

BACHELORTHESIS  
Allaa Faham

# Eine interaktive Visualisierung der durch Windkraftanlagen erzeugten Leistung in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern

---

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK  
Department Informations- und Elektrotechnik

Faculty of Computer Science and Engineering  
Department of Information and Electrical Engineering

Allaa Faham

Eine interaktive Visualisierung der durch  
Windkraftanlagen erzeugten Leistung in  
Abhängigkeit von verschiedenen Parametern

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang *Bachelor of Science Regenerative Energiesysteme und Energie-  
management*  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Karin Landenfeld  
Zweitgutachter: Prof. Dr. Michael Röther

Eingereicht am: 18.März 2022

**Allaa Faham**

**Thema der Arbeit**

Eine interaktive Visualisierung der durch Windkraftanlagen erzeugten Leistung in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern

**Stichworte**

Interaktive Visualisierung, Windenergie, Windkraftanlagen, Rauigkeit, Simulation

**Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit beschäftigt sich damit, die Abhängigkeiten zwischen den Rauigkeiten der Erdoberfläche, den Windgeschwindigkeiten, und der Leistung der Windkraftanlagen durch eine aktive Visualisierung darzustellen. Dabei werden zuerst die technischen Grundlagen erläutert. Die verwendeten Formeln sind aufgelistet und erklärt. Die verschiedenen Implementierungsmöglichkeiten werden diskutiert und verglichen. Mit den Programmiersprachen HTML/CSS/JavaScript wird die Visualisierung umgesetzt. Diese Dokumentation enthält den Aufbau des Programmes und dessen Ablauf.

---

**Allaa Faham**

**Title of Thesis**

An interactive visualization of the power generated by wind turbines depending on various parameters

**Keywords**

Interactive visualization, wind energy, wind turbines, roughness, simulation

**Abstract**

This work deals with the visualization of the dependencies between the roughness of the earth's surface, the wind speeds and the power of the wind turbines. The technical basics are explained first. The formulas used are listed and explained. The various implementation options are discussed and compared. The visualization is implemented with the programming languages HTML/CSS/JavaScript. This documentation contains the structure of the program and its sequence.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>viii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ziel der Arbeit . . . . .	2
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .	2
<b>2 Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1 Klimawandel und Energiewende . . . . .	4
2.2 Windenergie . . . . .	5
2.3 Windgeschwindigkeiten . . . . .	6
<b>3 Technische Grundlagen</b>	<b>7</b>
3.1 Windleistung . . . . .	7
3.1.1 Betzsches Gesetz . . . . .	8
3.2 Die atmosphärische Grenzschicht . . . . .	9
3.3 Rauigkeit und Rauigkeitslänge . . . . .	10
3.3.1 Berechnung der Rauigkeitslänge . . . . .	12
3.4 Vertikales Temperaturprofil . . . . .	12
3.4.1 Labile Schichtung . . . . .	12
3.4.2 Stabile Schichtung . . . . .	12
3.4.3 Neutrale Schichtung . . . . .	13
3.5 Höhenprofil des Windes . . . . .	13
3.5.1 Potenzsatz nach Hellmann . . . . .	14
3.5.2 Logarithmische Höhenformel . . . . .	14
3.6 Berechnung der Anzahl der versorgten Häuser . . . . .	15
3.7 Spezifikationen der gewählten Windkraftanlage . . . . .	17
3.7.1 Regelung der Anlage . . . . .	17

<b>4</b>	<b>Softwaretechnische Implementierung</b>	<b>20</b>
4.1	Implementierungsmöglichkeiten . . . . .	20
4.2	Spiel-Engine . . . . .	20
4.2.1	HTML/CSS/JavaScript . . . . .	22
4.2.2	Wahl der Implementierungsmethode . . . . .	23
4.3	Umsetzung der Visualisierung . . . . .	24
4.3.1	Seiten der Visualisierung . . . . .	25
4.3.2	Plotly.js . . . . .	28
4.3.3	Verwendete Bilder und Rechte . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Darstellung der Szenarien</b>	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>34</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	34
6.2	Ausblick . . . . .	34
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>36</b>
<b>A</b>	<b>Quellcode</b>	<b>39</b>
A.1	index.html . . . . .	39
A.2	location.html . . . . .	40
A.3	city.html . . . . .	41
A.4	prototype.js . . . . .	42
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>45</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Zeitliche Entwicklung der installierten on- und offshore Windleistung [21]	5
2.2	Bruttostromerzeugung 2018 [21]	5
2.3	Windzonen nach DIBt in Deutschland [3]	6
3.1	Idealisierte Strömung nach Betz [25]	8
3.2	Die atmosphärische Grenzschicht geteilt in 3 Schichten [9]	9
3.3	Die Abhängigkeit zwischen Temperatur und Höhe in den drei Schichten des vertikalen Windprofils [25]	13
3.4	Vollaststunden verschiedener Energieerzeugungsarten [11]	16
3.5	Strömungsverhältnisse am Rotorblattprofil einer Stall- und Pitch-geregelten Windkraftanlage [16]	18
4.1	Struktur des Programms	24
4.2	Startseite	25
4.3	Standortseite	26
4.4	Simulationsseite	27
4.5	Ablauf des Programms	28
4.6	Bilder, die in der Visualisierung benutzt werden	29
5.1	Vergleich der Szenarien mit den gleichen Parametern	32
5.2	Vergleich der Szenarien bei der maximalen Leistung der Anlage und einer festen Höhe	33

# Tabellenverzeichnis

3.1	Rauhigkeitsklassen und Rauhigkeitslängen für verschiedene Oberflächen- charakteristiken . . . . .	11
3.2	Spezifikationen der simulierten Windkraftanlage . . . . .	17
4.1	Projekt, die mit Unity erstellt wurden . . . . .	21
4.2	Vergleich der Implementierungsmöglichkeiten . . . . .	23

# 1 Einleitung

Das Visualisieren von wissenschaftlichen Inhalten ist in der heutigen Zeit zu einer der wichtigsten und meistbenutzten Informationsquellen geworden. Beispielsweise dienen Abbildungen, Powerpoint Folien, Bilder oder auch interaktive Simulationen dazu, Informationen und komplexe Zusammenhänge auf eine anschauliche und verständliche Art darzustellen. Das Darstellen der Informationen durch Bilder und Videos reicht in manchen Fällen nicht aus, um die Lerninhalte erfassbar zu vermitteln. Eine interaktive Simulation ist ein Stil oder eine Methode, die die Übertragung von Informationen in den Köpfen der Studierenden vereinfacht und erleichtert. Der Einsatz von Simulationssoftware, Tools und Spielen kann den Lehr- und Lernprozess bereichern. Fortschritte sowohl bei der Computerhardware als auch bei der Software ermöglichen den Einsatz innovativer Methoden, um die Lernerfahrung zu verbessern. Studierende der Naturwissenschaften, Technik, Ingenieurwissenschaften und Mathematik (MINT) müssen sich mit komplexen Modellen realer Systeme auseinandersetzen. Durch interaktive Simulationen können Szenarien durchgespielt werden, die schwierig und kostenspielig umzusetzen sind. Außerdem können Simulationen in einigen Fällen als eine Sicherheitsmaßnahme dienen, da die Fehler durch Simulationen im wirklichen Leben vermieden werden können. Darüber hinaus können diese E-Learning Möglichkeiten dank der Globalisierung Studenten aus verschiedenen geografischen Regionen und Universitäten zur Verfügung gestellt werden [20].

Im Bereich der Energietechnik werden ebenfalls Simulationen eingesetzt, um verschiedenen Szenarien darzustellen. Simulationen für Windenergieanlagen dienen zum Beispiel dem Verständnis der Physik von Windkraftanlagen und der Rotordynamik oder für die Optimierung der Parameter, von denen die Leistung der Windkraftanlage abhängt. Simulationen von Solaranlagen können zum Beispiel bei den Berechnungen der jährlichen Ertragsabschätzung helfen.

### 1.1 Ziel der Arbeit

Mit dieser Arbeit wird eine interaktive Visualisierung implementiert. Diese Visualisierung konzentriert sich darauf, das Lernmodul “Regenerative Energien durch Sonne und Wind – verstehen leicht gemacht” zu komplementieren. In dem Lernmodul werden physikalische Themen rund um die regenerativen Energien Sonne und Wind und ihre Integration in das Stromnetz verständlich erklärt und anschaulich dargestellt. Zum Beispiel wird erklärt: Wie produziert eine Solarzelle Strom? Wie funktioniert ein Windrad? Wie lässt sich eine stabile Stromversorgung auf Basis erneuerbarer Energien aufbauen? In Lernsequenzen werden die Themen Photovoltaik, Windenergie sowie die Integration in das Stromsystem Schritt für Schritt erläutert. Das gelernte Wissen kann sofort mit interaktiven Aufgaben gefestigt und überprüft werden. Das Lernmodul wird über die Hamburg Open Online University (HOOU) und der Lernumgebung [viamint.de](http://viamint.de) der HAW Hamburg verfügbar sein.

Das Ziel dieser Arbeit ist eine interaktive Simulation zu implementieren, die die Abhängigkeiten zwischen der Höhe, der Rauigkeit und der Windgeschwindigkeit visualisiert. Die Visualisierung ist eine Hilfestellung, die den Lernenden ermöglicht, den Lerninhalt besser zu absorbieren und stellt kein eigenständiges Lernmodul dar.

Außerdem kann diese Visualisierung für Lehrende, Dozenten und Professoren der HAW Hamburg zur Verfügung gestellt werden. Sie kann sowohl in Lehrveranstaltungen verwendet, als auch den Studierenden zum Nacharbeiten der Lerninhalte empfohlen werden. Die Visualisierung kann ebenfalls von allen Interessierten auf der Welt verwendet werden, die die Englische oder Deutsche Sprache beherrschen, da die Lernangebote der Hamburg Open Online University offen und kostenlos sind. Die Visualisierung wird in englischer Sprache verfügbar sein

### 1.2 Aufbau der Arbeit

Insgesamt besteht diese Arbeit aus sechs Kapiteln:

Das **erste Kapitel** besteht aus einer allgemeinen Einleitung in die Thematik, dem Aufbau, der Motivation sowie der Problemstellung und Zielsetzung.

Im **zweiten Kapitel** wird auf einige allgemeine Informationen und Grundlagen über die Energiewende, Windenergie und Windgeschwindigkeiten eingegangen.

Das **dritte Kapitel** enthält die relevanten technischen Grundlagen, die für ein besseres Verständnis der Oberbegriffe, Inhalte, mathematischen Formeln und Abhängigkeiten sorgen. Hier werden außerdem auf die in der Visualisierung verwendeten Werte und Formeln hingewiesen.

Im **vierten Kapitel** werden die Implementierungsmöglichkeiten der Visualisierung diskutiert und verglichen. Darüber hinaus bietet dieses Kapitel einen tieferen Einblick in die Code-Struktur, die Seiten und den Workflow dieser Simulation.

Das **fünfte Kapitel** zeigt einen Vergleich der Szenarien in den verschiedenen Lokationen der Simulation mit den gleichen Parametern. Dieser Vergleich dient der Überprüfung der Funktionalität des Programms.

Im **letzten Kapitel** stehen abschließend das Fazit der gesamten Arbeit, der Ausblick und Verbesserungsvorschläge.

## 2 Grundlagen

Für ein besseres Verständnis dieser Arbeit werden in diesem Kapitel einige Grundlagen erklärt, auf denen diese Bachelorarbeit aufbaut. Zuerst wird in der Einleitung erklärt, dass Windenergie mit der Zeit immer mehr verwendet wird, um den Energiebedarf der Welt zu decken. Anschließend werden einige Grundlagen über Wind, Windenergie und Windkraftanlagen erläutert, die zum Verständnis der technischen Implementierung der Visualisierung dienen.

### 2.1 Klimawandel und Energiewende

Die zunehmende Erderwärmung und der Klimawandel sind seit einigen Jahren ein prä-sentes Thema in Wissenschaft, Politik und Gesellschaft. Als dominierende Ursache gelten die seit dem späten 20. Jahrhundert gestiegenen Emissionen von Kohlenstoffdioxid und anderen Treibhausgasen. Nach aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen wird die fortschreitende Erderwärmung zu Veränderungen der Stärke, Häufigkeit und der Dauer von Extremwetterereignissen führen [10].

Aufgrund der schnell wachsenden Bevölkerung und der dadurch schnell wachsende Industrieproduktion steigt der weltweite Energiebedarf. Der Energiesektor hat einen großen Einfluss auf das Klima und ohne eine globale Energiewende wird die Welt den Klimawandel nicht bewältigen können. Fossile Brennstoffe, die als primäre und am meisten verbreitete Energiequelle gelten, verursachen Probleme im Zusammenhang mit ihrem Beitrag zur Erderwärmung. Aus diesem Grund werden alternative saubere und nachhaltige Energiequellen gesucht. Regenerative Energien stellen eine der Möglichkeiten dar, von den fossilen Energieträgern und den damit verbundenen Treibhausgasemissionen abzuweichen. Neben anderen zur Verfügung stehenden regenerativen Energien weist die Windenergie in Deutschland, Europa und weltweit die größte Aufbaudynamik vor [10].

## 2.2 Windenergie

Die Erzeugung von Energie aus Windenergieanlagen entwickelt sich zu einer Hauptkomponente des Energiesystems und dominiert die regenerative Stromgewinnung in Deutschland. Die wichtigste Nutzform von Windenergie sind Windkraftanlagen, die sowohl an Land (onshore) oder auf dem Meer (offshore) installiert werden. Die Technologie hinter den Anlagen hat sich in den letzten Jahren stark entwickelt. Abbildung 2.1 zeigt die Entwicklung der installierten Windleistung in den letzten Jahren. Die installierte Leistung ist über die letzten Jahre stetig gestiegen [21].

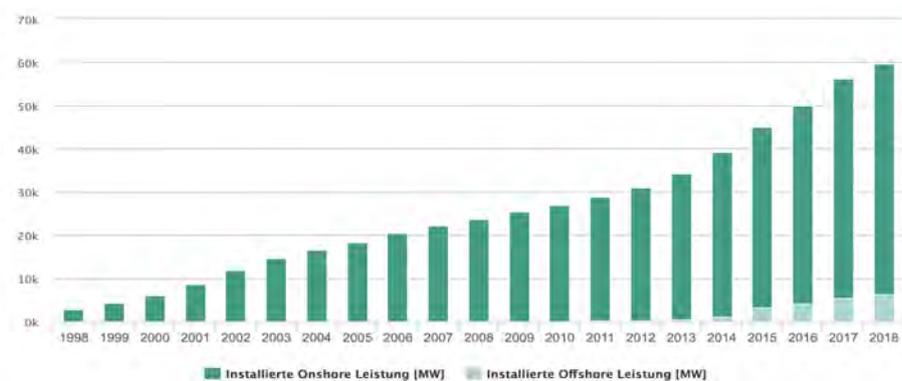


Abbildung 2.1: Zeitliche Entwicklung der installierten on- und offshore Windleistung [21]

Die Energiegewinnung aus den Windkraftanlagen entspricht, anders als bei den konventionellen Kraftwerken, selten dem bestehenden Energiebedarf, da sie durch unterschiedliche Wetterbedingungen Schwankungen ausgesetzt ist. Der Anteil des erzeugten Stroms aus erneuerbaren Energien betrug im Jahr 2018, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, 35% des gesamten erzeugten Stroms. Ca. die Hälfte dieses erzeugten Stroms wurde aus Windenergie gewonnen.

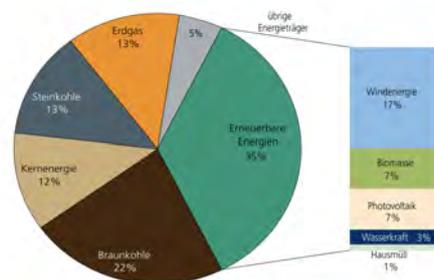


Abbildung 2.2: Bruttostromerzeugung 2018 [21]

## 2.3 Windgeschwindigkeiten

Da die Stromerzeugung einer Windkraftanlage mit der Stärke der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe in Beziehung steht, führen genaue Messungen der Windgeschwindigkeiten auf oder nahe der Nabenhöhe zu präzisen Vorhersagen der Energieerzeugung. Die Messungen können auch bei der Entscheidung, wo eine Windkraftanlage stehen soll, helfen. Damit können genaue Ergebnisse erzielt werden. Windgeschwindigkeiten sind nicht überall gleich. In Deutschland zum Beispiel wird die Karte, wie in Abbildung 2.3 angezeigt, in vier Windzonen geteilt, in denen verschiedenen mittlere Windgeschwindigkeiten herrschen. Je dunkler der Bereich auf der Karte ist, desto herrschen da schnellere mittlere Windgeschwindigkeiten [3].



Abbildung 2.3: Windzonen nach DIBt in Deutschland [3]

## 3 Technische Grundlagen

### 3.1 Windleistung

Die Leistung, die im Wind steckt, kann mit der folgenden Formel berechnet werden [25]:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (3.1)$$

mit:

P = Leistung des Windes

$\rho$  = Dichte der Luft

A = Durchströmte Fläche

v = Windgeschwindigkeit

Da es sich bei Windkraftanlagen bei der durchströmten Fläche um eine Kreisfläche handelt, kann die Formel ebenfalls wie folgt geschrieben werden:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * \pi * r^2 * v^3 \quad (3.2)$$

mit:

r = Länge Rotorblatt vom Mittelpunkt Rotornabe

Durch Abbremsung der Luftströmung durch die Rotorblätter wird die im Wind enthaltene kinetische Energie in mechanische Energie umgewandelt. Die Windleistung hängt von der Kubik der Windgeschwindigkeit. Das bedeutet, eine Verdopplung der Windgeschwindigkeit resultiert eine 8-fache Leistung der Windkraftanlage [25].

### 3.1.1 Betzsches Gesetz

Das Gesetz von Betz besagt, dass ein Motor nicht die gesamte ihm zugeführte Energie entziehen kann. Die Effizienzverluste einer Windkraftanlage werden durch den viskosen Widerstand an den Blättern, den Wirbel, der dem Luftstrom durch den Rotor verliehen wird, die Leistungsverluste in der Übertragung und dem elektrischen System verursacht [24].

Laut Betz [25] wird der Höchstwert der Energiegewinnung einer Windkraftanlage erreicht, wenn die ursprüngliche Windgeschwindigkeit  $v_1$  auf  $v_3 = 1/3 * v_1$  hinter der Windkraftanlage abgebremst wird (siehe Abbildung 3.1).

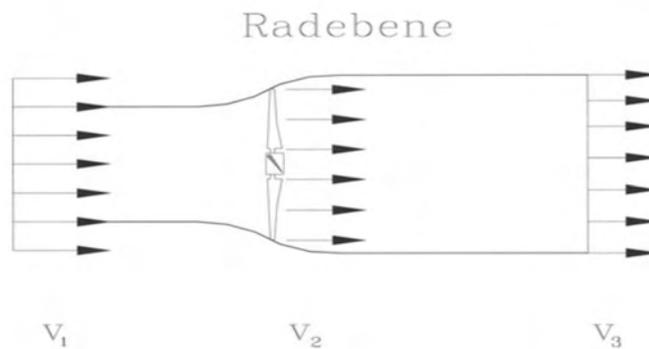


Abbildung 3.1: Idealisierte Strömung nach Betz [25]

Für die Berechnung des Wirkungsgrads einer Windenergieanlage wird die Formel in der Gleichung mit dem Leistungsbeiwert  $c$  multipliziert:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * \pi * r^2 * v^3 * c \quad (3.3)$$

wobei der höchste Wert dieses Leistungsbeiwerts  $16/27 = 0,59$  betragen kann, welcher auch Betz'scher Beiwert genannt wird. Das bedeutet, eine Windkraftanlage, die im Idealfall verlustfrei Energie produziert, kann maximal 59% der Windleistung nutzen [25].

### 3.2 Die atmosphärische Grenzschicht

Je mehr sich der Wind der Erdoberfläche nähert, desto mehr wird er von der Reibung der Oberfläche abgebremst. Dies passiert ab einer bestimmten Höhe, vor der der Wind ungestört bleibt. Der ungestörte Bereich beträgt 600 bis 2000m über dem Grund [13]. Er ist von der Tageszeit und den Wetterbedingungen abhängig. Der Bereich, in dem der Wind abgebremst wird, wird die atmosphärische Grenzschicht genannt. Je nach Rauigkeit, Windgeschwindigkeit und Temperatur ist diese Schicht unterschiedlich hoch. An klaren Tagen erstreckt sie sich ca. 100m über der Bodenoberfläche und an warmen Sommertagen bei niedrigen Windgeschwindigkeiten bis zu zwei Kilometer. Als Mittelwert wird eine Höhe von 1 Kilometer angenommen. Die Grenzschicht lässt sich in drei Schichten einteilen (siehe Abbildung 3.2) [9]. Die Luftströmung in diesen drei Schichten wird als turbulent bezeichnet.

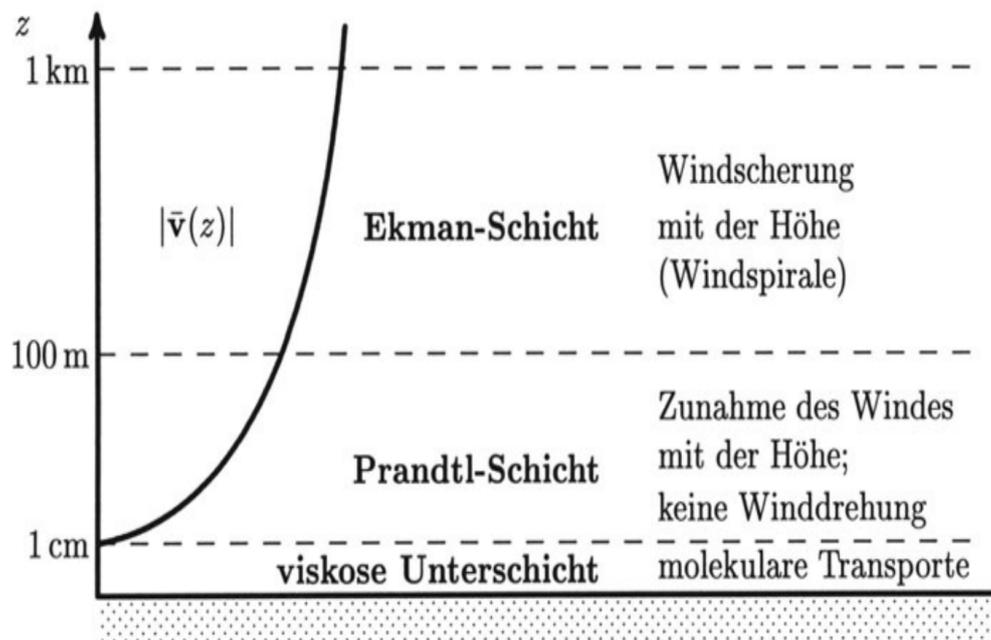


Abbildung 3.2: Die atmosphärische Grenzschicht geteilt in 3 Schichten [9]

Die **viskose Unterschicht** hat keinen Einfluss auf der Dynamik der betrachteten Grenzschicht [9] und wird aus diesem Grund nicht berücksichtigt.

Die **Ekman-Schicht** erstreckt sich bis in Höhen von einem bis zwei Kilometern. In dieser Schicht wird die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Zunahme der Höhe geringer.

An der oberen Grenze der **Ekman-Schicht** verschwinden die turbulenten Luftströmungen. Es wird der Bereich, in dem der Wind einen ungestörten Wert hat, erreicht [13].

Die **Prandtl-Schicht** erstreckt sich über eine Höhe von 100 Metern. Die Höher dieser Schicht wird häufig als fixer Prozentsatz (ca. 10%) der atmosphärischen Grenzschicht angenommen. Die Luftströmungen werden in dieser Schicht von der Reibung mit der Erdoberfläche dominiert [13]. In dieser Schicht werden die vertikalen turbulenten Flussdichten als höhnekonstant betrachtet, was zu einigen physikalischen und mathematischen Vereinfachungen führt [17]. Viele Windkraftanlagen werden in dieser Schicht gebaut. Deswegen ist es wichtig, die Änderungen der Windgeschwindigkeiten mit der Änderung der Höhe zu betrachten. Diese Änderung wird als vertikales Windprofil bezeichnet [25]. Das Windprofil hat einen direkten Einfluss auf die Energieproduktion der Windkraftanlagen und hat besondere Lasten auf den Rotor und die Gesamtkonstruktion [25]. In der Visualisierung dieser Arbeit wird die Prandtl-Schicht betrachtet.

### 3.3 Rauigkeit und Rauigkeitslänge

Die Erzeugung von Windenergie ist unter anderem von den Windgeschwindigkeiten abhängig. Windgeschwindigkeiten hängen ebenfalls von mehreren Parametern ab. Ein wichtiger Parameter, der einen direkten Einfluss auf die Erzeugung der Windenergie und auf die Entscheidung bei der Wahl deren Lokation hat, ist die Rauigkeit. Durch die Reibung der strömenden Luftmasse an der Oberfläche der Erde wird der Wind bzw. die Strömung abgebremst. Das bedeutet, je höher der Messpunkt an einem Ort liegt, desto schneller strömt der Wind. Die Rauigkeit ist ein Begriff, der die Unebenheit einer Oberflächenhöhe bezeichnet [25].

Die Rauigkeitslänge ist ein Maß für die Oberflächenrauigkeit des Geländeprofiles. Mit diesem Maß wird es möglich, die Windgeschwindigkeit in bestimmten Höhenbereichen mithilfe des logarithmischen Höhenprofils zu berechnen. Die Rauigkeitslänge  $z_0$  ermittelt die Höhe, in der der mittlere Wert der Windgeschwindigkeit theoretisch den Wert Null erreicht. Diese Vereinfachung reicht für die Berechnung der Energielieferung einer Windkraftanlage aus. Mit anderen Worten wird der Rauigkeitsparameter verwendet, um von beobachteten Windgeschwindigkeiten von einer festen Höhe, typischerweise 10m, auf eine andere festgelegte Höhe zu extrapolieren. Der Wert nimmt mit zunehmenden Hindernissen bzw. zunehmender Bebauung des Gebiets zu. Tabelle 3.1 zeigt die verschiedenen

Rauhigkeitslängen nach dem europäischen Windatlas in bestimmte Rauhigkeitsklassen für verschiedene Oberflächencharakteristiken [25].

Rauhigkeitsklassen und Rauhigkeitslängen sind Merkmale der Landschaft, die zur Bewertung der Windverhältnisse an einem potenziellen Standort einer Windkraftanlage verwendet werden. Eine hohe Rauhigkeitsklasse von 3 bis 4 kennzeichnet Landschaften, die mit Bäumen und Gebäuden übersät sind. Eine Meeresoberfläche hat eine Rauhigkeitsklasse null.

z0 [m]	Geländetyp	Rauhigkeitsklasse
1	Stadt	4
0,5	Vorstädte	3,5
0,3	Bebautes Gelände	3
0,2	Viele Bäume und/oder Büsche	3
0,1	Landwirtschaftliches Gelände mit geschlossenem Erscheinungsbild	2
0,05	Landwirtschaftliches Gelände mit offenem Erscheinungsbild	1,5
0,03	Landwirtschaftliches Gelände mit sehr wenigen Gebäuden, Bäumen usw.	1
0,01	Flughäfen, Start- und Landebahn	0,5
0,005	Blanke Erde (glatt)	0
0,001	Schneeoberflächen	0
0,0003	Sandoberflächen	0
0,0001	Wasserflächen	0

Tabelle 3.1: Rauhigkeitsklassen und Rauhigkeitslängen für verschiedene Oberflächencharakteristiken

### 3.3.1 Berechnung der Rauigkeitslänge

Einige Forscher glauben, dass ein konstanter Wert für die Rauigkeitslänge ausreichend ist. Eine Studie von Lange zeigt, dass verschiedene Methoden zum Erhalt der Rauigkeitslänge keinen signifikanten Unterschied in ihrem Wert ergeben [4]. Andererseits wird dieser Wert von anderen Wissenschaftlern als wichtiger Wert bei Berechnungen der Windgeschwindigkeit angesehen. Beispielsweise verfolgen Ueno und Deushi [13] bei deren Berechnungen der Rauigkeitslänge einen Ansatz, der die Welleneigenschaften berücksichtigt und dementsprechend andere Werte der Rauigkeitslänge berechnet.

In dieser Arbeit wird zur Vereinfachung der erste Ansatz verwendet, in dem der Wert der Rauigkeitslänge als konstant betrachtet wird und von Tabelle 3.1 übernommen wird.

## 3.4 Vertikales Temperaturprofil

Das vertikale Windprofil hat neben der Oberflächenrauigkeit ebenfalls einen Einfluss auf die Änderung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe. Das Profil wird in drei Kategorien eingeteilt:

### 3.4.1 Labile Schichtung

Bei labiler Schichtung ist die Luft, die sich näher am Boden befindet, wärmer als die darüber liegende. Dieser Fall tritt typischerweise in Sommermonaten auf, da die Sonne den Boden erwärmt. Die Wärme wird von unten nach oben transportiert. Durch den Transport kommt es zu einem starken Massenaustausch, was zu erhöhten Turbulenzen führt. Dabei wird von einem positiven vertikalen Wärmefluss gesprochen. Der Zuwachs der Windgeschwindigkeit mit der Änderung der Höhe ist aufgrund dieses starken Massenaustausches gering [28].

### 3.4.2 Stabile Schichtung

Die Temperatur am Boden ist bei einer stabilen Schichtung niedriger als die Temperaturen in höheren Lagen. Dieser Fall tritt in Wintertagen auf, da der Boden kühl wird. Bei dieser Schichtung wird die Wärme von oben nach unten transportiert. Durch diesen

negativen Wärmefluss werden Turbulenzen unterdrückt. Das bedeutet, es gibt einen geringen Massenaustausch, was zu signifikanten Änderungen der Windgeschwindigkeit mit der Änderung der Höhe führt [28].

#### 3.4.3 Neutrale Schichtung

Bei einer neutralen Schichtung wird von einem adiabatischen Temperaturprofil gesprochen. Die Lufttemperatur verringert sich um  $1^\circ$  bei einem 100 Meter Höhenzuwachs. In dieser Schichtung nimmt ein Luftpaket in jeder Position die Temperatur seiner Umgebung an. Dadurch entstehen keine Turbulenzen und es findet keinen Energietransport statt [28]. Abbildung 3.3 zeigt die Abhängigkeit zwischen der Temperatur und der Höhe in den drei Schichten.

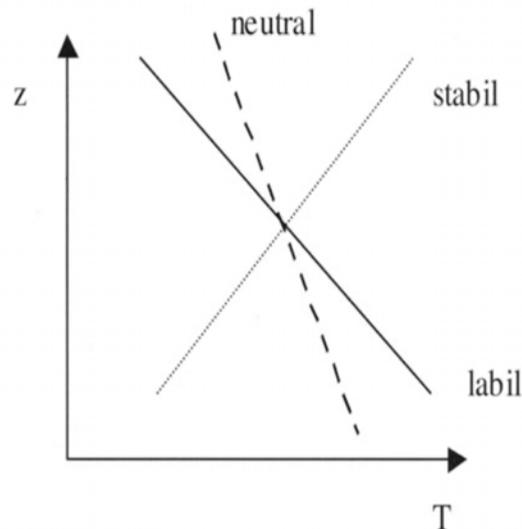


Abbildung 3.3: Die Abhängigkeit zwischen Temperatur und Höhe in den drei Schichten des vertikalen Windprofils [25]

#### 3.5 Höhenprofil des Windes

Wie zuvor erläutert wird in dieser Arbeit die Prandtl-schicht betrachtet, in der sich die Windgeschwindigkeit mit der Änderung der Höhe ändert [13]. Je näher sich die Luft-

strömung an der Erdoberfläche befindet, desto langsamer strömt sie. Für die Berechnung dieser Änderung eignen sich folgende Ansätze:

#### 3.5.1 Potenzsatz nach Hellmann

Bei der Annahme, dass die Schichtung des vertikalen Temperaturprofils neutral ist und dass eine absolut ebene Landschaft mit einheitlicher Oberflächenrauigkeit herrscht, kann die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Änderung der Höhe mit der folgenden Formel beschrieben werden [25]:

$$\frac{v(z_1)}{v(z_2)} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^\alpha$$

mit:

$v(z_1)$  und  $v(z_2)$  = Geschwindigkeiten auf den Höhen  $z_1$  und  $z_2$

$\alpha$  = Höhenexponent

Der Höhenexponent beträgt bei idealen Bedingungen 0,14. Die Hellmannformel liefert oft ungenaue Ergebnisse, da der Höhenexponent der gemessene Höhenexponent von der Höhe, der Rauigkeit und der atmosphärischen Sichtung abhängt. Das heißt, der Höhenexponent kann nur für den jeweiligen Standort, wo er gemessen wird, verwendet werden [14].

#### 3.5.2 Logarithmische Höhenformel

Das Verhältnis aus der Windgeschwindigkeit einer vordefinierten Höhe zur Geschwindigkeit des Windes in einer Referenzhöhe kann mit der logarithmischen Höhenformel näherungsweise beschrieben werden [13]:

$$v_2 = v_1 * \left(\frac{\frac{\ln(h_1)}{z_0}}{\frac{\ln(h_2)}{z_0}}\right) \quad (3.4)$$

mit:

$h_1$  = Höhe der Referenzgeschwindigkeit

$h_2$  = Höhe, in der die Windgeschwindigkeit berechnet wird

$z_0$  = Rauigkeitslänge

$v_1$  = Referenzgeschwindigkeit

$v_2$  = Gesuchte Windgeschwindigkeit

$\ln$  = Natürlicher Logarithmus

Dieser Ansatz wird in der Visualisierung benutzt.

## 3.6 Berechnung der Anzahl der versorgten Häuser

Die privaten Haushalte benötigen in Deutschland ein Viertel des gesamten Energieverbrauchs. Das betrug ca. 644 Terawattstunden im Jahr 2018 [27]. Für die Berechnung der Anzahl der versorgten Häuser in der Visualisierung wird der Energieverbrauch pro Haushalt benötigt. Es wird angenommen, dass die Haushalte, die durch die Anlage versorgt werden sollen, Zwei-Personen-Haushalte sind. Im Jahr 2019 haben Haushalte mit zwei Personen im Durchschnitt ca. 3196 kWh jährlich verbraucht [7].

Die Berechnung der Anzahl der versorgten Häuser kann schätzungsweise mit dem Betrachten der Volllaststunden einer Windkraftanlage berechnet werden. Da der Wind nicht konstant weht und sich Windkraftanlagen nach natürlichen Gegebenheiten richten, ist eine Abgabe der maximalen Leistung von der Windkraftanlage nicht möglich. Aus diesem Grund arbeiten die Anlagen in Teillastbetrieben. Windkraftanlagen müssen auch je nach Bedarf aufgrund von technischen Wartungen und Reparaturen abgeregelt werden [11].

Mit Volllaststunden wird die Zeit bezeichnet, in der eine Windkraftanlage mit maximaler Leistung betrieben werden müsste, um eine Energiemenge zu produzieren, die in einem realistischen Zeitraum produziert wird. Dabei werden Teillastbetriebszeiten in Volllastbetriebszeiten zusammengefasst. Die Volllaststunden sind ein Maß für die Ausnutzung einer Energieanlage [2]. Abbildung 3.4 zeigt die Anzahl der Volllaststunden verschiedener Energieerzeugungsarten.

In dieser Visualisierung wird jedoch zum besseren Verständnis der Ergebnisse der Wert der versorgten Häuser durch die in der Visualisierung erzeugte Leistung berechnet. Dies

	Volllaststunden pro Jahr (1 Jahr = 8.760 h)
Kernenergie	7.700
Braunkohle	6.650
Biomasse	6.000
Steinkohle	3.550
Wasserkraftwerk	4.100
Erdgas	3.150
Mineralöl	1.650
Wind (onshore)	1.750
Wind (offshore)	4.400
Photovoltaik (Hamburg)	840
Photovoltaik (München)	1.010
Photovoltaik (Madrid)	1.390
Pumpspeicher	970

Abbildung 3.4: Volllaststunden verschiedener Energieerzeugungsarten [11]

soll dem Nutzer verdeutlichen, zu welchen anderen Ergebnissen die Änderung der abhängigen Parameter führen kann. Es wird angenommen, dass die Anlage das ganze Jahr die gleiche Energiemenge liefert, die aus den vom Benutzer gewählten Parametern entstanden ist. Für die Berechnung wird folgende Formel benutzt:

$$AnzahlHaeuser = \frac{P * StundenImJahr}{Hausverbrauch} \quad (3.5)$$

mit:

P = Leistung der Windkraftanlage in der Visualisierung

Die durch die Windkraftanlage erzeugte Energiemenge ergibt sich aus der Multiplikation der Leistungsmenge mit der Anzahl der Stunden im Jahr geteilt durch den durchschnittlichen Verbrauch eines Hauses.

## 3.7 Spezifikationen der gewählten Windkraftanlage

Für die Visualisierung wurden die folgenden Spezifikationen der Windkraftanlage gewählt:

Nennleistung	3050 kW
Rotordurchmesser	100m
Einschaltwindgeschwindigkeit	2 m/s
Nennwindgeschwindigkeit	13 m/s
Abschaltwindgeschwindigkeit	25 m/s
Nabenhöhe (einstellbar)	60-100 m

Tabelle 3.2: Spezifikationen der simulierten Windkraftanlage

### 3.7.1 Regelung der Anlage

Mithilfe der Windkraftanlage wird die kinetische Energie in elektrische Energie umgewandelt. Um die vorgegebene Nennleistung nicht zu überschreiten, werden Windkraftanlagen geregelt und deren Leistung wird begrenzt. Damit werden Windkraftanlagen von mechanischen Beschädigungen oder thermischen Überlastungen geschützt. Die Regelung der Leistung erfolgt am Rotor durch die zwei Hauptkonzepte Stall und Pitch [16].

#### Stallregelung

Durch einen Strömungsabriss wird die Leistung der Windkraftanlage begrenzt. Das wird Stall-Effekt genannt. Eine Bedingung dafür ist die konstante Drehzahl der Rotorblätter. Dies wird mit Hilfe eines Asynchrongenerators realisiert. Der Generator ist mit der Netzfrequenz verbunden und läuft somit auf einer festen Drehzahl. Die Windkraftanlagen werden mit festmontierten, nicht regelbaren Rotorblättern errichtet. Wenn die Windgeschwindigkeit die Nenngeschwindigkeit der Anlage erreicht oder überschreitet, nimmt der Anstellwinkel hohe Werte an, sodass die Strömung nicht mehr vollständig der Krümmung der Oberfläche des Rotorblattprofils folgt. Das führt zu einer Vernichtung eines Anteils der kinetischen Energie und dementsprechend zu einer Begrenzung der Leistung [25].

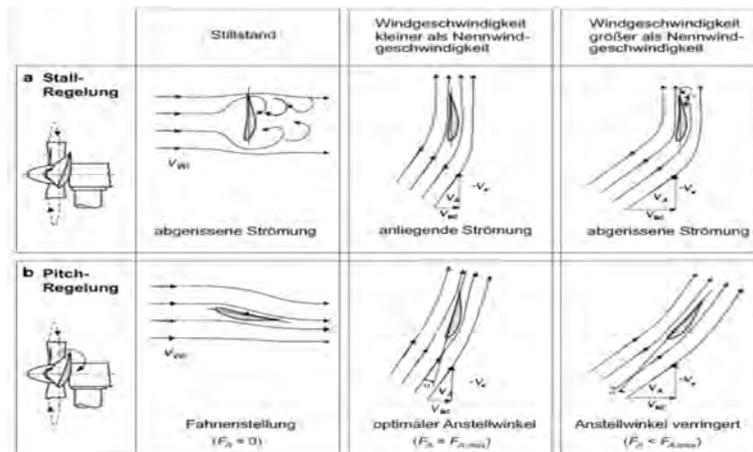


Abbildung 3.5: Strömungsverhältnisse am Rotorblattprofil einer Stall- und Pitch-regelten Windkraftanlage [16]

### Pitchregelung

Bei aktiver Verstellung der Rotorblätter der Anlage wird die abgegebene Leistung begrenzt. Das Verringern des Anstellwinkels  $A$  führt zu kleineren Auftriebskräften und somit zu einer geringeren Leistung [19]. Mit diesem Konzept wird die Leistung an die Windgeschwindigkeit angepasst.

Bei **sehr schwachem Wind** (bis 2 m/s) wird von der Windkraftanlage kein Strom produziert. Die Stärke des Windes kann die Rotorwelle nicht antreiben. Die Turbine steht in diesem Fall still.

Bei **normalem Wind** (2 m/s bis 12 m/s) wird durch das Drehen der Rotorblätter der Windkraftanlage Leistung produziert. In diesen Windgeschwindigkeiten wird so viel Windleistung wie möglich in mechanische Energie umgewandelt. Der Rotorblätter stehen im optimalen Arbeitspunkt und der Pitchwinkel beträgt  $0^\circ$ .

Bei **starkem Wind** (12 m/s bis 25 m/s) ist die Windleistung größer als die Leistung, die die Windkraftanlage braucht, um die maximale Nennleistung zu produzieren. In diesem Fall nimmt der Pitchwinkel mit der Zunahme der Windgeschwindigkeit zu. Das führt zu einer konstanten Abgabe der Nennleistung.

Bei **sehr starkem Wind** bzw. Sturm (ab 25 m/s) wird die Windkraftanlage abgeschaltet, um Schäden zu vermeiden. Der Pitchwinkel beträgt in diesem Fall ca  $90^\circ$  [19].

Abbildung 3.5 zeigt die Strömungsverhältnisse am Rotorblattprofil einer Stall- und Pitch-geregelten Windkraftanlage.

# 4 Softwaretechnische Implementierung

## 4.1 Implementierungsmöglichkeiten

Aufgrund mangelnder Kenntnisse des Autors in der Webprogrammierung stellte sich die Frage, welche Programmiersprache bzw. welche Software ausgewählt werden soll, um eine passende Implementierung der Visualisierung zu schaffen. Da sich mehrere Lösungen für die Implementierung eignen, musste sich der Autor mit den verschiedenen Möglichkeiten zuerst auseinandersetzen. Drei Implementierungsmöglichkeiten kamen infrage:

- Unity
- Unreal Engine
- HTML/CSS/JavaScript

Unity und Unreal Engine sind spezielle Frameworks, die Spiel-Engine genannt werden.

## 4.2 Spiel-Engine

Eine Spiel-Engine ist ein Software-Framework, das hauptsächlich für die Entwicklung von Videospiele entwickelt wurde und relevante Bibliotheken und Unterstützungsprogramme beinhaltet. Spiel-Engines wurden unter anderem entwickelt, um die Kosten, die Komplexität und die Zeit zu reduzieren, die bei der Entwicklung von Videospiele erforderlich sind [5].

### Unity

Unity wurde von UnityTechnologies entwickelt. UnityTechnologies hat die plattformübergreifende Spiele-Engine Unity im Juni 2005 auf der World Wide Apple Inc's Conference als ein exklusive Spiele-Engine (Mac OS X) veröffentlicht. Im Jahr 2018 wurde die Spiele-Engine auf 20 weitere Plattformen erweitert. Unity kann für mehrere Zwecke verwendet werden, unter anderem zur Entwicklung von Virtual-Reality-, zweidimensionalen und dreidimensionalen Spielen zusammen mit Simulationen für andere Intentionen. Es wurde von Unternehmen außerhalb von Videospiele für Film, Architektur, Automobil, Konstruktion und Technik verwendet [15]. Tabelle 4.1 zeigt einige Projekt, die mit Unity erstellt wurden.

Projektname	Erstveröffentlichung
Thomas Was Alone	2010
Temple Run	2011
RimWorld	2013
Hearthstone	2014
Pokemon Go	2016
Cuphead	2017

Tabelle 4.1: Projekt, die mit Unity erstellt wurden

Unity bietet eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber anderen erhältlichen Spiele-Engines. Mehrere Werkzeuge sind im Unity-Editor enthalten, die eine schnelle Iteration und Redaktion in den Entwicklungszyklen von Vorschau-Wiedergabemodus in Echtzeit ermöglichen. Darüber hinaus ist Unity für Mac, Linux und Windows geeignet und enthält eine künstlerfreundliche Reihe von Tools für immersives Design und Spielwelten sowie eine leistungsstarke Entwickler-Tool-Suite zur Implementierung von Spiellogik [15]. Es bietet einen visuellen Workflow mit Drag-and-Drop-Funktionen und unterstützt Skripting mit C, einer sehr bekannten Programmiersprache [12].

### Unreal Engine

Unreal Engine wurde von Epic Games im Jahr 1998 entwickelt. Zuerst wurde Unreal Engine für PC-first-person-shooter entwickelt. Mittlerweile wird es für eine Vielzahl von verschiedenen Zwecken eingesetzt, auch in anderen Branchen wie der Film- und Fernsehindustrie, übernommen. Unreal Engine ist in C++ geschrieben und bietet eine hohe Por-

tabilität und unterstützt verschiedene Desktop-, Mobil-, Konsolen- und Virtual-Reality-Plattformen [18].

### 4.2.1 HTML/CSS/JavaScript

Mit den drei Sprachen HTML/CSS/JavaScript können unter anderem interaktive Webseiten entwickelt werden.

#### HTML

HTML ist ein Akronym für HyperText Markup Language. Es ist eine Sprache, die bestimmt, wie Dokumente und Webseiten in einem Webbrowser angezeigt werden. HTML ist die Sprache, durch die die Bausteine der Webseite definiert sind. Die Sprache besteht aus zwei wesentlichen Teilen. Der erste Teil beinhaltet die Informationen, die die Webseite darstellen sollen. Der zweite Teil erläutert, wie diese Informationen gezeigt werden sollen. Die Applikation, die die Befehle dieser Sprache umsetzt, wird Web Browser genannt [6].

#### CSS

CSS ist ein Akronym für Cascading Style Sheets. Eine beliebte Sprache, die bestimmt, wie ein in HTML erstellte Webseite formatiert wird (Farben, Schriftstile, Layout und Funktionen). Sie ist für die Variationen in der Anzeige für verschiedene Geräte und Bildschirmgrößen zuständig. CSS spart Arbeit, da sie das Layout mehrerer Webseiten gleichzeitig steuern kann [22].

#### JavaScript

JavaScript ermöglicht es, CSS- und HTML-Elemente auf einer Website zu ändern, nachdem die Webseite geladen wurde, wodurch die Webseite interaktiver und ansprechender für Benutzer gestaltet werden kann. Sie funktioniert nicht als eigenständige Sprache, sondern wurde entwickelt, um mit HTML zusammenzuarbeiten, um interaktive Webseiten zu erstellen. Es ist nicht mit Java zu verwechseln [6].

### 4.2.2 Wahl der Implementierungsmethode

Da sich die beiden Spiele-Engine Unity und Unreal Engine von der Art und Weise wie sie funktionieren ähneln, wurden sie als eine Implementierungsmöglichkeit behandelt. In Tabelle 4.2 wurden Kriterien zur Entscheidung zwischen Spiele-Engine und HTML/CSS/JavaScript gelistet und gegenübergestellt:

x	HTML/CSS/JavaScript	Spiele-Engine
Vorkenntnisse	++	-
Web Development	++	-
Eingebaute Werkzeuge	-	++

Tabelle 4.2: Vergleich der Implementierungsmöglichkeiten

**Vorkenntnisse:** Im Studiengang "Regenerative Energiesysteme und Energiemanagement" werden mehrere Programmiersprachen im Laufe des Studiums gelehrt, unter anderem C und Java. Aufgrund dessen besitzt der Autor dieser Arbeit Vorkenntnisse in der funktionalen Programmierung. Vorkenntnisse bei der Erstellung von Projekten in Spiele-Engine sind wiederum nicht vorhanden.

**Web Development:** HTML/CSS/JavaScript Seiten werden im Browser ausgeführt, sodass ein Link für die Ausführung der Visualisierung ausreicht. Um Spiele-Engine Projekte auf dem Browser laufen zu lassen, muss ein externer Web Player installiert werden. Dieser hat Zugriff auf die GPU und andere Ressourcen des Computers.

**Eingebaute Werkzeuge:** Unity Editor enthält integrierte Tools, die das Entwickeln bzw. Optimieren des Projekts beschleunigen.

Da diese Visualisierung komplementär zum Lernmodul "Regenerative Energien durch Sonne und Wind" erstellt und dementsprechend als Webanwendung dargestellt wird, wurde die Implementierungsmöglichkeit mit den Programmiersprachen HTML/CSS/JavaScript gewählt.

### 4.3 Umsetzung der Visualisierung

Die Visualisierung ist eine Webanwendung, die mit HTML, CSS und JavaScript erstellt wurde. Die Struktur der Anwendung ist in der Abbildung 4.1 angegeben:

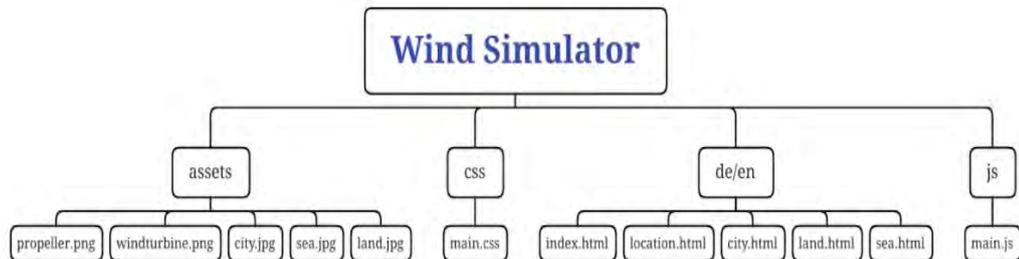


Abbildung 4.1: Struktur des Programms

Der Visualisierung besteht aus drei Hauptordnern:

**Assets:** Dieser Ordner enthält Bilder, die als Hintergrund der Lokationen gewählt wurden, sowie das Bild der Windkraftanlage

**CSS :** Es enthält CSS-Dateien, die zum Gestalten unserer Webanwendung erforderlich sind

**De:** Die Visualisierung in deutscher Sprache

**En:** Die Visualisierung in englischer Sprache

**Js:** JavaScript-Dateien, die erforderlich sind, um der Anwendung Funktionalität hinzuzufügen

Jede HTML Datei bzw. Seite von der Visualisierung wird in die Ordner de / en auf den jeweiligen Sprachen geschrieben. Die Beschreibung der einzelnen Dateien ist unten angegeben:

**Index.html:** Dies ist die Homepage für die Visualisierung

**location.html:** Es ist die Seite, die dem Benutzer ermöglicht, die Lokation bzw. die Rauigkeitslänge zu wählen.

**City.html:** Die Seite für die Lokation Stadt

**Land.html:** Die Seite für die Lokation Feld

**sea.html:** Die Seite für die Lokation See

### 4.3.1 Seiten der Visualisierung

#### Die Startseite



Abbildung 4.2: Startseite

Der Benutzer startet von der Homepage. Auf der Startseite ist eine Start-Schaltfläche, über die der Benutzer zur Standortseite gelangt. Der Benutzer kann die Sprache der Visualisierung über die Schaltfläche (Sprache ändern) ändern. Der Benutzer kann auch die Dokumentation über die Schaltfläche (Dokumentation anzeigen) anzeigen lassen. Da werden die verwendeten Formeln aufgelistet und der Programmablauf erklärt

#### Die Standortseite

Die Standortseite ist die Seite, auf der der Benutzer den Standort bzw. die Rauigkeitslänge auswählen kann. Der Benutzer kann die Lokation auswählen und zur Simulationsseite gehen. Der Benutzer kann die Sprache ändern, indem er die Schaltfläche „Sprache ändern“ verwendet. Er kann die Dokumentation der Visualisierung ebenfalls aufrufen.

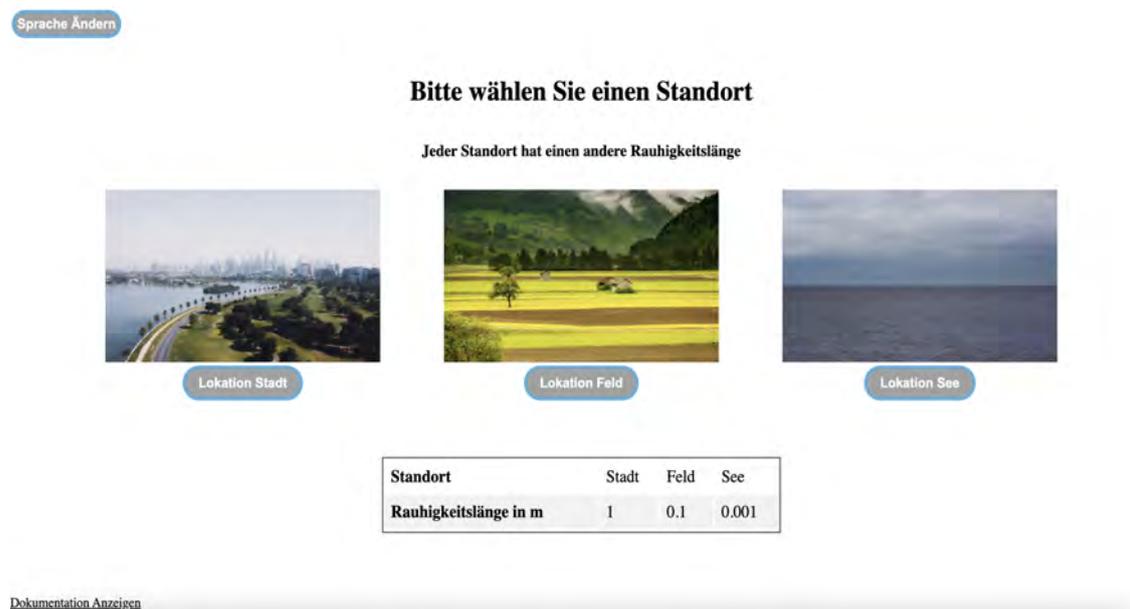


Abbildung 4.3: Standortseite

Auf dieser Seite kann der Benutzer sehen, welche Rauigkeitslänge zu welcher Lokation gehört. Es ist möglich, die Visualisierung in drei verschiedenen Lokationen mit drei verschiedenen Rauigkeitslängen zu starten. Die Tabelle wird dem Benutzer auf dieser Seite angezeigt.

### Die Simulationsseite

Auf der Simulationsseite kann der Benutzer die Referenzgeschwindigkeit (bei 10 Meter in der Visualisierung) ändern. Er kann auch die Höhe der Windkraftanlage verstellen. Die Ergebnisse werden dann basierend auf die Wahl des Benutzers angepasst. In der Visualisierung wird ein Diagramm der abgegebenen Leistung der Windkraftanlage über der Windgeschwindigkeit angezeigt. Die Simulationsseite ist in zwei Teile geteilt. Der Teil auf der rechten Seite ist der Controller, wo der Benutzer die Parameter ändern und die Ergebnisse sehen kann. Auf dem Teil auf der linken Seite wird dem Benutzer die Lokation angezeigt. Der Benutzer kann die Windgeschwindigkeit und die Höhe ändern. Die Änderungen des Benutzers werden auf dem Bild angezeigt. Wenn der Benutzer die Windgeschwindigkeit erhöht oder verringert, ändert sich die Geschwindigkeit des Rotors der Windkraftanlage auch entsprechend. Wenn der Benutzer wiederum die Höhe ändert, nimmt die Höhe der Windkraftanlage entsprechend zu oder ab.

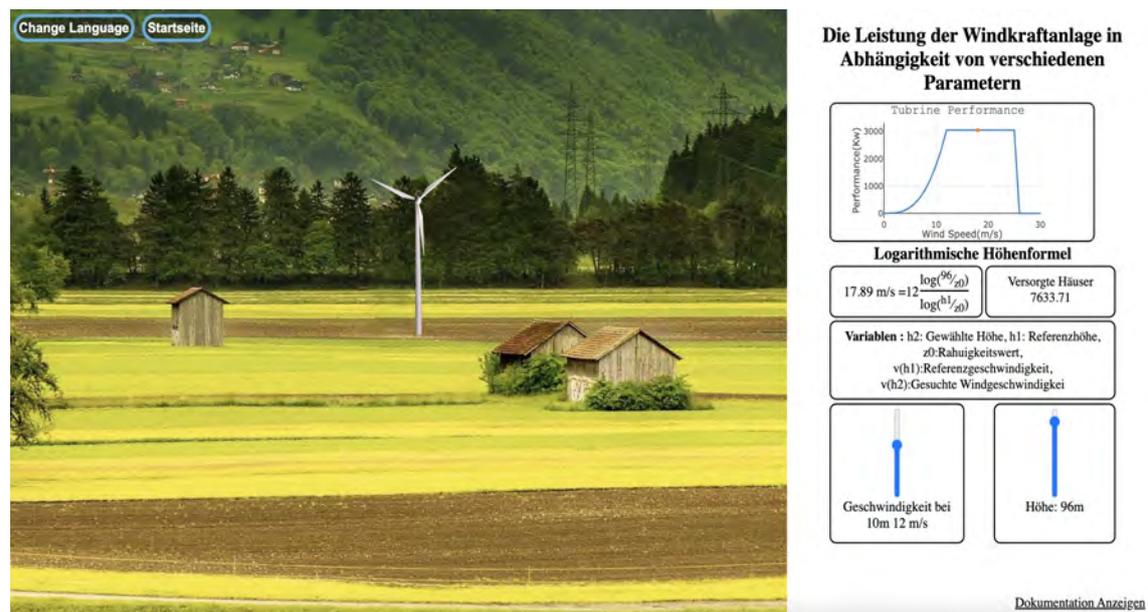


Abbildung 4.4: Simulationsseite

## Funktionalität der Visualisierung

Der Ordner js enthält die Datei prototype.js, die für alle Funktionalitäten der Visualisierung verantwortlich ist. Auf der Simulationsseite kann der Benutzer mit der Windgeschwindigkeit und der Höhe interagieren. Wenn der Benutzer den Wert der Windgeschwindigkeit oder die Höhe ändert, erhält die JavaScript-Datei die neuen Werte und führt passende Berechnungen durch. Der JavaScript-Code hat drei Funktionen, um seine Berechnungen durchzuführen:

**Velocity:** In dieser Funktion wird die logarithmische Höhenformel eingesetzt. Sie bekommt die Höhe, die Rauigkeitsklasse und die Referenzwindgeschwindigkeit als Parameter. Die Funktion gibt die Windgeschwindigkeit bei der vom Benutzer gewählten Höhe der Windkraftanlage.

**Windenergy:** In dieser Funktion wird die Leistung der Windkraftanlage berechnet und als Wert zurückgegeben. Die Funktion bekommt die Windgeschwindigkeit, die in der Funktion velocity2 berechnet wird, als Parameter.

**Houessupplied:** In dieser Funktion wird die Anzahl der versorgten Häuser berechnet. Als Parameter bekommt diese Funktion die von der Windkraftanlage abgegebene Leistung.

**Updategraph:** Diese Funktion aktualisiert das Leistungsdiagramm, wenn der Benutzer die Werte ändert. Dafür wird die JavaScript-Bibliothek plotly.js verwendet.

Der Simulator funktioniert wie folgt:



Abbildung 4.5: Ablauf des Programms

Das Programm wartet auf die Änderung des Benutzers. Sobald der Benutzer die Referenzwindgeschwindigkeit oder die Höhe der Anlage ändert, werden die Windgeschwindigkeit, die Leistung und die Anzahl der versorgten Häuser neu berechnet. Das Diagramm wird dementsprechend aktualisiert. Die Höhe der Anlage und die Geschwindigkeit des Rotors werden angepasst. Falls die Windgeschwindigkeit über 25 m/s beträgt, wird die Anlage abgeregelt.

### 4.3.2 Plotly.js

Für die Erstellung des Graphen in der Visualisierung wird die Bibliothek Plotly.js verwendet. Plotly.js ist eine High-Level-Diagrammbibliothek, die kostenlos und Open Source zur Verfügung steht [23]. Mit Plotly ist es möglich, mehrere Arten von Charts zu erstellen. Für die Anwendung dieser Visualisierung wurde das Liniendiagramm gewählt. Der Benutzer hat die Möglichkeit einige Funktionen von Plotly zu nutzen. Der Benutzer kann

ein Bild von dem Graphen bei jedem Arbeitspunkt der Anlage herunterladen. Es ist auch möglich in der Kennlinie ausgewählte Bereiche vergrößert darzustellen. Ein Reset-Button des Graphen steht zur Verfügung.

### 4.3.3 Verwendete Bilder und Rechte

In der Visualisierung hat der Benutzer die Möglichkeit, die Windkraftanlage in Abhängigkeit von den verschiedenen Parametern in drei verschiedenen Lokationen zu simulieren. Für die Lokationen werden die folgenden Bilder benutzt. Die Bilder sind für eine freie, kommerzielle Nutzung verfügbar.



(a) Stadt Lokation [29]



(b) Feld Lokation [1]



(c) See Lokation[26]



(d) Startseite [8]

Abbildung 4.6: Bilder, die in der Visualisierung benutzt werden

## 5 Darstellung der Szenarien

Die Abbildungen 5.1a, 5.1b, 5.1c zeigen Ergebnisse an einem Arbeitspunkt in den verschiedenen Lokationen. Die Referenzwindgeschwindigkeit in 10 Meter Höhe wird in den Abbildungen auf 6 m/s gesetzt und die Höhe auf 90 Meter Höhe. Damit wird ein direkter Vergleich möglich, der den Einfluss der Höhe bzw. die Rauigkeit in den verschiedenen Lokationen zeigt.

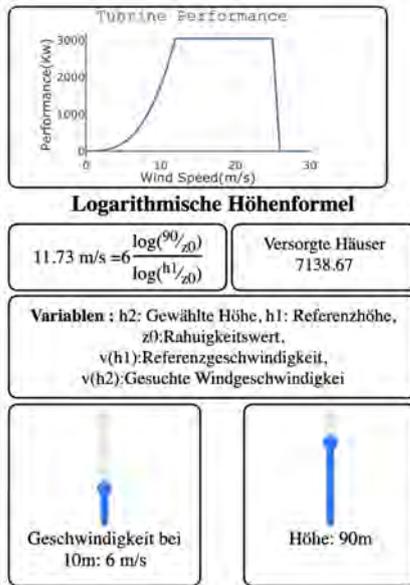
In der Lokation **Stadt** beträgt die Windgeschwindigkeit 11,73 m/s, wenn auf 10 m Höhe eine Geschwindigkeit von 6 m/s herrscht. Mit dieser Windgeschwindigkeit gibt die Windkraftanlage eine Leistung von 2830 kW ab.

In der Lokation **Feld** beträgt die Windgeschwindigkeit 8,86 m/s, wenn auf 10 m Höhe eine Geschwindigkeit von 6 m/s herrscht. Das zeigt eine geringere Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Zunahme der Höhe im Vergleich zu der Lokation Stadt. Mit dieser Windgeschwindigkeit gibt die Windkraftanlage eine Leistung von 1245 kW ab.

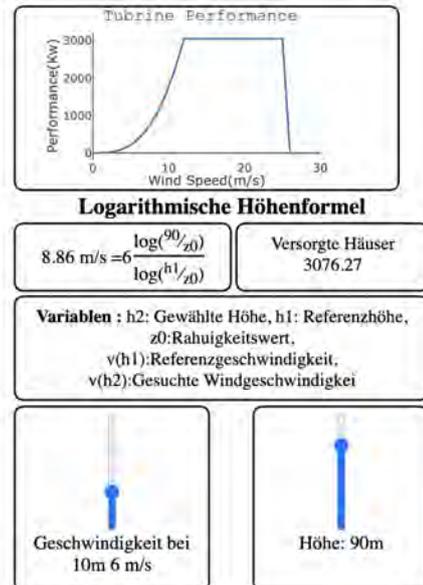
In der Lokation **See** beträgt die Windgeschwindigkeit 7,43 m/s, wenn auf 10 m Höhe eine Geschwindigkeit von 6 m/s herrscht. Das zeigt eine deutlich geringere Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Zunahme der Höhe im Vergleich zu der Lokation Stadt. Das liegt daran, dass sich im Meer nahezu keine Hindernisse befinden, die das Windprofil beeinflussen. Mit dieser Windgeschwindigkeit gibt die Windkraftanlage eine Leistung von 716 kW ab.

Die Abbildungen 5.2a, 5.2b, 5.2c zeigen die Ergebnisse der Visualisierung in den drei verschiedenen Lokationen. Die Höhe der Anlage wird fest auf 100 Meter eingesetzt. Die Referenzwindgeschwindigkeit bei 10m wird so eingesetzt, dass die Anlage die komplette Leistung liefert. Es ist zu erkennen, dass die Anlage bei einer festen Höhe die maximale Leistung in der Lokation Stadt mit geringerer Referenzgeschwindigkeit erreicht. Die Anlage benötigt in der Lokation See eine höhere Referenzgeschwindigkeit, da die Höhe der Anlage in diesem Szenario einen kleineren Einfluss auf die Windgeschwindigkeit hat.

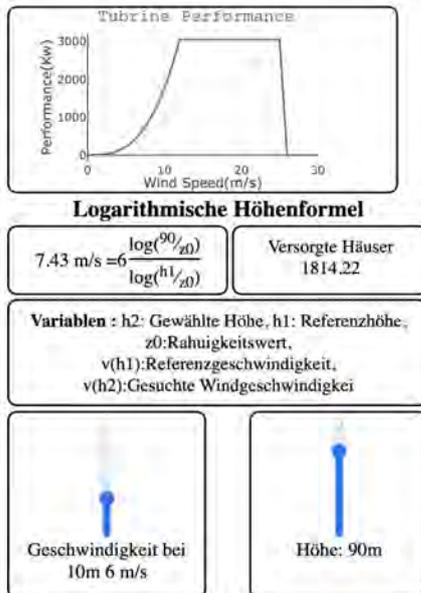
Das liegt daran dass die Rauigkeitslänge in der Lokation See im Vergleich zu dem in der Lokation Stadt gering ist [25].



(a) Szenario Stadt

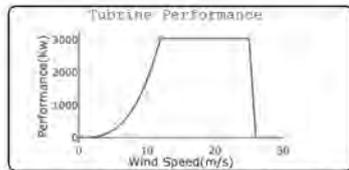


(b) Szenario Feld



(c) Szenario See

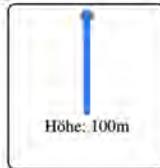
Abbildung 5.1: Vergleich der Szenarien mit den gleichen Parametern



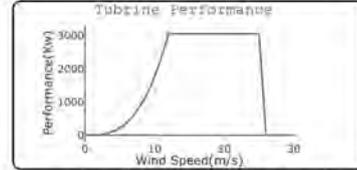
**Logarithmische Höhenformel**

$12.00 \text{ m/s} = 6 \frac{\log(100/z_0)}{\log(h^1/z_0)}$	Versorgte Häuser 7633.71
---	-----------------------------

**Variablen :** h2: Gewählte Höhe, h1: Referenzhöhe,  
z0: Rauhigkeitswert,  
v(h1): Referenzgeschwindigkeit,  
v(h2): Gesuchte Windgeschwindigkeit



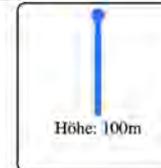
(a) Szenario Stadt



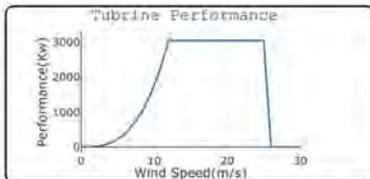
**Logarithmische Höhenformel**

$12.00 \text{ m/s} = 8 \frac{\log(100/z_0)}{\log(h^1/z_0)}$	Versorgte Häuser 7633.71
---	-----------------------------

**Variablen :** h2: Gewählte Höhe, h1: Referenzhöhe,  
z0: Rauhigkeitswert,  
v(h1): Referenzgeschwindigkeit,  
v(h2): Gesuchte Windgeschwindigkeit



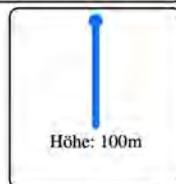
(b) Szenario Feld



**Logarithmische Höhenformel**

$12.50 \text{ m/s} = 10 \frac{\log(100/z_0)}{\log(h^1/z_0)}$	Versorgte Häuser 7633.71
--	-----------------------------

**Variablen :** h2: Gewählte Höhe, h1: Referenzhöhe,  
z0: Rauhigkeitswert,  
v(h1): Referenzgeschwindigkeit,  
v(h2): Gesuchte Windgeschwindigkeit



(c) Szenario See

Abbildung 5.2: Vergleich der Szenarien bei der maximalen Leistung der Anlage und einer festen Höhe

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im letzten Kapitel werden die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst. Darüber hinaus werden weitere absehbare Entwicklungsmöglichkeiten im Ausblick vorgeschlagen.

### 6.1 Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wurde eine interaktive Visualisierung der durch Windkraftanlagen erzeugten Leistung in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern entwickelt. Die Visualisierung findet im Rahmen des Lernmoduls “Regenerative Energien durch Sonne und Wind – verstehen leicht gemacht” statt. Die Benutzer können auf die Visualisierung auf der Seite der Hamburg Open Online University (HOOU) und der Lernumgebung [viamint.de](http://viamint.de) der HAW Hamburg zugreifen. Im zweiten und dritten Kapitel wurden Grundlagen und technischen Grundlagen ermittelt, auf der die Visualisierung basiert. Um den Einfluss der Rauigkeit auf das Windprofil zu simulieren, wurden drei Lokationen mit verschiedenen Rauigkeitswerten gewählt. Für das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Rauigkeit, Höhe und Windgeschwindigkeit sind drei Lokationen ausreichend. Dabei wurde jedoch beachtet, dass die Rauigkeitslängen in den verschiedenen Lokationen einen deutlichen Unterschied aufweisen. Es wurde zwischen verschiedenen Möglichkeiten für die Implementierung der Simulation verglichen. Die Entscheidung fiel auf die Programmiersprachen HTML/CSS/JavaScript. Die Visualisierung ist in englischer und deutscher Sprache verfügbar.

### 6.2 Ausblick

Weitere Zusatzideen werden in diesem Abschnitt aufgeführt, die über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen. Um die Abhängigkeit der Parameter von der abgegebenen Leistung

der Windkraftanlage klarer darzustellen, können die Ergebnisse bzw. die Leistungskennlinien von den verschiedenen Lokationen in einem Diagramm mit verschiedenen Farben dargestellt werden. Das erleichtert dem Nutzer den direkten Vergleich zwischen den verschiedenen Rauheitswerten. Als weitere Entwicklung dieser Visualisierung kann eine neue Funktion implementiert werden, die dem Nutzer ermöglicht, mehrere Windkraftanlagen in der Visualisierung hinzuzufügen. Dies wird dazu führen, dass weitere Themen in Bezug auf die Gewinnung der Windenergie bearbeitet werden können, wie zum Beispiel das Thema Mindestabstand zwischen den Anlagen.

# Literaturverzeichnis

- [1] ACANDRAJA: . – URL <https://pixabay.com/de/photos/feld-senke-landschaft-wiese-176602/>
- [2] AGENCY, European E.: Europe's onshore and offshore wind energy potential. (2009)
- [3] ANNA-KATHRIN WALLASCH, Silke L.: Ausgestaltung von Höchstwertregionen In Der Technologieübergreifenden Ausschreibung. (2017). – URL [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Studien/ausgestaltung-hoehstwertregionen-in-der-technologieuebergreifenden-ausschreibung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Studien/ausgestaltung-hoehstwertregionen-in-der-technologieuebergreifenden-ausschreibung.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- [4] B. LANGE, J. H. ; BARTHELMIE, R.: *Importance of thermal effects and sea surface roughness for offshore wind resource assessment*. Random House Incorporated, 2004
- [5] BENJAMIN NICOLL, Brendan K.: *The Unity Game Engine and the Circuits of Cultural Software*. Palgrave macmillan, 2019
- [6] BROOKS, David R.: *An Introduction To HTML and JavaScript For Scientists and Engineers*. Springer, 2007
- [7] BUNDESAMT, Statistisches: Stromverbrauch der privaten Haushalte nach Haushaltsgrößenklassen. (2021)
- [8] CANVA.COM: . – URL <https://canva.com>
- [9] D, Etling: *Theoretische Meteorologie*. Vieweg+Teubner Verlag, 1996
- [10] DIETER EIS, Detlef Laußmann Klaus S.: Klimawandel und Gesundheit. (2010). – URL <https://edoc.rki.de/bitstream/handle/176904/877/29ETCu06Z0tk.pdf?sequence=1>

- [11] FALTSHAUSER, Maximilian: Zahlen und Fakten zur Stromversorgung in Deutschland 2014. (2009). – URL <https://www.wbu.de/media/news/positionen/publikationen/Broschuere-Wirtschaftsbeirat-Zahlen-Fakten-Strom-2014.PDF>
- [12] HALPERN, Jared: *Developing 2D Games with Unity*. APRESS, 2019
- [13] HAU, Erich: *Windkraftanlagen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014
- [14] JING-JIN TIEO, Narasimalu S.: Suitability of power-law extrapolation for wind speed estimation on a tropical island. (2014). – URL <http://www.fluidosol.se/journal/Tieo-jweia.pdf>
- [15] JULIANI, Vincent-Pierre Berges Esh Vckay Yuan Gao Hunter Henry Marwan M. ; LANGE, Danny: *Unity: A General Platform for Intelligent Agents*. (2018). – URL <https://arxiv.org/pdf/1809.02627.pdf>
- [16] KALTSCHMITT M., Schulz D. Skiba M. Özdirik B.: *Stromerzeugung aus Windenergie*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013
- [17] KRAUS, Helmut: *Grundlagen der Grenzschicht-Meteorologie*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008
- [18] LEE, Joanna: *Learning Unreal Engine Game Development*. Packt Publishing, 2016
- [19] LORENZ JARASS, Wilfried V.: *Windenergie, zuverlässige Integration in die Energieversorgung*. Springer, 2009
- [20] MHAMED BEN OUAHI, Abdesselam Bliya Taoufi H. ; IBRAHMI, El Mehdi A.: The Effect of Using Computer Simulation on Students' Performance in Teaching and Learning Physics: Are There Any Gender and Area Gaps? (2021). – URL <https://downloads.hindawi.com/journals/edri/2021/6646017.pdf>
- [21] MICHAEL DURSTEWITZ, Stefan Faulstich Philip Görg Laura Große Berthold Hahn Marc-Alexander Lutz Jochen Mayer Sebastian Pfaffel Florian Rehwald Susann S.: WINDENERGIE REPORTDEUTSCHLAND 2018. (2018). – URL [http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/Windmonitor-2018/WERD\\_2018.pdf](http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/Windmonitor-2018/WERD_2018.pdf)
- [22] MICHAUD, Thomas: *Foundations of Web Design, Introduction to HTML and CSS*. 2014

- [23] PLOTLY.COM: Plotly JavaScript Open Source Graphing Library. . – URL <https://plotly.com/javascript/>
- [24] RAGHEB, M.: Wind Energy Conversion Theory. (2014). – URL <http://magdiragheb.com/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Wind%20Energy%20Conversion%20Theory%20Betz%20Equation..pdf>
- [25] ROBERT GASCH, Jochen T.: *Windkraftanlagen*. Teubner, 2005
- [26] SWEETAHOLIC: . – URL <https://pixabay.com/de/photos/windr%c3%a4der-windpark-meer-ozean-4657667/>
- [27] UMWELTBUNDESAMT: Energieverbrauch privater Haushalte. (2020)
- [28] WALTER ROEDEL, Thomas W.: *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*. Springer-Spektrum, 2017
- [29] WHELEN, Pat: . – URL <https://unsplash.com/photos/O8JcVojxfEo>

# A Quellcode

## A.1 index.html

```
1 <!DOCTYPE html>
2 <html lang="en">
3 <head> <!-- Die Startseite -->
4 <meta charset="UTF-8">
5 <meta http-equiv="X-UA-Compatible" content="IE=edge">
6 <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
7 <title>Document</title>
8 <style>
9 {
10   body{
11     display: flex;
12     flex-direction: column;
13     justify-content: center;
14     align-items: center;
15     height: 97vh;
16     background: url(./mainbg.png);
17     background-position: center;
18     background-repeat: no-repeat;
19     background-size: cover;
20   }
21   hi{
22     margin-bottom: 50px;
23   }
24   button {
25     font-size: 20px;
26     border-radius: 24px;
27     padding: 7px 16px;
28     border: 4px solid #5fadda;
29     color: #white;
30     background: #40000000;
31     font-weight: bold;
32   }
33   .langBtn{
34     position: fixed;
35     top: 5px; left: 5px;
36     z-index: 1000;
37     padding: 3px;
38   }
39   .pdfLink{
40     position: fixed;
```

```
41     position: fixed;
42     bottom: 3px;
43     left: 3px;
44     z-index: 10000;
45     color: #black
46   }
47 </style>
48 </head>
49 <body> <!-- Link der Dokumentation -->
50 <a href="https://drive.google.com/file/d/101RnyKiy18t-mWCedujL4mqCC3eUWzGs/view?usp=sharing" class="pdfLink">Dokumentation Anzeigen</a>
51 <h1 style="text-align:center">Eine interaktive Visualisierung der durch Windkraftanlagen</h1>
52 <h1 style="text-align:center">erzeugten Leistung in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern</h1>
53 <a href="/de/location.html">button-Anfang</button></a>
54 <button class="langBtn" onclick="window.location.href = window.location.origin+'/' + window.location.pathname.slice(3)">Sprache Ändern</button>
55 </body>
56 </html>
```

## A.2 location.html

```

1 <!DOCTYPE html>
2 <html lang="en">
3 <head>
4 <!-- Die Seite der Lokationen -->
5 <meta charset="UTF-8">
6 <meta http-equiv="X-UA-Compatible" content="IE=edge">
7 <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1">
8 <title>Document</title>
9
10 <style>
11
12 body {
13     display: flex;
14     flex-direction: column;
15     justify-content: center;
16     align-items: center;
17     height: 100vh;
18 }
19 figcaption {
20     text-align: center;
21 }
22 .container {
23     display: flex;
24 }
25
26 table {
27     width: 100%;
28     border: 1px solid black;
29     width: 500px;
30     margin: 50px;
31     font-size: 20px;
32 }
33 tbody tr:nth-child(
34     position: fixed;
35     bottom: 30px;
36     left: 30px;
37     z-index: 10000;
38     color: black
39 }

```

```

40
41 th, td {
42     text-align: left;
43     padding: 8px;
44 }
45 tr:nth-child(even) { background-color: #f2f2f2; }
46 tbody tr {
47     position: fixed;
48     top: 5px; left: 5px;
49     z-index: 1000;
50     padding: 3px;
51 }
52 button {
53     font-size: 16px;
54     border-radius: 24px;
55     padding: 7px 16px;
56     border: 4px solid #e5735d;
57     color: black;
58     background-color: #f0f0f0;
59     font-weight: bold;
60 }
61
62 </style>
63 </head>
64 <body> <!-- Tpe -->
65 <h1>Bitte wählen Sie einen Standort</h1>
66 <!-- Jeder Standort hat einen andere Raughigkeitlänge -->
67 <button class="langBtn" onclick="window.location.href = window.location.origin + '/' + window.location.pathname.slice(3) + 'Sprache_Andern/' + button.href = 'https://drive.google.com/file/d/1D18yKjy18t-hwCduj14mqC3mPrG5/view?usp=sharing'> class="pdfLink"> Dokumentation Anzeigen</a>
68
69 <div class="container">
70 
72 <figcaption>button-Lokation Stadt</button></figcaption>
73 </figure></a>
74 
76 <figcaption>button-Lokation Feld</button></figcaption>
77 </figure></a>
78 
80 <figcaption>button-Lokation See</button></figcaption>
81 </div>
82 </figure></a>
83 <table>
84 <tr> <!-- Raughigkeitstabelle -->
85 <th>Standort</th>
86 <td>Stadt</td>
87 <td>Feld</td>
88 <td>See</td>
89 </tr>
90 <tr>
91 <th>Raughigkeitswert in m</th>
92 <td>1</td>
93 <td>1</td>
94 <td>0.001</td>
95 </tr>
96 </tr>
97 </table>
98
99 </table>
100 </body>
101 </html>

```

## A.3 city.html

```

1 <!DOCTYPE html>
2 <html lang="en">
3 <head> <!--Stadt Lokation-->
4 <meta charset="UTF-8">
5 <meta http-equiv="X-UA-Compatible" content="IE=edge">
6 <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
7 <link rel="stylesheet" href="css/prototype.css">
8 <title>Document</title>
9
10 <script src="https://cdn.plot.ly/plotly-2.6.3.min.js"></script>
11
12 <style>
13   .turbine-image{
14     background: url(../city.jpg);
15     background-position: center;
16     background-repeat: no-repeat;
17   }
18   div#wind {
19     left: 37%;
20     top: 260px;
21   }
22 </style>
23
24 </head>
25 <body>
26 <button class="langBtn" onclick="window.location.href = window.location.origin+'/'+window.location.pathname.slice(3)+'-Sprache_Aendern-/button>
27 <a href="https://drive.google.com/file/d/101RuyJy18t-hWcedu14mqCC3edPzGd/view?usp=sharing" class="pdfLink">Dokumentation Anzeigen</a>
28
29 <a class="homeButton" href="/de/index.html">button Startseite</button></a>
30 <div class="main">
31
32 <div class="turbine-image">
33 <div class="image-container">
34 <div id="t1m">
35 <div class="mover">
36 
37 
38
39

```

```

40
41 </div>
42 </div>
43 </div>
44
45 <div class="control-panel">
46 <h2>Die Leistung der Windkraftanlage in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern</h2>
47 <div class="control">
48 <div id="tester" style="width:400px;height:100px;">div</div>
49
50 <div class="formula-supply">
51 <h3>Logarithmische Höhenformel</h3>
52 <div class="formula">
53 <table>
54 <tr>
55 <td rowspan="2">
56 <td class="bottom">log<sup>log</sup>span class="h1" id="h1">h2</span></sup>frakt<sub>20</sub>/</td>
57 <tr>
58 <td>log<sup>log</sup>span1</sup>frakt<sub>20</sub>/</td>
59 </tr>
60 </table>
61 </div>
62 </div>
63 <div class="supply-house">
64 <p>Versorgte Häuser</p><span class="supplyValue"></span></div>
65 </div>
66 <div class="legends supply-house">
67 <p>Variablen : </p><b>h2</b> Gewählte Höhe, <b>h1</b> Referenzhöhe, <b>z0</b>Rauhigkeitswert, <b>v</b>v(h1)Referenzgeschwindigkeit, <b>v</b>v(h2)Gesuchte Windgeschwindigkeit
68 </div>
69
70 <div class="wind-loc-container">
71 <input id="wdrange" type="range" min="0" max="100" value="0">
72 <div class="wind-speed-info">
73 <p>Höhe: <span class="h1" id="h1">60</span> /</p>
74 </div>
75 </div>
76
77 </div>
78

```

```

79 <div class="wind-loc-container">
80 <input id="wdrange" type="range" min="0" max="20" value="0">
81 <div class="wind-speed-info">
82 <p>Geschwindigkeit bei 10m: <span class="wd" id="wd">0</span> /</p>
83 </div>
84 </div>
85 </div>
86
87 </div>
88 </div>
89
90 <script> /* Rauhigkeitswert in dieser Lokation */
91 z = 1
92 </script>
93
94 <script src="js/prototype.js"></script>
95 </body>
96 </html>

```

## A.4 prototype.js

```
1 change = document.querySelectorAll('input[type="range"]');
2 change.forEach(element => {
3   element.addEventListener('change', ()=>{
4
5
6   var hrange = document.getElementById('hrange')
7   var wndrange = document.getElementById('wndrange')
8   var value = document.getElementById('value')
9
10
11  var ht = document.querySelectorAll('.ht')
12  var wnd = document.querySelectorAll('.wnd')
13  var turbine = document.querySelector('.mover')
14
15    h1 = 30
16    var h2 = hrange.value
17    v_h1 = wndrange.value
18
19
20    // rendering values
21    ht.forEach(element => {
22      element.innerHTML = h2
23    });
24    wnd.forEach(element => {
25      element.innerHTML = v_h1
26    });
27    // getting velocity
28    var v2 = velocity2(h2,v_h1,z)
29    // rendering the velocity 2
30    value.innerHTML = v2.toFixed(2)+ ' m/s';
31    // rendering house supply
32    document.querySelector('.supplyValue').innerHTML = house_supply(v2.toFixed(2)).toFixed(2)
33    // updating the graph
34    graph_update(v2,toFixed(1))
35    // changing the position of turbine
36    turbine.style.bottom = (h2*1.5)-150 + 'px'
37    // rotation speed
38    document.querySelector('img#xyz').style.webkitAnimationDuration = (1/(v_h1))+1.2 + 's'
39    // velocity greater than 25 not accepted
40
41    if (v2.toFixed(0)>25){
42      alert('The wind speed is greater than 25 m/s. The wind turbine must be shut down')
43      document.querySelector('img#xyz').style.webkitAnimationDuration = 0 + 's'
44    }
45    else if (v2.toFixed(0)==0){
46      document.querySelector('img#xyz').style.webkitAnimationDuration = 0 + 's'
47    }
48  });
49
50  function velocity2(h2,v_h1,z){
51    v2 = v_h1 * (Math.log(h2/z)/Math.log(10/z)) //log wind profile formula
52    return v2
53  }
54
55  function windEnergy(x){
56
57    performance = (0.45*0.5*((3.1417*50*50)) * Math.pow(x,3))/1000 // performance formula
58    return performance
59  }
60
61
62
63  function house_supply(x){ //houses supplied formula
64    if (x<12){
65      performance = windEnergy(x)
66      supply = ((performance*0760))/3500
67      console.log(performance)
68      return supply
69    }
70    else if(x==12 && x<25){
71      performance = 3050
72      supply = ((performance*0760))/3500
73      console.log(performance)
74      return supply
75    }
76    else{
77      return 0
78    }
79  }
```

```

79 }
80
81
82 function graph_update(x){
83
84     var arr = [];
85     for (var i = 0; i < 12; i = i+0.1) {
86         arr.push(i.toFixed(1));
87     }
88     console.log(arr)
89
90     x_axis_2 = ['13.0','14.0','15.0','16.0','17.0','18.0','19.0','20.0','21.0','22.0','23.0','24.0','25.0','26.0','27.0','28.0','29.0','30.0']
91     generated_x = [...arr,...x_axis_2]
92
93
94     generated_y = []
95     for (i in arr) {
96         generated_y.push(windEnergy(arr[i]));
97     }
98
99     generated_y = [...generated_y,'3053','3053','3053','3053','3053','3053','3053','3053','3053','3053','3053','0','0','0','0','0']
100
101     Plotly.react( document.getElementById('tester'), [
102     {
103         x: generated_x,
104         y: generated_y
105     },
106     ],
107     {
108         x: parseFloat(x)>12?(Math.ceil(parseFloat(x))).toString():x,
109         y: parseFloat(x)>=25?(0):parseFloat(x)>12?['3053']:generated_y[generated_x.indexOf(x)],
110         modes: 'lines+markers',
111         type: 'scatter'
112     }
113     ],{
114         margin: { b: 30,t:25 },
115         showLegend:false,
116         xaxis:{

```

```

118         title:{
119             text:'Wind Speed(m/s)'
120         }
121     },
122     yaxis:{
123         title:{
124             text:'Performance(Kw)'
125         }
126     },
127     title: {
128         text:'Turbine Performance',
129         font: {
130             family: 'Courier New, monospace',
131             size: 18
132         },
133         xref: 'paper',
134         x: 0.9,
135     },
136 })
137 }
138 }
139
140
141
142 function initial_graph(x){
143     var arr = [];
144     for (var i = 0; i < 12; i = i+0.1) {
145         arr.push(i.toFixed(1));
146     }
147     console.log(arr)
148     x_axis_2 = ['13.0','14.0','15.0','16.0','17.0','18.0','19.0','20.0','21.0','22.0','23.0','24.0','25.0','26.0','27.0','28.0','29.0','30.0']
149     generated_x = [...arr,...x_axis_2]
150
151
152     generated_y = []
153     for (i in arr) {
154         generated_y.push(windEnergy(arr[i]));
155     }
156 }

```

```
157 generated_y = [...generated_y, 3053, 3053, 3053, 3053, 3053, 3053, 3053, 3053, 3053, 3053, 3053, 3053, 3053, 0, 0, 0, 0, 0 ]
158
159
160 Plotly.newPlot( document.getElementById('tester'), {
161   {
162     x: generated_x,
163     y: generated_y
164   },
165 },
166 {
167   {
168     x:[0],
169     y:[0],
170     mode: 'lines+markers',
171     type: 'scatter'
172   }
173 }, {
174   margin: { b: 30, t: 25 },
175   showlegend: false,
176   xaxis: {
177     title: {
178       text: 'Wind Speed(m/s)'
179     }
180   },
181   yaxis: {
182     title: {
183       text: 'Performance(kW)'
184     }
185   }
186 },
187 {
188   title: {
189     text: 'Turbine Performance',
190     font: {
191       family: 'Courier New, monospace',
192       size: 18
193     },
194     xref: 'paper',
195     x: 0.9,
196   },
197 },
198 }
```

```
196 })
197
198 }
199
200
201 initial_graph('12.3')
202
```

## **Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

---

Ort

Datum

Unterschrift im Original