

# Umweltbilanz gebäudemontierter Kleinwindkraftanlagen

Alexander Hirschl<sup>1</sup>, Sebastian Stortecky, Susanne Schidler, Kurt  
Leonhartsberger

FH Technikum Wien, Giefinggasse 6, +43 1 333 40 77-584, [hirschl@technikum-wien.at](mailto:hirschl@technikum-wien.at),  
[www.technikum-wien.at](http://www.technikum-wien.at)

## **Kurzfassung:**

Weltweit sind mehr als 1 Millionen Kleinwindenergieanlagen (KWEA) mit einer installierten Leistung von über 900 MW in Betrieb (Stand 2015), wobei in den kommenden Jahren ein ähnliches Wachstum wie das der Photovoltaik in den vergangenen Jahren erwartet wird [1]. Aufgrund des wachsenden Interesses von privaten Haushalten an Energieautonomie, stellen KWEA auf oder neben Gebäuden eine Alternative bzw. Ergänzung zu anderen regenerativen Erzeugungstechnologien dar [2]. Um jedoch einen Beitrag zu nachhaltigen Energiesystemen zu leisten, müssen KWEA die für Herstellung und Errichtung eingesetzte Energie und die dabei emittierten Emissionen innerhalb der angegebenen Lebensdauer wieder einbringen. Aus diesem Grund wurden im Forschungsprojekt SmallWindPower@Home unter anderem die Amortisationszeiten von zwei KWEA in unterschiedlichen Montagekonfigurationen untersucht. Es hat sich dabei herausgestellt, dass sich die Anlagen an guten Windstandorten nach wenigen Jahren speziell auf Gebäuden ökologisch und energetisch amortisieren. Urbane Standorte mit geringen mittleren Windgeschwindigkeiten weisen jedoch Amortisationszeiten auf, die die Lebensdauer der meisten Anlagen überschreiten.

**Keywords:** Kleinwindenergieanlage, Lebenszyklusanalyse, Gebäudemontage, CO<sub>2</sub>-Emissionen

## **1 Einleitung**

Speziell unter der Prämisse eine versorgungssichere, nachhaltige und resiliente urbane Energieversorgung sicher zu stellen, die nicht ausschließlich auf Energieerzeugung aus dem Umland angewiesen ist, gilt es, die vorhandenen Energieressourcen in der Stadt bestmöglich zu nutzen. Neben der Photovoltaik stellen Kleinwindenergieanlagen (KWEA), die vermehrt in den Fokus privater Haushalte rücken, eine der wenigen Möglichkeiten dar auch in dicht bebauten Gebieten sowie im städtischen Umfeld auf oder im Umkreis von Gebäuden umweltfreundlich elektrische Energie zu erzeugen [2]. Um den Beitrag einer Energieversorgung zu nachhaltiger Entwicklung sicherzustellen ist es wichtig, dass sich Erzeugungsanlagen innerhalb ihrer Lebensdauer energetisch sowie in Bezug auf die entlang der gesamten Wertschöpfungskette in den Herstellungsprozessen und durch Transporte entstandenen CO<sub>2</sub>-äquivalenten Emissionen amortisieren. Daten zur energetischen

---

<sup>1</sup> Jungautor

Amortisation und der Umweltwirkung von am österreichischen Markt verfügbaren Anlagen konnten in eingehenden Recherchen nicht gefunden werden.

Um die Umweltwirkungen des Abbaus von Rohstoffen, Fertigung und Montage für zwei gebäudemontierte Kleinwindkraftanlagen zu ermitteln, wurden im Zuge des Forschungsprojekts „SmallWindPower@Home“ neben Fragestellungen, die das Leistungsverhalten behandeln eine Wirkungsabschätzung in Form einer Lebenszyklusanalyse (LZA) durchgeführt. Für das Forschungsprojekt wurde eine neue Infrastruktur im Energieforschungspark Lichtenegg installiert, welche typische Anwendungsfälle in besiedeltem Gebiet repräsentiert. Bei den untersuchten KWEA handelte es sich um zwei horizontalachsige KWEA (SuperWind 1250 und Anerdgy B60 Doppelrotor). Die Untersuchungen an den KWEA wurden für jeweils drei verschiedene Fälle durchgeführt, bei welchen die KWEA in unterschiedlichen Konfigurationen im Energieforschungspark installiert wurden.

### 1.1 Zentrale Fragestellung

Im ersten Untersuchungsfall wird die Installation der KWEA auf einer Flachdachgarage betrachtet. Der zweite Anwendungsfall untersucht die Installation auf einem Gebäude mit Giebeldach. Im dritten Fall wurden, um ein Referenzszenario für die gebäudemontierten KWEA zu haben, die Umweltauswirkungen für eine an einem freistehenden Mast montierte Anlage berechnet. In allen drei Fällen wurden die KWEA, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, jeweils in einer Höhe von 7 m installiert. Mit Hilfe der von den Herstellern eingeholten Daten zu Stoffströmen und Massenanteilen von Anlagen bzw. Mastsystemen konnte im Programm „openLCA“ eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt werden. Dabei wurden im Detail für die Evaluierung folgende Daten erhoben:

- Kleinwindkraftanlagen: Teileliste, Materialien, Massenanteile, Transportwege, Herstellungsverfahren, Herstellungsländer.
- Mastsysteme: Abmessungen, Massenanteile, Materialien, Herstellungsverfahren, Herstellungsländer, Transportwege.
- Windmessdaten: 1-Minutenmittelwerte vom Jahr 2017
  - Standort: Lichtenegg 2313 Tafern
  - Standort: Energybase 1210 Wien

Aus dieser Datengrundlage ist das primäre Ziel die CO<sub>2</sub>-Emissionen und den Energiebedarf für Herstellung und Montage zu ermitteln und dem Ertrag bzw. den eingesparten Emissionen durch reduzierten Stromnetzbezug über 20 Jahre Betriebsdauer gegenüberzustellen.

### 1.2 Methode

Die Umweltauswirkungen von KWEA werden anhand ausgewählter Parameter wie Klimapotenzial, Rohstoffeinsatz und kumuliertem Energieaufwand bewertet. Der für die LZA zu definierende Nutzen der KWEA liegt in der während des Betriebs erzeugten elektrischen Energie. Daher wurde die erzeugte elektrische Energie in kWh als funktionelle Einheit gewählt, auf welche sich die LZA bezieht.

Die Systemgrenze reicht von der Rohstoffgewinnung bis zum Ende der Betriebsdauer der KWEA. In einem zweiten Schritt wird der Abbau mitberücksichtigt werden. Recyclingverfahren oder auch Zahlen zu Anteilen von recycelten Materialien sind noch nicht etabliert.

Die Datengrundlagen bildeten eigene Messungen an Anlagenteilen nach Zerlegen einer Anlage, Auskünfte des Herstellers, und fundierte Schätzungen. Die Berechnungen selbst erfolgten mit dem Ökobilanzprogramm openLCA bzw. in diesem Fall mit der ecoinvent Version 2.2. Für die Berechnung der energetischen Amortisationsdauer, wurde der kumulierte Energieaufwand (Herstellung und Installation) der im Rahmen der Lebensdauer produzierten Energie gegenübergestellt. Transporte und Produktion der Bauteile erfolgen überwiegend in Europa.

## 2 Datenaufbereitung

### 2.1 Kleinwindanlagen

Die erste untersuchte Anlage ist ein alternatives horizontalachsiges Rotorkonzept, bei welchem auf einem Befestigungspunkt zwei Rotoren angeschlossen sind und über Zahnriemen einen Generator antreiben. Die KWEA Anergdy B60 (siehe Abbildung 1 (a)) der Firma Anergdy konnte aus projektorganisatorischen Gründen nicht im Realbetrieb gemessen werden. Daher beziehen sich die Ergebnisse auf Herstellerangaben und Berechnungen. Das Modell B60 ist für einen Windgeschwindigkeitsbereich von 3 m/s bis 20 m/s ausgelegt und hat eine Nennleistung von 1500 W. Der Rotordurchmesser beträgt 2 m, was einer überstrichenen Rotorfläche von 6,3 m<sup>2</sup> für beide Rotoren entspricht [3].

Bei der zweiten KWEA handelt es sich ebenfalls um eine horizontalachsige Anlage der Firma Superwind. Das Modell Superwind 1250 (siehe Abbildung 1 (b)) wurde bereits im Forschungsprojekt eingesetzt, daher stehen reale Messdaten für die Beurteilung der Leistung der Anlage zur Verfügung. Laut Hersteller kann die Anlage ab einer Windgeschwindigkeit von 3,5 m/s bis 16 m/s mit 1250 W Nennleistung Ertrag bringen. Der Rotordurchmesser der Anlage beträgt 2,4 m was einer überstrichenen Rotorfläche von 4,5 m<sup>2</sup> entspricht [4].

Die von den Herstellern angegebenen Leistungskennlinien (siehe Abbildung 1) dienen in beiden Fällen als Berechnungsgrundlage für die energetische und CO<sub>2</sub>-Amortisation.

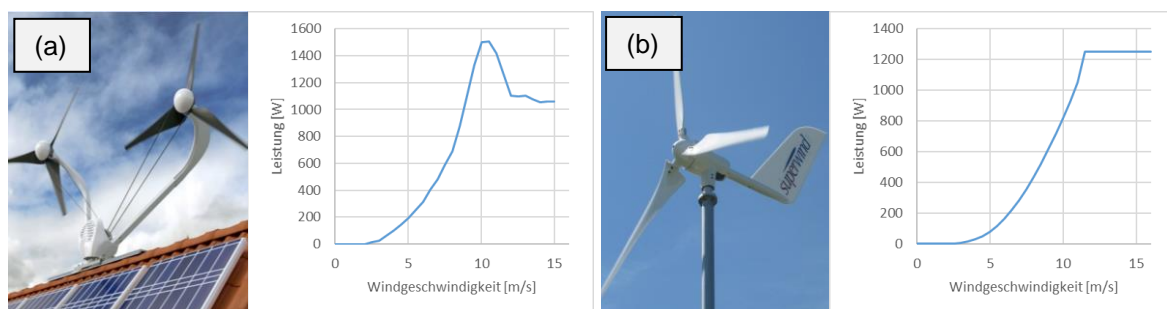


Abbildung 1: KWEA und Leistungskennlinien (a)Anergdy B60 [3] & (b)Superwind 1250 [4]

Die Basis der Lebenszyklusanalyse und anschließenden Amortisationsrechnung ist die Erhebung von verwendeten Materialien, Massenanteilen, Herstellungsorten und -verfahren

sowie Transportwegen. Die KWEA **Anerdgy B60** besteht laut Teileliste des Herstellers aus über 246 Einzelteilen, wobei ein Großteil weniger als 1 % des Gesamtgewichts von 115 kg (berechnetes Gesamtgewicht) beträgt. In der Lebenszyklusanalyse wurden alle Massenanteile berücksichtigt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten werden in der folgenden Auflistung (siehe Tabelle 1) lediglich die Hauptkomponenten aufgelistet. Die restlichen Teile werden in der Kategorie Rest zusammengefasst und umfassen Schrauben, Winkel und kleine mechanische Teile.

Tabelle 1: KWEA Anerdgy B60 – Teileliste [3]

Bauteil	Masse	Material
<b>Flexible Halterung</b>	21,4 kg	Aluminium, Chrom, Stahl
<b>Generator</b>	7,1 kg	Aluminium, Kupfer, Eisen
<b>Neodym-Magnet (Gen.)</b>	0,74 kg	Neodym, Eisen, Bor, Epoxy
<b>2x GFK-Mast</b>	41,3 kg	GFK, Stahl, Chrom, Aluminium
<b>Schutzschale</b>	22,4 kg	Stahl
<b>6x Rotorblätter</b>	18,5 kg	Baydur / Polyurethan
<b>Zahnriemen</b>	0,13 kg	Glasfaser, Nylon, PVC
<b>Rest</b>	4,1 kg	Aluminium, Stahl, Chrom, PUR, PVC,
<b>Gesamt</b>	<b>115,7 kg</b>	-
<b>Verpackungsmaterial</b>	118,9 kg	Karton, LDPE, Palette
<b>Wechselrichter 2,4kW</b>	18,5 kg	Aluminium, Kupfer, PVC, ...

Der Transport der Rohstoffe und Teile erfolgt durch unterschiedliche Transportmittel. Der größte Anteil liegt mit 1.244,6 tkm (Tonnenkilometer) im Transport von Rohstoffen durch transozeanische Frachtschiffe. Die zweitgrößte Transportleistung von 43,9 tkm wird durch LKW mit einem Gewicht zwischen 16 und 32 t erbracht. Zusätzlich wurde der Energieaufwand für den Aufbau der Anlage mit einem Kran berücksichtigt.

Für die KWEA **SuperWind 1250** konnten nicht alle Gewichtsanteile der Bauteile gewogen werden, daher mussten teilweise anhand von Abmessungen und Plänen bzw. Materialangaben die Massen berechnet werden. Herstellungsverfahren wurden zum Teil vom Hersteller angegeben bzw. es wurden für fehlende Verfahren gängige Herstellungsverfahren angenommen.

Tabelle 2: KWEA SuperWind 1250 – Teileliste [4]

Bauteil	Masse	Material
<b>3x Rotorblätter</b>	6,23 kg	CFK, GFK, Epoxy
<b>Scheibenbremse</b>	1,53 kg	50%Edelstahl 50%Aluminium
<b>Generator</b>	12,55 kg	Kupfer, Stahl, Neodym,
<b>Generatorgehäuse + Edelstahladapter</b>	9,45 kg	Aluminiumlegierung AlMgSi0,5
<b>Nabe (Pitch-Steuerung)</b>	9,3 kg	60%Aluminium 40%Edelstahl
<b>Windfahne</b>	5,9 kg	PVC(HD)
<b>Windfahnenhalter</b>	2,5	Aluminium

<b>Schrauben</b>	0,52 kg	Verzinkter Stahl
<b>Stecker 5-polig</b>	0,148 kg	PVC, Kupfer
<b>Gesamt</b>	<b>48,1 kg</b>	
<b>Verpackungsmaterial</b>	8 kg	Karton
<b>Wechselrichter 2,4kW</b>	18,5 kg	Aluminium, Kupfer, PVC, ...

Auch hier erfolgt der Transport der Rohstoffe und Bauteile mit Hilfe unterschiedlicher Transportmittel, dabei hat der Schifftransport mit 56,52 tkm wiederum den größten Anteil der Transportwege. Der restliche Transport von 4,6 tkm wurde mit LWK in verschiedenen Gewichtsklassen durchgeführt.

## 2.2 Mastsysteme

Die Montage der KWEA erfolgt je nach Betrachtungsszenario auf verschiedenen Mastsystemen. Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Mastsysteme, welche in Deutschland (Püchersreuth) aus verzinktem Stahl hergestellt wurden. Abbildung (a) zeigt das Mastsystem für das Giebeldach mit Anbindung an die Dachunterkonstruktion. Der Mast hat eine Höhe von 2,13 m und ergibt am Gebäude eine Nabenhöhe von 7 m. Abbildung (b) zeigt das Mastsystem für das Flachdach mit Kreuzstreben, dabei ist der Mast 2,13 m hoch und ergibt am Gebäude ebenfalls eine Nabenhöhe von 7 m. Der freistehende Mast in Abbildung (c) ist, ausgehend vom Boden, 7 m hoch. Das Fundament hat eine Grundfläche von 2,25 m x 2,25 m, ist 1 m tief und besteht aus einer Stahlbewehrung und Beton.

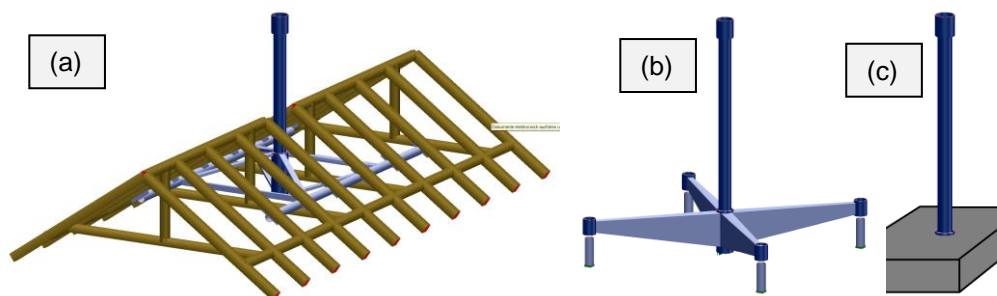


Abbildung 2: Mastkonstruktion (a) Giebeldach (b) Flachdach (c) freistehender Mast+Fundament

Die Mastsysteme weisen unterschiedliche Massen auf, was sich auf die Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz auswirkt. Tabelle 3 zeigt die Massenaufteilung der Mastsysteme, dabei fällt auf, dass die Mastkonstruktion für das Flachdach trotz Dämpfungseinheit aus Polyurethan (PUR) den geringsten Massenanteil mit insgesamt 360 kg aufweist. Der Giebeldachmast ist mit 375 kg am zweitschwersten. Der freistehende Mast ist mit 440 kg am schwersten und in Kombination mit dem Fundament damit auch am energieintensivsten bei der Herstellung.

Tabelle 3: Massenaufteilung Mastsysteme

	<b>Giebeldachmast</b>	<b>Flachdachmast</b>	<b>Freistehender Mast</b>
<b>Masse Rohrmast</b>	81 kg	81 kg	440 kg
<b>Masse Halterung</b>	281 kg	271 kg	35 kg (Leiter Al)
<b>Schrauben</b>	13 kg	7 kg	21 kg
<b>Dämpfer (PUR)</b>	-	1 kg	-

Fundament/Beton	-	-	11.826 kg
Gesamtmasse	375 kg	360 kg	12.322 kg

Der Transport der Mastsysteme vom Produktionsort Püchersreuth (Deutschland) nach Lichtenegg (Niederösterreich) wurde für eine Strecke von 569 km berechnet. Die Transporte der Rohstoffe zum Herstellungsort und zum Aufstellungsort führten beim Flachdachsystem zu insgesamt 324,6 tkm, beim Giebeldachsystem zu 358,5 tkm und beim freistehenden Mastsystem zu 439 tkm. Nach dem Transport der Mastsysteme von Püchersreuth nach Lichtenegg, wurde die Montage der Systeme mit Kränen durchgeführt.

### 2.3 Standorte

Die Erträge und damit die energetische und CO<sub>2</sub>-Amortisation hängen stark von den lokalen Windverhältnissen am Standort ab. Bis zu einer Höhe von 100 m haben die Topographie, wie Höhenunterschiede und Gebäude sowie lokale Wetterphänomene einen wesentlichen Einfluss auf die Windverhältnisse [5]. Aufgrund des lokalen Einflusses wurden die Amortisationszeiten für den Standort Lichtenegg 2813 Tafern - einem überdurchschnittlich guten, ländlichen Standort (5 m/s mittlere jährliche Windgeschwindigkeit) und den Standort Energybase 1210 Wien – einem mittleren urbanen Standort (3,4 m/s mittlere jährliche Windgeschwindigkeit), berechnet. Für die Evaluierung wurden aufgrund der guten Datengrundlage für beide Standorte Messwerte aus dem Jahr 2017, in 1-minütiger Auflösung herangezogen. Da die Messpunkte an den Standorten unterschiedliche Messhöhen aufweisen (19 m Lichtenegg und 29 m Energybase) und die Referenzhöhe in den Betrachtungsfällen 7 m beträgt, wurden die Windgeschwindigkeitsmessdaten mit Hilfe der dem Standort entsprechenden Rauigkeitsklasse und dem logarithmischen Windprofil (siehe Abbildung 3) auf die Referenzhöhe umgerechnet. Dabei ist in der Formel in Abbildung 3  $v_{h_1}$  die Windgeschwindigkeit am Messpunkt und  $h_1$  die Messhöhe. Die Referenzhöhe (7 m) wird durch  $h_2$  angegeben bzw. passend zum Standort eine Rauigkeitslänge  $z_0$  ausgewählt und die resultierende Windgeschwindigkeit in der Referenzhöhe  $v_{h_2}$  berechnet [5].

$$v_{h_2} = v_{h_1} \frac{\ln \frac{h_2}{z_0}}{\ln \frac{h_1}{z_0}}$$

$v_{h_1}$	Windgeschwindigkeit Höhe 1 [m/s]
$v_{h_2}$	Windgeschwindigkeit Höhe 2 [m/s]
$h_1$	Messhöhe 1 [m]
$h_2$	Messhöhe 2 [m]
$z_0$	Rauhigkeitslänge [m]

Abbildung 3: logarithmisches Windprofil nach Prandtl [5]

Anhand der Leistungskennlinien (siehe Abbildung 1) der Anlagen wurden die Erträge mithilfe der auf Referenzhöhe umgerechneten Daten (7 m) für ein Jahr berechnet. Für die Berechnung der energetischen Amortisation wurde die Annahme einer 100 %-igen Eigennutzung der erzeugten Energie getroffen. Bei der CO<sub>2</sub>-Amortisation wurde ebenfalls ein Eigennutzungsgrad von 100 % angenommen und den spezifischen Emissionen von Strom aus dem österreichischen Stromnetz gegenübergestellt.

## 2.4 CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen Strom

Um Aussagen über die CO<sub>2</sub>-Einsparungen treffen zu können wurden die gesamt emittierten CO<sub>2</sub>-äquivalenten Emissionen in der gesamten Wertschöpfungskette den Einsparungen von elektrischer Energie aus dem österreichischen Stromnetz inklusive aller Importe jährlich gegenübergestellt. Die Ermittlung der Emissionen erfolgte anhand der prozentualen Zusammensetzung aller Kraftwerke in Österreich bzw. bei Importen der Zusammensetzung in den jeweiligen Ländern. Anhand der Energiebilanz von 2017 [6] in Österreich konnte die prozentuelle Aufteilung der inländischen Erzeugung bzw. der ausländischen Erzeugung je Land [7] ermittelt werden.

Tabelle 4: Prozentuelle Aufteilung der inländischen Stromerzeugung [6] und von Importen [7]

Inländische Erzeugung			Importe		
	<b>65 TWh</b>	<b>71%</b>		<b>26 TWh</b>	<b>29%</b>
Wasserkraft	39,8 TWh	43%	Deutschland	14,5 TWh	16%
Naturgas	8,6 TWh	9%	Tschechien	10,6 TWh	12%
Kohlegase	1,9 TWh	2%	Rest	1,3 TWh	1%
Wind	5,2 TWh	6%			
Steinkohle	2,0 TWh	2%			
Rest	7,6 TWh	8%			
Rest: Öl, Müll, Biomasse, PV, Geothermie			Rest: Schweiz, Italien, Ungarn, Slowenien		

Anhand der Aufteilung in Tabelle 4 konnten die spezifischen Emissionen je erzeugter kWh ermittelt werden. Dabei ergaben sich für die Erzeugung einer kWh 0,295 kg CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen.

## 3 Ergebnisse

Die Lebenszyklusanalysen wurden für jede der zwei Anlagen für die drei oben genannten Aufstellungen durchgeführt. Abbildung 4 zeigt die bis zur fertig errichteten Kleinwindkraftanlage entstandenen Emissionen. Diese gelten näherungsweise für beide Standorte, da der Distanzunterschied der beiden betrachteten Standorte zu Emissionsunterschieden von unter 1 % führt. In Abbildung 4 (a) sind die Emissionen für die Errichtung der KWEA Anergdy B60 auf die verschiedenen Mastsysteme abgebildet. Dabei zeigt sich, dass Anlage und Wechselrichter mit insgesamt 1.292 kg CO<sub>2</sub>-äquiv. Emissionen die geringsten Emissionen des Gesamtsystems aus Mast, Anlage, Wechselrichter bzw. Fundament aufweisen. Bei der Giebeldachmontage führt die Aufstellung des Gesamtsystems zu 3.200 kg CO<sub>2</sub>-äquiv. Emissionen und beim Flachdach aufgrund geringerer Masse zu 3.089 kg CO<sub>2</sub>-äquiv. Emissionen. Der freistehende Mast hat insgesamt die höchsten Emissionen, da die Produktion des Betons für das Fundament sehr energieintensiv ist. Die Gesamtemissionen des freistehenden Mastsystems liegen mit 3.914 kg CO<sub>2</sub>-äquiv. Emissionen im Durchschnitt um 769 kg CO<sub>2</sub>-äquiv. höher.

Abbildung 4 (b) zeigt dieselben Ergebnisse für die KWEA Superwind 1250, wobei im Vergleich zur KWEA Anergdy B60 die Emissionen bei jedem Montagesystem geringer ausfallen, was auf das geringere Gewicht der KWEA Superwind 1250 und damit geringeren

Energiebedarf zurückzuführen ist. Der Giebeldachmast inklusive Anlage und Wechselrichter führen zu 2.536 kg CO<sub>2</sub>-äquiv. Emissionen und der Flachdachmast zu 2.426 kg CO<sub>2</sub>-äquiv. Emissionen. Erwartungsgemäß führt der freistehende Mast inklusive Fundament mit 3.250 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten zu den höchsten Emissionen.

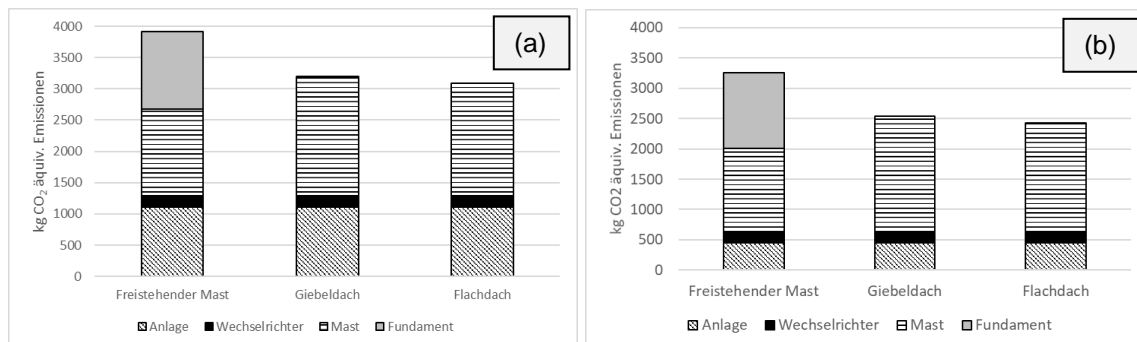


Abbildung 4: CO<sub>2</sub>-äquiv. Emissionen – Herstellung und Transport von (a) Anergdy B60, (b) Superwind 1250

Beim Energieverbrauch für die Herstellung ist bei den Montagesystemen und bei den KWEA-Varianten eine ähnliche Aufteilung zu verzeichnen. Für die Herstellung der KWEA Anergdy B60 und des freistehenden Masts, werden insgesamt 12.607 kWh benötigt. Hierbei ist der Energiebedarf aufgrund des Fundaments am höchsten und der des Flachdachsystems inklusive Anlagen mit 10.701 kWh am geringsten. Mit der KWEA Superwind 1250 ist der Energiebedarf bei allen Systemen um 3.214 kWh geringer.

Bei gegebener Leistungskennlinie und Windgeschwindigkeitsdaten aus Lichtenegg konnten die Jahreserträge für die KWEA Anergdy B60 mit 1.890 kWh und die KWEA Superwind 1250 mit 1.034 kWh berechnet werden. Für den Standort Energybase mit einer geringeren mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit ergaben sich für die KWEA Anergdy B60 745 kWh und die KWEA Superwind 1250 352 kWh Jahresertrag. Der jährliche Ertrag wurde dem kumulativen Energieaufwand für die Herstellung und Errichtung gegenübergestellt, um die energetische Amortisationszeit zu ermitteln. Für die CO<sub>2</sub>-Amortisation werden die jährlichen Erträge mit den Emissionen des Netzstroms (0,295 kg CO<sub>2</sub>-äquiv. Emissionen) multipliziert. Somit entsprechen die Einsparungen von Netzstrom der CO<sub>2</sub>-Gutschrift auf die bei Herstellung und Errichtung entstandenen Emissionen.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Amortisationsrechnung für die KWEA Anergdy B60 in Lichtenegg, auf der linken Achse die CO<sub>2</sub>-Amortisationszeit (durchgezogene Linien) und auf der rechten Achse die energetische Bilanz (strichlierte Linien). In Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen zeigt sich, dass sich das Anlagenmastsystem Flachdachmast (blau), welches die geringsten Emissionen bei der Herstellung aufweist nach 5,5 Jahren bzw. energetisch nach 7,4 Jahren am schnellsten amortisiert. Das Giebeldachsystem mit Anlage weist um 111 kg höhere CO<sub>2</sub>-äquiv. Emissionen und einen um 453 kWh höheren Energiebedarf für die Herstellung auf. Die Amortisationszeit verlängert sich dadurch geringfügig - bezüglich der Emissionen auf 5,7 Jahre und bei der energetischen Amortisation auf 7,6 Jahre. Die höchsten Emissionen und Energieeinsatz bei der Produktion weist die Anlage mit freistehendem Mastsystem auf. Hierbei amortisiert sich das System aus Mast, Fundament und Anlage basierend auf Emissionen nach 7,4 Jahren und energetisch nach 8,4 Jahren.



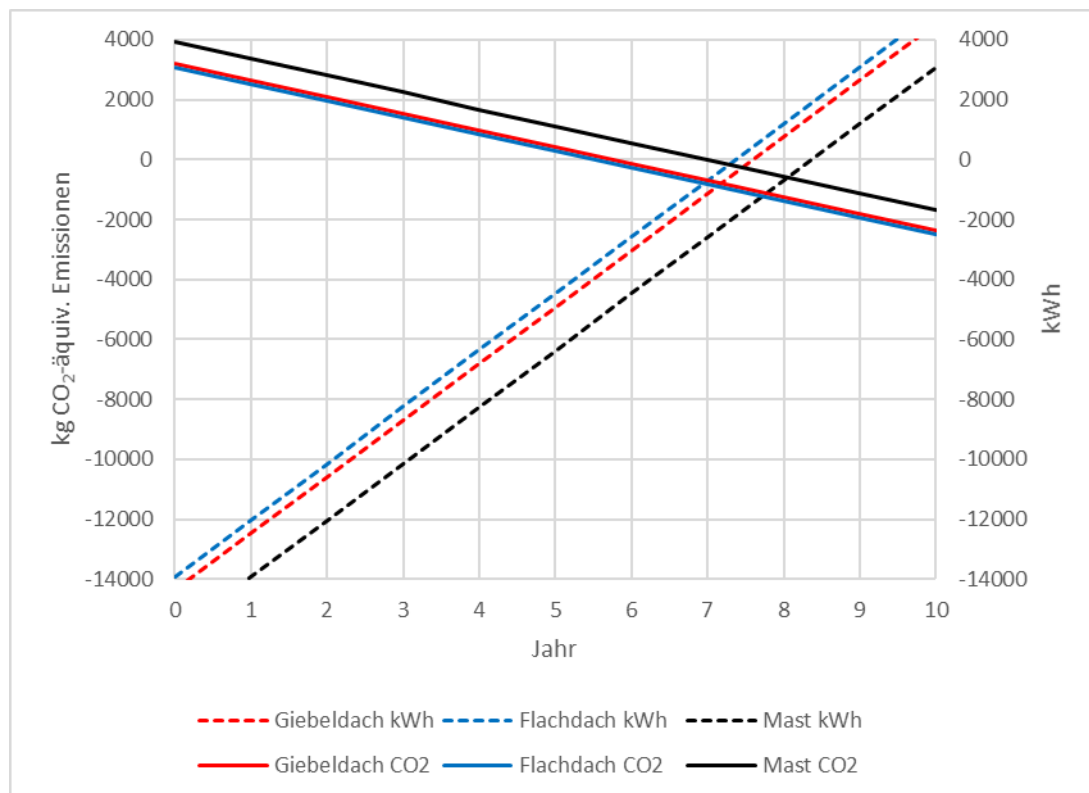


Abbildung 5: Amortisationszeit Anergdy B60 – Standort Lichtenegg

Am Standort EnergyBase sind die Amortisationszeiten aufgrund der geringeren mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit und der daraus resultierenden geringeren Jahreserträge um einen Faktor >2 länger. Das Flachdachsystem benötigt in diesem Fall 14,1 Jahre für das Amortisieren der CO<sub>2</sub>-Emissionen und 19,3 Jahre für das Erbringen der eingesetzten Energie bei der Herstellung. Beim Giebeldach sind die Werte für CO<sub>2</sub> und Energie um 0,5 und 0,6 Jahre höher. Beim freistehenden Mastsystem sind die Amortisationszeiten an diesem Standort erwartungsgemäß am längsten mit 17,8 Jahren für CO<sub>2</sub>-Emissionen und 21,2 Jahren für die Herstellungenergie. Diese Werte liegen über der angenommenen Lebensdauer der Anlage – somit ist der Einsatz der entsprechenden Varianten an diesem Standort aus ökologischer Sicht nicht zu empfehlen.

In Abbildung 6 sind die Amortisationszeiten für die KWEA Superwind 1250 am Standort Lichtenegg abgebildet, welche im Vergleich zur KWEA Anergdy B60 (siehe Abbildung 5) eine im Durchschnitt 2 bis 3 Jahre längere Amortisationszeit aufweist. Das Flachdachsystem mit Superwind KWEA mit den geringsten Emissionen benötigt in diesem Fall für die Amortisation der CO<sub>2</sub> Emissionen 7,9 Jahre und für die Energie 10,3 Jahre. Im Vergleich dazu benötigt das Giebeldachsystem für die Amortisation der CO<sub>2</sub>-Emissionen 8,3 Jahre und 10,8 Jahre für die Herstellungenergie. Die Amortisationszeit für den freistehenden Mast ist hierbei mit 10,7 Jahre (CO<sub>2</sub>) und 12,2 Jahre (energetisch) wieder am längsten.

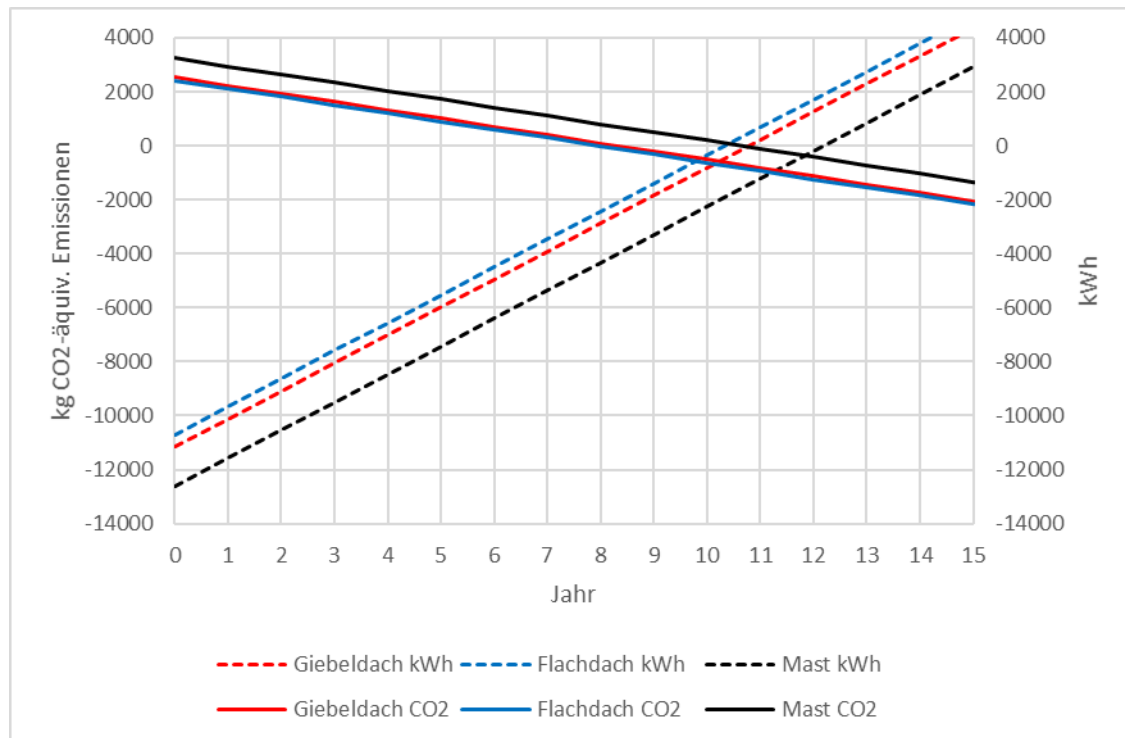


Abbildung 6: Amortisationszeit Superwind 1250 – Standort Lichtenegg

Die Erträge am Standort Energybase fallen mit der KWEA Superwind 1250 um 65 % geringer aus als in Lichtenegg, weshalb auch die Amortisationszeiten um das 2 bis 3-fache länger sind. Bei Flachdachmontage amortisiert sich die Anlage samt Mast und Wechselrichter nach 23,3 Jahren in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen und nach 30,4 Jahren wird die Energie für die Herstellung wieder eingebracht. Beim Giebeldach ist die Dauer für die Amortisation für CO<sub>2</sub> um 1,1 Jahre und für Energie um 1,3 Jahre länger. Der freistehende Mast hat aufgrund des energie- und CO<sub>2</sub>-intensiven Fundaments die längste Amortisationsdauer, mit 31,3 Jahren für die bei der Produktion entstandenen CO<sub>2</sub>-Emissionen und 35,8 Jahre für das Wiedereinbringen der Herstellungsenergie. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der Standort aus ökologischen Gründen nicht für diese Anlage geeignet ist.

Die CO<sub>2</sub>-Amortisation hängt neben dem Standort auch vom zur Herstellung verwendeten Strommix als auch vom Mix des eingesparten Netzstroms ab. Eine Vergleichsrechnung mit den Emissionen für den netzbezogenen Strom aus Deutschland (489 g CO<sub>2</sub>-äquiv. Emissionen) für das Jahr 2017 ergeben im Durchschnitt um 2 Jahre kürzere CO<sub>2</sub>-Amortisationszeiten [8].

## 4 Zusammenfassung

Im Zuge der Lebenszyklusanalyse der KWEA Anergdy B60 und Superwind 1250 hat sich gezeigt, dass KWEA an guten Windstandorten (5 m/s mittlere Jahreswindgeschwindigkeit) sich energetisch und ökologisch innerhalb einer angenommenen Lebensdauer von 20 Jahren amortisieren können. Dabei konnte beim Vergleich der Erträge an den Standorten Lichtenegg ( $v_{\text{mittel}}$  5 m/s) und Energybase ( $v_{\text{mittel}}$  3,4 m/s) gezeigt werden, dass sich neben der

Effizienz der jeweiligen Technologie der Standort maßgeblich auf die ökologische und energetische Amortisation auswirkt.

Der Standort hat auch über den eingesparten Netzstrom Einfluss auf die CO<sub>2</sub> Amortisation. Im Vergleich mit den spezifischen Emissionen für den Strommix aus Deutschland, welcher im Vergleich zu Österreich einen weitaus höheren Anteil fossiler Energieträger hat, konnte gezeigt werden, dass bei Betrieb in Deutschland die Amortisationszeit um bis zu 2 Jahre sinkt.

Ein weiterer entscheidender Faktor für die energetische und CO<sub>2</sub>-Amortisation ist der Materialeinsatz und der damit verbundene Energiebedarf. Bezüglich der Wahl des Mastsystems spielt auch hier der Standort eine Rolle. Der Vergleich von Abbildung 4 zeigt, dass Dachkonstruktionen aufgrund des fehlenden Fundaments gesamtsystemisch einen geringeren Material- und Energieeinsatz haben. Daher ist bei guten Windverhältnissen über Dach aus ökologischer und energetischer Sicht eine Dachmontage zu bevorzugen. Um KWEA ökologisch zielführend zu betreiben sind daher die Standortwahl und eine messtechnische Bewertung vorab entscheidend.

## Literatur

- [1] Small Wind World Report, 2017, [http://www.wwindea.org/wp-content/uploads/filebase/small\\_wind\\_/SWWR2017-SUMMARY.pdf](http://www.wwindea.org/wp-content/uploads/filebase/small_wind_/SWWR2017-SUMMARY.pdf), 16.01.2019
- [2] Experteninterview: Leeb K., 2016, Solvento energy consulting GmbH, Interesse an Kleinwindkraft in Österreich. Wien
- [3] Herstellerankunft: Anerdgy AG, Technoparkstrasse 1, 8005 Zürich, Schweiz
- [4] Herstellerankunft: Superwind GmbH, Am Rankenwerk 2-4 D-50321 Brühl/Deutschland
- [5] Hau, E., 2008, Windkraftanlagen – Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 4 Auflage, Springer-Verlag, Leipzig, e-ISBN: 978-3-540-72151-2
- [6] Statistik Austria, 2016, [https://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_NATIVE\\_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=029955](https://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_NATIVE_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=029955), 14.11.2018
- [7] Biomasseverband, 2017, <http://www.biomasseverband.at/de/presse/presseaussendungen/pressematerialien-2017/eiskalter-jaenner-treibt-fossile-stromproduktion-auf-rekordhoch/>, 14.11.2018
- [8] Umweltbundesamt, 2017, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Strommix>, 15.01.2019