



Kanton Zürich
Baudirektion
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
Energie

Kleinwindanlagen

März 2025



Inhalt

Zusammenfassung	3
1. Grundlagen	4
1.1. Definition	4
1.2. Anlagetypen	4
1.3. Leistungsparameter	6
2. Anwendungsmöglichkeiten	9
2.1. Leistungsklassen	9
2.2. Betriebsart	9
2.3. Marktübersicht	10
3. Standort und Installation	12
3.1. Windverhältnisse	12
3.2. Dachmontierte vs. freistehende Anlagen	13
3.3. Lärm und Schattenwurf	13
3.4. Eiswurf	14
4. Energiewirtschaftliche Einordnung	15
4.1. Beitrag zur Stromversorgung	15
4.2. Wirtschaftlichkeit	15
5. Umweltauswirkungen	17
5.1. Ökobilanz von Kleinwindanlagen	17
5.2. Auswirkungen auf Vögel und Fledermäuse	17
6. Rechtliche Rahmenbedingungen	18
6.1. Bewilligung innerhalb Bauzonen	18
6.2. Bewilligung ausserhalb Bauzonen	18
7. KWA als Pilotprojekt	19
8. Kleinwind in anderen Kantonen	19
9. Quellen	21

Zusammenfassung

Im Kanton Zürich gelten Windenergieanlagen (WEA) mit einer Höhe von bis 30 m und einer Leistung von bis zu 30 kW als Kleinwindanlagen (KWA). International gibt es jedoch keine einheitliche Definition für KWA. Es existieren verschiedene Grössen und Typen von KWA mit unterschiedlichen Leistungswerten. Es ist wichtig, die Angaben der Hersteller sorgfältig zu überprüfen, da es keine einheitliche Zertifizierung für KWA gibt und Herstellerangaben kaum verifiziert werden.

KWA können sowohl freistehend an Masten als auch auf Dächern oder sonstigen Strukturen installiert werden. Freistehende KWA erzielen in der Regel höhere Erträge. Dachmontierte KWA können bei Betrieb Schwingungen und Vibrationen auf das Gebäude übertragen, was bei unsachgemässer Installation zu Belästigungssituationen bis hin zu Schäden führen könnte. Zudem müssen installierte KWA die Grenzwerte für Lärmemissionen einhalten, was bei einer dachmontierte KWA schwieriger sein kann als bei freistehenden. Bei der Standortwahl sollte auch die Gefährdung von Vögeln und Fledermäusen fachgerecht beurteilt werden, um das Kollisionsrisiko zu reduzieren. Für die Bewilligung von KWA ist zum heutigen Zeitpunkt eine Einzelfallbetrachtung erforderlich. Dabei gibt es Unterschiede im Bewilligungsverfahren zwischen KWA in und ausserhalb des Baugebiets.

Die Wahl des richtigen Standorts ist entscheidend für einen wirtschaftlichen und ökologischen Betrieb einer KWA. Das wichtigste Kriterium dabei ist die vorherrschende Windgeschwindigkeit, da diese massgeblich den Ertrag der Anlage beeinflusst. Eine Verdoppelung der Windgeschwindigkeit kann die Leistung einer Anlage bis um das Achtfache steigern. Auch die Windrichtung und -strömung sowie die Änderungen dieser beiden Parameter in Art und Geschwindigkeit beeinflussen den effektiven Ertrag einer KWA. So sollte die Umgebung einer KWA möglichst hindernisfrei sein, um Windturbulenzen zu vermeiden.

Die Wirtschaftlichkeit von KWA hängt vor allem von der Windgeschwindigkeit des Standortes sowie dem Eigenverbrauch ab. Da Elektrizität aus KWA selten verkauft werden kann, spielt der Handel keine Rolle. Die Windgeschwindigkeit und die damit verbundene Stromproduktion steigen mit der Grösse der Anlage, weshalb grössere Anlagen in der Regel wirtschaftlicher sind als kleine. Kostentreiber können aber auch Individualkonstruktionen sein (z.B. Dachverstärkungen). Dann gilt dieser Grundsatz nicht mehr. Mit den in der Schweiz in Siedlungsgebieten anzutreffenden Windgeschwindigkeiten werden die Investitionskosten von KWA in den meisten Fällen kaum amortisiert. Pro kWh produziertem Strom verursachen KWA mehr CO₂-Emissionen als Grosswindanlagen (GWA) und benötigen ein Vielfaches mehr an Ressourcen.

Aktuell leisten KWA sowohl international als auch in der Schweiz nur einen geringen Beitrag zur Stromversorgung. Auch in Zukunft wird – im Gegensatz zu GWA – das Potenzial von KWA als gering eingeschätzt. Dennoch können KWA in bestimmten Fällen sinnvoll sein, insbesondere an schwer zugänglichen Standorten wie Berghütten oder dezentralen Sende- oder Messstationen, welche keinen oder nur eingeschränkten Zugang zum Stromnetz verfügen.

1. Grundlagen

1.1. Definition

Der Begriff Kleinwindanlagen (KWA) umfasst ein breites Spektrum an Windgeneratoren mit sehr unterschiedlichen Leistungen. Eine einheitliche Definition von KWA gibt es nicht. Es existieren internationale Standards und Zertifizierungen, welche jedoch von den Herstellern gesetzlich nicht erfüllt werden müssen, um ihre Produkte auf dem Markt zu verkaufen.

In Deutschland gelten Windanlagen als KWA, wenn die überstrichene Rotorfläche bis zu 200 m² beträgt (nach IEC 61400-2). Die Nennleistung dieser Anlagen kann bis zu 100 kW betragen. In der Schweiz gelten andere Definitionen. Aufgrund der verfahrenstechnischen Vorgaben gelten im Kanton Zürich Windenergieanlagen bis zu einer Gesamthöhe von 30 m und einer Leistung von bis zu 30 kW als KWA.

Kleinwindanlagen bestehen aus mehreren Bestandteilen, die ihre Funktionsweise und Effizienz bestimmen. Diese Bestandteile sind grundsätzlich dieselben wie bei Grosswindanlagen (GWA), variieren jedoch je nach Anlagetyp.

Die **Rotorblätter** der Windanlage fangen den Wind ein und wandeln so kinetische Energie in mechanische Energie um. Die Form, Grösse und Anzahl Rotorblätter beeinflussen die Leistung und den Wirkungsgrad der Anlage. Die **Nabe** bildet das Verbindungselement zwischen Rotorblättern und der Hauptachse der Anlage. Mittels der Nabe kann die Energie auf den **Generator** übertragen werden. Dieser wandelt die mechanische Energie aus den Rotorblättern in elektrische Energie um. Die Art des Generators hängt von der Bauart der KWA ab. Der **Mast** definiert die Höhe der Anlage. Das **Fundament** der Anlage sorgt für ihre Standfestigkeit und gewährleistet, dass die Anlage auch bei starkem Wind stabil bleibt. Bei freistehenden Anlagen kann das Fundament als metallischer Anker oder Betonfundament umgesetzt werden. Alternativ kann der Mast mithilfe von Abspannseilen befestigt werden.

1.2. Anlagentypen

KWA reichen von Mikroanlagen, welche beispielsweise auf Hausdächern montiert werden, bis zu freistehenden Anlagen, die zum Teil ganze Gewerbe mit Strom versorgen können. Es existieren viele verschiedene Anlagentypen, welche in Horizontalachsenanlagen und Vertikalachsenanlagen sowie Auftriebsläufer und Widerstandsläufer eingeteilt werden können. Im Folgenden werden die verschiedenen Bauformen sowie deren Vor- und Nachteile beschrieben.

Widerstandsprinzip

Im Widerstandsprinzip bietet die Rotorfläche der Windenergieanlage dem Wind Widerstand und wird vom Wind weggedrückt. Dabei dreht sich der Rotor maximal so schnell wie die vorherrschende Windgeschwindigkeit. Der Wirkungsgrad von Widerstandsläufern ist eher niedrig. Maximal 20% der kinetischen Energie des Windes kann in mechanische Energie umgewandelt werden. Widerstandsläufer haben pro kW Leistung ein höheres Gewicht und einen höheren Materialverbrauch als andere Anlagentypen. Beispiel für Widerstandsläufer sind Savonius-Rotoren. Zu ihren Vorteilen zählt der Betrieb bei geringen Windgeschwindigkeiten (1-2 m/s), die Stromproduktion unabhängig von der Windrichtung und tendenziell geringere Schallemissionen.



Abbildung 1: Savonius-Rotor (Foto: www.klein-windkraftanlagen.com)

Auftriebsprinzip

Im Auftriebsprinzip werden die Rotoren der KWA durch Luftdruckunterschiede an den beiden Rotorblattseiten bewegt. Die Rotorblätter sind in einem bestimmten Winkel an der Drehachse befestigt, wodurch die Anströmung des Windes Auftrieb generiert, der die Rotorblätter dreht. In der Theorie können maximal 59% der kinetischen Energie in mechanische Energie umgewandelt werden. Pro kW Leistung haben Auftriebsläufer ein geringeres Gewicht und einen geringeren Materialverbrauch. Die meisten Windenergieanlagen sind Auftriebsläufer.

Horizontalachsenanlagen

Horizontalachsenanlagen zählen meistens drei Rotorblätter, können aber bis zu 5 Rotorblätter haben. Dieser Anlagentyp ist technisch ausgereift und hat sich langjährig bewährt. Horizontalachsenanlagen erzielen mit bis zu 50% die höchsten Wirkungsgrade. Die Rotorblätter können entweder dem Wind zugewandt (Luvläufer) oder dem Wind entgegengewandt (Leeläufer) sein. Horizontalachsenanlagen sind pro kW installierter Leistung leichter als Vertikalachsenanlagen, müssen jedoch in Windrichtung ausgerichtet sein und brauchen eine Windnachführung bei Richtungswechsel des Windes. Bei schnellen Windrichtungsänderungen produzieren sie nur geringe Strommengen. Die Blattspitzgeschwindigkeit (Umdrehungsgeschwindigkeit) von Horizontalachsenanlagen ist höher als bei Vertikalachsenanlagen, was zu höheren Schallemissionen führen kann. Konzentratoren sind Sondertypen von horizontalachsigen Auftriebsläufern. In der Theorie führt die zusätzliche Ummantelung der Windturbine zu einem höheren Wirkungsgrad.



Abbildung 2: Beispiele für Horizontalachsenanlagen. Links: «klassische» Horizontalachsenanlage (Foto: www.klein-windkraftanlagen.com). Rechts: Konzentratoren (Foto: iStock)

Vertikalachsenanlagen

Im Gegensatz zu Horizontalachsenanlagen verändert sich bei Vertikalachsenanlagen der relative Winkel des Rotorblattes bei der Umdrehung zum Wind. Vertikalachsenanlagen können Wind aus verschiedenen Richtungen nutzen und eignen sich deswegen für Standorte mit schnellen Windrichtungsänderungen oder Schräganströmungen. Das führt jedoch auch zu einer ungleichen Last auf das Material (aerodynamische Unwuchten) und kann zu Schwingungen und Resonanzen führen, welche langfristig zu einer Materialermüdung führen können. Sie besitzen einen geringeren Wirkungsgrad als Horizontalachsenanlagen und haben höhere Kosten und mehr Materialverbrauch pro kW Leistung. Zur Überwindung von Trägheitsmomenten ist oft eine externe Energieversorgung für den Anlaufvorgang von Vertikalachsenanlagen notwendig. Beispiele für Vertikalachsenanlagen sind Darrieus-Rotoren oder H-Rotoren. Darrieus-Rotoren zeichnen sich durch gebogene Trageflügel aus, während H-Rotoren gerade Trageflügel besitzen, welche theoretisch höhere Leistungen erzielen können.



Abbildung 3: Beispiele für Vertikalachsenanlagen. Links: Darrieus-Rotor (Foto: www.klein-windkraftanlagen.com). Rechts: H-Rotor (Foto: iStock)

1.3. Leistungsparameter

Hersteller von KWA geben meistens die Nennleistung der Anlage an. Diese beschreibt die Leistung der Anlage bei einer gewissen Windgeschwindigkeit. Oftmals wird eine hohe Windgeschwindigkeit (Nenngeschwindigkeit) für diese Berechnung verwendet, was für Standorte mit niedrigeren Windgeschwindigkeiten nicht aussagekräftig ist. Deswegen ist es wichtig, die Leistungskennlinie der jeweiligen KWA zu kennen. Diese beschreibt, welche Leistung die KWA bei einer gewissen Windgeschwindigkeit erzielen kann, und gibt die An- und Abschaltgeschwindigkeit der Anlage an.

Die Leistung einer Windenergieanlage hängt von verschiedenen Parametern ab, und kann mit Hilfe der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$P = C_p * \frac{1}{2} \rho * A * v^3$$

C_p ist der Leistungskoeffizient und beschreibt, wie viel kinetische Energie in mechanische Energie umgewandelt werden kann. Das theoretische Maximum dieses Leistungskoeffizienten für Windenergie beträgt 0.59, ist aber in der Praxis tiefer. Horizontalachsenanlagen verfügen mit 0.4-0.5 den höchsten Leistungskoeffizienten. Dieser Leistungskoeffizient wird meist vom Hersteller angegeben.

ρ ist die Luftdichte (in kg/m^3) und A die Rotorfläche (in m^2). Die Leistung von Windenergieanlagen kann auch als spezifische Leistung pro Quadratmeter Rotorfläche angegeben werden. So können zwei Anlagen zwar die gleiche Nennleistung aufweisen, jedoch kann die Anlage mit grösserer Rotorfläche diese Nennleistung schon bei geringerer Windgeschwindigkeit erreichen. Manche Hersteller verkaufen Windgeneratoren mit unterschiedlichen Rotoren. Grössere Rotoren eignen sich besser für Gebiete mit schwächeren Windverhältnissen.

Die Windgeschwindigkeit v^3 (in m/s) ist der wichtigste Leistungsparameter der Windenergie. Eine Verdoppelung der Windgeschwindigkeit verursacht in der Theorie eine achtfache Steigerung der Leistung (dritte Potenz). Diese Steigerung variiert jedoch je nach Leistungskurve und Aerodynamik, und ist durch die Abschaltgeschwindigkeit der Anlage limitiert.

Um den Ertrag einer KWA zu berechnen, wird jedoch nicht nur die durchschnittliche Windgeschwindigkeit des Standortes, sondern auch die Verteilung der Windgeschwindigkeit benötigt.

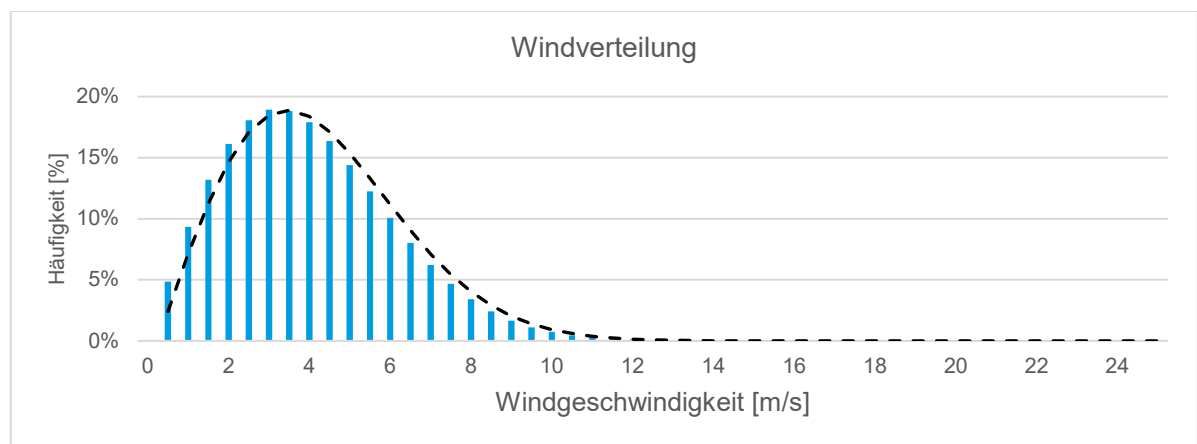


Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit. Annahme: durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 4 m/s, Weibullverteilung mit Skalenfaktor = 2

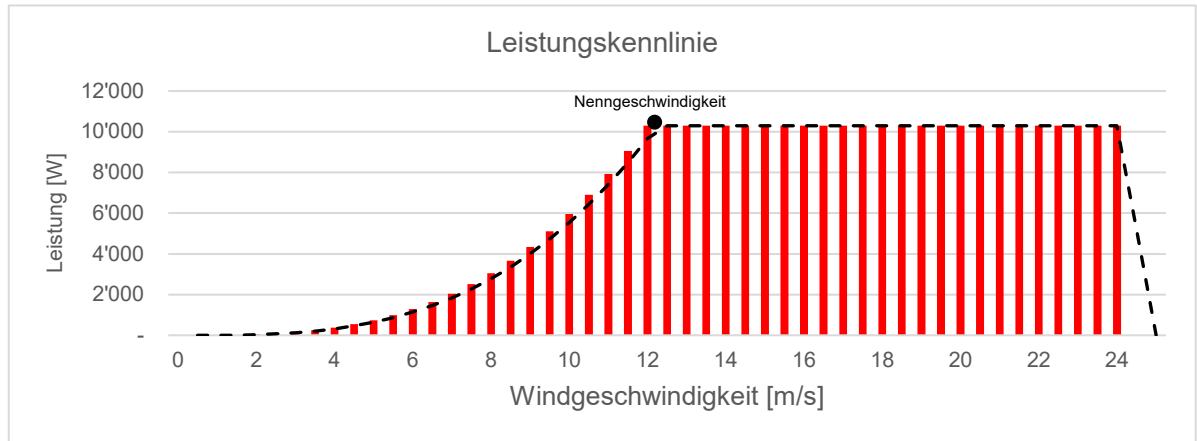


Abbildung 5: Leistungskennlinie einer horizontalen KWA. Annahmen: Rotordurchmesser 6 m, Leistungskoeffizient = 0.35

Der voraussichtliche Stromertrag kann anschliessend mithilfe der Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit und der Leistungskennlinie der Anlage berechnet werden. Dazu wird die jeweilige stündliche Windgeschwindigkeit (berechnet aus der Windverteilung) mit den Werten der Leistungskennlinie (Leistung pro Windgeschwindigkeit) multipliziert. Für den realen Stromertrag müssen zusätzlich die Verluste der Abschattungen durch Hindernisse und Netzeinspeisung miteinbezogen werden, welche je nach Standort und Technologie anders sein können.

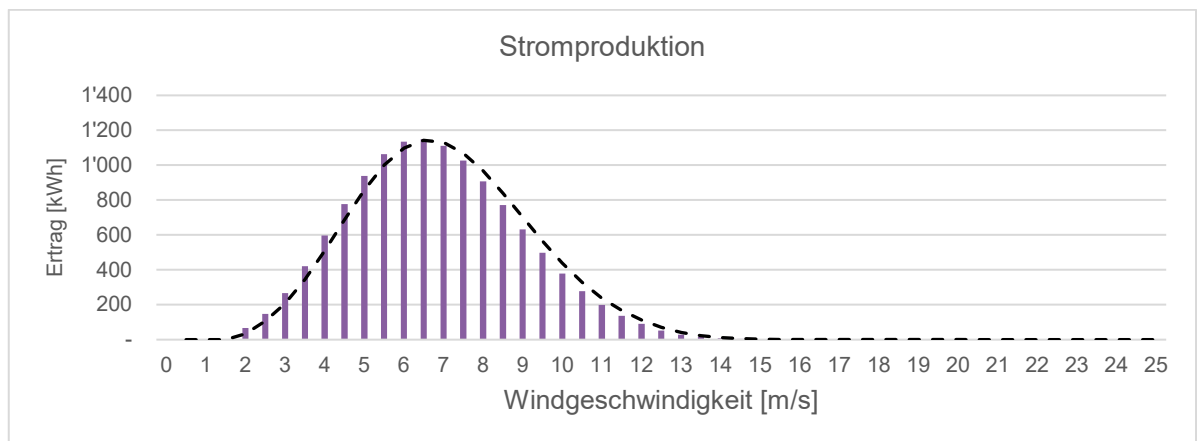


Abbildung 6: Berechneter Ertrag der KWA mit 6 m Rotordurchmesser und einem Leistungskoeffizienten von 0.35 an einem Standort mit einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 4 m/s.

2. Anwendungsmöglichkeiten

2.1. Leistungsklassen

Bei KWA herrscht eine grosse Bandbreite an Anwendungszwecken und Betreibern. Diese reichen von Hobbyanlagen bis hin zu Anlagen, die ganze Gewerbe mit Strom versorgen können. KWA können grob in drei Grössenklassen eingeordnet werden:

Mikrowindanlagen haben je nach Definition eine Nennleistung von 0.01-1.5 kW. In dieser Grössenordnung befinden sich die meisten auf dem Markt erhältlichen Vertikalachsenanlagen. Mikrowindanlagen sind oft für starke Winde oder extreme Wetterbedingungen ausgelegt, welche die kleine Rotorfläche zum Teil kompensieren können. Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten haben Mikrowindanlagen eine sehr geringe Leistung.

Kleinwindanlagen bis 5 kW Leistung und bis 4 m Rotordurchmesser sind am häufigsten und eignen sich für die Versorgung von Wohnhäusern. Es handelt sich vornehmlich um Horizontalachsenanlagen, es sind aber auch einzelne Vertikalachsenanlagen in diesem Leistungssegment verfügbar.

Kleinwindanlagen bis 30 kW Leistung und bis 20 m Rotordurchmesser eignen sich für die Stromversorgung von Gewerben, landwirtschaftlichen Betrieben oder Mehrfamilienhäusern. In diesem Leistungsbereich handelt es sich in erster Linie um Horizontalachsenanlagen. Es sind kaum zertifizierte Vertikalachsenanlagen verfügbar.

2.2. Betriebsart

KWA können entweder ganz, teilweise oder gar nicht ans Stromnetz gekoppelt sein. Bei vollständig netzgekoppelten Anlagen wird der gesamte produzierte und nicht selbst verbrauchte Strom ins öffentliche Stromverteilnetz eingespeist. Die Stromerzeugung ist unabhängig vom Eigenbedarf. Die Stromnetzbetreiber sind verpflichtet, den Strom zu einem gewissen Tarif abzunehmen. Die Betreiber der Anlage können den Strom für die Eigenstromnutzung verwenden und nur die Überschüsse in das öffentliche Verteilnetz einspeisen. Zusätzlich können Stromüberschüsse in Batterien gespeichert werden, um den Strom zu einem späteren Zeitpunkt zu nutzen. In Kombination mit Photovoltaikanlagen kann ein noch höherer Grad der Stromautarkie erreicht werden. Dezentrale Systeme, sogenannte Inselanlagen, verfügen über keinen Anschluss ans Stromnetz. KWA in Inselanlagen haben eine kleine Leistung (meist Mikroanlagen), und die Anlage ist oft mit Batterien und/oder PV-Anlagen verbunden. Zu Inselanlagen gehören beispielsweise Messstationen, Sendemasten für den Mobilfunk, Segelboote oder Alphütten.

KWA können entweder freistehend oder auf Dächern installiert werden. Freistehende Anlagen produzieren in der Regel mehr Energie und haben eine einfachere Installation. Bei dachmontierten KWA müssen vor der Installation Abklärungen bezüglich Statik, Lärm und ggf. auch Blitzschutz durchgeführt werden. Mehr Informationen in Kapitel 3.

2.3. Marktübersicht

Laut der [World Wind Energy Association](#) gibt es mittlerweile über 1,1 Millionen KWA weltweit mit einer totalen installierten Kapazität von 1'300 MW und durchschnittlichen Leistung von 1.1 kW. Die weltweit grössten Märkte für KWA sind China, die USA und Grossbritannien.

Die aktuelle Marktsituation von KWA in der Schweiz ist schwierig zu beurteilen, da Anlagen unter 24 kW (30 kVA) nicht offiziell erfasst und registriert werden müssen, besonders wenn sie zur Eigenversorgung dienen und der Strom nicht ins Stromnetz eingespeist wird. Laut BFE erhielten 2023 schweizweit rund 7 KWA unter 30 kW eine Einspeisevergütung. Im Kanton Zürich sind 7 KWA registriert (Pronovo Stand Nov. 2023). Verkaufszahlen von KWA in der Schweiz sind nicht verfügbar, allerdings gibt es einige Schätzungen zur Marktsituation in Deutschland und Österreich. Diese Schätzungen sind jedoch je nach Quelle sehr unterschiedlich und teils nicht mehr aktuell. Während Gehling et al. (2018) die Zahl der KWA in Deutschland auf 20'000 schätzt, waren 2022 im Deutschen Marktstammregister lediglich 712 Anlagen unter 30 kW mit einer Gesamtleistung von 4,7 MW registriert. Tendenziell gab es in den Jahren 2009 bis 2015 einen starken Zubau von KWA. In den letzten Jahren war der Verkauf von KWA eher rückläufig, bevor die Nachfrage im Jahr 2023 wieder anstieg.

Tabelle 1: Registrierte KWA im Kanton Zürich (Pronovo, Stand November 2023)

Ort	Datum Inbetriebnahme	Leistung bei Erstinbetriebnahme [kW]	Jahresproduktion [kWh]
Urdorf	11.04.2022	2.1	2'000
Brütten	01.04.2002	6.4	11'000
Brütten	25.08.2006	7	12'000
Winterthur	02.11.2000	7	9'800
Winterthur	02.11.2000	7	9'800
Winterthur	21.06.2002	7	9'500
Wädenswil	18.10.2007	10	4'000
Gesamt		46.5	58'100

Der Markt von KWA ist sehr unübersichtlich. Weltweit existieren rund 300 Hersteller von KWA mit insgesamt mehr als 1000 verschiedenen Modellen, und bei der Produktqualität gibt es grosse Unterschiede. Es gibt viele unseriöse Hersteller, die mit übertriebenen Nennleistungen werben oder deren Anlagen qualitativ minderwertig sind, besonders bei Mikrowindanlagen. Im Gegensatz zu Dänemark und Grossbritannien gibt es in Deutschland, Österreich und

der Schweiz noch keinen Zertifizierungsstandard, die KWA vor Markteinführung erfüllen müssen. Gütesiegel und Standards sind bislang vor allem für freistehende Anlagen verfügbar. Die bekanntesten Standards sind:

- IEC 61400-2 (Internationale Norm für Windenergieanlagen)
- AWEA Small Wind Turbine Standard (USA)
- MCS-Standard (UK)

Um eine dieser Zertifizierungen zu erhalten, müssen die Hersteller die Schallemissionen, die Nennleistung sowie den Energieertrag von Drittfachstellen messen lassen. In manchen Ländern wie Grossbritannien erhalten nur zertifizierte Anlagen eine Einspeisevergütung. Generell sind jedoch nur wenige Anlagen zertifiziert, da der Prozess mit hohen Kosten verbunden ist. Es gibt auch qualitativ hochwertige KWA ohne Zertifizierungen. Ein guter Indikator ist, wie lange der Hersteller schon am Markt ist und ob er seine Modelle regelmässig überarbeitet.

Im Gegensatz zu Horizontalachsenanlagen haben sich Vertikalachsenanlagen trotz optischen Vorteilen bisher nicht am Markt etabliert. Dies insbesondere, da die Zuverlässigkeit und die Wirtschaftlichkeit geringer ist als bei Horizontalachsenanlagen.

3. Standort und Installation

3.1. Windverhältnisse

Die Auswahl des richtigen Standorts ist essenziell für einen wirtschaftlichen und ökologischen Betrieb von KWA. Das wichtigste Kriterium ist die vorherrschende Windgeschwindigkeit, da diese massgeblich den Ertrag der Anlage beeinflusst. Windströmungen werden von der Topografie, der Bebauung und der Oberflächenstruktur (Rauigkeit) beeinflusst und variieren stark je nach Distanz zum Boden. Windverhältnisse im Siedlungsgebiet sind anders als ausserhalb des Siedlungsgebietes. Im Siedlungsgebiet wird der Wind durch zahlreiche Hindernisse beeinflusst, was zu starken kurzfristigen Schwankungen der Windrichtung und Geschwindigkeit (Turbulenz) führt. Mit steigender Höhe nehmen diese turbulenten Strömungen ab und die Windgeschwindigkeit nimmt zu.

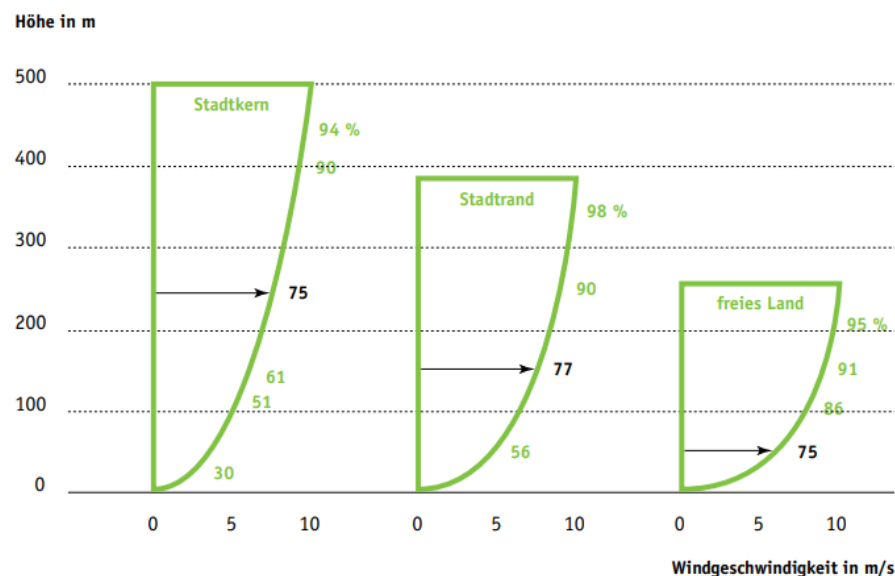


Abbildung 7: Entwicklung des Windgeschwindigkeitsprofils in der Höhe bei unterschiedlichen Siedlungsdichten (HTW, 2013)

Oft werden Modelle verwendet, um lokale Windverhältnisse abzuschätzen. Für solche Modelle werden hochauflösende 3D-Geodaten, ein Strömungssimulationsmodell sowie langjährige Windmessdaten aus der Umgebung benötigt. Bei 3D-Geodaten kann es sich bspw. um digitale Oberflächenmodelle auf Basis von Laserscandaten handeln. Die Rauigkeit der Oberfläche, welche massgebend für die Windverhältnisse ist, kann mithilfe von Landnutzungstypen definiert werden. Besonders in besiedelten Gebieten, wenn KWA beispielsweise auf Dächern installiert werden, braucht es Modelle mit einer Auflösung von einem Meter, um den kleinräumigen Unterschieden in den Windgeschwindigkeiten gerecht zu werden. Allerdings können selbst die komplexesten Berechnungsmethoden die effektiven Windverhältnisse nur begrenzt abschätzen. Windmessungen am geplanten Standort der KWA sind zwar

kostspielig, können aber äusserst hilfreich sein, um den provisorischen Stromertrag und die damit verbundene Wirtschaftlichkeit genauer abzuschätzen. Die Windmessungen sollten mindestens zwölf Monate dauern, damit die vorherrschenden Verhältnisse in allen Jahreszeiten und die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten berechnet werden können. Experten empfehlen einen minimalen Jahresmittelwert von 4 m/s. Zusammen mit der Leistungskennlinie des Herstellers lässt sich so der jährliche Ertrag abschätzen (siehe Kapitel 1.3).

3.2. Dachmontierte vs. freistehende Anlagen

Idealerweise trifft der Wind ungehindert auf die KWA, deswegen sollten die KWA möglichst hoch aufgestellt werden, sodass die Anlage die Umgebung überragt und einen ausreichenden Abstand zu Hindernissen hat. In dicht bebauten Gebieten mit Gebäuden auf gleicher Höhe und flachen Dächern herrschen zum Teil verhältnismässig niedrige Turbulenzen, da die Flachdächer eine glatte Oberfläche bilden und die Bodenrauigkeit der Umgebung vermindert wird. Allerdings kann es auch am Rand der Flachdächer durch starke Rand- und Umlenkeffekte lokal zu grossen Abweichungen der Windverhältnisse kommen. Der Abstand zwischen einem Hindernis (z.B. Gebäude, Bäume) und einer KWA sollte in Hauptwindrichtung 13 bis 20-mal mehr sein als die Hindernishöhe, was innerhalb der Bauzone schwierig ist.

Flachdächer sind im Vergleich zu Schrägdächern geeigneter für KWA, da sie besser erreichbar sind, was Installation und Wartung der Anlage einfacher gestaltet. Vor Installation muss geprüft werden, ob das Dach das Gewicht der Anlage sicher tragen kann und ob das Gebäude den zusätzlichen Belastungen durch Schwingungen und Vibrationen der Anlage während des Betriebes standhalten kann. Diese Schwingungen werden durch Massenunwuchten oder aerodynamische Unwuchten verursacht. Massenunwuchten sind auf den Hersteller zurückzuführen und können durch die Wahl qualitativ hochwertiger Anlagen vermieden werden. Aerodynamische Unwuchten entstehen durch die asymmetrische Blattanordnung und asymmetrische Anströmung der Anlage, besonders bei Vertikalachsenanlagen. Aerodynamische Unwuchten lassen sich nicht beheben. Bei Dachmontagen von KWA sollten zusätzliche Dämpfmechanismen integriert werden, um Materialermüdung sowie Lärmemissionen vorzubeugen.

Grundsätzlich sind jedoch ländliche Standorte mit freistehenden KWA zu bevorzugen, da diese mehr Strom produzieren und tendenziell wirtschaftlicher sind. Bei allen Anlagen ist eine fachgerechte Installation notwendig, da sonst Schäden an der Anlage auftreten können, welche die Lebensdauer verkürzen. Dies hat negative Folgen für die Umweltauswirkungen und Wirtschaftlichkeit der Anlage. Zudem sollte die Anlage über diverse Sicherheitsmechanismen verfügen, wie etwa Sturmsicherung oder Blitzschutz bei exponierter Lage.

3.3. Lärm und Schattenwurf

Lärmemissionen hängen zunächst vor allem von den gewählten Anlagentypen und der Montageart ab. Der Schallleistungspegel variiert je nach Windgeschwindigkeit und der daraus resultierenden Blattspitzgeschwindigkeit, welche bei Horizontalachsenanlagen höher ist als bei Vertikalachsenanlagen. Generell ist der Schallpegel jedoch anlagenspezifisch und sollte durch den Hersteller oder im Bericht der Zertifizierung angegeben werden. Eine einheitliche Angabe

zum Schallleistungspegel gibt es nicht, weshalb es schwierig ist, Anlagen anhand ihrer Angaben miteinander zu vergleichen. Nur wenige Hersteller verfügen über unabhängige Messungen der Lärmemissionen oder Angaben zur Bestimmung der Mindestabstände. Diese sind länderspezifisch und richten sich nach der Lärmschutzgesetzgebung.

In einer österreichischen Studie wurden vier verschiedene Anlagentypen getestet. Ab einer Windgeschwindigkeit von 7 m/s überschritten die meisten Anlagentypen den Emissionsgrenzwert von 40 dB(A) nachts in Erholungsgebieten und 45 dB(A) nachts in Wohngebieten in 20m Nähe. Zusätzlich ist bei bestehenden KWA eine regelmässige Wartung nötig, damit es nicht zu störenden Quietsch- oder Rattergeräuschen kommt. Lärmemissionen können demnach ein wichtiges Hindernis für die Umsetzung von KWA sein.

Lichtreflexionen hängen vom Anlagentyp und der Oberflächenbeschaffenheit der Rotoren ab. So haben matte Oberflächen geringere Reflexionsgrade als glänzende. Auch der Schattenwurf der Anlage ist je nach Bauweise unterschiedlich. In der Schweiz gibt es keine gesetzlichen Regelungen bezüglich des Schattenwurfs bei Windanlagen. Bei konkreten Projekten für GWA orientiert man sich an den Richtlinien aus Deutschland. Hier dürfen Wohnhäuser in der Umgebung maximal acht Stunden pro Jahr und 30 Minuten pro Tag von Windrädern beschattet werden. Störend ist vor allem der bewegte Schattenwurf des sich drehenden Rotors.

3.4. Eiswurf

Ab Temperaturen unter 1°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von mindestens 90% können die Rotorblätter vereisen. Zur Verhinderung von Schäden an Personen oder Sachgütern durch den damit verbundenen Eiswurf oder Eisabfall ist ein Sicherheitsabstand einzuplanen (empfohlen wird ein Abstand 1,5-mal der Gesamthöhe). Das Risiko von Eiswurf ist je nach Anlagentyp unterschiedlich. So kommt es beispielsweise bei Konzentratoren kaum zu Eiswurf, da die Rotorblätter von einem Mantel umgeben sind.

GWA verfügen über eine Sensorik, welche Eisbildung erkennt, und die Anlage abschaltet. KWA besitzen dies nicht, da die zusätzlichen Kosten nicht in Relation zur Gesamtinvestition stehen. Dunkle Farben können dazu beitragen, dass Eis schneller schmilzt. Anti-Freeze Folien, welche die Entstehung von Eis auf den Rotorblättern verhindern sollen, wirken nur bedingt. Es wird daher empfohlen, die Vereisung der Anlage anhand der Temperatur und Luftfeuchtigkeit zu bestimmen.

4. Energiewirtschaftliche Einordnung

4.1. Beitrag zur Stromversorgung

Heute spielt der Beitrag von KWA zur Stromversorgung sowohl international als auch in der Schweiz eine unbedeutende Rolle. Auch in Zukunft wird – im Gegensatz zu GWA – das Potenzial von KWA als gering eingeschätzt.

Das Konzept Windenergie des Bundes definiert Rahmenbedingungen für die Planung von Windenergieanlagen. Dabei sollen Windenergieanlagen bevorzugt an Standorten mit möglichst hohen Erträgen konzentriert werden, um den Ressourcenverbrauch und die Umweltauswirkungen zu minimieren. KWA werden dabei kaum erwähnt, da sie im Vergleich zu GWA sehr geringe Erträge erzielen.

KWA werden auch in den Energieperspektiven 2050+ des Bundes und der Energiestrategie des Kantons Zürich nicht thematisiert. Im Schlussbericht zum Windpotenzial der Schweiz 2022 wird das Potenzial von Windenergieanlagen schweizweit auf knapp 30 TWh pro Jahr geschätzt und die Energiestrategie 2022 des Kantons weist ein kantonales jährliches Potenzial von 800 GWh aus, was mit den Erhebungen des Bundes übereinstimmt.

Um dieselbe Menge an Strom wie eine einzige GWA zu produzieren wären je nach Grösse mehrere hundert bis mehrere tausend KWA notwendig. Das ist nicht vereinbar mit dem Ziel, möglichst wenige Windenergieanlagen an möglichst wenigen Standorten zu bauen. Deswegen empfiehlt das BFE, Kleinwindanlagen nur an schwer zugänglichen Standorten mit eingeschränktem oder fehlendem Anschluss an das Stromnetz zu installieren.

4.2. Wirtschaftlichkeit

Pauschale Aussagen über die Wirtschaftlichkeit von KWA sind schwierig, da die Stromproduktion, welche in der Regel das ausschlaggebende Kriterium ist, je nach Standort und Windverhältnissen des Betreibers stark variieren kann. Technische Eigenschaften wie Anlagegrösse und Gewicht beeinflussen die Kosten für die Installation und Unterkonstruktion der Anlage ebenfalls. Weitere Kosten können für die Baubewilligung und die damit verbundenen Abklärungen anfallen.

Der zentrale Kennwert der Wirtschaftlichkeit von KWA sind die Stromgestehungskosten (CHF/kWh). Bei Eigenverbrauch des produzierten Stroms ist der Betrieb von KWA wirtschaftlich, wenn die Stromgestehungskosten tiefer sind als die Strombezugskosten. Falls der produzierte Strom ins Netz eingespeist wird, ist der Betrieb dann wirtschaftlich, wenn der mögliche Erlös aus dem Stromverkauf höher als die Stromgestehungskosten liegt. Die Kosten von KWA setzen sich aus Investitionskosten (Anschaffungskosten und Planungs- und Installationskosten) sowie Betriebskosten zusammen. Die spezifischen Investitionskosten beschreiben die notwendigen Investitionen pro kW installierter Leistung. Für KWA belaufen sich die spezifischen Investitionskosten zwischen 3000 und 10'000 CHF pro kW Leistung. In der Regel sind Anlagen mit einer höheren Leistung mit geringeren spezifischen Investitionskosten

verbunden. Grössere Anlagen sind demnach meist wirtschaftlicher als kleinere. Allerdings können zusätzliche Faktoren wie Dachverstärkung ab einer gewissen Grösse oder Hausanschluss-Netzverstärkung die Investitionskosten von grösseren Anlagen erhöhen. Auf dem Markt sind auch günstigere Modelle verfügbar, die jedoch oftmals nicht getestet oder zertifiziert sind und von minderwertiger Qualität sind. Zum Vergleich: bei Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von 5-15 kW belaufen sich die Investitionskosten auf rund 2500-4000 CHF pro kWp Leistung.

Windenergieanlagen erhalten nur dann Investitionsbeiträge, wenn ihre Leistung über 2 MW beträgt. KWA werden nicht gefördert. Betreiber einer KWA können jedoch an dem Einspeisevergütungssystem teilnehmen und erhalten pro kWh Strom, der ins Netz eingespeist wird, eine Einspeiseprämie. Der Vergütungssatz wird mithilfe von Referenzanlagen vom BFE berechnet und variiert je nach Technologie und Leistungsklasse. Die Dauer der Vergütung beträgt 15 Jahre ab der Inbetriebnahme. Dabei fallen KWA mit einer Leistung bis und mit 10 kW unter Kleinwindanlagen und der Vergütungssatz ändert sich über die gesamte Dauer nicht. Bei Anlagen mit einer Leistung über 10 kW wird der Vergütungssatz, wie bei GWA, nach fünf Jahren Betriebszeit überprüft und angepasst.

Die mögliche Stromerzeugung hängt von der Leistungskennlinie der Anlage, der Abschaltgeschwindigkeit der Anlage und der Wahl des Standortes ab. Da die Stromerzeugung in der stark von der Windgeschwindigkeit abhängt, sind KWA nur dann wirtschaftlich sinnvoll, wenn der gewählte Standort genügend Wind hat. Meistens sind die Stromgestehungskosten von KWA, insbesondere von Anlagen im Leistungsbereich unter 10 kW, über dem Strompreis (bei Eigenverbrauch) oder dem Erlös aus dem Stromverkauf (bei Netzeinspeisung) und die Investition kann langfristig kaum amortisiert werden. Die Höhe des zukünftigen Strompreises und der Einspeisevergütung beeinflusst demnach, wie attraktiv KWA sind.

Die effektiven Gestehungskosten variieren nach Anlage und Standort. Die ZHAW schätzt die Gestehungskosten von KWA auf mindestens 0.25 CHF/kWh und maximal 1 CHF/kWh ein. Tabelle 2 zeigt die Gestehungskosten zwei exemplarischer Anlagen mit 1.5 bzw. 12 kW. Die Kosten hängen stark von den Anzahl Volllaststunden pro Jahr ab (Stunden pro Jahr, in denen die Anlage bei voller Nennleistung laufen müsste, um die Jahresproduktion zu erreichen). Bei 900 Volllaststunden belaufen sich die Gestehungskosten auf 0.85 CHF/kWh (Bornay 1.5 kW Anlage) und 0.47 CHF/kWh (Antaris 12 kW Anlage). Bei Standorten mit noch tieferen Windgeschwindigkeiten steigen die Gestehungskosten noch mehr an. Die Berechnung enthält keine Kosten für Windmessungen, weitere Standortabklärungen oder Montagearbeiten. Zudem kann es sein, dass manche Anlagen die durchschnittliche Lebensdauer einer KWA von 20 Jahren nicht erreichen und früher ersetzt werden müssen.

Hersteller	Modell	Nennleistung [kW]	Spezifische Investitionskosten [CHF/kW]	Stromgestehungskosten [CHF/kWh]	Volllaststunden [h]
Bornay	Wind 13+ 1500w Netzbetrieb	1.5	10'000	0.36 – 0.85	1800 (max) 900 (min)
Braun	Antaris 12 kW Netzbetrieb	12	6'700	0.24 – 0.47	1800 (max) 900 (min)

Tabelle 2: Gestehungskosten von zwei Beispielanlagen

5. Umweltauswirkungen

5.1. Ökobilanz von Kleinwindanlagen

Bei Betrachtung des Ressourcenverbrauchs bei der Erstellung von Windenergieanlagen (Ökobilanz) pro kWh produzierter elektrischer Energie schneiden grössere Windenergieanlagen besser ab. Grosswindanlagen erzielen bessere Erträge, da Winde bei höherem Turm und längeren Flügeln besser genutzt werden können. Je nach Standort kann diese Zahl auch viel höher sein, etwa wenn KWA an Standorten mit tiefer Windgeschwindigkeit installiert werden. Pro kWh produziertem Strom verursachen KWA mehr CO₂-Emissionen als GWA und benötigen ein Vielfaches mehr an Ressourcen. Wie viel grösser die Auswirkungen tatsächlich sind, hängt in erster Linie von den Windverhältnissen und der damit verbundenen effektiven Stromproduktion der KWA ab. Zudem spielt die Robustheit der Anlage eine grosse Rolle. Wenn die Anlage nicht fachgerecht installiert wurde oder qualitativ minderwertig ist, kann es sein, dass sie noch vor Ende der Lebensdauer ersetzt werden muss. Das erhöht den Ressourcenverbrauch und die Umweltauswirkungen pro kWh zusätzlich.

Der grösste Teil der Umweltauswirkungen sind auf das Fundament und den Mast von KWA zurückzuführen, da oftmals Stahl und Beton verwendet werden. Wie auch bei GWA sind fachgerechte Entsorgung und Recycling essenziell, um die Umweltauswirkungen zu minimieren.

5.2. Auswirkungen auf Vögel und Fledermäuse

Die Auswirkungen von KWA auf Vögel und Fledermäuse sind bei weitem nicht so gut untersucht wie die von grossen Windenergieanlagen. Es ist schwierig, generelle Aussagen zu treffen, da KWA sehr divers in Grösse, Höhe, Bauweise und Rotordurchmesser sind. Man geht davon aus, dass das Mortalitätsrisiko von Fledermäusen und Vögeln geringer ist als bei GWA aufgrund der geringeren Rotorfläche. Wenn man allerdings die Anzahl geschätzter Schlagopfer mit der installierten Leistung in Relation setzt, ändert sich diese Aussage. Grundsätzlich kann man jedoch bei der Standortwahl von KWA Kollisionen reduzieren. So sollte man beispielsweise darauf achten, nicht in Flugrouten oder Quartieren von Fledermäusen eine KWA zu installieren und genügend Abstand zu Strukturen lassen, welche anziehend auf Vögel und Fledermäuse wirken. Zudem sollten Standorte mit Artenförderungsmassnahmen, Wildruhezonen, Jagdbanngebiete und Wildtierkorridore vermieden werden.

6. Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Bewilligung von KWA liegt innerhalb der Bauzone im Kanton Zürich grundsätzlich in der Kompetenz der Gemeinde. Ausserhalb der Bauzone ist für solche Anlagen, neben der kommunalen Baubewilligung, ein Entscheid des Kantons erforderlich. Grundsätzlich handelt es sich bei KWA immer um Einzelfallbeurteilungen.

KWA müssen die Grenzwerte der Lärmschutzverordnung (LSV, SR 814.41) einhalten. Da es keine einheitliche Zertifizierung bei KWA gibt, muss im Einzelfall eine lärmtechnische Beurteilung durchgeführt werden. Zudem muss in der Regel eine Fachperson die Auswirkungen einer potenziellen Anlage auf Vögel und Fledermäuse beurteilen. Für Kleinstwindanlagen können bezüglich dem Detaillierungsgrad der Abklärungen Erleichterungen erfolgen.

6.1. Bewilligung innerhalb Bauzonen

Für das Bewilligungsverfahren innerhalb der Bauzone ist grundsätzlich die Gemeinde zuständig. Dabei ist u.a. zu prüfen, ob die Anlage zonenkonform ist und die baupolizeilichen Anforderungen, wie z.B. die Gebäudehöhe eingehalten werden können. Sie wird in der Regel auch beurteilen, ob sich die Anlage ausreichend einordnet. Vorbehalten bleiben weitere kantonale Abklärungen im Bereich Denkmalschutz und Ortsbildschutz.

6.2. Bewilligung ausserhalb Bauzonen

Ausserhalb der Bauzone ist zusätzlich zur Baubewilligung der Gemeinde eine raumplanungsrechtliche Bewilligung des Kantons erforderlich. Die Beurteilung hierfür erfolgt nach Art. 22 Abs. 2 Raumplanungsgesetz (RPG, SR 700), beziehungsweise nach Art. 24 RPG. Damit eine Standortgebundenheit nachgewiesen werden kann wird geprüft, ob die Stromerzeugung primär für den Eigenverbrauch vorgesehen ist. Für die Erschliessung, Errichtung, und den Unterhalt der KWA dürfen nur geringfügige Eingriffe notwendig sein. Die Anlage muss sich möglichst gut in die Landschaft einfügen. Dabei sind auch alternative Stromerzeugungsarten zu prüfen (insbesondere Photovoltaik mit Stromspeicherung). Die durchzuführende Standortevaluation der KWA dient dazu, den besten Standort für die Anlage zu ermitteln. Für die KWA ist gestützt auf Art. 44 der Raumplanungsverordnung (RPV, SR 700.1) ein Rückbaurevers im Grundbuch einzutragen.

Liegt die KWA in einem Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler (BLN) oder im Geltungsbereich einer überkommunalen Schutzverordnung (SVO), so ist zusätzlich eine landschaftsschutzrechtliche Bewilligung erforderlich. Hierfür ausschlaggebend sind die konkreten Auswirkungen des Einzelvorhabens auf die Landschaft.

Im Weiteren können auch ausserhalb der Bauzonen Denkmalschutz- oder Ortsbildschutzobjekte tangiert sein und damit zusätzliche Abklärungen erforderlich machen.

KWA im Wald sind in der Regel nicht bewilligungsfähig.

7. KWA als Pilotprojekt

Der Kanton Zürich fördert Pilotprojekte zur Erprobung energiesparender Systeme und von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien. Innovative Technologien setzen sich damit schneller am Markt durch und inspirieren zur Nachahmung.

Diese Möglichkeit steht auch für KWA offen. Weitere Informationen und die aktuellen Förderbedingungen finden sich unter [Pilotprojekte Energie | Kanton Zürich \(zh.ch\)](https://www.zh.ch/de/energie/pilotprojekte-energie).

8. Kleinwind in anderen Kantonen

Immer mehr Kantone setzen sich mit KWA und deren Bewilligungsverfahren auseinander. In den folgenden Abschnitten werden Richtlinien und zusätzliche Regelungen für KWA in ausgewählten Kantonen thematisiert. Diese Übersicht ist jedoch nicht abschliessend.

Schaffhausen

Im Richtplan des Kantons Schaffhausen findet sich eine Grundlagenkarte, in der 33 potenziell günstige Standorte für Kleinwindanlagen eingetragen sind, auch wenn diese nicht parzellenscharf definiert sind. Diese Standorte basieren auf einer ersten Interessensabwägung, die auf der Windpotenzialstudie des Kantons aus dem Jahr 2009 beruht. Eine detaillierte Prüfung dieser Standorte steht jedoch noch aus.

Der Kanton Schaffhausen hat einen Leitfaden Kleinwindanlagen erarbeitet. Dieser Leitfaden erläutert den Planungsbedarf und schafft Klarheit auf Seiten der Gesuchsteller/Investoren sowie für Baubehörden. Kern des Leitfadens bildet eine Kaskade von Fragen, die der Gesuchsteller vor dem Einreichen des Baugesuchs abklären muss. Im Wesentlichen geht es um den Nachweis der Standortgebundenheit und der Eignung des Standortes. Letzteres umfasst Themen wie Windverhältnisse, Anlagentyp, Lärmimmissionen, Schattenwurf sowie Landschafts- und Artenschutz (Vögel und Fledermäuse). Die Kaskade erklärt auch, unter welchen Bedingungen einfache Abklärungen ausreichend sind und wann vertiefte Analysen notwendig sind. Die Ergebnisse dieser Abklärungen sind Bestandteil des Baugesuchsdossiers, das bei der Standortgemeinde bzw. dem kantonalen Bauinspektorat eingereicht wird. Auf Basis der Unterlagen führt die kantonale Baubehörde eine umfassende Interessensabwägung durch.

Thurgau

Der Kanton Thurgau hat einen Leitfaden für Windenergieanlagen veröffentlicht und schätzt das Potenzial der KWA als gering ein. Des Weiteren wird die Wirtschaftlichkeit von KWA häufig als unzureichend bewertet, weshalb der Kanton Thurgau das Windpotenzial vor allem mit GWA erschliessen will. Ausserhalb der Bauzonen dürfen KWA nur dann errichtet werden, wenn der Strom direkt in landwirtschaftlichen Betrieben verwendet wird oder eine Standortgebundenheit aufgrund eines ausreichenden Windpotenzials nachgewiesen werden kann.

Voraussetzung für eine Genehmigung sind eine Windmessung, Lärmprognose, Abschätzung des Schattenwurfes sowie Abklärungen zu möglichen Auswirkungen auf Vögeln und Fledermäusen. Darüber hinaus besteht eine Rückbaupflicht für alle KWA.



Aargau

Standorte für KWA müssen auf Nabenhöhe eine durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 3 m/s aufweisen. Dabei sind Windmessungen nicht zwingend erforderlich, und das Windpotenzial kann auch rechnerisch anhand der Windpotenzialkarte des Kantons Aargau nachgewiesen werden. KWA sind im Kanton Aargau in Industrie- und Gewerbezone zulässig.

Bern

KWA sollen in der Regel nur in speziellen Situationen realisiert werden (z. B. innerhalb der Siedlungsgebiete oder bei fehlendem Netzanschluss). KWA als Nebenanlagen zu Gebäuden sind baubewilligungsfrei, wenn der Rotordurchmesser kleiner als 2 m, die Gesamthöhe (inkl. Rotor) unter 2,50 m und der Grenzabstand ab Rotorausserbegrenzung für Nebengebäude eingehalten wird. Alle weiteren WEA auf Gebäuden und alle anderen WEA sind baubewilligungspflichtig. Anlagen ausserhalb Bauzone sind zulässig, wenn der Netzanschluss fehlt oder eine andere spezielle Situation vorliegt und die WEA nahe an bestehende grössere Bauten und Anlagen grenzt.

9. Quellen

ARE. 2020. Konzept Windenergie. Basis zur Berücksichtigung bei der Planung von Windenergieanlagen. Bern.

BFE. 2011. Positionspapier Kleinwindanlagen und Energieforschung in der Schweiz. Bundesamt für Energie. Bern.

BFE. 2024. Liste aller KEV-Bezüger im Jahr 2023

BFN. 2022. Praxisinfo: Schutz von Vögeln und Fledermäusen an Kleinwindenergieanlagen. Bundesamt für Naturschutz. Bern.

BWE. 2024. Windenergieanlagen mit senkrechter Drehachse – «Vertikalachser». [Vertikalachser | BWE e.V. \(wind-energie.de\)](#) (Zugriff am 18.09.2024)

Cattin R., Heikkilä U., 2016, Evaluation of ice detection systems for wind turbines, Bern.

EnergieSchweiz. 2024. Simulation von Energiesystemen mit dem Tachion-Simulation-Framework. BFE. Bern.

Gasch R., Kamieth R., 2016, Windkraftanlagen – Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb. 9. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden.

Gehling, M. 2019. Installierte Leistung, Stromerzeugung und Marktentwicklung von Kleinwindanlagen in Deutschland

Hau E., 2008, Windkraftanlagen – Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin.

HTW Berlin. 2013. Empfehlungen zum Einsatz kleiner Windenergieanlagen im urbanen raum – Ein Leitfaden.

Jüttemann, P. 2023. Kleinwind-Marktreport – Die besten Kleinwindkraftanlagen in Deutschland. Bad Honnef

Jüttemann, P. 2023. Kosten kleiner Windkraftanlagen und Wirtschaftlichkeit (19.08.2024): [Kosten und Wirtschaftlichkeit kleiner Windkraftanlagen | Expertentipps \(klein-windkraftanlagen.com\)](#)

Kanton Aargau, Departement für Bau, Verkehr und Umwelt. 2023. Richtplan Kanton Aargau Kapitel E1.3: Windkraftanlagen.

Kanton Appenzell Ausserroden, Departement für Bau und Volkswirtschaft. 2024. Kleinwindkraftanlagen. [Kleinwindkraftanlagen - Appenzell Ausserroden \(ar.ch\)](#) (Zugriff am 19.09.2024).

Kanton Bern, Amt für Gemeinden und Raumordnung. 2018. Wegleitung «Anlagen zur Nutzung der Windenergie». Bern

Kanton Schaffhausen Baudepartement. 2021. Leitfaden Kleinwindenergieanlagen. Schaffhausen.

Kanton Thurgau Departement für Bau und Umwelt. 2021. Leitfaden für die Planung von Windenergieanlagen im Kanton Thurgau.

Kouloumpis, V., Sobolewski, R. A., Yan, X. 2020. Performance and life cycle assessment of a small scale vertical axis wind turbine. Journal of Cleaner Production. 247. 119520. Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119520

Leonhartsberger, K., Peppoloni, M., Hirschl, A., Baumann-Stanzer, K., Stenzel, S., Lotterer, C., Leeb, K., Klappacher, J., Tiefgraber, C., Zajicek, L., Drapalik, M., Reiterer, D., Teppner, R., Auer, M., 2019b, Urbane Windenergie - Entwicklung von Beurteilungsmethoden für den Einsatz von Kleinwindenergieanlagen in urbaner Umgebung. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 30/2019

Leonhartsberger, K., Hirschl, A., Schidler, S., Priglinger, B., Peppoloni, M., Österreicher, D., Baumann-Stanzer, K., Stenzel, S., Lotterer, C., Tiefgraber, C., Stökl, A., Lachinger, F. 2022. Evaluierung der Auswirkungen von gebäudemontierten KWEA auf Performance, Personen, Gebäude und Umgebung. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 10/2022

Lombardi, L., Mendecka, B., Carnevale, E., Stanek, W. 2018. Environmental impacts of electricity production of micro wind turbines with vertical axis. Renewable Energy 128, 553-564. Doi: 10.1016/j.renene.2017.07.010

Martina Klärle und Anne Fuchs (2013): WIND-AREA – automatisierte Berechnung von Windpotenzialkarten für Kleinwindanlagen auf der Basis hochauflösender Fernerkundungsdaten. In: Strobl, J., Blaschke, T., Griesebner, G. & Zagel, B. (Hrsg.) (2013): Angewandte Geoinformatik 2013.

Minderman, J., Pendlebury, C. J., Pearce-Higgins, J. W., Park, K., J. 2012. Experimental Evidence for the Effect of Small Wind Turbine Proximity and Operation on Bird and Bat Activity. PLoS ONE 7(7): e41177. doi:10.1371/journal.pone.0041177

Nickl, C., Scherzl, A. M., Baur, I., Speer, F. 2022. Potenzialstudie Kleinwindkraftanlagen auf Münchner Gebäuden – Endbericht. Team für Technik GmbH.

Prognos AG, TEP Energy GmbH, INFRAS AG: 2021: Energieperspektiven 2050+ - Gesamtdokumentation der Arbeiten. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Bern.

Pronovo. 2024. Vergütung. [Vergütung – Pronovo AG](#) (Zugriff am 16.09.2024)

PSI. 2019. Potenziale, Kosten und Umweltauswirkungen von Stromproduktionsanlagen – Aufdatierung des Hauptberichts (2017). Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Bern

Schweizerische Koordinationsstelle für Fledermausschutz. 2015. Merkblatt: Kleine und mittelgrosse Windenergieanlagen und Fledermausschutz: Angewendete Verfahren bei der Planung und Umsetzung in der Schweiz. Zürich

Shoutou, L., Chen, Q., Li, Y., Pröbsting, S., Yang, C., Zheng, X., Yang, Y., Zhu, W., Shen, W., Wu, F., Li, D., Wang, T., Ke, S. 2022. Experimental investigation on noise characteristics of small scale vertical axis wind turbines in urban environments. Renewable Energy. 200. 970-982. 41177. Doi: [10.1016/j.renene.2022.09.099](https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.099)

Tremeac, B., Meunier, F. 2009. Life cycle analysis of 4.5 MW and 250 MW wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13. 2104-2110. Doi: 10.1016/j.rser.2009.01.001

World Wind Energy Association. 2024. Knowledge Base. [Knowledge Base – WWEA Small Wind Platform \(wwindea.org\)](https://www.knowledgebase-wwea.org/) (Zugriff am 20.08.2024)

ZHAW. 2016. Wann sind Kleinwindanlagen sinnvoll? Wädenswil.