



Bildung mit Energie
ENTDECKEN, ERFORSCHEN, ERLEBEN

BEGLEITDOKUMENT - MODUL 2

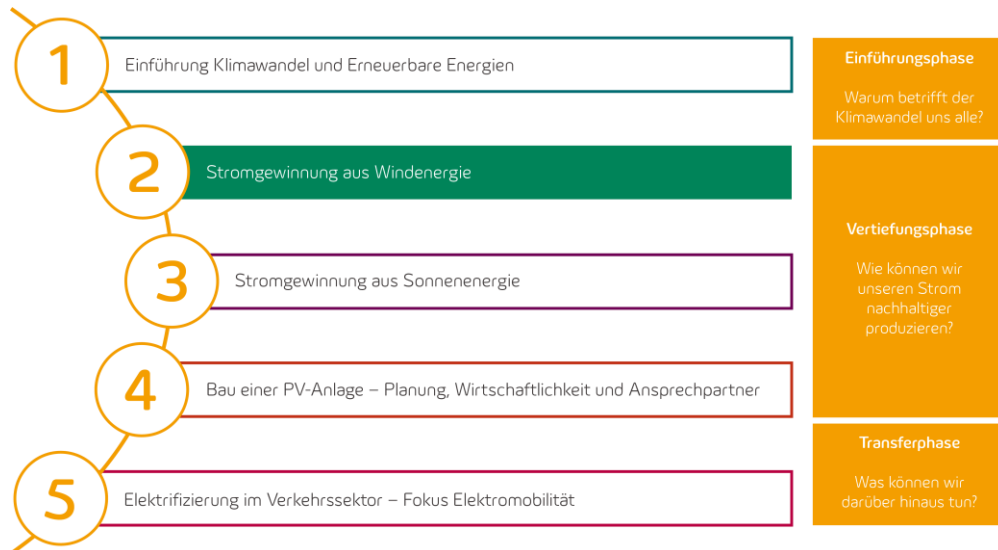
Stromgewinnung aus Windenergie

o zukunftsgeladen

Inhalt

1	Einordnung des Moduls in Gesamtkontext	3
2	Gesamtübersicht der Unterrichtseinheit	3
3	Ziele für diese Unterrichtseinheit	3
4	Checkliste zur Vorbereitung der Unterrichtseinheit	4
5	Detailerklärungen zu einzelnen Schwerpunkten der Agenda	5
5.1	Check-In (10min)	5
5.1.1	Erläuterung der Motivation für die kommenden Unterrichtseinheiten (UE)	5
5.1.2	Kennenlernen der SchülerInnen	5
5.2	Einführung in die Windenergie (10min)	6
5.3	Theorie Teil 1: Komponenten und Aufbau einer Windenergieanlage (10min)	11
5.4	Experimente (45min)	15
5.5	Theorie Teil 2: Theorie hinter der Funktionalität einer Windenergieanlage (10min)	16
5.5.1	Dynamischer Auftrieb	16
5.5.2	Die optimale Rotorblattanzahl	17
5.6	Check-Out (5min)	18
6	Zusammenfassung	19
7	Anhang	20
7.1	Windlandkarte Deutschland A0 Farbe (Datei M2_01)	20
7.2	Wichtige Fakten zur Windenergie (Datei M2_02)	21
7.3	Entwicklung und Ausbauszenarien Deutschland (Datei M2_03)	22
7.4	CO ₂ Ausstoß pro Energieträger (Datei M2_04)	23
7.5	Poster Windenergieanlage (Datei M2_05)	24
7.6	Experimente Windenergie für SchülerInnen (Datei M2_06)	25
7.7	Experimente Windenergie für Lehrpersonal (Datei M2_07)	25

1 Einordnung des Moduls in Gesamtkontext



2 Gesamtübersicht der Unterrichtseinheit

Agenda		
Zeit	Schwerpunkte	Inhaltliche Ausgestaltung
10min	Check-In	
10min	Einführung in die Windenergie	Einführende Grundlagen zu: <ul style="list-style-type: none"> • Windaufkommen • Standort von Windrädern • Rauigkeitseffekt
10min	Theorie Teil 1	<ul style="list-style-type: none"> • Komponenten Windenergieanlage • Aufbau Windenergieanlage
10min	Aufbau Experimentierkoffer	<ul style="list-style-type: none"> • Gruppen bilden • Koffer verteilen • Basis aufbauen und Experimente verteilen
30min	Durchführung Experimente	Experimente zu <ul style="list-style-type: none"> • Flügelform • Flügelanzahl • Einstellwinkel • Windgeschwindigkeit
5min	Vorstellung Experimente	<ul style="list-style-type: none"> • Gruppen stellen sich gegenseitig Ergebnisse ihrer Experimente vor
10min	Theorie Teil 2	<ul style="list-style-type: none"> • Dynamischer Auftrieb • Optimale Anzahl der Rotorblätter
5min	Check-Out	

3 Ziele für diese Unterrichtseinheit

Mit der Unterrichtseinheit (UE) zum Thema Stromgewinnung aus Windenergie wird auf die Vermittlung folgender Themen abgezielt:

- Die SchülerInnen kennen die Grundlagen zur Windenergieerzeugung, angefangen beim Windaufkommen in Deutschland bis hin zu Aspekten der Standortwahl.
- Die SchülerInnen haben einen Überblick über die Komponenten einer Windenergieanlage und können den optimalen Aufbau einer industriellen Windenergieanlage nachvollziehen. Die Theorie wird spielerisch im Rahmen verschiedener Experimente erarbeitet bzw. vertieft.
- Die SchülerInnen sind mit den physikalischen Grundlagen einer Windenergieanlage vertraut.

4 Checkliste zur Vorbereitung der Unterrichtseinheit

Vorbereiten

- Experimentierkoffer bestellt (1 Koffer für 3-4 SchülerInnen; Lieferzeit ca. 1 Woche)
- Flipcharts mit Agenda, KPIs und Stimmungcheck
- „Experimente Windenergie für Lehrpersonal“ gesichtet und Experimente probeweise durchgeführt

Ausdrucken

- M2_01 „Windlandkarte Deutschland“, Empfehlung DIN A0 (siehe 7.1)
- M2_02 „Wichtige Fakten zur Windenergie“, Empfehlung DIN A3 (siehe 7.2)
- M2_03 „Entwicklung und Ausbauszenarien Deutschland“, Empfehlung DIN A3 (siehe 7.3)
- M2_04 „CO₂ Ausstoß pro Energieträger“, Empfehlung DIN A4 (siehe 7.4)
- M2_05 „Poster Windenergieanlage“, Empfehlung DIN A0
- M2_06 „Experimente Windenergie für SchülerInnen“ je 1 Set pro SchülerIn, Empfehlung DIN A4 (siehe 7.7)

Mitbringen:

- Stifte
- Flipchart

5 Detailerklärungen zu einzelnen Schwerpunkten der Agenda

5.1 Check-In (10min)

5.1.1 Erläuterung der Motivation für die kommenden Unterrichtseinheiten (UE)

- ✚ Ziel: Anfänglich gilt es mit den SchülerInnen zu klären, warum diese (UE) abgehalten werden, was in dieser und in den folgenden UE im groben Rahmen passieren wird.
- ⚙ Vorbereitung: Um den SchülerInnen den Rahmen und die Ziele der UE dauerhaft während der UE anzeigen zu können, ist es möglich Flipcharts mit Agenda und KPIs vorzubereiten wie beispielhaft in den untenstehenden Bildern dargestellt:

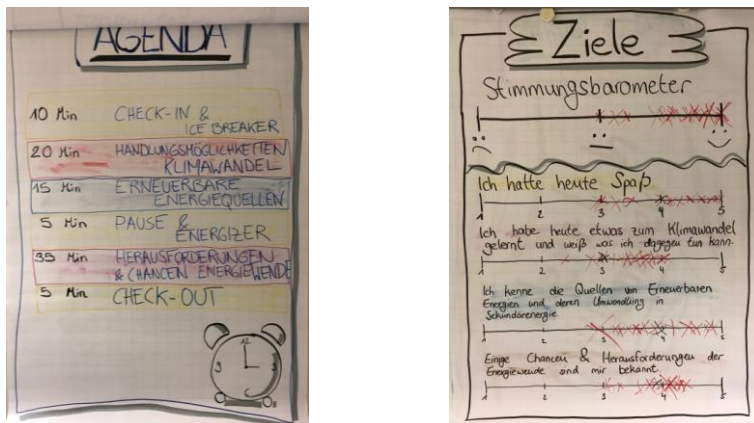


Abb. 1: Beispiele für Flipcharts mit Agenda, KPIs und Stimmungscheck

- ☞ Durchführung: Die Stimmung aller Teilnehmer wird im Vorfeld abgefragt, die Bewertungen der anderen Ziele werden im Nachgang erfasst.

- 🕒 Tipps & Tricks: Für eine Zusammenfassung aller UE siehe Anhang Modul 5.

5.1.2 Kennenlernen der SchülerInnen

- ✚ Ziel: Die Teilnehmer der UE lernen sich gegenseitig kennen und machen sich vertraut. Optional kann dies durch eine einfache Fragerunde oder einen spielerischen Ice-Breaker (eine gelockerte Atmosphäre wird geschaffen) realisiert werden. Für den spielerischen Einstieg siehe beispielhaft die nachfolgenden Punkte:
- ⚙ Vorbereitung: Die SchülerInnen stellen sich im Kreis auf (ideal für den zweiten Abschnitt dieses Teils ist ein Stuhlkreis).
- ☞ Durchführung Schritt 1: Im Kreis stehende Teilnehmer werfen sich imaginären Ball zu und beantworten folgende Fragen, bis jeder Teilnehmer einmal gesprochen hat:
 - Wie heiße ich?
 - Wo komme ich her?
 - Worauf bin ich heute am meisten gespannt/freue ich mich am meisten?

☞ Durchführung Schritt 2: Zum weiteren Kennenlernen wird das Spiel „Der Wind weht für alle, die...“ gespielt. Es wird wie folgt durchgeführt:

1. Aufstellen von n-1 Stühlen im Kreis.
2. Ein Teilnehmer beginnt und stellt sich in die Mitte des Kreises.
3. Ziel dieses Teilnehmers ist es, sich einen Sitzplatz zu sichern.
4. In der Mitte stehender Teilnehmer beginnt Satz mit „Der Wind weht für alle, die ...“.
5. Satz wird beendet durch typische und untypische Vorlieben, Hobbys, Eigenschaften, etc. (idealerweise keine äußeren Erscheinungsmerkmale).
6. Alle, auf die die Aussage zutrifft, müssen sich einen neuen Sitzplatz suchen.
7. Während des Wechsels muss der in der Mitte stehende Teilnehmer versuchen einen Sitzplatz zu finden.
8. Wer keinen Platz im Kreis findet, stellt sich in die Kreismitte und vervollständigt als Nächster den Satz.
9. Ziel ist es sich gegenseitig besser kennenzulernen und eine vertraute Atmosphäre zu schaffen.

5.2 Einführung in die Windenergie (10min)

🌳 Ziel: Es wird die Frage geklärt, wieso die Windenergie dem Klimawandel entgegenwirkt und Wissen zum Windaufkommen in Deutschland, dem aktuellen Stand des Anlagenausbaus und der zukünftigen Entwicklung in Deutschland vermittelt.

🌀 Vorbereitung: Die Windkarte wird im Format DIN A0 im Vorfeld an diesen Teil ausgedruckt sowie die Kärtchen mit den „Wichtigen Fakten zur Windenergie“, die idealerweise in Farbe auf DIN A3. Gleichermäßen ist das Blatt mit „Bisherige Entwicklung und Ausbauszenarien für die Windenergie on- und offshore in DE“ in Farbe auf DIN A3 auszudrucken. Die untenstehende Tabelle zum CO₂ Ausstoß pro Energieträger sollte auf das Flipchart gezeichnet werden.

☞ Durchführung Schritt 1: Im ersten Schritt soll der Begriff Windenergie definiert werden. Folgend soll die Frage beantwortet werden, wieso die Windenergie dem Klimawandel entgegenwirkt. Hierzu wird eine Tabelle mit den CO₂ Ausstoßmengen verschiedener Energieträger präsentiert.

- a) Definition Windenergie: Definition Windenergie: Windenergie bezeichnet die Nutzung der Bewegungsenergie (kinetischen Energie) von Luftbewegungen zur Gewinnung von Strom.
- b) Wie ist die Windenergie für die Bekämpfung des Klimawandels vorteilhaft? Warum werden Braunkohlekraftwerke geschlossen und Windenergieanlagen gebaut?
In der Tabelle werden die CO₂ Emissionen von verschiedenen Energieträgern verglichen. Um eine Kilowattstunde Strom aus Braunkohle zu erzeugen stößt man im Vergleich zu einer Kilowattstunde Strom aus Windkraft das 40-fache an CO₂ aus. Durch den deutlich geringeren Ausstoß an CO₂ ist die Windenergie eine geeignete Form der Stromerzeugung, um dem Klimawandel entgegenzuwirken.

Hintergrundwissen: Die Kalkulation berücksichtigt alle CO₂ Emissionen, die über den Lebenszyklus einer Anlage entstehen, d.h. während der Gewinnung der Rohstoffe, Herstellung der Anlage, Transport, Bau, sowie Wartung, Abriss und Recycling.

CO₂ Ausstoß pro Energieträger¹

Energieträger	CO ₂ Ausstoß je kWh
Braunkohle	1.000 g
Steinkohle	810 g
Erdgas	377 g
Photovoltaik	89 g
Kernenergie	27 g
Windkraft	24 g

☞ Durchführung Schritt 2: In diesem Schritt wird unter Verwendung einer Landkarte das Windaufkommen in Deutschland aufgezeigt. Hier soll auf die unterschiedlichen Bedingungen in den Regionen eingegangen werden. Folgend wird der aktuelle Stand des Windanlagenausbaus präsentiert und mittels Kärtchen an die Landkarte angebracht. Abschließend wird eine Statistik mit der zukünftigen Entwicklung präsentiert.

- a) Welches Windaufkommen haben wir in Deutschland? In welchen Gebieten stehen die meisten Windenergieanlagen?

Hintergrundwissen: Im Vergleich zu der Nutzung anderer Primärenergien ist die große Herausforderung bei der Windkraft, dass sie direkt vor Ort genutzt bzw. umgewandelt werden muss. Gegenbeispiel Biomasse: Holzpellets werden auf dem Land erzeugt und in die Stadt transportiert, wo sie genutzt werden können.

Die Wahl eines geeigneten Standortes ist extrem wichtig:

- Deutschland hat knapp 8% der Landfläche außerhalb von Wäldern und Schutzgebieten, welche potentiell für die Windenergienutzung zur Verfügung stehen. Ziel ist es 2% für die Windkraft zu nutzen.²
- Der Standort sollte einen möglichst starken und konstanten Wind vorweisen. Kriterium ist: Durchschnittliche Windgeschwindigkeit über einen bestimmten Zeitraum (in Meter pro Sekunde)

Präsentation der Windlandkarte in Deutschland:

- Hier wird die durchschnittliche Windgeschwindigkeit über 20 Jahre hinweg aufgezeigt: Ungleiche Verteilung in Deutschland: Der Hauptunterschied liegt

¹ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/233868/umfrage/co2-emissionen-bei-der-stromerzeugung-nach-erzeugungsart/>

² <https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente-landesverbaende/schleswig-holstein/publikationen/schleswig-holstein-potenzial.pdf>

zwischen den südlichen Bundesländern (geringes Aufkommen) und dem Norden (hohes Aufkommen). Beste Windverhältnisse liegen in den Küstenregionen vor, hauptsächlich an der Nordsee. Darüber hinaus verfügen auch Gebirge über hohe Windaufkommen.

- Was ist der Grund für die ungleiche Aufteilung?
 - Lokale Begebenheiten, wie Bebauung, Geländeform und Bewuchs beeinflussen die Windgeschwindigkeit.
 - Die Windgeschwindigkeit nimmt mit der Höhe zu. Deswegen stehen viele Windanlagen auf Anhöhen.
 - Das Meer ist durch die gleichmäßige Oberfläche ein attraktiver Standort. Landeinwärts bedarf es immer größerer Höhen, um vergleichbare Windgeschwindigkeiten wie an der Küste zu erreichen.³
 - Bei den besten Standorten besteht oft die Herausforderung, eines komplizierten Baus und Wartung der Anlage (Bsp. Offshore auf dem Meer oder auf Bergspitzen).

Hintergrundwissen: In einer bestimmten Höhe ab ca. 1000m befindet sich die Höhenströmung welche nicht von der Oberfläche der Erde beeinflusst wird (Große Kontinentalgebirge bilden hier eine Ausnahme). Näher an der Oberfläche kommt es durch Oberflächengegebenheiten zu Turbulenzen (Verwirbelungen = Wind strömt nicht mehr gleichmäßig in eine Richtung) in den Windströmungen. ⁴

b) Wichtige Fakten zum Ausbau der Windenergieanlagen in Deutschland (Stand 2019).
Folgende Informationen werden an die Windlandkarte angeheftet:

- Strommix in Deutschland (A)
 - i. Erneuerbare Energien bei 33,3% der gesamten Erzeugung
 - ii. Windkraft bei 16,3%
- Deutschlandweiter Ausbau der Windenergieanlagen (WEA) (B)
 - i. Anzahl: Ca. 30.000 WEA mit insgesamt ca. 58 GW Leistung
 - ii. 113 TWh Einspeisung 2018 Von Gesamtstromverbrauch 540 TWh in DE
- Onshore Windenergieanlagen (C + D)
 - i. Anzahl: 29.071; Leistung: 52,3 GW
 - ii. In Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Nordrhein-Westfalen stehen 50% aller Onshore WEA
- Offshore Windparks (E + F + G)
 - i. Anzahl: 1.160; Leistung: 5,3 GW
 - ii. Nordsee 87% der installierten Offshore Leistung; Ostsee 13%

³ <http://www.renewable-energy-concepts.com/german/windenergie/wind-basiswissen/rauhigkeitsklassen.html>

⁴ <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/hoehenstroemung/3535>

Anordnung der Faktenkärtchen:

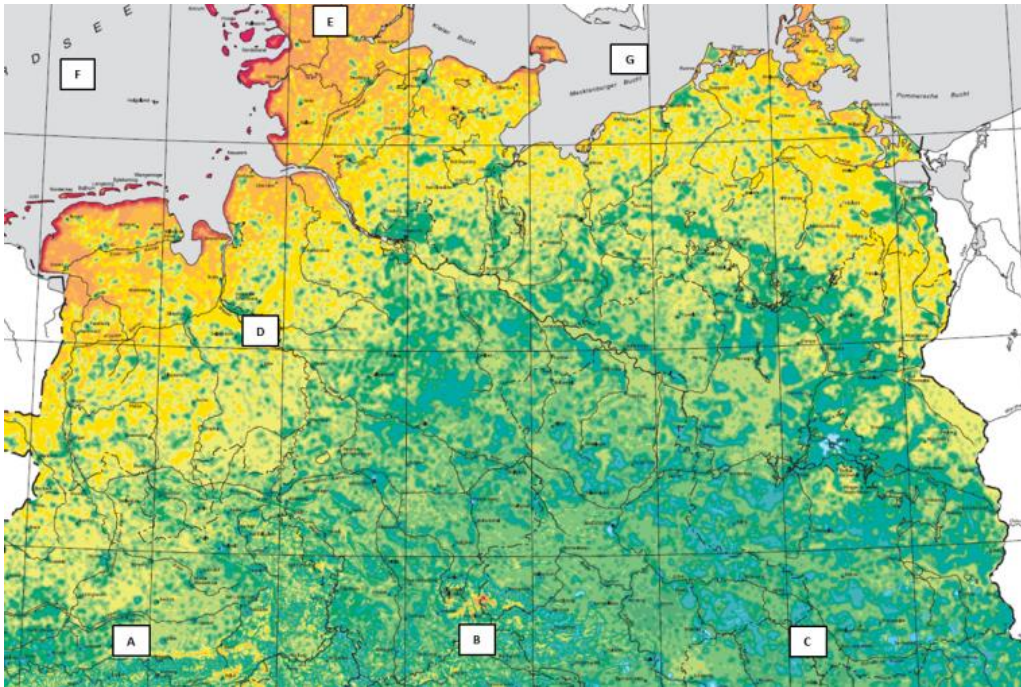


Abb. 1: Windlandkarte Deutschland

a) Zukünftiger Ausbau Windenergie in Deutschland:⁵

Hintergrundwissen: Momentan (2018) wird von einer Flaute beim Windenergie-Ausbau gesprochen. Ursache für den rückläufigen Ausbautrend sind politische Vorgaben und Regelungen. Mit der jüngsten Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) wurden beispielsweise durch den Gesetzgeber Ausschreibungen eingeführt und das Volumen begrenzt.

Dies ist etwas überraschend, weil Strom aus Wind mittlerweile nicht mehr teurer ist als aus anderen Kraftwerken und keine, oder nur geringe, Subventionen benötigt. An vielen windgünstigen Standorten ist die Windenergie weltweit mittlerweile wettbewerbsfähig gegenüber neu errichteten konventionellen Kraftwerken, auch in Deutschland.

Wurden im vergangenen Jahr (2017) an Land noch 1.792 neue Windräder mit einer Leistung von 5,3 Gigawatt aufgestellt, so dürfte die Ausbauleistung in diesem Jahr (2019) um rund ein Drittel auf weniger als 3,5 Gigawatt zurückgehen.

Auf See ist der Ausbau gedeckelt und hängt unter anderem mit den für den Stromtransport zum Land errichteten Kapazitäten zusammen. Schon lange steht die Forderung der Branche im Raum, den Ausbaudeckel für die Windkraft auf See bis 2030 von 15 auf 20 Gigawatt anzuheben. (ca. +10 bis 15-fache in 12 Jahren).

Eine Problematik stellen alte Windenergieanlagen dar: 2020 könnten mehr und mehr alte Windenergieanlagen abgeschaltet werden, weil deren Förderung nach 20 Jahren ausläuft und sie nicht mehr wirtschaftlich zu betreiben sind. Bis 2023 laufen mehr als ein Viertel aller Windkraftwerke in Deutschland aus der Förderung.

⁵ <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/erneuerbare-energien-experten-erwarten-gebremsten-ausbau-von-windenergie/22780084.html?ticket=ST-3341590-1bfMD7o2soZHCgF4zv3i-ap6>

- Der Ausbaupfad in der folgenden Abbildung stellt eine Annahme des Fraunhofer IEE (Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik) zur künftigen Entwicklung dar. Enthalten sind:
 - i. Die aktuell gesetzlich vorgesehenen Ausschreibungsmengen
 - ii. Der Zubau im Jahr 2018 anhand der bestehenden Genehmigungen
 - iii. Die Stilllegung von WEA nach Erreichen der 20-jährigen Lebensdauer
- Ergebnis:
 - iv. Der Ausbau wird nach 2018 durch das Ausschreibungsverfahren gebremst. (Volumen der Ausschreibungen ist begrenzt)
 - v. Durch den Wegfall der Anlagen aus den zubaustarken Jahren 2000 - 2005 verläuft der Ausbaupfad zwischen 2020 und 2025 sehr flach.

Der aktuelle Klimaschutzplan der Bundesregierung von 2016 bildet mit 69,6 GW die Zielmarke des Ausbaupfades [Bundesumweltministerium].⁶

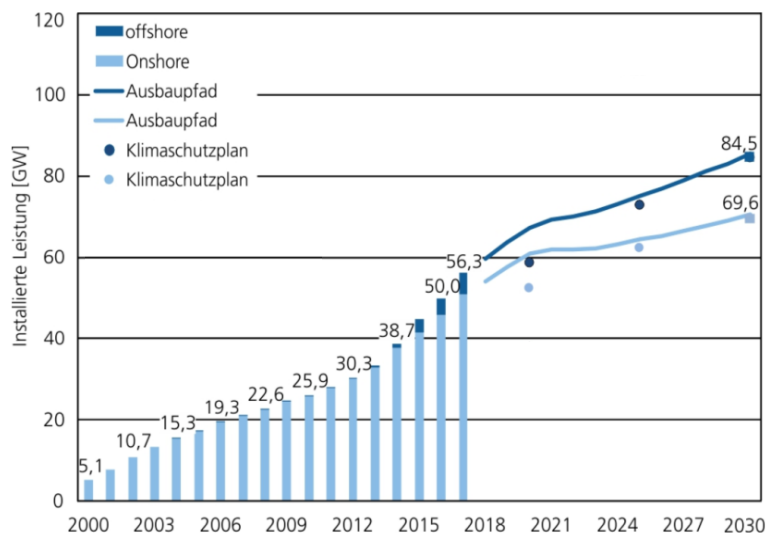


Abb. 2: Ausbaupfad Windenergie in Deutschland 2000 – 2030

5.3 Theorie Teil 1: Komponenten und Aufbau einer Windenergieanlage (10min)

- 🎯 Ziel: In diesem Teil wird auf die Vermittlung des technischen Aufbaus einer Windenergieanlage sowie einiger technischer und wirtschaftlicher Dimensionen abgezielt.
- 🧠 Vorbereitung: Zur Vorbereitung dieser Einheit sollte das Plakat ‚Komponenten einer Windenergieanlage‘ in DIN A0 geplotet und anschließend die Infotexte unter den Komponentenbezeichnungen abgeklebt werden – diese Inhalte werden im Dialog erarbeitet. Zudem wird eine Tafel / ein Whiteboard für eine kurze Rechnung benötigt.
- 👥 Durchführung Schritt 1: Im ersten Schritt soll gemeinsam mit den SchülerInnen der Aufbau einer Windenergieanlage erarbeitet werden. Der Reihe nach werden unter Zuhilfenahme des

⁶ http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor_de/1_wind-im-strommix/1_energiewende-in-deutschland/5_Ausbau_der_Windenergie/

Plakats die wichtigsten Komponenten durchgesprochen. Hierbei sollte zunächst der Name der Komponente genannt werden. Anschließend sind die SchülerInnen gefragt etwas zu dem Zweck der jeweiligen Komponente zu sagen. Die von den SchülerInnen gegebenen Informationen sollten Sie ergänzen, bevor mit der nächsten Komponente fortgefahren wird. Hier eine Auflistung der Komponenten inkl. Beschreibung und einiger Zusatzinformationen über das Plakat hinaus:

1. Turm: Der Turm stellt die größte und schwerste Komponente einer Windenergieanlage dar und macht ca. 15 bis 25% der gesamten Investitionskosten aus. Die Bauart des Turms ist abhängig von Anlagentyp, Nabenhöhe und Windprofil. Heute sind Rohrtürme aus Stahl am weitesten verbreitet.

Hintergrundwissen: Die Höhe des Turms ist stark standortabhängig. Für Standorte mit einer hohen Bodenrauigkeit (Wald, Wohngebäude o.Ä.) kommen bspw. höhere Türme zum Einsatz, um einen möglichst gleichmäßigen und hohen Windertrag zu haben.

2. Rotorblatt: Das Rotorblatt stellt die Hauptkomponente bei der Umwandlung von Windenergie in mechanische Energie dar und ist im Durchschnitt 50 bis 80 m lang. Zur energetischen Umwandlung wird das Prinzip des dynamischen Auftriebes genutzt (siehe Kapitel 5.4.1). Um die perfekte Position gegenüber der anströmenden Luft zu erreichen kann das Rotorblatt verstellt werden (pitchen).

Hintergrundwissen: Bei der Auslegung müssen aerodynamische wie auch mechanische Eigenschaften berücksichtigt und in Einklang gebracht werden.

3. Rotornabe: Die Rotornabe verbindet die Rotorblätter mit dem Rest der Anlage und überträgt die aufgenommene Leistung. An der Nabe wird die Nabenhöhe als Kennzahl zur Höhenangabe einer Windenergieanlage erfasst. Die durchschnittliche Nabenhöhe liegt zwischen 120 und 140m.

Hintergrundwissen: In der Nabe an der Rotorblattaufnahme befinden sich kleinere Getriebe, um eine Blattverstellung (pitchen) und damit eine Leistungsregelung zu ermöglichen.

4. Getriebe: Es gibt sowohl Windenergieanlagen mit, als auch ohne Getriebe. Bei einer Windenergieanlage ohne Getriebe sind Antriebsstrang und Generator direkt miteinander verbunden. Darüber hinaus kommt ein sehr großer Generator zum Einsatz. Bei Windenergieanlagen mit Getriebe ist eben jenes zwischen Antriebsstrang und Generator geschaltet, um die Drehzahl und das Drehmoment anzupassen. Hier kommen kleinere Generatoren zum Einsatz. Allgemein ist das Ziel des Getriebes die niedrige Drehzahl verbunden mit einem hohen Drehmoment des Rotors ($6\text{-}20\text{ min}^{-1}$) in eine hohe Drehzahl ($900\text{-}2000\text{ min}^{-1}$) mit niedrigerem Drehmoment am Generator umzuwandeln.

Hintergrundwissen: Die Baugröße eines Getriebes wird durch das notwendige Übersetzungsverhältnis zwischen Rotor und Generatorwelle bestimmt. Für große Anlagen sind Übersetzungsverhältnisse von 1:100 üblich.

5. Bremse: Mechanische Scheibenbremsen werden zur Fixierung der Rotorblätter, Notabschaltung und zum manuellen Stopp bei Wartung eingesetzt.

Hintergrundwissen: Nicht zur Abriegelung der Drehgeschwindigkeit geeignet, da zu klein dimensioniert.

6. Messinstrumente: Messwerte wie Windgeschwindigkeit und -richtung werden direkt an der Windenergieanlage ermittelt, damit sich die Anlage optimal auf die aktuellen Bedingungen einstellen kann.

Hintergrundwissen: Resultierende Einstellmöglichkeiten wären das Drehen der Rotorblätter zur Anpassung an die Windgeschwindigkeit und das Drehen der gesamten Windenergieanlage über dem Turm zur Orientierung an der Windrichtung.

7. Generator: Der Generator besteht aus Rotor und Stator und ist ein Energiewandler, der mechanische Energie in elektrische Energie umwandelt. In der heutigen Industrie werden Generatoren mit einer Leistung zwischen 2,5 und 10,0 MW eingesetzt, wobei neu errichtete Anlagen in der Regel Generatoren über 8,0 MW nutzen.

Hintergrundwissen: Das Prinzip des Generators ist vergleichbar mit dem eines Fahrraddynamos. In der Regel liegt bei großen Windenergieanlagen eine Spannung von 690 V an. Diese Spannung wird mit einem Transformator in Abhängigkeit von der lokalen Netzspannung auf 20 kV bis 110 kV transformiert.

8. Gondel: Die Gondel dient als Einhausung und schützt die sensible Technik vor Umwelteinflüssen. Üblicherweise besteht sie aus glasfaserverstärktem Kunststoff oder Aluminium.

Zum Abschluss kann noch einmal auf die Höhe der auf dem Poster abgebildeten Windenergieanlage eingegangen werden, um eine Verhältnismäßigkeit herzustellen.

⊗ Tipps & Tricks: Die Zeit von 1 Minute / Komponente ist knapp bemessen und nur ausreichend für kurze Diskussionen je Komponente. Sollte mehr Zeit zur Verfügung stehen (z.B. kann UE auf zwei UE aufgeteilt werden), bietet es sich an den SchülerInnen mehr Zeit zum Nachdenken und zur Diskussion zu lassen. Darüber hinaus kann es hilfreich sein, den SchülerInnen im Vorhinein die Möglichkeit zu geben, sich bereits mit dem Plakat vertraut zu machen. So ist eine intensive Beteiligung realistischer und das Gelernte verankert sich besser.

☞ Durchführung Schritt 2: Um ein Gefühl für die erzeugte Menge Windstrom einer Windenergieanlage zu bekommen, kann eine recht einfache Rechnung helfen. Hierbei wird mit wenigen Informationen berechnet, wie viele Haushalte eine Windenergieanlage mit Strom versorgen kann. Folgende Informationen sind gegeben:

- Kapazität der Turbine: 8 MW
- Ø Stromverbrauch eines 2 Personen-Haushalts: 2.500 kWh/a
- Ø Volllaststunden äquivalente einer Offshore WEA: 5.000 h/a

Hintergrundwissen: Die Produktionszeit einer Windenergieanlage wird in der Regel als äquivalent angegeben, da es die Leistungskennlinie zu berücksichtigen gilt. Denn auch wenn sich eine Windenergieanlage nicht im Volllastbetrieb befindet, wird dennoch Strom produziert. Entsprechend gilt es die erzeugte Strommenge umzulegen.

Rechnung:

//Umrechnung der Anlagenkapazität in kW zur Angleichung an den Ø Stromverbrauch

$$8 \text{ MW (Kapazität)} * 1.000 = 8.000 \text{ kW}$$

//Multiplikation der Anlagenkapazität mit den Volllaststunden (Aussage der Rechnung: Eine Anlage mit einer Kapazität von 8.000 kW wird 5000 Stunden im Jahr in Volllast betrieben)

$$8.000 \text{ kW (Kapazität)} * 5000 \frac{\text{h}}{\text{a}} (\text{Ø Volllaststunden äq.}) = 40.000.000 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} (\text{Windstrom})$$







//Abschließend gilt es den im gesamten Jahr erzeugten Windstrom durch den Ø Stromverbrauch eines Haushalts zu teilen, um die Anzahl der versorgten Haushalte zu berechnen.

$$\frac{40.000.000 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} (\text{Windstrom})}{2.500 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} (\text{Ø Stromverbrauch})} = 16.000 \text{ Haushalte}$$

⊗ Tipps & Tricks: Für weniger mathematisch interessierte SchülerInnen kann die eigenständige Herleitung der Rechnung durchaus fordernd sein. Deshalb sollte hier zuvor der Wissensstand der SchülerInnen eingeschätzt und der Abschnitt entsprechend durchgeführt werden.

- Bei weniger mathematisch interessierten SchülerInnen, sollte die Berechnung gemeinsam erfolgen.
- Bei mathematisch interessierten SchülerInnen, können die gegebenen Informationen geteilt werden und die SchülerInnen führen die Berechnung eigenständig durch.

5.4 Experimente (45min)

-  Ziel: Das Ziel der Experimente ist es den SchülerInnen auf praktische Art nahezubringen, wie ein Windrad konzipiert werden sollte, um den besten Energieertrag zu erwirtschaften.
-  Vorbereitung: Für die Unterrichtsstunde ist der Experimentierkoffer *Windkraftkoffer* auf der Internetseite von 3malE zu bestellen (<http://www.3male.de/web/cms/de/1545464/schule/materialien-fuer-die-schule/experimentierkoffer/windkraftkoffer/>). Diese haben eine Lieferzeit von circa einer Woche. Wir empfehlen einen Koffer für 3-4 SchülerInnen. Stellen Sie sicher, dass Sie den SchülerInnen die Arbeitsblätter ‚Experimente Windenergie für SchülerInnen‘ zur Verfügung stellen.
-  Durchführung Vorbereitung (10 Minuten): Die Gruppen aus SchülerInnen sollen sich als Experten in jeweils einem Bereich sehen. Es handelt sich um 4 Experimente zu den Themen Flügelform, Flügelanzahl, Einstellwinkel und Windgeschwindigkeit. Teilen Sie die SchülerInnen in Expertengruppen à 3-4 SchülerInnen ein und ordnen Sie jeder Gruppe einen beliebigen Experimentierkoffer zu. Teilen Sie alle Arbeitsblätter aus. Gruppe 1 ist verantwortlich für Experiment 1, Gruppe 2 für Experiment 2 und so weiter. Wenn es mehr als 4 Gruppen gibt, beginnt Gruppe 5 ebenfalls mit Experiment 1 und so weiter. Die SchülerInnen dürfen nun loslegen und das ihnen zugeordnete Experiment aufbauen. Überprüfen Sie bitte den ordnungsgemäßen Aufbau.
-  Durchführung der Experimente (30 Minuten): Nach dem erfolgreichen Aufbau können die SchülerInnen in die Ausführung der Experimente gehen. Wenn eine Gruppe mit ihrem Experiment fertig ist, kann sie sich mit einem nächsten Experiment beschäftigen; dieses muss sie im Anschluss allerdings nicht vorstellen.
-  Auswertung der Ergebnisse (5 Minuten): Wenn alle Gruppen fertig sind, stellen die jeweiligen Experten die Ergebnisse der Experimente vor. Es kommt nicht auf die einzelnen Messwerte an, sondern auf die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen. Die Lösungen finden Sie im Dokument „Experimente Windkraft für Lehrpersonal“. Fassen Sie die Ergebnisse der SchülerInnen zusammen, oder lassen Sie die SchülerInnen die Ergebnisse nochmal zusammenfassen. Wie sollte das ‚perfekte Windrad‘ konzipiert sein? Ein Windrad sollte also *gewölbte* Flügel aufweisen. Aus technischer Sicht sollten *so viele Flügel wie möglich* verwendet werden (Hier sollte auf den wirtschaftlichen Aspekt verwiesen werden, der zu dem Industriestandard von 3 Flügeln führt). Idealerweise ist der *Anstellwinkel variabel*, damit er an die Windgeschwindigkeit angepasst werden kann. Geographisch sollte darauf geachtet werden, dass das Windrad in einem *windreichen Gebiet* errichtet wird, um den Ertrag zu steigern.
-  Tipps & Tricks: Es empfiehlt sich in Vorbereitung auf die Unterrichtsstunde mit dem Experimentierkoffer vertraut zu machen und die Experimente mindestens einmal durchgeführt zu haben. Die Experimente sind dem Aufgabenheft im Windkraftkoffer entnommen und angepasst worden. Falls Sie mehr Zeit für den Experimentierteil einplanen wollen, finden Sie noch weitere spannende Experimente im Aufgabenheft. Beachten Sie, dass die Koffer nach 4 Wochen wieder zurückgesendet werden müssen.

5.5 Theorie Teil 2: Theorie hinter der Funktionalität einer Windenergieanlage (10min)

- ✂ Ziel: Dieser Modulteil soll den theoretischen Hintergrund zu den zuvor durchgeführten Experimenten liefern und beziehend auf die Ergebnisse der Experimente durchgeführt werden.
- 🌀 Vorbereitung: Dieser Theorieteil bedarf keiner weiteren Vorbereitung, da alle notwendigen Lehrmittel bereits auf dem Plakat abgebildet sind.
- ⚙ Durchführung: Zur Durchführung dieses Moduls wird zunächst auf das physikalische Prinzip des dynamischen Auftriebs eingegangen (Kapitel 5.5.1). Anschließend wird die physikalisch optimale Anzahl der Rotorblätter durch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erweitert (Kapitel 5.4.2.).

5.5.1 Dynamischer Auftrieb

Der dynamische Auftrieb ist die primäre jedoch nicht die alleinige Ursache dafür, dass sich ein Windrad dreht und ein Flugzeug fliegt. Doch wie ist dieses Prinzip zu erklären? Zunächst einmal strömt die Luft auf den Flügel (siehe 1). Trifft die anströmende Luft auf den Flügel, teilt sie sich an der Vorderkante des Flügels in einen Strom oberhalb und einen unterhalb des Flügels (siehe 2).

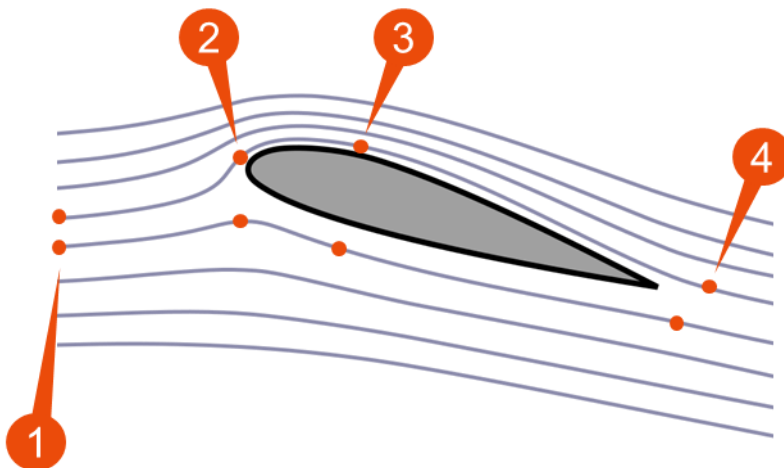


Abb. 3: Beispielhafte Darstellung des dynamischen Auftriebs

Die Luft oberhalb des Flügels strömt mit einer höheren Geschwindigkeit als die Luft unterhalb des Flügels. Nach dem Gesetz von Bernoulli führt dies zu einem Unterdruck über dem Flügel und einem Überdruck unter der Tragfläche – die Folge ist dynamischer Auftrieb. Doch wie kommt es zu den unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten?

Das ist die Folge einer Zirkulationsströmung. Bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten folgt die Strömung unter der Tragfläche der Heckkante. Wird der Luftstrom schneller, so kann die unter dem Flügel strömende Luft nicht mehr um die Heckkante nach oben strömen, sondern hat das Bestreben, einer gedachten Verlängerung der Tragflächenunterseite zu folgen. So entsteht der sog. Anfahrwirbel (siehe A). Als physikalische Konsequenz bildet sich ein zweiter Wirbel mit entgegengesetztem Drehimpuls. Dieser Wirbel bildet sich um den Flügel herum (siehe B) und wird als Zirkulation bezeichnet. Die Zirkulation überlagert sich mit der anströmenden Luft, sodass die Luft oberhalb des Flügels schneller als die Luft unterhalb des Flügels strömt.

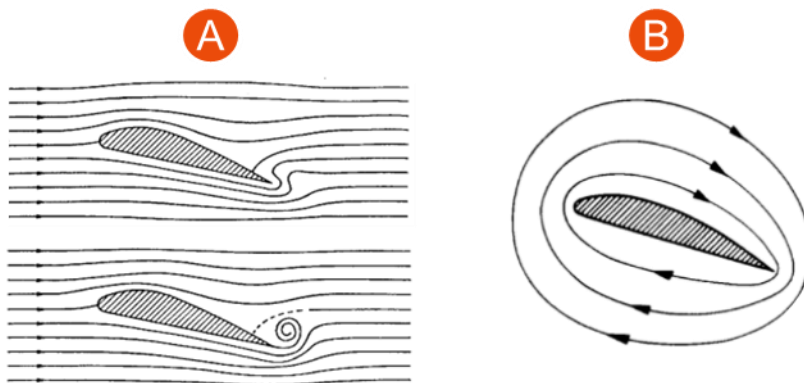


Abb. 4: Beispielhafte Darstellung einer Zirkulationsströmung

Verweis Experiment: Auch in den Experimenten konnte festgestellt werden, dass ein Windrad mit gewölbten Flügeln den höchsten Energieertrag hat. Eckige Flügel würden die Entstehung einer solchen Strömung nicht fördern. Zudem kann die Strömung bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten nur dann aufrechterhalten und einem Strömungsabriss vorgebeugt werden, wenn der Anstellwinkel variabel ist. Auch dies hat sich in den Experimenten gezeigt.

5.5.2 Die optimale Rotorblattanzahl

Hintergrundwissen: Viele Rotorflügel laufen langsam, haben ein hohes Drehmoment und können schon bei kleineren Windstärken starten. Ihre bekanntesten Einsatzgebiete sind Wasserpumpen und das Mahlen von Getreide. Man spricht von vielblättrigen Langsamläufern. Die heutigen kompakten Generatoren zur Stromerzeugung erfordern jedoch hohe Drehzahlen. Dies wird durch schnell laufende Rotoren mit möglichst wenig Flügeln erreicht, die aerodynamisch optimiert werden. Dabei spielen Form und Stellung der Rotorblätter eine entscheidende Rolle.


Windenergieanlagen lassen sich nach unterschiedlichen Kriterien klassifizieren. Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale liegen in der Windenergieumwandlung, der Bauform und der Rotor-aerodynamik. Am auffälligsten ist es, dass sich im Industriestandard die Bauform mit 3 Rotorblättern durchgesetzt hat. Anlagen mit 3 Rotorblättern werden von allen großen Herstellern eingesetzt und sind sowohl bei On- und Offshoreanlagen der Standard. Doch warum ist das so? In Bezug auf die optimale Rotorblattanzahl gilt es vereinfacht das Optimum im Zielkonflikt zwischen Energieertrag und Wirtschaftlichkeit zu finden. Betrachtet man das Optimum des Energieertrages, so sieht man, dass sich der Energieertrag mit der Anzahl der Rotorblätter erhöht.

Verweis Experiment: Wie in den Experimenten zu sehen, führt eine höhere Anzahl an Rotorblättern zu einem höheren Energieertrag. Die Kurve zeigt einen negativ logarithmischen Verlauf, was so viel heißt, dass mit jedem zusätzlichen Rotorblatt der Mehrertrag sinkt. So erhöht sich bspw. der Energieertrag von 1 auf 2 Rotorblätter deutlich und von 5 auf 6 Rotorblätter nur sehr wenig.


In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit wird es etwas komplexer. Generell lässt sich sagen, dass eine geringere Rotorblattanzahl zu geringeren Investitionskosten führt, das Optimum also bei weniger Rotorblättern liegt. Da 1, 2 oder 4 Rotorblätter allerdings zu einem instabilen Laufverhalten führen, sind hier erhöhte Instandhaltungskosten zu erwarten.

Heute hat sich gezeigt, dass 3 Rotorblätter das Optimum zwischen Energieertrag und Wirtschaftlichkeit sind. Auch sieht man hier schwingungstechnische Vorteile in der Handhabung und damit Lebensdauer.⁷


5.6 Check-Out (5min)

 Ziel: In diesem Teil erfolgt der inhaltliche und organisatorische Abschluss des zweiten Moduls. Es wird Feedback der SchülerInnen entgegengenommen und im Zuge dessen auch noch einmal auf die anfänglich gesteckten Ziele geschaut

 Vorbereitung: Für diesen Punkt ist keine Vorbereitung notwendig.

 Durchführung Schritt 1: Im Folgenden ist beispielhaft eine Formulierungsmöglichkeit angegeben:

„Vielen Dank für eure Mitarbeit heute. Es hat mir großen Spaß gemacht und euch hoffentlich auch. Wir möchten das Modul gerne mit einem "Wort des Tages" abschließen, mit dem jeder von euch kurz zusammenfasst, was er von heute mitnimmt. Wir freuen uns natürlich auch immer über Feedback und Anregungen - sowohl was euch gut gefallen hat, als auch was wir noch besser machen können. Im nächsten Modul werden wir mit euch tiefer in Photovoltaik eintauchen und uns einzelne Technologien im Detail anschauen. Insofern, vielen Dank noch mal an euch und viel Spaß beim nächsten Mal!“

 Durchführung Schritt 2: Die SchülerInnen füllen abschließend die am Flipchart festgehaltenen Ziele aus. Das Ergebnis kann ggf. noch in der gleichen Stunde kurz diskutiert werden oder als Aufhänger für das nachfolgende Modul genutzt werden.

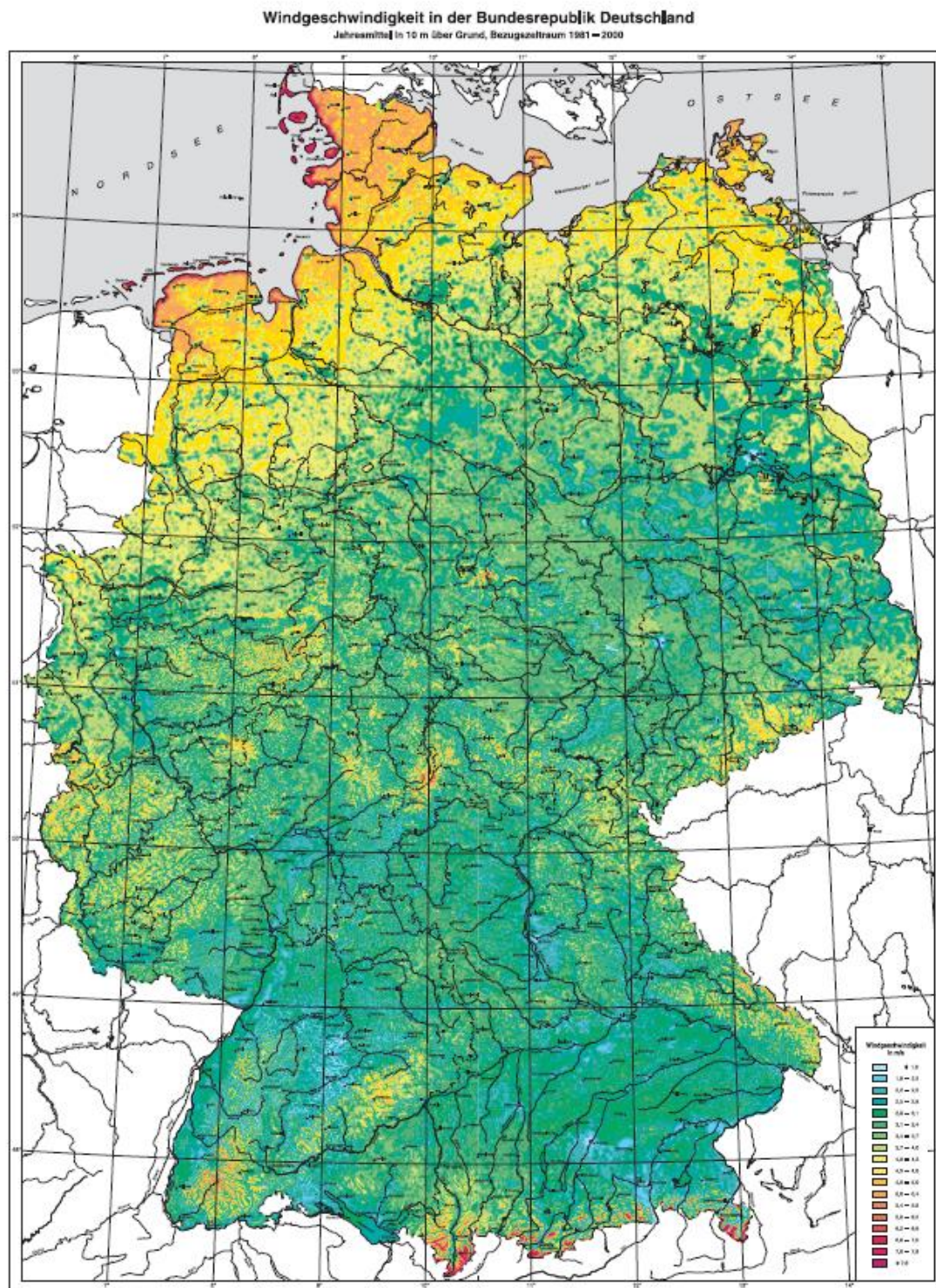
⁷ <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/energie/windenergie/technik-der-windkraft/>

6 Zusammenfassung

- Die Nutzung von Windenergie wirkt dem Klimawandel entgegen.
- Der optimale Standort einer Windenergieanlage wird durch viele Faktoren bestimmt (Windaufkommen, Rauigkeit, Untergrund etc.).
- Eine Windenergieanlage funktioniert ähnlich wie ein Dynamo.
- Gewölbte Rotorblätter sind aufgrund des dynamischen Auftriebs am effizientesten (Funktionsweise vergleichbar zum Flugzeug); Industriestandard sind aus wirtschaftlichen Gründen 3 Rotorblätter.
- Windenergie ist eine veritable Alternative zu fossiler Energie, denn eine durchschnittliche Windenergieanlage kann bis zu 16.000 Haushalte mit Strom versorgen.

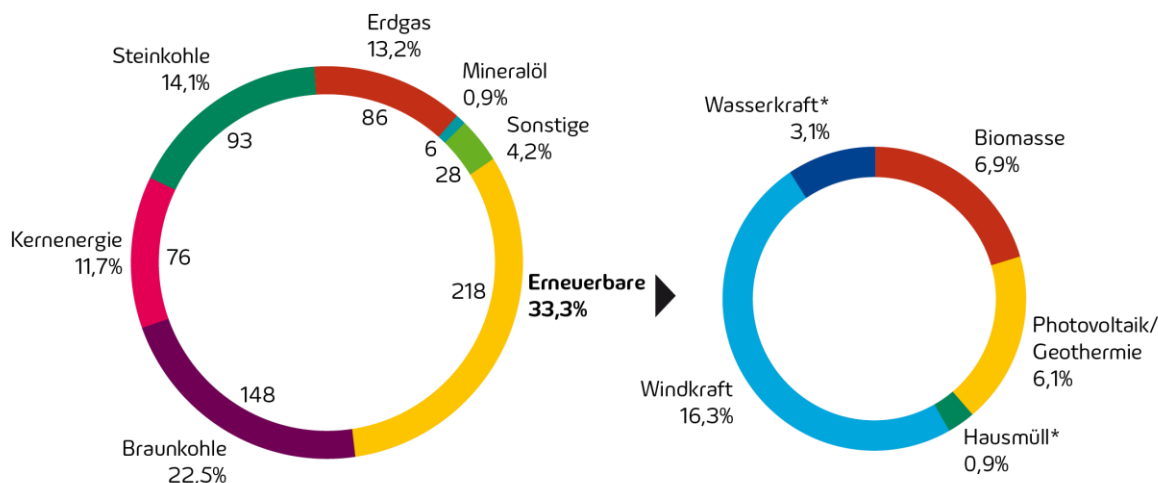
7 Anhang

7.1 Windlandkarte Deutschland A0 Farbe (Datei M2_01)



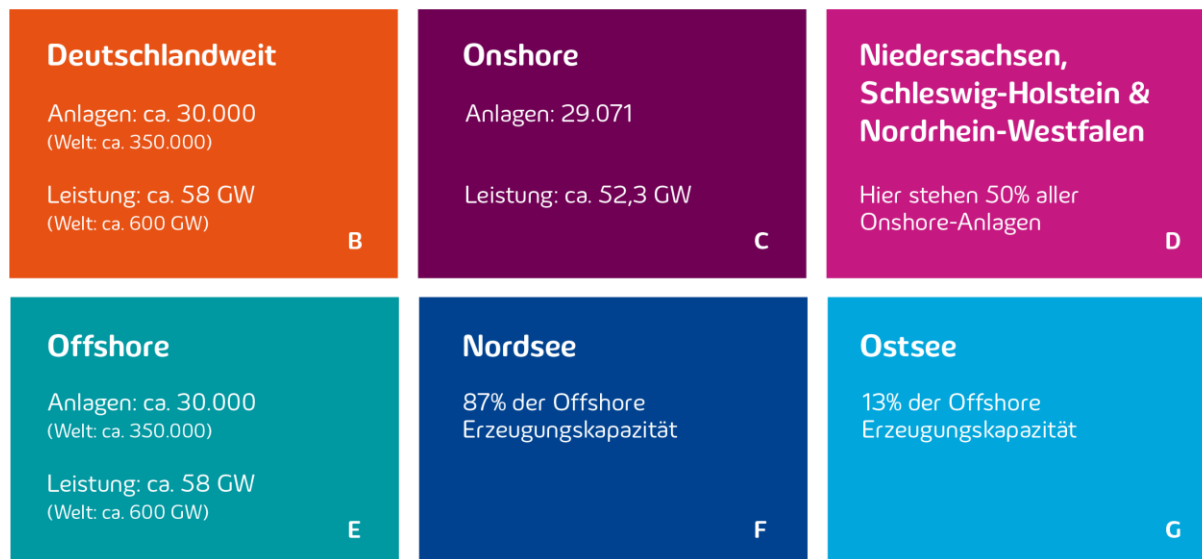
7.2 Wichtige Fakten zur Windenergie (Datei M2_02)

„Strommix“ Deutschland



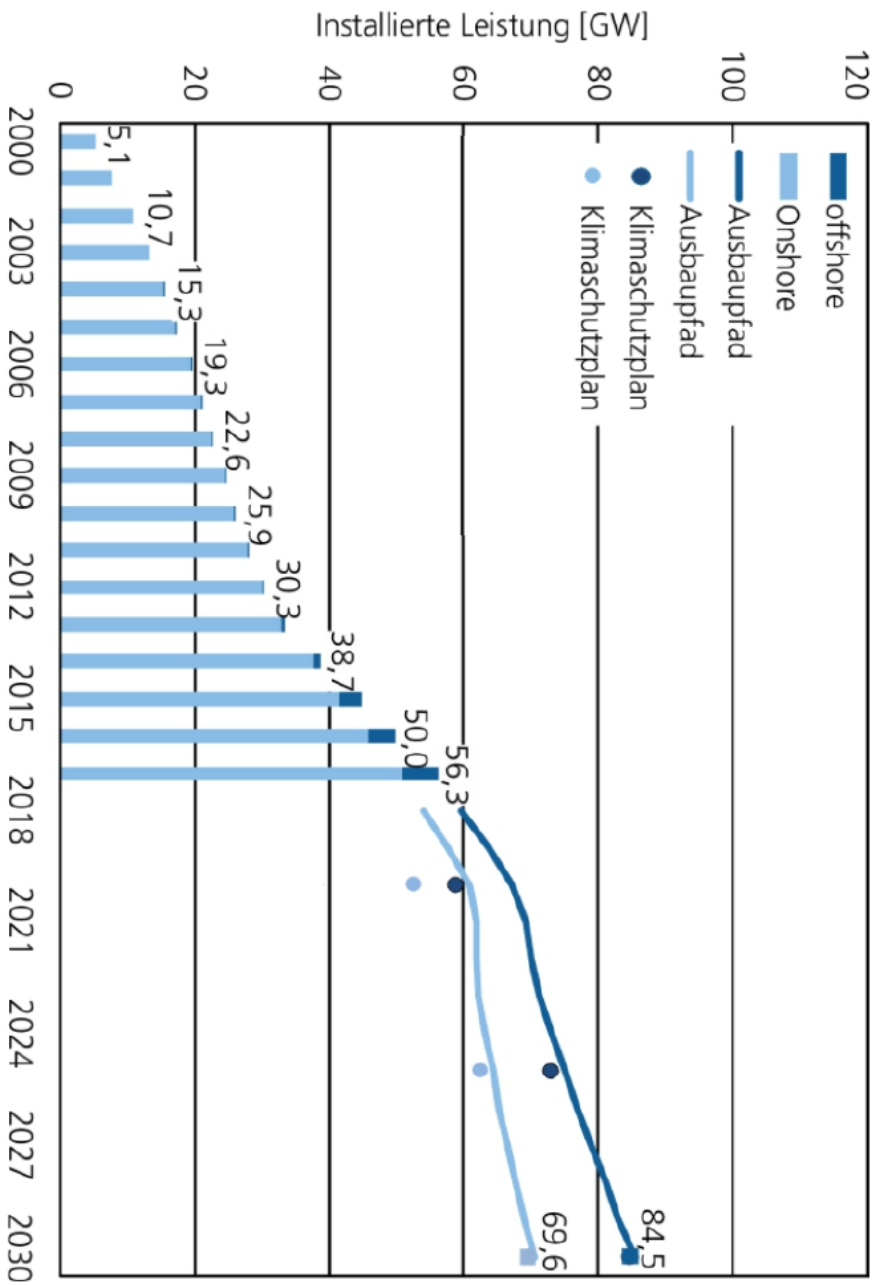
Bruttostromerzeugung in Deutschland 2017 in TWh; vorläufige Angaben, z.T. geschätzt; *regenerativer Anteil; Stand: Februar 2018
Quelle: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>

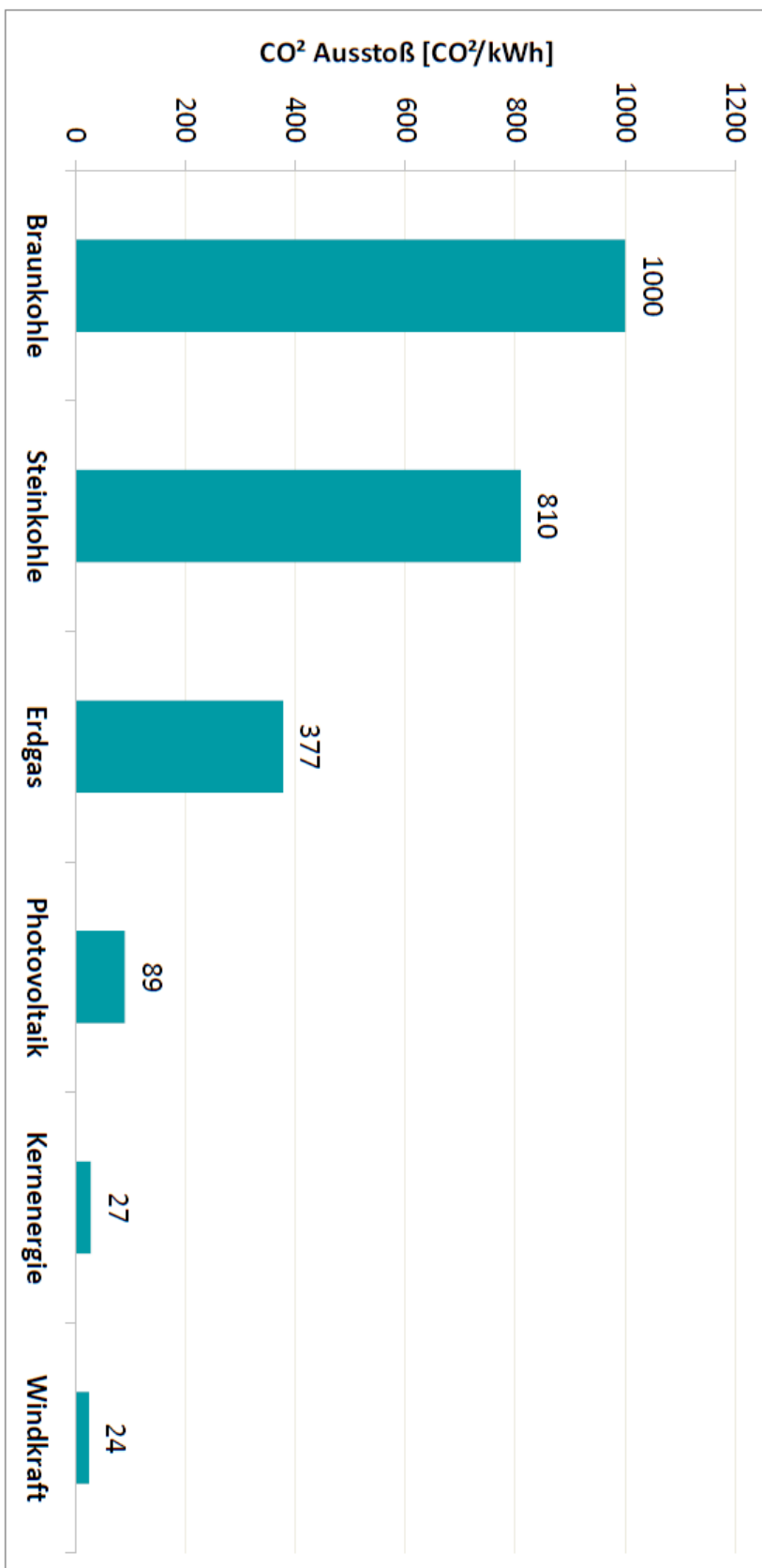
A



7.3 Entwicklung und Ausbauszenarien Deutschland (Datei M2_03)

Bisherige Entwicklung und Ausbauszenarien für die Windenergie On- und Offshore in DE



7.4 CO₂ Ausstoß pro Energieträger (Datei M2_04)

7.5 Poster Windenergieanlage (Datei M2_05)

Windenergieanlage (WEA)

Anzahl Rotorblätter⁴

WEA mit 1 Rotorblatt Pro Jahr: 1000 kWh/m² Pro MW: ca. 200000 kWh Pro Blätter: ca. 200000 kWh	WEA mit 2 oder 4 Rotorblättern Pro Jahr: 2000 kWh/m² Pro MW: ca. 400000 kWh Pro Blätter: ca. 400000 kWh	WEA mit 3 Rotorblättern Pro Jahr: 1500 kWh/m² Pro MW: ca. 300000 kWh Pro Blätter: ca. 300000 kWh	WEA mit 5+ Rotorblättern Pro Jahr: 2000 kWh/m² Pro MW: ca. 400000 kWh Pro Blätter: ca. 400000 kWh
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Dynamischer Auftrieb¹

Bei Luft, die über die Flügel strömt, wird sie durch die Kräfte der Luft überströmt und dem Grenzstrom beinahe föhrt das zu einem Überdruck über dem Flügel und einem Unterdruck unter der Flügeloberfläche. Die Luftströmung, die über die Flügel strömt, wird durch die Abbiegung des Flügels abgelenkt. Die Luftströmung unter dem Flügel wird durch die Kräfte der Luft unterströmt und dem Grenzstrom beinahe föhrt das zu einem Unterdruck unter dem Flügel und einem Überdruck über dem Flügel.

Die aerodynamische Luft-Turbine, die sich an der Vorderkante des Flügels befindet, überträgt die Kräfte auf den Flügel.

Luftströme werden wieder zusammengeführt.

Zirkulation

Bei hohen Rotationsgeschwindigkeiten wird die Luft durch die Kräfte der Zirkulation in die gleiche Richtung der Rotation geblasen. So kann die Luft nicht mehr um die Rotationsachse herum strömen, sondern hat das Bestreben, sich in die gleiche Richtung der Rotation zu bewegen. Die Zirkulation ist ein physikalisches Phänomen, das durch die Kräfte der Zirkulation entsteht. So entsteht die sog. Antriebs- und Abtriebskraft. Als physikalische Konsequenz bildet sich ein zentraler Wirbel, der entgegen der Rotation verläuft. Dieser Wirbel ist die Ursache für die Zirkulation. Die Zirkulation ist ein physikalisches Phänomen, das durch die Kräfte der Zirkulation entsteht. So entsteht die sog. Antriebs- und Abtriebskraft. Als physikalische Konsequenz bildet sich ein zentraler Wirbel, der entgegen der Rotation verläuft. Dieser Wirbel ist die Ursache für die Zirkulation.

Rauigkeitseffekt³

Höhenströmung: Nicht mehr durch die Rauigkeit beeinflusst, keine Turbulenzen.

Bedermatte-Grenzschicht: Bereich oberhalb der Oberfläche, in dem die Windgeschwindigkeit durch die Rauigkeit beeinflusst wird.

- 1** Getriebe und schwerkste Komponente einer WEA
- 2** Rotorblätter
- 3** Rotornabe
- 4** Generator
- 5** Bremse
- 6** Messströmvent
- 7** Gondel
- 8** Turm

1. https://www.physnet.uni-wuerzburg.de/TUM/ILW/ILWstand_Ergaenzung.pdf

2. <https://www.waendenergie.de/lehre/lehraufgaben/energieanlagen/energieanlagenkonstruktion/energieanlagenkonstruktion.pdf>

3. <http://www.renewable-energy-concepts.com/gan/energieanlagen/energieanlagenkonstruktion/energieanlagenkonstruktion.html>

4. <https://www.gao.de/energy/1729/indien/indien-energieanlagen-windkraftenergie-der-flugel>

- 7.6 Experimente Windenergie für SchülerInnen (Datei M2_06)
Siehe beigelegte PDF Datei.
- 7.7 Experimente Windenergie für Lehrpersonal (Datei M2_07)
Siehe beigelegte PDF Datei.