

2 Bauformen Kleinwindkraftanlagen

Auf dem Markt der Kleinwindanlagen sind viele verschiedenen Turbinentypen anzutreffen. Die Unterschiede reichen dabei von ihrer aerodynamischen Wirkungsweise bis hin zur konstruktiven Bauweise. Windkraftanlagen nutzen zum einen das Widerstandsprinzip zur Windenergieumwandlung und zum anderen das Auftriebsprinzip, analog zu einem Flugzeugflügel. Des Weiteren gibt es Unterschiede in der Drehachse des Rotors. Dreht sich der Rotor um eine vertikale Achse, so handelt es sich um eine vertikale Windkraftanlage. Horizontale Windkraftanlagen verfügen über eine horizontale Rotordrehachse. Eine weitere Differenzierung erfolgt durch Schnell- und Langsamläufer. Folgende Abbildung 3 zeigt einen Überblick über handelsübliche Kleinwindanlagen und deren unterschiedliche Bauformen. Im Anschluss werden die einzelnen Bauformen aufgeführt und im Detail erläutert.

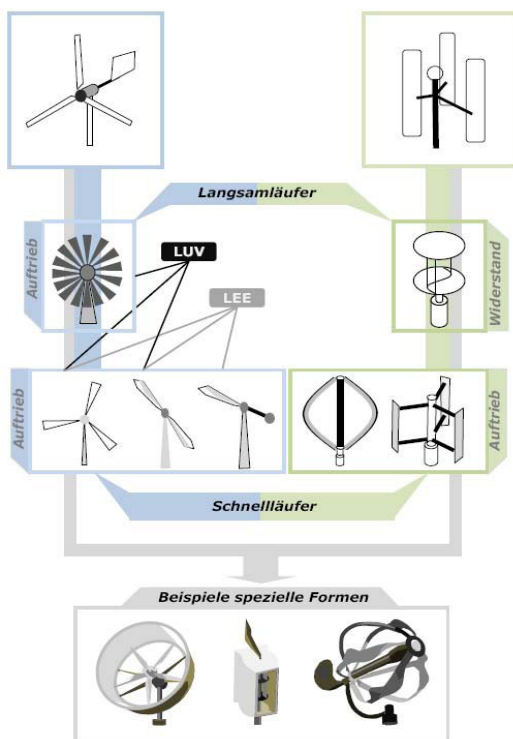


Abbildung 3: Übersicht Bauformen Kleinwindkraftanlagen [vgl. Twele 2011]

2.1 Widerstands- und Auftriebsläufer

Die Umwandlung der Leistung in mechanische Energie erfolgt bei Windkraftanlagen nach dem Widerstands- oder Auftriebsprinzip. Das Widerstandsprinzip ist das einfachste und älteste Prinzip zur Windenergienutzung. Wird ein Widerstandsläufer durch eine Windgeschwindigkeit v_w angeströmt, so stellt dessen Angriffsfläche A einen Widerstand im Wind dar. Dadurch entsteht eine Widerstandskraft F_w , die parallel zur Anströmrichtung das Rotorblatt antreibt, vgl. Abbildung 4. Ein Nachteil der Widerstandsläufer ist der schlechte Leistungsbeiwert¹ von maximal 0,2. Ein Vorteil gegenüber dem Auftriebsläufer ist jedoch, dass Widerstandsläufer aufgrund der größeren Angriffsfläche eine geringere Einschaltgeschwindigkeit benötigen, vgl. hierzu E. Hau [Hau 2008].

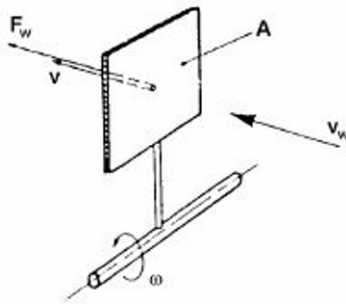


Abbildung 4: Widerstandsläufer [vgl. BWE 2013a]

Die Rotorblätter eines Auftriebsläufers basieren auf dem Prinzip eines Flugzeugflügels und werden durch aerodynamischen Auftrieb bewegt. Der anströmende Wind wird ober- und unterhalb des Rotorblattes vorbeigeführt. Durch die Wölbung des Blattes muss die Luft auf der Oberseite schneller fließen als auf der Unterseite, da sie auf der Oberseite eine weitere Strecke zurück zulegen hat, siehe Abbildung 5.

¹ Der Leistungsbeiwert c_p beschreibt, welcher Anteil der Windleistung in mechanische Leistung umgewandelt werden kann. Also der Wirkungsgrad bei der Umwandlung von Windenergie in mechanische Energie. Laut Betz liegt der ideale maximale Leistungsbeiwert c_{pR} bei 0,593 [vgl. Hau 2008].

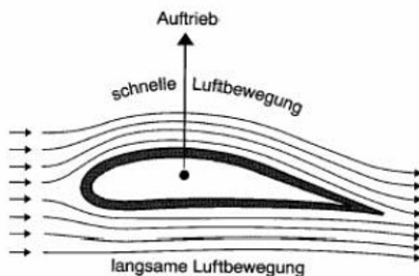


Abbildung 5: Darstellung Luftströmung an Rotorblatt [vgl. BWE 2013b]

Auf der Oberseite entsteht dadurch ein Unterdruck und auf der Unterseite ein Überdruck. Dieser Druckunterschied erzeugt eine senkrecht zur Anströmungsrichtung verlaufende Auftriebskraft F_A , welche die Rotorblätter in Bewegung versetzt, vgl. Abbildung 6. Antriebsläufer finden heutzutage die meiste Anwendung, da diese über einen besseren Leistungsbeiwert als Widerstandsläufer verfügen. Die effizientesten Anlagen auf Basis des Auftriebsprinzips erreichen bereits einen Leistungsbeiwert von 0,52 [vgl. BWE 2013b].

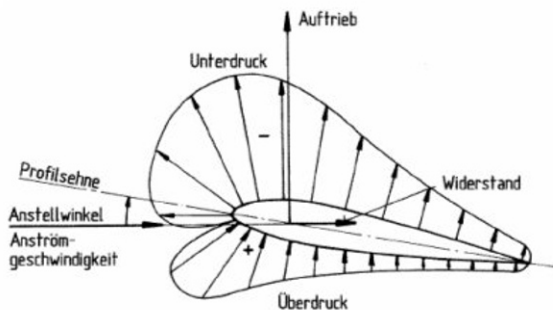


Abbildung 6: Luftkräfte an Rotorblatt eines Auftriebsläufers [vgl. Hau 2008]

2.2 Schnell- und Langsamläufer

Schnell- und Langsamläufer werden durch die Schnelllaufzahl λ definiert. Die Schnelllaufzahl gibt das Verhältnis zwischen der Umfangsgeschwindigkeit der Rotorblattspitze und der Windgeschwindigkeit an [vgl. Hau 2008].

$$\lambda = \frac{\text{Umfangsgeschwindigkeit der Blattspitze } U}{\text{Windgeschwindigkeit } v_w}$$

Der Leistungsbeiwert ist ebenso abhängig von der Schnelllaufzahl. In Abbildung 7 werden typische Leistungsbeiwerte und Schnelllaufzahlen diverser Windanlagen aufgezeigt. In der Literatur herrscht keine Einigkeit, ab welcher Schnelllaufzahl eine Windturbine als Schnellläufer gilt. Im Allgemeinen sind Widerstandsläufer, wie zum Beispiel der Savonius Rotor, die Amerikanische Windturbine und die Holländer Windmühle als Langsamläufer anzusehen.

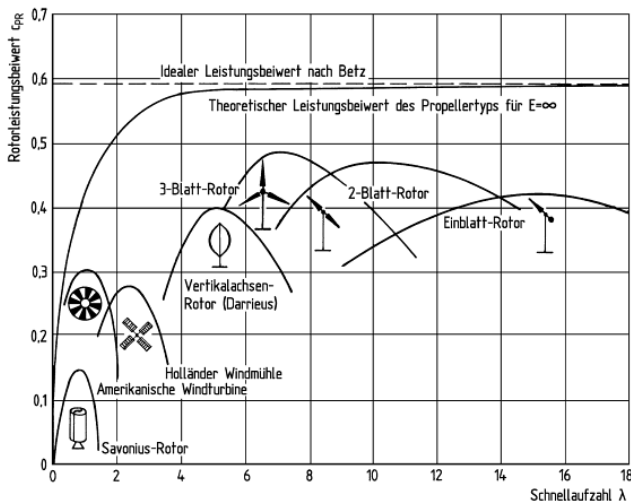


Abbildung 7: Typische Schnelllaufzahlen und Leistungsbeiwerte verschiedener Windkrafttypen [vgl. Hau 2008]

2.3 Vertikal- und Horizontalläufer

Je nach Drehachse des Rotors handelt es sich um einen Vertikal- oder Horizontalläufer. Dreht sich der Rotor um eine vertikale Achse, so wird dieser Rotor als Vertikalläufer bzw. die jeweilige Windturbine als Vertikalanlage bezeichnet. Rotoren mit einer horizontalen Drehachse werden als Horizontalläufer bezeichnet und die entsprechende Windturbine als Horizontalanlage. Vertikale Windanlagen stellen dabei die älteste Bauform dar, denn Persische Windmühlen basierten bereits um 1700 auf diesem Prinzip. Heute gibt es vier verschiedene Typen der Vertikalachser, den Savonius, Darrieus, Darrieus-H und Darrieus-Helix Rotor. Horizontalanlagen werden in der Regel mit 1 Blatt-, 2 Blatt-, oder 3 Blatt-Rotoren betrieben. Die historischen Westernmills (Amerikanische Windmühlen) sind ebenfalls noch vereinzelt aufzufinden. Heutzutage finden aber aufgrund ihrer höheren Leistungsausbeute hauptsächlich 3 Blatt-Rotoren Anwendung. Bei Horizontalanlagen wird außerdem zwischen Lee- oder Luvläufer unterschieden. Bei Luvläufern (LUV) befinden sich die Rotorblätter in Windrichtung vor dem Installationsmast, bei Leeläufern (LEE) in Windrichtung hinter dem Mast [vgl. BWE 2013c]. Da im Rahmen dieser Masterarbeit vertikale Kleinwindanlagen untersucht werden, werden an dieser Stelle nur Savonius, Darrieus, Darrieus-H, sowie die neuartigen Darrieus-Helix Rotoren, vgl. Abbildung 8, im Detail aufgeführt und ein Vergleich zu horizontalen Windturbinen aufgestellt.

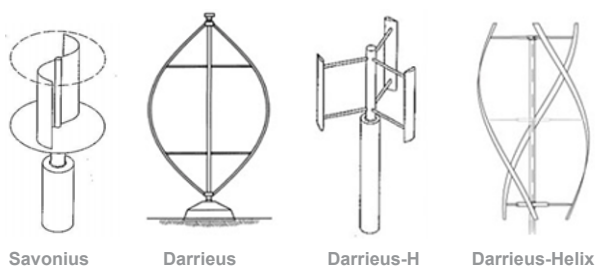


Abbildung 8: Rotortypen vertikaler Windkraftanlagen [eigene Darstellung in Anlehnung an Ecosources 2013 und Hau 2008]

2.3.1 Savonius Rotor

Der Savonius Rotor wurde von dem Finnen Sigurd Savonius erfunden und galt zunächst als reiner Widerstandsläufer mit einer Schnelllaufzahl kleiner eins. Die ursprüngliche Bauform der Savonius Rotoren, siehe Abbildung 8, ist bei Schalenkreuzanemometern üblich. Die heutzutage gängigen Savonius Rotoren bei Windkraftanlagen sind eine Kombination aus Widerstands- und Auftriebsläufer, vgl. hierzu Abbildung 9. Hierbei sind die beiden Zylinderhälften versetzt angeordnet, sodass der anströmende Wind von der offenen Seite zur entgegengesetzt gerichteten Seite umgeleitet wird. Dadurch können eine bessere Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert, im Vergleich zu den reinen Widerstandsläufers, erreicht werden [vgl. Gipe 2004]. Nach E. Hau liegt der maximale Leistungsbeiwert bei 0,25. Reine Widerstandsläufer hingegen erreichen nur ein Maximum von 0,2 [vgl. Hau 2008]. Als Vorteile der Savonius Rotoren gelten der einfache Aufbau und die Montage sowie ein hohes Drehmoment bei relativ niedriger Drehzahl. Außerdem kann dieser Rotor bereits bei sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten von 2-3 m/s betrieben werden [vgl. Mukinovic 2009].



Abbildung 9: Neue Bauform Savonius Rotor [vgl. Windside 2013]

2.3.2 Darrieus Rotor

Der Darrieus Rotor ist ein Auftriebsläufer und wurde 1925 von dem Franzosen George Darrieus entwickelt. Hierbei kreisen zwei bis drei auf einer Bogenlinie gekrümmte Rotorblätter um eine vertikale Drehachse. Die Rotorblätter sind dabei sehr aufwendig und kompliziert in der Herstellung. Ein bedeutender Vorteil dieses Anlagentyps ist, dass die mechanischen und elektrischen Komponenten in der Nähe des Erdbodens angesiedelt sind und dadurch eine einfache Wartung möglich ist. Der Darrieus Rotor verfügt über eine bessere Schnelllaufzahl ($\lambda = 5$) und besseren Leistungsbeiwert ($c_p = 0,4$) als ein Savonius Rotor. Die Unfähigkeit von alleine anlaufen zu können sowie keine Möglichkeit der Leistungsanpassung stellen



Abbildung 10: Darrieus Rotor [vgl. BWE 2013]

die negativen Aspekte dieses Rotors dar [vgl. Hau 2008].

2.3.3 Darrieus-H Rotor

Der Darrieus-H Rotor ist eine spezielle Abwandlung des Darrieus Rotors. Anstatt der gebogenen Blätter, werden senkrecht angeordnete Rotorblätter über Haltestreben mit der Rotorwelle verbunden. Dabei besitzen die Rotorblätter einen konstanten Abstand zur Drehachse. Durch die abgeänderte Form, ist eine einfachere Fertigung und theoretisch eine bessere Leistungsausbeute möglich. In der Praxis verursachen die Halterungen und Verstrebungen jedoch einen so großen Widerstand, dass bisher keine bessere Leistungsausbeute erreicht wird. Des Weiteren ist bei Darrieus-H Rotoren keine Starthilfe nötig [vgl. Hau 2008].



Abbildung 11: Darrieus-H Rotor [vgl. Aseptor 2013]

2.3.4 Darrieus-Helix Rotor

Der Darrieus-Helix Rotor basiert ebenfalls auf dem Prinzip eines Darrieus Rotors, allerdings mit einer spiralförmigen Anordnung der Rotorblätter. Dieser Rotortyp stammt ursprünglich aus der Hydroenergie und wurde 2001 von Alexander Gorlov patentiert. Durch die spezielle Formung der Rotorblätter benötigt dieser Rotortyp ebenfalls keine Starthilfe und verursacht keinen störenden Schattenschlag, im Vergleich zu einem Darrieus oder Darrieus-H Rotor. In der Regel besitzen Windkraftanlagen dieses Rotortyps einen Leistungsbeiwert von 0,35 [vgl. WindDose 2013].



Abbildung 12: Darrieus-Helix Rotor [vgl. quietrevolution 2013]

2.3.5 Vergleich horizontale und vertikale Kleinwindanlagen

Kleinwindanlagen mit vertikaler Drehachse können von jeder Seite angeströmt werden und benötigen dadurch keine Windnachführung. Dies bringt nicht nur einen geringeren Bauaufwand, da kein Windrichtungsmesser und keine Nachführeinheit angebracht werden müssen, sondern zudem eine bessere Windausbeute mit sich. Durch die Trägheit der Mess- und Nachführeinrichtung sowie des Rotors können schnelle Änderungen der Windrichtung nicht zur Energiegewinnung genutzt werden, da der Rotor zeitweise nicht optimal angeströmt wird. Aufgrund der Windrichtungsunabhängigkeit vertikaler Rotoren, eignen sich diese besonders gut bei turbulenten Windströmungen, welche vor allem bei Standorten für Kleinwindanlagen auftreten. Wartungsanfällige Komponenten einiger vertikaler Kleinwindanlagen können außerdem in Bodennähe installiert werden, wodurch eine einfache Wartung möglich ist. Die geringe Lärmemission vertikaler Windanlagen ist ein weiterer Pluspunkt im Vergleich zu horizontalen Anlagen. Denn dadurch, dass Rotoren mit vertikaler Drehachse über eine geringere Schnelllaufzahl und somit über eine geringe Blattspitzengeschwindigkeit verfügen, entstehen weniger Geräusche. Da Kleinwindanlagen in Wohngebieten errichtet werden, spricht vor allem dieser Aspekt für vertikale Rotoren. Der irritierende Schattenschlag tritt bei den meisten vertikalen Windkraftanlagen ebenfalls nicht auf, vgl. hierzu M. Mukinovic [Mukinovic 2009].

Als großer Nachteil der vertikalen Kleinwindanlagen gilt jedoch die geringere Leistungsausbeute im Vergleich zu den horizontalen Geschwistern. Während Horizontalanlagen einen Leistungsbeiwert von bis zu 0,5 aufweisen können, erreichen vertikale Windanlagen einen Maximalwert von 0,4. Durch die geringeren Investitionskosten bei horizontalen Kleinwindanlagen fallen diese außerdem in der Wirtschaftlichkeit besser aus. Ein weiterer negativer Aspekt der Vertikalläufer sind die verursachten Resonanzen. Vertikale Kleinwindkraftanlagen geben starke Vibrationen ab, weshalb komplizierte und kostenaufwändige Unterkonstruktionen bei Dachinstallationen benötigt werden [vgl. Jüttemann 2013a].

Aus den obig genannten Punkten geht hervor, dass vertikale Kleinwindanlagen durch ihre Windrichtungsunabhängigkeit, geringen Schallemissionen und der Vermeidung von Schattenschlag besonders gut für den Betrieb in Wohngebieten geeignet sind. Im Vergleich zu Horizontalanlagen sind sie jedoch leistungsschwächer und kostenintensiver. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass während der letzten Jahrzehnte intensiv an der Technologie der horizontalen Windkraftanlagen geforscht wurde und vertikale Windanlagen

dadurch einen enormen Forschungsrückstand erleiden mussten. Durch das globale Wachstum der Kleinwindkraft werden vertikale Rotortypen nun mehr und mehr erforscht, um die Entwicklungsrückstände aufzuholen und eine kommerzielle Einsatzreife zu erreichen.

Vertikale Kleinwindanlagen in Bayern

Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse

Schmelmer, R.; Denk, P.

2015, XXI, 131 S. 44 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-08057-0