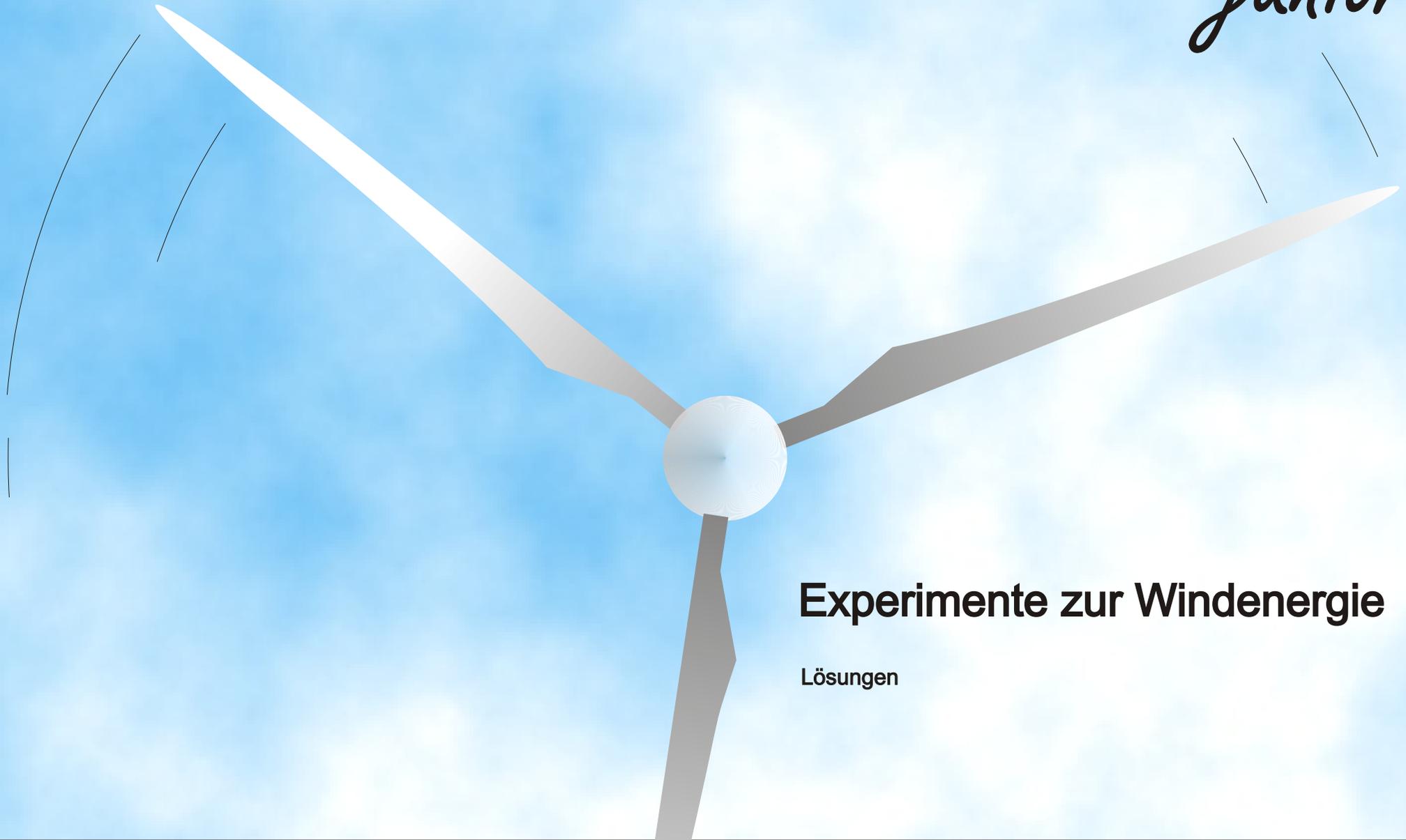


WINDTRAINER

junior



Experimente zur Windenergie

Lösungen

Die Vervielfältigung ist nur für Unterrichtszwecke
in Verbindung mit dem Windtrainer junior gestattet.
Eine Verbreitung ist nur nach ausdrücklicher
Genehmigung der IKS Photovoltaik GmbH erlaubt.

Ausgabe 07/2014

IKS Photovoltaik GmbH
An der Kurhessenhalle 16 b
D-34134 Kassel / Germany
Tel. +49 (0) 561 / 9538050
Fax +49 (0) 561 / 9538051
www.iks-photovoltaik.de
info@iks-photovoltaik.de



Lehrsysteme
Messtechnik
Sonderentwicklungen

Grundlage

11 Experimente zur Windenergie
Schul-Technologie-Zentrum
Recklinghausen e.V.
Autoren
Johannes Lemke
Thomas Niebur

Autoren

Dipl.-Ing. Holger Kunsch
Michael Schröder

Inhalt und Anordnung im Koffer	1
Vorstellung der einzelnen Komponenten	2
Aufbau des Systems	8
Bestimmungsgemäße Verwendung / Sicherheitshinweise	10
 Experimente zur Windenergie	
Experiment 1 Messung der Windgeschwindigkeit in der Umgebung	11
Experiment 2 Messung der Windgeschwindigkeit der Windmaschine in Abhängigkeit von der Potentiometerstellung.....	12
Experiment 3 Messung der Ausgangsleistung einer Windenergieanlage in Abhängigkeit von der Flügelform.....	13
Experiment 4 Messung der Ausgangsleistung einer Windenergieanlage in Abhängigkeit von der Flügelanzahl	14
Experiment 5 Messung der Ausgangsleistung einer Windenergieanlage in Abhängigkeit von der Flügelstellung	16
Experiment 6 Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie einer Windenergieanlage bei konstanter Drehzahl	17
Experiment 7 Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie am Auftriebs- und Widerstandsläufer bei konstanter Windgeschwindigkeit.....	18
Experiment 8 Messung der Ausgangsleistung einer Windenergieanlage in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit	20

Experiment 9	Messung der Ausgangsleistung am Savonius-Generator mit und ohne Spalt.....	21
Experiment 10	Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie am Savonius-Generator bei konstanter Windgeschwindigkeit.....	22
Experiment 11	Laden eines GoldCap-Kondensators/Akkumulators mit einer Windenergieanlage	23
Experiment 12	Entladen eines GoldCap-Kondensators/Akkumulators	24
Experiment 13	Aufbau eines Inselnetzes	25
Schaltsymbole und Begriffe	26

Inhalt und Anordnung im Koffer



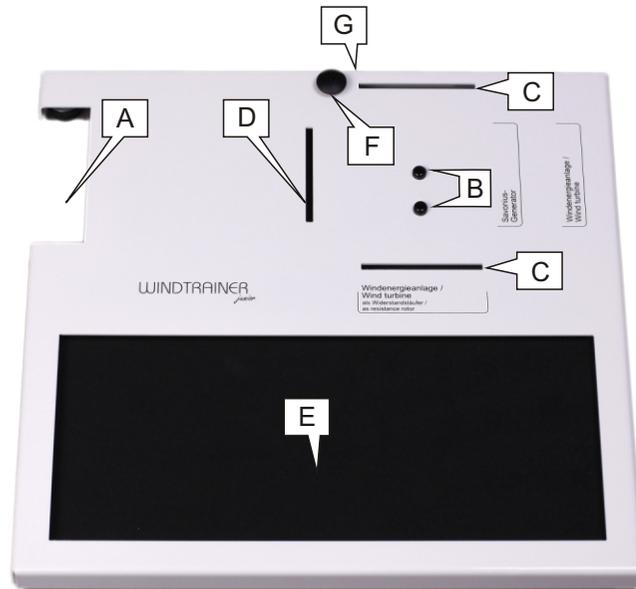
- ① Grundplatte
- ② Halteknopf für Gummischnur (Hefffixierung)
- ③ Anleitungen
- ④ Lösungen
- ⑤ Aufhängung für Grundplatte



- ⑥ Windmaschine
- ⑦ Anemometer
- ⑧ Fuß zu Anemometer (unten)
- ⑨ 2 Multimeter (1x unten)
- ⑩ Windblende
- ⑪ Schutzhaube
- ⑫ Windenergieanlage axial
- ⑬ 8 Flügel, 4x gerade, 4x gewölbt
- ⑭ Schraubendreher (unten)
- ⑮ 8 Messkabel, 4x rot, 4x blau
- ⑯ Steckernetzteil (DC Kabel unter Speicher)
- ⑰ Speicher
- ⑱ Last 1 (Verbrauchermodul)
- ⑲ Last 2
- ⑳ Savonius-Generator mit Einsteck-Blende (unten)
- ㉑ Savonius-Generator-Unterteil

Schaumstoffpolster zum Abdecken der Komponenten (im Kofferdeckel, ohne Bild)

Vorstellung der einzelnen Komponenten



Grundplatte ①

Dient zur Aufnahme der Windenergieanlage ⑫, des Savonius-Generators ⑳ + ㉑, der Schutzhaube ⑪, der Windblende ⑩ und zur Ablage der Experimentiermodule und Messgeräte.

- A Aussparung zum Einsetzen der Windmaschine ⑥
- B Stifte zum Positionieren der Windenergieanlage ⑫ und des Savonius-Generators ⑳ + ㉑
- C Positionierungsschlitz für die Schutzhaube ⑪
- D Positionierungsschlitz für die Windblende ⑩
- E Ablage für Experimentiermodule und Messgeräte
- F Halteknopf für Gummischnur zur Fixierung der Hefte im Kofferdeckel
- G Schlitz zur Aufhängung der Grundplatte im Kofferdeckel

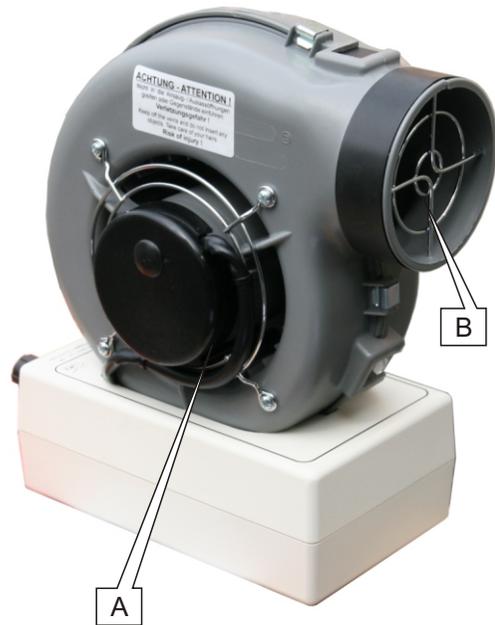


Anleitungen ③

Beschreibung der Experimente.

Lösungen ④

Hintergrundinformationen und Lösungen.



Windmaschine ⑥

Die Windmaschine besteht aus dem Standgehäuse mit integrierter Drehzahlregelung, Anschlussbuchse zur Stromversorgung, Windgeschwindigkeitsregler und dem Gebläse.

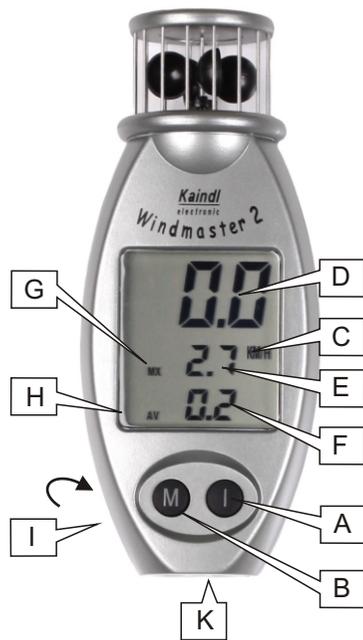
- A Luftansaugöffnung
- B Luftauslassöffnung

ACHTUNG:

Nicht in den Luftansaug- / Auslassbereich greifen oder Gegenstände dort einführen. Insbesondere auf Haare im Ansaugbereich achten!

- C Stromversorgungsanschlussstecker für 12 V DC vom Steckernetzteil oder Spezialanschlusskabel 12 V DC (Lieferumfang bei **ComBox**)
- D Ein-Aus Schalter (Stellung: Aus = Linksdrehung bis Anschlag) und Windgeschwindigkeitsreglung (Skala 1-10)

Vorstellung der einzelnen Komponenten



Anemometer ⑦

Gerät zur Messung der Windgeschwindigkeit.

- A** Ein/Aus-Taste, automatische Abschaltung nach ca. 8 Tagen
- B** Mode-Taste, Auswahl der Messeinheit, Auswahl bleibt gespeichert
- C** Anzeige Messeinheit, KM/H (Kilometer / Stunde), KTS (Knoten), M/S (Meter / Sekunde), MP/H (Meilen / Stunde)
- D** Anzeige aktuelle Windgeschwindigkeit
- E** Anzeige maximale Windgeschwindigkeit ab dem Einschaltzeitpunkt
- F** Anzeige durchschnittliche Windgeschwindigkeit ab dem Einschaltzeitpunkt
- G** MX = MAXIMUM (Maximalwert), AV = AVERAGE (Durchschnittswert), Blinkbetrieb: Bitte neue Batterie einlegen!
- H** Anzeige aktuelle Windgeschwindigkeit nach Beaufort-Skala (Bargraph)
- I** Batteriefach rückseitig, Batterietyp: Lithium Cr2032, +Pol nach oben!
- K** Stativgewinde UNC 6,35 x 1,27, Schraube nicht zu fest anziehen! Zur Befestigung des Fußes ⑧

Batterie nicht aufladbar, bei Entsorgung bitte die Umweltvorschriften beachten. Gerät bei äußeren Beschädigungen nicht weiter benutzen. Zur Reinigung keine Chemikalien benutzen. Gerät nicht unter Wasser benutzen. Nicht für Dauerbetrieb. Starke Magnetfelder, Vibrationen und andere starke mechanische Belastungen vermeiden.

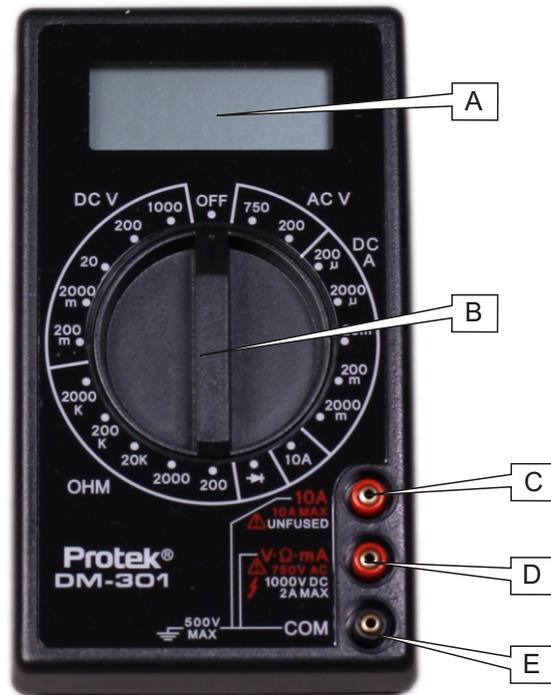
Technische Daten: 2,5-150 KM/H, 1,3-81 KTS, 0,7-42 M/S, 1,5-93 MP/H
 Auflösung 0,1 (0-19,9), 1 (20-150)
 Genauigkeit +/- 4% +/- 1 Digit, Betriebstemperaturbereich -20 bis +70°C



Fuß zu Anemometer ⑧

Zum Aufstellen des Anemometers ⑦ auf den oberen Stift **B** der Grundplatte ①

- A** Bohrung zum Positionieren auf der Grundplatte ①
- B** Gewinde zum einschrauben in das Anemometer ⑦



Multimeter ⑨

A	Anzeigefeld (3 ½-stellig, 7 Segmente, Ziffernhöhe 13 mm)	
B	Funktions- und Messbereichswahlschalter In der Stellung "OFF" ist das Gerät ausgeschaltet. Bei Nichtgebrauch in diese Position schalten (Batterieschonung). Vor dem Umschalten der Messbereiche Messkabel herausziehen! Gewünschten Messbereich wählen:	
	AC V Wechselfspannung	Anschlussbuchsen D und E max. 500 V Genauigkeit 1,2% +10 Digit
	DC A Gleichstrom	Anschlussbuchsen D und E max. 2000 mA Sicherung 2 A / 250 V Genauigkeit 1,0% +2 Digit im Bereich 200µA bis 20 mA, Genauigkeit 1,2% +2 Digit im Bereich 200 mA Genauigkeit 1,5% +2 Digit im Bereich 2000 mA
	10 A Gleichstrom	Anschlussbuchsen C und E max. 10A Anschluß ungesichert Genauigkeit 1,5 % +2 Digit
	→ Diodentest	-
	Ω Widerstandsmessung	Anschlussbuchsen D und E nur spannungslos messen Genauigkeit 0,7% +2 Digit im Bereich 200 Ω bis 200 kΩ, Genauigkeit 1,0% +2 Digit im Bereich 2000 kΩ
	DC V Gleichspannungsmessung	Anschlussbuchsen D und E max. 500 V Genauigkeit 0,7% +2 Digit in allen Bereichen
C	2 mm Anschlussbuchse +	10 A Gleichstrom
D	2 mm Anschlussbuchse +	V / Ω / mA
E	2 mm Anschlussbuchse -	für alle Messbereiche

Vorstellung der einzelnen Komponenten

Batteriewechsel

Messkabelanschlüsse trennen, Gerät ausschalten (Pos. OFF), rückseitigen Deckel abschrauben.
Nur auslaufsichere Batterie Typ: 9 V Blockbatterie verwenden.
Auf Polarität achten!

Sicherungswechsel

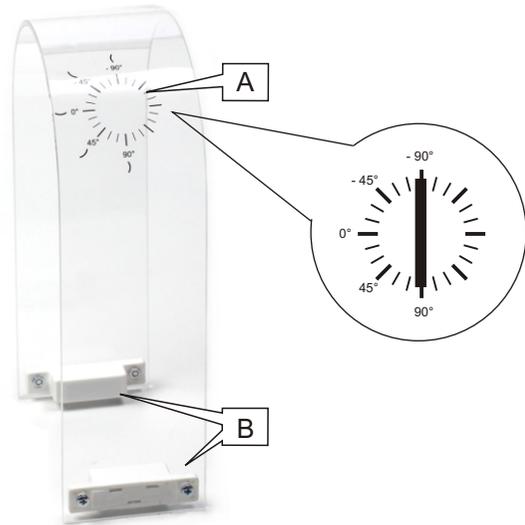
rückseitigen Deckel abschrauben,
nur Typ 2 A / 250 V verwenden.

Multimeter nur in Verbindung mit den Experimenten des Windtrainer junior verwenden!

Windblende ⑩

Zur Verwendung der Windenergieanlage als Widerstandsläufer. Die Blende wird in den Schlitz D der Grundplatte ① mit dem Magnet Richtung Windmaschine eingesetzt und mit dem Magnet fixiert.





Schutzhaube ⑪

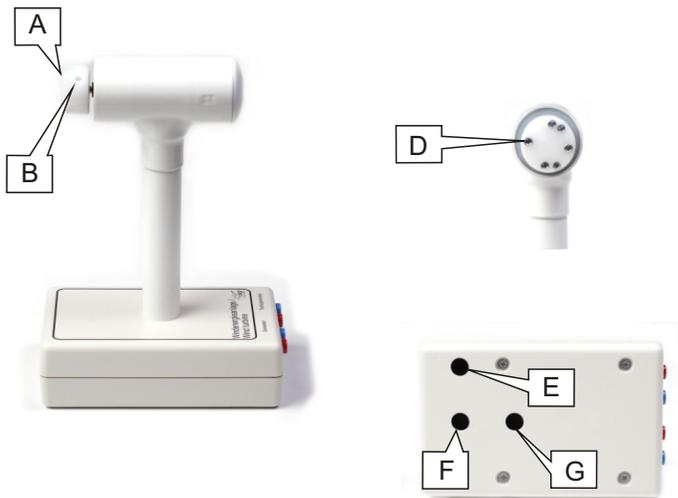
Zum Schutz vor den sich bewegenden Flügeln und zum Schutz vor Flügeln, die sich bei evtl. unsachgemäßer Arretierung mit hoher Geschwindigkeit von der Nabe lösen können.

Zusätzlich dient die Schutzhaube als Hilfe zur Einstellung der Anstellwinkel der Flügel.

Die Schutzhaube wird mit den unteren Enden in die Schlitze **C** der Grundplatte ① eingesetzt und durch die Magneten **B** gehalten. Die Skala **A** befindet sich Richtung Ablage **E** der Grundplatte ①.

Gegebenenfalls bei eingesetztem geraden Flügel in der Stellung 90° die Schutzhaube längs der Schlitze **C** in der Grundplatte ① verschieben, bis sich die 90°-Markierung mit dem Flügel deckt (Einsetzen der Flügel siehe Seite 5).

- A** Gradskala zur Einstellung der Anstellwinkel der Flügel
- B** Haltemagneten

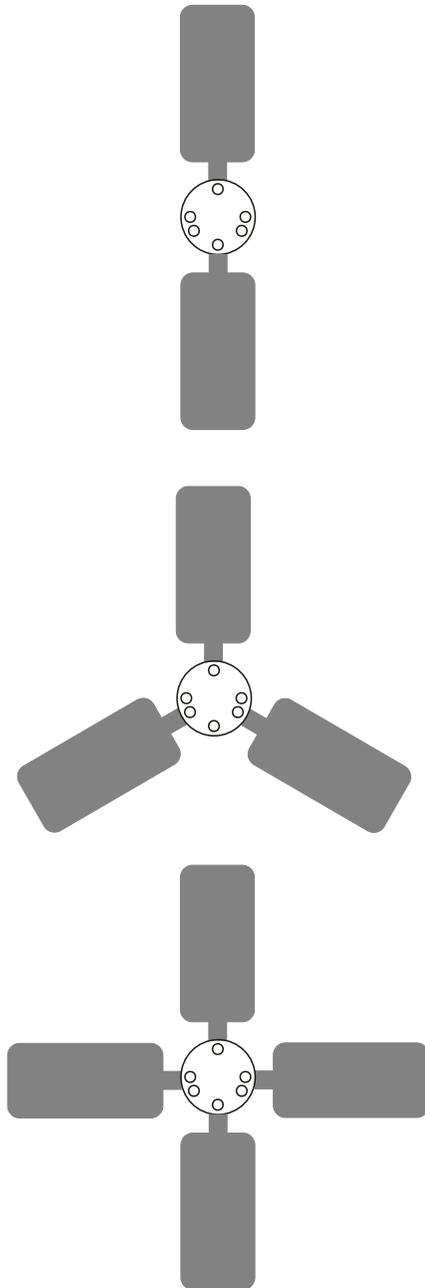


Windenergieanlage axial ⑫

Die Windenergieanlage axial besteht aus einem Gleichstromgenerator, auf dessen Welle eine Nabe zur Aufnahme der Flügel angebracht ist, und einem Tachogenerator zur Bestimmung der Drehzahl. Die Nabe ist für die Aufnahme von zwei, drei und vier Flügeln geeignet.

- A** Flügelhabe
- B** Aufnahmebohrungen für Flügel
- C** Anschlussbuchsen Generator und Tachogenerator
- D** Stiftschraube
- E - G** Bohrungen auf der Unterseite der Windenergieanlage zum Aufsetzen auf die Positionierstifte B der Grundplatte ①

Vorstellung der einzelnen Komponenten



Windenergieanlage axial ⑫

Montage der Flügel

Achtung! Feinmechanisches Gerät - bitte vorsichtig arbeiten!

Flügel gerade oder gewölbt in vorgegebener Anordnung nacheinander in die äußeren Bohrungen **B** der Flügelnabe **A** bis zum Anschlag einstecken und mittels Gradskala **A** der Schutzhaube ⑪ in gewünschtem Winkel ausrichten.

Mit dem Innensechskantschraubendreher ⑭ die Stiftschrauben **D** leicht anziehen, so dass sich der Flügel nicht von allein verdreht oder gar herausgeschleudert wird.

Bei den gewölbten Flügeln ist darauf zu achten, dass die Wölbung mit den Symbolen auf der Skala übereinstimmt (gleichsinnig), es sei denn, es ist im entsprechenden Experiment, ausdrücklich der andere Fall (gegensinnig) gewünscht.

Aufbau auf der Grundplatte ①

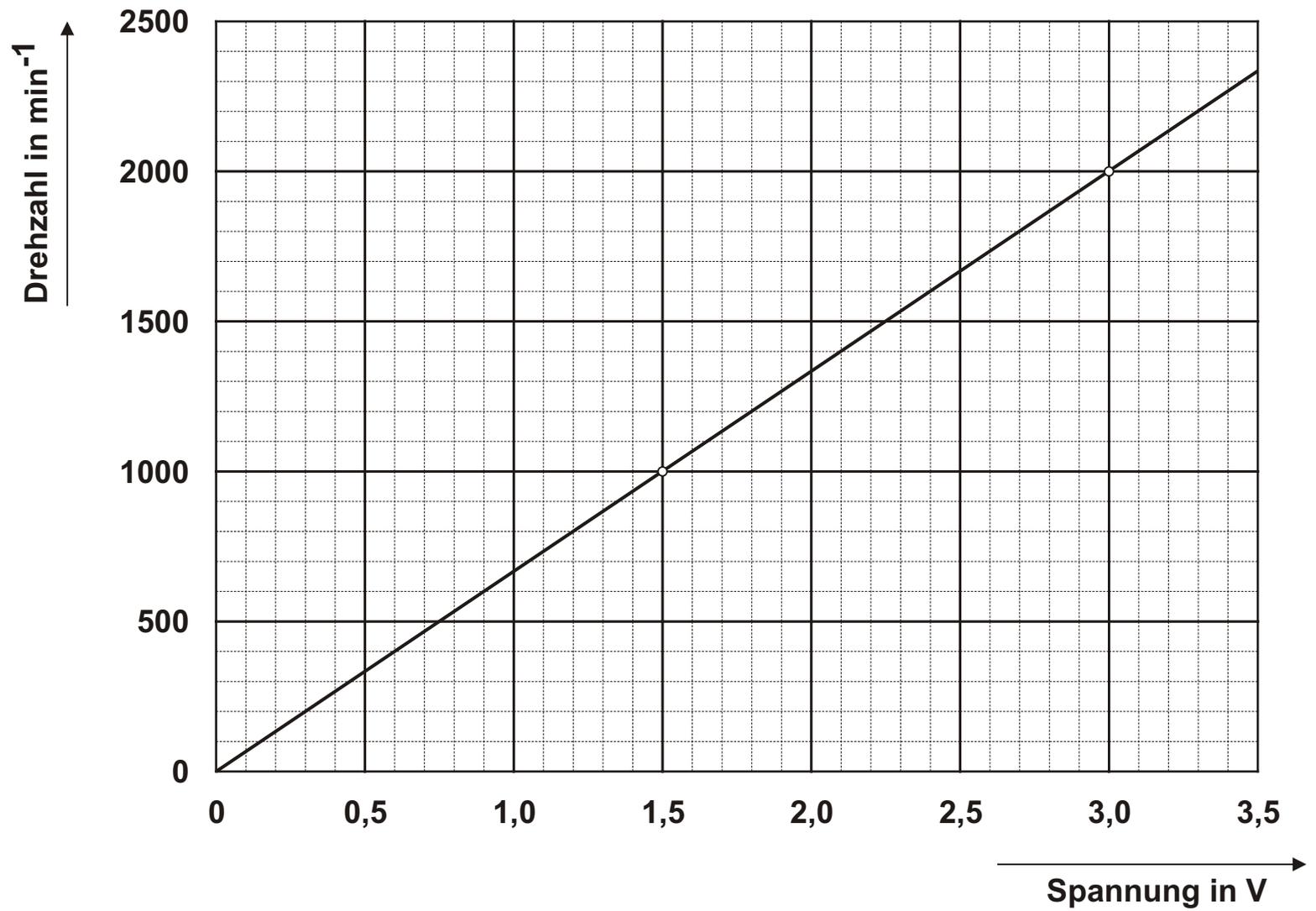
- zum Betrieb als Auftriebsläufer ist die Windenergieanlage so auszurichten, dass die Nabe **A** der Windenergieanlage ⑫ Richtung Gebläseeinheit ⑥ zeigt.
Die Positionierstifte **B** der Grundplatte ① sitzen dabei in den Bohrungen **D** und **E** in dem Fuß der Windenergieanlage ⑫. Zur Orientierung beim Aufsetzen dient der Aufdruck Windenergieanlage auf der Grundplatte ①.
Zum Betrieb wird die Schutzhaube ⑪ auf die Grundplatte ① aufgesetzt und ggf. ausgerichtet.
- zum Betrieb als Widerstandsläufer ist die Windenergieanlage so auszurichten, dass die Nabe **A** der Windenergieanlage ⑫ im Vergleich zu a) um 90° nach rechts gedreht ist.
Die Positionierstifte der Grundplatte ① sitzen dabei in den Bohrungen **E** und **F** in dem Fuß der Windenergieanlage ⑫. Zur Orientierung beim Aufsetzen dient der Aufdruck Windenergieanlage als Widerstandsläufer auf der Grundplatte ①.
Zum Betrieb wird die Windblende ⑩ zwischen Windmaschine ⑥ und Windenergieanlage ⑫ in den Positionierungsschlitz **D** der Grundplatte ① gestellt.

Technische Daten:

Nennspannung:	12 V
Anschlusswiderstand:	9,7 Ohm
Generatorspannungskonstante:	1,4 mV / min ⁻¹
Stromkonstante:	75 mA / mNm
max Wirkungsgrad:	84%
Tachogeneratorspannung:	1,5 V / 1000 min ⁻¹

Die Drehzahl kann aus der Tachospannung errechnet oder aus dem nachfolgenden Drehzahl-Tachospannung-Diagramm ermittelt werden.

Tachogenerator



Vorstellung der einzelnen Komponenten



4 x



4 x



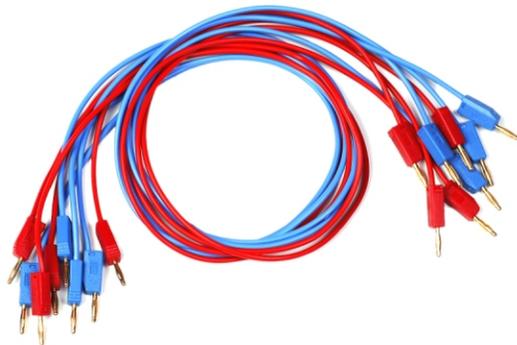
Flügel ⑬

4 Stück gerade, 4 Stück gewölbt. Zum Einbau in die Nabe **A** der Windenergieanlage ⑫.



Schraubendreher ⑭

Sechskant-Kugelpopf-Dreher 2mm, zum Drehen der Stiftschrauben **C** in der Nabe **A** der Windenergieanlage ⑫ und der Stiftschraube **B** im Savonius-Rotor ⑳.



Messkabel ⑮

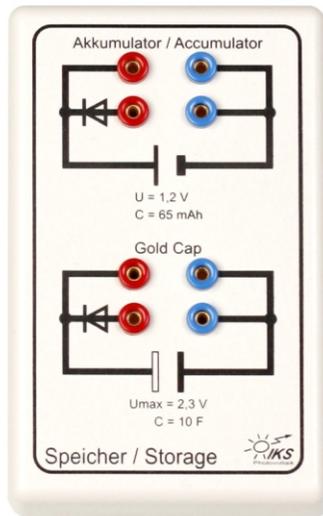
4 Stück rot, 4 Stück blau, hochflexible Verbindungsleitungen mit 2 mm Steckern und Abgriffbuchsen. Kontaktflächen vergoldet, Bemessungsstrom max. 10 A.

Maximal zulässige Betriebsspannung 25 V Wechselstrom, 60 V Gleichstrom!



Steckernetzteil ①⑥

Zum Anschluss an den Stromversorgungsanschlussstecker **C** der Windmaschine ⑥.
Die Anschlussbuchse **A** des Netzkabels hat eine Aussparung, die mit einer Nase im Anschlussstecker **C** der Windmaschine ⑥ fluchten muss. 100-240V 50-60 Hz



Speichermodul ①⑦

Nickel-Metall-Hydrid-Akkumulator:

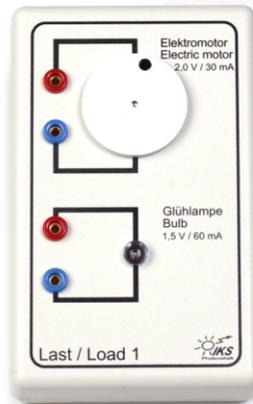
Spannung:	1,2 V Gleichstrom
Kapazität:	65 mAh
Ladestrom:	max. 6,5 mA /10 h
Ladeschlussspannung:	ca 1,4 V
Oberer Anschluss:	direkte Verbindung
Unterer Anschluss:	über Sperrdiode, Spannungsabfall ca 0,7 V

GoldCap:

Kondensator mit hoher Speicherfähigkeit:

Kapazität:	ca. 10 F
Ladespannung:	max. 2,3 V Gleichstrom

Vorstellung der einzelnen Komponenten



Last 1 (18)

Elektromotor:

Betriebsspannung: max. 2,0 V Gleichstrom
Leerlaufstrom: ca. 15 mA bei 1,5 V

Glühlampe:

Betriebsspannung: max. 1,5 V Gleichstrom
Stromaufnahme: ca. 60 mA bei 1,5 V



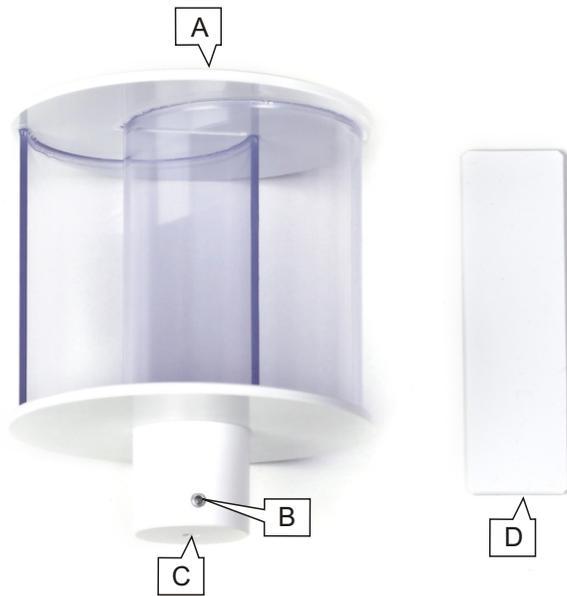
Last 2 (19)

Zur Belastung der Windenergieanlage axial (12) und des Savoniusrotor-Generators (20) + (21) mit dem Lastwiderstand und Messung der Spannung und des Stromes.

Kennwerte Lastwiderstand:

Widerstand: 100 Ω
Belastbarkeit: max. 2 W

- A Anschluss Generator
- B Anschluss Multimeter zur Spannungsmessung
- C Anschluss Multimeter zur Strommessung
- D Drehknopf, Rechtsdrehung erhöht den Widerstand

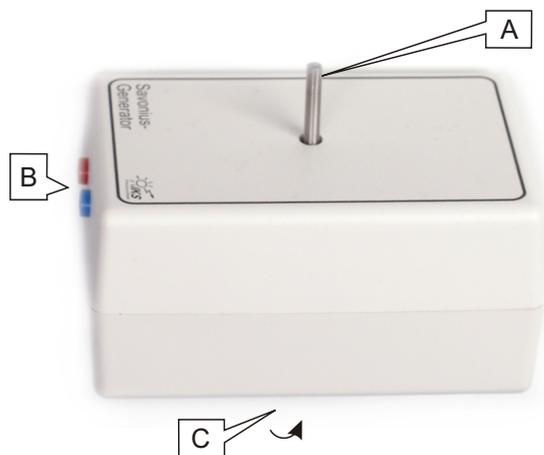


Savonius-Generator mit Einsteckblende ⑳

Bei dem Savonius-Generator handelt es sich um eine vertikale Windenergieanlage. Der Rotor wird mit der Bohrung **C** an der Unterseite auf die Achse **A** des Savonius-Generator-Unterteils ㉑ bis zum Anschlag aufgesetzt und die Stiftschraube **B** mit dem Schraubendreher : ⑭ leicht angezogen.

Um den Effekt des Spaltes zwischen den Halbschalen zu verdeutlichen, lässt sich dieser durch Einsetzen der Sperrplatte verschließen. Dazu wird die Sperrplatte **D** von oben in den Schlitz **A** geschoben.

- A** Schlitz zum Einführen der Sperrplatte **D**.
- B** Stiftschraube zur Fixierung des Rotors auf der Achse **A** des Savonius-Generator-Unterteils ㉑.
- C** Bohrung zur Aufnahme der Achse **A** des Savonius-Generator-Unterteils ㉑.
- D** Sperrplatte zum Verschließen des Spaltes zwischen den Halbschalen des Rotors. Die Sperrplatte wird in den Schlitz **A** des Rotors eingeführt.



Savonius-Generator-Unterteil ㉑

In dem Unterteil befindet sich der Generator und ein Getriebe. Da der Savonius-Generator ein Langsamläufer ist, wird mit dem Getriebe eine Drehzahlanpassung erreicht.

Zum Betrieb wird der Savonius-Generator ㉒ wie oben beschrieben auf die Achse montiert. Das Unterteil wird mit den Bohrungen **C** auf der Unterseite des Gehäuses auf die Positionierstifte **B** der Grundplatte ① gesetzt. Der Aufdruck: Savonius-Generator auf der Grundplatte ① erleichtert die Positionierung.

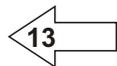
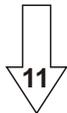
Die Buchsen **B** zeigen dabei zum rechten Rand der Grundplatte ①.

- A** Achse
- B** Anschlussbuchsen Generator
- C** Bohrung zur Aufnahme der Positionierstifte **B** der Grundplatte ①

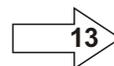
Aufbau des Systems



Aufbau A



Aufbau B



- 1 Gummischnur aushängen und Hefte herausnehmen.
- 2 Grundplatte anheben, herausnehmen und aufstellen. Rechts von der Grundplatte dürfen sich keine Hindernisse befinden, die den Luftstrom behindern könnten.
- 3,4,5 Windmaschine, Windenergieanlage und Steckernetzteil entnehmen.
- 6 DC Kabel so in die Windmaschine stecken, dass die Ausparung der Buchse mit der Nase des Steckers fluchtet.
- 7 Die Windmaschine in die Aussparung der Grundplatte stellen.
- 8 Steckernetzteil an Steckdose mit FI-Schalter anschließen.
- 9 Die in den Anleitungen angegebenen Module und Multi-meter in der Ablage der Grundplatte anordnen.

Aufbau A

- 10/A Fuß des Anemometers entnehmen und in das Anemometer vorsichtig einschrauben.
- 11/A Das Anemometer mit der Bohrung im Fuß unten auf den mittleren Positionierstift der Grundplatte setzen.

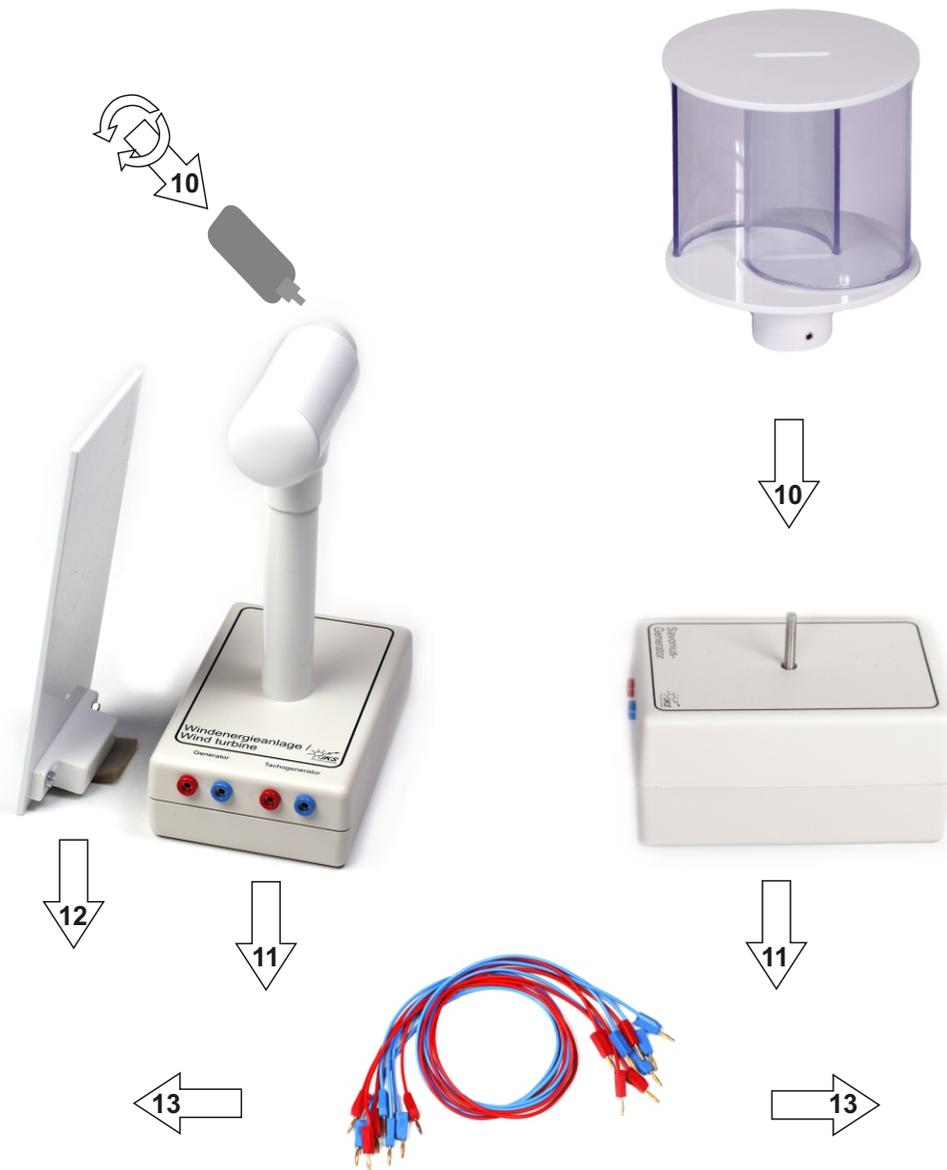
Aufbau B

- 10/B Flügel entsprechend der Anleitung in die Nabe der Windenergieanlage einstecken und mit dem Schraubendreher die Stiftschrauben leicht anziehen, so dass die Flügel gesichert sind, sich aber noch bewegen lassen.
- 11/B Die Windenergieanlage mit den unteren Bohrungen auf die Positionsstifte (**Windenergieanlage**) der Grundplatte stellen.
- 12 Schutzhaube in die Positionierschlitz der Grundplatte einführen, so dass die Magnete anliegen. Flügel auf 90° stellen und Position der Schutzhaube ggf. korrigieren. Flügel auf angegebenen Winkel einstellen, die Stiftschrauben mit dem Schraubendreher vorsichtig anziehen.
- 13 Aufbau nach Anleitung mit Messkabeln verbinden.
- 14 Windmaschine am Drehknopf durch Rechtsdrehung einschalten, Windgeschwindigkeitsregelung von 1-10.

Aufbau des Systems

Aufbau C

Aufbau D



Aufbau C

10/C Flügel entsprechend der Anleitung in die Nabe der Windenergieanlage einstecken und mit dem Schraubendreher die Stiftschrauben leicht anziehen, so dass die Flügel gesichert sind, sich aber noch bewegen lassen. Die Windenergieanlage vorübergehend mit den unteren Bohrungen auf die Positionsstifte (**Windenergieanlage**) der Grundplatte stellen. Schutzhaube vorübergehend in die Positionierschlitze der Grundplatte einführen, so dass die Magnete anliegen. Flügel auf 0° stellen. Die Stiftschrauben mit dem Schraubendreher vorsichtig anziehen. Die Schutzhaube wieder entfernen.

11/C Die Windenergieanlage nach Abbildung mit den unteren Bohrungen auf die Positionierstifte der Grundplatte stellen (siehe Aufdruck auf der Grundplatte: Windenergieanlage als Widerstandsläufer).

12/C Windblende in den Positionierschlitz der Grundplatte einführen, so dass der Magnet anliegt.

13 Aufbau nach Anleitung mit Messkabeln verbinden.

14 Windmaschine am Drehknopf durch Rechtsdrehung einschalten, Windgeschwindigkeitsregelung von 1-10.

Aufbau D

10 D Die Achse des Unterteiles bis zum Anschlag in die Bohrung an der Unterseite des Rotors einschieben. Die Stiftschraube mit dem Schraubendreher vorsichtig anziehen.

11 D Den Savonius-Generator nach Abbildung mit den unteren Bohrungen auf die Positionierstifte der Grundplatte stellen (siehe Aufdruck auf der Grundplatte: Savonius-Generator).

13 Aufbau nach Anleitung mit Messkabeln verbinden.

14 Windmaschine am Drehknopf durch Rechtsdrehung einschalten, Windgeschwindigkeitsregelung von 1-10.

Bestimmungsgemäße Verwendung

Sicherheitshinweise

-  Der Betrieb der Baugruppen darf nur an der dafür vorgeschriebenen Spannung erfolgen.
-  Falls das Netzkabel beschädigt ist, darf es nur von einem Fachmann ausgetauscht werden.
-  Beim Herausziehen des Netzkabels ausschließlich am Stecker und niemals am Kabel anfassen. Stellen Sie niemals schwere Gegenstände auf das Netzkabel und biegen Sie es nicht in einem zu engen Radius oder um scharfe Ecken.
-  Die zulässige Umgebungstemperatur (Raumtemperatur) darf während des Betriebes 10 °C und 40 °C nicht unter- bzw. überschreiten.
-  Das System ist für den Gebrauch in trockenen und sauberen Räumen bestimmt.
-  Bei Bildung von Kondenswasser muss eine Akklimatisierungszeit von bis zu 5 Stunden abgewartet werden.
-  Ein Betrieb des Systems im Freien bzw. in Feuchträumen ist unzulässig.
-  Schützen Sie das System vor Feuchtigkeit, Spritzwasser und Hitzeeinwirkung.
-  Das System darf nicht in Verbindung mit leicht entflammaren und brennbaren Flüssigkeiten, Gasen oder Stäuben verwendet werden.
-  Die Module dürfen nur unter Aufsicht und Anleitung eines fachkundigen Lehrers in Betrieb genommen werden.
In Schulen bzw. Ausbildungseinrichtungen ist das Betreiben des Systems durch geschultes Fachpersonal verantwortlich zu überwachen.
-  In gewerblichen Einrichtungen sind die Unfallverhütungsvorschriften des Verbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften für elektrische Anlagen und Betriebsmittel zu beachten.
-  Falls ein Modul repariert werden muss, dürfen nur Original-Ersatzteile verwendet werden! Die Verwendung abweichender Ersatzteile kann zu ernsthaften Sach- und Personenschäden führen !
-  Eine Reparatur darf nur vom Fachmann durchgeführt werden !
-  Das System ist nach Gebrauch stets von der Versorgungsspannung zu trennen.
-  Dringt irgendeine Flüssigkeit in ein Modul ein, so könnte es dadurch beschädigt werden. Sollten Sie irgendwelche Flüssigkeiten in oder über die Baugruppe verschüttet haben, so muss das Gerät vom Netz getrennt und von einem qualifizierten Fachmann überprüft werden.
-  Im Umgang mit Produkten, die mit elektrischer Spannung in Berührung kommen, müssen die gültigen VDE-Vorschriften beachtet werden, insbesondere VDE 0100, VDE 0550 / 0551, VDE 0700, VDE 0711 und VDE 0860.
-  Vor Öffnen eines Modules stets den Netzstecker ziehen oder sicherstellen, dass das Gerät stromlos ist.
-  Der netzseitige Anschluss sollte nur über einen FI-Schalter und einen Stromkreis mit Not-Aus-Funktion betrieben werden.
-  Verkabelung darf nur mit beiliegenden Messleitungen erfolgen.
-  Bei Betrieb der Module ist stets auf die strikte Einhaltung der in der zugehörigen Beschreibung genannten Kenndaten für elektrische Größen zu achten.
-  Bei Versuchsaufbauten ist vor der Inbetriebnahme der Module generell von fachkundigem Lehr- oder Aufsichtspersonal zu prüfen, ob diese ordnungsgemäß verkabelt / angeschlossen sind.
-  Bei Verwendung der Module für Versuchsaufbauten, die nicht in den Anleitungen beschrieben sind, ist grundsätzlich zu prüfen, ob die entsprechenden Module für diese Anwendung geeignet sind.
Im Zweifelsfalle ist unbedingt Rückfrage bei dem Hersteller notwendig.

Haftungsausschluss

Sowohl das Einhalten dieser Anleitung und der Versuchsanleitungen als auch die Bedingungen und Methoden bei Verschaltung, Betrieb, Verwendung und Wartung des Systems können von der IKS Photovoltaik GmbH nicht überwacht werden.

Bitte beachten Sie, dass Bedien- und Anschlussfehler außerhalb unseres Einflussbereiches liegen.

Eine unsachgemäße Ausführung der Zusammenschaltung oder falsche Bedienung kann zu Sachschäden führen und in Folge Personen gefährden.

Daher übernehmen wir keinerlei Verantwortung und Haftung für Verluste, Schäden oder Kosten, die sich aus fehlerhafter Verkabelung, unsachgemäßem Betrieb sowie falscher Verwendung und Wartung ergeben, oder in irgendeiner Weise damit zusammenhängen.

Wir behalten uns das Recht vor, ohne vorherige Mitteilung Änderungen bezüglich Produkt, technischer Daten oder Bedienungs- und Versuchsanleitung vorzunehmen.

Bestimmungsgemäße Verwendung

Der bestimmungsgemäße Einsatz der einzelnen Module ist in den vorhergehenden Seiten und den Anleitungen beschrieben. Ein anderer Einsatz als vorgegeben ist nicht zulässig, bzw. geschieht auf eigene Gefahr des Anwenders.

Garantie

1. Das Liefergut ist unverzüglich nach Eintreffen am Bestimmungsort vom Auftraggeber auf Transportschäden zu prüfen. Beanstandungen wegen unvollständiger oder unrichtiger Lieferung sind uns spätestens innerhalb von 8 Werktagen nach Ankunft der Lieferung am Bestimmungsort mit begründeter Information anzuzeigen. Nach Ablauf dieser Frist gilt die Lieferung als vertragsgemäß ausgeführt.
2. Für verborgene Mängel, die bei unverzüglicher Untersuchung nicht festzustellen sind, stehen wir 24 Monate ab Versandtag in der Weise ein, dass wir das fehlerhafte Material nach unserer Wahl nachbessern oder mangelfrei ersetzen. Ist dies unmöglich, fehlgeschlagen oder unzumutbar, so kann der Auftraggeber nur Herabsetzung des Kaufpreises oder Rücktritt von dem mangelhaften Teil des Vertrages verlangen. Das mangelhafte Teil ist in jedem Fall zum Zwecke der Nachbesserung oder Ersatzteillieferung und bei Vertragsrücktritt vom Auftraggeber an unsere Anschrift zurückzusenden. Für wesentliche Fremderzeugnisse beschränkt sich die Haftung des Lieferers auf die Abtretung der Haftungsansprüche, die ihm gegen den Lieferer des Fremderzeugnisses zustehen.
3. Das Recht des Auftraggebers, Ansprüche aus Mängeln geltend zu machen, verjährt in allen Fällen vom Zeitpunkt der rechtzeitigen Anzeige an in 24 Monaten, frühestens jedoch mit Ablauf der Gewährleistung.
4. Natürlicher Verschleiß, unsachgemäße Behandlung, Fahrlässigkeit, schädigende Einwirkungen Unbefugter, unbeaufsichtigte Benutzung sowie Änderungen am Liefergut, die durch den Auftraggeber oder durch Dritte ohne unsere schriftliche Zustimmung erfolgen, schließen unsere Mängelhaftung und Gewährleistungspflicht ohne Einschränkung aus.
5. Für die Beseitigung von Mängeln hat uns der Auftraggeber die erforderliche Zeit und Gelegenheit einzuräumen. Ist der Auftraggeber hierzu nicht oder nur mit unzumutbaren Auflagen bereit, entfällt für uns jede Gewährleistungspflicht. Das gilt auch bei Mängelanzeigen gemäß Punkt 1.
6. Für das Ersatzstück und die Ausbesserung beträgt die Gewährleistungsfrist drei Monate, sie läuft mindestens aber bis zum Ablauf der ursprünglichen Gewährleistungsfrist für den Liefergegenstand. Die Frist für Mängelhaftung an dem Liefergegenstand wird um die Dauer der durch die Nachbesserungsarbeiten verursachten Betriebsunterbrechung verlängert. Weitere Gewährleistungs- und Schadensersatzansprüche des Auftraggebers in jeglicher Form sind ausgeschlossen; insbesondere ein Anspruch auf Ersatz von Schaden, der nicht an dem Liefergegenstand selbst entstanden ist, sowie Ansprüche des Auftraggebers aus unerlaubter Handlung des Lieferers sind, soweit gesetzlich zulässig, ausgeschlossen. Soweit der vorstehende Haftungsausschluss gesetzlich nicht zulässig ist, ist unsere Haftung unabhängig vom Rechtsgrund begrenzt auf maximal 5% des Kaufpreises desjenigen Materials, das den Schaden verursacht hat oder Gegenstand des Anspruchs ist oder in direktem Bezug dazu steht.

Die in den Lösungen angegebenen Werte können aufgrund von Toleranzen der Bauteile und verschiedenen Betriebsbedingungen von den aktuell gemessenen Werten abweichen. Einflüsse sind z.B. Temperaturänderungen, Verwirbelungen des Luftstroms, Genauigkeit bei der Winkeleinstellung der Flügel, Luftbewegungen im Experimentierraum durch offene Fenster, Veränderung des Luftstroms in der Umgebung des Laborplatzes durch umhergehende Personen, Betrieb mehrerer Arbeitsplätze gleichzeitig auf engerem Raum, etc. Insbesondere die exakte und gleichmäßige Flügelstellung hat großen Einfluss auf die Messergebnisse und muss mit besonderer Sorgfalt beachtet werden.

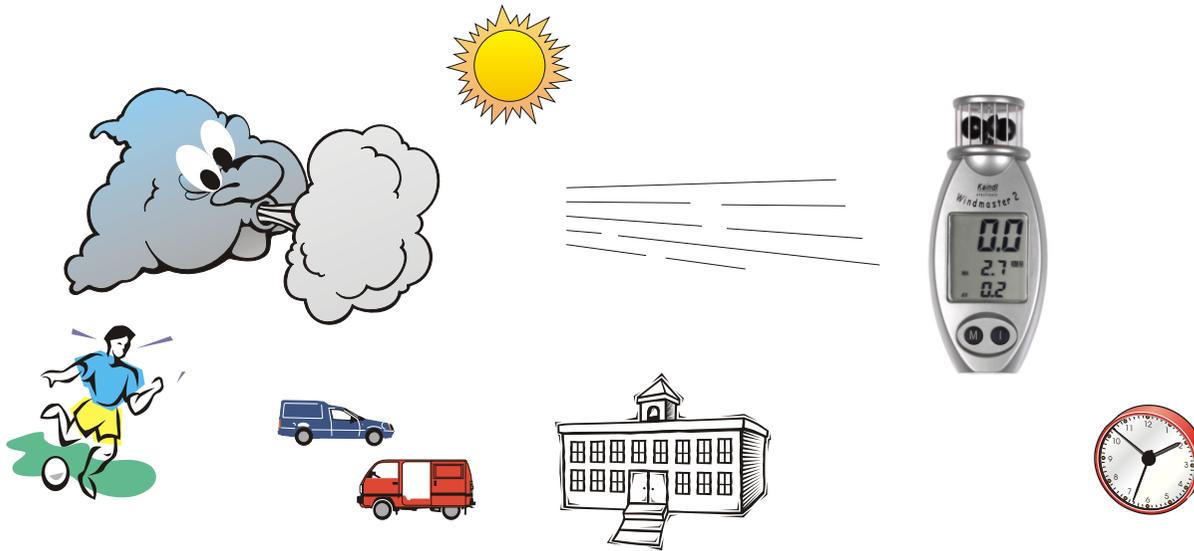
Hinter dem Windenergiekonverter muss der Luftstrom frei von Hindernissen abgeführt werden können.

Achten Sie bei der Ermittlung der Stromwerte unbedingt auf die angegebenen Messbereiche für die Multimeter. Der Bereich 10 A hat einen kleineren Innenwiderstand als der Messbereich DC A 2000m oder DC A 200 m.

Während der Messung muss auf ein Umschalten auf einen anderen Messbereich verzichtet werden, da sonst die Messreihe verfälscht wird.

Das Experimentiersystem, insbesondere der Windenergiekonverter mit Generator, Tachogenerator, Nabe und Flügeln sowie der Savonius-Generator sind feinmechanische Komponenten und müssen mit entsprechender Vorsicht und Feingefühligkeit behandelt werden.

Aufbau



Information

Die Messungen dienen der größenordnungsmäßigen Einordnung von Windstärken:

Beaufortscala
(Skala zur Klassifikation von Winden nach Ihrer Geschwindigkeit)

Stufe	Kennwort	km/h	m/s
0	Windstille	unter 1	0 - 0,2
1	leiser Zug	1 - 5	0,3 - 1,5
2	leichte Brise	6 - 11	1,6 - 3,3
3	schwache Brise	12 - 19	3,4 - 5,4
4	mäßige Brise	20 - 28	5,5 - 7,9
5	frische Brise	29 - 38	8,0 - 10,7
6	starker Wind	39 - 49	10,8 - 13,8
7	steifer Wind	50 - 61	13,9 - 17,1
8	stürmischer Wind	62 - 74	17,2 - 20,7
9	Sturm	75 - 88	20,8 - 24,4
10	schwerer Sturm	89 - 102	24,5 - 28,4
11	orkanartiger Sturm	103 - 117	28,5 - 32,6
12	Orkan	118 - 133	32,7 - 36,9
13	Orkan	134 - 149	37,0 - 41,4
14	Orkan	150 - 166	41,5 - 46,1
15	Orkan	167 - 183	46,2 - 50,9
16	Orkan	184 - 201	51,0 - 56,0
17	Orkan	über 200	über 56,0

Da sich die Windgeschwindigkeit in der Natur ständig ändert, werden für die Tabelle die gemittelten Werte (Anzeige: AV auf dem Display des Anemometers einige Minuten gemessen), verwendet.

Über den einführenden Charakter des Experimentes hinaus könnte man die Untersuchung auch zu einer Standortanalyse für eine fiktiv oder möglicherweise sogar real geplanten Windenergieanlage ausweiten. Dazu wäre es erforderlich, das Anemometer an einem mindestens 3 m langen Mast zu befestigen und im Bereich des Standortes systematisch Windgeschwindigkeitsmessungen durchzuführen.

Information

Die Auswirkungen des Windes können in den unterschiedlichen Situationen beobachtet werden.
Zum Beispiel, der Druck, den der Wind oder der Fahrtwind auf den eigenen Körper ausübt, die zerstörerische Kraft von Stürmen oder die antreibende Kraft auf Segel oder Rotoren.

Die Leistungsfähigkeit des Windes hängt in erster Linie von der Windgeschwindigkeit ab.
Das Experiment dient dazu, sich einen Eindruck über Größe sowie die zeitlichen und örtlichen Unterschiede dieser Geschwindigkeit zu verschaffen.

Aufgabe

Bei diesem Experiment werden zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Orten die Windgeschwindigkeiten mit dem Handwindmessgerät (Anemometer) gemessen und notiert.

Gerät einschalten (I) und mit der Taste "M" die Einheit M/S (m/s) wählen.

Beispiele für Messorte sind:

- Straße vor der Schule
- Hofeinfahrt der Schule
- Schulhof (zugige Ecke)
- Schulhof (geschützte Ecke)
- Sportplatz
- Dach eines zugänglichen Schulgebäudeteils

Wiederholen Sie die Messung am Ende der Unterrichtsstunde und/oder in einer der nachfolgenden Stunden, um zeitliche Veränderungen der Windgeschwindigkeit beobachten zu können.

Ort der Messung	Datum/Zeit	Windgeschwindigkeit (m/sek)
Schulhof	12:00	2,5
Dach	12:05	3,5
Sportplatz	12:10	1,5
Tor	12:15	4,7
Schulhof	14:00	3,2
Dach	14:05	4,2
Sportplatz	14:10	2,5
Tor	14:15	6,0

1. Geben Sie die größte und kleinste Windgeschwindigkeit an, die an den verschiedenen Messorten gemessen wurde. Berechnen Sie das Verhältnis dieser Geschwindigkeiten.

$$v_{\max} = 6,0 \text{ m/s}$$

$$v_{\min} = 1,0 \text{ m/s}$$

$$v_{\max} / v_{\min} = 6$$

2. An welchem Ort wurden die größten Schwankungen der Windgeschwindigkeit festgestellt? Geben Sie für diesen Ort die größte und die kleinste Windgeschwindigkeit an und berechnen Sie deren Verhältnis.

Ort: **Sportplatz**

$$v_{\max} = 2,5 \text{ m/s}$$

$$v_{\min} = 1,0 \text{ m/s}$$

$$v_{\max} / v_{\min} = 2,5$$

3. Die Windleistung ist proportional zu v^3 ($P = \text{const.} \times v^3$, wobei v die Windgeschwindigkeit ist). Wie verhält sich die Windleistung bei Verdoppelung, Verdreifachung und Vervielfachung der Windgeschwindigkeit bzw. bei der Änderung der Windgeschwindigkeit von v_{\min} nach v_{\max} aus Aufgabe 2?

$$v_2 / v_1 = 2$$

$$v_2 / v_1 = 3$$

$$v_2 / v_1 = 4$$

$$v_{\max} / v_{\min} = 2,5$$

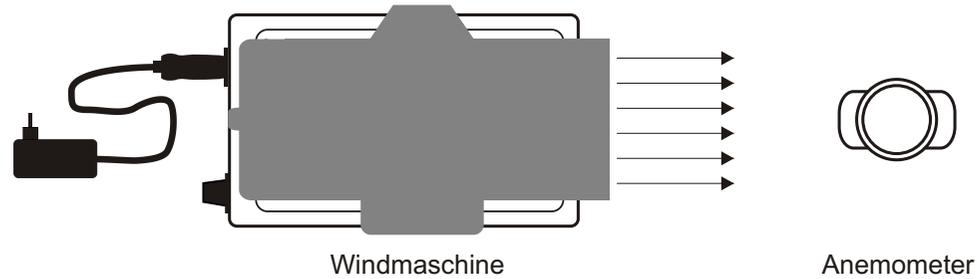
$$P_2 / P_1 = 8$$

$$P_2 / P_1 = 27$$

$$P_2 / P_1 = 64$$

$$P_{\max} / P_{\min} = 15,6$$

Aufbau



Information

Diese Messung ist eigentlich zu Beginn einer jeden experimentellen Sequenz erforderlich, die unter Nutzung des **Windtrainer junior** durchgeführt werden soll. Bei dieser Messung wird festgestellt, welche Windgeschwindigkeit die Windmaschine am Messort in Abhängigkeit von der Potentiometerstellung des Reglers erzeugt.

Das erstellte Diagramm kann in allen folgenden Versuchen genutzt werden und erspart die sonst notwendige Ermittlung der jeweiligen Windgeschwindigkeit.

Darüber hinaus eignet sich dieser Versuch auch, um Fertigkeiten in der Handhabung der Experimentiergeräte des Windtrainer junior zu erwerben. Dies gilt für das Anschließen der Windmaschine ebenso wie für das Einstellen und Ablesen der Messgeräte.

Information

Die Einteilung am Einstellknopf der Drehzahlsteuerung der Windmaschine ist willkürlich und wird in Skalenteilen (Skt) angegeben.

Als Voraussetzung für die folgenden Experimente soll in diesem Versuch der Zusammenhang zwischen Skaleneinteilung und Windgeschwindigkeit ermittelt werden.

Skalenteilung	Windgeschwindigkeit (m/sek)
0	0
1	3,5
2	4,0
3	5,8
4	6,9
5	8,0
6	9,0
7	9,6
8	10,3
9	10,8
10	11,0

Aufgabe

Bauen Sie das Experiment entsprechend der oben gezeigten Darstellung auf.

Den Fuß an das Anemometer anschrauben, Gerät einschalten (I) und mit der Taste: M die Einheit M/S (m/s) wählen.

Den Fuß mit der Bohrung auf den mittleren Positionierstift der Grundplatte stellen.

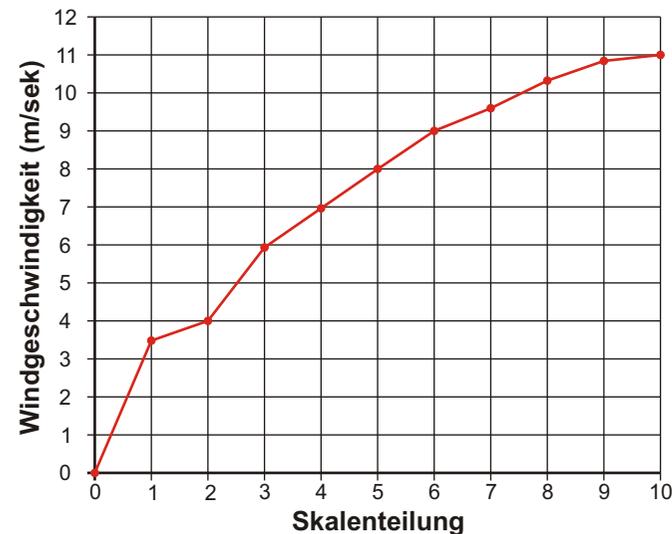
Führen Sie die Messung in Schritten von ganzen Skalenteilen durch.

Schreiben Sie die Messwerte in die Tabelle.

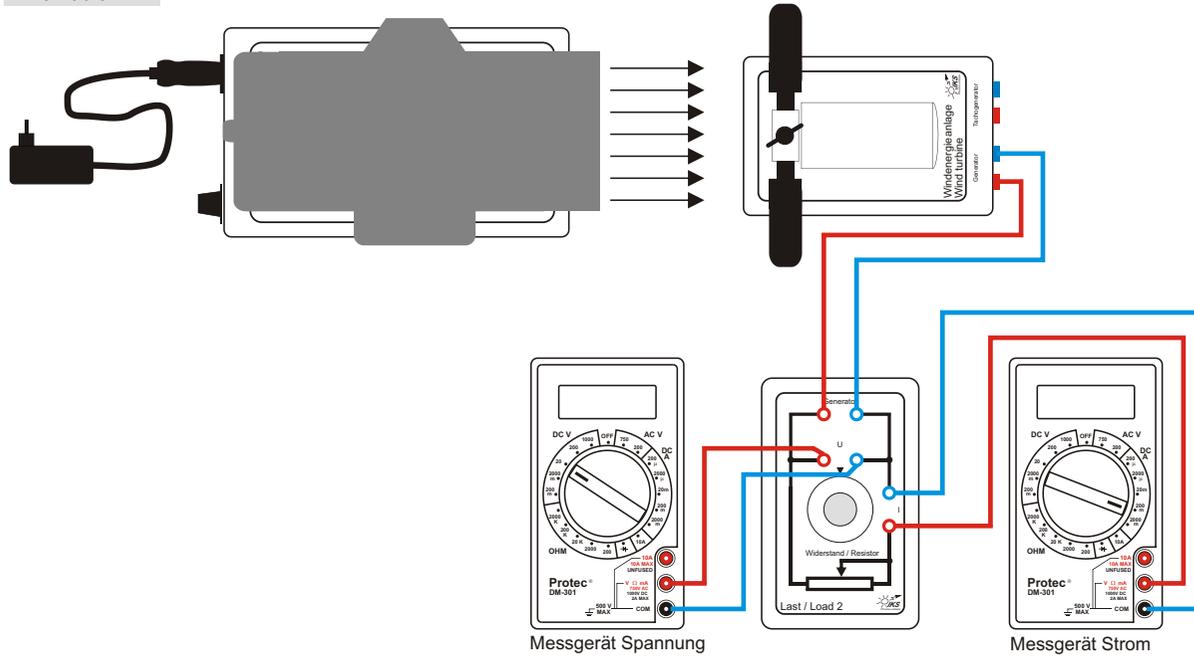
Erstellen Sie dann mit den Daten ein Diagramm und legen Sie durch die Messpunkte eine Ausgleichskurve.

Benutzen Sie das Diagramm in den folgenden Experimenten zur Ermittlung der Windgeschwindigkeit aus der Potentiometereinstellung.

Windgeschwindigkeit/Skalenteilung



Aufbau



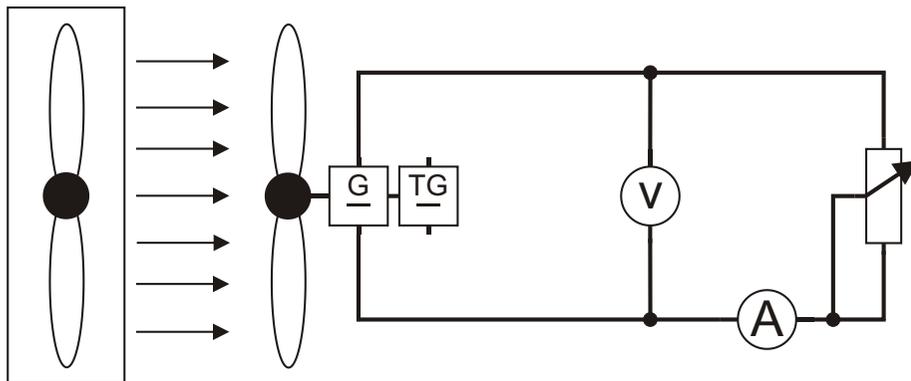
Information

Dieses Experiment gehört hinsichtlich der Durchführung eher zu den einfacheren Experimenten. Die einzige Schwierigkeit bei der Durchführung taucht dann auf, wenn die gewölbten Flügel gegensinnig montiert werden sollen. Hierbei hilft die Symbolik auf der Einstellrosette der Schutzhaube.

Die Ergebnisse dieses einfachen Experimentes sind dagegen bemerkenswert. Zunächst erkennt man an der Leistungssteigerung, dass die gewölbten Flügel erwartungsgemäß mehr Auftrieb erfahren als die ebenen Flügel. Wenn man einen der gewölbten Flügel gegensinnig montiert, hebt sich die zusätzliche Auftriebskraft auf und man erhält in etwa wieder das Ergebnis, das man für die ebenen Flügel beobachten konnte.

Ein solches Ergebnis fordert geradezu heraus, den Antriebsmechanismus an den Flügeln einer Windenergieanlage praktisch wie theoretisch genauer zu untersuchen.

Schaltplan



Information

Im Laufe der Entwicklung der Windkraftanlagen wurden verschiedene Flügelformen für den Konverter verwendet.

Dieses Experiment dient dazu, den Einfluss der Flügelform auf das Betriebsverhalten zu ermitteln.

Aufgabe

Bauen Sie das Experiment entsprechend der oben gezeigten Darstellung auf.

Verwenden Sie einen Auftriebsläufer mit zwei Flügeln.

Der Bereichswahlschalter des Multimeters Spannung ist auf die Position **DC V 20** einzustellen, der des Multimeters Strom auf die Position **DC A 200 m**.

Für die Belastung wird der Widerstand der Last 2 auf einen Wert von 50Ω eingestellt.

Es werden insgesamt drei Messungen mit zwei Flügelformen durchgeführt.

Montieren Sie zunächst die ebenen Flügel mit einem Einstellwinkel von 60° . Stellen Sie am Potentiometer der Windmaschine eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s ein. Benutzen Sie dazu das Diagramm aus Experiment 2.

Messen Sie die Spannung und die Stromstärke des Windenergieanlage und berechnen Sie die Leistung.

Führen Sie die gleiche Messung mit den gewölbten Flügeln durch. Die Wölbung soll dabei mit den auf der Winkelrosette der Schutzhaube angegebenen Symbolen übereinstimmen (normal).

Zuletzt wird die Messung wiederholt, wobei einer der gewölbten Flügel um 180° gedreht wird - so, dass die Wölbung entgegengesetzt zu den angegebenen Symbolen ist (gegensinnig).

Alle Messungen werden in einer Tabelle festgehalten. Die Leistung P errechnet sich aus dem Produkt aus Spannung und Stromstärke.

Einstellungen:

Windenergieanlagenprinzip: Auftrieb
Flügelanzahl: 2
Flügelform: eben / gewölbt
Einstellwinkel: 60°
Windgeschwindigkeit: 8 m/s
Lastwiderstand: 50Ω

	1. Flügel	2. Flügel	U (V)	I (mA)	P (mW)
ebener Flügel			1,05	17,3	18,17
gewölbter Flügel (normal)			1,78	29,6	52,69
gewölbter Flügel (gegensinnig)			0,85	13,8	11,73

1. Vergleichen Sie die erste und die zweite Messung. Bei welcher Flügelform wird eine höhere Leistung erreicht? Begründung?

Die höhere Leistung wird mit den gewölbten Flügeln erreicht, da diese auf Grund ihrer

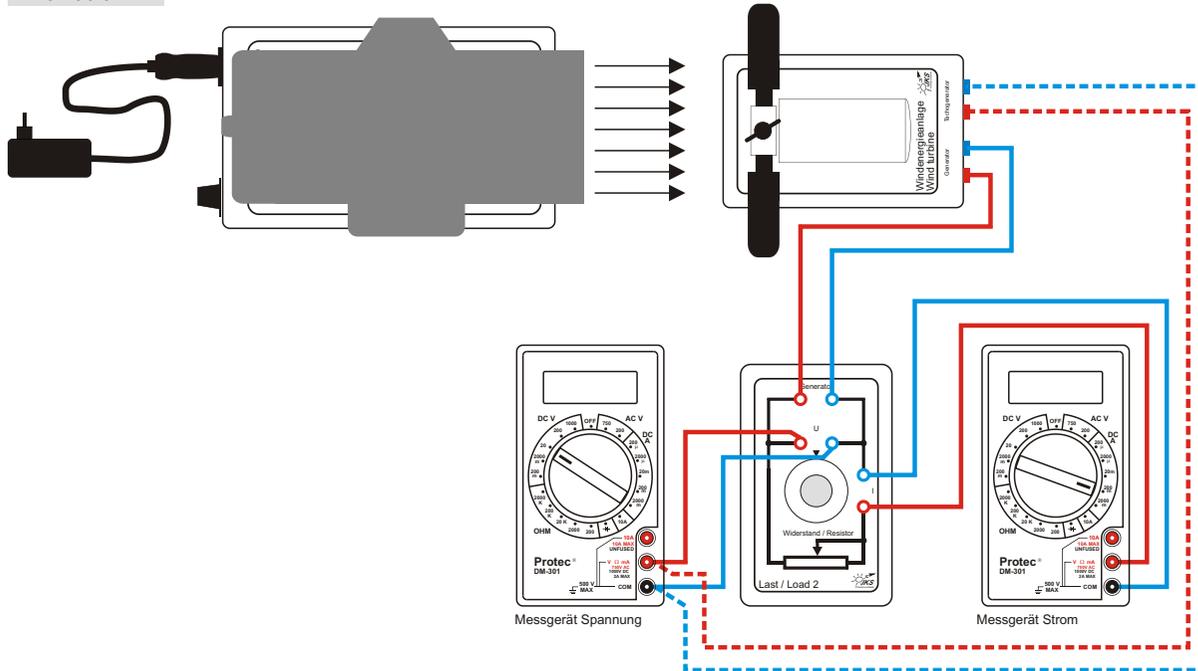
gebogenen Form einen größeren Auftrieb haben.

2. Vergleichen Sie die dritte Messung mit den beiden vorangegangenen Messungen. Begründen Sie das Ergebnis.

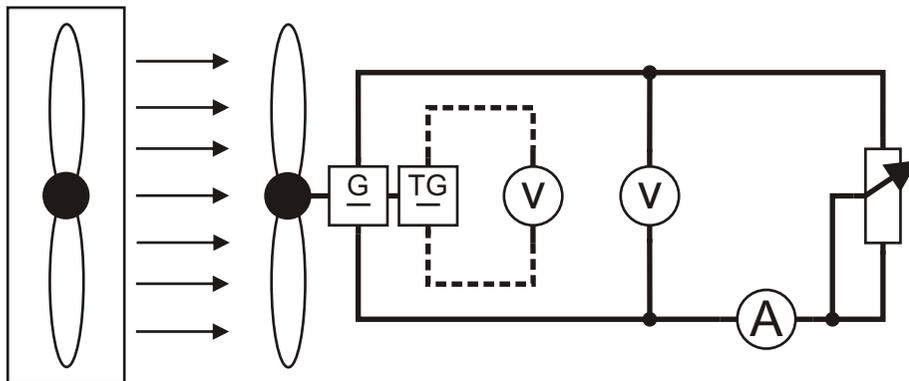
Die Leistung der dritten Messung entspricht in etwa der ersten. Die zusätzliche Auftriebskraft

an einem Flügel wird durch die gegensinnige Stellung am anderen aufgehoben.

Aufbau



Schaltplan



Information

Dieses Experiment ist eines der aufwendigeren von den 13 Experimenten. Es dient der Beantwortung der häufig auftretenden Frage, ob Windenergieanlagen mit vielen Flügeln mehr Leistung erbringen als solche mit weniger Flügeln.

Da das Ergebnis dieses Experimentes aus dem Vergleich dreier Messkurven gewonnen wird, ist es wichtig, die festen Einstellungen (Flügelform, Einstellwinkel, Windgeschwindigkeit) sorgfältig konstant zu halten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Drehzahl der Rotoren, bei der die maximale Leistungsabgabe erfolgt, mit zunehmender Flügelanzahl sinkt.

Der vierflügelige Rotor erreicht die größte Leistung.

Bei realen Windenergieanlagen beträgt der Leistungszuwachs von zwei auf drei Blätter ca. vier Prozent, der von drei auf vier Blätter noch ca. 2 Prozent.

Die bevorzugte Lösung für Windenergieanlagen stellt ein Rotor mit drei Blättern dar.

Der mögliche Gewinn an Leistung und Energielieferung von wenigen Prozenten reicht in der Regel nicht aus, um die Kosten für ein weiteres Rotorblatt zu rechtfertigen.

Im Vergleich mit dem Zweiblattrotor hat der Dreiblattrotor ein aerodynamisch symmetrischeres Verhalten und ist auch deshalb die optimale Lösung.

Information

Bei der Beobachtung verschiedener Windenergieanlagen fällt auf, dass sie sich abgesehen von der Größe und Bauart auch durch die Anzahl der verwendeten Flügel unterscheiden. In diesem Experiment soll untersucht werden, ob es eine optimale Flügelanzahl gibt.

Aufgabe

Für jede Flügelanzahl (zwei, drei und vier) wird eine Messreihe durchgeführt. Achten Sie darauf, dass bei allen Messreihen Windgeschwindigkeit, Flügelform und Einstellwinkel beibehalten werden.

Verändern Sie in jeder Messreihe den Widerstand der Last Z in $20\ \Omega$ -Schritten von $0\ \Omega$ bis $100\ \Omega$.

Messen Sie jeweils die Spannung und die Stromstärke der Windenergieanlage sowie die Ausgangsspannung des Tachogenerators und tragen diese in die jeweilige Tabelle ein.

Zur Messung der Tachogeneratorspannung werden die Anschlusskabel des Multimeters Spannung kurzzeitig von dem Messmodul in den Tachospannungsangabe der Windenergieanlage gesteckt.

Der Bereichswahlschalter des Multimeters Spannung ist auf die Position **DC V 20** einzustellen, der des Multimeters Strom auf die Position **DC A 200 m**.

Berechnen Sie die jeweils abgegebene Leistung. Ermitteln Sie weiterhin die Rotordrehzahlen mit Hilfe des Drehzahl-Tachogeneratorspannungs-Diagramms (siehe Seite 5). Stellen Sie für jede Flügelanzahl die Abhängigkeit der Leistung von der Drehzahl in einem gemeinsamen Diagramm dar. Zeichnen Sie die drei Ausgleichskurven ein.

Einstellungen:

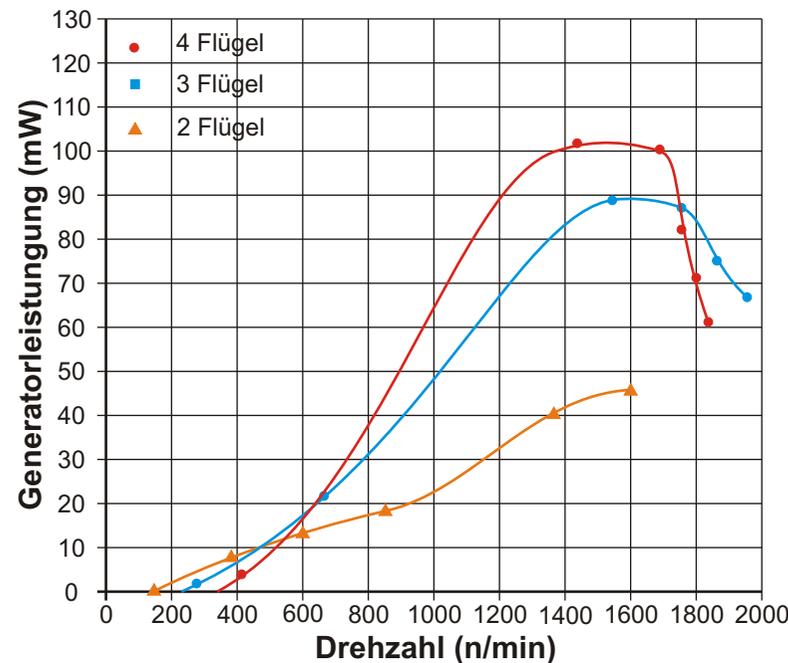
Windenergieanlagenprinzip: Auftrieb
 Flügelanzahl: 2 / 3 / 4
 Flügelform: gewölbt
 Einstellwinkel: 75°
 Windgeschwindigkeit: 8 m/s
 Lastwiderstand: $0-100\ \Omega$ in $20\ \Omega$ -Schritten

R (Ω)	U (V)	I (mA)	P (mW) 2 Flügel	U Tachog. (V)	Drehz. (n/min)
0	0,03	22	0,66	0,25	167
20	0,4	20	8,0	0,59	393
40	0,72	18	12,9	0,9	600
60	1,05	17,5	18,4	1,26	840
80	1,83	22,3	40,8	2,07	1380
100	2,14	21,1	45,2	2,38	1587

R (Ω)	U (V)	I (mA)	P (mW) 3 Flügel	U Tachog. (V)	Drehz. (n/min)
0	0,05	37,9	1,9	0,43	287
20	0,64	33,8	21,6	0,99	660
40	1,86	46,8	87,0	2,35	1567
60	2,3	37,5	86,3	2,66	1733
80	2,5	30,4	76,0	2,83	1887
100	2,62	25,8	67,6	2,91	1940

R (Ω)	U (V)	I (mA)	P (mW) 4 Flügel	U Tachog. (V)	Drehz. (n/min)
0	0,07	50	3,8	0,61	407
20	1,39	73,1	101,6	2,13	1420
40	2,01	54,8	100,5	2,5	1667
60	2,25	36,7	82,6	2,64	1760
80	2,4	29,3	70,3	2,71	1807
100	2,48	24,5	60,8	2,74	1827

Ausgangsleistung/Flügelzahl



weiter auf nächster Seite \longrightarrow

1. Ermitteln Sie für jede Flügelanzahl, bei welcher Drehzahl die höchste Leistung erreicht wird:

Flügelanzahl	Drehzahl für P_{\max} in (n/min)	P_{\max} in (mW)
2	1587	45,2
3	1567	87
4	1420	101,6

2. Welchen Zusammenhang zwischen Flügelanzahl und optimaler Drehzahl kann man daraus ableiten?

Je weniger Flügel der Rotor besitzt, desto größer ist die Drehzahl, bei der die optimale Leistung erreicht wird.

.....

.....

3. Geben Sie an, bei welcher Flügelanzahl die größte Ausgangsleistung gemessen wurde: vier

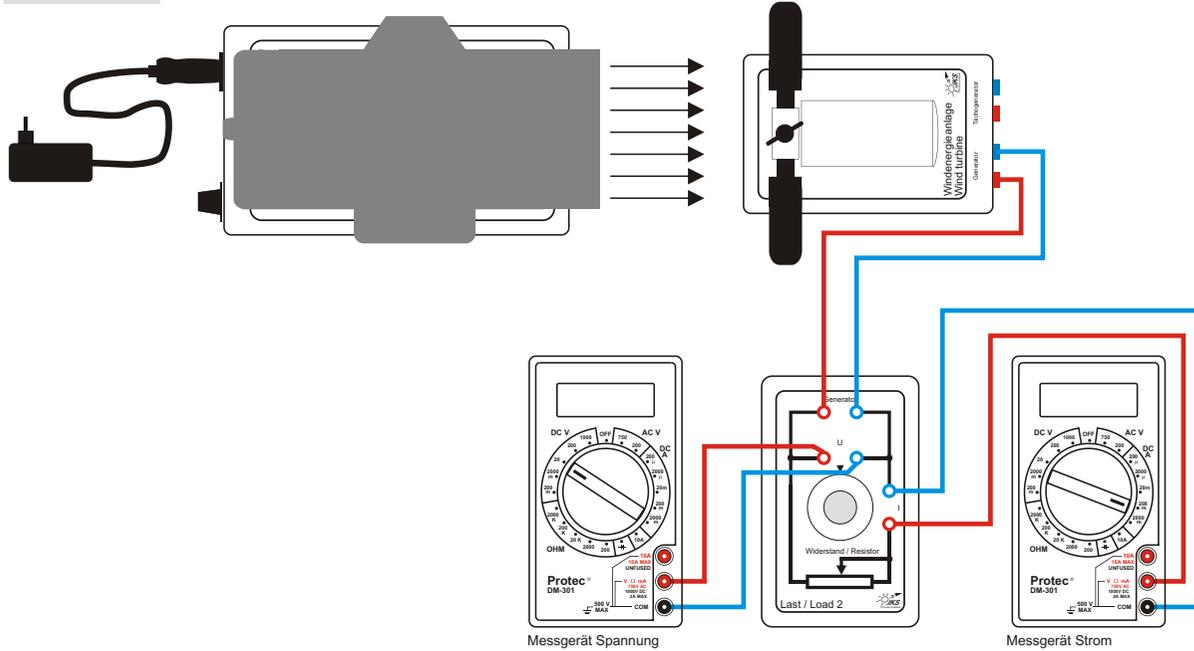
4. Erklären Sie das Zustandekommen der Ergebnisse der Aufgaben 2 und 3:

Mehr Flügel bedeuten größere Angriffsfläche für den Wind, aber gleichzeitig auch höheren technischen Aufwand. Die Leistungssteigerung zwischen zwei und drei Flügeln ist größer als die zwischen drei und vier Flügeln.

.....

.....

Aufbau

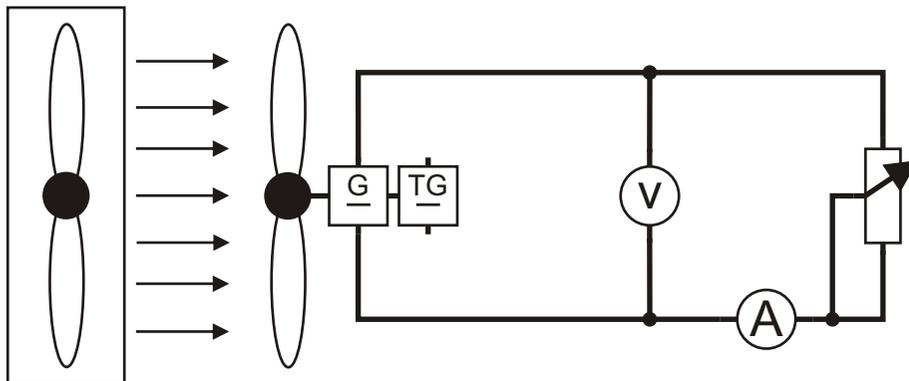


Information

Bei diesem Versuch sind eine Vielzahl von Flügelstellungen erforderlich. Daher ist es ratsam, mit drei ebenen Flügeln zu arbeiten und die Schülerinnen und Schüler darauf hinzuweisen, dass sie die Feststellschrauben für die Flügel nur behutsam anziehen sollen.

Die Ergebnisse stehen im Widerspruch zu der naheliegenden Vermutung, dass das Leistungsmaximum bei einem Einstellwinkel von etwa 45° zu finden ist. Deshalb ist auch dieser Versuch besonders gut geeignet, die Wirkung der Windkraft auf einen sich drehenden Flügel zu untersuchen.

Schaltplan



Information

Eine Windenergieanlage sollte möglichst immer mit bestem Wirkungsgrad arbeiten, d.h. die maximal mögliche mechanische Leistung aus dem Wind entnehmen und in elektrische Leistung umwandeln.

Die Leistung hängt von verschiedenen Faktoren ab.

Auf die Faktoren: Windgeschwindigkeit und Belastung durch den Verbraucher hat die Windenergieanlage keinen Einfluss. Moderne Windenergieanlagen sind jedoch in der Lage, die Flügelstellung zu variieren, um die Ausgangsleistung zu optimieren.

Die Abhängigkeit der Ausgangsleistung von der Flügelstellung soll in diesem Experiment untersucht werden.

Aufgabe

Bauen Sie den Versuch entsprechend der obigen Darstellung auf.

Messen Sie die Stromstärke und die Spannung bei unterschiedlichen Einstellwinkeln für zwei verschiedene Windgeschwindigkeiten.

Der Bereichswahlschalter des Multimeters Spannung ist auf die Position **DC V 20** einzustellen, der des Multimeters Strom auf die Position **DC A 200 m**.

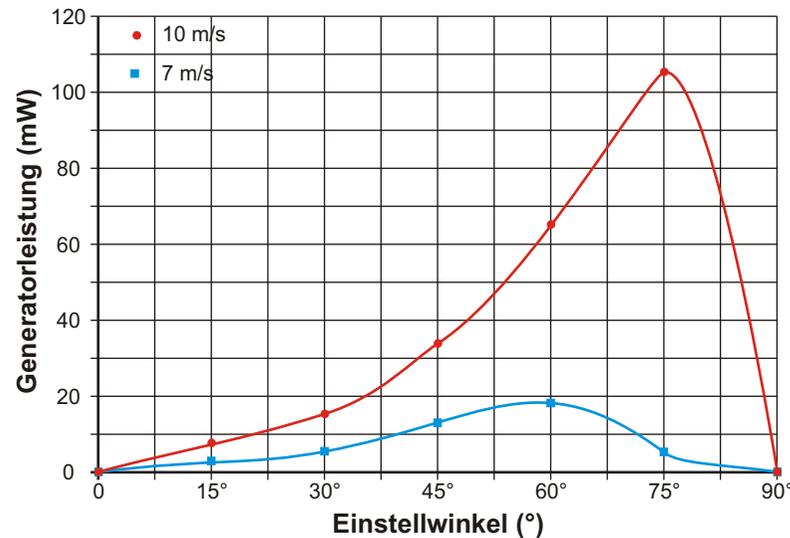
Stellen Sie die Abhängigkeit der Ausgangsleistung vom Einstellwinkel für beide Windgeschwindigkeiten in einem gemeinsamen Diagramm dar.

Einstellungen:

Windenergieanlagenprinzip: Auftrieb
 Flügelanzahl: 3
 Flügelform: eben
 Einstellwinkel: 0-90° in 15°-Schritten
 Windgeschwindigkeit: 7 m/s und 10 m/s
 Lastwiderstand: 50 Ω

Einstellwinkel	Windgeschwindigkeit (m/sek)					
	7 m/sek			10 m/sek		
	U (V)	I (mA)	P(mW)	U (V)	I (mA)	P(mW)
0°	0	0	0	0	0	0
15°	0,38	6,5	2,47	0,66	10,8	7,13
30°	0,62	10,3	6,39	0,97	16,3	15,81
45°	0,88	14,2	12,49	1,45	23,5	34,07
60°	1,05	17,2	18,06	1,96	31,8	62,32
75°	0,54	9	4,86	2,55	41,7	106,33
90°	0	0	0	0	0	0

Ausgangsleistung/Flügelstellung



1. Wie groß ist jeweils der optimale Einstellwinkel bei der

Windgeschwindigkeit 7 m/s: **60°**

Windgeschwindigkeit 10 m/s: **75°**

2. Welcher Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Einstellwinkel vermuten Sie?

Je größer die Windgeschwindigkeit, desto größer der optimale Einstellwinkel.

3. Überlegen Sie, ob eine Windkraftanlage mit fester Rotorblattstellung optimal arbeiten kann. Begründung?

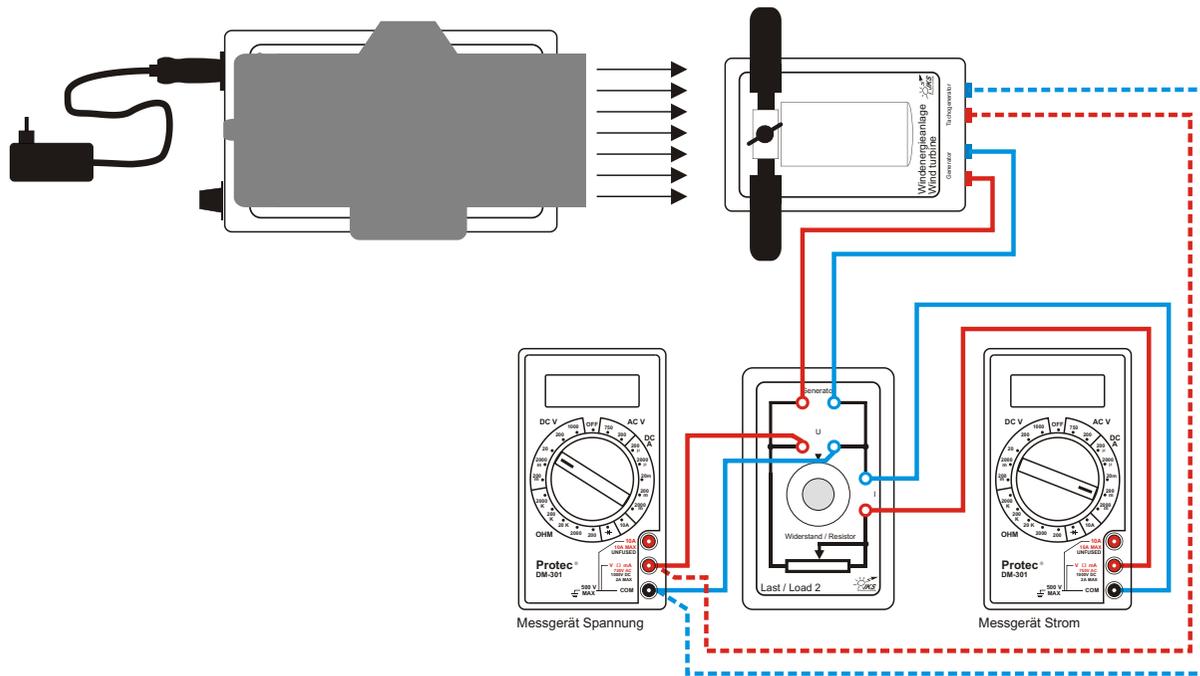
Da der optimale Einstellwinkel stark von der Windgeschwindigkeit abhängt, wird bei einem festen Einstellwinkel der optimale Wirkungsgrad nur für eine bestimmte Windgeschwindigkeit erreicht.

4. Schlussfolgern Sie, welche technischen Anforderungen deshalb an moderne Windkraftanlagen gestellt werden.

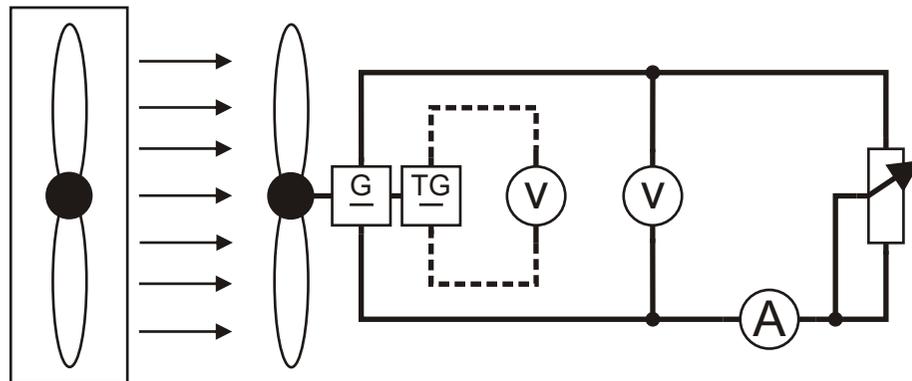
Moderne Windkraftanlagen können die Rotorblätter abhängig von der Windgeschwindigkeit einstellen. Sie verfügen über eine automatische Rotorblattverstellung und einen Windmesser.

Hiermit kann die Leistung in gewissen Grenzen geregelt werden.

Aufbau



Schaltplan



Information

In diesem Experiment liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung des elektrischen Teils einer Windenergieanlage. Der Generator der Modellanlage ist ein Gleichstromgenerator, dessen Ausgangskennlinie und belastungsabhängige Ausgangsleistung untersucht werden können.

Die Durchführung dieses Experimentes ist im Vergleich mit den anderen recht einfach, wenn man mit der größten Windgeschwindigkeit und der vollen Belastung beginnt und sich dabei eine für die gesamte Messung geeignete Drehzahl auswählt.

Das Ergebnis ist annähernd eine Gerade, die auf ein rein ohmsches Verhalten der Quelle (ohne induktive Anteile) hinweist.

Bei entsprechender Leistungsfähigkeit der Lerngruppe kann man anhand dieses Verhaltens das Ersatzschaltbild des Generators erarbeiten. Die Leistungskurve zeigt deutlich die belastungsabhängige Ausgangsleistung, deren Maximum etwa bei mittlerer Belastung auftritt. An diese Beobachtung lässt sich eine Diskussion der optimalen Anpassung des Verbrauchers an den Erzeuger anschließen.

Für die Berechnung des Innenwiderstandes sind zwei alternative Wege denkbar. Zum einen kann man den Innenwiderstand aus dem Verhältnis der Ausgangsspannung zur Ausgangsstromstärke für den Punkt größter Leistung errechnen. Zum anderen ist der Innenwiderstand gleich dem Verhältnis von Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke.

Information

Um das Verhalten einer Windenergieanlage als Spannungsquelle zu verstehen, ist es notwendig, die Betriebskennlinie der Quelle zu ermitteln und mit den Kennlinien anderer Spannungsquellen zu vergleichen.

Die hier gemessene Kennlinie ist die des Gleichstromgenerators in der Windenergieanlage, die für eine bestimmte Drehzahl des Generators ermittelt wird.

Aufgabe

Bauen Sie das Experiment entsprechend der oben gezeigten Darstellung auf. Es werden jeweils die Spannung und die Stromstärke bei verschiedenen Belastungen gemessen. Der Bereichswahlschalter des Multimeters Spannung ist auf die Position **DC V 20** einzustellen, der des Multimeters Strom auf die Position **DC A 200 m**.

Für die Drehzahlmessung werden die Anschlusskabel des Spannungsmessgerätes von der Last 2 in den Ausgang des Tachogenerators umgesteckt. Die Drehzahl ergibt sich mit Verwendung des Drehzahl-Tachogeneratorspannung-Diagramms (siehe S. 5).

Die Drehzahl ist für jede Belastung konstant zu halten. Stellen Sie dazu zunächst die größte Belastung an der Last 2 ein (Kurzschluss $R_{\text{Last}} = 0 \Omega$). Mit Hilfe der Windmaschine wird nun die gewünschte Drehzahl von 1000 min^{-1} eingestellt (Tachogeneratorspannung $1,5 \text{ V}$ entspricht 1000 min^{-1}). Es werden Stromstärke und Spannung in die Tabelle eingetragen (Spannungsmessgerät vorher umstecken). Danach wird der Belastungswiderstand auf den nächsten Wert aus der Tabelle eingestellt. Dies hat eine Änderung der Drehzahl zur Folge.

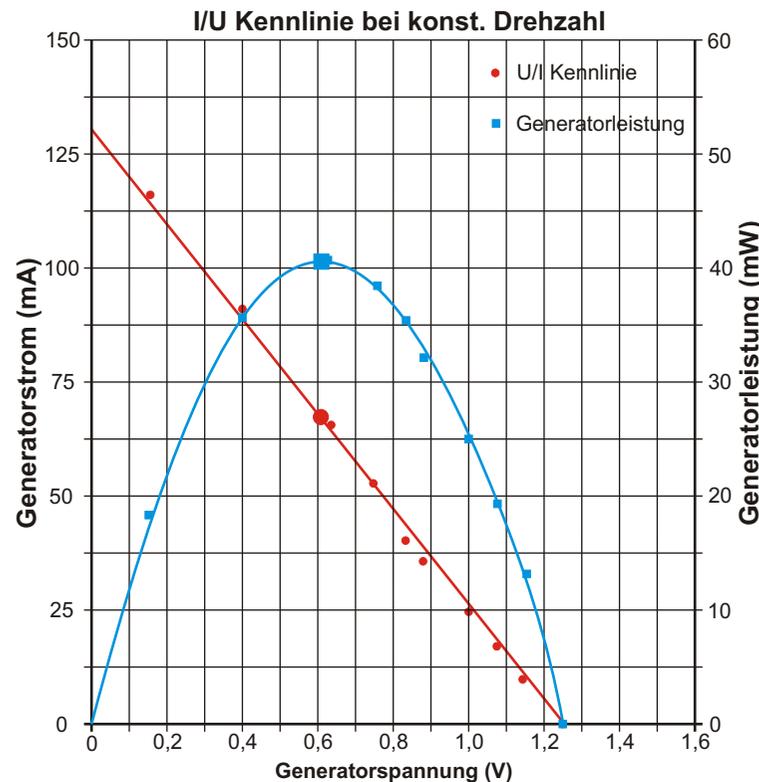
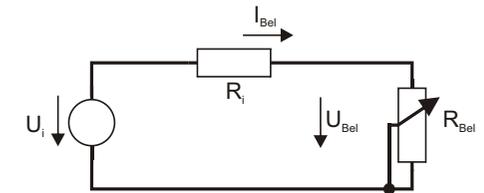
Durch Verminderung der Windgeschwindigkeit wird die Drehzahl wieder auf den vorgegebenen Wert gebracht. Stromstärke und Spannung werden erneut gemessen und eingetragen. Dies wird mit den anderen Werten wiederholt. Für die Einstellung Leerlauf entfernen Sie bitte das Pluskabel des Stromstärkemessgerätes von der Last 2.

Einstellungen:

Windenergieanlagenprinzip: Auftrieb
 Flügelzahl: 4
 Flügelform: gewölbt
 Einstellwinkel: 60°
 Windgeschwindigkeit: angepasst geregelt
 Lastwiderstand: $0 - 100 \Omega$ (nach Tabelle)
 Tachogeneratorspannung: $1,5 \text{ V}$ entspricht 1000 min^{-1}

R (Ω)	U (V)	I (mA)	P (mW)
0	0,16	115,0	18,4
5	0,40	89,6	35,8
10	0,63	65,9	41,5
15	0,76	51,0	38,8
20	0,83	43,0	35,7
25	0,88	36,8	32,4
40	1,00	25,0	25,0
60	1,08	17,8	19,2
100	1,15	11,0	12,7
Leerlauf	1,25	0	0

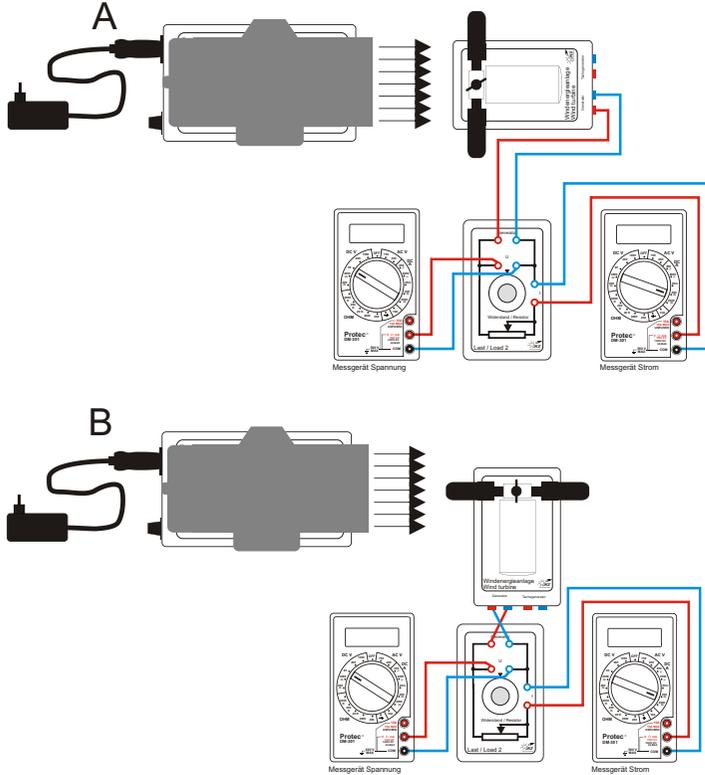
1. Tragen Sie die bei den verschiedenen Belastungen gemessenen Spannungen und Stromstärken in die Messtabelle ein. Berechnen Sie die abgegebene Leistung.
2. Stellen Sie die Messwertpaare in einem U/I Diagramm dar. Zeichnen Sie den vermuteten Verlauf der Kennlinie ein.
3. Zeichnen Sie in das gleiche Diagramm den Leistungsverlauf in Abhängigkeit von der Spannung ein. Kennzeichnen Sie auf der Kennlinie den Punkt der größten Leistungsabgabe.
4. Wie sieht das vereinfachte Ersatzschaltbild eines Gleichstromgenerators aus?



5. Die maximale Leistungsabgabe erfolgt, wenn der Belastungswiderstand die gleiche Größe wie der Innenwiderstand des Generators besitzt. Wie groß ist der Innenwiderstand des verwendeten Gleichstromgenerators?

$$R_i = \frac{0,62 \text{ V}}{67 \text{ mA}} = 9,3 \Omega$$

Aufbau



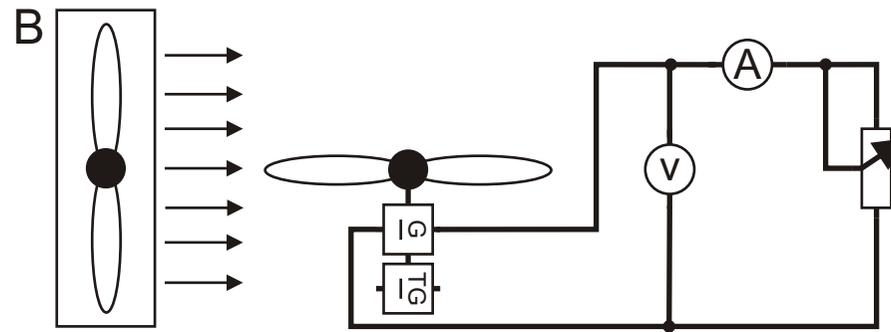
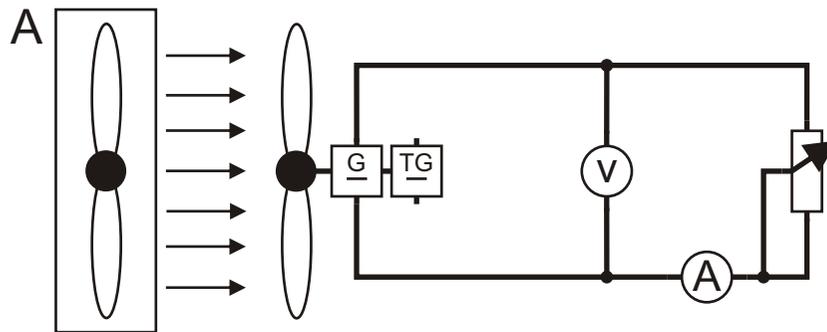
Information

Wenn man die Ausgangskennlinie einer Windenergieanlage bei konstanter Windgeschwindigkeit misst, stellt man fest, dass die Drehzahl bei zunehmender Belastung sinkt. Mit sinkender Drehzahl verringert sich auch die Quellenspannung des Generators und damit auch die Stromstärke durch den Belastungswiderstand. Im Gegensatz zu Experiment 6 wird in diesem Experiment das Verhalten der gesamten Windenergieanlage unter Belastung untersucht.

Die Durchführung des Experimentes ist einfach: Es wird eine Windgeschwindigkeit vorgewählt. Anschließend ändert man schrittweise die Belastung und misst die Stromstärke und die Spannung.

Zur Interpretation der gemessenen Kennlinien bietet es sich an, die in Experiment 6 ermittelte Kennlinie mit in das Diagramm einzuzichnen.

Schaltplan



Information

Im Experiment 6 wurde die Kennlinie des Gleichstromgenerators ermittelt, wobei die Drehzahl konstant zu halten war. Im normalen Betrieb hat die Belastung einer Windenergieanlage jedoch auch Einfluss auf die Drehzahl des Rotors. Welche Auswirkungen sich daraus auf das Betriebsverhalten ergeben, soll mit diesem Experiment untersucht werden. Es werden der Auftriebs- und der Widerstandsläufer untersucht.

Aufgabe

Bauen Sie das Experiment entsprechend der oben gezeigten Darstellung auf.

A: Die Windenergieanlage wird als Auftriebsläufer betrieben. Der Bereichswahlschalter des Multimeters Spannung ist auf die Position **DC V 20** einzustellen, der des Multimeters Strom auf die Position **DC A 200 m**.

Stellen Sie mit der Windmaschine eine Windgeschwindigkeit von 8,5 m/s ein. Diese Windgeschwindigkeit wird während des gesamten Experiments nicht verändert. Der Lastwiderstand wird durch das Potentiometer der Last 2 schrittweise von 0 Ω bis 100 Ω variiert.

Tragen Sie die jeweils gemessenen Spannungs- und Stromwerte in die Messtabelle ein.

Berechnen Sie die abgegebenen Leistungen. Einen zusätzlichen Messpunkt erhält man für den Leerlauf (Stromstärke gleich null). Dazu werden die Verbindungsleitungen des Stromstärkemessgerätes aus der Last 2 entfernt.

B: Stellen Sie die Flügel auf **0°** ein. Dann wird die Schutzhaube entfernt und die Windblende aufgesetzt.

Wiederholen Sie sämtliche Messungen nach Anleitung (A) mit der zum Widerstandsläufer um **90°** nach rechts gedreht, in die Position Widerstandsläufer, umgesetzten Windenergieanlage.

Durch die geänderte Drehrichtung der Windenergieanlage müssen die Anschlusskabel vertauscht werden.

Einstellungen:

Windenergieanlagenprinzip: Auftriebsläufer Widerstandsläufer

Flügelzahl: 4 4

Flügelform: eben eben

Einstellwinkel: 45° 0°

Windgeschwindigkeit: 8,5 m/s 8,5 m/s

Lastwiderstand: 0 Ω -100 Ω 0 Ω -100 Ω

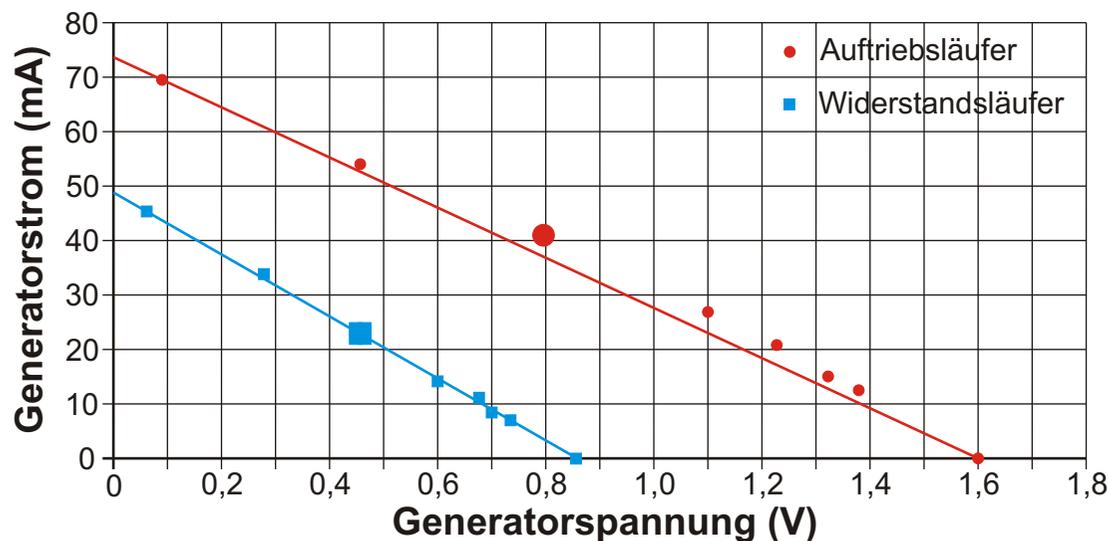
(nach Tabelle) (nach Tabelle)

Auftriebsläufer			
R (Ω)	U (V)	I (mA)	P(mW)
0	0,09	69,5	6,25
10	0,46	54,5	25,07
20	0,79	40,5	31,99
40	1,1	27,1	29,81
60	1,23	20,2	24,85
80	1,33	16,3	21,68
100	1,38	13,5	18,63
Leerlauf	1,60	0	0

Widerstandsläufer			
R (Ω)	U (V)	I (mA)	P(mW)
0	0,06	45,2	2,71
10	0,28	33,5	9,38
20	0,45	23,5	10,57
40	0,60	14,9	8,94
60	0,68	11,0	7,84
80	0,70	8,7	6,09
100	0,73	7,3	5,33
Leerlauf	0,86	0	0

1. Zeichnen Sie Kurven für jeden Windenergieanlagentyp in das Diagramm ein.
2. Kennzeichnen Sie im Diagramm jeweils die Stelle der Kennlinie, in dem die größte Leistung auftritt.

I/U Kennlinie bei konst. Windgeschwindigkeit



weiter auf nächster Seite →

3. Welcher Windenergieanlagentyp liefert die größte Leistung und warum?

Typ: Auftriebsläufer.....

Begründung: Im Gegensatz zum Widerstandsläufer werden beim Auftriebsläufer alle Flügel gleichzeitig angeströmt......

Der Auftriebsläufer erreicht außerdem einen höheren Leistungswert......
.....

4. Während der Messungen hat sich die Drehzahl der Windenergieanlage verändert. Ergänzen Sie Ihre Beobachtung:

Je größer der Lastwiderstand..... , desto höher die Drehzahl. (Wählen Sie je einen der Begriffe: Stromstärke, Lastwiderstand)

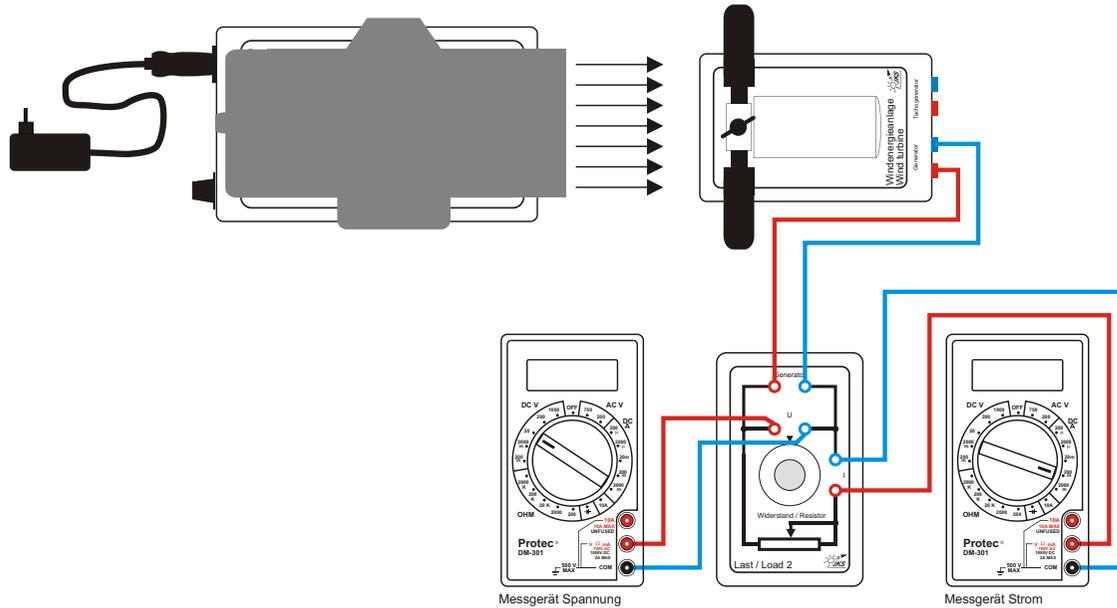
Je kleiner die Stromstärke..... , desto höher die Drehzahl.

5. Vergleichen Sie den Kurvenverlauf des Auftriebsläufers mit der Kennlinie aus Versuch 6. Welchen Unterschied erkennen Sie? Woran könnte das liegen?

Mit zunehmender Stromstärke fällt die Spannung deutlich stärker ab, als in Experiment 6......

Dies liegt daran, dass durch die Belastung die Drehzahl und somit auch die induzierte Spannung sinkt......
.....

Aufbau



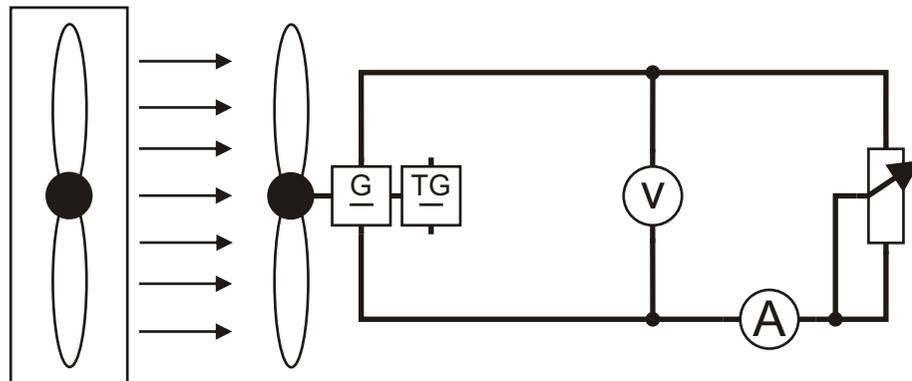
Information

Dieses Experiment nimmt unmittelbar Bezug auf die in Experiment 1 Aufgabe 3 hergeleitete Abhängigkeit der Windleistung von der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. Die Ausgangsleistung einer Windenergieanlage ergibt sich aus der angebotenen Windleistung und dem Gesamtwirkungsgrad der Anlage, d.h. dem Leistungswert des Rotors und dem Wirkungsgrad des Generators. Diese beiden Größen sind von verschiedenen Parametern abhängig und über den Verlauf der Messung nur in grober Näherung als konstant anzusehen. Daher ist auch nur eine annähernde Proportionalität der Ausgangsleistung zu v^3 im Experiment zu erwarten.

Um den Verlauf der Graphen sicherer zeichnen zu können, ist die Messung eines oder mehrerer Zwischenwerte zu empfehlen.

Die überragende Bedeutung der Höhe der Windgeschwindigkeit für den Ertrag der Windenergieanlage wird deutlich, Schwankungen der Windgeschwindigkeit wirken sich stark auf die Qualität und die Verfügbarkeit der Versorgung mit Windstrom aus.

Schaltplan



Information

Die Höhe der Windgeschwindigkeit ist für den Ertrag einer Windenergieanlage von entscheidender Bedeutung. In diesem Experiment soll die Ausgangsleistung einer Windenergieanlage in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit näher untersucht werden.

Aufgabe

Bauen Sie das Experiment entsprechend der oben gezeigten Darstellung auf.

Der Bereichswahlschalter des Multimeters Spannung ist auf die Position **DC V 20** einzustellen, der des Multimeters Strom auf die Position **DCA 200 m**.

Die Windgeschwindigkeit wird variiert, indem der Drehknopf der Windmaschine zwischen 0 und 10 im Abstand von einem Skalenteil eingestellt wird. Die Windgeschwindigkeit für jede Einstellung ergibt sich aus dem Diagramm, welches im Experiment 2 ermittelt wurde.

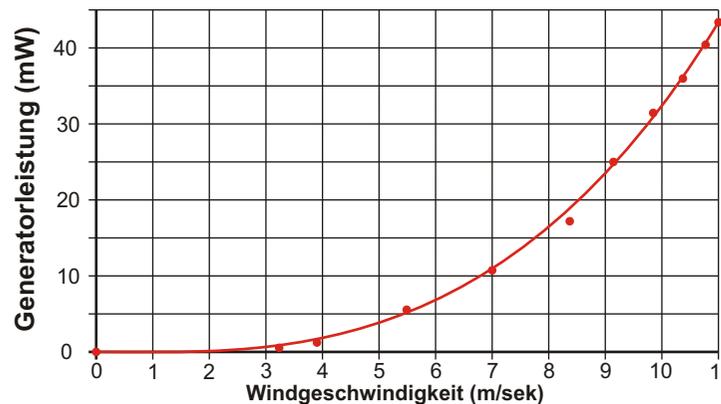
Tragen Sie die jeweils gemessenen Spannungen und Stromstärken in die Messtabelle ein. Berechnen Sie die abgegebenen Leistungen.

Einstellungen:

Windenergieanlagenprinzip: Auftrieb
 Flügelzahl: 3
 Flügelform: eben
 Einstellwinkel: 45°
 Windgeschwindigkeit: 0-10 Skalenteile in einem Skalenteilungsschritt
 Lastwiderstand: 40 Ω

Skalenteilung	Windgeschwindigkeit (m/sek)	Spannung (V)	Strom (mA)	Leistung (mW)
0	0	0	0	0
1	3,2	0,06	1,6	0,10
2	3,9	0,15	4,8	0,72
3	5,5	0,47	11,7	5,50
4	7,0	0,66	16,8	11,10
5	8,3	0,85	21,0	17,80
6	9,1	1,00	25,0	25,00
7	9,8	1,13	28,0	31,64
8	10,4	1,21	30,2	36,54
9	10,8	1,28	32,2	41,22
10	11	1,32	33,1	43,69

Ausgangsleistung/Windgeschwindigkeit



1. Tragen Sie die Messergebnisse in das Diagramm ein.
2. Zeichnen Sie eine Ausgleichskurve für die Messpunkte im Diagramm ein.
3. Die Leistung des anströmenden Windes wächst mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit (P_{wind} ist proportional v^3). Eine Verdoppelung der Windgeschwindigkeit bedeutet deshalb die⁸.....-fache Windleistung.
4. Ergänzen Sie die Tabellen durch Werte aus der Diagrammkurve. Berechnen Sie jeweils das Verhältnis von v_2 / v_1 und P_2 / P_1 und tragen Sie die Werte ebenfalls ein.

v_1 in m/sek	v_2 in m/sek	v_2 / v_1
5	10	2
P_1 in mW	P_2 in mW	P_2 / P_1
4,0	32,5	8,1

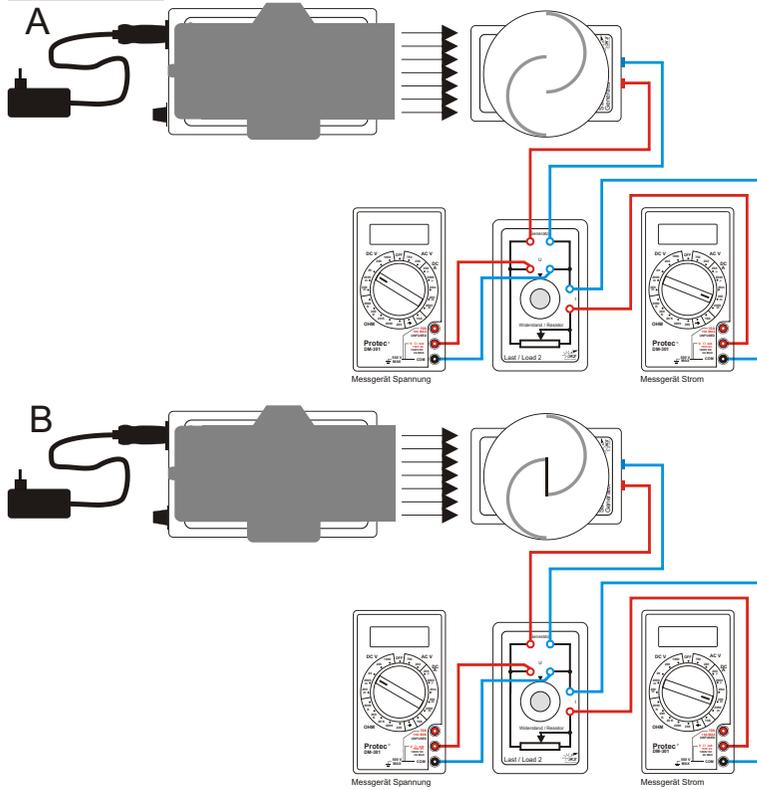
5. Wächst die gemessene Ausgangsleistung der Windenergieanlage auch mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit? Nennen Sie Gründe für die Abweichung:

Die Proportionalität der Leistung gilt nur in etwa, da der Wirkungsgrad der Windenergieanlage z.B. auch vom Anströmwinkel und der Schnelllaufzahl abhängt, die sich innerhalb der Messreihe ändert.

6. Welche Bedeutung besitzen die Höhe der Windgeschwindigkeit und deren Schwankungen für den Ertrag einer Windenergieanlage ?

Der Ertrag einer Windkraftanlage ist annähernd proportional zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. Schwankungen der Windgeschwindigkeit wirken sich deshalb gravierend auf die verfügbare elektrische Leistung der Anlage aus.

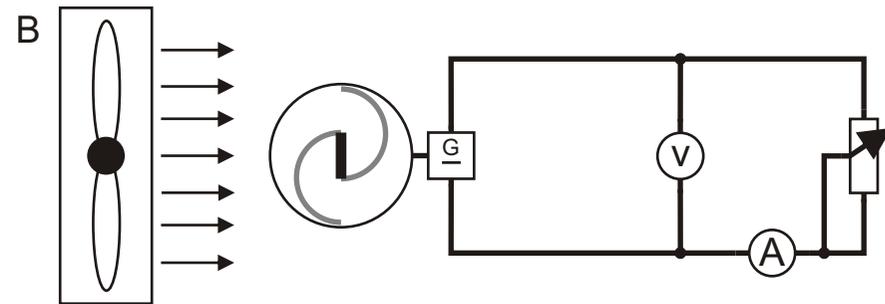
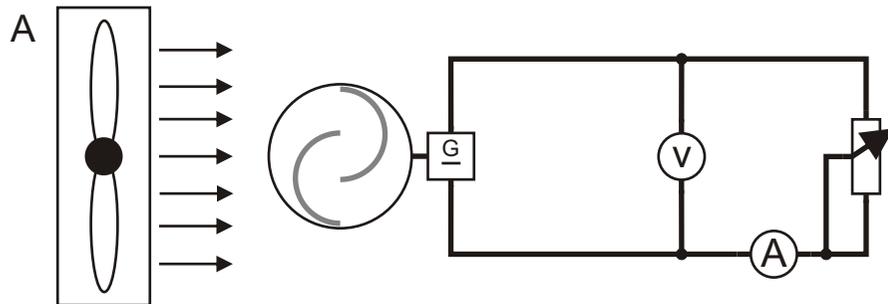
Aufbau



Information

Die beiden Experimente mit dem Savonius-Generator widmen sich dem Aufbau und der Funktion dieses Windenergieanlagentyps.

Schaltplan



Information

Savonius-Generatoren werden sowohl mit als auch ohne Luftspalt zwischen den Halbschalen gebaut. Im folgenden Experiment soll untersucht werden, welchen Einfluss der Luftspalt auf die Leistungsfähigkeit des Generators hat.

Aufgabe

Bauen Sie das Experiment entsprechend der oben gezeigten Darstellung auf. Stellen Sie die größtmögliche Windgeschwindigkeit ein.

Stellen Sie an Last 2 einen Belastungswiderstand von 50Ω ein. Der Bereichswahlschalter des Multimeters Spannung ist auf die Position **DC V 20** einzustellen, der des Multimeters Strom auf die Position **DC A 200 m**.

Messen Sie nun für die gleiche Windgeschwindigkeit und den gleichen Belastungswiderstand die Ausgangsspannung und die Ausgangsstromstärke des Generators bei **A**: offenem und **B**: geschlossenem Luftspalt. Achten Sie beim Schließen des Luftspaltes darauf, dass die Sperrplatte die Nut trifft, die zwischen den Halbschalen angebracht ist. Tragen Sie die Werte in die Tabelle ein und berechnen Sie jeweils die Ausgangsleistung.

Geben Sie dem Savonius-Generator ausreichend Zeit, damit sich stabile Messwerte einstellen.

Einstellungen:

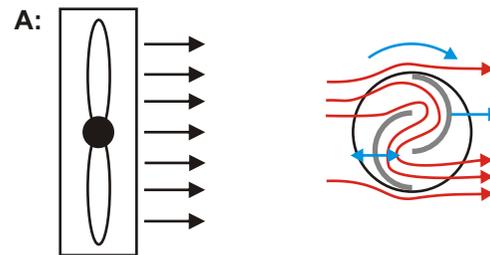
Windgeschwindigkeit: 10 m/s
 Betrieb Savonius-Generator: **A**: offener Luftspalt
 B: geschlossener Luftspalt
 Lastwiderstand: 50 Ω

	Generatorspannung (V)	Generatorstrom (mA)	Generatorleistung (mW)
offener Luftspalt	0,97	19,3	18,72
geschlossener Luftspalt	0,76	15,7	11,93

1. Vergleichen Sie die Ausgangsleistung bei offenem und geschlossenem Luftspalt (gleich, kleiner, grösser) :

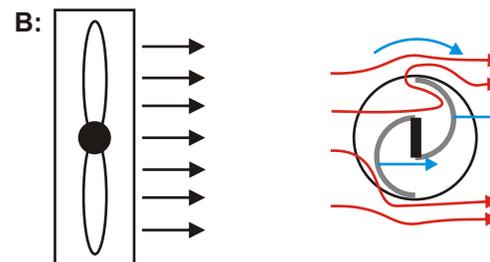
P_{offen} ist.....**größer**.....wie $P_{\text{geschlossen}}$

2. Zeichnen Sie dazu in die beiden Skizzen die Linien für den Luftstrom und die resultierenden Kräfte bei offenem und geschlossenem Luftspalt ein. Erklären Sie dieses Verhalten.



Erklärung:

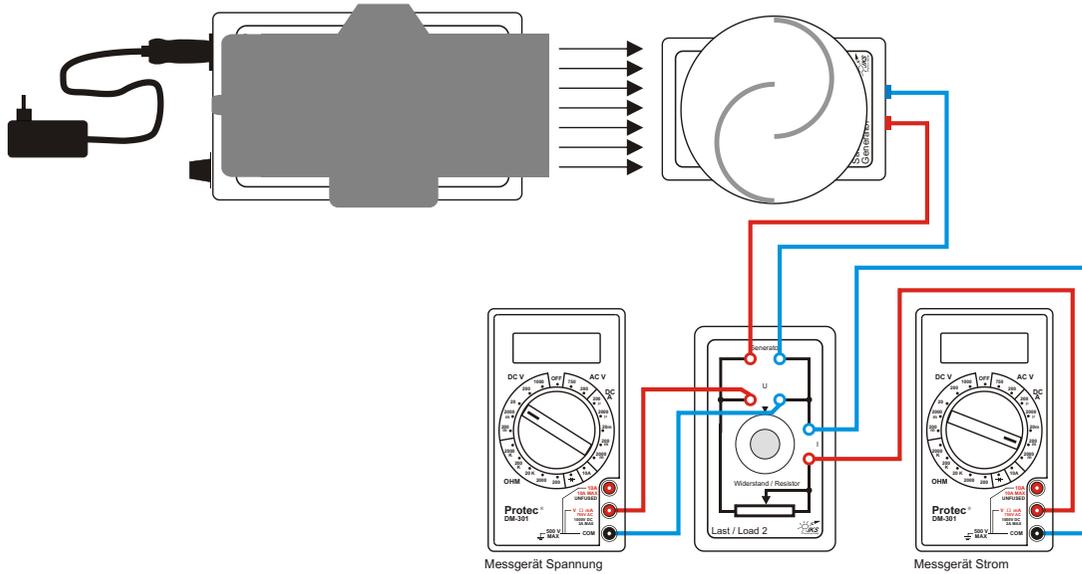
Bei geöffnetem Spalt lenkt die mitläufige Schale den Luftstrom derart um, dass die rückläufige Schale auch von der konkaven Seite angeströmt wird und eine Kraft in Drehrichtung erzeugt.



Erklärung:

Bei geschlossenem Spalt wirkt die rückläufige Schale als Bremse, da sie entgegen der Drehrichtung angeströmt wird. Der Rotor dreht sich, weil die rückläufige Schale einen geringeren Widerstandsbeiwert hat als die mitläufige.

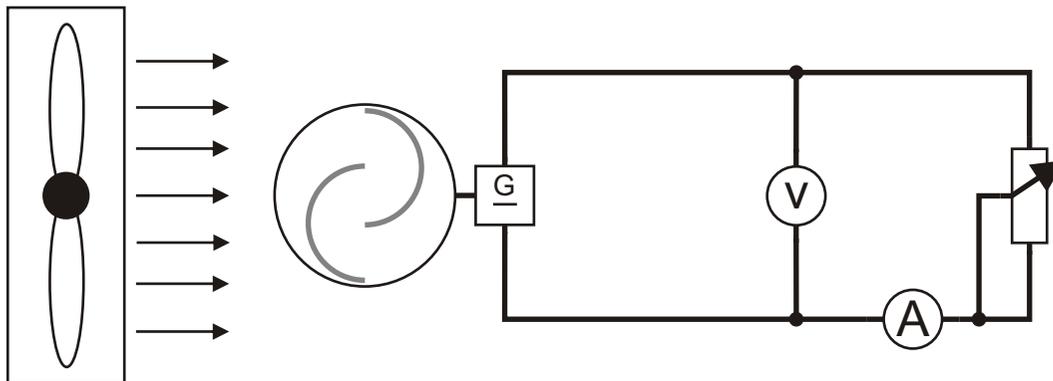
Aufbau



Information

Dieses Experiment ist vergleichbar mit dem Experiment 7, bei dem ähnliche Abhängigkeiten bei Auftriebs- und Widerstandsflüchern untersucht wurden. Auch in diesem Experiment sinkt die Drehzahl mit zunehmender Belastung, und zwar so stark, dass die Spannungsschwankungen des Generators beobachtbar werden. Um in diesen Betriebszuständen einen zutreffenden Messwert fest zu stellen, bestimmt man aus dem kleinsten und größten Messwert einen Mittelwert.

Schaltplan



Information

Wie in Experiment 7 für den Auftriebs- und Widerstandsläufer soll hier das Betriebsverhalten des Savonius-Generators bei konstanter Windgeschwindigkeit und variablem Belastungswiderstand untersucht werden.

Aufgabe

Bauen Sie das Experiment entsprechend der oben gezeigten Darstellung auf.

Der Bereichswahlschalter des Multimeters Spannung ist auf die Position **DC V 20** einzustellen, der des Multimeters Strom auf die Position **DC A 200 m**.

Bitte beachten Sie, dass der Savonius-Generator mit offenem Luftspalt betrieben wird.

Verändern Sie den Belastungswiderstand von 0 Ω bis 100 Ω in 10 Ω Schritten.

Messen Sie jeweils die Ausgangsspannung und die Ausgangsstromstärke und tragen Sie die Werte in die Tabelle ein. Einen zusätzlichen Messpunkt erhält man für Leerlauf (Strom gleich null). Dazu wird das Stromstärkemessgerät aus den Buchsen der Last 2 entfernt. Berechnen Sie anschließend die Leistungen und tragen die Werte ebenfalls in die Tabelle ein.

Geben Sie dem Savonius-Rotor ausreichend Zeit, damit sich stabile Messwerte einstellen.

Einstellungen:

Windgeschwindigkeit: 10 m/s
 Betrieb Savonius-Generator: ohne Sperrplatte (offener Luftspalt)
 Lastwiderstand: 0 Ω - 100 Ω in 10 Ω - Schritten

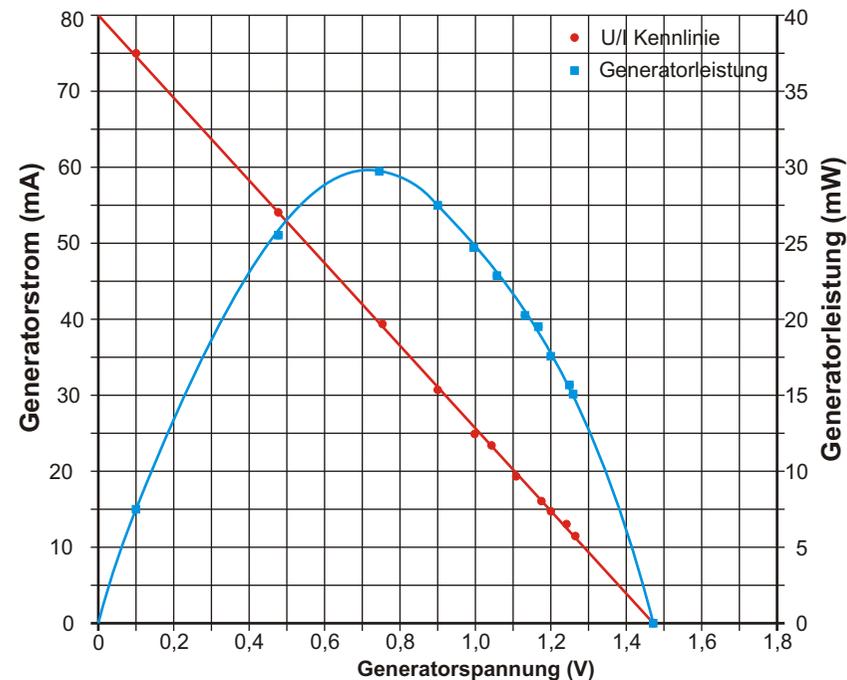
Falls die Diagrammskalierung nicht ausreicht, können Sie das Experiment mit etwas verminderter Windgeschwindigkeit (8 oder 9 m/s) durchführen.

R (Ω)	U (V)	I (mA)	P(mW)
0	0,10	75,1	7,51
10	0,48	53,8	25,82
20	0,75	38,9	29,18
30	0,90	30,5	27,50
40	0,99	24,6	24,35
50	1,06	20,9	22,15
60	1,12	18,3	20,50
70	1,17	16,4	19,19
80	1,20	14,6	17,52
90	1,23	13,3	16,36
100	1,26	12,2	15,37
Leerlauf	1,47	0	0

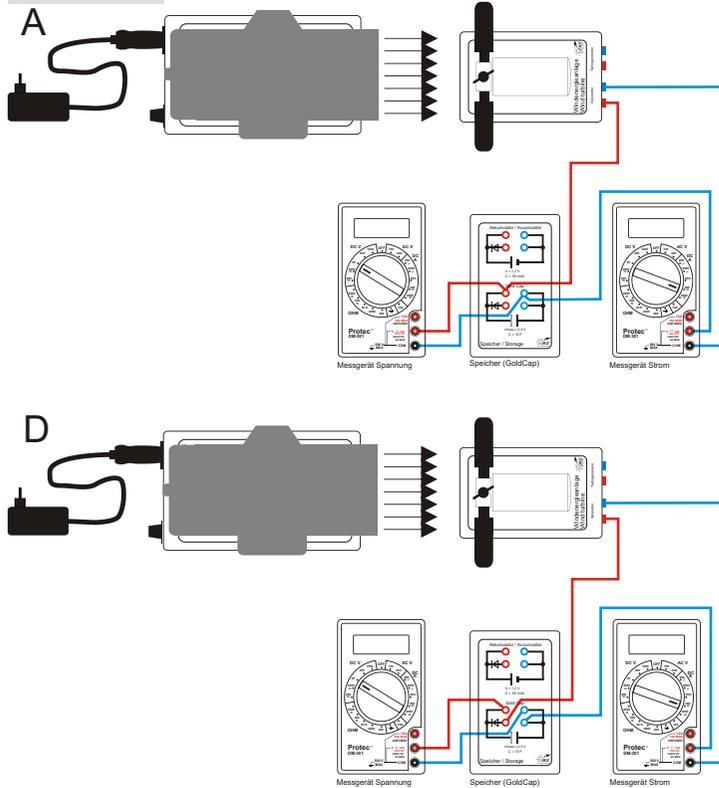
- Übertragen Sie die Messpunkte für U und I in das Diagramm und zeichnen durch die Messpunkte eine Ausgleichskurve.
- Zeichnen Sie in das gleiche Diagramm den Leistungsverlauf in Abhängigkeit von der Spannung ein.
- Welchen Vorteil besitzt der Savonius-Generator im Vergleich zu Widerstands- und Auftriebsläufer, wenn sich die Windrichtung ändert?

Der Savonius-Generator arbeitet unabhängig von der Windrichtung. Widerstands- und Auftriebsläufer müssen der Windrichtung nachgeführt werden.

I/U Kennlinie Savonius bei konst. Drehzahl



Aufbau



Information

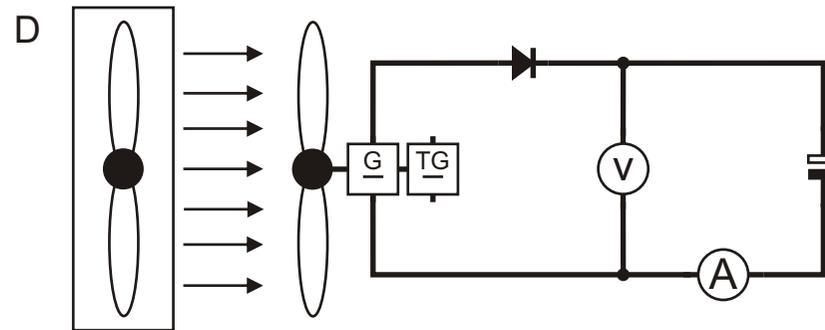
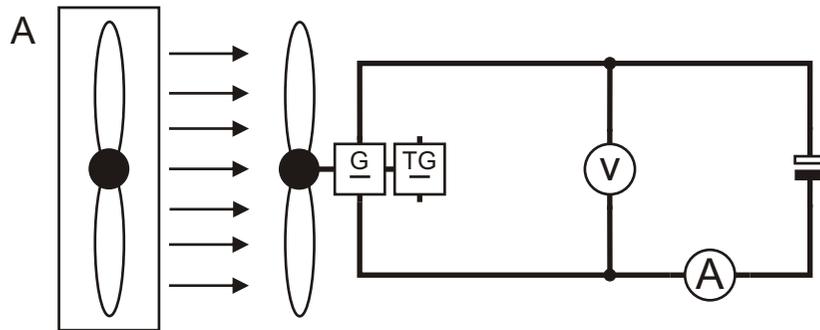
Ein GoldCap-Kondensator ist ein Doppelschichtkondensator mit hoher Kapazität.

Wird der Speicher über die stillstehende Windenergieanlage entladen, fließt ein Strom und die Windenergieanlage arbeitet als Motor.

Wird der Speicher nun über eine Sperrdiode geladen, entsteht ein Spannungsabfall von ca. 0,6 V (bei normalen Siliciumdioden). Um diesen Wert vermindert sich die Ladeendspannung.

Alternativ kann auch der Akkumulator geladen werden. Dies beansprucht jedoch viel mehr Zeit. Je nach Ladezustand sollte vor Versuchsbeginn eine Teilladung bis zu einer Spannung von ca. 1 V mit der Glühlampe als Last erfolgen.

Schaltplan



Information

Wenn eine Windenergieanlage im Inselbetrieb Verbraucher versorgen soll, wird wegen des unbeständigen Windangebotes und des schwankenden Strombedarfs ein Zwischenspeicher für die elektrische Energie benötigt. Im folgenden Experiment wird für diese Aufgabe ein Akkumulator oder für Verbraucher mit sehr geringem Energiebedarf auch ein GoldCap-Kondensator verwendet.

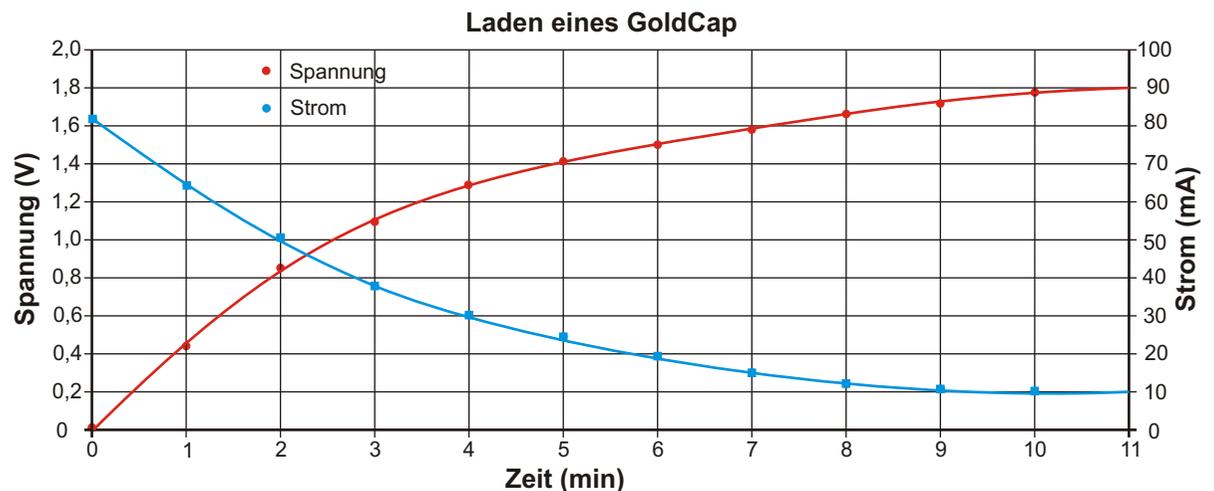
Aufgabe

- A:** Die Windenergieanlage an die beiden oberen Buchsen des GoldCap über ein Multimeter als Strommesser anschließen. Bereichswahlschalter auf Position **DC A 200 m**. Das andere Multimeter als Spannungsmesser an die oberen Kontakte anschließen. Bereichswahlschalter Position **DC V 20**. Windgeschwindigkeit auf 8 m/s einstellen. Sicherstellen, dass der GoldCap entladen ist (mit Glühlampe). Den GoldCap aufladen, bis nur noch ein sehr kleiner Strom (ca. 5-8 mA) fließt. Welche Spannung liegt jetzt am GoldCap?
- B:** Die Windmaschine ausschalten (Windstille). Beobachten Sie den Strommesser, was tritt ein?
- C:** Nun durch zusätzliches Anschließen der Glühlampe als Verbraucher (Last 1) an die oberen Anschlüsse des GoldCap, diesen vollständig entladen (Spannung 0 V) und dann die Glühlampe wieder abklemmen.
- D:** Stecken Sie die Leitungen der Windenergieanlage nun in die beiden unteren Buchsen des GoldCap. (**mit Diode**) Das Voltmeter bleibt an den oberen Buchsen. Den GoldCap aufladen, bis nur noch ein sehr kleiner Strom (ca. 5-8 mA) fließt.
- E:** Wiederholen Sie Experiment B. Beobachten Sie das Amperemeter. Was tritt ein? Welche Spannung liegt jetzt am GoldCap? Welche Aufgabe hat die Diode im Stromkreis?
- F:** GoldCap wieder vollständig entladen (s. C), GoldCap aufladen, die Spannung und den Strom zu den Zeitintervallen in die Tabelle eintragen. Werte anschließend in das Diagramm übertragen und die zusammengehörenden Messpunkte verbinden. Welche Erkenntnisse lassen sich aus dem Diagramm ableiten?

Einstellungen:

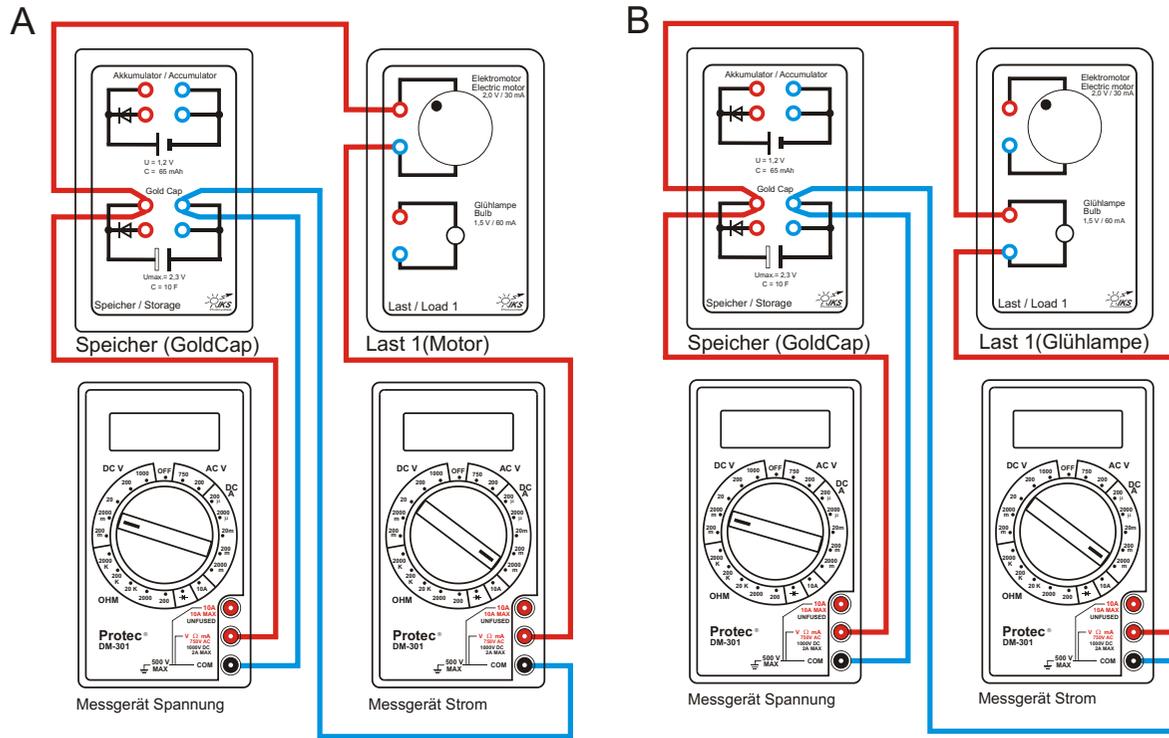
Windenergieanlagenprinzip: Auftrieb
Flügelzahl: 4
Flügelform: gewölbt
Einstellwinkel: 60°
Windgeschwindigkeit: 8 m/s

Zeit (min)	Spannung (V)	Strom (mA)
0	0,04	82
1	0,43	64,2
2	0,86	50,4
3	1,10	38,5
4	1,28	30,5
5	1,41	25,7
6	1,51	19,5
7	1,59	14,8
8	1,65	12,5
9	1,70	10,5
10	1,79	10,1



- A:** ca. 2,38 V.....
- B:** Es fließt ein Rückstrom, die Windenergieanlage entläd den GoldCap......
- E:** Es fließt kein Rückstrom. Die Spannung beträgt ca. 1,8 V. Die Diode hat eine Sperrfunktion.....
- F:** Der anfängliche Strom ist hoch und geht gegen Ladeende gegen Null. Die Spannung ist anfänglich Null und steigt gegen Ladeende nicht weiter an. Die Kurvenverläufe sind nicht linear.

Aufbau



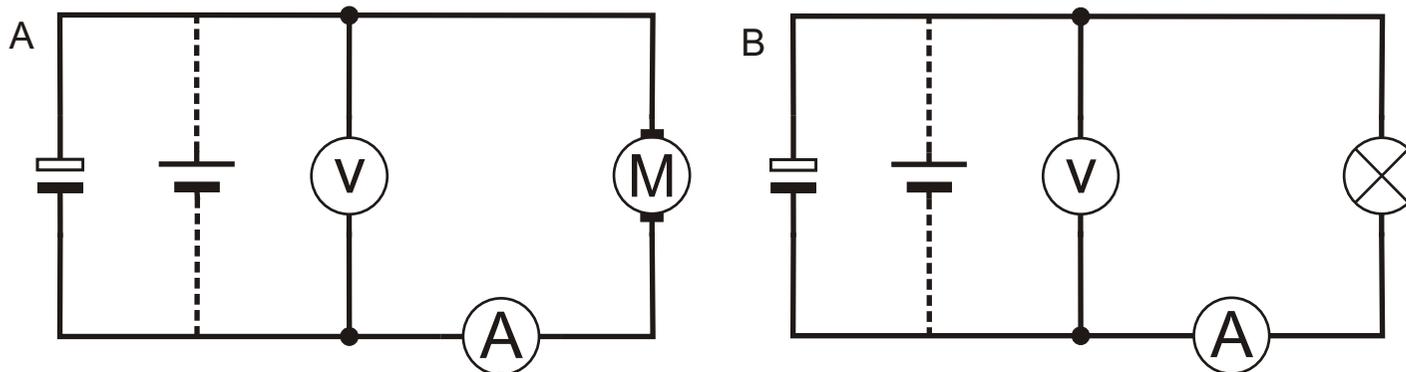
Information

Der GoldCap-Kondensator ist für Lasten mit geringem Energiebedarf geeignet.

Durch die Temperaturänderung des Glühfadens der Glühlampe, während der Entladung, ist der Innenwiderstand nicht linear, die Stromkurve zeigt deshalb einen Bauch.

Alternativ kann auch der Akkumulator entladen werden. Dies beansprucht jedoch viel mehr Zeit. Je nach Ladezustand sollte vor Versuchsbeginn eine Aufladung nach Experiment 11 bis zu einer Spannung von ca. 1,35 bis 1,4 V erfolgen. Den Entladevorgang so lang ausführen, bis die Spannung auf ca. 1 V abgesunken ist.

Schaltplan



Information

Wie verhält sich ein GoldCap-Kondensator bei Belastung mit einem Verbraucher?

Aufgabe

Laden Sie zunächst den GoldCap wie in Experiment 11, Seite 21, beschrieben (über Diode).

A: Bauen Sie dann das Experiment entsprechend der oben links gezeigten Darstellung auf. Den Elektromotor als Last über ein Multimeter als Amperemeter, Bereichswahlschalter auf Position **DC A 2000 m**, an die oberen Buchsen des GoldCap anschließen. **Die-Plus-Verbindung zum Elektromotor noch nicht herstellen.**

Das andere Multimeter als Voltmeter, Bereichswahlschalter Position **DC V 2000 m** wie dargestellt an den GoldCap anschließen.

Den GoldCap mit dem Elektromotor entladen (**Plus-Leitung einstecken**). Beobachten Sie während des Entladevorganges die Spannung und den Strom. Tragen Sie zu den vorgegebenen Zeitintervallen die Werte in die Tabelle 1 ein.

B: Laden Sie erneut den GoldCap wie in Experiment 11, Seite 21, beschrieben (über Diode). Wiederholen Sie die vorigen Anweisungen von Experiment (A:), jedoch verwenden Sie als Last diesmal die Glühlampe nach der obigen rechten Darstellung. Tragen Sie die Werte in Tabelle 2 ein. Werte anschließend in das Diagramm eintragen und die zusammengehörenden Messpunkte verbinden.

C: Welche Erkenntnisse lassen sich aus den Diagrammen ableiten?

D: Für welche Anwendung ist der untersuchte Speicher geeignet?

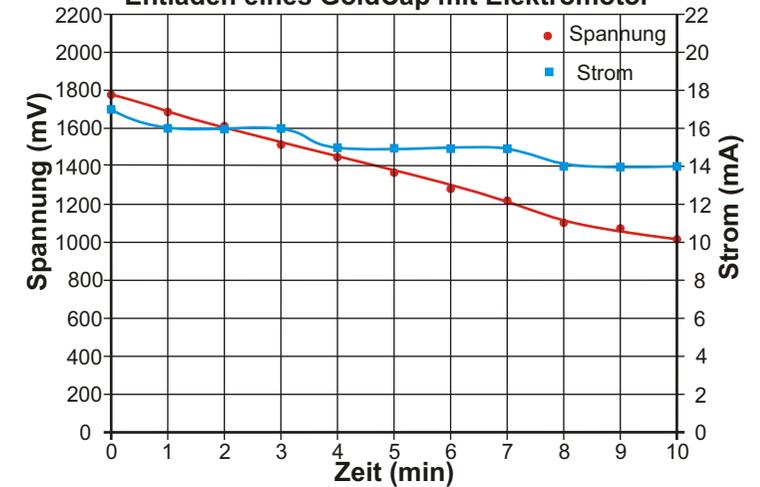
Tabelle 1: Elektromotor als Last

Zeit (min)	Spannung (mV)	Strom (mA)
0	1791	17
1	1694	16
2	1610	16
3	1527	16
4	1448	15
5	1371	15
6	1295	15
7	1220	15
8	1147	14
9	1075	14
10	1002	14

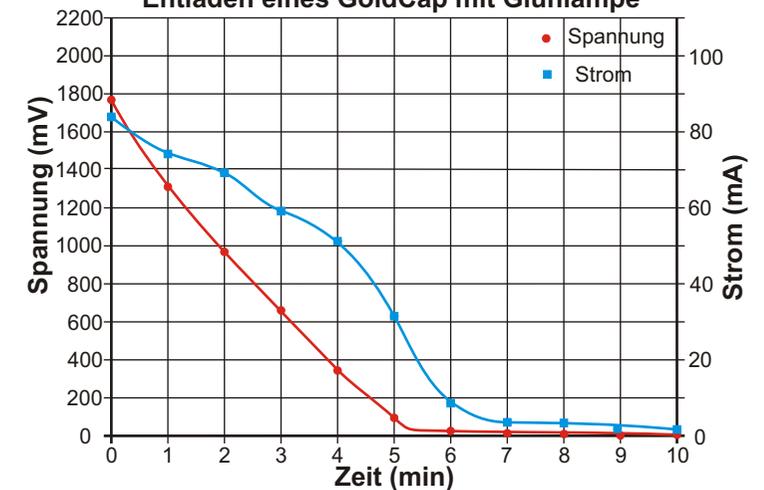
Tabelle 2: Glühlampe als Last

Zeit (min)	Spannung (mV)	Strom (mA)
0	1791	84
1	1360	74
2	986	69
3	649	59
4	348	51
5	99	31
6	21	8
7	9	3
8	6	3
9	5	2
10	4	2

Entladen eines GoldCap mit Elektromotor



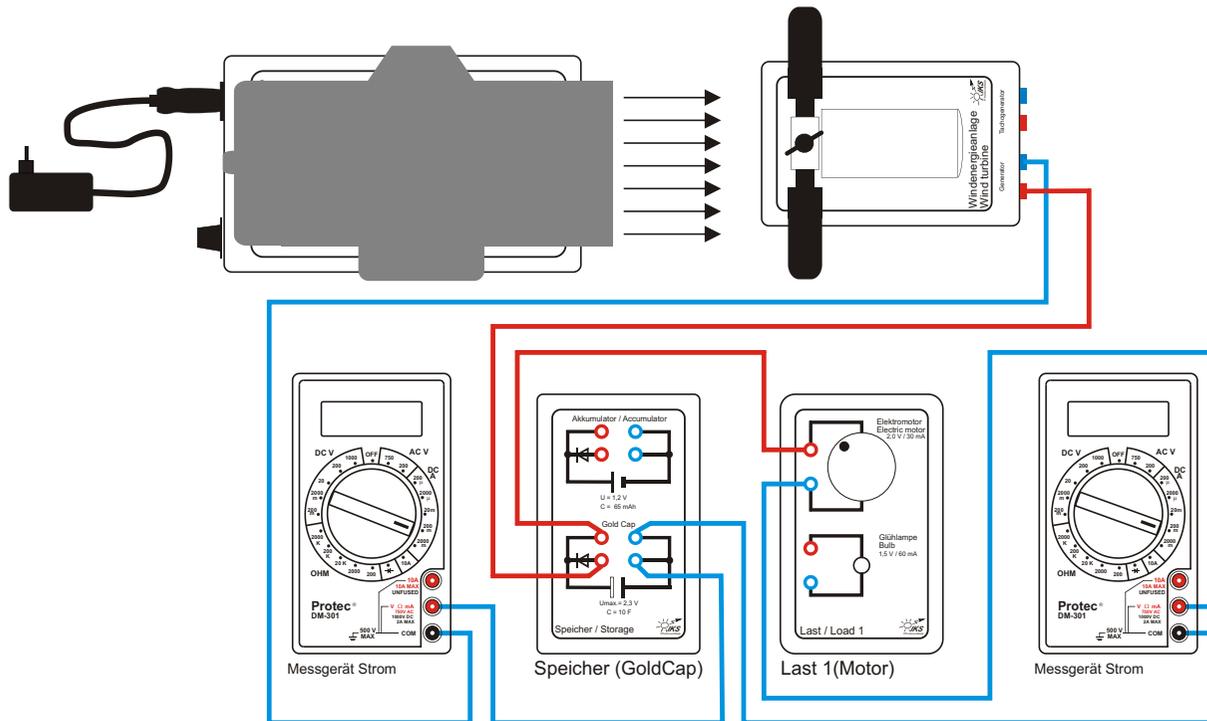
Entladen eines GoldCap mit Glühlampe



C: *Bei Verwendung des Motors als Last sinkt die Spannung allmählich, der Strom bleibt fast konstant. Über den Messzeitraum lässt sich der Motor betreiben. Bei Verwendung der Glühlampe als Last sinkt die Spannung schnell ab, der Strom sinkt bis auf den Wert 0. Der Betrieb der Glühlampe ist nur über das erste 1/5 des Messzeitraumes möglich.*

D: *Der GoldCap ist für Lasten mit geringer Stromaufnahme geeignet.*

Aufbau



Information

An diesen Experimenten lässt sich der Einfluss der einzelnen Komponenten und der Einfluss unterschiedlicher Betriebsbedingungen auf die Funktion eines Inselnetzes veranschaulichen.

Wie müssen welche Komponenten bei bestimmten Betriebsbedingungen ausgelegt werden, damit eine optimale Funktion des Inselnetzes gegeben ist?

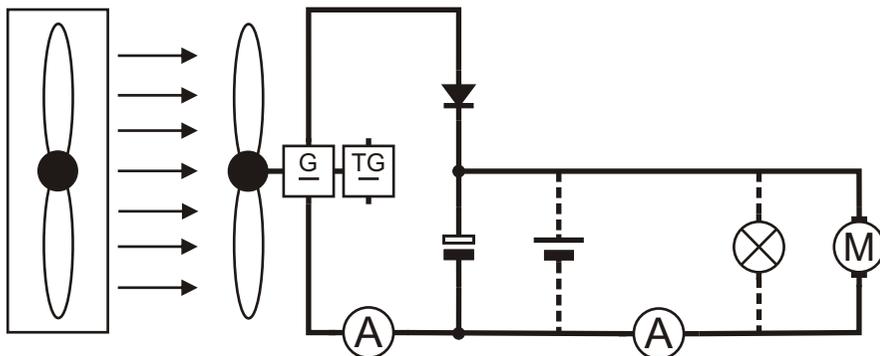
Betriebsbedingungen:

- Einschaltdauer / Einschalthäufigkeit der Last
- Einschaltzeitpunkt
- Windangebot

Eigenschaften der Komponenten:

- Energieinhalt des Speichers
- Leistung der Windenergieanlage
- Aufnahmeleistung der Last

Schaltplan



Information

Wird eine Windenergieanlage mit einem Energiespeicher und einem Verbraucher zusammengeschaltet, hat man ein Inselnetz in der einfachsten Form.

Je nach Windstärke, Ladezustand des Speichers und Betrieb des Verbrauchers ergeben sich unterschiedliche Stromflüsse und Stromstärken in dem System.

Aufgabe

Das auf der obigen Seite abgebildete Schema und der Schaltplan zeigen ein solches Inselnetz.

Führen Sie folgende Experimente durch und zeichnen Sie in die nebenstehenden Schaltpläne die Stromflussrichtungen mit Pfeilen ein (Einstellungen wie Experiment 11):

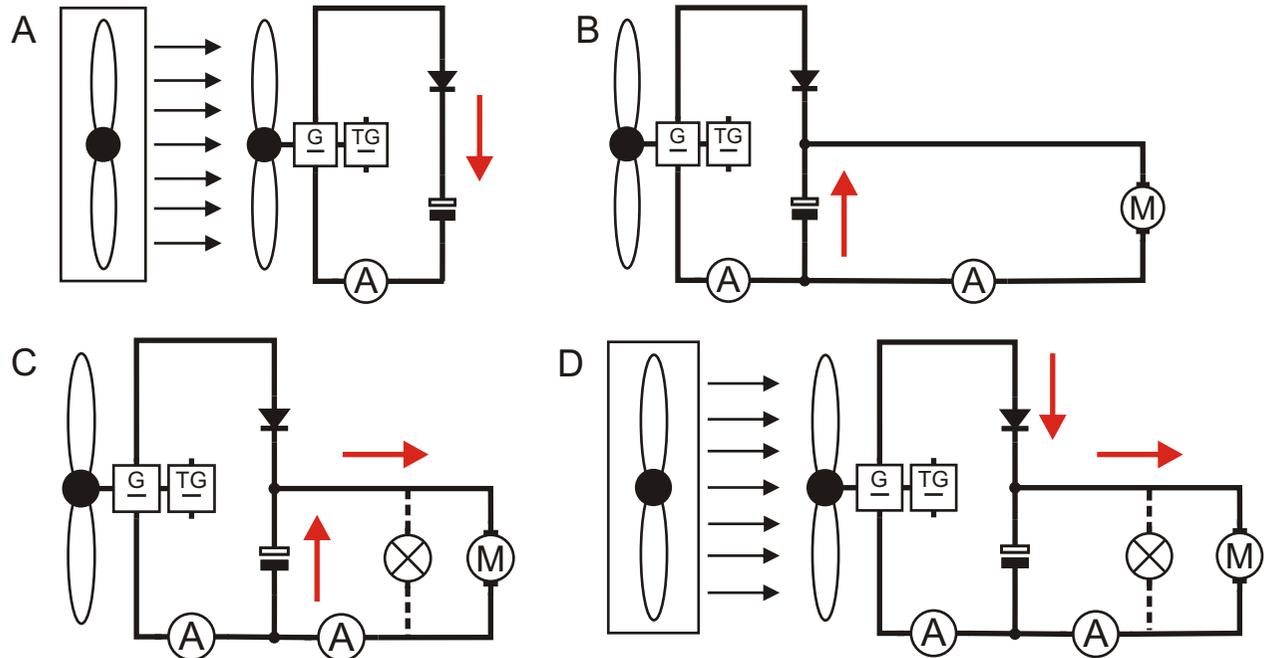
A: Die Windenergieanlage wird über die beiden unteren Buchsen an den GoldCap über ein Multimeter als Amperemeter, Bereichswahlschalter auf Position **DC A 200 m**, in den Stromkreis angeschlossen. Einstellungen des Windenergieanlage siehe Experiment 11. GoldCap aufladen, bis kein Strom mehr fließt.

B: Bauen Sie das Experiment entsprechend dem Schaltplan **B** auf. Den Elektromotor mit dem zweiten Multimeter als Amperemeter, Bereichswahlschalter Position **DC A 200 m**, im Stromkreis an die oberen Buchsen des GoldCap anschließen. Die Windmaschine ist ausgeschaltet (Windstille). Den Elektromotor ca. 3 Minuten laufen lassen. Was ist zu beobachten?

C: Schalten Sie nun die Glühlampe als zusätzliche Last parallel zum Elektromotor, bis der GoldCap vollkommen entladen ist (Schaltplan **C**). Beobachten Sie die Amperemeter. Was geschieht ?

D: Schalten Sie nun die Windmaschine wieder ein, (Schaltplan **D**). Beobachten Sie die Amperemeter. Was geschieht?

E: Welche Bedingungen müssen die einzelnen Komponenten für die optimale Funktion eines Inselnetzes erfüllen?

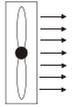


B: Der Laststrom bleibt annähernd konstant. Das Betriebsverhalten des Motors ändert sich kaum. Der Ladestrom ist Null.

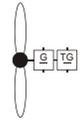
C: Der Entladestrom erhöht sich stark und sinkt dann schnell ab. Die Glühlampe erlischt nach kurzer Zeit, der Motor dreht sich immer langsamer bis zum Stillstand.

D: Der Ladestrom nimmt zunächst den Maximalwert an. Der Laststromwert erhöht sich langsam, der Motor dreht sich immer schneller und die Glühlampe fängt an zu leuchten. Ladestrom und Laststrom nehmen nach einigen Minuten die gleichen Werte an.

E: Diskussion. Stichpunkte siehe Text oben im Feld: Information.



Gebläse



Windenergieanlage, bestehend aus
Flügeln, Generator und Tachogenerator



GoldCap Kondensator



Akkumulator



Voltmeter



Amperemeter



Regelbarer Widerstand



Glühlampe



Elektromotor



Diode



Anschlussbuchse

