

Frischer, kräftiger Wind im Technikunterricht

Windkraftanlagen (WKA) als Funktionsmodell – Test im Windkanal – Teil 2

Anleitungen und Anregungen für Fertigung und Betrieb im Technikunterricht der allgemeinbildenden Schulen, Sekundarstufe I und II

von Dietrich Kadell und Lothar Georgi

Gestaltungsmöglichkeiten für den Unterricht und seine inhaltlichen und methodischen Anspruchsebenen.

- o Die konzipierte Windkraftanlage kann einerseits nach Vorlage montiert und betrieben werden. Andererseits ermöglichen verschiedene Konstruktions-, Test- und Berechnungsmöglichkeiten anspruchsvolle Lernprozesse, durch die technisch relevanten Handlungsvollzüge realisiert und kognitiv erfasst werden.

Unterrichtskonzept Teil 2

Die Bedingungen für die Konstruktion, Fertigung und den Betrieb moderner Windkraftanlagen sind vielschichtig komplex.

Sachbereiche

Erneuerbare Energieträger, Maschinenteknik, Fertigungstechnik, Elektrotechnik, Strömungsmechanik

Förderung technischer Fähigkeiten

Konstruieren, Fertigen, Experimentieren, Testen, Messen, Vergleichen, Berechnen, Analysieren, Repowern

Unterrichtskonzept Teil 1

Über den 1. Teil des Unterrichtsprojektes wurde in der tu 156/2015 berichtet.

Die Abbildungen 1–3 verweisen auf die grundlegende Struktur des Projektes.

- o Im **1. Teil** der Projektarbeit wurden Konstruktion, Montage und Betrieb einer Windkraftanlage als Funktionsmodell mit unterschiedlichen Komponenten zur Erzeugung und Nutzung von elektrischem Strom vorgestellt.
- o Der Aufbau und der Betrieb einer laborgemäßen Teststrecke mit Windmaschine, Windkanal und Messvorrichtung ermöglicht Experimente, Vergleiche, Analysen und das Repowern der Funktionsmodelle.
- o Das Unterrichtskonzept ist didaktisch offen und ermöglicht vielfältige



Abb. 1: Triebstrang, moderne WKA und Funktionsmodell



Abb. 2: Windmaschine, offener Windkanal, Messgerät für Windgeschwindigkeit

Das Projekt grenzt ein auf einige grundlegende Funktionszusammenhänge.

Darüber hinaus im Arbeitsprozess von den Schülerinnen und Schülern abgeleitete Fragestellungen und Themen könnten in Form von Erkundungsaufträgen erarbeitet und referiert werden. Dies ist jeweils abhängig von der Lernsituation.

- Im zweiten Teil des Unterrichtsprojektes werden Rotorblätter mit unterschiedlichen Blattprofilen gefertigt, getestet, verglichen und re-power.
- Rotorleistungsbeiwerte, Schnelllaufzahlen, Gesamtwirkungsgrade werden gemessen, berechnet, verglichen und analysiert. (Abb. 1–3)

Windkraftrotoren mit unterschiedlichen Blattprofilen / Fertigung und Leistungstest

Schwerpunkt des zweiten Teils der Projektarbeit ist Ausführung der Rotorblätter und ihre Bedeutung für die Energieausbeute der WKA-Funktionsmodelle.

Damit erhöht sich das Anspruchsniveau für Schülerinnen, Schüler und Lehrkräfte. Es bleibt die allgemeine Frage nach der Konstitution in der anzutreffenden Unterrichtssituation.

Zum Erfolg moderner Windkraftanlagen für die Nutzung erneuerbarer Energien hat wesentlich die Konstruktion und die Fertigung hoch effizienter Rotorblätter beigetragen.

Es haben sich Dreiblatt-Anlagen als Luv-Läufer durchgesetzt.

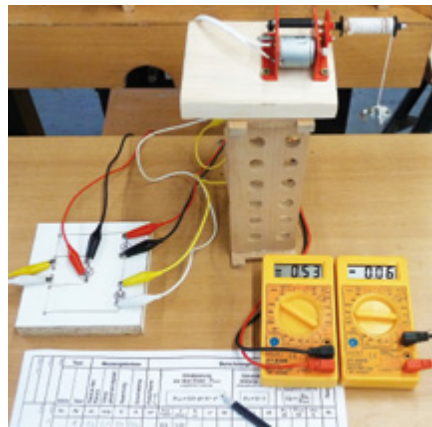


Abb. 3: Messeinrichtung, Protokoll

Sie sind der beste Kompromiss bezüglich Vor- und Nachteilen gegenüber Anlagen mit anderen Konstruktionen.

Stichworte: Leistungsaufnahme, Wirkungsgrad, Windschatteneffekt, Anlaufgeschwindigkeit, Anschaffungskosten, Wirtschaftlichkeit

Im Rahmen der praktischen Möglichkeiten des Projektes können Schülerinnen und Schüler mit Erkenntnisgewinn unterschiedliche Rotoren fertigen, erproben und re-power.

Diese praktischen Möglichkeiten sind eingegrenzt durch Leistung und Durchmesser der Windmaschine und durch vorgegebene Maschinenkomponenten.

Deren Auswahl beruht auf unterrichtliche Handhabbarkeit und didaktische Lernzielvorgabe. Sie stehen in Abhängigkeit von vertretbaren Anschaffungskosten und dem Angebot des Lehrmittelmarktes.

Trotzdem gibt es vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten. Sie werden der Motivationslage der Schülerinnen und Schüler gerecht, mit ihren Modellen im relativen Vergleich möglichst hohe Energieausbeute zu erreichen.

Das Auftriebsprinzip

Das Auftriebsprinzip, das die Grundlage für die Funktionsweise eines Flugzeugs ist, spielt auch bei Windkraftanlagen eine entscheidende Rolle.

Weit verbreitet sind heute Windkraftanlagen, die das Auftriebsprinzip nutzen und deren Rotoren sich nach dem Vorbild der klassischen Bockwindmühle in einer Ebene senkrecht zur Windrichtung drehen.

Luft strömt mit der Anströmgeschwindigkeit an einem Rotorblatt vorbei, das um den Anströmwinkel gegen den Windstrom gedreht ist.

Die Ablenkung des Luftstroms durch das Profil bewirkt eine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit an der gewölbten Seite.

Bernoulli-Effekt: Mit zunehmender Geschwindigkeit wird der Druck reduziert.

Somit herrscht auf der gewölbten Seite ein geringerer Druck als auf der Gegenseite. Dieser Druckunterschied bewirkt den Auftrieb. (Abb. 4 + 5)

Am WKA-Rotorblatt wirkt neben der Auftriebskraft auch die Widerstandskraft.

Die Auftriebskraft bewirkt die Rotordrehung. Die Widerstandskraft ist entgegengesetzt gerichtet, es herrscht Reibung gegen den Luftstrom.

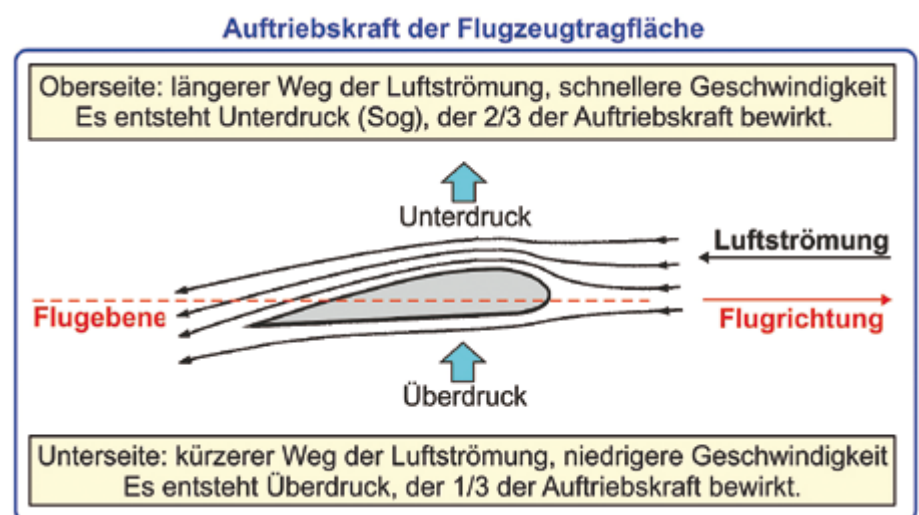


Abb. 4: Dynamische Auftriebskraft an der Flugzeugtragfläche

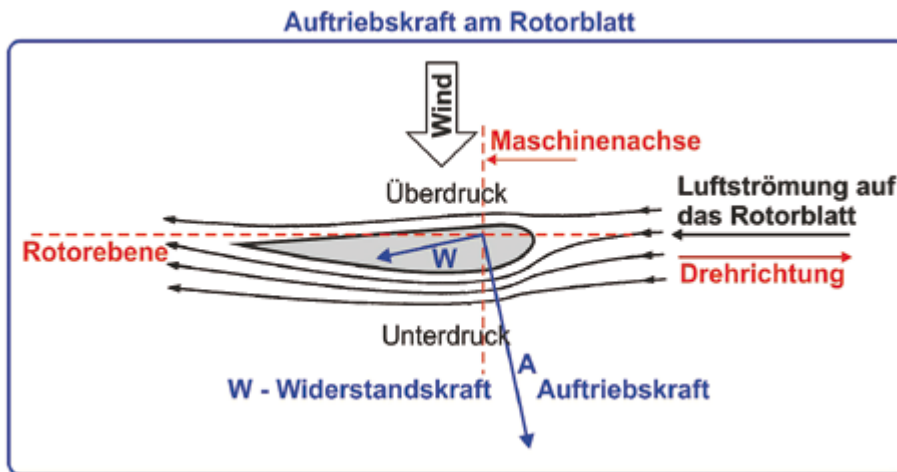


Abb. 5: Dynamische Auftriebskraft und Widerstandskraft am Rotorblatt

Die Widerstandskraft ist abhängig von der Blattform und dem Anstellwinkel des Rotorblattes gegen die Rotorebene.

Bei einem geringen Anstellwinkel ist die Widerstandskraft 20–100 Mal niedriger als die Auftriebskraft.

Man erhält eine große Nutzkraft der WKA, wenn die Widerstandskraft möglichst klein gegenüber der Auftriebskraft ist.

Das Verhältnis von Auftriebskraft und Widerstandskraft wird als Gleitzahl bezeichnet. Sie sollte möglichst groß sein.

Ein Rotorblatt aus einer ebenen Platte kann eine Gleitzahl von (griech. epsilon) = 10 erreichen. Gewölbte Platten erreichen $\varepsilon = 40$, aerodynamisch geformte Profile $\varepsilon = 90$.

Luftstrom auf das Rotorblatt

Die effektive Anströmgeschwindigkeit der Luft auf das Rotorblatt ergibt sich aus der Windgeschwindigkeit in der Rotorebene und der Umfangsgeschwindigkeit (Eigendrehung) des Rotorblattes.

Das Rotorblatt ist um den Anströmwinkel gegen den Windstrom gedreht.

Anströmwinkel und Anstellwinkel des Rotorblattes gegen die Rotorebene sind nicht gleich. Sie bezeichnen unterschiedliche Zuordnungen.

Diese für die Nutzkraft der Anlagen bedeutsamen Faktoren können mit den angebotenen Projektmöglichkeiten von den Schülerinnen und Schülern konstruktiv und experimentell nachvollzogen werden.

Es wird hier nicht eingegangen auf Beschreibung und Berechnung der effektiven Anströmgeschwindigkeit, des Anströmwinkels und der Gleitzahl.

Sehr wohl können diese Aspekte bei anspruchsvoller Unterrichtsgestaltung einbezogen werden.

Verwindung der Rotorblätter

Weil die Umfangsgeschwindigkeit des Rotorblattes von der Nabe zum Blattende hin zunimmt und die effektive Anströmgeschwindigkeit auf das Rotorblatt beibehalten werden soll, wird der Anströmwinkel über die Rotorblattlänge hin konstruktiv verändert, bezeichnet als Verwindung des Rotorblattes.

Auf Konstruktion und Erprobung von Rotorblättern mit unterschiedlichen Profilgeometrien wird im Projekt wegen der Fertigungsprobleme nicht eingegangen.

Ausgewählte Rotorkonstruktionen

Aus der Projektarbeit werden vier Rotorkonstruktionen vorgeschlagen, deren Einsatz wesentliche Funktionszusammenhänge verdeutlicht, siehe Abbildungen 6 bis 9.

Die Kenngrößen Gesamtwirkungsgrad, Rotorleistungsbeiwert und Schnelllaufzahl werden ermittelt und verglichen. Auf die Bedeutung von Drehmoment und Drehzahl auf die mechanische Rotorleistung wird hingewiesen.



Abb. 6: Rotorblatt aus Balsaholz, Profil: ebene Platte



Abb. 7: Rotorblatt aus Aluminiumblech, Profil: gewölbte, abgekantete Platte



Abb. 8: Rotorblatt aus Balsaholz mit Profil in aerodynamischer Form



Abb. 9: 6-Blatt-Rotor, vergrößerte Wind-Angriffsfläche

Montage und Stücklisten der Konstruktionen Abb. 6–8 siehe Teil 1 des Unterrichtsprojektes, tu 156/2015. Konstruktion und Montage zu Abb. 9 werden weiter unten beschrieben.

Fertigung der Rotoren

Die Rotorblätter der 3-Blatt-Rotoren werden mit gleich großer Wind-Angriffsfläche gefertigt und mit gleichem Anstellwinkel zur Rotorebene montiert.

Die Fertigung des aerodynamisch geformten Profils aus Balsaholz, Abb. 8, erfolgt in Vorarbeit mit dem Bandschleifer und in Feinarbeit per Hand mit Schleifklotz und Schleifpapier.

Zur Montage an die Rotornabe siehe Stückliste auf den Arbeitsbögen Blatt Nr. 3 und 5, Teil 1 der Ausarbeitung.

Maße der Rotorblätter

Die Länge ergibt sich aus den maximalen Möglichkeiten des Windkanals. Der Durchmesser der vorgestellten Rotoren beträgt 60 cm. (Abb. 10)

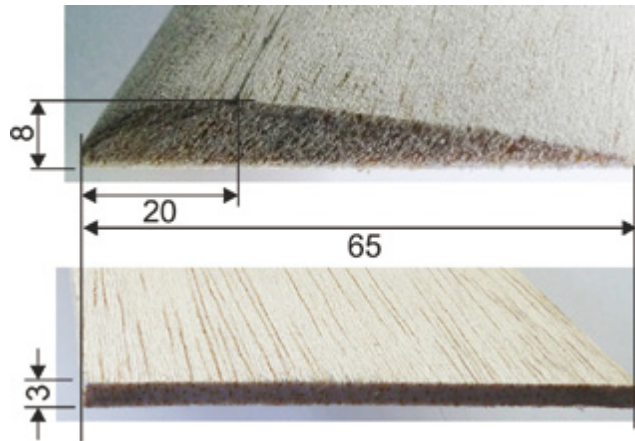


Abb. 10: Vorschlag: Maße des aerodynamisch geformten und des ebenen Profils

Die Schnelllaufzahl $\lambda = 4,01$ des Rotors „Abb. 8“ verweist auf die hohe Umdrehungszahl des Generators von 8580 pro Minute gegenüber dem Rotor mit ebenem Profil mit 3580 Umdrehungen pro Minute.

Entscheidend für die nutzbare elektrische Leistung ist die erreichte Umdrehungszahl des Generators.

Testergebnisse

Es ist zu bedenken, dass die Messergebnisse oft nicht präzise vergleichbar sind. Die Ausgangsfaktoren sind von Test zu Test nicht immer gleich. Windverhältnisse im Testumfeld können sich verändern. Der von den Generatoren gelieferte Gleichstrom ist nicht geglättet. Beim Geräteaufbau und im Betrieb gibt es Positionsveränderungen.

Trotzdem sind die möglichen Tests und die Ergebnisvergleiche im Rahmen der Lernzielvorgaben sinnvoll nutzbar. (Abb. 11)

Die Ermittlung und Berechnung der Kenngrößen wird im Folgenden dargestellt, ergänzt um die Bedeutung von Drehmoment und Drehzahl.

Der 3-Blatt-Rotor mit dem speziell aerodynamisch geformten Blattprofil (WKA Abb. 8) erreicht einen Gesamtwirkungsgrad von $\eta = 0,14$. Das bedeutet, 14 % der mit der Rotorfläche verfügbaren Windenergie wird in elektrische Energie umgewandelt, eine mit 11 % gesteigerte Energieausbeute gegenüber dem Rotor mit ebenem Profil.

Der 6-Blatt-Rotor mit dem Rotorleistungsbeiwert von 0,46 erreicht hohe Drehmomente.

Weiterführende Aufgaben

Experimente mit unterschiedlich eingestellten Anstellwinkeln der Rotorblätter zur Rotorebene geben Aufschluss über das Verhältnis von Widerstandskraft und Auftriebskraft. Höhere Anstellwinkel bedeuten stärkere Widerstandskraft.

Experimente mit unterschiedlichen Getriebeübersetzungen belegen einerseits die Bedeutung der Umdrehungszahlen, andererseits zeigen sie die begrenzten Möglichkeiten der erreichten Rotor-Drehmomente auf. Unter gewissen Bedingungen gehen Funktionsmodelle mit höheren Übersetzungen nicht in Betrieb.

Experimente mit unterschiedlichen Anzahlen und Formen der Rotorblätter geben Aufschluss über Möglichkeiten zur Veränderung von Rotor-Drehmomenten.

WKA - Nr. Name	Profil Rotorblatt	Anzahl Rotor-Blatt	Anstellwinkel	Getriebe-Übersetzung	Generator	elektr. Verbraucher	Gesamtwirkungsgrad (eta)	Rotor-Leistungsbeiwert C_p	Schnelllaufzahl (λ)	Rangfolge
Abb. 6	ebene Platte	3	20°	1 : 15,6	Gleichstrommotor J2	Motor-Winde	$\eta = 0,03$	$C_p = 0,14$	$\lambda = 1,78$	4.
Abb. 7	gewölbte Platte	3	20°	1 : 15,6	Gleichstrommotor J2	Motor-Winde	$\eta = 0,04$	$C_p = 0,29$	$\lambda = 1,77$	3.
Abb. 8	aerodynamisch	3	20°	1 : 15,6	Gleichstrommotor J2	Motor-Winde	$\eta = 0,14$	$C_p = 0,42$	$\lambda = 4,01$	1.
Abb. 9	gewölbte Platte	6	20°	1 : 39	Gleichstrommotor J2	Motor-Winde	$\eta = 0,13$	$C_p = 0,46$	$\lambda = 2,39$	2.

Abb. 11: Testergebnisse