

## Nutzung der Kleinwindkraft

Bislang spielt die Kleinwindkraft in Deutschland im Gegensatz zu anderen Formen Erneuerbarer Energien nur eine untergeordnete Rolle. Es bestehen noch große Ausbaupotenziale. Mit dem wachsenden Bewusstsein für die Möglichkeiten der dezentralen Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien gewinnt diese Technologie auch in küstenfernen Regionen zunehmend an Zuspruch.

Einer der Vorteile der verbrauchernahen Energieerzeugung durch Kleinwindkraftanlagen liegt in der Verminderung übertragungsbedingter Leitungsverluste. Durch dezentrale Lösungen werden kurze, verlustarme Transportwege gewährleistet und der Ausbaubedarf von Netzkapazitäten kann unter Umständen verringert werden.

Mit Hilfe einer Kleinwindkraftanlage kann eine zumindest teilweise elektrische Eigenversorgung sichergestellt werden. Auf Grund der stetig steigenden Energiekosten wird diese Option immer attraktiver, weil hierdurch die Abhängigkeit vom Strombezug reduziert wird. Innerhalb der letzten 15 Jahre stiegen die Strompreise für Privathaushalte um durchschnittlich 4,5 % pro Jahr auf ca. 28,73 ct/kWh im Jahr 2014. Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, den produzierten Strom möglichst komplett selber zu nutzen anstatt ihn in das Netz der allgemeinen Stromversorgung einzuspeisen.

Der effektivste Weg zur Steigerung der Eigenverbrauchsquote besteht darin, die Anlagengröße am Minimum des kontinuierlich auftretenden Strombedarfs, der sogenannten Grundlast, auszurichten, so dass der erzeugte Strom jederzeit selbst verwertet werden kann. Als Faustregel für die wirtschaftliche Optimierung einer Kleinwindkraftanlage könnte daher gelten: Nur so groß wie nötig, so klein wie möglich.

In Bezug auf die technischen Komponenten unterscheiden sich Kleinwindkraftanlagen nicht wesentlich von großen Anlagen. Die Abgrenzung erfolgt durch Größe und Leistung. Eine Gesamthöhe von unter 50 Metern, eine Rotorfläche kleiner als 200 Quadratmeter (was einem Rotordurchmesser von knapp 16 Metern entspricht) und eine Leistung kleiner als 100 kW sind die ausschlaggebenden Merkmale von Kleinwindkraftanlagen. Innerhalb dieser Kleinwindkraftanlagenkategorie kann eine Unterscheidung in die drei Leistungsklassen der Tabelle 1 vorgenommen werden.

<b>Leistungsklasse 1</b>	Bis 5 kW	Mikrowindkraftanlagen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wohngebäude</li> <li>- Gekoppelt ans Stromnetz oder batteriegestütztes Inselsystem</li> </ul>
<b>Leistungsklasse 2</b>	5 – 30 kW	Miniwindkraftanlagen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gewerbebetriebe und Landwirtschaft</li> <li>- Netzkopplung zur Überschusseinspeisung</li> </ul>
<b>Leistungsklasse 3</b>	30 – 100 kW	Mittelwindkraftanlagen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gewerbebetriebe und Landwirtschaft</li> <li>- Netzkopplung zur Überschusseinspeisung</li> </ul>

**Tabelle 1:** Leistungsklassen bei Kleinwindkraftanlagen

## Physikalische und meteorologische Grundlagen der Windenergie

Wind beschreibt, vereinfacht dargestellt, die Bewegung von Luftmassen, die auf Grund von Temperaturunterschieden variierende Dichte- und Druckverhältnisse aufweisen. Verantwortlich für Temperatur- und Druckunterschiede sind jahres- und tageszeitliche Witterungseinflüsse, aber auch geographische Faktoren wie die Geländebeschaffenheit, die zur unterschiedlich starken Absorption von Sonnenstrahlung führt. Wärmere Luft besitzt eine geringere Dichte als kältere und steigt empor. Kältere und schwerere Luft sinkt herab und strömt in die entstandenen Zonen niedrigeren Luftdrucks – die Luftmassen beginnen zu zirkulieren.

Die so entstandene Bewegungsenergie (kinetische Kraft) hängt von der Masse der Luft und ihrer Beschleunigung ab. Aus der kinetischen Kraft lässt sich mit Hilfe elektrotechnischer Umwandlungsprozesse in Windkraftanlagen elektrischer Strom erzeugen. Je höher die Geschwindigkeit und Masse des Windes – im Fall von Windanlagen entspricht dies dem durch die Rotorfläche strömenden Luftstrom – desto größer ist die daraus produzierbare Strommenge. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Windleistung ist dabei von überproportionaler Bedeutung, wie nachfolgend näher erläutert wird. Windgeschwindigkeiten können in insgesamt 12 Windstärken eingeteilt werden, deren Bezeichnungen und Auswirkungen in Tabelle 2 beschrieben werden.

Windstärke	m/s	km/h	Bezeichnung	Sichtbare Auswirkungen
0	0 - 0,2	1	Windstille	Keine Luftbewegung, Rauch steigt gerade empor
1	0,3 - 1,5	1 - 5	Leiser Zug	Rauch treibt leicht ab, Windfahnen bleiben unbewegt
2	1,6 - 3,3	6 - 11	Leichte Brise	Wind im Gesicht spürbar, Windfahnen bewegen sich
3	3,4 - 5,4	12 - 19	Schwache Brise	Blätter und dünne Zweige werden bewegt, Fahnen flattern
4	5,5 - 7,9	20 - 28	Mäßige Brise	Dünne Zweige werden bewegt, Staub und Papier verweht
5	8,0 - 10,7	29 - 38	Frische Brise	Äste und kleine Bäume bewegen sich, deutlich hörbares Windgeräusch
6	10,8 - 13,8	39 - 49	Starker Wind	Starke Äste bewegen sich, hörbares Pfeifen an Überlandleitungen
7	13,9 - 17,1	50 - 61	Steifer Wind	Bäume schwanken, Widerstand beim Gehen
8	17,2 - 20,7	62 - 74	Stürmischer Wind	Zweige brechen, starker Widerstand beim Gehen
9	20,8 - 24,4	75 - 88	Sturm	Kleinere Schäden an Dächern, Äste brechen, Gartenmöbel fallen um
10	24,5 - 28,4	89 - 102	Schwerer Sturm	Bäume werden entwurzelt, größere Schäden an Häusern
11	28,5 - 32,6	103 - 117	Orkanartiger Sturm	Selten im Binnenland, schwere Sturmschäden, Forstschäden
12	32,7 - 56,0	118 - 133	Orkan	Selten im Binnenland, schwerste Verwüstungen

**Tabelle 2:** Definition und Effekte unterschiedlicher Windstärken

Um Windkraftanlagen möglichst standortgerecht auswählen zu können, werden sie anhand von Windzonen oder Windklassen eingestuft. Gängige Definitionen hierfür liefern das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) mit der DIN 1055-4 in ihrer seit 2007 geltenden Fassung und die International Electrotechnical Commission (IEC) mit der IEC 61400. Beide Normen legen vier Windzonen bzw. -klassen fest, unterscheiden sich jedoch in der Nummerierung sowie marginal in den Grenzwindgeschwindigkeiten für die Abgrenzung der Windzonen bzw. -klassen. In Abbildung 1 sind exemplarisch die Bereiche der Durchschnittwindgeschwindigkeiten der jeweiligen Zonen bzw. Klassen aufgeführt.

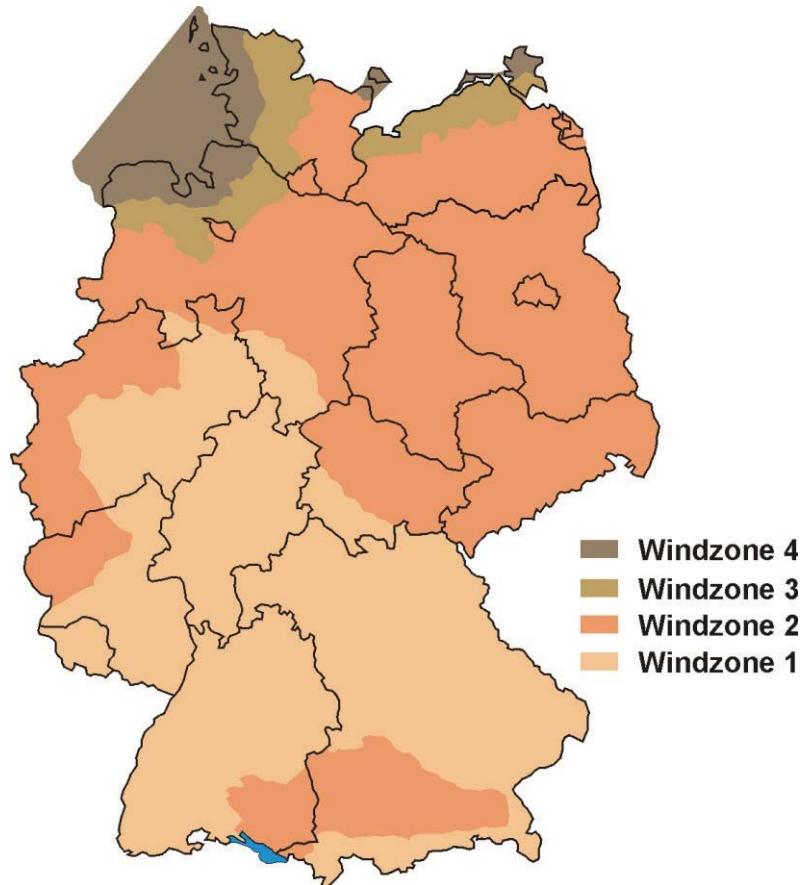
	DIBt-Windzonen und IEC-Windklassen im Vergleich				
	0 - 6 m/s	6 - 7 m/s	7 - 8 m/s	8 - 9 m/s	9 - 10 m/s
DIBt $V_{\text{mittel}}$	Windzone 1 0 - 6,3 m/s	Windzone 2 6,3 - 7,2 m/s	Windzone 3 7,2 - 8,3 m/s	Windzone 4 8,3 - 9,6 m/s	
IEC $V_{\text{mittel}}$	Windklasse IV 0 - 6 m/s	Windklasse III 6 - 7,5 m/s	Windklasse II 7,5 - 8,5 m/s	Windklasse I 8,5 - 10 m/s	

**Abbildung 1:** Vergleich der Windzonen und -klassen anhand der Durchschnittwindgeschwindigkeiten ( $v_{\text{mittel}}$ ) gemäß der DIBt- und IEC-Richtlinie

Die Windzone bzw. -klasse gibt auch an, welche Spitzenwindgeschwindigkeiten an einem Standort zu erwarten sind. Dadurch beschreibt sie, auf welche Kräfte und Belastungen eine Windkraftanlage eingestellt sein muss. Sind die Durchschnittwindgeschwindigkeiten und somit die Windzone bzw. -klasse eines Standortes bekannt, kann theoretisch anhand dieser Einordnung gezielt ein passender Anlagentyp ausgewählt werden.

Daher zertifizieren viele Windkraftanlagenhersteller ihre Produkte für einzelne Windzonen bzw. -klassen und kennzeichnen sie dann mit einer sogenannten Typenklasse. Da viele am Markt befindliche Kleinwindkraftanlagen jedoch keine Zertifizierungen vorweisen, sind weitere Kriterien, die in den nachfolgenden Kapiteln erläutert werden, zu berücksichtigen.

Die DIBt-Klassifizierung in DIN 1055-4 legt die in Abbildung 2 ersichtliche regionale Verteilung der Windzonen in Deutschland fest. Daraus geht hervor, dass vor allem die Südhälfte Bayerns in relativ schwachen Windzonen liegt. Nichtsdestotrotz ist auch dort eine Vielzahl an geeigneten Standorten für die Windkraftnutzung verfügbar.



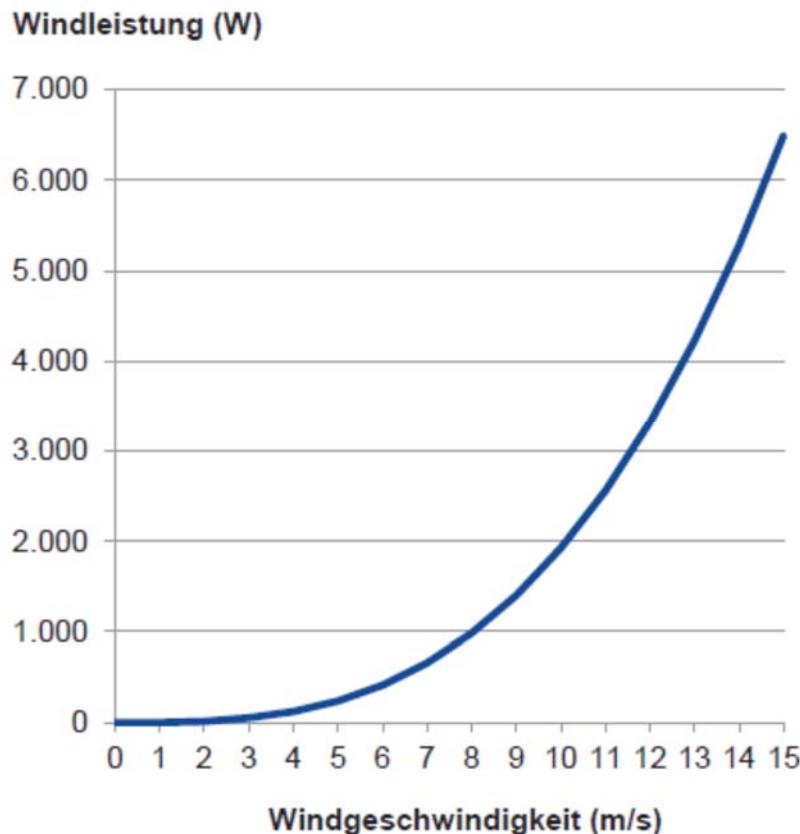
**Abbildung 2:** Windzonen gemäß DIN 1055-4 in Deutschland

## Standortevaluierung

Bei Kleinwindkraftanlagen gestaltet sich die Standortfindung deutlich anspruchsvoller als zum Beispiel bei Photovoltaikanlagen. Einerseits kann das Windpotential von Region zu Region stark variieren, andererseits wirken sich bereits einzelne Charakteristika des jeweiligen Geländes deutlich auf das Strömungsverhalten des Windes aus. Dennoch ist es möglich, die Qualität eines potenziellen Kleinwindkraftstandortes schon im Vorfeld verlässlich einzuschätzen und somit den Grundstein für einen ertragreichen Anlagenbetrieb zu legen. Hierfür sind elementare Fragen bezüglich des am möglichen Standort vorhandenen Windpotentials zu beantworten.

## Windpotential am Standort

Ein positiver Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Stromerzeugung ist natürlich naheliegend. Aus Abbildung 3 geht hervor, dass die Leistung des Windes, die die Grundlage für die weitere Stromerzeugung mit einer Windkraftanlage darstellt, überproportional mit der Windgeschwindigkeit zunimmt.



**Abbildung 3:** Zunahme der Windleistung mit der Windgeschwindigkeit

Grund hierfür ist, dass die Geschwindigkeit in die Leistungsberechnung in dritter Potenz eingeht (siehe Formel 1) und damit überproportionale Auswirkungen hat. Anschaulich ausgedrückt führt eine Verdopplung der Windgeschwindigkeit zur achtfachen mechanischen  $P$  bzw. elektrischen Leistung. Neben der Windgeschwindigkeit gehen die Luftdichte  $\rho$  (bei Realbedingungen als Konstante mit  $1,225 \text{ kg/m}^3$  zu berücksichtigen) und die vom Wind durchströmte Querschnittsfläche, bei Windanlagen also die überstrichene Rotorfläche  $A_R$ , in die Berechnung der Windleistung ein.

$$P_{Wind} = \frac{1}{2} * \rho * A_R * v_W^3$$

#### Formel 1: Windleistung

Für eine erste Einstufung der Windverhältnisse am potentiellen Standort bieten sich Daten und Kartenmaterialien von nahegelegenen öffentlichen oder privaten Wetterstationen an, die oftmals kostenlos zugänglich sind. Frei abrufbare Windkarten finden sich auf den Webseiten des Deutschen Wetterdienstes.

Obwohl sich diese Werte oft nicht exakt auf den späteren Anlagenstandort und die spätere Nabenhöhe übertragen lassen, geben sie groben Aufschluss über das Windpotential und erlauben somit in vielen Fällen bereits eine erste Einschätzung der Standorteignung. Völlig ungeeignete Standorte lassen sich hiermit frühzeitig ausschließen, ohne kostspielige Messungen durchzuführen. Liegen die vorherrschenden Windgeschwindigkeiten im Jahresdurchschnitt bei mindestens 4 m/s, bietet es sich an, die lokalen Gegebenheiten mit Hilfe von Windmessungen genauer zu analysieren.

## Geländebeschaffenheit

Das Strömungsverhalten des Windes wird maßgeblich von der Beschaffenheit des jeweiligen Geländes beeinflusst. Insbesondere die Orographie einer Landschaft, also die Anordnung und der Verlauf von Gebirgen und ihren Hängen, jedoch auch Oberflächenhindernisse wie Wälder und Gebäude prägen das Strömungsverhalten des Windes. Zur Beschreibung des Geländes spricht man von der Oberflächenrauhigkeit. Anhand dieser kann eine Einordnung verschiedener Geländetypen erfolgen. Je nach Häufigkeit, räumlicher Verteilung und der Größe von Hindernissen werden verschiedene Rauhigkeitsklassen unterschieden, siehe Tabelle 3, die bei steigender Einstufung zu niedrigeren Anteilen verwertbarer Leistung des Windes führen.

Rauhigkeitsklasse	Rauhigkeitslänge	Energieindex	Beschreibung
0	0,0002 m	100 %	Offene Wasserflächen: Meere, Seen
0.5	0,0024 m	73 %	Offenes, flaches Gelände ohne Windhindernisse, z.B. Landebahnen
1	0,03 m	52 %	Offenes, flaches Gelände mit wenigen weit entfernten Windhindernissen wie Hecken, Zäune, z.B. große Felder
1.5	0,055 m	45 %	Kulturlandschaft mit wenigen Windhindernissen in einer Entfernung von unter 1.000 m
2	0,1 m	39 %	Kulturlandschaft mit wenigen Windhindernissen in einer Entfernung von unter 500 m, sanfte Hügel
2.5	0,2 m	31 %	Kulturlandschaft mit Windhindernissen in einer Entfernung von unter 250 m
3	0,4 m	24 %	Dörfer, Kleinstädte, bewaldete Flächen, landwirtschaftliches Gelände mit hohen Hecken, raues und unebenes Terrain
3.5	0,8 m	18 %	Größere Städte, hohe Gebäude
4	1,6 m	13 %	Großstädte mit sehr hohen Gebäuden

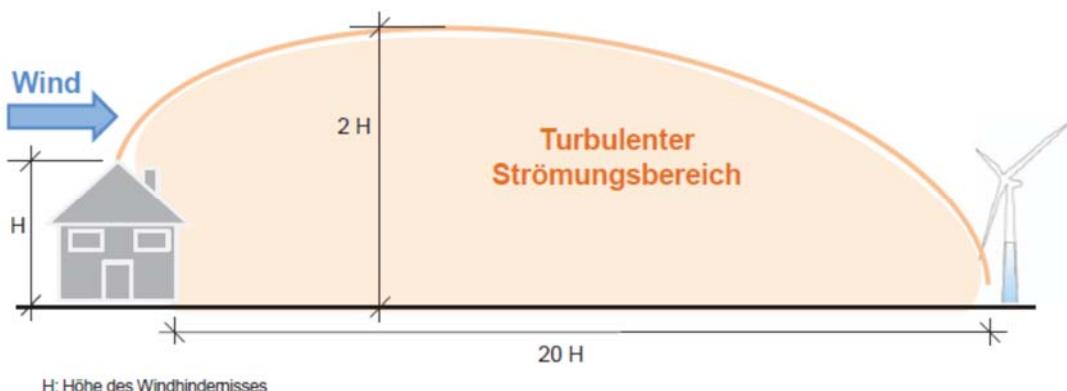
**Tabelle 3:** Rauhigkeitsklassen

Die in Tabelle 3 aufgeführte Rauhigkeitslänge gibt die Höhe in Metern über Grund an, in der die Windgeschwindigkeit als Folge der Geländebehindernisse noch null beträgt. Je weniger ein Gelände von Unebenheiten und Bewuchs oder Bebauung geprägt ist, desto niedriger ist seine Rauhigkeitsklasse und desto günstiger sind die Voraussetzungen für die Windkraftnutzung. Mit zunehmender Nabenhöhe nimmt der Geländeinfluss ab und es werden höhere und gleichmäßige Windgeschwindigkeiten erzielt.

Anschaulich lässt sich der Einfluss der Oberflächenrauhigkeit auf die erzielbaren Stromerträge mit Hilfe des Energieindexes ausdrücken. Dieser gibt den zu erwartenden Anteil der Windleistung innerhalb einer bestimmten Rauhigkeitsklasse verglichen mit der Rauhigkeitsklasse 0 an, in der keinerlei Windhindernisse vorhanden sind.

Bei der Auswahl des späteren Anlagenstandortes ist zu berücksichtigen, dass sich Windhindernisse in ausreichender Entfernung zur Windanlage befinden. Dies gilt besonders für die Hauptwindrichtung, aus der der Großteil der Energieerträge zu erwarten ist. Eine Anlage sollte so positioniert sein, dass sie aus der Hauptwindrichtung frei angeströmt wird.

Hinter jedem Hindernis entsteht in Windrichtung eine Verwirbelungszone, in der Turbulenzen entstehen. Diese turbulenten Strömungen zeichnen sich durch veränderliche Strömungsrichtungen und vor allem durch deutlich niedrigere kinetische Energie aus, da sie gegenüber der am Hindernis auftreffenden gleichmäßigen laminaren, also gleichmäßigen Windströmung bereits gebremst wurden. Die energiearmen und verwirbelten Turbulenzströmungen können von Windanlagen kaum genutzt werden. Wie Abbildung 4 darstellt, kann sich eine solche Verwirbelungszone in der Höhe bis auf das Doppelte und in der Länge auf das Zwanzigfache der Hindernishöhe ausdehnen.



**Abbildung 4:** Turbulenter Strömungsbereich auf Grund von Windhindernissen

Bei Kleinwindkraftanlagen spielen überdies die Beschaffenheit der Umgebungsbebauung bzw. bei Dachanlagen insbesondere die Geometrie und Statik des Gebäudes, auf dem die Anlage installiert werden soll, eine erhebliche Rolle. Exponierte Standorte auf Anhöhen, die ungestört anströmbar sind, sollten daher gegenüber Talsenken nahe dichter Bebauung oder natürlicher Hindernisse wie Wäldern vorgezogen werden.