnüre an Bäume oder Steine festbinden. Die Turbine kann dann mit der Energiebox verbunden und der Schalter auf «Ein» gestellt werden. Mit dem langen Kabel ist es möglich, die Energiebox beim Campen über Nacht ins Zelt zu nehmen, um dort geschützt die Geräte aufzuladen. Eine Schutzhülle oder Transportbox wurde nicht entwickelt.

Umweltbedingungen

Das Motorengehäuse mit dem verbauten Motor ist wasserdicht und somit für den Betrieb im Wasser oder Regen geeignet. Nahezu alle Bauteile der Turbine wurden mithilfe von 3D Druckern hergestellt. Hierbei wurden die Druckeinstellungen so gewählt, dass die Teile eine höhere Festigkeit haben und stabiler sind. Die Bauteile für den ersten Prototypen wurden mit dem Material PLA (Polylactic-Acid) gedruckt. Für den nächsten Prototypen würden wir ASA (Acrylnitril-Styrol-Acrylat) als Material verwenden. ASA hält den Witterungen im Aussenbereich besser stand als PLA und ist zudem noch schlagfest. Für die Turbine wurde ein helles grau und weiss gewählt, damit sie sich bei warmem Wetter durch die Sonne nicht zu stark aufheizt. ASA hält Temperaturen von -20°C bis 95°C aus und ist auch nicht feuchtigkeitsempfindlich. Nur bei einer längeren Aussetzung in feuchten Gebieten könnte es zu einer Feuchtigkeitsaufnahme kommen.

Kosten

Die Materialkosten unseres Prototyps belaufen sich auf 582.10Fr. Darin sind keine Löhne oder Infrastrukturkosten einberechnet. Auch das Fotostativ ist nicht in den Kosten enthalten. Die Halterung für die Montage der Windturbine auf das Stativ ist inkludiert.

Optimierungsmöglichkeiten

Nach der Herstellung, Montage und dem Testen des Prototyps haben wir bereits viele Verbesserungsmöglichkeiten festgestellt. Bereits während des Konstruierens oder nach den 3D-Drucken haben wir Teile im CAD abgeändert (Abb. 128), damit sie beim nächsten Ausdruck besser passen. Es gab auch Teile wie die Rotornabe (Abb. 127), die wir noch einmal drucken mussten, da sich die Masse des Gehäuses nochmals geändert hatten.



Abbildung 128: Rotornabe Neu-Alt



Abbildung 127: Kaplan turbine Neu-Alt

Für einen nachfolgenden Prototypen gibt es aber auch grundlegende Dinge, die wir ändern würden. Das Gehäuse und auch alle sonstigen gedruckten Teile könnte man noch leichter gestalten. Wir könnten die Wandstärken reduzieren und zudem gewisse Dimensionen verändern. Da wir während der Entwicklung des Prototyps noch nicht den Originalmotor zur Verfügung hatten, mussten wir auch den Prototyp danach konstruieren. Der Ausleihmotor hatte mehrere Kabel, welche wir für unseren Gebrauch nicht benötigten, aber nicht abtrennen durften. Deshalb musste das Gehäuse z.B. länger werden als geplant, um sie darin verstauen zu können. Die Turbine besteht aus vielen Einzelteilen, welche zusammengesetzt wurden. Hier gab es Passungen und Sitze, die man trotz 3D-Druck noch genauer hätte gestalten können. Der Drehsockel ist für das Gewicht der Turbine und die auftretenden Kräfte im Betrieb zu klein konstruiert. Dieser müsste robuster und grösser gestaltet werden. Auch die Halterung, die mit dem Drehsockel verbunden und auf dem Kamerastativ befestigt wird, ist zu wenig stabil. Hier könnte etwas Eigenes konstruiert und direkt am Sockel des Stativs angebracht werden. Bei unserem Prototyp kommt das Kabel beim hinteren Teil des Gehäuses raus. Wenn sich das Gehäuse dreht und im Wind ausrichtet, kann es sich verdrehen oder auch die Ausrichtung verhindern. Deshalb wäre es sinnvoll, in einem nächsten Schritt die Kabeldurchführung durch die Drehachse des Drehsockels zu gestalten. Hierzu müsste der Verbindungbolzen mit einem Rohr ersetzt werden. Dann könnte man einen sogenannten Schleifring einbauen, welcher den elektrischen Kontakt an der Schnittstelle auch bei Drehung mittels Schleifkontakte (Abb. 129) gewährleistet.



Abbildung 129: Schleifkontakt

Um den Zusammenbau der Rotornabe zu erleichtern, könnten wir uns eine Art Schnappverbindung vorstellen, mit welcher die Nabe per Knopfdruck auf die Motorwelle aufgesetzt werden kann. Man könnte eine solche Verbindung auch für das Einsetzen der Rotorblätter in die Nabe andenken. Dabei ist jedoch Vorsicht geboten, Sicherheit geht vor. Die Teile dürfen sich auch bei Rotation auf keinen Fall lösen, was sonst zu einem ernsthaften Verletzungsgefahr-Risiko führen würde. Die Energiebox könnte noch kleiner gestaltet werden. Vor allem, wenn sich in Zukunft noch kleinere elektronische Bauteile finden lassen würden. Ausserdem wäre auch bei dieser Box ein besserer Schutz (z.B. IP64, Schutz gegen Spritzwasser) angebracht. Das Gehäuse mit dem Schalter und den Schrauben könnte mit einer Dichtung ausgestattet werden und für die USB-Ladebuchse könnte man eine Gummikappe als Schutz in Erwägung ziehen. Um die Turbine platzsparender und leichter zu gestalten, könnten wir Zylinderkopfschrauben mit Senkkopfschrauben ersetzen und anstelle von Muttern, könnte man wo immer möglich mit Gewindeeinsätzen arbeiten. Diese haben den Vorteil, dass weniger Verbindungsmittel benötigt werden und die Montage erleichtert wird. Bei der Montage der beiden Rotoraufsätzen haben wir bemerkt, dass die Gewindestifte mit M4-Gewinde zu klein gewählt sind. Um diese festzuschrauben, muss man mit der langen Seite des Inbusschlüssels arbeiten, da diese durch den grossen Durchmesser sehr tief liegen. Dies ist nicht sehr praktisch, da die längere Seite meistens einen abgerundeten Einsatz hat und dadurch schnell durchdreht, wenn das Gewinde ein wenig streng läuft. Wenn man beim System mit Gewindestiften bleibt, könnte dieses Problem mit einer Anpassung auf M5-Gewindestifte behoben werden, da der grössere Schlüssel besser greift und grössere Kräfte aushält. Auch bei der Dichtigkeit haben wir noch Potenzial zur Optimierung. Die Gummischnur könnte durch einen O-Ring ersetzt werden. Dieser hat keine Übergangsstelle und dichtet somit komplett ab. Da es bei den 3D gedruckten Teilen je nach Geometrie der Teile unter Druck zu einem Wassereintritt kommen könnte, besteht die Möglichkeit, die Aussenflächen der Bauteile mit einem Acryllack oder Epoxidharz zu versiegeln. Um das Volumen der Turbine weiter zu optimieren, wären faltbare Rotorblätter eine Option. Diese könnten das längste aller Bauteile beinahe um die Hälfte verkleinern.

Erstellen einer Schutzhülle / Transportbox

In einem weiteren Schritt könnten wir uns vorstellen, eine Art Schutzhülle oder Koffer für das Gerät zu entwickeln. Dies hätte den Vorteil, dass man alles übersichtlich und geschützt in einem Behälter unterbringen könnte. Bei Outdooraktivitäten kann es immer passieren, dass jemand ausrutscht und mit dem Rucksack hinfällt. Dies könnte zu einer Beschädigung des Geräts führen und je nach dem eine aufwändige Reparatur nach sich ziehen. Eine mögliche Variante wäre eine Hartschalenbox mit Deckel, die mit Scharnieren verbunden ist. Das Innere könnte mit einem Schaumstoff ausgelegt werden, indem man die Konturen und Formen der einzelnen Teile einarbeiten würde. Die Box hätte zudem noch einen Handgriff und praktische Tragegurte.

Kosten- und Bauteileliste

In der folgenden Tabelle (Tab. 5) sind die Kosten aller Bauteile aufgelistet, welche wir für den Prototypen verwendet haben. Wir haben uns dafür ein Kostenlimit von 500Fr. gesetzt. Der ausschlaggebende Grund für die Kostenüberschreitung war der teure Motor. Anfangs dachten wir, dass es günstigere Motoren gäbe, da wir die nötigen technische Anforderungen unterschätzt haben.

Bezeichnung	Anzahl	Firma	Kosten
Filament Rollen 3D-Druck	4	3D Ware	87.80Fr.
Rotorblätter (3er Set)	1	Temu	39.00Fr.
Motor EC 90 flat Ø90mm, bürstenlos, 260 Watt	1	Maxon	299.20Fr.
Ausleihmotor EC 90 flat Ø90mm, bürstenlos, 400 Watt	1	Maxon	20.00Fr.
Windregler (3-Phasenrichter)	1	Techstudio.ch	78.00Fr.
DC-DC Aufwärtswandler XL6009	1	Bastellgarage.ch	5.90Fr.
DC-DC Abwärtswandler LM2596	1	Bastellgarage.ch	9.90Fr.
Wechselschalter	1	Digitec.ch	12.10Fr.
Elektronisches Kleinmaterial	div.	an Lager	ca. 5.00Fr.
Kabelverschraubung, M12, IP68	2	Distrelec.ch	0.80Fr.
Schrauben und Verbindungsmittel	div.	an Lager	ca. 5.00Fr.
Wellendichtring, NBR 2-Lippen ø 10mm	1	Maagtechnics	6.40Fr.
Schräggugellager, einreihig	1	Kugellagerking	3.50Fr.
Gummischnur ø 2mm	ca. 1m	Kugellagerking	1.50Fr.
Rohmaterial Edelstahl	div.	Debrunner	8.00Fr.
Kosten Total			582.10Fr.

Tabelle 11: Kostentabelle

Mechanische Werkstatt am NMZ



Abbildung 130:
Werkstatt

Die Mechanische Werkstatt des Naturhistorischen Museums der Universität Zürich (Abb. 130) stand uns für den praktischen Teil der Diplomarbeit zur Verfügung. Sie verfügt unter anderem über eine Ständerbohrmaschine, einer Drehbank, verschiedene 3D-Drucker und ein Laborgerät. Ausserdem konnten wir auch die grosse Werkbank für Montagen und elektronische Arbeiten sehr gut gebrauchen.



Abbildung 132:
Standbohrmaschine



Abbildung 131: Drehbank

Mit der Drehbank (Abb. 131) konnten die Sperrbolzen, die Gewindestange der Rotor spitze und weiter Anpassungen an Bauteilen vorgenommen werden. Mit der Standbohrmaschine Strands (Abb. 132) konnten wir kontrollierte Tests mit dem Motor durchführen und Anpassungen an den Bauteilen vornehmen.

Mit den beiden 3D Drucker (XL (Abb. 133) und MK3 (Abb. 135)) von Prusa konnten wir den grössten Teil unseres Prototyps herstellen. Der Prusa XL eignet sich hervorragend für grosse Bauteile. Das druckbare Volumen beträgt beim XL 36cm x 36cm x 36cm.

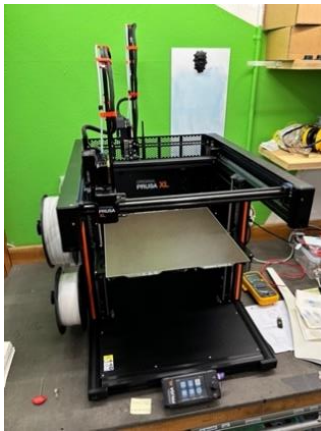


Abbildung 133: Prusa XL



Abbildung 135: Prusa MK3

Um Lötarbeiten durchzuführen, haben wir die Lötstation von Weller (Abb. 134) benutzt. Das Modell WSM 1C hat einen integrierten Akku und ist somit auch ideal für mobile Arbeiten.



Abbildung 134: Weller Lötstation

Mit dem Labor Netzteil (Abb. 136) konnten wir kontrollierte Messungen an allen elektronischen Bauteilen durchführen und testen, wie sie sich verhalten.



Abbildung 136: Labor Netzteil

Das Anemometer (Windmessgerät) (Abb. 137) half uns die genaue Windgeschwindigkeit festzustellen.



Abbildung 137: Anemometer

Quellenangaben

Literaturverzeichnis

- Bayerische Landeskraftwerke GmbH.* (28. 09 2024). Von <https://www.landeskraftwerke.bayern/francis-turbine.htm> abgerufen
- adriancubas. (28. 09 2024). *Autodesk Instructables.* Von <https://www.instructables.com/WINTURER-a-Portable-NP-F-Battery-Charger-Wind-Turb/> abgerufen
- BauNetz Wissen.* (28. 09 2024). Von <https://www.baunetzwissen.de/bauphysik/fachwissen/feuchteschutz/luftfeuchte-und-wasserdampfdiffusion-4381921> abgerufen
- Chat-GPT: Was sind Erneuerbare Energien? (12. 07 2024).
- Chat-GPT: Welches sind die grundlegenden physikalischen Prinzipien, die bei Wasserturbinen vorkommen? (12. 07 2024).
- earthtechproducts.com.* (16. Juni 2024). Von <https://www.earthtechproducts.com/waterlily-turbine-spotlight.html> abgerufen
- Geppert Hydro GmbH.* (28. 09 2024). Von <https://www.geppert-hydro.com/unsere-loesungen/neuanlagen/diagonal-turbine/> abgerufen
- Global Wind Atlas.* (28. 09 2024). Von <https://globalwindatlas.info/en/area/Switzerland/Bern> abgerufen
- gunt.de.* (16. September 2024). Von www.gunt.de/images/download/Basiswissen-Wasserturbinen_german.pdf abgerufen
- Hoffmann, V. (1990). *Energie aus Sonne, Wind und Meer.*
- Hotz-Hart, P. B. (28. 9 2024). *swissmallhydro.* Von https://swissmallhydro.ch/wp-content/uploads/2019/07/247_4d-Turb.auswahl-Dimensionierung-Abnahme.pdf abgerufen
- Kafader, U. (28. 09 2024). *maxon.* Von <https://support.maxongroup.com/hc/de/articles/360004496254-maxon-Motoren-als-Generatoren> abgerufen
- Kusiek, A. (2022). *Windenergieanlagen.*
- Ossberger.* (28. 09 2024). Von <https://www.ossberger.de/wasserkrafttechnik/ossberger-durchstroemturbine> abgerufen
- Palffy, S. O. (2017). *Wasserkraftanlagen.* Wilfried J. Bartz .
- PRUSA RESEARCH.* (28. 09 2024). Von https://help.prusa3d.com/de/article/asa_1809# abgerufen
- Ramona Schmelmer, P. D. (2015). *Vertikale Kleinwindanlagen in Bayern - Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse.*
- swissmallhydro.ch.* (23. August 2024). Von https://swissmallhydro.ch/wp-content/uploads/2019/07/247_1d-Wasserturbinen.pdf abgerufen
- TCS.* (28. 09 2024). Von <https://www.tcs.ch/de/camping-reisen/camping-insider/ratgeber/reisevorbereitung/wild-campen-in-der-schweiz.php> abgerufen
- The Engineering ToolBox.* (28. 09 2024). Von https://www.engineeringtoolbox.com/specific-speed-pump-fan-d_637.html) abgerufen
- VERBUND .* (28. 09 2024). Von https://www.verbund.com/de-at/ueber-verbund/kraftwerke/turbinen/kaplan?srsId=AfmBOooE2sK0nwPW4UDkIIQjQgMw6rCh_tRtLNKSsgj4GCK4CdyTY4R9 abgerufen
- Wasserkraftverband Deutschland.* (28. 09 2024). Von <https://www.wasserkraftverband.de/pelton-turbine/> abgerufen
- WaterLily.* (28. 09 2024). Von <https://get.waterlilyturbine.com/paddling-charger/#lp-pom-block-328> abgerufen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Terminplan Soll.....	7
Abbildung 2: Terminplan Soll-Ist.....	8
Abbildung 3: Risikomatrix.....	9
Abbildung 4: Luv- und Leeläufer (Quelle: Arne Kusiek, 2022).....	12
Abbildung 5: Vertikalen Turbinen (Quelle: Ramona Schmelmer, Petra Denk, 2015).....	12
Abbildung 6: Schnelllaufzahlen und Leistungsbeiwerte (Quelle: Ramona Schmelmer, Petra Denk, 2015).....	13
Abbildung 7: Auftrieb (Quelle: Rudolf Koller, Norbert Kastrup, 1998).....	14
Abbildung 8: Strömungswiderstandprinzip (Quelle: Arne Kusiek, 2022).....	14
Abbildung 9: Strömungen am Flugzeugflügel (Quelle: Arne Kusiek, 2022).....	15
Abbildung 10: Kräfte am Flugzeugflügel (Quelle: Arne Kusiek, 2022).....	15
Abbildung 11: Druckverläufe bei unterschiedlichen Anstellwinkeln (Quelle: Arne Kusiek, 2022).....	15
Abbildung 12: Geometrie Rotorblatt (Quelle: Arne Kusiek, 2022).....	16
Abbildung 13: Kräfte und Momente am Rotorblatt (Quelle: Arne Kusiek, 2022).....	17
Abbildung 14: Aerodynamische Kräfte am Rotorblatt (Quelle: Arne Kusiek, 2022).....	17
Abbildung 15: Rotorleistungsbeiwert zu Schnelllaufzahl (Quelle: Arne Kusiek, 2022).....	18
Abbildung 16: Profiltiefe zu Radiale Komponente (Quelle: Arne Kusiek, 2022).....	18
Abbildung 17: Wasserturbinentypen (Quelle: Wilfried J. Bartz, Hans-Joachim Mesenholl, 2017).....	19
Abbildung 18: Turbinenarten 1/2 (Quelle: Wilfried J. Bartz, Hans-Joachim Mesenholl, 2017).....	20
Abbildung 19: Turbinenarten 2/2 (Quelle: Wilfried J. Bartz, Hans-Joachim Mesenholl, 2017).....	20
Abbildung 20: Impulsprinzip (Rudolf Koller, Norbert Kastrup, 1998).....	21
Abbildung 21: Abfluss und Wasserstand Aare-Bern, Schönau https://www.hydrodaten.admin.ch/de/seen-und-fluesse/stationen-und-daten/2135#waterlevel-annual	22
Abbildung 22: Geschwindigkeit zu Höhe über Grund (Quelle: Arne Kusiek, 2022).....	23
Abbildung 23: Windverhältnisse Kanton Bern (Quelle: https://globalwindatlas.info/en).....	24
Abbildung 24: Windstärketabelle (Quelle: Arne Kusiek, 2022).....	24
Abbildung 25: Mittlere Windgeschwindigkeiten (Quelle: https://globalwindatlas.info/en).....	24
Abbildung 26: Windgeschwindigkeit Jahresverlauf (Quelle: https://globalwindatlas.info/en).....	25
Abbildung 27: Windgeschwindigkeit Tagesverlauf (Quelle: https://globalwindatlas.info/en).....	25
Abbildung 28: Netzdiagramm über 24h und Jahr (Quelle: https://globalwindatlas.info/en).....	25
Abbildung 29: Wassermenge Parallelbetrieb (Quelle: Hotz-Hart, 2024).....	26
Abbildung 30: Wassermenge Inselbetrieb (Quelle: Hotz-Hart, 2024).....	26
Abbildung 31: Hohes Gefälle (Quelle: Eigene Abbildung).....	27
Abbildung 32: Mittleres Gefälle (Quelle: Eigene Abbildung).....	27
Abbildung 33: Flaches Gefälle (Quelle: Eigene Abbildung).....	27
Abbildung 34: Energiewandlung.....	30
Abbildung 35: WindLilyTurbine (Quelle: www.earthtechproducts.com).....	31
Abbildung 36: WaterLily Turbine (Quelle: www.earthtechproducts.com).....	31
Abbildung 38: Windturer.....	32
Abbildung 37: Windturer gefaltet.....	32
Abbildung 39: Modell Turbine mit beweglicher Welle.....	32
Abbildung 40: Vertikale Windturbine.....	33
Abbildung 41: Skizze Windturbine.....	33
Abbildung 42: Windturbinenmodell.....	33
Abbildung 43: Skizze Wasserrad.....	33
Abbildung 44: Wasserrad.....	33
Abbildung 45: Skizze abnehmbare Module.....	34
Abbildung 46: Skizze biegbare Welle.....	34
Abbildung 47: Skizze Turbine mit Energiebox.....	34

Abbildung 48: Diagramm Leistung Wasser zu Luft	36
Abbildung 49: Diagramm Luftfeuchte zu Luft	37
Abbildung 50: Maxon Motor.....	42
Abbildung 51: Maxon Motor Eigenschaften	42
Abbildung 52: Schutzarten IP	43
Abbildung 53: Abwärtsrichter.....	44
Abbildung 54: Aufwärtsrichter.....	44
Abbildung 55: Windturbinenregler.....	44
Abbildung 56: Maxon Motor Eigenschaften	45
Abbildung 57: PLA.....	47
Abbildung 58: Rotorblatt.....	47
Abbildung 59: Segment	48
Abbildung 60: Rotornabe Bestandteile	48
Abbildung 61: Sperrbolzen	48
Abbildung 62: Spitze	48
Abbildung 63: Löcher der Blätter	48
Abbildung 64: Kaplan turbine angepasst	49
Abbildung 65: Kaplan turbine Original	49
Abbildung 66: Kaplan turbine angepasst	49
Abbildung 67: Kaplan turbine Original	49
Abbildung 68: Kaplan turbine angepasst	49
Abbildung 69: Dichtschnur.....	50
Abbildung 70: Schraubverbindungen.....	50
Abbildung 71: Kabelverschraubung.....	51
Abbildung 72: Deckel an Gehäuse	51
Abbildung 73: Behälter im Gehäuse	51
Abbildung 74: Zwischenplatte.....	51
Abbildung 75: Untere Hälfte.....	51
Abbildung 76: Befestigung.....	51
Abbildung 77: Energiebox	51
Abbildung 78: Energiebox	51
Abbildung 79: Platinen.....	51
Abbildung 80: Aufwärtswandler	52
Abbildung 81: Abwärtswandler	52
Abbildung 82: Windregler	52
Abbildung 83: IP68 Stecker	52
Abbildung 84: Kippschalter	52
Abbildung 85: Windfang Schnittdarstellung	53
Abbildung 86: Windfang eingefahren.....	53
Abbildung 87: Windfang ausgefahren.....	53
Abbildung 88: Windfang fixiert	53
Abbildung 89: Windfang Rändelschraube.....	53
Abbildung 90: Windfang eischen.....	53
Abbildung 91: Drehsockel Bestandteile	54
Abbildung 92: Fotostativ Halterung.....	54
Abbildung 93: Befestigungsöse	54
Abbildung 94: Aufsatzrohr	54
Abbildung 95: Gummischnur	55
Abbildung 96: Wellendichtring (maagtechnics.ch)	55
Abbildung 97: Schnitt von Wellendichtring mit 2 Lippen (maagtechnics.ch).....	55
Abbildung 98: Schrägkugellager (rs-online.com)	55
Abbildung 99: Einpressmuttern (spirol.com)	55
Abbildung 100: Slicer-Programm.....	57
Abbildung 101: Stützstruktur.....	57
Abbildung 102: Losgelöste Stützstruktur.....	57
Abbildung 103: Gehäuse unter Wasser	58

Abbildung 104: Deckel auf Gehäule	58
Abbildung 105: Motordummy	58
Abbildung 106: Kabelabdichtung mit Kabel	58
Abbildung 107: Gummischeiben	58
Abbildung 108: Deckel.....	58
Abbildung 109: Standbohrmaschine	59
Abbildung 110: Verbundene Bauteile	59
Abbildung 111: Spannungswandler	59
Abbildung 112: Schema mit Aufwärts- und Abwärtsrichter hintereinandergeschaltet.....	60
Abbildung 113: Messungen	60
Abbildung 114: Tests mit Aufwärtswandler	61
Abbildung 115: Finales Elektroschema.....	61
Abbildung 116: Bauteile im Rucksack.....	62
Abbildung 117: Auslegeordnung.....	62
Abbildung 118: Aufbau im Garten.....	63
Abbildung 119: Aufbau in höherer Lage	63
Abbildung 120: Hering in der Erde.....	63
Abbildung 121: Auslegeordnung für Windturbine.....	63
Abbildung 122: Drehendes Rad.....	64
Abbildung 123: Turbine im Bach.....	64
Abbildung 124: Montage.....	64
Abbildung 125: Auslegeordnung Wasserturbine	64
Abbildung 126: Wasserrad mit Kanal.....	64
Abbildung 127: Kaplan turbine Neu-Alt.....	66
Abbildung 128: Rotornabe Neu-Alt	66
Abbildung 129: Schleifkontakt	66
Abbildung 130: Werkstatt	68
Abbildung 131: Drehbank	68
Abbildung 132: Standbohrmaschine	68
Abbildung 133: Prusa XL.....	69
Abbildung 134: Weller Lötstation	69
Abbildung 135: Prusa MK3.....	69
Abbildung 136: Labor Netzteil.....	69
Abbildung 137: Anemometer	69
Tabelle 1: Risikotabelle	9
Tabelle 2: Referenzwerte	28
Tabelle 3: Maximale Referenzwerte	28
Tabelle 4: Präferenzenmatrix.....	30
Tabelle 5: Stoffdichten.....	35
Tabelle 6: Referenzwerte	35
Tabelle 7: Leistung und Drehzahl	41
Tabelle 8: Produktionszeiten	56
Tabelle 9: Spannungstest.....	60
Tabelle 10: Spannungswandler in Serie	61
Tabelle 11: Kostentabelle	68

Reflexion

Kontrolle Zielerreichung

Mit unserer Projektarbeit beabsichtigten wir ein Produkt zu konstruieren, welches in ihrer Form neuartigen Charakter hatte. Die meisten Ideen, die wir hatten, waren aber Varianten von bereits existierenden Produkten. Als wir die Idee von einer Wind-Wasserturbine prüften, konnten wir nur ein einziges Produkt ausmachen. Das Hauptanliegen unserer Arbeit war deshalb herauszufinden, ob die Kombination einer Wasser- und Windturbine möglicherweise Nutzungspotential zwecks Stromerzeugung hätte. Dazu haben wir einige Ziele gesetzt, welche beim Erreichen diese These stärken sollten.

Da die Turbine für unterwegs in freiem Gelände geeignet sein sollte, musste sie kompakt sein. Unser Produkt erfüllte diese Anforderung, da es bequem von Ort zu Ort (bei unseren Feldtests) in einem Rucksack mitgetragen werden konnte. Remo hat das Produkt gar mit dem Motorrad sicher zum ersten Standort transportiert. Darauf mussten wir unsere Wind-Wasserturbine zu Fuss zu einem Bach im Wald bringen und später irrten wir damit in einem Dorf umher, um einen geeigneten Platz zu finden. Auch auf dem Regensberg wechselten wir mit unserem Produkt mühelos einige Male den Standort. Der Aufbau an den verschiedenen Standorten verlief reibungslos. Die kleinen Anpassungen der Windturbinennabe hatte sich im Nachhinein gelohnt, da sich diese beim ersten Versuch nur schwer montieren und demontieren liess. Nun funktioniert sie optimal.

Die Technischen Anforderungen erfüllte die Turbine im Grossen und Ganzen recht gut. Wir konnten bei den vorgegebenen Drehzahlen die 5-Volt-Ausgangsspannung erreichen. Dass der Prototyp wasserdicht ist, bewies er nicht nur im Testbecken, sondern auch an den vielen Stellen, wo wir ihn ins Wasser tauchten, um ihn zum Drehen zu bringen.

Wir haben für die Werte der Umweltbedingungen Annahmen getroffen, wie sie bei einem serienreifen Produkt gewünscht wären. Daher hatten wir diese schon bei der Präferenzen Matrix als sehr gering eingestuft, da wir nicht in der Lage waren, das Modell mit diesen Werten zu testen. Luftfeuchtigkeit und Regen sollte aber kein Problem darstellen, da unser Produkt ja wasserdicht ist.

Die Kosten von 500 Franken haben wir leider um 80 Franken überschritten. Unser festgelegtes Budget sollte uns vor allem von zu hohen Kosten schützen und auch garantieren, dass solch eine Turbine für einen Kunden im erschwinglichen Rahmen erhältlich sein soll. Bei der Bauteilwahl setzten wir vor allem die Priorität auf die Funktionalität. Daher verwendeten wir eher Teile, die dieser gerecht wurden.

Insgesamt sprechen aber die Ergebnisse dafür, dass diese Art von Energieerzeuger Potential besitzt. Die drei Hauptziele konnten wir umsetzen:

1. Wir bauen mindestens zwei funktionierende Varianten zur Energiegewinnung.
2. Eine davon soll mit Hilfe eines Adapters elektrische Energie aus Wasserkraft gewinnen können.
3. Das ganze Konstrukt soll mit einem handelsüblichen Rucksack mitgeführt werden können.

Für die von uns nicht behandelten Frage, wie viele Abnehmer sich dafür finden würden, bräuhete es eine separate Marktforschung, falls es einmal zum Ziel werden sollte, die Turbine in Serie umzusetzen. Wir selbst haben weiterhin privat Interesse daran, dieses Projekt noch weiterzuführen. Während des ganzen Arbeitsprozesses fiel es uns teilweise schwer, einige Dinge nicht einfach noch weiter optimieren zu können, da uns die Zeit gefehlt hat.

Lessons learnt

Wir haben uns dafür entschieden, die Diplomarbeit zu zweit zu machen. Die Zusammenarbeit hat sehr gut funktioniert und wir haben uns in verschiedenen Bereichen hervorragend ergänzt. Eine regelmässige Kommunikation war über die ganze Arbeit hinweg ein ausserordentlich wichtiger Punkt. Missverständnisse konnten dadurch vermieden oder dann schnell ausgeräumt werden. Es war unerlässlich, dass wir uns von Zeit zu Zeit vor Ort getroffen und das weitere Vorgehen besprochen haben. Da wir ein physisches Gerät entwickelt haben, musste auch viel konstruiert und skizziert werden. Die Abstimmung war hierbei sehr wichtig, vor allem, wenn die verschiedenen Konstruktionen zusammengeführt werden mussten. Der Einsatz von verschiedenen 3D-Druckern war für dieses Projekt optimal. Wir waren dadurch sehr flexibel und konnten schnell Anpassungen an getesteten Bauteilen vornehmen. Es gab viele kleine Änderungen, die wir umgehend mit einer Korrektur im CAD und einem Wiederholungsdruck beheben konnten. Oft handelte es sich um massliche Anpassungen, damit Passungen genauer wurden und Verbindungselemente wie Gewindehülsen, eingepresst werden konnten. Zudem gab es auch konstruktive Korrekturen, um z.B. die Kerbwirkung zu minimieren oder scharfe Ecken und Kanten zu beheben. Das interdisziplinäre Thema, welches wir behandelt haben, war enorm spannend und umfangreich. Wir erhielten theoretische sowie auch praktische Einblicke in verschiedene Bereiche, welche für uns neu waren. Wir haben z.B. zum ersten Mal ein wasserdichtes Gerät konstruiert, wobei viele Aspekte zu beachten waren. Die Recherchearbeit und Lösungssuche waren manchmal mühsam und langwierig. Wir haben dabei gemerkt, dass es durchaus Sinn macht, Fachpersonen anzufragen, um von deren Fachwissen zu lernen und zu profitieren. Dies war vor allem im Bereich der elektronischen Bauteile und bei der Motorwahl der Fall. Die Fachleute konnten auch gute Ratschläge geben, wo die Produkte zu finden sind und wie sie einzusetzen sind. Bei der Recherche über diese Themen haben wir jedoch einiges an wertvoller Zeit verloren. Immerhin können wir nun die Datenblätter dieser Produkte um einiges besser interpretieren als vor dieser Diplomarbeit. Eine Herausforderung dieser Arbeit war der Bereich der Strömungslehre. Bei den Berechnungen haben wir gemerkt, dass es schnell tief in die Materie hineingeht. Es gibt viele Parameter, die zu berücksichtigen sind, wenn man ein präzises Ergebnis erhalten will. Durch die lange Recherche und die Abklärungen hat uns am Ende die Zeit für einen vollumfänglichen Test im idealen Gebiet gefehlt. Hier müssten wir in Zukunft mehr Zeit einberechnen.

Nutzung von Künstlicher Intelligenz

Die KI-Programme, mit welchen sich mühelos Antworten auf schwierige Fragen finden lassen (und beeindruckende Bilder mithilfe von Beschreibungen erstellt werden können oder schnell verschiedene Varianten für ein Bauteil konstruiert werden) haben einen steilen Aufstieg erlebt. In kürzester Zeit haben diese Programme den Schulalltag oder auch das Ausleben der Kreativität auf den Kopf gestellt. Sogar in der Berufswelt ist die KI angekommen und wird eingesetzt, um in Rekordzeit z.B. ein Programm für einen Microcomputer zu schreiben. Die KI bringt sehr viele Vorteile und kann helfen, Arbeiten effizienter zu verrichten, sowie die Inspiration zu fördern. Der Nutzer gelangt schnell zu Ergebnissen, für die er sonst Stunden mit Recherche aufwenden müsste. Wenn wir im Gegensatz etwas googeln, ist es manchmal schwierig, auf Anhieb die Antwort zu bekommen, nach der man sucht. Es gibt jedoch einiges zu beachten. Bei der KI z.B. Chat GPT ist das anders. Die Antwort kommt schnell, präzise und umfangreich. Es ist sogar möglich, Tabellen und Bilder erstellen zu lassen. Es ist auch eindrücklich, wie sich die KI die Diskussionsverläufe merkt und sich auf früher Geschriebenes beziehen kann. Wir dürfen der KI jedoch nicht einfach blind vertrauen und alle Antworten für richtig anschauen. Die Ergebnisse sind eigenständig mit legitimen Quellen zu überprüfen. Denn die KI nimmt das Wissen aus unzähligen Quellen und errechnet die grösste Wahrscheinlichkeit für eine «sinnvolle» Wortreihenfolge. Es hat sich schon oft herausgestellt, dass die KI in den Antworten fehlerhafte Aussagen macht und Informationen vermischt. Es gibt unzählige Beispiele, in welchen Fehler und Unstimmigkeiten nachgewiesen werden

konnten. Die KI kann auch verwendet werden, um Texte auf die Grammatik zu überprüfen oder in einem bestimmten Stil umzuschreiben.

In dieser Arbeit kam die KI nur punktuell zur Anwendung. Sie wurde bei der Recherchearbeit verwendet oder um auch unbekannte Zusammenhänge oder Vorgänge erklären zu lassen. Man kann mithilfe der KI schnell eine Übersicht bei komplexen Themen oder Abläufen gewinnen, in dem die KI strukturierte Auflistungen abliefern. Der Gebrauch der KI muss in dieser Arbeit deklariert werden. Bei der Verwendung der Antworten der KI müssen auch die vorangehenden Fragen angegeben werden.

Wichtig ist, dass wir uns bewusst sind, wie wir mit dem Gebrauch der KI umgehen. Sie soll ein Werkzeug und eine Unterstützung sein und kann niemals das endgültige Ergebnis liefern. Die KI wird in Zukunft nicht mehr wegzudenken sein. Sie hält auch schon Einzug in Programme wie CAD, Sprachverarbeitung oder Programmierhilfen. Auch Microsoft Word, mit der diese Arbeit geschrieben wurde, benutzt KI für die Rechtschreibung. Es ist also wichtig sich mit dieser Technologie auseinanderzusetzen und zu wissen, wie man sie einsetzt und wo die Grenzen sind.

Schlusswort

Dieses Projekt erwies sich für uns als sehr interessant und wir konnten dabei viel über Elektrotechnik und die physikalischen Abläufe von Wind und Wasserturbinen lernen. Wir wussten nicht, wie gut unsere These, zwei verschiedene Stromerzeuger zu kombinieren, funktionieren würde. Wir sind daher selbst von den Ergebnissen positiv überrascht und freuen uns, dass diese Kombination möglich ist. Wie gesagt, ist dieses Projekt für uns persönlich noch nicht vorbei. Wir haben Interesse, dieses noch weiterzuführen und zu verbessern.

Wir möchten uns bei allen bedanken, die uns während dieser Arbeit unterstützt haben. Allen voran Detlef Jüsten, der unsere Arbeit betreut und uns stets wertvolle Rückmeldungen gegeben hat.

Zudem möchten wir uns bei El.ing. Martin Märki bedanken, welcher uns viel über die Energieerzeugung von Luft und Wasser und auch vieles über DC-DC-Wandler und deren Zusammenhänge erklärt hat.

Anschliessend bedanken wir uns bei der Firma Maxon, welche uns einen Elektromotor zur Verfügung gestellt hat und bei allen Mitarbeitern, die uns mit ihrer Expertise weiterhelfen konnten, namentlich Herr Josef Berchtold und Herr Walter Schmid.

Ein grosser Dank gilt auch dem Naturhistorischen Museum der Universität Zürich für die Möglichkeit zur Benutzung der Mechanischen Werkstatt, der 3D-Drucker und der Zerspanungsmaschinen.

Wir bedanken uns bei Carine und Urs Schellenberg, welche den Text sprachlich korrigierten.

Auch geht ein Dank an Patrizia Horvat, für wertvolle Inputs und die Unterstützung beim Layout dieser Arbeit.

Klassifizierung und Eigenständigkeitserklärung

Bei der betreffenden Diplomarbeit handelt es sich um eine öffentliche Arbeit.
Diese darf daher von Dritten eingesehen werden.

Wir bestätigen hiermit, dass die vorliegende Arbeit von uns eigenständig verfasst wurde und
verwendeten Quellen als solche deklariert wurden.
Diese Arbeit ist einmalig und wurde nicht in einer ähnlichen Form einer anderen
Prüfungskommission vorgelegt oder veröffentlicht.

Wir stimmen hiermit zu, dass die vorliegende Arbeit auf Plagiate überprüft wird.

Zürich, 23.10.2024

Ort, Datum



Unterschrift des Studierenden

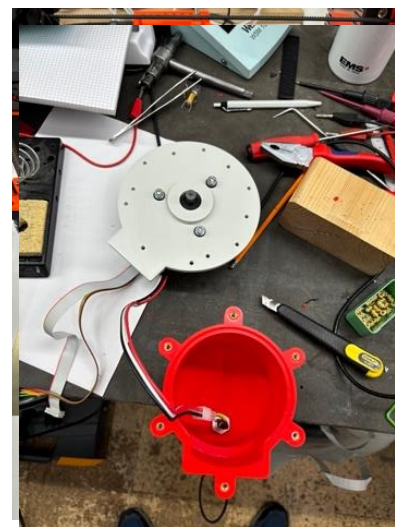
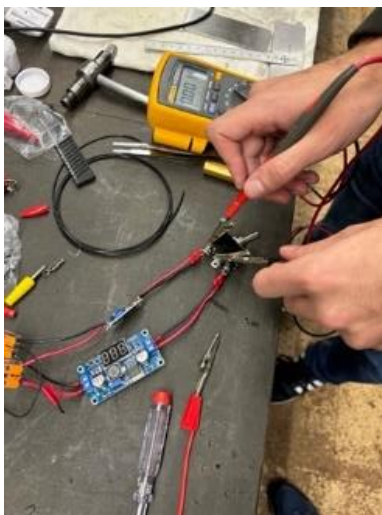
Zürich, 23.10.2024

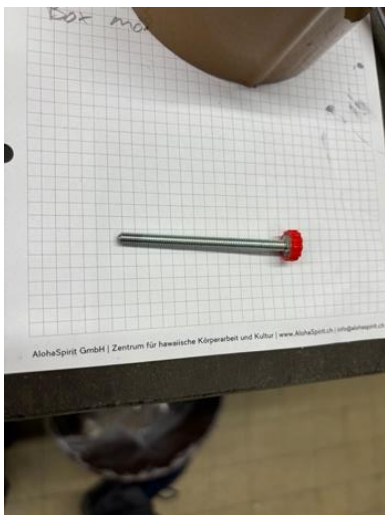
Ort, Datum



Unterschrift des Studierenden

Anhänge

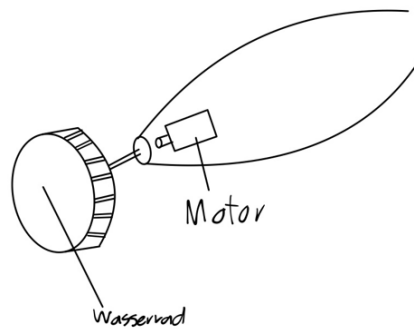
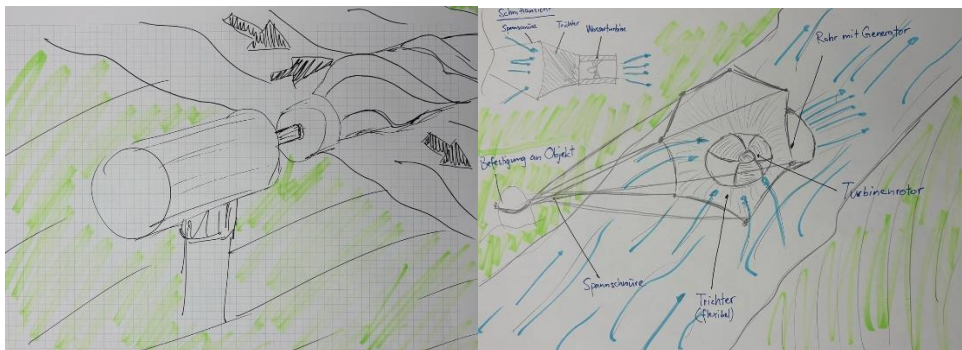








Skizzen Windturbine



	LM2577 Aufwärtswandler	Nur Motor	Buck Boost	XL6009
105	1.5 1.7	18	—	1.1
210	2.8	48	—	50
350	8.0	87	5.05	11
445	10.7	11.9	5.05	
700	17.8	18.6	5.05	
890	24.1	24.0	5.05	
1450	31.57/33	20.0*	5.05	
2900				

	SY8205 7-24V to 5V 4A Step down Converter	LM2596
105	—	—
210	—	3.65
350	4.76	4.76 5.0
445	4.76	5.0
700	4.77	5.0
890	4.77	5.2
1450	—	5.2
2900	—	—

00x

05x

012

50V

	XL6009 LM2596		XL6009 SY8205	Buck Boost XL6009	
105	-	-	-	-	-
210	5*	5	4.8**	-	-
350	5.2	5.2	-	5.2	5
445	5.2	5.2	-	5.2	5
700	5.2	5.2	-	5.2	5
890	5.2	5.2	-	5.2	5
1450	5.2	5.2	-	5.2	5
2900					

* ~~Abgemessen~~ ~~Abgemessen~~ * Zusammen angeschlossen
 ** ~~Abgemessen~~ ~~Abgemessen~~ gemessen

Protokoll Zwischengespräch 15.07.2024

Schweizerische
Fachschule
TEKO

Zürich 15.7.24
Coach: Detlef Jüsten
Diplomanden: Joel Schellenberg
Remo Antenori

Protokoll der 1. Besprechung Diplomarbeit

- Dichte der beiden Medien (Luft/Wasser) berücksichtigen → Annäherung der beiden Medien für „Kompromiss“ der Wasser-Windturbin
- Pflicht- und Lastenheft: Dichtigkeit des Produkts angeben
- Windfang: Abwägen ob es ihn braucht → Argumentation der Entscheidung
- KI → Quelle angeben
↳ genaue Frage angeben und Abschnitt ausweisen.
↳ evtl. auch farblich markieren.
- Wenn Umfang nur 80% des Soll → auch ok
- 26.7 - 6.8 DJ abwesend.
- Martin Märki (Elektroing.) als Quelle angeben
↳ wenn in Anspruch genommen
- Rudolf Koller } → Methodisches Konstruieren
- Pahl & Beitz }
- Konstruieren: Nicht Trial & Error sondern „Roter Faden“ von Anfang an

15.07.24 Joel Schellenberg

Prinzip

- Ursache - Wirkung (Physik?)
(Formel dahinter)

Unterschiede Wasser-Wind in unserer Situation
(Unterschiedliche Medien) Leitschaufel, Turbine

Wasser Wind (in welcher Situation währen sie sich an?)
Dichte Wind / Strömungsgeschwindigkeit

Wichtig Winde Wasserkraft annäherung
Zuerst Formel in Physik umsetzen

Im Modellbau nachschauen
Durchmesser → Steigung

Wie unterscheidet sich unser Produkt von der
Konkurrenz

Zeitplanung über die ganze Zeit

Nicht zu tief in die Strömung reingehen

Im Lasten heft kann zum Beispiel Wasserdichte
ausgeschlossen werden

Bei jeder Anwendung/Funktion argumentieren
Braucht es Windfang? art mit automatischer

Anstatt Rücksok transportgestell^{Ausrichtung}
(da definition offener)

Roter Faden ist sehr wichtig

15.07.24 Joel Schellenberg

KI darf genutzt werden, aber als Quelle
dokumentieren (Fragestellung)
Vlt auch noch schreiben wo sind Vor-/Nachteile
davon 1-2 Seiten über KI schreiben
- Wie wurde KI gefragt?

Weniger ist mehr → knackig formuliert (z.B. 30 Seiten)
nicht 200 Seiten)

Detlef zählt nicht Anzahl Worte 80% von Sollwert ist ok

Kommunikation: Verständnisfragen sind ok
2. Termin sinnvoll wählen um andere Fragen zu klären
~~30~~

Min 2 Variante, min eine Wasser, eine Luft
Dürfen auch mehr sein
Einmal soll es im Wind und einmal im Wasser
funktionieren. Wie ist egal

Interview möglich, einfach bei Quellen angeben

Gibt es Kennlinie zu Kraft-Energie

Roter Faden ist sehr wichtig

Rudolf Koller - Methodische
Pahl/Beitz

Microside Termin einhalten

2 Blöcke

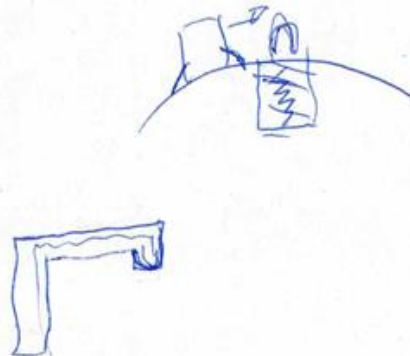
Arbeit reicht per Email (PDF)

Also nichts drucken

Protokoll Zwischengespräch 23.09.2024

Zweites Gespräch

- ✓ • Wie relevant ist es, ob die Turbinen genug Spannung generieren? → Es geht mehr um die Erkenntnis
- ✓ • Werden wir die Präsentation zu zweit halten? 3dmin + ca 7min Frageminute
- ✓ • (Anzahl Wörter?) → viel CAD, 3D Druck + Testing nicht relevant
 - Was wenn z.B Wasserturbine keinen elektrischen Strom generiert? "Erkenntnisse"
 - Quellen: Wie genau Quellen ausweisen im Kerntext? (Nach jedem Absatz oder wenn wieder neue Quelle benutzt wird?)
- ✓ • Wenn praktischer Teil nicht funktioniert wie gewollt, kann man es mit dem theoretischen Teil abfangen? (Erkenntnisse, Argumente, Entscheidungsbegründung) z.B. Schwierigkeit einen möglichst passenden Motor zu finden "Erkenntnisse"
- Für viele Angaben und Parameter mussten Werte festgelegt werden → mögliche Fehlerquellen und Ungenauigkeiten.



Die genauen Fragen, welche wir der KI stellen

↳ konkreter

Worte werden nicht gezählt → kein Einfluss auf Bewertung

Volumenstrom → Unterschiede der Beiden Varianten

Dichte, Volumenstrom

Wie ändert sich zum Beispiel der Winkel der Turbinen

dieser Zusammenhang mit zwei Graphen darstellen

Volumenstrom bei einem Rohr, gleiche Geometrien,

aber einmal Wasser, einmal Luft

Das unterschieds-Verhältnis darstellen → abhängig

von Rotorlänge der Windturbinen, daraussfolgend

die korrekte Wasserturbine auslegen

Leistungsformel passt, nachfolgende Berechnungen

sollen aber zurückrechenbar sein

Mal feuchte gesättigte Luft (Dampf) einnehmen

Im besten Fall ist Ausgangsleistung von Luft gleich

wie die im Wasser

Abgrenzen

Im Fazit Erkenntnisse der Differenzen von

Wind/Wasser erklären

Volumendurchsatz Wasserturbine auf Wasserturbine

hochrechnen

Bei exel zum Beispiel mit Durchmesser spielen

Graphen erstellen

Parameter Zusammenbringen

Energiekurven zusammen z.B. Leistung / Dimension

Flugzeug Papeller → unten / oben Verstellung
Winkel Rotorblätter

• Verschiedene Dichte Luft aufzeigen

• Muss sich alles sauber zurückrechnen lassen.

→ Leistungsformel

→ Verhältnisse

Wie beeinflusst unser Einstellen das Resultat
↳ Muss konsistent sein

• Auf die Leistung gleiche

P_{Luft} P_{Wasser} →

• Momentkurve der beiden Fluide
am Anfang nah (wenig Nm) danach schnell
auseinander.

Vorschlag Diplomarbeit

Schweizerische
Fachschiule

TEKO

Vorlage Themeneingabe

Fachrichtung	Maschinentechnik
Klasse	Z-TMA-21-T-a
Name	Antenori / Schellenberg
Vorname	Remo / Joel
E-Mail	remo.antenori@edu.teko.ch joel.schellenberg@edu.teko.ch

Vorschlag Diplomarbeit

Diplomwunsch	Bau einer mobilen Windturbin
Themabeschreibung	In der heutigen Zeit sind Alternativen zur Energiegewinnung gefragt. Jeder Schritt in diese Richtung trägt zu einer nachhaltigeren Umwelt bei. Es gibt viele interessante Möglichkeiten dafür. Da wir gerne Outdoor unterwegs sind, entwickeln und bauen wir eine Windturbin, welche einfach mittels Rucksack mitgeführt werden kann. Das heisst sie soll so kompakt wie möglich und so leicht wie möglich gebaut werden. Diese kann, um kleine Verbraucher wie Taschenlampen oder auch Akkus aufzuladen, z.B. beim Camping, bei Ausflügen oder beim Wandern verwendet werden. Jedoch wird sie nicht konzipiert um grössere Geräte mit Strom zu versorgen. So kann man sich in der Natur unabhängiger und auch länger aufhalten. Um dies zu bewerkstelligen, möchten wir verschiedene Varianten entwickeln und austesten. Wir wollen möglichst viel an dieser Windturbin selber herstellen und nur Einheiten und Bauteile zukaufen welche sich nicht gut selber herstellen lassen. Die Entwicklung dieser Windturbin enthält auch die dazugehörige Halterung für den Betrieb.
Kunde	Wir selbst haben Interesse an diesem Produkt und sicher auch weitere Outdoor Begeisterte. Im besten Fall entsteht durch dieses Projekt auch ein Produkt, welches man auf dem Markt anbieten könnte.
Erfolgskriterien	Ziele: -Wir bauen mindestens zwei funktionierende Varianten zur Energiegewinnung. -Eine davon soll mit Hilfe eines Adapters elektrische Energie aus Wasserkraft gewinnen können. -Das ganze Konstrukt soll mit einem handelsüblichen Rucksack mitgeführt werden können. Die Aufteilung bei den Arbeiten wird ziemlich ausgeglichen sein. Wir werden beide mithilfe von CAD Programmen Bauteile konstruieren und diese dann auch auf einem 3D-Drucker ausdrucken und zusammenbauen. Zudem haben wir Zugang zu einer Werkstatt in welcher wir übliche mechanische Arbeiten ausführen können. Allfällige Aufträge an Dritte, sowie Bestellungen werden wir beide zusammen ausarbeiten.
Wunsch Diplomcoach	1. Detlef Jüsten 1. Nicolas Stankowski
Wunsch Diplomexperte	1. Nicolas Stankowski 1. Detlef Jüsten
Klassifizierung Diplomarbeit	<input checked="" type="checkbox"/> Öffentlich: Meine Diplomarbeit darf mit Quellenangabe veröffentlicht werden <input type="checkbox"/> Privat: Meine Diplomarbeit ist privat und darf TEKO Intern genutzt und nur nach schriftlicher Einwilligung mit Quellenangabe veröffentlicht werden <input type="checkbox"/> Vertraulich: Meine Diplomarbeit ist vertraulich und ich erstelle eine Vertraulichkeitsvereinbarung nach den Richtlinien der TEKO und meines Auftragsgebers, welche von allen Parteien (Diplomand, Auftragsgeber, Schulleitung, Diplomcoach und Diplomexperte unterzeichnet werden muss) Geheim: Als Geheim deklarierte Diplomarbeiten werden von der TEKO abgelehnt

Wird vom Abteilungsvorstand ausgefüllt:

Bewilligt	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein, Begründung:
Datum	19. Juni 2024
Unterschrift Abteilungsvorstand	
Unterschrift Schulleitung	