

# **Nutzung von Kleinwindenergieanlagen an Bildungseinrichtungen**

- Machbarkeitsstudie -

Reiner Lemoine Institut gGmbH  
Ostendstr. 25  
12459 Berlin



**Durchgeführt von** Reiner Lemoine Institut gGmbH  
Ostendstr. 25  
12459 Berlin

**Projektverantwortlicher** Berit Müller  
Email: [berit.mueller@rl-insitut.de](mailto:berit.mueller@rl-insitut.de)

**Stand** 25.05.2016

Im Auftrag des Unabhängigen Instituts für Umweltfragen UfU e.V., Berlin



Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des Projektes „EE-Schule“ - Evaluation solarer Schulprojekte und Machbarkeitsstudie Windenergie an Bildungseinrichtungen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	4
Tabellenverzeichnis .....	4
1. Motivation .....	5
2. Kleinwindenergieanlagen für den schulischen Unterricht .....	6
2.1 Auswahlkriterien .....	6
2.2 Beispielanlagen .....	9
3. Grundlegende Erkenntnisse aus laufenden Windprojekten .....	12
3.1 Umfang der Befragung .....	12
3.2 Zusammenfassung der Erfahrungen .....	12
3.3 Ablauf eines KWEA-Projektes .....	15
4. Kostenzusammensetzung bei der Realisierung von Kleinwindprojekten .....	16
5. Rechtliche Rahmenbedingungen für KWEA in Deutschland .....	18
5.1 Relevante Gesetzestexte .....	18
5.2 Kurze Erklärung .....	19
6. Unterrichtseinheiten .....	21
6.1 Allgemein .....	21
6.2 Kennenlernen von Kleinwindenergieanlagen: Definition und Varianten .....	21
6.3 Schwingungsmessung an Kleinwindenergieanlagen .....	23
6.4 Schallmessungen an KWEA .....	27
6.5 Energieerzeugung der KWEA .....	29
6.6 Windmessung/-beobachtung .....	31
6.7 Schattenwurf .....	33
6.8 Planspiel Windkraftkonflikt .....	34
6.9 Beteiligung beim Bau und Betrieb von Windkraftanlagen .....	36
7. Praktikumsbeschreibung .....	39
7.1 Allgemein .....	39
7.2 Arbeitsblätter .....	39
Literaturverzeichnis .....	59

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Veranschaulichung einer vertikalachsigen (links [3]) und horizontachsigen (rechts [4]) KWEA.....	7
Abbildung 2: Horizontalchser der Firma Ampair [5].....	9
Abbildung 3: JPT-100 im Anwendungsbeispiel als Batterielader, zur Versorgung von elektrischen Verbrauchern [7].....	10
Abbildung 4: VK 50 Amperius [8].....	11
Abbildung 5: Schematischer Ablauf eines KWEA-Projektes (für Vollständigkeit wird nicht garantiert).....	15
Abbildung 6: Exemplarische Kostenverteilung für die Anschaffung und Installation einer Kleinwindenergieanlage.....	17
Abbildung 7: Beispielhafte Strömungsvisualisierung [Quelle: HTW Berlin].....	41
Abbildung 8: Beispiel für Visualisierung der Messsektoren an Standort für Leistungskurvenvermessung [Quelle: RLI].....	44
Abbildung 9: Beispiel für Prinzipskizze des Messsystemaufbaus.....	46
Abbildung 10: Beispiel für Prinzipskizze des Messsystemaufbaus.....	48
Abbildung 11: Beispielhafte Darstellung der relativen Windgeschwindigkeitsverteilung [Quelle: <a href="http://www.grund-wissen.de/">http://www.grund-wissen.de/</a> ; Stand: 07.12.2015].....	57

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Pro und Contra von horizontalen und vertikalen KWEA bei der Einbindung in den Unterricht.....	7
Tabelle 2: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile von vertikalen und horizontalen KWEA [2] .8	8
Tabelle 3: Technische Angaben zur Ampair 100 x 0,9 [6].....	9
Tabelle 4: Technische Angaben zur JPT-100 [7].....	10
Tabelle 5: Technische Angaben VK 50 – Amperius [9].....	11
Tabelle 6: Immissionsrichtwerte.....	27

## 1. Motivation

Im Rahmen des Projekts „EE-Schulen - Evaluation solarer Schulprojekte und Machbarkeitsstudie Windenergie an Bildungseinrichtungen“, das vom Unabhängigen Institut für Umweltfragen durchgeführt wird, werden Schulen unterstützt, ihre Kleinwindenergieanlage (KWEA) in der Sichtbarmachung und pädagogischen Nutzung zu optimieren.

Die vorliegende Machbarkeitsstudie soll interessierten Schulen und Bildungseinrichtungen als Leitfaden dienen, eine bereits vorhandene KWEA in den Unterricht einzubinden oder auch als Handlungsempfehlung unterstützen, wenn eine Kleinwindenergieanlage auf dem eigenen Gelände errichtet werden soll. Die Machbarkeitsstudie zeigt die Möglichkeiten auf, eine KWEA nicht nur hinsichtlich technischer Hintergründe sondern auch im Kontext gesellschaftlich relevanter Themen im Unterricht zu behandeln. Sie soll aber auch einen realistischen Blick auf den Aufwand ermöglichen, den die Installation einer Kleinwindanlage an einer Schule mit sich bringt.

Es werden technische, wirtschaftliche und genehmigungsrechtliche Aspekte zusammengefasst. Diese sind Ergebnis einer umfangreichen Recherche [1] und ergeben sich aus der Kooperation mit zwei Oberstufenzentren, einem Freizeitzentrum als außerschulischem Lernort in Berlin und einem Gymnasium in Sachsen sowie weiteren telefonisch durchgeführten Interviews mit Schulen, die bereits eine eigene Anlage besitzen.

## 2. Kleinwindenergieanlagen für den schulischen Unterricht

### 2.1 Auswahlkriterien

Für die Einbindung einer Kleinwindenergieanlage in den pädagogischen Kontext müssen verschiedene Aspekte bedacht werden:

- Finanzieller Aufwand,
- Geeigneter Standort auf dem Gelände,
- Gesicherte Betreuung bzw. Zuständigkeit, d.h. ein vorhandenes Konzept zur Einbindung in den pädagogischen Kontext,
- Erreichbarkeit der Kleinwindenergieanlage für die Einbindung in den Unterricht und
- Einbettung der Kleinwindenergieanlage in eine Messumgebung.

Das Ergebnis von Recherchen und dem Austausch mit verantwortlichen LehrerInnen für ihre KWEA an verschiedenen Schulen hat ergeben, dass vor allem KWEA im unteren Leistungsbe-  
reich für den schulischen Kontext geeignet sind.

Bei der Auswahl der richtigen Anlage für den Unterricht sind weiterhin folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Gute Veranschaulichung des grundlegenden Aufbaus einer Windenergieanlage
- Ausführliche Dokumentation der Technik und Bedienung sowohl der KWEA als auch des Wechselrichters (sofern vorhanden) seitens des Herstellers
- KWEA in Kombination mit PV zur Veranschaulichung der Synergie
- KWEA mit wenigen 100 W zur direkten Speisung von kleineren Verbrauchern wie Lampen, Leuchten etc.

und weitere Anforderungen, die sich aus der Individualität der LehrerInnen bzw. der Schule ergeben.

Bei der Wahl stellt sich die Frage, ob Vertikal- oder Horizontalachsenanlagen ggf. besser geeignet sind. Diese Frage kann nicht eindeutig beantwortet werden, da es von den Vorstellungen/ dem Konzept der verantwortlichen LehrerInnen abhängt, welche technischen Aspekte damit veranschaulicht werden sollen. Einen groben Leitfaden soll aber die Tabelle 1 bieten.

Tabelle 1: Pro und Contra von horizontalen und vertikalen KWEA bei der Einbindung in den Unterricht

	Horizontale KWEA	Vertikale KWEA
<b>Repräsentanz der Windenergie</b>	- Hoher Wiedererkennungswert, allein schon mit einem dreiblättrigen Rotor	- Wird in der Öffentlichkeit gelegentlich als Kunst verstanden
<b>Bauliche Struktur</b>	- Beide Varianten verfügen über Rotor, Generator, Sicherungssysteme, Turm/Mast, Fundament/Anbindung - KWEA reagieren aufgrund ihrer geringen Trägheit sehr gut auf Windgeschwindigkeitsänderungen	
<b>Vergleichbarkeit zur WEA</b>	- Selten aktive Regelungssysteme in Verwendung: passive Windnachführung, passive Rotorblattverstellung → geringere Komplexität	- Kein Windrichtungsnachführung, Einfluss von Turbulenzen und Schräganströmung nicht vergleichbar mit WEA
<b>Eigenheiten</b>	- Teils erhöhte Geräuschemissionen - Unruhiges Betriebsverhalten durch passive Windrichtungsnachführung	- Teils erhöhte Schwingungsprobleme - Optik, - Energieerzeugung gering - Kommt mit turbulenten Windverhältnissen klar

### KWEA mit vertikaler Rotorachsausrichtung

**Vorteile:** KWEA mit vertikal ausgerichteter Rotorachse sind aufgrund ihrer Robustheit gegenüber hohen Turbulenzen (Windrichtungsänderungen) besonders für dicht besiedelte Gebiete geeignet, in denen nur selten von einer gleichförmigen Anströmung auszugehen ist. Anlagen dieses Bautyps erreichen meist nur geringe Blattspitzengeschwindigkeiten, wodurch die Schallemissionen gering bleiben. Vertikale KWEA erfordern keine Windnachführung, sodass die direkte Nutzung der Energie auch bei schnellen und häufigen Wechseln der Anströmungsrichtung und Geschwindigkeit möglich ist.

**Nachteile:** Sie sind naturgemäß schwerer ausgeführt als Horizontalachser der gleichen Leistungsklasse, was i.d.R. mit höheren Preisen verbunden ist. Energetisch gesehen sind sie ineffizienter in der Umwandlung von kinetischer in elektrische Energie als Horizontalachser bei gleicher überstrichener Rotorfläche [2]

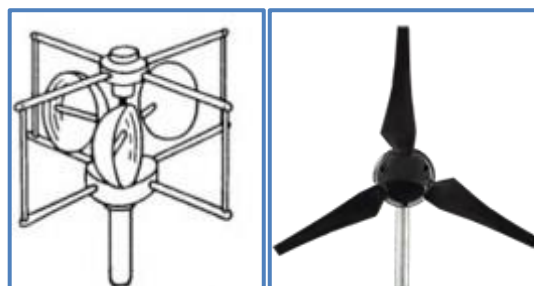


Abbildung 1: Veranschaulichung einer vertikalachsigen (links [3]) und horizontachsigen (rechts [4]) KWEA

### KWEA mit horizontaler Rotorachsausrichtung

**Vorteile:** Sie stellen den Großteil der am Markt befindlichen KWEA dar. Meistens verwenden die Hersteller (wie bei großen WEA) 3 Rotorblätter. Es gibt aber auch Bauformen mit zwei, vier oder fünf Rotorblättern. Sie haben eine kompakte Bauweise und sind effizienter als Vertikalachser. Außerdem ist das Betriebsverhalten der Anlagen deutlicher ruhiger, als das der vertikalen KWEA, da weniger strömungstechnische Störungen induziert werden.

**Nachteile:** Sie benötigen eine **Windnachführung** und reagieren, wenn passiv geführt z.B. mit Windfahne, empfindlich auf schnell wechselnde Windrichtungen. Dadurch werden zusätzliche Schwingungen in die Tragstruktur eingeleitet. Dieser Effekt wird in dicht besiedeltem Gebiet mit hoher Umgebungsbebauung bzw. anderen Hindernissen verstärkt, weshalb horizontale KWEA im Stadtgebiet eher ungeeignet sind. Ihre recht hohen Schallemissionswerte überschreiten überdies oft die geltenden Grenzwerte (nach TA Lärm) und erschweren aufgrund genehmigungsrechtlicher Belange somit zusätzlich den Einsatz im bewohnten Gebiet [2].

Tabelle 2: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile von vertikalen und horizontalen KWEA [2]

Eigenschaften	Vertikale KWEA	Horizontale KWEA
<b>Effizienz</b>	mäßig	hoch
<b>Windnachführung</b>	nicht notwendig	verschiedene Konzepte
<b>Toleranz/Schräganströmung</b>	hoch	niedrig
<b>Schallemissionen</b>	gering	meist höher
<b>Gewicht</b>	vergleichsweise hoch	vergleichsweise niedrig
<b>Kosten</b>	vergleichsweise hoch	vergleichsweise niedrig

Im Folgenden werden einige KWEA vorgestellt, die aufgrund ihrer Leistungsklasse und der vergleichsweise geringen Investitionskosten für die Aufstellung an Schulen geeignet sind. Die Erfahrungen der befragten LehrerInnen haben gezeigt, dass kleine horizontale KWEA priorisiert werden sollten, da diese:

- aufgrund ihrer Größe vergleichsweise geringen Genehmigungsaufwand erforderten,
- ihr Betrieb sich als zuverlässig herausgestellt hat und
- der Wiedererkennungswert für die Schüler höher ist.

Nichtsdestotrotz wird auch eine vertikale KWEA aufgeführt, um einen allgemeinen Überblick zu geben.



## 2.2 Beispielanlagen

Im Folgenden werden einige Kleinwindenergieanlagen vorgestellt, die für den Einsatz an Schulen in Frage kommen. Sie zeichnen sich durch kleine Rotoren, geringe Nennleistung und geringe Nabenhöhen aus. Dies hat den Vorteil eines reduzierten Genehmigungsprozesses sowie einer vergleichsweise einfachen Handhabung während des Betriebs. Weitere Anlagen sind entsprechenden Marktübersichten und Internetseiten zu entnehmen:

- Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers vom WINEUR-Projekt
- Catalogue of Small Wind Turbines des Nordic Folkecenter for Renewable Energy
- BWE-Marktübersicht spezial Kleinwindenergieanlagen vom Bundesverband WindEnergie e.V.
- [www.kleinwindanlagen.de](http://www.kleinwindanlagen.de)

### 2.2.1 Ampair 100 x 0,9



Abbildung 2: Horizontalachser der Firma Ampair [5]

Die Anlage ist vom Hersteller Ampair aus Großbritannien. Hierbei handelt es sich um einen **Luvläufer** mit Windfahne. Der Rotor befindet sich demnach vor dem Turm. Die Windnachführung erfolgt passiv mit einer Windfahne (siehe Abbildung 2). Die Anlage verfügt über einen Permanentmagnetgenerator, der bei Kleinwindenergieanlagen am häufigsten verwendet wird. Des Weiteren verfügt die Anlage aus Sicherheitsgründen über einen elektrischen Überdrehzahlenschutz, d.h. die Anlage wird bei zu hohen Drehzahlen gedrosselt. Die KWEA wird häufig mit einem PV-Modul kombiniert und wird z.B. auf Yachten oder in anderen Off-Grid-Bereichen angewendet.

Tabelle 3: Technische Angaben zur Ampair 100 x 0,9 [6]

Kenngrößen	
<b>Nennleistung</b>	100 W
<b>Rotordurchmesser</b>	0,93 m
<b>Blattanzahl</b>	6
<b>Einschaltwindgeschwindigkeit</b>	3,5 m/s
<b>Nennwindgeschwindigkeit</b>	15 m/s
<b>Nabenhöhe</b>	12,5 m
<b>Überlebenswindgeschwindigkeit</b>	> 60 m/s
<b>Preis</b>	777 €

### 2.2.2 JetPro

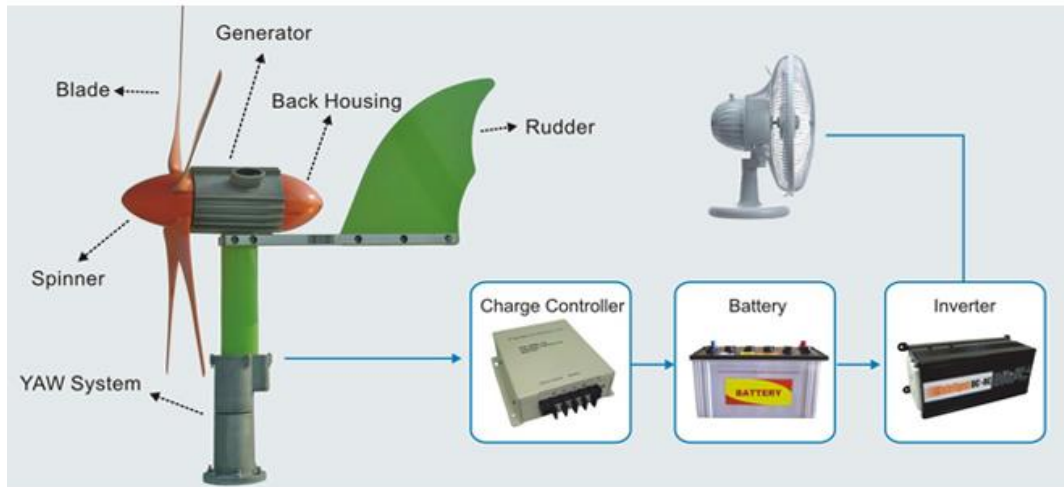


Abbildung 3: JPT-100 im Anwendungsbeispiel als Batterielader, zur Versorgung von elektrischen Verbrauchern [7]

Die Anlage stammt vom Hersteller **Jetpro Technology** aus Taiwan. Bei der JPT-100 handelt es sich um die KWEA, die auf dem Dach des Brandis-Gymnasiums in Sachsen (Kooperationsschule im Projekt) angebracht wurde (vgl. Abbildung 3)

Die Anlage verfügt ebenfalls über einen Permanentmagnetgenerator und kann, wie es in Brandis auch der Fall ist, mit einem PV-Modul kombiniert und als Hybridanlage genutzt werden. Zusätzlich wird eine Batterie mit entsprechender Laderegulung hinzugefügt, um die z.B. tagsüber gewonnene elektrische Energie abends oder nachts für Beleuchtungszwecke zu nutzen.

Tabelle 4: Technische Angaben zur JPT-100 [7]

Kenngrößen	
<b>Nennleistung</b>	100 W
<b>Rotordurchmesser</b>	0,68 m
<b>Blattanzahl</b>	5
<b>Einschaltwindgeschwindigkeit</b>	3 m/s
<b>Nennwindgeschwindigkeit</b>	12 m/s
<b>Nabenhöhe</b>	Variabel
<b>Abschaltgeschwindigkeit</b>	20 m/s
<b>Preis (in Kombination mit 100 W PV, siehe Abbildung 3 [Interview mit John Deere Vertriebler])</b>	2.800,- €

**2.2.3 VK 50 – Amperius**


Abbildung 4: VK 50 Amperius [8]

Die Anlage ist vom **Hersteller KD Stahl- und Maschinenbau GmbH** aus Deutschland. Dessen Sortiment beinhaltet Amperius Anlagen mit vertikaler Rotorachsausrichtung verschiedener Größen (vgl. Abbildung 4). Sie verfügen über integrierte Sicherheitscontroller mit Drehzahlüberwachung. Eine selbstständige Leistungsbegrenzung bei Starkwind fungiert als Schutzsystem. Die KWEA sind mit Permanentmagnetgeneratoren ausgestattet und haben Nennleistungen von 200 W bis 5 kW [9]

Tabelle 5: Technische Angaben VK 50 – Amperius [9]

Kenngößen	
<b>Nennleistung</b>	860 W
<b>Rotordurchmesser</b>	1,90 m
<b>Blattanzahl</b>	3
<b>Einschaltwindgeschwindigkeit</b>	2,5 m/s
<b>Max. Leistung</b>	1100 Watt bei 13 m/s
<b>Masthöhe</b>	9 m/ 18 m
<b>Abschaltgeschwindigkeit</b>	16 m/s
<b>Preis (für Bruttokunden)</b>	4.150,- €

### 3. Grundlegende Erkenntnisse aus laufenden Windprojekten

#### 3.1 Umfang der Befragung

Im Rahmen des Projektes „EE-Schulen“ wurden Interviews mit Schulen mit bereits installierten KWEA durchgeführt, um deren Erfahrungen für weitere Projekte nutzen zu können sowie um deren Rahmenbedingungen, Wünsche und Vorbehalte für zukünftige Projekte mit Erneuerbaren Energien genauer zu beleuchten. Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte zusammengefasst.

Insgesamt wurden 11 Interviews geführt, 7 davon telefonisch und 4 im Rahmen von Vor-Ort-Besuchen.

#### 3.2 Zusammenfassung der Erfahrungen

##### 3.2.1 Impulse

- Ideengeber für Kleinwindenergieanlagen sind i.d.R. interessierte LehrerInnen mit thematischem Bezug, z.B. Physik, allgemeine Naturwissenschaften.
- Bei Vorhandensein einer PV-Anlage bietet sich die Anschaffung einer KWEA scheinbar an.

##### 3.2.2 Erfolgsfaktoren für die Verstetigung eines KWEA-Projektes

- Schulleitung, die mit der Freimachung zeitlicher Ressourcen, MitarbeiterInnenmotivation und Finanzierungsmöglichkeiten das Projekt unterstützt,
- Erhöhtes Engagement der LehrerInnen und technischen MitarbeiterInnen, das Projekt über ihre Kompetenzen hinaus unterstützen zu wollen,
- Vorhandensein eines technischen Grundverständnisses beim Lehrpersonal und anderen MitarbeiterInnen aufgrund ähnlicher bereits umgesetzter technischer Projekte

##### 3.2.3 Finanzierung

- KWEA haben i.d.R. höhere spezifische Investitionskosten und geringere Erträge als PV-Anlagen, was einen wirtschaftlichen Betrieb erschwert (Erkenntnis aus mehreren Projekten im innerstädtischen Bereich).
- Finanzierung erfolgte zumeist durch den Gewinn von Schüler-/Forschungswettbewerben oder Spenden.
- Bei der Anschaffung dürfen Folgekosten nicht vernachlässigt werden, z.B. Genehmigung, Betriebskosten etc.
- Förderungen/Finanzierungsmöglichkeiten ergaben sich z.B. durch:
  - Kooperation mit der Stadt im Verlauf des Genehmigungsprozesses,
  - Kooperations- und Förderanfrage beim Gebäudebetreiber, der die Anlage als Werbemaßnahme (grünes Image) nutzt,

- Aufnahme von Krediten bei der KfW-Bank mit günstigen Konditionen für EE-Projekte oder auch
- Spendenaufrufe auf Schulfesten,
- Kooperationen zwischen allgemeinbildenden Schulen und berufsbildenden Schulen für bessere Finanzierungsmöglichkeiten, die günstige Fördermöglichkeiten haben.

### 3.2.4 Errichtung der KWEA

- Der Aufstellung sollte eine Standortbewertung vorausgehen.
- Bei der Standortauswahl müssen folgende Aspekte berücksichtigt werden:
  - Windbedingungen, Strömungsverhältnisse,
  - Sicherheitsaspekte für die Einbindung in den Unterricht,
  - Statik und Sichtbarmachung.
- Eine professionelle Projektbegleitung/ Unterstützung für den Genehmigungsprozess ist ratsam, da der zeitliche Aufwand für mit dieser Thematik nicht vertraute Personen sehr hoch sein kann.
- Der Genehmigungsprozess von KWEA variiert in den einzelnen Bundesländern, siehe auch [Recherchebericht](#) [1]. Oft bestehen auch bei den MitarbeiterInnen der Behörden Wissenslücken, die durch eigene genaue Kenntnis über die geltenden Regelungen kompensiert werden können.

### 3.2.5 Einbindung in den Unterricht

- Bereits vor der Anschaffung sollte ein Konzept für die Einbindung der KWEA in den Unterricht vorhanden sein, da diese sonst schnell verwaist bzw. in Vergessenheit gerät → Zu bedenken ist hierbei, dass die Rahmenpläne selten Spielraum für eine intensive Auseinandersetzung mit Windenergie lassen.
- Die Einbindung in ein Batteriesystem mit weiterem Verbraucher hinterlässt nachhaltigen Eindruck bei Schülern.
- Die Einspeisung erfolgt der Einfachheit halber meist ins eigene Hausnetz → Eigenverbrauch.
- Schautafeln/Digitalanzeigen/Poster usw. erhöhen das Bewusstsein für die Technologie bei den Schülern, was sich für die PV-Anlagen mehrfach gezeigt hat.
- Präsentation der Ertragsdaten auf schuleigener Homepage ermöglicht neben der Sichtbarmachung nach außen auch eine Nutzung für den Unterricht.
- Die Messdatenaufnahme und -weiterverarbeitung muss demnach mit hoher Priorität bewertet werden.
- Die Einbindung der KWEA in den Unterricht erfordert in Abhängigkeit vom Konzept Kenntnisse im Bereich der:

- Elektrik, Informatik,
  - Messtechnik, Mechanische Schwingungen und
  - Windenergie.
- Die KWEA war selten auch Teil geisteswissenschaftlicher bzw. gesellschaftskritischer Auseinandersetzungen, da der Anwendungsbereich von KWEA und damit auch ihr Anteil an der energetischen Versorgung noch relativ unbekannt ist.
  - Für eine intensivere Auseinandersetzung mit der KWEA bieten sich AGs, Projektstage o.a. an.

### 3.2.6 Betrieb der KWEA

- Eine strukturierte Projektdokumentation von der ersten Kontaktaufnahme mit KWEA-Herstellern über die Kommunikation mit Behörden bis hin zum Konzept zur Handhabung der KWEA und ihrer Einbindung in den Unterricht sollte zentral abgelegt werden. → Dies erleichtert die Einarbeitung neuer Lehrer in das KWEA-Projekt.
- Die Zuständigkeit sollte der Redundanz wegen auf mindestens zwei Lehrer verteilt werden.
- Grundsätzlich ist festzuhalten, dass mit der Anlagengröße/-leistung der Umfang zu bewältigender Probleme für die Schulen zunimmt.
- Die Verantwortlichen an der Schule sollten bedenken, eine technische Begleitung für den Betrieb der Anlage zu organisieren, da gelegentlich Probleme mit Schwingungen oder auch der Elektrik auftreten können → Dieses Knowhow war an keiner der befragten Schulen vorhanden, ein entsprechender externer Ansprechpartner war aus diesem Grund oft erforderlich.

### 3.3 Ablauf eines KWEA-Projektes

Der Erfolg eines Kleinwindprojektes hängt nicht nur vom Einsatz jedes Einzelnen ab, sondern auch von einem guten Überblick über sämtliche Aspekte des Gesamtprojektes, wie sie in Abschnitt 3.2 dargelegt sind. Dies ist wichtig für die Aufstellung der Kleinwindenergieanlage wie auch ihren sinnvollen Einsatz im Unterricht und nachhaltigen Betrieb für ca. 20 Jahre. **Fehler! erweisquelle konnte nicht gefunden werden.** fasst die wichtigsten Punkte chronologisch zusammen. Abweichungen können natürlich auftreten, jedoch ist der grobe Ablauf dadurch bereits wiedergegeben.

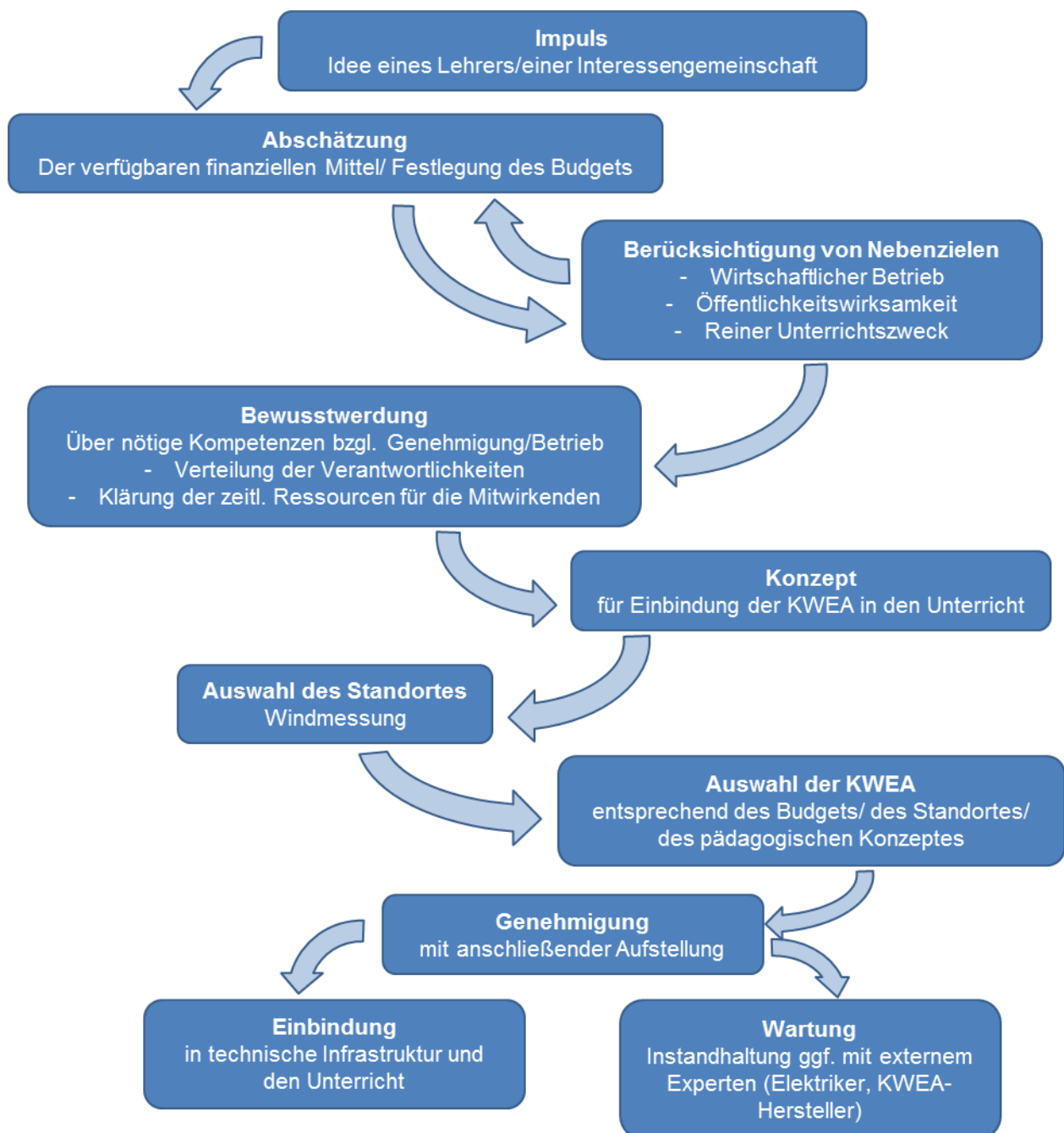


Abbildung 5: Schematischer Ablauf eines KWEA-Projektes (für Vollständigkeit wird nicht garantiert)

#### 4. Kostenzusammensetzung bei der Realisierung von Kleinwindprojekten

Bei der Realisierung von Kleinwindprojekten fällt der Großteil der Kosten auf die anfänglichen Investitionskosten, die aus den Anschaffungskosten sowie den Planungs- und Installationskosten bestehen. Doch auch während des Betriebs fallen Kosten an, die bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung zu berücksichtigen sind. Die Kosten für Kleinwindprojekte setzen sich wie folgt zusammen [2]:

##### **Anschaffungskosten**

- Gondel (Rotor, Generator, Getriebe)
- Turm
- Fundament und/oder Beschwerung
- Steuerung
- Wechselrichter und/oder Speicher
- ggf. Maßnahmen zur Schwingungsberuhigung
- ggf. Blitzschutztechnik
- ggf. Windmesstechnik zur Ermittlung des Windpotenzials

##### **Planung und Installation**

- ggf. Nachweise für Baugenehmigung (Emissionen, Statik)
- Netzanschlusskosten (inkl. Zählleinrichtung)
- ggf. vorhergehende Messkampagne zur Ermittlung des Windpotenzials
- Kapitalkosten

##### **Betriebskosten**

- Wartung und Reparatur
- Versicherung
- Miete für Zählleinrichtung (sofern nicht Eigentum des Betreibers/der Betreiberin)
- ggf. Kosten durch Ertragsausfall

Kosten für den Rückbau sind in der Liste nicht enthalten und müssen gegebenenfalls mit berücksichtigt werden. Die Kosten für Montage, den Netzanschluss und das Blitzschutzkonzept können je nach Standortbedingungen stark divergieren. Bei der Installation auf dem Boden bietet der Großteil der Hersteller Fundamente mit an. In urbanen Gebieten sind Dachinstallationen für höhere Erträge ratsam, die jedoch oft zu kostenaufwendigen Speziallösungen führen [2]. Für die Auf-Dach-Montage gilt auch zu beachten, dass ein zusätzliches statisches Gutachten erforderlich ist. Bei den Planungs- und Installationskosten ist die Größe der Anlage von Bedeutung. Bei Anlagen kleiner als 1 kW Nennleistung kann die Planung und Installation selbst oder zum Großteil eigenständig und somit kostensparend vom Anlagenbetreiber vorgenommen werden. Hier sind das



Gewicht, die Aufstellungshöhe sowie der Aufstellungsort der Anlage ausschlaggebend, ob die Planung und Installation ohne größere Hilfsmittel durchgeführt werden kann. Der Einsatz von schweren Maschinen wie z. B. Kränen kann zu einem großen Kostenfaktor werden, der bei kleinen Anlagen eine finanzielle Amortisation der Anlage erschwert.

Am Beispiel einer bereits installierten vertikalen Kleinwindenergieanlage mit einer Nennleistung von 1 kW wird deutlich, dass neben den Hardwarekosten auch die Betriebskosten mit 16 % der Gesamtkosten nicht zu unterschätzen sind (Annahme: 250 €/a inkl. Personalaufwand).

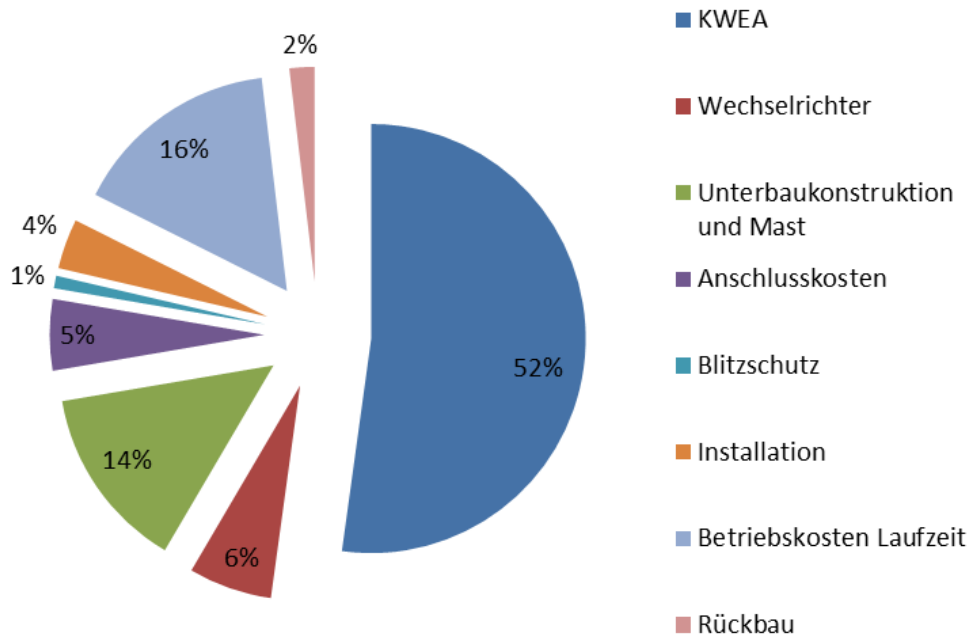


Abbildung 6: Exemplarische Kostenverteilung für die Anschaffung und Installation einer Kleinwindenergieanlage

## 5. Rechtliche Rahmenbedingungen für KWEA in Deutschland

Die bau- und genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen für die Errichtung von Kleinwindenergieanlagen auf Dächern oder als freistehende Anlagen berühren viele Rechtsbereiche. Hieraus ergibt sich im Vorfeld ein erheblicher Organisationsaufwand. In diesem Kapitel wird ein grober Überblick gegeben, was es zu beachten gilt und welche rechtlichen Anforderungen an das KWEA-Projekt gestellt werden.

Für einen detaillierten Einblick in die Rechtslage wird der Recherchebericht [1] empfohlen. In diesem wird weiterhin diskutiert, ob eine behördliche Genehmigung entsprechend der geltenden Landesbauordnung für jedes Bundesland benötigt wird und welche Kriterien die Antragsunterlagen (Bauvorlage) für die Erteilung einer Baugenehmigung in den einzelnen Bundesländern erfüllen müssen.

### 5.1 Relevante Gesetzestexte

Die Tabelle soll zunächst einen ersten rechtlichen Überblick über die relevanten Gesetzestexte schaffen [2].

#### **Bauplanungsrecht:**

- Baugesetzbuch (BauGB): Insbes. die §§ 29 ff. BauGB,
- Baunutzungsverordnung (BauNVO),
- ggf. Bebauungsplan.

#### **Bauordnungsrecht:**

- Bauordnung des jeweiligen Bundeslands,
- Bauvorlagen- bzw. Durchführungsverordnung des jeweiligen Bundeslandes,
- Technische Regelwerke: Insbes. DIN EN 61400-2 („Sicherheit kleiner Windenergieanlagen“) und DIN EN 1055-4 („Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten“).

#### **Immissionsschutzrecht:**

- Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): insbes. § 22 BImSchG,
- Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm).

#### **Naturschutzrecht:**

- Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), insbes. §§ 42 ff. BNatSchG sowie die jeweiligen länderspezifischen Ausführungsgesetze zum Bundesnaturschutzgesetz

#### **Denkmalschutzrecht:**

- Denkmalschutzgesetz im jeweiligen Bundesland

#### **Luftverkehrsrecht:**

- §§ 12 ff. Luftverkehrsgesetz (LuftVG). (Bei Dachkonstruktionen relevant)

KWEA gelten als bauliche Anlagen i.S.d. § 29 BauGB [10] und fallen, wie bereits beschrieben, unter die landesspezifischen Regelungen der Bauordnungen. Ab einer Höhe von 50 m muss ein Genehmigungsverfahren nach Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) durchgeführt werden.

Im Anschluss an diesen kurzen Überblick zum Rechtsrahmen wird nun die Genehmigungspflicht bzw.- Freiheit von KWEA geklärt.

## 5.2 Kurze Erklärung

Die für die Errichtung einer KWEA verantwortlichen Personen müssen sich bewusst sein, dass gerade der rechtliche Teil in einem KWEA-Projekt sehr umfangreich und komplex ist. Er stellt den Kern eines jeden Vorhabens dar, denn auch bei verfahrensfreien Anlagen müssen die öffentlich rechtlichen Regelungen eingehalten werden, was die Schule oder Bildungseinrichtung selbstständig übernehmen und gewährleisten muss. Für die rechtlichen Rahmenbedingungen des KWEA-Projekts sind Standort und Höhe der Anlage die entscheidenden Einflussfaktoren.

Je nach Standort der Schule und somit dem Standort der KWEA ergeben sich bauplanungsrechtliche Kriterien nach dem BauGB und der BauNVO. Zunächst muss man sich die Frage stellen, ob man sich im Außenbereich, beplanten Innenbereich oder unbeplanten Innenbereich befindet und inwieweit die KWEA dem Bebauungsplan entspricht, wenn einer vorhanden ist. Des Weiteren ist es wichtig, den Charakter des Baugebiets nach BauNVO zu definieren (z.B. Mischgebiet). An diese Voraussetzungen schließt sich die Genehmigungsfrage der KWEA an. In einigen Bundesländern ist die Aufstellung von KWEA bis zu einer bestimmten Höhe sowie teilweise in Verbindung mit einem bestimmten Baugebiet verfahrensfrei. Ein weiterer Weg, eine Anlage verfahrensfrei zu errichten, ist die Deklaration der Anlage zur Technischen Gebäudeausrüstung, was jedoch durch die Behörde bestätigt werden muss.

Wenn ein Bebauungsplan vorliegt, mit dem die KWEA im Einklang steht, kann in fast allen Bundesländern eine Genehmigungsfreistellung beantragt werden. Hier hat die Gemeinde ein „Vetorecht“, mit dem sie die Durchführung eines vereinfachten Genehmigungsverfahrens einfordern kann. Genauso kann auch die zuständige Baubehörde dem Freistellungsantrag widersprechen und ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren fordern.

Die Schule muss sich bewusst sein, dass durch eine Freistellung oder eine generelle Verfahrensfreiheit das Kleinwindunterfangen nicht automatisch auch rechtlich abgesichert ist. Es liegt in der Verantwortung der Schule, alle weiteren öffentlich-rechtlichen Anforderungen einzuhalten. Wenn keine Baugenehmigung notwendig ist, können Genehmigungen von z.B. der Denkmal-und/oder Naturschutzbehörde erforderlich sein, die dann selbstständig bezogen werden müssen.

Wenn eine Baugenehmigung benötigt wird, wird in den meisten Bundesländern bis 30 m Höhe ein vereinfachtes Verfahren durchgeführt. Dies entlastet nur die Behörde. Die Schule (Bauherr\_in) muss eine vollständige Bauvorlage einreichen wie sie auch im förmlichen Verfahren verlangt wird.

Das Zustimmungsverfahren ist am Ende besonders hervorzuheben, da es nur für Bauvorhaben in öffentlicher Trägerschaft gilt. Dafür muss die Bauleitung und -überwachung allerdings von einer öffentlichen Stelle übernommen werden.

Wie sich auch im Zuge der Auswertung der Erfahrungsberichte der Schulen mit KWEA gezeigt hat, ist dieser Weg dennoch nicht der gängigste. Viele Schulen sind über andere Stellen und in Kooperation mit Privatpersonen oder externen Projekten an ihre Anlagen gelangt.

Je nachdem, ob sich die Schule im ländlichen oder städtischen Raum befindet, spielen gerade nachbarschaftsrechtliche Belange in KWEA-Projekten eine erhebliche Rolle.

## 6. Unterrichtseinheiten

### 6.1 Allgemein

In diesem Kapitel werden Vorschläge für die praktische bzw. pädagogische Auseinandersetzung mit dem Thema Windenergie gemacht. Im Fokus stehen dabei verschiedene Aspekte einer Kleinwindenergieanlage, die den Betrieb, die Emissionen, den Standort, sowie die Energieerzeugung betreffen. Darüber hinaus werden auch Möglichkeiten der pädagogischen Nutzung von Kleinwindenergieanlagen für sozial- und geisteswissenschaftliche Fächer wie z. B. Politikwissenschaft bzw. Politische Bildung, Sozialwissenschaften, Wirtschaftswissenschaften sowie für den Bereich Wirtschaft-Arbeit-Technik vorgestellt.

Für die technisch orientierte Vermittlung des Themas wird im Folgenden bereits wichtiges Hintergrundwissen zur Theorie gegeben. Außerdem werden zur Veranschaulichung der Problematik Videovorschläge gemacht, die den SuS präsentiert werden können. Es sei zu erwähnen, dass das hier angebotene Theoriewissen nur einen groben Einblick gibt. Für eine intensivere Auseinandersetzung mit dem jeweiligen Thema seien aus diesem Grunde weiterführende Literaturen empfohlen:

- *Empfehlungen zum Einsatz kleiner Windenergieanlagen im urbanen Raum - Ein Leitfa-*  
*den der HTW Berlin,*
- *Windkraftanlagen - Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb* von R. Gasch und J. Twele
- *Kleinwindenergieanlagen, die Genehmigungslage in Deutschland und deren Einsatz an*  
*Bildungseinrichtungen* von Reiner Lemoine Institut gGmbH

### 6.2 Kennenlernen von Kleinwindenergieanlagen: Definition und Varianten

Geeignet für folgende Fächer: Physik, EE, Umwelttechnik, Geographie, Wirtschaft-Arbeit-Technik

Allgemein: Kleinwindenergieanlagen (KWEA) dienen in der Regel der gewerblichen oder haushaltsbezogenen Deckung des Strombedarfs oder der Einspeisung in das Stromnetz, mit entsprechender Vergütung. Da die Anlagen nicht zwangsläufig auf freiem Gelände und nicht mit der größtmöglichen Leistung installiert werden, existieren Varianten, die an den Strombedarf und den Windverhältnissen am jeweiligen Standort angepasst sind. Daher unterscheiden sich einige KWEA in ihrer Bauform und hinsichtlich ihrer Leistungsklassen. Die gängigen KWEA sind horizontal ausgelegt, da sich die Rotorebene um die horizontale Achse dreht. Es existieren auch Varianten, die sich um die vertikale Achse drehen. Diese sind im Allgemeinen robuster und weniger windanfällig, weisen jedoch einen geringeren Wirkungsgrad auf als die horizontalen Anlagen. Der Einsatz von KWEA findet oft im urbanen Bereich statt und die häufigsten Nutzungsvarianten sind der Inselbetrieb (autark), der Netzparallelbetrieb (Eigenverbrauch und Einspeisung), das Hybrid-system (Wind im Verbund mit anderen Energiesystemen) und das Windpumpensystem (Windenergie für mechanische Arbeit). Bauform und Leistungen unterscheiden sich von Fall zu Fall.

Entscheidend für die Wahl der jeweiligen KWEA ist der Standort, die Nutzung, die Sicherheit, der Ertrag und die Kosten der Anlage.

Lernziele und Kompetenzen: SuS lernen Definitionen und Varianten von Kleinwindenergieanlagen mit ihren Vor- und Nachteilen kennen. Sie erlernen das Abwägen und Abschätzen von geeigneten KWEA für unterschiedliche Standorte und Nutzungsbedingungen.

Auswahl an Videos:

- Kleinwindenergieanlagen am Flughafen Köln/Bonn
- o <https://www.youtube.com/watch?v=sdBonRBv19I>

Weiterführende Links/Internetseiten:

- Broschüre „Kleinwindanlagen: Fakten zur Nutzung von Windenergie im Kleinen“ des Kreises Steinfurt
- o <http://bit.ly/1PtsUml>
- Informationen des Bundesverband WindEnergie zum Thema Kleinwind
- o <https://www.wind-energie.de/themen/kleinwind>
- Informationen des Kleinwindkraft-Portals zum Thema Kleinwindenergieanlagen
- o <http://www.klein-windkraftanlagen.com/>

Dauer	Methoden/Aktivitäten	Material
<b>5 min.</b>	Zum Einstieg wird der Film „Kleinwindenergieanlagen am Flughafen Köln/Bonn“ gezeigt.	Der Film ist zu finden auf: <a href="http://bit.ly/1L6nuyu">http://bit.ly/1L6nuyu</a>
<b>5 min</b>	Hierauf folgt eine Auflistung der Charakteristiken für die Einstufung als Kleinwindanlage mit Hilfe des Lehrers.	Fakten zu Kleinwindanlagen <a href="http://bit.ly/1PtsUml">http://bit.ly/1PtsUml</a>
<b>25 min</b>	Daraufhin werden Gruppen gebildet, die die einzelnen Varianten von Kleinwindanlagen hinsichtlich Bauform, Kenndaten und Vorteilen recherchieren: Die Varianten sind:	
	1. Horizontalanlagen	Luv/Leeläufer <a href="http://bit.ly/1QtoUTV">http://bit.ly/1QtoUTV</a> <a href="http://bit.ly/1VQwND6">http://bit.ly/1VQwND6</a> <a href="http://bit.ly/24D6y8Z">http://bit.ly/24D6y8Z</a>

	2. Vertikalanlagen (Savonius, Darrieus, H-Darrieus)	Vertikale Kleinwindanlag: <a href="http://bit.ly/1msDuNZ">http://bit.ly/1msDuNZ</a> <a href="http://bit.ly/1poLtyU">http://bit.ly/1poLtyU</a>
	3. Mantelturbine	Mantelturbine: <a href="http://bit.ly/1niZiNE">http://bit.ly/1niZiNE</a>
<b>10 min</b>	Anschließend folgt eine Gegenüberstellung von vertikaler, horizontaler und Mantelturbine an der Tafel in Form einer Tabelle.	
SuS bekommen die Hausaufgabe sich über verschiedene Windnutzungssysteme zu informieren und eine Zeichnung anzufertigen, wie diese integriert werden könnten. Diese Möglichkeiten sind in der Regel: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Inselbetrieb (Eigenverbrauch)</li> <li>2. Netzparallelbetrieb (Eigenverbrauch und Einspeisung)</li> <li>3. Hybridsysteme (Verbunden mit anderen Technologien)</li> <li>4. Windpumpensysteme (Fördern von Wasser)</li> </ol> Die Ergebnisse werden in der darauf folgenden Stunde vorgestellt.		

### 6.3 Schwingungsmessung an Kleinwindenergieanlagen

#### Geeignet für folgende Fächer:

- Physik, EE, Umwelttechnik

Allgemein: Bei Dachmontagen stellt die Übertragung der Schwingungen der Anlage auf das Gebäude ein spezielles Problemfeld dar. Das System aus KWEA und tragender Struktur besitzt in Abhängigkeit der Einzelkomponenten und deren Verbindung eine Vielzahl von Eigenfrequenzen. Liegen diese im anregenden Frequenzspektrum (abhängig vom Betriebsdrehzahlbereich), kommt es zu verstärkten Schwingungen im Betrieb der Anlage, die bereits mit der Hand gespürt (am Mast bzw. Verstrebungen) oder aber auch optisch wahrgenommen werden können (z.B. durch Auslenkungen des Turmkopfes/Gondel).

Diese Schwingungen, hervorgerufen durch Massenunwuchten am Rotor (ungleiche Verteilung der Massen an den Rotorblättern um die Rotorachse) oder aerodynamische Unwuchten (durch unterschiedliche Rotorblattverstellwinkel/Anstellwinkel der Rotorblätter zum Wind oder auch turbulentes Windfeld), führen zu erhöhten Belastungen für die Anlage, wodurch ihre Lebensdauer verringert wird und Schäden an Lagern, Fundament o.a. bereits kurzfristig wahrgenommen werden können.

Hinzu kommt die Weiterleitung der Schwingungen auf die Umgebung. Bei freier Aufstellung stellt es noch kein großes Problem dar, auch wenn das Fundament durch Rissbildung geschädigt werden kann. Bei Aufstellung auf dem Dach bedeuten Schwingungsübertragungen eine mechani-

sche Belastung der Gebäudestruktur und ggf. sogar eine akustische Störung, da mit den Gebäudeschwingungen auch Geräuschbildung einhergehen kann.

Es gibt weitere Schwingungsursachen, so z.B. Blatt-Turm-Interaktion, Generator, „hektische“ passive Windrichtungsnachführung.

#### Weiterführende Links/Internetseiten:

- Schwingungen bei Windkraftanlagen – allgemein, Eigenformen:  
<http://prof.beuth-hochschule.de/fileadmin/user/resnik/Diplomarbeiten/Voll/Schwingungen.htm>;  
Letzter Zugriff: 15.03.2016
- Messung niederfrequenter Schwingungen:  
<http://www.sonnewindwaerme.de/fachaufsatz-windenergie/kunst-niederfrequente-schwingungen-messen>;  
Letzter Zugriff: 15.03.2016
- Windkraftanlagen, Turm, Dynamik:  
[http://www.cae-wiki.info/wikiplus/index.php/Windkraftanlagen-Turm\\_Dynamik](http://www.cae-wiki.info/wikiplus/index.php/Windkraftanlagen-Turm_Dynamik)  
Letzter Zugriff: 15.03.2016
- Lastreduktion für Windenergieanlagen:  
<http://www.fos4x.de/anwendungen/lastreduktion-f%C3%BCr-windenergieanlagen>  
Letzter Zugriff: 15.03.2016
- R. Gasch und J. Twele: Windkraftanlagen, S.284 und folgende, Vieweg+Teubner, 6.Auflage, 2010

Equipment: Die Versuche können unterstützt werden durch Messtechnik, die ggf. bereits als Laborinventar vorhanden ist, so z.B. Beschleunigungssensoren in Kombination auch mit einem Drehzahlsensor und einem Windmessgerät. Da dies sehr kostenintensives Equipment ist, beinhalten die Versuchsbeschreibungen einfache Ausstattung.

#### Auswahl an Videos:

- KWEA Betriebsschwingungen an Windfahne aufgrund von Unwuchten o.a.:  
<https://www.youtube.com/watch?v=b4wVPmpifA>
- WEA-Abschaltung und Ausschwingen:  
[https://www.youtube.com/watch?v=1di-G\\_ezzYs](https://www.youtube.com/watch?v=1di-G_ezzYs)
- Turmschwingungen an KWEA:  
<https://www.youtube.com/watch?v=H4GXjpMgHFE>
- Schwingungen und Geräuschemissionen von Auf-Dach-KWEA:  
<https://www.youtube.com/watch?v=gJf8gkyAkFo>



### 6.3.1 Betriebsschwingungen spüren

Lernziele und Kompetenzen: Verständnis für die Auswirkung von betriebsbedingten Schwingungen

Zeit	Methoden/Aktivitäten	Material
15 min.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- LehrerIn bespricht mit SuS die Ursachen für Schwingungen an (Klein-)Windenergieanlagen</li> <li>- LehrerIn bespricht mit SuS Folgen von Schwingungen für Anlage und Gebäude/Fundament</li> <li>- LehrerIn kann Video zeigen</li> </ul>	- Ggf. Video
5-10 min.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- LehrerIn geht mit SuS zur KWEA (die möglicherweise Vibrationen aufweist), die in Betrieb ist</li> <li>- LehrerIn zeigt SuS die schwingungsfähigen Komponenten an einer KWEA, Rotorblätter, Turm-Gondel-System, Abspannungen/Verstrebungen, Beschwerungen am Boden</li> </ul>	- Wind, KWEA
5 min.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SuS spüren durch Handauflegen bzw. akustische Wahrnehmung die Schwingungen, verursacht durch die KWEA</li> </ul>	

### 6.3.2 Versteifung von Schwingungssystemen

Lernziele und Kompetenzen: Verständnis für Eigenfrequenzen und Eigenfrequenzprobleme

Im Speziellen: Massebehaftet Körper haben eine Eigenfrequenz, die von der Masse und der Geometrie (Trägheit) abhängt. Demnach haben auch alle Komponenten an einer KWEA eine Eigenfrequenz. Sowohl die Komponenten im Einzelnen wie auch das Turm-Gondel-System als Ganzes. Da die Energiegewinnung an KWEA durch die Drehbewegung des Rotors ermöglicht wird, zeichnet sich das Betriebsverhalten von KWEA durch die bereits erwähnten Schwingungen aus, die wiederum durch ein Vielfaches der Rotordrehzahl charakterisiert sind. Massenunwuchten wirken mit der Drehfrequenz des Rotors, Blatt-Turm-Interaktion bei einem dreiblättrigen Horizontalachser wirkt mit dem dreifachen der Rotordrehzahl usw. Nun können diese betriebsbedingten Schwingungen im Bereich der Eigenfrequenzen der Komponenten liegen, wodurch diese angeregt werden.

Die Anregung von Eigenfrequenzen ist ein sogenannter Resonanzfall, in dem die Komponente in extreme Schwingungen versetzt werden kann bzw. sehr hohe Belastungen auftreten. Um dies zu vermeiden, werden Dämpfer und Tilger eingesetzt, die das System so verändern, dass deren Eigenfrequenzen einfach „verschoben“ bzw. abgedämpft (z.B. Stoßdämpfer) werden. An KWEA geschieht dies z.B. am Turmkopf oder Turmfuß durch Gummidämpfer oder durch die abgestimmte Konstruktion des Turmes → Veränderung der Höhe des Turmes führt zu Veränderung der Geometrie des Turmes und das wiederum hat Einfluss auf die Trägheit des Turm-Gondel-Systems und das führt zur Verschiebung der Eigenfrequenz.

Weiterführende Links/Internetseiten:

- Eigenfrequenz:  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Eigenfrequenz>  
 Letzter Zugriff: 15.03.2016
- Eigenfrequenzen schwingender Saiten:  
[https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/Im\\_data/Im\\_282/auto/kap13/cd374.htm](https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/Im_data/Im_282/auto/kap13/cd374.htm)  
 Letzter Zugriff: 15.03.2016
- R. Gasch und J. Twele: Windkraftanlagen, S.295 und folgende, Vieweg+Teubner, 6.Auflage, 2010

Zeit	Methoden/Aktivitäten	Material
15 min.	- LehrerIn erklärt die Thematik	-
10 min.	- SuS untersuchen die KWEA auf schwingungsfähige Komponenten - SuS überlegen, welche Maßnahmen für Veränderung der Eigenfrequenzen durchgeführt werden können	- KWEA
10 min.	- Sollte KWEA mit Verstrebungen ausgestattet sein, so können diese mit Spanngurt versteift werden (Erhöhung der Eigenfrequenz)	- Spanngurte
15 min.	- Sollte KWEA mit gedämpftem Turmkopf ausgestattet sein, kann dieser mit Holzkeilen und Spanngurt ggf. versteift werden - Erhöhung der Eigenfrequenz	- Spanngurte, Leiter, Holzkeile
5 min.	- Beobachtung der Schwingungen vor und nach dem Eingriff durch Handauflegen bzw. messtechnische Untersuchung	- Wind

### 6.3.3 Videobasierte Untersuchung der Schwingungen

Lernziele und Kompetenzen: Verständnis für die Bewegung von Windenergieanlagen

Im Speziellen: Schwingungsfähige Systeme bewegen sich. Windenergieanlagen, so massiv sie auch erscheinen, können sich demnach aufgrund von Schwingungsanregung bewegen, siehe oben. Diese Schwingungen können optisch und akustisch wahrgenommen werden.

Die optische Auswertung kann durch eine Kamera und entsprechende Auswertesoftware unterstützt werden.

Weiterführende Links/Internetseiten:

- Icarus - Kostenloses Motion Tracking:  
<https://www.youtube.com/watch?v=tq0GunPe1yq>  
 Letzter Zugriff: 15.03.2016

- Tutorials für Icarus:  
<http://www.colinlevy.com/tuts/IcarusTutorials/Icarus.php>  
Letzter Zugriff: 15.03.2016

Dauer	Beschreibung	Hilfsmittel
15 min.	- LehrerIn erklärt Thematik - LehrerIn zeigt Video	- <a href="https://www.youtube.com/watch?v=1di-G_ezzYs">https://www.youtube.com/watch?v=1di-G_ezzYs</a>
10 min.	- An KWEA wird Referenzobjekt angebracht, das mit Kamera von unten erfasst werden kann, z.B. Winkel mit langem horizontalem Schenkel	- Leiter - Referenzobjekt an der KWEA (Regalwinkel o.ä.)
10 min.	- Kamera wird nach oben ausgerichtet neben den Turm gestellt mit dem Referenzobjekt im Fokus	- Kamera mit Videofunktion - Stativ
5-10 min.	- Anlage muss nun in Betrieb genommen werden - Betriebsbedingte Schwingungen werden aufgezeichnet	- KWEA - Wind
15 min.	- Am PC können Schwingungen untersucht werden entweder mit einfachem Videoprogramm oder gar mit Tracking-Programmen (z.B. ICARUS)	- Computer

## 6.4 Schallmessungen an KWEA

Geeignet für folgende Fächer: Physik, EE, Umwelttechnik, Soziales usw.

Allgemein: Windenergieanlagen stehen oft in der Kritik, weil sie aufgrund von Geräuschemissionen die Wohnqualität umliegender bewohnter Gebiete senken. Kleinwindenergieanlagen kämpfen mit dem gleichen Problem, was bei der Aufstellung im Stadtgebiet deutlich gravierender ist. Schall entsteht an der Anlage vor allem durch Blattspitzenablösung, d.h. die Strömung löst sich vom Rotorblatt, aber auch die Generatorbrummen. Der Effekt der Blattspitzenablösung nachempfunden werden, wenn man einen Stock durch die Luft wedelt.

Aus emissionsschutzrechtlichen Gründen dürfen die Schallimmissionen am Ort des Beobachters gewisse Grenzwerte nicht überschreiten. Dies kann durch eine entsprechende Auslegung der Anlage, im speziellen des Rotors, bewirkt werden.

Tabelle 6: Immissionsrichtwerte

Gebiet	Tags	Nachts
<b>Industriegebiete</b>	70 $\text{dB}_A$	70 $\text{dB}_A$
<b>Gewerbegebiete</b>	65 $\text{dB}_A$	50 $\text{dB}_A$
<b>Kern-, Dorf- und Mischgebiete</b>	60 $\text{dB}_A$	45 $\text{dB}_A$
<b>Allgemeine Wohngebiete</b>	55 $\text{dB}_A$	40 $\text{dB}_A$
<b>Reine Wohngebiete</b>	50 $\text{dB}_A$	35 $\text{dB}_A$
<b>Kurgebiete, Krankenhäuser und Pflegeanstalten</b>	45 $\text{dB}_A$	35 $\text{dB}_A$

Auswahl an Videos:

- Schwingungen und Geräuschemissionen von Auf-Dach-KWEA:  
<https://www.youtube.com/watch?v=qJf8gkyAkFo>
- Visualisierung von Schallemissionen an WEA:  
<https://www.youtube.com/watch?v=6lxt9KeEoSA>

#### 6.4.1 Geräuschwahrnehmung an KWEA

Lernziele und Kompetenzen: Wahrnehmung der Geräuschemissionen von KWEA, sowie deren Richtungsabhängigkeit.

Dauer	Beschreibung	Hilfsmittel
10 min.	- LehrerIn erläutert Thematik	- Ggf. Video
5 min.	- SuS und LehrerIn gehen zur Anlage und hören	- Wind, KWEA
5 min.	- SuS nehmen Geräuschemissionen der produzierenden KWEA ohne Messtechnik wahr - SuS gehen um die Anlage herum und entfernen sich von ihr, um den Einfluss von Richtung und Entfernung zu beobachten - KWEA kann ein- und ausgeschaltet werden, um den Unterschied deutlich zu machen	- Wind - KWEA

#### 6.4.2 Schallmessung an KWEA

Lernziele und Kompetenzen: Messtechnisch unterstützte Bewertung der KWEA hinsichtlich Geräuschemissionen

Im Speziellen: Diese Unterrichtseinheit erfordert den Einsatz eines Mikrofons, das im günstigsten Fall bereits Bestandteil des Laborinventares ist, da es recht kostspielig ist (ca. 3.000,- €).

Weiterführende Links/Internetseiten:

- Messung der Schallemission von Windenergieanlagen:  
[http://www.thueringen.de/imperia/md/content/tlug/abt1/v-referate/2014/06\\_2014/8\\_wea-schall\\_2014-05-13.pdf](http://www.thueringen.de/imperia/md/content/tlug/abt1/v-referate/2014/06_2014/8_wea-schall_2014-05-13.pdf)  
 Letzter Zugriff: 15.03.2016
- Schallimmissionen von Windkraftanlagen:  
[http://www.igus-dresden.de/cgi-bin/igus.cgi?sprache=&menu=unterrubrik\\_anz&id=rubr9499174107&rubrik=rubr9499174107&text\\_rubr=2&seite=html117830738786&unterseite=uhtml415743205448](http://www.igus-dresden.de/cgi-bin/igus.cgi?sprache=&menu=unterrubrik_anz&id=rubr9499174107&rubrik=rubr9499174107&text_rubr=2&seite=html117830738786&unterseite=uhtml415743205448)  
 Letzter Zugriff: 15.03.2016

Dauer	Beschreibung	Hilfsmittel
10 min.	- LehrerIn erklärt Thematik	- Ggf. Video
10 min.	- SuS wählen Messstandorte aus und charakterisieren diese (Entfernung, Ausrichtung auch bzgl. Windrichtung) - Standorte können auf Übersichtskarte eingetragen werden, um die Ergebnisse anschließend auch dort zu visualisieren	- Maßband - Karte (googlemaps)
3 min.	- Zeitliche Synchronisierung der Messsysteme für Schallmessung und Windmessung	- Computer
60 min.	- Beispielhafte Schallmessung an definierten Positionen im Umkreis der Anlage (eigentlich dauert Schallmessung mehrere Tage, je nach Windgeschwindigkeitsaufkommen)	- Wind, KWEA - Mikrofon - Windfahne, Anemometer
30 min.	- Bewertung des Einflusses der Windrichtung/-geschwindigkeit und des Lärmpegels in Abhängigkeit vom Abstand des Immissionsortes zur Anlage auf Basis der Messwerte	- Tabelle
<b>Danach</b>	⇒ Auseinandersetzung mit Grenzwerten	

## 6.5 Energieerzeugung der KWEA

Geeignet für folgende Fächer: Physik, EE, Umwelttechnik, Elektrotechnik

Allgemein: Windenergieanlagen dienen der Erzeugung elektrischer Energie. Dies geschieht, in dem der Rotor der Anlage durch erhöhtes Windaufkommen in Drehung versetzt wird und dabei ein Generator angetrieben wird. Dieser besteht aus dem Rotor mit durch Magnete hervorgerufenem magnetischem Gleichfeld. Durch die Drehung des Feldes wird in den Wicklungen des Stators elektrische Spannung induziert und damit elektrische Energie erzeugt. Dieser Zusammenhang kann auf verschiedene Weise demonstriert werden. Einerseits durch die direkte Messung der Leistung der KWEA, andererseits aber auch durch den Anschluss einer elektrischen Last wie einer Lampe, die beginnt zu leuchten, sobald die KWEA aufgrund der Drehbewegung Strom erzeugt.

### 6.5.1 Leistungsmessung

Lernziele und Kompetenzen: Bewertung der Leistungsfähigkeit der KWEA

Im Speziellen: Dieser Versuch kann kurzzeitig unternommen werden, um einen groben Einblick in die Fluktuation der Leistungsbereitstellung von Windenergieanlagen zu bekommen, schließlich weht der Wind nie dauerhaft mit der gleichen Windgeschwindigkeit, sodass die Leistungsbereitstellung von WEA nie konstant ist. Der Versuch kann genauso auch längerfristig durchgeführt werden, um die Leistung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten aufzuzeichnen und durch die Häufung der Messwerte bei gleicher Windgeschwindigkeit zu vergrößern, wodurch eine validere Einschätzung der Leistungskurve vorgenommen werden kann.

In jedem Fall erfordern die Versuche bereits einen Versuchsaufbau, in dem die Windgeschwindigkeit und ggf. die –richtung aufgezeichnet werden.

Dauer	Beschreibung	Hilfsmittel
15 min.	- LehrerIn erläutert die Thematik	
5 min.	- LehrerIn erläutert den SuS den Versuchsaufbau	- Energiezähler - Windmesssystem - KWEA
5 – 10 min.	- Versuchsdurchführung, SuS können an Digitalanzeige die fluktuierende Einspeisung beobachten	- Wind
1-7 Tage oder länger	- Versuch wird über längeren Zeitraum fortgeführt	- Wind
30 min.	- Auswertung der Messdaten mit vorbereiteter EXCEL-Tabelle o.a.	- Auswertetool
10 min.	- Darstellung der Zusammenhangs zwischen Windgeschwindigkeit und Leistung (Leistungskurve)	- Computer
15 min	⇒ Tafelbild für vergleichende Betrachtung von Windleistung und KWEA-Leistung → Thematisierung der Effektivität, Leistungsbeiwert	

### 6.5.2 Zusammenhang zwischen Energieerzeugung und –nutzung

Lernziele und Kompetenzen: Bewusstsein für Fluktuation der Einspeisung

Im Speziellen: Dieser Versuch erfordert wie der vorangegangene einen vorbereiteten Versuchsaufbau aus KWEA, elektrischer Verschaltung und dem Verbraucher, z.B. eine Lampe. Versuchsaufbau kann ggf. mit Batterie und Laderegulierung kombiniert werden, sodass veranschaulicht wird, wie überschüssige Energie zwischengespeichert wird und für windarme Zeiten vorgehalten werden kann.

Dauer	Beschreibung	Hilfsmittel
10 min.	- LehrerIn erläutert Thematik	
20 min.	- LehrerIn erklärt den Versuchsaufbau bzw. untersuchen SuS eigenständig den Versuchsaufbau und entwickeln ein Verständnis dafür	- Versuchsaufbau
10 min.	- Einschalten der KWEA - Beobachtung von Erzeugung, Verbrauch und Speicherung mittels Digitalanzeige	- KWEA, Wind

## 6.6 Windmessung/-beobachtung

Geeignet für folgende Fächer: Physik, EE, Umwelttechnik

Allgemein: Die Messung der Windgeschwindigkeit und -richtung sind für die Beurteilung eines potentiellen Standortes für Windenergieanlagen unerlässlich. Die Windverhältnisse sind dabei nicht nur abhängig vom regionalen Windaufkommen, sondern auch von der lokalen Orographie. Bereits kleinere Hügel, Büsche und Baumgruppen sind maßgebliche Hindernisse für die Windanströmung von Kleinwindenergieanlagen mit vergleichsweise geringen Nabenhöhen. Für eine aussagekräftige Einschätzung des Windstandortes ist die Windmessung eines gesamten Kalenderjahres notwendig. Da das Windaufkommen innerhalb eines Jahres saisonalen Schwankungen unterliegt, kann eine Messung z.B. in den Wintermonaten leicht zu einer Überschätzung des Potentials am Standort führen.

Eine erste Bewertung der Windverhältnisse am Standort erfolgt über die Mittlere Windgeschwindigkeit. Diese gibt an, wie stark die Windgeschwindigkeiten durchschnittlich innerhalb eines bestimmten Zeitraums waren. Für die genaue Ertragsprognose ist jedoch eine Bestimmung der Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten notwendig. Diese werden in Windgeschwindigkeitshistogrammen abgebildet. Aus der Häufigkeitsverteilung kann dann die Energiemenge berechnet werden, welche in den jeweiligen Windgeschwindigkeitsbereichen (sog. BINs) zur Verfügung steht.

Auswahl an Videos:

- Tragflügel im Windkanal:  
<https://www.youtube.com/watch?v=HZL29QY97yU>  
[https://www.youtube.com/watch?v=cSN2zztj\\_GQ](https://www.youtube.com/watch?v=cSN2zztj_GQ)
- Visualisierung der Stromlinien:  
[https://www.youtube.com/watch?v=g\\_eMQvDoDWk](https://www.youtube.com/watch?v=g_eMQvDoDWk)
- Erläuterung der Windmessung mit E-Chalk:  
[https://www.youtube.com/watch?v=\\_KqgOgRwjqE](https://www.youtube.com/watch?v=_KqgOgRwjqE)

### 6.6.1 Flatterbandversuch

Lernziele und Kompetenzen: Bewusstsein für Einfluss von Hindernissen auf Strömung

Im Speziellen: Häuserkanten, Büche oder auch Dachkanten haben maßgeblichen Einfluss auf die lokalen Windverhältnisse. Die Hindernisse führen zu einer Verwirbelung in der Anströmung. Durch diese turbulente Anströmung kann der Ertrag einer KWEA gemindert werden, gravierender ist jedoch die Mehrbelastung der Anlagenstruktur. Durch die häufig wechselnden Windgeschwindigkeiten und -richtungen werden die Rotorblätter ungleichförmig angeströmt, was zu Schwingungen führen kann, die sich dann auf das gesamte Turm-Gondel-System übertragen.

Diese Verwirbelungen können bereits durch den Einsatz einfachster Mittel visualisiert werden. In diesem Versuch wird eine Absperrband an einen langen Stab gebunden und in die Luft gehalten. Bei laminarer ungestörter Anströmung, zieht sich das Band gerade und straff im Wind, bei turbulenter Anströmung wird das Band eher unruhig ggf. in großen/kleinen Kurven im Wind flattern.

Dauer	Beschreibung	Hilfsmittel
20 min.	- LehrerIn erklärt Thematik	- Gg. Video
5 min.	- LehrerIn geht mit SuS auf Schulhof, Dach etc. und gibt Ihnen Flatterband am Stab SuS überlegen im Vorhinein, wo turbulente und laminare Strömungen vorliegen	- Flatterband (ca. 2m) - Lange Stange
10 min.	- SuS untersuchen Schulgelände hinsichtlich der Strömung	- Wind

### 6.6.2 Windmessung

Lernziele und Kompetenzen: Bewusstsein für Fluktuation der Einspeisung

Im Speziellen: Windmessung kann mit verschiedenen Windsensoren durchgeführt werden. Dabei muss bewusst sein, dass auch diese einen Einfluss auf das Ergebnis haben. Schalenkreuzanemometer sind mechanische drehende Teile, die mit einer gewissen Trägheit auf Windgeschwindigkeitsänderungen reagieren. Gleiches gilt für die Windfahne mit Hinblick auf die Windrichtung. Dies ist ein generelles Problem von Messverfahren, bei denen in das zu vermessende Medium eingegriffen wird. Ultraschallanemometer sind sehr hochwertige Alternativen, die allerdings ebenfalls die Windströmung beeinflussen, da hier die Luft die kleinen Sensorköpfe umströmt, d.h. ihnen ausweicht. Dennoch sind diese Messgeräte sehr gut, da sie die Windgeschwindigkeitsanteile richtungsabhängig darstellen können. Ein Schalenkreuzanemometer misst hingegen nur die horizontale Komponente.

Die Windmessung kann mit den Schülern exemplarisch für einen kurzen Zeitraum durchgeführt werden, dann aber auch über mehrere Tage/Wochen laufen, sodass eine große Datenmenge ausgewertet werden kann mit Darstellung der Windhäufigkeit in Histogrammen und richtungsabhängige Darstellung mit Windrose. Die Tools, z.B. basierend auf EXCEL, sollten vor der UE vorbereitet sein, damit die SuS die Auswertung der Messzeitreihen zügig umsetzen können.

Folgende Medien stehen zur Verfügung:

- Tool für Ertragsprognose:  
<http://windmonitor.de/>  
[http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/img/SWT\\_Yield\\_Estimator\\_De.xls](http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/img/SWT_Yield_Estimator_De.xls)
- Internetseite mit Vorhersagen und Messwerte von Standorten:  
<http://www.windfinder.com/>
- Internetseite für langjährige Messreihen:  
<https://werdis.dwd.de/>
- Tool für Windauswertung:  
<https://www.windographer.com/>



Dauer	Beschreibung	Hilfsmittel
15 min.	- LehrerIn erläutert Thematik	-
5 min.	- LehrerIn erklärt SuS den Messaufbau	- KWEA, Messtechnik
5 min.	- SuS beobachtet Echtzeitmessung, um sich der Fluktuation des Windaufkommens bewusst zu werden	-
20 – 30. Min	- SuS erhalten Windzeitreihe in EXCEL-Datei und sortieren die Werte in Bins für Histogramm	- Computer, EXCEL
15 min.	- Windgeschwindigkeiten werden richtungsabhängig dargestellt in Windrose	- Computer, EXCEL

## 6.7 Schattenwurf

Geeignet für folgende Fächer: Physik, EE, Umwelttechnik, Sachkunde, PW

Allgemein: Schattenwurf von Windenergieanlagen ist ein kritisches Thema, das die Wahrnehmung von Erneuerbaren Energien in der Gesellschaft prägt. Aus diesem Grund müssen WEA wie auch KWEA dort aufgebaut werden, wo sie durch ihre Emissionen am wenigsten auffallen bzw. die Anwohner stören. Wie für Geräuschemissionen gibt es auch für den Schattenwurf Grenzwerte, die bezogen auf das Tages- wie auch das Jahresaufkommen des Schattens an einem schutzwürdigen Immissionsort nicht überschritten werden dürfen. Dies sind 30 Minuten am Tag und 30 Stunden im Jahr.

Folgende Effekte sind bei der Beurteilung des störenden optischen Einflusses von Windenergieanlagen zu berücksichtigen:

- **Lichtblitze (Disco-Effekte)** sind periodische Reflexionen des Sonnenlichtes an den Rotorblättern.
- **Kern- Bzw. Halbschatten** ist vom Immissionsort aus betrachtet die vollständige oder nicht vollständige Verdeckung der Sonne durch das Rotorblatt.
- **Periodischer Schattenwurf** ist die wiederkehrende Verschattung des direkten Sonnenlichtes durch die Rotorblätter einer Windenergieanlage.

Als Folge einer Überschreitung der Grenzwerte kann dem Betreiber die Vorgabe gemacht werden, die WEA zu gewissen Zeiten im Jahr abzuschalten, sodass der dynamische Schatten vermieden wird.

Auswahl von Medien:

- Video zum Schattenwurf einer KWEA auf Dach ins Wohnzimmer:  
<https://www.youtube.com/watch?v=-TjDKZeYRRQ>
- Schattenwurfberechnung – Energieatlas Bayern:  
<https://www.energieatlas.bayern.de/file/pdf/1099/Erl%C3%A4uterungen%20zur%20Schattensimulation%20von%20Windkraftanlagen.pdf>

### 6.7.1 Schattenwurf/Diskoeffekt erfassen

Lernziele und Kompetenzen: Nachbildung des Schattenwurfs auf dem Schulgelände und Bewusstsein für saisonale Veränderung des Schattenwurfs

Dauer	Beschreibung	Hilfsmittel
10 min.	- LehrerIn erläutert Thematik und zeigt ggf. Video	-
5 min.	- LehrerIn beschreibt anhand der PDF von Energieatlas das Ziel der Aufgabe, den Schattenwurf auf Schulgelände nachzuvollziehen, um geeigneten Standort für KWEA zu finden bzw. aktuellen Standort der KWEA zu bewerten	-
tagesbegleitend	- SuS zeichnen alle 30 min. den Schattenwurf mit Kreide auf - Punkte können in eine Karte vom Schulgelände (googlemaps) eingetragen werden, sodass Schattenkarte entsteht	- Sonne - Kreide - Karte
15 min.	- Diskussion der Ergebnisse und Bewertung möglicher Standorte hinsichtlich Grenzwerten	-

Die nachfolgenden Unterrichtseinheiten beinhalten ein Unterrichtsangebot für sozial- und geisteswissenschaftliche Fächer:

### 6.8 Planspiel Windkraftkonflikt

Geeignet für folgende Fächer: Wirtschaft-Arbeit-Technik, Sozialwissenschaften, Politikwissenschaften, Politische Bildung, Ethik

Allgemeines: Planspiele eignen sich gut für einen argumentativen Rollenwechsel und das Hineinversetzen in die Argumentation unterschiedlicher Akteure im Kontext eines Konfliktes oder im Fall gegensätzlicher Interessen. Dies ist häufig im Fall der Errichtung von Windkraftanlagen oder Windparks gegeben, aber auch der Bau von Kleinwindenergieanlagen in eher bebauten Regionen kann zu Widerständen und Einwänden seitens der Nachbarschaft führen. Daher ist die Durchführung eines Planspiels für dieses Themenfeld gut eignet.

Lernkompetenz: SuS lernen verschiedene Positionen u. Argumente für und gegen die Errichtung von Windparks kennen und versetzen sich in die Lage unterschiedlicher Akteure. Sie lernen sachlich zu begründen, auf andere Argumente einzugehen und reflektieren sich sowie andere hinsichtlich ihres Auftretens.

Dauer	Beschreibung	Hilfsmittel
<b>10 min</b>	<p>Durchführung des Planspiels „Windkraftkonflikt“ des Wissenschaftsladens Bonn.</p> <p>Aufteilung des Kurses mit Hilfe der Rollenlose in Gruppen bzw. Einzelpersonen. Diese erhalten jeweils eine Spielmappe mit den für die jeweilige Rolle relevanten Materialien.</p>	<p>Planspiel:  <a href="http://www.wila-planspiele.de/de/planspiele/windenergie.html">http://www.wila-planspiele.de/de/planspiele/windenergie.html</a></p> <p>Die Rollenverteilung muss auf die 9 TN des Kurses zugeschnitten werden,                      d. h.                      2 Gemeinderäte                      2 Vertreter der Bürgerinitiative Gegenwind                      1 Vertreter des Windparkinvestors Powerwind                      1 Vertreter des Naturschutzvereins                      2 Landwirte                      1 Moderator</p>
<b>30 min</b>	<p>Alle Gruppen erhalten den fiktiven Zeitungsartikel „Neue Skyline am Rhein“, der im Rahmen des Planspiels zur Verfügung gestellt wird. Anschließend gibt es für jede Gruppe, ihrer Rolle entsprechend, Material, mit dem sie sich auf die Diskussionsrunde vorbereiten.</p>	
<b>40 min</b>	<p>Die verschiedenen Akteure werden in Form einer Gruppe vertreten und unterscheiden sich in Diskutierende und Beobachtende. Ein Wechsel im Verlauf des Planspiels ist sinnvoll. Die Beobachter/innen sitzen hinter ihren Partner/inne/n. Nun beginnt das eigentliche Spiel. Die Leitung der Bürgerversammlung übernimmt die Rolle der Moderatorin/des Moderators. Sie/Er eröffnet die Sitzung und fordert auf, den an der Sitzung Teilnehmenden die Argumente vorzutragen. Haben alle Gruppen ihre Position vorgestellt, beginnt die freie Diskussion. Dabei versucht der Moderator zwischen den Gruppen zu vermitteln. Er sorgt dafür, dass am Ende der 40 Minuten ein Lösungsvorschlag präsentiert wird, über den abgestimmt werden kann.</p>	

**10 min** Abschließend wird das Planspiel mit Hilfe des entsprechenden Arbeitsbogens (M12) ausgewertet und die Selbsteinschätzung durchgeführt, die Beobachter geben ihren Partnern mit Hilfe ihrer Notizen eine Rückmeldung.

## 6.9 Beteiligung beim Bau und Betrieb von Windkraftanlagen

Geeignet für folgende Fächer: Wirtschaft-Arbeit-Technik, Sozialwissenschaften, Politikwissenschaften, Politische Bildung, Ethik

Allgemein: Verfahren der Beteiligung und der Teilhabe sind von wesentlicher Bedeutung, um eine Akzeptanz für Windkraftanlagen zu erzielen. Besonders auf der lokalen Ebene bedarf es daher einer Beteiligung der Bevölkerung und Strategien der Teilhabe im Vorfeld von geplanten Anlagen. Erfolgt dies nicht, so sind häufig Widerstände und Ablehnungen gegen neue WKA beobachtbar.

Lernkompetenz: SuS lernen zunächst grundsätzliche Aspekte von Akzeptanz- und Beteiligungsstrategien kennen. Sie erhalten Informationen zur Unterscheidung von formellen und informellen Beteiligungsverfahren und bekommen Einblicke in konkrete Teilhabebeispiele.

### Auswahl an Videos:

- Kurzfilme mit Beispielen der Beteiligung in der Mediathek der Agentur für Erneuerbare Energien:
- o <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/filme-animationen/>

### Weiterführende Links/Internetseiten bzw. Material für die Unterrichtseinheit:

- Artikel von Frau Dr. Petra Schweizer Ries zum Thema "Akzeptanz- und Partizipationsforschung zu Energiehaltung" aus dem Themenheft des Forschungsverbund Erneuerbare Energien zum Thema „Transformationsforschung für ein nachhaltiges Energiesystem“ vom 01.07.2011
- o [http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2011-2/th2011\\_07\\_01.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2011-2/th2011_07_01.pdf)

Beteiligungsleitfaden Windenergie des BUND und NABU

- o [https://www.bund-bawue.de/fileadmin/bawue/pdf\\_datenbank/PDF\\_zu\\_Themen\\_und\\_Projekte/klima\\_und\\_energie/dialogforum/Beteiligungsleitfaden\\_Windenergie\\_NABU\\_BUND\\_2014.pdf](https://www.bund-bawue.de/fileadmin/bawue/pdf_datenbank/PDF_zu_Themen_und_Projekte/klima_und_energie/dialogforum/Beteiligungsleitfaden_Windenergie_NABU_BUND_2014.pdf)

- Studie des Instituts für ZukunftsEnergieSysteme zu den Nutzeneffekten von Bürgerenergie:
  - o [http://www.buendnis-buergerenergie.de/fileadmin/user\\_upload/Studie\\_Nutzeffekte\\_von\\_Buergerenergie\\_17092015.pdf](http://www.buendnis-buergerenergie.de/fileadmin/user_upload/Studie_Nutzeffekte_von_Buergerenergie_17092015.pdf)
  
- Studie der Leuphana Universität Lüneburg zum Stand der Energiegenossenschaften in Deutschland
  - o [https://www.buendnis-buergerenergie.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/Studien/Studie\\_Zum\\_Stand\\_von\\_Energiegenossenschaften\\_in\\_Deutschland\\_Leuphana.pdf](https://www.buendnis-buergerenergie.de/fileadmin/user_upload/downloads/Studien/Studie_Zum_Stand_von_Energiegenossenschaften_in_Deutschland_Leuphana.pdf)
  
- Bericht des Magazins „Panorama“ zum Thema „Neodym in Windkraftanlagen“ unter dem Titel „Das schmutzige Geheimnis sauberer Windräder“ vom 28.04.2011
  - o <http://daserste.ndr.de/panorama/archiv/2011/windkraft189.html>

Dauer	Beschreibung	Hilfsmittel
<b>20 min</b>	Einführung in die grundsätzlichen Aspekte von Akzeptanz und Beteiligung, mittels des Artikels „Akzeptanz- und Partizipationsforschung zu Energienachhaltigkeit“ von Frau Prof. Dr. Petra Schweizer-Ries im FVEE Themenheft 2011	<a href="http://bit.ly/1SMePTb">http://bit.ly/1SMePTb</a>
<b>10 min</b>	2 Kurzfilme zu Beispielen:  Gemeinsame Planung von Windkraft im Odenwaldkreis in Hessen und Direktvermarktung von Windenergie	Film 1: <a href="http://bit.ly/1WIdgy9">http://bit.ly/1WIdgy9</a>  Film 2: <a href="http://bit.ly/1Zcerh6">http://bit.ly/1Zcerh6</a>
<b>30 min</b>	Arbeitsgruppenphase zu Akzeptanz und möglichen Akzeptanzproblemen:  1. AG Sichtung des Beteiligungsleitfadens Windenergie. Mögliche Fragen hierzu: Welche Beteiligungsmöglichkeiten haben Verbände? Welche Beteiligungsverfahren gibt es?	Beteiligungsleitfaden Windenergie des BUND und NABU: <a href="http://bit.ly/1T16AEH">http://bit.ly/1T16AEH</a>

2. AG Sichtung der Studie des Instituts für ZukunftsEnergieSysteme zu den Nutzeffekten von Bürgerenergie. Mögliche Fragen hierzu: Welche zentralen Effekte werden genannt und wie beurteilen Sie diese? <http://bit.ly/1ruxYPI>
3. AG Sichtung der Studie der Leuphana Universität Lüneburg: Zum Stand von Energiegenossenschaften in Deutschland. Mögliche Fragen hierzu: Wie beurteilen Sie die Dynamik der Gründungen und welche Veränderungen haben sich in den vergangenen Jahren bis 2014 ergeben? Worauf führen Sie das zurück? <http://bit.ly/23oRYi5>
4. AG Kritische Auseinandersetzung mit der Windkraft: Neodym in Windkraftanlagen. Mögliche Fragen hierzu: Welche Folgen könnte ein dauerhafter Einsatz für die gesellschaftliche Akzeptanz haben. Wie beurteilen Sie diesen Sachverhalt? <http://bit.ly/1MUPELv>

**20 min** Präsentationen der Arbeitsgruppen zu ihren Erkenntnissen

## 7. Praktikumsbeschreibung

### 7.1 Allgemein

Die folgenden Aufgabenbeschreibungen wurden bereits im Unterricht an einem Oberstufenzentrum in Berlin erprobt. Die Aufgaben werden mithilfe der IEC 61400-12 (International Electrotechnical Commission) bearbeitet. Die SuS waren angehalten, die Aufgaben innerhalb der Gruppen selbstständig zu bearbeiten und nur wenn zwingend erforderlich gemeinsam zu bearbeiten. Den Schülern müssen folgende Hilfsmittel zur Verfügung stehen:

- Computer mit MS EXCEL, MS Powerpoint (oder vergleichbares) und ggf. Gimp
- Internetzugang und
- Maßband.

### 7.2 Arbeitsblätter

Die Aufgaben beinhalten die Auseinandersetzung mit EXCEL-Tabellen. Sofern nicht vorgefertigte Tabellen mit den entsprechenden Formeln bereits ausgegeben werden, müssen die SuS entsprechende Fertigkeiten im Umgang mit EXCEL bereits haben, da andernfalls die Bearbeitung eine erhöhte Unterstützung durch den Betreuer erfordert bzw. der zeitliche Rahmen für die Bearbeitung schnell überschritten werden kann.

Gewisse Aufgaben erfordern überdies eine Vorstellungskraft über die Strömungsbeeinflussung verschiedener physikalischer Körper, weshalb eine kurze Einführung in die Strömungsphysik sinnvoll ist.

Die Arbeitsblätter enthalten Ausschnitte aus der Richtlinie IEC 61400-12, sodass den SuS ein Eindruck vom Umfang und der Detailtiefe einer Messkampagne zur Leistungskurvenvermessung vermittelt werden kann. In den Ausschnitten sind Verweise auf Anhänge und Abschnitte angegeben, die in den Arbeitsblättern eventuell nicht enthalten sind, für die Bearbeitung der Aufgaben aber auch nicht zwingend erforderlich sind.

Die Arbeitsblätter befassen sich mit den drei Themen:

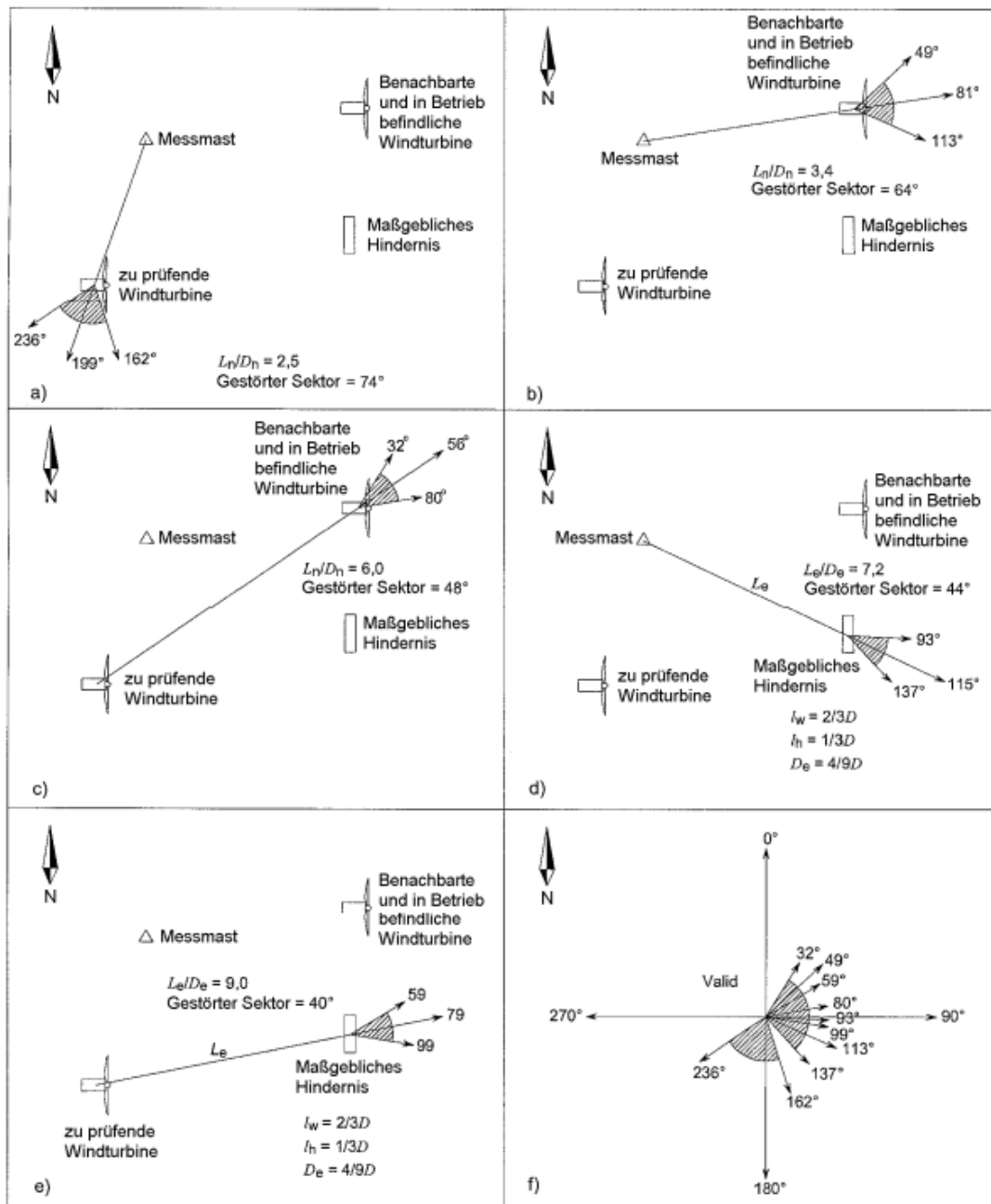
- Standortbewertung
- Messsystem und
- Messkampagne

und sind derart gestaltet, dass bei entsprechender Vorbereitung, die einzelnen Aufgaben auch separat bearbeitet und gelöst werden können.

### 7.2.1 Standortbewertung

#### Aufgabe 1 (ca. 20 min):

Mithilfe von Maßband, Stift und Zettel wird Skizze entworfen und der Standort dokumentiert. Ergebnis soll eine Draufsicht-Skizze des Standortes sein mit den Abständen der Hindernisse zu KWEA und Mast, nicht zu vergessen die Ausdehnung der Hindernisse. Erforderlich ist des Weiteren ein Referenzmaß für das Eintragen ins Satellitenbild.





Die Bilder zeigen die Sektoren, die auszuschließen sind, wenn:

- a) der Messmast im Nachlauf der zu vermessenden WEA steht;
- b) der Messmast im Nachlauf einer benachbarten und in Betrieb befindlichen WEA steht;
- c) die WEA im Nachlauf einer benachbarten und in Betrieb befindlichen WEA steht;
- d) der Messmast im Nachlauf eines maßgeblichen Hindernisses steht;
- e) die WEA im Nachlauf eines maßgeblichen Hindernisses steht;
- f) alle oben genannten Einflüsse a) bis e) kombiniert sind.

### Aufgabe 2 (ca. 20 min):

In Satellitenbild von [maps.google.de](https://maps.google.de) oder auch [www.deine-berge.de](http://www.deine-berge.de) werden die Abmessungen eingezeichnet, außerdem die Anordnung von Messmast/WEA und Hindernissen durch Winkel und Entfernung bestimmt. In 3D-Visualisierung von [maps.google.de](https://maps.google.de) ggf. weitere Hindernisse identifizieren.

### Aufgabe 3 (ca. 15 min):

Es werden die Anströmungsverhältnisse am Standort visualisiert:

- Dachkantenablösung (4 Windrichtungen in 4 Skizzen)
- Windverhältnisse auf Dach mit Draufsicht (4 Windrichtungen in 4 Skizzen)

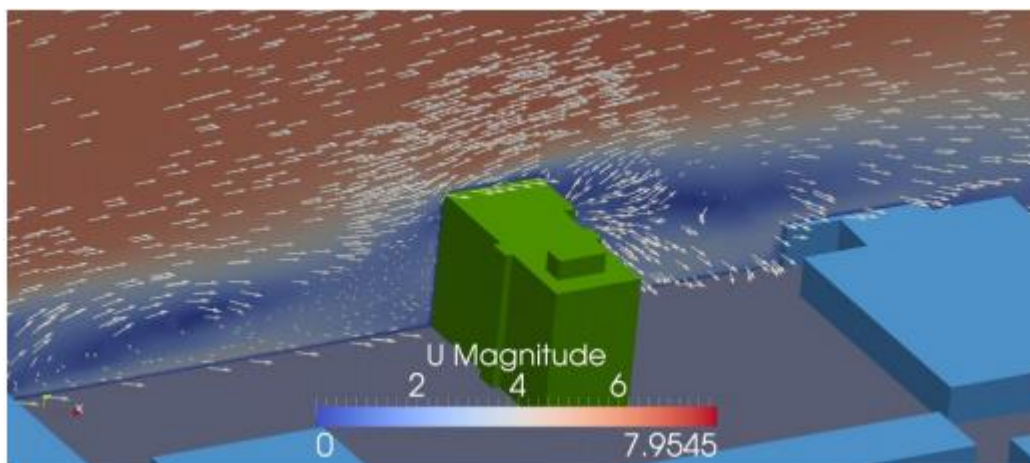


Abbildung 7: Beispielhafte Strömungsvisualisierung [Quelle: HTW Berlin]

**Aufgabe 4 (ca. 30 min):**

Mithilfe der vorhandenen EXCEL-Tabelle werden die Einflüsse der Hindernisse auf die Messung bewertet, siehe auch Auszug aus IEC 61400-12. Die EXCEL-Tabelle muss durch Formeln ergänzt werden.

*Optional: Zusätzlich soll eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, inwiefern die Parameter das Ergebnis beeinflussen.*

**Anforderungen in Bezug auf Hindernisse**

Es dürfen keine maßgeblichen Hindernisse (z. B. Gebäude, Bäume, WEA in Parkstellung) im Messsektor innerhalb einer bestimmten Entfernung von der WEA und vom Messmast stehen. Kleinere Gebäude, die mit der WEA oder dem Messsystem verbunden sind, sind zulässig.

Zur Vorhersage des Einflusses von Hindernissen auf den Mast und die Anlagenposition in Nabenhöhe ist ein Hindernismodell anzuwenden. Das Kriterium zur Ermittlung eines maßgeblichen Hindernisses ist, dass die Anströmung zwischen der Anlagenposition auf Nabenhöhe und dem Messmast auf Nabenhöhe bei einer beliebigen Windrichtung im Messsektor um mindestens 1 % beeinflusst wird.

Der Einfluss eines Hindernisses auf den Messmast oder die Anlagenposition in der Höhe  $z$  wird ermittelt nach:

$$\Delta U_z / U_h = -9,75(1 - P_0) \frac{h}{x} \eta \exp(-0,67\eta^{1,5}) \quad (\text{A.1})$$

$$\eta = \frac{H}{h} \left( K \frac{x}{h} \right)^{\frac{-1}{n+2}} \quad (\text{A.2})$$

$$K = \frac{2\kappa^2}{\ln \frac{h}{z_0}} \quad (\text{A.3})$$

Dabei ist

- $x$  die Entfernung eines nachgelagerten Hindernisses zum Messmast oder zur WEA [m];
- $h$  die Höhe des Hindernisses [m];
- $U_h$  die freie Windgeschwindigkeit in der Höhe  $h$  des Hindernisses [m/s];
- $n$  der Exponent des Geschwindigkeitsprofils ( $n = 0,14$ );
- $P_0$  die Völligkeit des Hindernisses (0: massiv, 1: kein Hindernis);
- $H$  die Nabenhöhe [m];
- $z_0$  die Rauigkeitslänge [m];
- $\kappa$  die von-Karman-Konstante 0,4.

**Aufgabe 5 (ca. 30 min):**

Anschließend werden die Messsektoren berechnet mit entsprechendem EXCEL-Tool. Berechnungsgrundlage bietet wieder die IEC 61400-12. Die EXCEL-Tabelle muss mit entsprechenden Formeln ergänzt werden.

Sektoren mit einem maßgeblichen Hindernis müssen unter Bezugnahme auf Bild A.1 ausgeschlossen werden. Die zu berücksichtigenden Maße sind die jeweilige Entfernung  $L_e$  und der äquivalente Rotordurchmesser  $D_e$  des Hindernisses. Der äquivalente Rotordurchmesser des Hindernisses wird bestimmt durch:

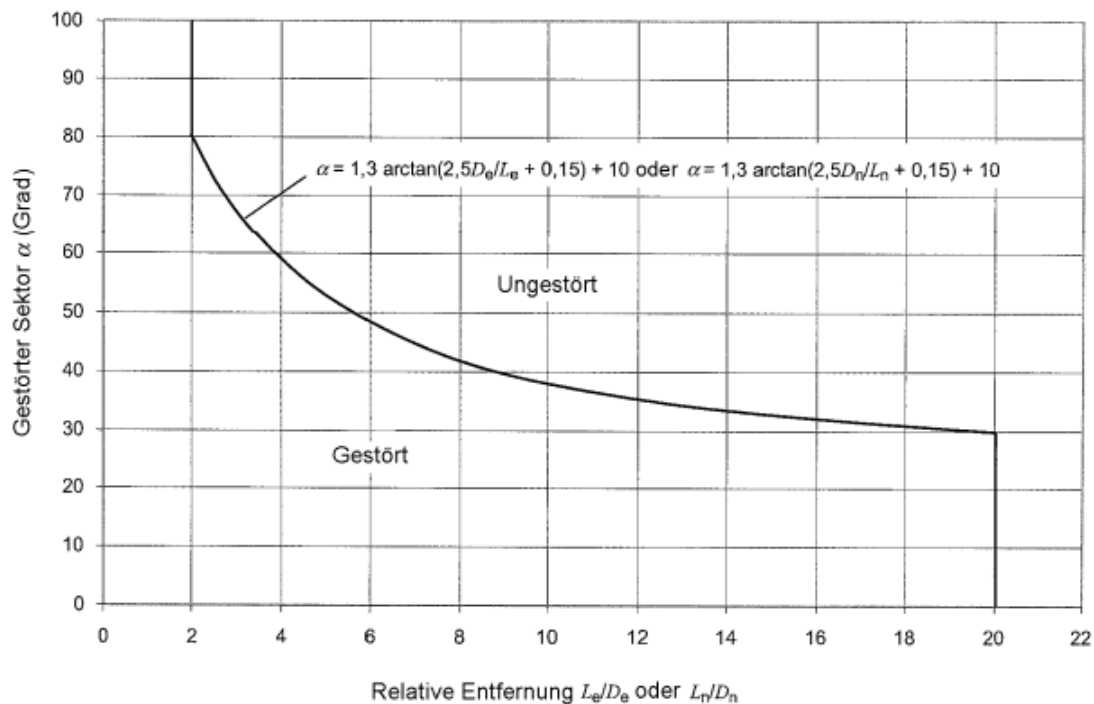
$$D_e = \frac{2l_h l_w}{l_h + l_w} \quad (\text{A.4})$$

Dabei ist

$D_e$  der äquivalente Rotordurchmesser;

$l_h$  die Höhe des Hindernisses;

$l_w$  die Breite des Hindernisses.



**Bild A.1 – Auszuschließende Sektoren aufgrund der Nachlaufströmung benachbarter und in Betrieb befindlicher WEA und maßgeblicher Hindernisse**

**Aufgabe 6 (ca. 15 min):**

Die Erkenntnisse aus den Berechnungen werden im Satellitenbild oder skizzenhaft festgehalten. Beispiel siehe Abbildung 8.

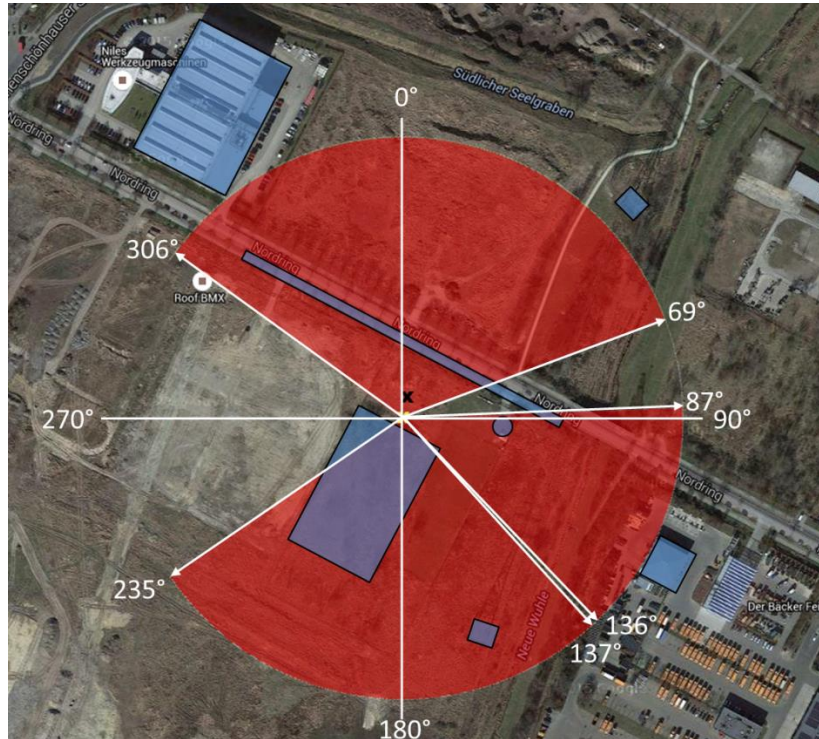


Abbildung 8: Beispiel für Visualisierung der Messsektoren an Standort für Leistungskurvenvermessung [Quelle: RLI]

## 7.2.2 Messsystem

### Aufgabe 1 (ca. 60 min):

Recherche der verschiedenen Messverfahren (Internet und andere Quellen) zur Ermittlung der erforderlichen Messgrößen inkl. Skizze für Messaufbau und ggf. Gleichungen aus IEC etc. (Messverfahren):

- elektrische Leistung (Stromwandler, Spannungsmessung)
- Drehzahl (optisch, induktiv etc.)
- Blattwinkel (optisch, induktiv, etc.)
- Datenerfassungssystem (SPS, digi./ana E/A, Protokolle)

### **Elektrische Leistung**

Die elektrische Nettoleistung der WEA ist mit Hilfe eines Leistungsmessgerätes (z. B. Leistungsmessumformer) zu messen und beruht auf der Strom- und Spannungsmessung an jeder Phase.

Die Genauigkeitsklasse des Stromwandlers muss die Anforderungen von **IEC 60044-1** erfüllen und die Genauigkeitsklasse des Spannungswandlers, falls verwendet, muss die Anforderungen von IEC 60186 erfüllen. Es muss Klasse 0,5 oder besser verwendet werden.

Die Genauigkeit des Leistungsmessgerätes muss, falls es sich um einen Leistungsmessumformer handelt, den Anforderungen von IEC 60688 entsprechen und es muss die Genauigkeitsklasse 0,5 oder besser verwendet werden. Falls das Leistungsmessgerät kein Leistungsmessumformer ist, sollte die Genauigkeit der Klasse 0,5 eines Leistungsmessumformers entsprechen. Der Betriebsbereich des Leistungsmessgerätes muss dafür ausgelegt sein, alle positiven und negativen momentanen Leistungsspitzen zu messen, die von der WEA erzeugt werden. Zur Orientierung sollte der gesamte Messbereich des Leistungsmessgerätes auf – 50 % bis 200 % der Bemessungsleistung der WEA ausgelegt sein. Alle Daten müssen während der Messung regelmäßig kontrolliert werden, um sicherzugehen, dass die Bereichsgrenzen des Leistungsmessgerätes nicht überschritten worden sind. Der Leistungsmessumformer muss nach bezeichneten Normen kalibriert werden. Das Leistungsmessgerät muss zwischen WEA und elektrischem Anschluss angebracht werden, um sicherzustellen, dass nur die elektrische Nettowirkleistung (d. h. verringert um den Selbstverbrauch) gemessen wird. Es muss angegeben werden, ob die Messungen auf der Anlagenseite oder auf der Netzseite des Transformators durchgeführt wurden.

### **Drehzahl und Blatteinstellwinkel**

Wenn der Bedarf besteht, z. B. wenn Messungen im Zusammenhang mit Geräuschmessungen durchgeführt werden, sollten während der gesamten Messung die Drehzahl und der Blatteinstellwinkel gemessen werden. Falls diese Messungen vorgenommen werden, müssen die Ergebnisse nach [Abschnitt 9](#) dokumentiert werden.

### **Regelungssystem der WEA**

Für die Anwendung der Ablehnungskriterien nach [7.4](#) müssen genügend Statussignale erfasst, verifiziert und überwacht werden. Es ist ausreichend, diese Parameter aus dem Datensystem der WEA-Regelung, soweit vorhanden, auszukoppeln<sup>3</sup>. Die Definition jedes Statussignals ist aufzuzeichnen.

### **Datenerfassungssystem**

Zur Erfassung der Messwerte und zum Speichern der vorverarbeiteten Daten ist ein digitales Datenerfassungssystem mit einer Abtastrate von mindestens 1 Hz je Kanal zu verwenden.

Die Kalibrierung und die Genauigkeit der Kette des Datensystems (Übertragung, Signalverarbeitung und Datenaufzeichnung) sind zu überprüfen, indem bekannte Signale an den Messwandlerenden eingespeist und diese Eingabewerte mit den aufgezeichneten Ablesewerten verglichen werden. Zur Orientierung gilt, dass die Unsicherheit des Datenerfassungssystems im Vergleich zur Unsicherheit der Messfühler vernachlässigbar sein sollte.

**Aufgabe 2 (ca. 15 min):**

Leitungsplan: schematischer Aufbau des Messsystems mit genauer Identifizierung der Messkomponenten und –orte für die KWEA

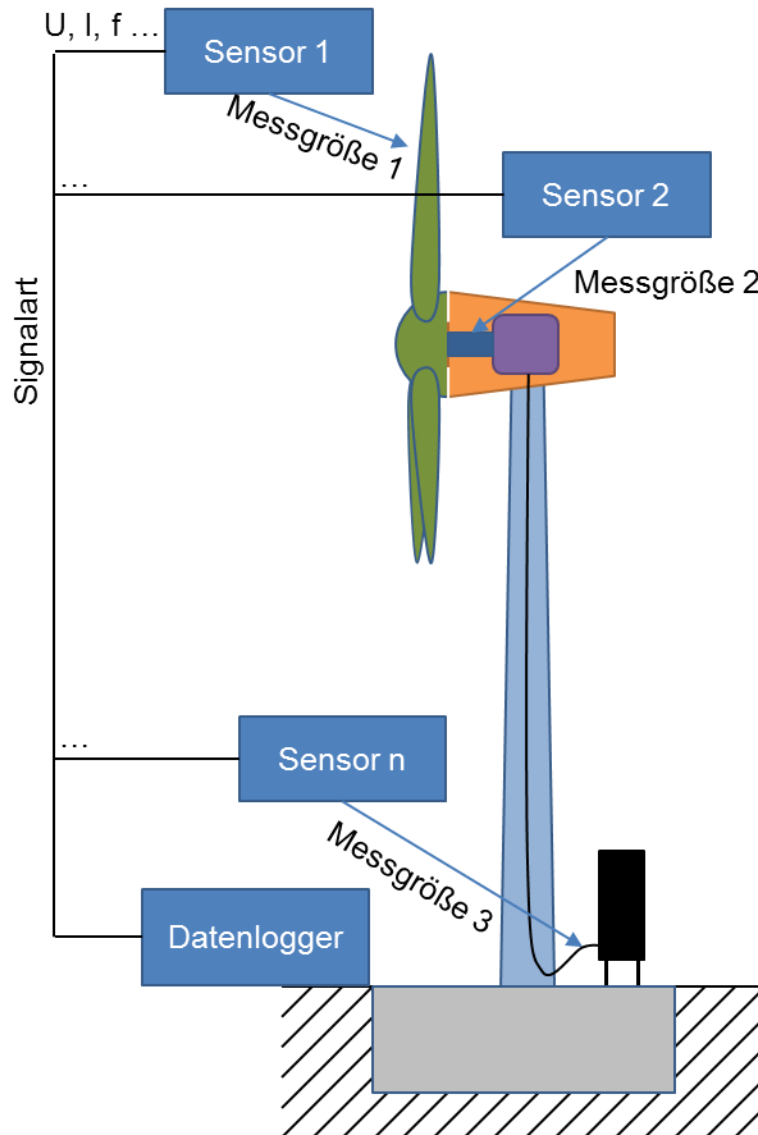


Abbildung 9: Beispiel für Prinzipskizze des Messsystemaufbaus

### Aufgabe 3 (ca. 60 min):

Recherche der verschiedenen Messverfahren zur Ermittlung der erforderlichen Messgrößen inkl. Skizze für Messaufbau und ggf. Gleichungen aus IEC etc. (Messverfahren):

- Windgeschwindigkeit (Schalenkreuz-/Ultraschallanemometer, LIDAR)
- Windrichtung (Windfahne, Ultraschallanemometer, etc.)
- Luftdichte – Herleitung (Druck, Temperatur, Feuchte)

### **Windgeschwindigkeit**

Die Windgeschwindigkeit muss mit einem Schalenkreuzanemometer gemessen werden, das die Anforderungen von [Anhang I](#) erfüllt. Für Messungen des Leistungsverhaltens ist ein Anemometer mit einer Genauigkeitsklasse besser 1,7A zu verwenden. Außerdem wird empfohlen, in einem Gelände, dass nicht die Anforderungen von [Anhang B](#) „Keine Standortkalibrierung erforderlich“ erfüllt, eine Klasse besser als 2,5B oder 1,7S zu verwenden. Die zu messende Windgeschwindigkeit ist definiert als der Mittelwert des Betrages der horizontalen Komponente des momentanen Windgeschwindigkeitsvektors<sup>2</sup> einschließlich lediglich der longitudinalen und lateralen Turbulenzanteile, jedoch nicht der vertikalen Turbulenzanteile. Folglich sollte die Winkelabhängigkeit des Schalenkreuzanemometers eine Kosinusform besitzen (siehe [Anhang J](#)). Alle dokumentierten Windgeschwindigkeiten und alle mit den Betriebskennwerten verbundenen Unsicherheiten müssen sich auf diese Definition der Windgeschwindigkeit beziehen.

Das Schalenkreuzanemometer muss vor der Messkampagne kalibriert und nach Abschluss der Messkampagne nachkalibriert werden. Der Unterschied der Regressionsgeraden der Vor- und der Nachkalibrierung muss im Bereich von 6 m/s bis 12 m/s innerhalb von  $\pm 0,1$  m/s liegen. Für die Messung des Leistungsverhaltens darf nur die Kalibrierung vor der Messkampagne benutzt werden. Die Kalibrierung des Schalenkreuzanemometers muss nach dem Verfahren im [Anhang F](#) durchgeführt werden. Während der Kalibrierung muss das Schalenkreuzanemometer an einem vertikalen Rohr befestigt sein, ähnlich wie es während der Messung des Leistungsverhaltens verwendet wird.

Als ungünstigere Alternative zur Nachkalibrierung muss dokumentiert werden, dass das Schalenkreuzanemometer die Kalibrierung über die Dauer des Messzeitintervalls beibehält. Es sollte das Verfahren nach [Anhang K](#) verwendet werden.

Das Schalenkreuzanemometer ist bezogen auf den Fußpunkt des Messmastes innerhalb von  $\pm 2,5$  % der Nabenhöhe anzubringen. Es gelten die im [Anhang G](#) angegebenen Anforderungen an die Montage.

Die Unsicherheit der Windgeschwindigkeitsmessung leitet sich aus drei Quellen ab (siehe [Tabelle D.1](#)): aus der Kalibrierung der Messgeräte, aus den Betriebskennwerten des Anemometers und aus der Störung der Anströmung durch die Montage der Messgeräte. Die Unsicherheit der Kalibrierung wird nach [Anhang F](#) ermittelt. Die Unsicherheit aufgrund der Betriebskennwerte wird nach der Klassifikation der Windmessung nach [Anhang I](#) ermittelt. Die Unsicherheit aufgrund der Montage wird nach [Anhang G](#) ermittelt.

### **Windrichtung**

Die Windrichtung sollte mit einer Windfahne gemessen werden. Die dafür benutzte Windfahne muss an einem Ausleger des Messmastes befestigt werden, wie im [Anhang G](#) beschrieben. Die kombinierte Unsicherheit der Windrichtungsmessung aus Kalibrierung, Betrieb und Ausrichtung sollte kleiner als  $5^\circ$  sein.

### **Luftdichte**

Die Luftdichte wird aus der Messung der Lufttemperatur und des Luftdruckes mittels Gleichung (1) abgeleitet. Bei hohen Temperaturen wird empfohlen, zusätzlich die relative Luftfeuchte zu messen und danach zu korrigieren. Die Dichtewirkung der Luftfeuchte muss mit Gleichung (F.1) korrigiert werden.

Der Lufttemperaturfühler und gegebenenfalls der Feuchtemessfühler müssen innerhalb von 10 m Abstand zur Nabenhöhe angebracht werden, um die Lufttemperatur im Zentrum des WEA-Rotors möglichst genau wiederzugeben.

Der Luftdruckmessfühler sollte am Messmast nahe der Nabenhöhe angebracht werden, um den Luftdruck im Zentrum des WEA-Rotors möglichst genau wiederzugeben. Wenn der Luftdruckmessfühler nicht in der Nähe der Nabenhöhe angebracht ist, sind die Luftdruckmessungen nach ISO 2533 auf die Nabenhöhe zu korrigieren.

**Aufgabe 4 (ca. 15 min):**

Leitungsplan: schematischer Aufbau des Messsystems mit genauer Identifizierung der Messkomponenten und –orte für den Windmessmast

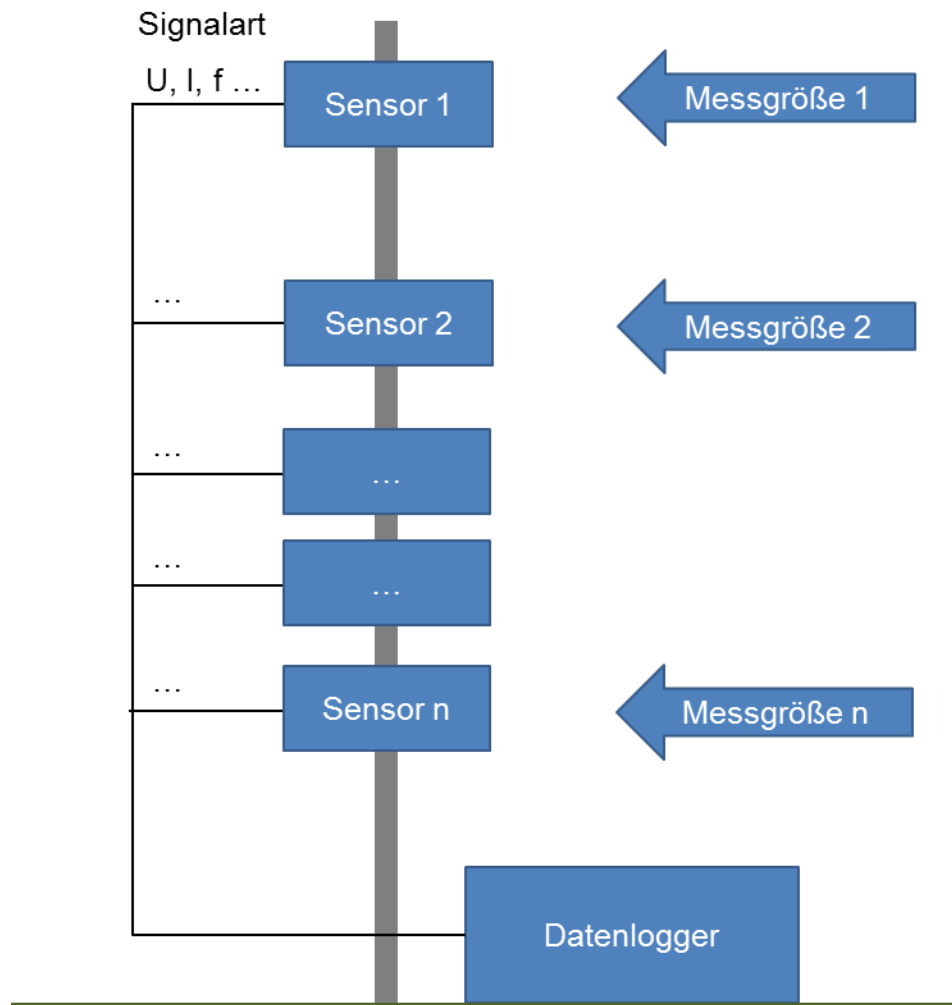


Abbildung 10: Beispiel für Prinzipskizze des Messsystemaufbaus



### 7.2.3 Messkampagne

#### Aufgabe 1 (ca. 15 min):

Recherche der Eckdaten für die Messkampagne entsprechend der IEC 61400-12:

- Messbedingungen, Messdauer, Datenumfang, Messfrequenz

#### Aufgabe 2 (ca. 15 min):

Systematik der Auswertetabelle für Messdatenauswertung erfassen (nach Möglichkeit durch Grafik unterstützen):

- was passiert, wenn nicht genügend Daten vorhanden?

#### Aufgabe 3 (ca. 15 min):

Wie werden die Daten aufbereitet für die anschließende Auswertung? (nach Möglichkeit durch Grafik unterstützen)

- Mittelung, Normierung o.a.
- Methodik erfassen

### Messverfahren

Das Ziel des Messverfahrens ist die Aufzeichnung von Daten, die eindeutig festgelegten Kriterien genügen, um sicherzustellen, dass die Daten quantitativ und qualitativ ausreichen, um das Leistungsverhalten der WEA hinreichend genau zu bestimmen. Das Messverfahren muss nach [Abschnitt 9](#) dokumentiert werden, so dass jeder einzelne Verfahrensschritt und jede Messbedingung überprüft und gegebenenfalls wiederholt werden kann.

Die Genauigkeit der Messungen ist in Form der Messunsicherheiten, wie im [Anhang D](#) beschrieben, auszudrücken. Im Laufe der Messungen sollten die Daten regelmäßig kontrolliert werden, um eine hohe Qualität und die Wiederholbarkeit der Messergebnisse zu sichern. Zur Dokumentation aller wichtigen Ereignisse während der Messung des Leistungsverhaltens muss ein Protokoll geführt werden.

### Betrieb der WEA

Im Laufe der Messung muss die WEA im Normalbetrieb arbeiten, wie es im Betriebshandbuch der WEA beschrieben ist, und die Konfiguration der Maschine darf nicht verändert werden. Der Betriebsstatus der WEA muss mit den Statussignalen nach [Abschnitt 9](#) aufgezeichnet werden. Während der Messung muss die übliche Wartung der Anlage durchgeführt werden, jedoch sind diese Arbeiten im Messprotokoll zu dokumentieren. Spezielle Wartungsarbeiten wie häufige Blattreinigung, die darauf ausgerichtet sind, die Leistungsfähigkeit während der Messung zu erhalten, müssen im Einzelnen beschrieben werden. Solche speziellen Wartungsarbeiten sollen nicht durchgeführt werden, wenn sie nicht von allen Vertragspartnern vor Beginn der Messung vereinbart worden sind.

### Datenerfassung

Die Daten müssen kontinuierlich mit einer Abtastrate von 1 Hz oder höher erfasst werden. Lufttemperatur, Luftdruck, WEA-Status und Niederschlag dürfen, falls sie gemessen werden, mit einer geringeren Abtastrate erfasst werden, mindestens aber einmal je Minute.

Das Datenerfassungssystem muss entweder die Abtastwerte oder die Statistik der Datensätze wie folgt speichern:

- Mittelwert;
- Standardabweichung;

- Größtwert;
- Kleinstwert.

Die erfassten Datensätze basieren auf Zeiträumen von 10 min, über die lückenlos Messwerte vorliegen. Es müssen so lange Daten erfasst werden, bis die in 7.6 festgelegten Anforderungen erfüllt sind.

### Ablehnung von Daten

Um sicherzustellen, dass nur Daten aus normalen Betriebszuständen der Anlage in der Auswertung verwendet werden, und um zu gewährleisten, dass Daten nicht verfälscht sind, müssen Datensätze aus der Datenbasis unter folgenden Bedingungen ausgeschlossen werden:

- die externen Bedingungen mit Ausnahme der Windgeschwindigkeit liegen außerhalb des Betriebsbereiches der WEA;
- die Anlage kann wegen einer Fehlerbedingung der WEA nicht betrieben werden;
- die Anlage wurde von Hand abgeschaltet oder befindet sich im Probe- oder Wartungsbetrieb;
- Ausfall oder Beeinträchtigung (z. B. durch Vereisung) der Messeinrichtungen;
- Windrichtung außerhalb des Messsektors (der Messsektoren) nach 5.2.2;
- Windrichtungen außerhalb der gültigen (vollständig eingemessenen) Sektoren aus der Standortkalibrierung.

Jedes andere Ablehnungskriterium ist eindeutig zu dokumentieren.

Die Leistungskurve muss die Hystereseeffekte beim Einschalt-Regelungsalgorithmus sowie den Effekt parasitärer Verluste unterhalb der Einschaltwindgeschwindigkeit erfassen. Der Effekt einer großen Hystereseschleife auf die Leistungskurve im Ausschalt-Regelungsalgorithmus kann beträchtlich sein. Falls während der Messung das Ausschaltverhalten erreicht worden ist, müssen zwei Datensätze vorgelegt werden. Ein Datensatz muss alle Datenpunkte in der Datenbasis enthalten (Datenbasis A). Der andere Datensatz muss alle Daten ausschließen, bei denen die Anlage die Energieerzeugung aufgrund des Ausschaltens bei hoher Windgeschwindigkeit eingestellt hat (Datenbasis B)<sup>4</sup>.

Teilmengen der Datenbasis, die unter besonderen Betriebsbedingungen (z. B. hohe Oberflächenrauigkeit der Blätter aufgrund von Staub, Salz, Insekten oder Eis) oder atmosphärischen Bedingungen (z. B. Niederschlag, Windgradient) während des Messzeitintervalls ermittelt wurden, können als besondere Datenbasis erfasst werden.

Sollte die Netzfrequenz um mehr als 2 Hz schwanken, könnte es angebracht sein, das Leistungsverhalten bei mehreren Frequenzpegeln als besondere Datenbasis zu erfassen. In diesen Fällen sollten die Netzfrequenzen in Frequenzbänder eingeteilt werden, die um die ganzzahligen Werte der Netzfrequenz zentriert sind.

### Korrektur der Daten

Für die erfassten Datensätze müssen die Windgeschwindigkeiten für die Störung der Anströmung aus der Standortkalibrierung (siehe 5.2) korrigiert werden und der Luftdruck muss korrigiert werden, falls dieser in einer anderen Höhe als Nabenhöhe gemessen wurde (siehe 6.4).

### Datenbasis

Nach der Normierung der Daten (siehe 8.1) müssen die erfassten Datensätze nach dem „BIN-Verfahren“ sortiert werden (siehe 8.2). Die erfassten Datensätze müssen mindestens einen Windgeschwindigkeitsbereich von 1 m/s unterhalb der Einschaltwindgeschwindigkeit bis zur 1,5fachen Windgeschwindigkeit bei 85 % der Bemessungsleistung der WEA abdecken. Alternativ muss der Windgeschwindigkeitsbereich von 1 m/s unterhalb der Einschaltwindgeschwindigkeit bis zu der Windgeschwindigkeit reichen, bei der die „gemessene AEP“ größer oder gleich 95 % der „extrapolierten AEP“ ist (siehe 8.3). Im Messbericht muss angegeben werden, welche der beiden Definitionen zur Bestimmung des Bereiches der gemessenen Leistungskurve benutzt wurde. Der Windgeschwindigkeitsbereich muss in lückenlose 0,5-m/s-BINs unterteilt werden, zentriert um ganzzahlige Vielfache von 0,5 m/s.

Die Datenbasis ist als vollständig zu betrachten, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- jedes BIN enthält Messwerte über mindestens 30 min,
- die Datenbasis enthält Messwerte über mindestens 180 h.

Sollte ein einziges unvollständiges BIN den Abschluss der Messung verhindern, kann der BIN-Wert durch lineare Interpolation der beiden benachbarten vollständigen BINs geschätzt werden. Die Leistungskurve bei hohen Windgeschwindigkeiten kann auf folgende Weise vervollständigt werden:

- für Windgeschwindigkeiten über der 1,6fachen Windgeschwindigkeit bei 85 % der Bemessungsleistung kann der Messsektor geöffnet werden.

Die folgende Bedingung muss durch diese beiden Maßnahmen erfüllt werden: Die mit erweiterten Verfahren gemessene AEP weicht um weniger als 1 % von der AEP ab, die bis zum höchsten vollständigen Windgeschwindigkeits-BIN für die erweiterten Verfahren extrapoliert wurde (für die Rayleigh-Verteilung in 8.3).

Die Datenbasis muss im Messbericht nach [Abschnitt 9](#) beschrieben werden.

### Normierung der Daten

Die erfassten Datensätze müssen auf zwei Referenzluftdichtewerte normiert werden. Der erste Wert ist die Luftdichte auf Meereshöhe unter Bezug auf die ISO-Normatmosphäre ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ ). Der andere Wert muss der Mittelwert der gemessenen Luftdichten am Messstandort während der Zeiträume der gültigen Datenerfassung sein, gerundet auf den nächsten  $0,05\text{-kg/m}^3$ -Wert. Es wird keine Normierung auf die tatsächliche mittlere Luftdichte benötigt, wenn diese innerhalb von  $1,225 \text{ kg/m}^3 \pm 0,05 \text{ kg/m}^3$  liegt. Alternativ kann die andere Normierung auf einen Nennluftdruck ausgeführt werden, der für den Standort vordefiniert ist. Die Luftdichte kann aus der gemessenen Lufttemperatur und dem gemessenen Luftdruck nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\rho_{10\text{min}} = \frac{B_{10\text{min}}}{R_0 \cdot T_{10\text{min}}} \quad (1)$$

Dabei ist

- $\rho_{10\text{min}}$  die abgeleitete Luftdichte, über 10 min gemittelt;
- $T_{10\text{min}}$  die gemessene absolute Lufttemperatur, über 10 min gemittelt;
- $B_{10\text{min}}$  der gemessene Luftdruck, über 10 min gemittelt;
- $R_0$  die Gaskonstante von trockener Luft mit  $287,05 \text{ J}/(\text{kg} \times \text{K})$ .

Bei einer WEA mit Stall-Regelung mit konstantem Blatteinstellwinkel und konstanter Drehzahl erfolgt die Datennormierung auf die gemessene Ausgangsleistung nach folgender Gleichung:

$$P_n = P_{10\text{min}} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_{10\text{min}}} \quad (2)$$

Dabei ist

- $P_n$  die normierte Ausgangsleistung;
- $P_{10\text{min}}$  die gemessene Leistung, über 10 min gemittelt;
- $\rho_0$  die Referenzluftdichte.

Bei einer WEA mit aktiver Leistungsregelung erfolgt die Normierung auf die Windgeschwindigkeit nach folgender Gleichung:

$$V_n = V_{10\text{min}} \left( \frac{\rho_{10\text{min}}}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad (3)$$

Dabei ist

$V_n$  die normierte Windgeschwindigkeit;

$V_{10\text{min}}$  die gemessene Windgeschwindigkeit, über 10 min gemittelt.

### Ermittlung der gemessenen Leistungskurve

Die gemessene Leistungskurve wird durch Anwenden der „BIN-Verfahren“ auf die normierten Datensätze ermittelt, wobei 0,5-m/s-BINs verwendet und die Mittelwerte der normierten Windgeschwindigkeit und der normierten Ausgangsleistung für jedes Windgeschwindigkeits-BIN nach folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \quad (4)$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad (5)$$

Dabei ist

$V_i$  die normierte und gemittelte Windgeschwindigkeit im BIN  $i$ ;

$V_{n,i,j}$  die normierte Windgeschwindigkeit des Datensatzes  $j$  im BIN  $i$ ;

$P_i$  die normierte und gemittelte Ausgangsleistung im BIN  $i$ ;

$P_{n,i,j}$  die normierte Ausgangsleistung des Datensatzes  $j$  in BIN  $i$ ;

$N_i$  die Anzahl der 10-min-Datensätze im BIN  $i$ .

Die Kurve der gemessenen Leistung ist, wie in [Abschnitt 9](#) beschrieben, darzustellen. Wenn während der Messung Ausschaltverhalten erreicht worden ist, müssen zwei Leistungskurven dargestellt werden. Leistungskurve A muss auf Datenbasis A beruhen und Leistungskurve B auf Datenbasis B, wie in 7.4 beschrieben. Beide Leistungskurven müssen nach [Abschnitt 9](#) dargestellt werden.

### Leistungsbeiwert

Der Leistungsbeiwert  $C_P$  der WEA muss zum Messergebnis hinzugefügt und, wie im [Abschnitt 9](#) beschrieben, angegeben werden.  $C_P$  muss aus der Kurve der gemessenen Leistung nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$C_{P,i} = \frac{P_i}{\frac{1}{2} \rho_0 A V_i^3} \quad (8)$$

Dabei ist

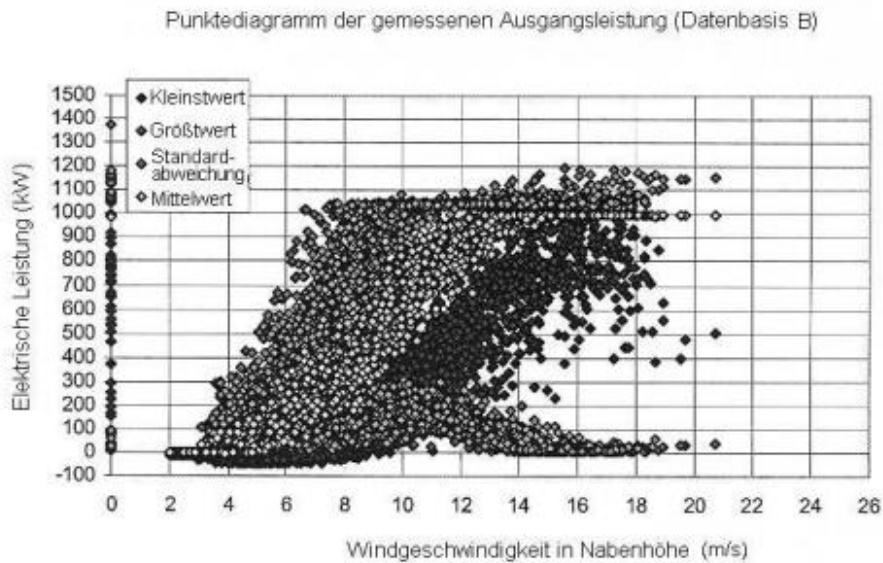
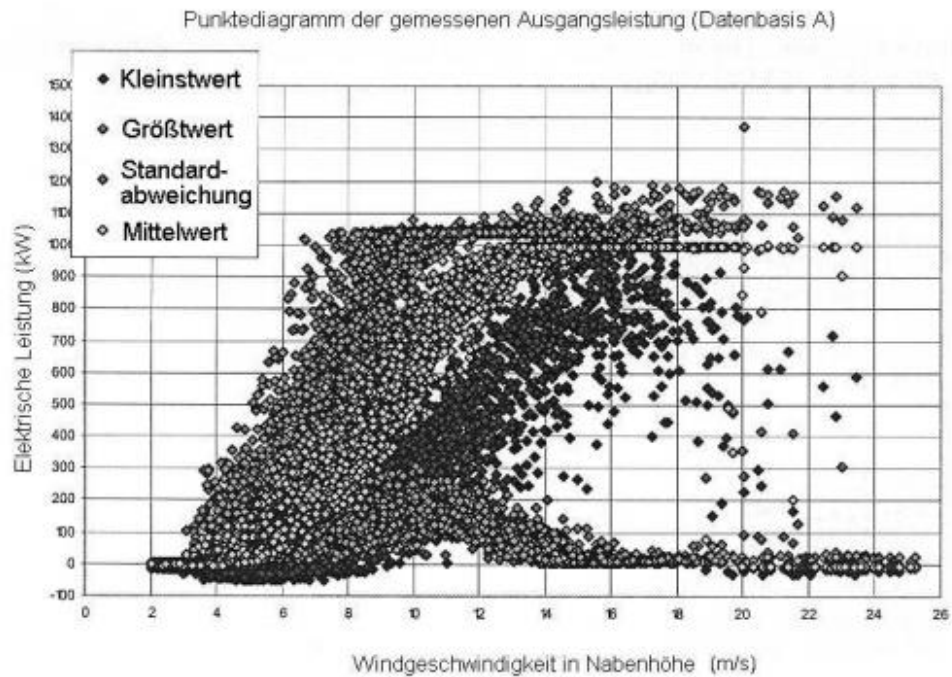
$C_{P,i}$  der Leistungsbeiwert im BIN  $i$ ;

$V_i$  die normierte und gemittelte Windgeschwindigkeit im BIN  $i$ ;

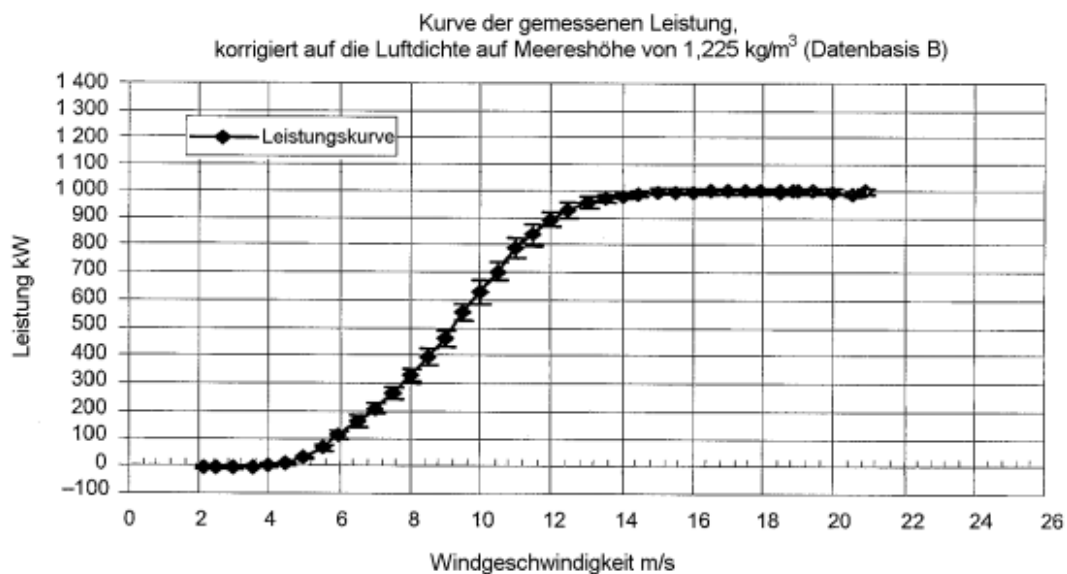
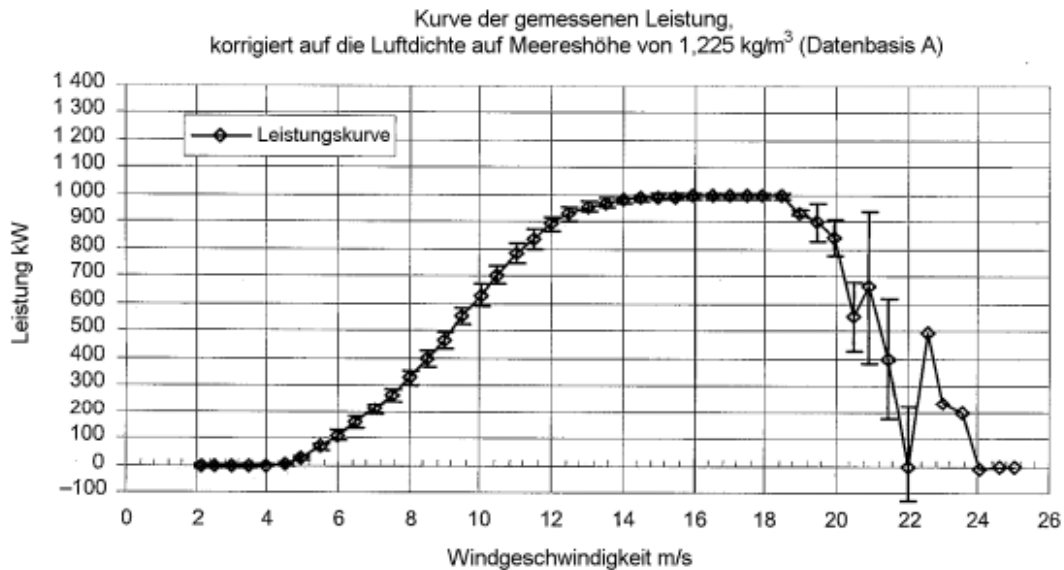
$P_i$  die normierte und gemittelte Ausgangsleistung im BIN  $i$ ;

$A$  die überstrichene Fläche des WEA-Rotors;

$\rho_0$  die Referenzluftdichte.



**Bild 2 – Beispieldarstellung der Datenbasen A und B: Punktediagramme der Messung des Leistungsverhaltens, aufgenommen mit 1 Hz (Mittelwerte, über 10 min gemittelt)**



**Bild 3 – Beispieldarstellung einer Kurve der gemessenen Leistung für die Datenbasen A und B**

### Messung des Leistungsverhaltens kleiner WEA

Kleine WEA (nach der jeweiligen aktuellen Ausgabe der [IEC 61400-2](#)) erfordern besondere Bedingungen für die Messung des Leistungsverhaltens. Insbesondere müssen Anlagen zum Laden von Batterien auf eine Weise vermessen werden, die repräsentativ für den normalen Betrieb ist, aber die Einflüsse einer besonderen Batterieanordnung und besonderer Bedingungen während der Messung verringert oder beseitigt. Bei der Messung einer kleinen WEA müssen alle in der vorliegenden Norm angegebenen Anforderungen mit folgenden Ergänzungen und Änderungen erfüllt werden:

- a) in 5.1: Zur Beschreibung des Leistungsverhaltens der Batterieladung muss die Windenergieanlage (WEA) die Maschine mit Rotor, den Turm, die Regel- und Steuereinrichtung der Anlage und die Leitungsführung zwischen Anlage und Last umfassen. Zur WEA gehört der Laderegler, d.h. eine Spannungsschutzeinrichtung, die die Ausgangsleistung der WEA verringert, wenn die Batterie vollständig geladen ist. Die WEA kann eine Hilfslast umfassen, die für den Verbrauch der Anlagenenergie benutzt wird, wenn die Batterie vollständig geladen ist. Der Batteriesatz gehört nicht zur WEA, weil dieser als Teil der Last betrachtet wird.

- b) in 5.1: Zur Beschreibung der Leistungsabgabe der Anlage an das Netz muss die WEA die Maschine mit Rotor, den Turm, die Regel- und Steuereinrichtung der Anlage, die Leitungsführung zwischen Anlage und Last, den Laderegler und eine Hilfslast (falls verwendet), wie oben angegeben, umfassen. Zusätzlich kann zur Anlage ein Spannungsumrichter gehören. Wenn zwischen Spannungsumrichter und Netz ein Transformator geschaltet ist, kann dieser entweder als Teil der WEA oder als Teil der Last angesehen werden.
- c) auch in 5.1: Die WEA muss an eine elektrische Last angeschlossen sein, die repräsentativ für die Auslegungslast der Anlage ist. Im Fall von Batterieladern besteht die Last aus einem Batteriesatz, einem Spannungsregler und einem Verbraucher der Leistung, die durch den Spannungsregler geführt wird. In einem idealen Messaufbau speichert der Batteriesatz nicht die von der Anlage erzeugte Energie. Die gesamte Leistungsabgabe der Anlage wird durch den Spannungsregler geführt. Deshalb kann der Batteriesatz kleiner sein als gewöhnlich für die Anlage empfohlen, solange die Spannung an den Anschlüssen der Anlage zur Last innerhalb der nachfolgend angegebenen Festlegungen gehalten werden kann.
- d) auch in 5.1: Die WEA muss mit dem vom Hersteller festgelegten Montagesystem errichtet werden. Wird eine WEA nicht mit einem bestimmten Montagesystem geliefert, sollte die Maschine in einer Nabenhöhe von mindestens 10 m angebracht werden.
- e) auch in 5.1: Zur Verringerung der Differenzen in den Ergebnissen durch die Leitungsführung zwischen Anlage und Last darf der Anschluss der Last nicht näher als am Fuß des Turmes und nicht weiter entfernt als in einem Abstand entsprechend der dreifachen Turmhöhe erfolgen. Die Leitungsführung zwischen der kleinen WEA und der Last muss den Spezifikationen des Herstellers entsprechen. Wenn die Spezifikation einen Bereich für den Kabeldurchmesser angibt, muss der Kabelquerschnitt so nah wie möglich am Mittelwert dieses Bereiches gewählt werden. Wenn keine Spezifikation vorhanden ist, muss der Kabelquerschnitt so bemessen sein, dass der Spannungsabfall zwischen WEA-Generator und Last 10 % der Nennspannung bei Bemessungsleistung entspricht.
- f) auch in 5.1: Der Spannungsregler muss in der Lage sein, die Spannung am Anschluss der Last an die Anlage für den gesamten Bereich der Ausgangsleistung der Anlage innerhalb von 10 % auf den Einstellungen nach Tabelle G.1 zu halten. Der 1-min-Mittelwert der Ladespannung muss innerhalb von 5 % der Einstellungen nach Tabelle G.1 bleiben, damit die Daten verwendet werden können.
- g) in 5.2.1: Wenn es in der Praxis günstiger ist, das Anemometer an einem langen Ausleger am Turm zu befestigen, ist kein zusätzlicher Messmast erforderlich. Um eine mögliche Nachlaufströmung durch das Anemometer, die Windfahne und deren Befestigungsmittel und damit den Einfluss auf die Anströmung eines kleinen Rotors zu verringern, müssen alle Bauteile mindestens 3 m von den Rotorteilen entfernt angebracht werden. Zusätzlich sollte die Befestigung des Anemometers so ausgeführt werden, dass sich dessen Querschnittsfläche über der Höhe des 1,5fachen Rotordurchmessers unterhalb der Nabenhöhe befindet.
- h) in 6.1: Die Ausgangsleistung der Anlage muss an den Anschlusspunkten der Last gemessen werden.
- m) in 7.3: Die vorbereiteten Datensätze müssen 1-min Dauer haben. Alle nachfolgenden Verweisungen auf 10-min-Datensätze in der Norm müssen bei der Messung kleiner WEA 1-min Dauer haben
- n) in 7.6: Wenn die folgenden Kriterien erfüllt sind, darf die Datenbasis als vollständig betrachtet werden:
  - 1) jedes Windgeschwindigkeits-BIN zwischen 1 m/s unter der Einschaltwindgeschwindigkeit und 14 m/s muss Abtastwerte über mindestens 10 min umfassen;
  - 2) die gesamte Datenbasis enthält Daten über mindestens 60 h für kleine WEA innerhalb des Windgeschwindigkeitsbereiches;
  - 3) bei Klappanlagen sollte die Datenbasis vollständige Windgeschwindigkeits-BINs enthalten, die das Leistungsverhalten beschreiben, wenn die Anlage aus dem Wind geklappt wird.

**Tabelle 2 – Beispieldarstellung einer Kurve der gemessenen Leistung für die Datenbasis B**

Kurve der gemessenen Leistung (Datenbasis B)							
Referenzluftdichte 1,225 kg/m <sup>3</sup>					Kategorie A	Kategorie B	Kombinierte Unsicherheit
BIN-Nr.	Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe	Ausgangsleistung	C <sub>p</sub>	Anzahl der Datensätze (10-min-Mittelwerte)	Standardunsicherheit s <sub>i</sub>	Standardunsicherheit u <sub>i</sub>	Standardunsicherheit u <sub>c,i</sub>
	m/s	kW			kW	kW	kW
4	2,1	-3,6	-0,26	138	0,05	6,3	6,3
5	2,5	-3,6	-0,16	275	0,04	6,3	6,3
6	3,0	-3,8	-0,10	270	0,13	6,3	6,3
7	3,5	-2,2	-0,03	320	0,56	6,3	6,3
8	4,0	-0,4	0,00	347	0,56	6,3	6,3
9	4,5	6,0	0,05	362	0,67	6,3	6,4
10	5,0	27,7	0,15	333	1,09	6,8	6,9
11	5,5	67,4	0,28	285	1,65	10,9	11,0
12	6,0	111,3	0,36	262	2,26	16,1	16,3
13	6,5	160,9	0,40	265	3,08	20,1	20,3
14	7,0	209,4	0,42	286	3,22	20,4	20,7
15	7,5	262,0	0,43	287	3,23	20,7	20,9
16	8,0	327,6	0,44	248	3,28	23,3	23,5
17	8,5	395,2	0,44	215	4,38	28,6	28,9
18	9,0	462,0	0,44	179	4,94	29,8	30,2
19	9,5	556,1	0,45	183	5,02	29,9	30,3
20	10,0	629,8	0,43	133	5,83	41,5	41,9
21	10,5	703,1	0,42	127	6,82	32,8	33,5
22	11,0	786,5	0,41	119	6,75	36,1	36,7
23	11,5	836,5	0,38	101	6,65	36,5	37,1
24	12,0	893,5	0,36	94	7,27	25,2	26,2
25	12,5	928,6	0,33	74	5,59	28,8	29,3
26	13,0	956,4	0,30	70	6,38	19,5	20,5
27	13,5	971,3	0,27	63	4,66	16,5	17,1
28	14,0	980,9	0,25	71	3,19	13,5	13,8
29	14,5	988,2	0,22	77	2,53	12,2	12,4
30	15,0	993,5	0,20	64	1,37	11,9	11,9
31	15,5	993,7	0,18	47	0,84	11,6	11,6
32	16,0	995,7	0,17	54	0,83	11,3	11,3
33	16,5	996,2	0,15	33	0,42	11,4	11,4
34	17,0	996,4	0,14	23	0,23	11,3	11,3
35	17,5	996,5	0,13	30	0,24	11,3	11,3
36	18,0	996,5	0,12	13	0,18	11,3	11,3
37	18,5	995,7	0,11	11	0,21	11,3	11,3
38	19,0	996,6	0,10	14	0,59	11,3	11,3
39	19,4	996,1	0,09	10	0,21	11,3	11,3
40	20,0	994,1	0,09	5	0,41	11,3	11,3
41	20,5	987,4	0,08	2	2,67	11,4	11,7
42	20,9	996,9	0,08	3	3,38	11,8	12,3



**Aufgabe 4 (ca. 60 min.):**

Messzeitreihen auswerten (<https://werdis.dwd.de>) für die letzten 12 Monate:

- Histogramm der relativen Häufigkeit der Windgeschwindigkeit
- Histogramm der Windrichtungsverteilung

Beispielorte mit einer Messstation:

- Hallig Hooge
- Freiburg
- Fichtelberg/Oberfranken-Hüttstadt
- Berlin-Tempelhof

**Aufgabe 5 (ca. 30 min.):**

Analyse der Standorte:

- Inwiefern lassen sich Einflüsse der Topographie auf das Windaufkommen ableiten? Nutze dafür auch [maps.google.de](https://maps.google.de) in geneigter Ansicht mit 3D-Modellierung
- Was ist die Hauptwindrichtung in Deutschland?
- Warum ist dies am betrachteten Standort ggf. nicht die HWR?

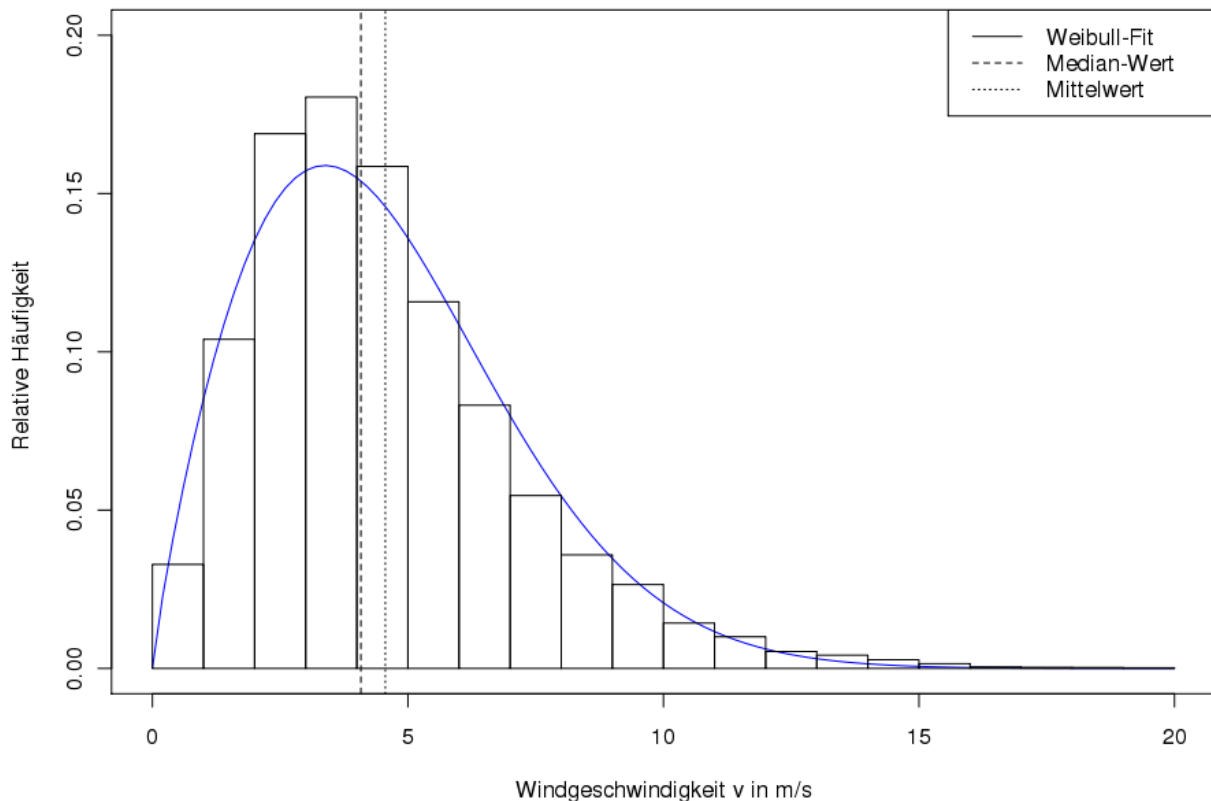


Abbildung 11: Beispielhafte Darstellung der relativen Windgeschwindigkeitsverteilung [Quelle: <http://www.grund-wissen.de/>; Stand: 07.12.2015]



## Literaturverzeichnis

- [1] Reiner Lemoine Institut gGmbH, „Kleinwindenergieanlagen, die Genehmigungslage in Deutschland und deren Einsatz an Bildungseinrichtungen,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.ufu.de/media/content/files/Fachgebiete/Klimaschutz/EE-Schule/Recherchebericht.pdf>. [Zugriff am 02 03 2016].
- [2] Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW), „Empfehlungen zum Einsatz kleiner Windenergieanlagen im urbanen Raum - Ein Leitfaden,“ Berlin, 2013.
- [3] Bundesverband WindEnergie, „Vertikalachser,“ [Online]. Available: <https://www.windenergie.de/infocenter/technik/funktionsweise/horizontalachser>. [Zugriff am 19 01 2016].
- [4] My Windpower GmbH, „Horizontale Windanlage,“ [Online]. Available: <http://www.mywindpower.de/wp-content/uploads/2012/05/Horizontale-Windanlage-1.png>. [Zugriff am 30 07 2015].
- [5] Solarlink GmbH, „Windgenerator Ampair Pacific,“ [Online]. Available: <http://www.solarlink.de/Images/pacific5.jpg>. [Zugriff am 19 01 2016].
- [6] Christensen, Katie, Catalogue of Small Wind Turbines 2012, Dänemark: Nordic Folkecenter for Renewable Energy, 2012.
- [7] Jetpro Technology, „Our Products > JPT-100,“ [Online]. Available: <http://www.jetprotech.com.tw/en/products/jpt100.htm>. [Zugriff am 12 03 2015].
- [8] Amperius, „Amperius Turbina,“ [Online]. Available: <http://www.amperius.pl/images/Amperius-turbina.jpg>. [Zugriff am 16 07 2015].
- [9] KD Stahl- und Maschinenbau GmbH, „System im Überblick,“ [Online]. Available: <http://www.amperius.de/das-amperius-prinzip/>. [Zugriff am 21 Mai 2015].
- [10] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Baugesetzbuch (BauGB)*, Berlin, 2014.