

ifeu -  
Institut für Energie-  
und Umweltforschung  
Heidelberg GmbH



## **Pilotstudie zur Akzeptanz vertikaler Windenergieanlagen**

Abschlussbericht zum BMU-EE-Querschnitts-Forschungsvorhaben  
(FKZ: 0327644)

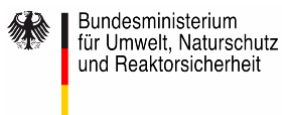
### Arbeitspaket

## **Umweltverträglichkeit und Ökobilanz vertikaler Windenergieanlagen**

Horst Fehrenbach

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH  
Wilckensstr. 3  
D-69120 Heidelberg

Heidelberg, Mai 2009



Die Pilotstudie zur Akzeptanz vertikaler Windenergieanlagen wurde gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ASPEKTE DER STANDORTBEZOGENEN UMWELTVERTRÄGLICHKEIT .....</b>	<b>3</b>
2.1	Rechtliche Lage .....	3
2.2	Vorgehensweise bei der Bewertung von Umweltauswirkungen.....	4
2.3	<b>Potenzielle Belastungsaspekte von VWEAs.....</b>	<b>5</b>
2.3.1	Belastungsaspekt Lärm und Infraschall .....	6
2.3.2	Belastungsaspekt elektromagnetische Strahlung.....	10
2.3.3	Flächeneingriff, Flächenumwandlung, Versiegelung .....	12
2.3.4	Optische Einflüsse .....	12
2.3.5	Mechanische Bewegung .....	13
2.3.6	Auswirkungen durch Betriebsstörungen und Unfallrisiken.....	14
2.4	<b>Zusammenfassung der standortbezogenen Umweltverträglichkeit .....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>ÖKOBILANZ EINER VERTIKALWINDANLAGE .....</b>	<b>17</b>
3.1	Zieldefinition und Rahmenfestlegung.....	17
3.2	<b>Sachbilanz.....</b>	<b>19</b>
3.2.1	Herstellung und Errichtung.....	19
3.2.2	Nutzungsphase, Verbräuche und Gesamt- Stromerzeugung .....	20
3.2.3	Aufwendung und Gutschrift aus Abbruch und stofflicher Verwertung .....	21
3.2.4	Referenzsysteme .....	21
3.3	<b>Wirkungsabschätzung .....</b>	<b>23</b>
3.3.1	Methodische Grundlagen .....	23
3.3.2	Ergebnisse.....	24
3.4	<b>Interpretation und Bewertung .....</b>	<b>28</b>
3.4.1	Normierung der Ergebnisse .....	28
3.4.2	Sensitivitätsanalyse.....	30
3.5	<b>Zusammenfassung der Ökobilanz.....</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>32</b>



# 1 Kurzfassung

In diesem Teilbericht bewertet das ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg die Umweltrelevanz von vertikalen Windkraftanlagen (VWEA) anhand von zwei unterschiedlichen methodischen Ansätzen:

- die Bewertung der standortbezogenen Umweltverträglichkeit im Sinne einer UVP
- die Lebenswegbilanz als Systemanalyse nach Art der Ökobilanz

## **Standortbezogene Umweltverträglichkeit (UVP-Ansatz)**

Für die Bewertung nach dem UVP-Ansatz wurden unter der Annahme einer ggf. empfindlichen Standortumgebung die denkbaren negativen Auswirkungen einer VWEA (oder gruppenweise gehäufte VWEAs) auf die Umweltschutzgüter (v.a. Menschen, Tiere, Pflanzen, Boden, Wasser, Luft) analysiert. Dabei wurde analog der üblichen Vorgehensweise bei einer Umweltverträglichkeitsuntersuchung für eine BImSchG-Genehmigung vorgegangen.

Im Resultat ist festzustellen, dass eine formale Überprüfung der **potenziellen Belastungsaspekte einer vertikalen Windkraftanlage keine erheblichen Auswirkungen auf die Umweltschutzgüter (Mensch, Tier, Pflanze, Boden etc.) erwarten lässt.**

Diese Aussage ist in Bezug auf neuere Untersuchungen in Großbritannien für Fledermäuse u.U. zu relativieren, wonach speziell Vertikalläufer für diese Tiergruppe ein höheres Risiko darstellen könnten als Horizontalanlagen. Ferner lässt sie sich nicht ohne weiteres auf die Installation größerer Anlagengruppen übertragen. Insbesondere die Frage möglicher Lärmbelastung wie auch die optische Wirkung muss in solchen Fällen nochmals konkret überprüft werden.

Bezüglich einer differenzierten Bewertung für unterschiedliche Standorte ist festzustellen, dass die Geringfügigkeit der Umweltwirkung von VWEA nach den Maßstäben des UVPG grundsätzlich für jeglichen Standort (z.B. Wohngebiet, landwirtschaftlicher Betrieb) gilt, unabhängig davon, ob die Anlage in Deutschland oder in anderen Ländern (Schwellen- und Entwicklungsländer einbezogen) betrieben wird.

In die Betrachtung der Auswirkungen am Standort wurden mögliche Substitutionseffekte durch die Stromerzeugung nicht einbezogen. Diese Frage kann gerade für unterversorgte und infrastrukturell abgeschiedene Regionen in Schwellen- und Entwicklungsländern von erheblicher Konsequenz sein. Geht man von der Standardsituation eines Ersatzes von mit Diesel betriebenen Stromaggregaten aus, so ist umgekehrt durch eine VWEA ein erheblicher Einfluss zur Minderung von toxischen Luftschadstoffemissionen gegeben.

## **Systemanalyse (Ökobilanz)**

Die Lebenswegbilanz wurde gemäß der Standards nach DIN EN ISO 14040/44 durchgeführt. Die Systemgrenze umfasste die Herstellung der Materialien einer VWEA (inklusive Hilfsmodule wie Speicherbatterien bei Inselsystemen), die Abbruch, Recycling und Entsorgungsphase, sowie die Betriebslebenszeit mit dem Gesamtvolumen an erzeugtem Strom. Diesem wird als Gutschrift die Umweltlast der substituierten Strommenge im allgemeinen Netz bzw. durch Dieselstrom-Aggregate (Inselsystem) gegen gerechnet.

Im Ergebnis fällt die Bilanz einer Vertikalwindkraftanlage insgesamt überwiegend positiv aus. Während die Nutzungsphase nahezu lastenfrei ist, beruhen die Einschränkungen im Ergebnis auf der Herstellung der Materialien (v.a. Stahl). Diese Lebenswegphase ist bei Großkraftwerksanlagen angesichts der höheren Umsatzleistung bezogen auf das verbaute Material dagegen eher unbedeutend.

In jeder Hinsicht positiv verhalten sich die Treibhausgase, die Bilanz fossiler Ressourcen aber auch Versauerung und Eutrophierung, vergleicht man die Lebenswegaufwendungen des VWEA-Stroms mit dem durchschnittlichen Strom aus dem deutschen Netz.

Dies stellt sich noch deutlicher dar, wenn die VWEA in einer infrastrukturarmen Region in einem Schwellen- oder Entwicklungsland betrieben wird. Dann ist von einer Substitution dieselbasierter Stromerzeugung (Stromaggregate) auszugehen. In der Ökobilanz resultiert dies in einer noch deutlicheren Entlastung in allen Wirkungskategorien.

Eine Ausnahme bilden die krebserzeugenden Emissionen mit umgekehrtem Ergebnis aufgrund der Daten und Annahmen zur Herstellung sowie geringen und schlechten Recyclings von Speicherbatterien. Würde diese Last aus der Materialvorkette minimiert werden, wäre eine Verbreitung des VWEA-Einsatzes nach den Ergebnissen der Ökobilanz insbesondere in infrastrukturarmen Regionen in Schwellen- oder Entwicklungsländern zu begrüßen, da der Substitutionseffekt dort gerade auch an den Standorten die Vermeidung toxischer Schadstoffemissionen ermöglicht.

## 2 Aspekte der standortbezogenen Umweltverträglichkeit

In diesem Kapitel werden die potenziell möglichen Umweltbelastungen am Standort einer VWEA analysiert. In einem ersten Abschnitt soll dabei auf die standortbezogene Umweltverträglichkeitsprüfung aus rechtlicher Sicht eingegangen werden. Dem muss Folgendes vorangestellt werden:

- Die Darstellung der „rechtlichen Lage“ im anschließenden Kapitel soll nicht durch pauschale Anwendung der formalen Anforderungen dem Ausschluss bzw. der a priori-Bagatellisierung möglicher Umweltauswirkungen dienen. Richtig ist, dass aufgrund der vergleichsweise geringen baulichen und installati-onstechnischen Dimensionen einer einzelnen VWEA (Größenordnung 5 kW) Ausmaße erhebliche Umweltauswirkungen eher nicht zu erwarten sind. Es muss aber betont werden, dass es bei dieser Betrachtung um eine *exemplarische* Prüfung geht, um erste Schlussfolgerungen für künftige Anforderungen an die Anla-genart, für Ver- oder Gebote oder für Prüfpflichten zu ermitteln.
- Bei der Bewertung auf der Ebene einer Einzelanlage muss stets die Möglichkeit einer gehäuften Installation mehrerer bis zahlreicher Anlagen an einem Standort in Betracht gezogen werden. Dabei müssen die ggf. geringen Auswirkungen auch in Relation zu den geringen Erträgen gesehen werden. Die „spezifische“ Belastung (bezogen auf die erzeugte Strommenge) kann sich dabei in einem an-deren Licht darstellen als die effektive Belastung der Einzelanlage.

Nach einer kurzen Einführung in die Methodik (Abschnitt 2.2) werden in Abschnitt 2.3 die aus der üblichen UVP-Praxis abgeleiteten Belastungsanalysen in Bezug auf die Umweltschutzgüter nacheinander abgearbeitet.

Am Ende (Abschnitt 2.4) werden diese Analysen zusammengeführt und es werden Wissenslücken und zu empfehlende künftige Anforderungen formuliert.

### 2.1 Rechtliche Lage

Das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) schreibt für bestimmte öffentliche und private Vorhaben eine frühzeitige und umfassende Ermittlung, Be-schreibung und Bewertung potenzieller Auswirkungen auf die Umwelt vor. Welche be-stimmten Vorhaben in welchem Maße darunter fallen, ist in Anlage 1 des UVPG kata-logisiert. Damit trifft der Gesetzgeber eine Vorentscheidung darüber, für welche Art von Vorhaben potenzielle Umweltauswirkungen antizipiert werden und für welche nicht.

Die Gruppe der Windkraftanlagen (WEA) ist in Anlage 1 des UVPG unter Nummer 1.6 eingeordnet und ist bezüglich der Anwendung des UVPG grundsätzlich auf die „Errich-tung und den Betrieb einer Windfarm mit Anlagen mit einer Gesamthöhe von jeweils mehr als 50 Metern“ beschränkt. Handelt es sich um einen Windpark mit 20 oder mehr Windkraftanlagen ist das Vorhaben explizit UVP-pflichtig (Kennung X). Handelt es sich um 6 bis 19 Windkraftanlagen, ist eine allgemeine Vorprüfung des Einzelfalls durchzu-

führen (Kennung A; gemäß § 3c Satz 1 UVPG). Bei 3 bis 5 Anlagen ist eine standortbezogene Vorprüfung des Einzelfalls durchzuführen (Kennung S; gemäß siehe § 3c Satz 2).

Anlagen der Größe der hier betrachteten Vertikalläufer fallen somit nicht in den Anwendungsbereich des UVPG und man könnte den raschen Schluss ziehen: Der Gesetzgeber antizipiert, dass derartige Anlagen keine (erheblichen) Auswirkungen auf die Umwelt haben, nach dem Prinzip: Keine Relevanz nach UVPG, keine Umweltrelevanz!

Nun wird der Eingrenzung der UVP-Relevanz von WEA häufig die besondere Privilegierung dieser Anlagenart entgegen gehalten. Die Befreiung von speziellen, von der Politik gewünschten als förderungswürdig erachteten Techniken von gesetzlichen Prüfpflichten muss nicht in jeder Konsequenz eine grundsätzliche Prüfwürdigkeit ausschließen.

Aus fachlicher Sicht ist eine generelle Prüfung der Umweltverträglichkeit von Vertikalläufern zumindest im Sinne eines abstrahierten Screenings in Anlehnung an § 3c UVPG gerechtfertigt. Die vorliegende Arbeit soll sich jedoch nicht rechtfertigen anhand der formalen gesetzlichen Belange, sondern folgt - wie eingangs erwähnt - einer *exemplarischen* Prüfung.

## 2.2 Vorgehensweise bei der Bewertung von Umweltauswirkungen

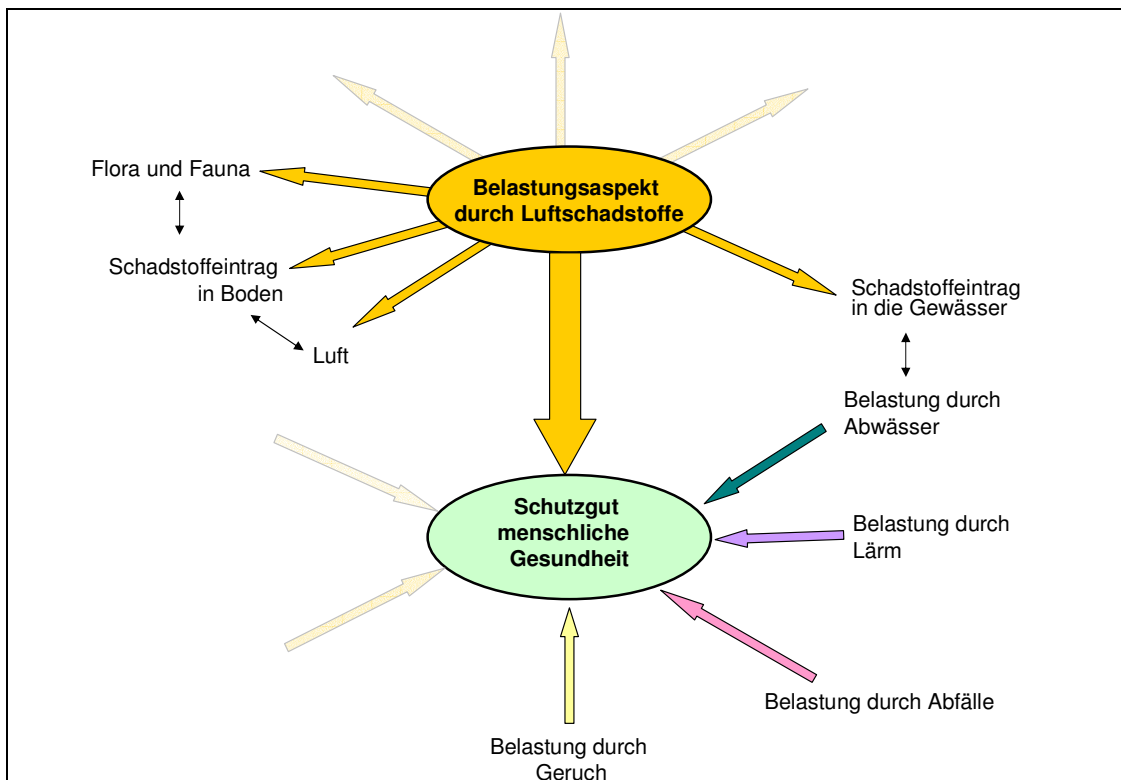
Auf der Basis einer generalisierten Technikanalyse erfolgt eine Abschätzung potenzieller Belastungsaspekte. In einer Expositions- und Risikoanalyse anhand der UVP-Methodik soll dabei für verschiedene Standorttypen die Erheblichkeit der Anlageneinflüsse bewertet werden.

Das Grundprinzip des UVPG beruht auf dem Gedanken der Schutzgüter, wie sie in § 2 Absatz 1 aufgelistet sind:

1. **Menschen**, einschließlich der menschlichen Gesundheit, **Tiere, Pflanzen** und die **biologische Vielfalt**,
2. **Boden, Wasser, Luft, Klima** und **Landschaft**,
3. **Kulturgüter** und **sonstige Sachgüter**

Nach den Erfahrungen des IFEU-Instituts bei der Durchführung zahlreicher Umweltverträglichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)-Genehmigungen zeigt es sich als transparenter und praktikabler, die Untersuchung mit der Analyse der potenziellen Belastungsaspekte eines Vorhabens zu beginnen und erst in einem zweiten Schritt auf die Auswirkungen entlang der verschiedenen Schutzgüter wie menschliche Gesundheit, Boden, Wasser, Luft etc. abzustellen. Dies ist insbesondere dadurch geboten, wenn ein Belastungsaspekt (z.B. Schallemissionen) auf verschiedene Schutzgüter wirken kann und ein Schutzgut schlussendlich von sehr unterschiedlichen Belastungsaspekten beeinträchtigt werden kann. Dies soll auch Abb. 1 veranschaulichen.





**Abb. 1** Schematische Darstellung der Analyse eines Belastungsaspektes (Beispiel Luftschadstoffemissionen) in seinen Auswirkungen auf die einzelnen Schutzgüter (erster Schritt) und die Bündelung der Auswirkungen auf die Schutzgüter (Bsp. „menschliche Gesundheit“) (zweiter Schritt).

## 2.3 Potenzielle Belastungsaspekte von VWEAs

Im Untersuchungsrahmen von Umweltverträglichkeitsuntersuchungen zu Bau und Betrieb technischer Anlagen (z.B. gemäß BImSchG) sind folgende Belastungsaspekte üblicherweise enthalten:

- Emission von Luftschadstoffen
- Emission von klimawirksamen Gasen
- Emission von Gerüchen
- Emission von Lärm
- Emission von Infraschall
- Emission von elektromagnetischer Strahlung
- Emission von Licht und Wärme
- Ableitung von Abwasser
- Erzeugung von Abfällen
- Flächeneingriff, Flächenumwandlung, Versiegelung
- Optische Einflüsse
- Mechanische Bewegung
- Auswirkungen durch Betriebsstörungen und Unfallrisiken

Während für die Belastungsaspekte „Emission von Luftschadstoffen“, „Gerüche“, „Ableitung von Abwasser“ und „Erzeugung von Abfällen“ (Ausnahme Entsorgung von Alt-schmierstoff) explizit keine von VWEA ausgehenden Wirkungen anzunehmen sind, sollen zu den anderen Aspekten im Folgenden die denkbaren Wirkungspotenziale diskutiert und bewertet werden.

## 2.3.1 Belastungsaspekt Lärm und Infraschall

### Beurteilungsgrundlage von Geräuschemissionen

Als Lärm werden alle Schallereignisse bezeichnet, die das menschliche Wohlbefinden beeinträchtigen. Damit ist der Begriff Lärm subjektiv geprägt und nicht messtechnisch zugänglich. Messbar sind allerdings die auftretenden Geräusche und Schallereignisse. Ein Schallereignis stellt sich als kleinste Druckschwankung um den atmosphärischen Luftdruck dar; diese Schwingung wird vom Gehör wahrgenommen. Das Lautstärkeempfinden eines Schallereignisses wird dabei grundsätzlich durch eben diesen Schalldruck und zudem durch die Frequenz bestimmt. Die Frequenz (Anzahl der Schwingungen pro Sekunde) bedingt die „Tonhöhe“. Je höher die Frequenz desto höher wird der Ton/das Geräusch wahrgenommen.

Der Schalldruck an der Schmerzgrenze ist ca. 3 Mio. mal so groß wie der Schalldruck an der Hörschwelle. Zur Vereinfachung der Darstellung des Schalldruckpegels wird deshalb eine logarithmische Zahlenskala gewählt, die in Dezibel (dB) angegeben wird.

Da das menschliche Gehör tiefe Frequenzen (tiefe Töne) leiser wahrnimmt als hohe, werden die ermittelten Schalldruckpegel nochmals umgerechnet, um den Lautstärkeindruck realistischer abbilden zu können. International wird in der Regel eine „A-Bewertung“ durchgeführt (Korrektur der Schallpegel nach einer bestimmten Bewertungskurve A, die Schallpegel mit tiefen Frequenzen nach unten korrigiert, da sie ja leiser wahrgenommen werden, dafür aber lauter wahrgenommene höhere Frequenzen tendenziell nach oben). Die resultierenden Schallpegel werden in dB(A) angegeben.

Die Dezibelskala der Lautstärke beginnt mit 0 dB(A) an der Hörschwelle und endet bei 130 dB(A) an der Schmerzgrenze. Von einem geschulten Ohr können Änderungen der Lautstärke um 1 dB(A) gerade noch wahrgenommen werden; eine Pegeländerung um 10 dB(A) entspricht etwa einer Verdopplung bzw. Halbierung der subjektiv empfundenen Lautstärke. Letztere bedeuten eine Verzehnfachung bzw. Reduktion auf ein Zehntel des Schalldruckes. In Tab. 1 sind die Lautstärke und die zugehörige Geräuschempfindung einiger typischer Geräuscharten aufgeführt. Außer von der Lautstärke hängt die Lärmwirkung auch vom zeitlichen Verlauf eines Schallereignisses ab, entsprechend wird zur Bewertung ein zeitlich gemittelter Schallpegel, der so genannte Mittelungspegel herangezogen.

Zur Erfassung und Beurteilung von Geräuschemissionen aus Gewerbe und Industrie ist die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm vom 26. August 1998 (GMBI. Nr. 26 vom 28.08.1998 S. 503) maßgebend (siehe Tab. 2). Nach den Regelungen der TA Lärm werden die Geräuschemissionen einer Anlage getrennt für den Tag und die Nacht ermittelt und beurteilt. Beurteilungszeitraum "tagsüber" ist die Zeit von 06.00 - 22.00 Uhr, der Beurteilungszeitraum "nachts" umfasst den Zeitraum von 22.00 - 06.00 Uhr. Der unter Berücksichtigung des Geräuschcharakters (Ton-, bzw. Impulshaltigkeit) sowie des zeitlichen Verlaufes ermittelte Beurteilungspegel einer Anlage wird durch Vergleich mit verschiedenen Immissionsrichtwerten, welche nach der Schutzwürdigkeit vorhandener Nutzungen im Einwirkungsbereich einer Anlage abgestuft sind, bewertet.

Nach derzeitigem Kenntnisstand kann das Vorhandensein schädlicher Umwelteinwirkungen verneint werden, wenn die nach TA Lärm ermittelten Beurteilungspegel die Immissionsrichtwerte der TA Lärm einhalten bzw. unterschreiten.

**Tab. 1 Geräuschempfinden**

Lärmstufe	Geräuschart	Lautstärke	Geräuschempfinden	
<b>I</b> <b>30 – 65 dB(A)</b>	Ticken einer leisen Uhr, feiner Landregen, Flüstern	30 dB(A)	sehr leise	
	Psychische Reaktion	nahes Flüstern, ruhige Wohnstraße	40 dB(A)	ziemlich leise
		Unterhaltungssprache	50 dB(A)	normal
		Unterhaltungssprache in 1 m Abstand, Bürolärm	60 dB(A)	normal
<b>II</b> <b>65 – 90 dB(A)</b>	laute Unterhaltung, Rufen, Pkw in 10 m Abstand	70 dB(A)	sehr laut	
	Physiologische Reaktion	Straßenlärm bei starkem Verkehr	80 dB(A)	sehr laut
<b>III</b> <b>90 – 120 dB(A)</b> <b>Gehörschaden,</b> <b>Ohr-Schmerz</b>	lauter Fabriksaal	90 dB(A)	sehr laut bis unerträglich	
	Autohupen in 7 m Abstand	100 dB(A)	sehr laut bis unerträglich	
	Kesselschmiede	110 dB(A)	sehr laut bis unerträglich	
	Flugzeugmotor	120 dB(A)	sehr laut bis unerträglich	
		130 dB(A)	Schmerzschwelle	

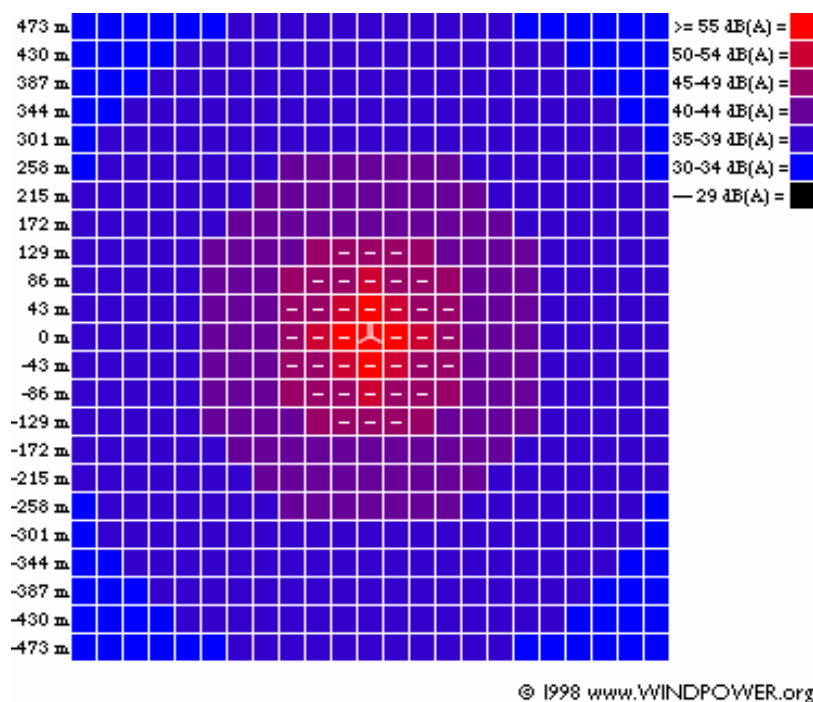
**Tab. 2 Immissionsrichtwerte nach TA Lärm/VDI 2058 für Gewerbe- und Industrielärm**

Gebietsbezeichnung	Immissionsrichtwerte TA Lärm
<b>a)</b> - Gebiete, in denen nur gewerbliche oder industrielle Anlagen und Wohnungen für Inhaber und Leiter der Betriebe sowie für Aufsichts- und Bereitschaftspersonen untergebracht sind.	70/70
<b>b)</b> - Gebiete, in denen vorwiegend gewerbliche Anlagen untergebracht sind.	60/50
<b>c)</b> - Gebiete mit gewerblichen Anlagen und Wohnungen, in denen weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind.	60/45
<b>d)</b> - Gebiete, in denen vorwiegend Wohnungen untergebracht sind.	55/40
<b>e)</b> - Gebiete, in denen ausschließlich Wohnungen untergebracht sind.	50/35
<b>f)</b> - Kurgebiete, Krankenhäuser und Pflegeanstalten.	45/35
<b>g)</b> - Wohnungen, die mit der Anlage baulich verbunden sind.	40/30

Alle Pegelangaben in dB(A). Der Wert vor dem Schrägstrich gilt für den Beurteilungszeitraum Tag, der Wert nach dem Schrägstrich für die Nacht

## Beurteilung einer VWEA

Die Schallwirkung von Windkraftanlagen beruht in der Hauptsache auf dem Windgeräusch der sich im Wind drehenden Rotorblätter. Bei großen horizontalen WEAs mit Schalleistungspegeln im Bereich von 100 dB(A) wird davon ausgegangen, dass außerhalb eines Radius von 130 m der Schallimmissionspegel unterhalb 45 dB(A) liegt. In 500 m Distanz liegen die Werte bereits unterhalb jeglicher Immissionsrichtwerte der TA Lärm.



**Abb. 2** Schallentwicklung am Beispiel einer großen horizontalen WEA  
(Quelle: <http://www.windpower.org/de/tour/env/sound.htm>)

Für VWEA sind aufgrund der Rotorcharakteristik erheblich geringere Schalleistungspegel zu erwarten. Dies ist auf die geringere Schnelllaufzahl und damit deutlich geringere Blattspitzengeschwindigkeit zurückzuführen. Nach Angaben von TASSA ist davon auszugehen, dass bereits in naher Umgebung der VWEA die Schallimmissionspegel

### deutlich unter 45dB(A)

liegen. Messungen sind noch nicht abgeschlossen, da die Zertifizierung als letzter Schritt – vor der Serienproduktion - vorgesehen ist. Weitere Erkenntnisse können aus einer Fragebogenaktion des IFEU-Instituts gezogen werden, deren Ergebnisse in Tab. 3 zusammengestellt sind, die jedoch auf Messungen der Hersteller beruhen und aufgrund uneinheitlicher Richtlinienbezüge nicht durchweg vergleichbar sind. Jedoch wären auch danach zumindest für Wohngebiete keine Einschränkungen auf Lärmschutzsicht zu erwarten. Für weitergehende Aussagen (empfindlichere Nutzungsbereiche) kann erst nach Nachweis der tatsächlichen und dauerhaft gesicherten Schallpegel ein Urteil getroffen werden.

Neben der Entfernung zum Windrad spielen Frequenz des Geräuschs (Luftabsorption), Bodenbeschaffenheit, Geländeprofil, Wettereinflüsse und Windrichtung eine Rolle bei der Geräuscheinwirkung und sind somit standortsspezifisch (Pantazopoulou 2009).

**Tab. 3 Herstellerangaben zu Geräuschemissionen, Leistungsmessung und vorhandenen Zertifizierungen (Quelle: IFEU-Fragebogen)**

	Schallmessung	Leistungsmessung	Zertifikate/ Richtlinien
Ampair			G83/1 (Empfehlung für den Netzanschluss von Generatoren bis 16A) BS EN 61400-2, BS EN IEC 60335-1, etc.
Partzsch	94 dB(A) bei 11 m/s (gemessen von Akkustik u. Ing. Consult Frankfurt O.)	durchgeführt mit Referenzanlage über 2 Jahre	
Sinuswind	28-45 dB(A) (Yacht 500), 30-40 dB(A) (Home 1500 u. Professional 5000)	eigene Leistungsmessung	
WES Energy	keine	eigene	keine
Inno Energy	keine	keine	keine
Nakao Intl	keine	keine	keine
Name ist IFEU bekannt	48 dB(A) bei 35 m Entfernung und 10 m/s Windgeschwindigkeit / (eigener Standard, da bisher kein einheitlicher vorhanden ist. Gemessen v. ISVR)	eigene	keine
Ropatec	42 dB(A) eigene Angaben	eigene Angaben Belgrad Militärinstitut (2008)	
TASSA	keine	keine	keine
VENCO	35 dB(A) bei 300 W Anlage bei 6 m/s und 6 m Abstand	bei DEWI	laufendes Zertifizierungsverfahren
winDual	27 dB(A) eigene Angaben	eigene	

### Beurteilung von Infraschall

Infraschall sind tieffrequente Schallwellen unterhalb der Hörgrenze (Frequenz <16 Hertz). Sie werden emittiert von natürlichen Quellen wie Erdbeben aber auch Föhn. Typische künstliche Quellen sind große Turbinen. Auch große Windkraftanlagen gelten als Infraschallquellen. Nach Untersuchungen aus Kanada sind schädliche Auswirkungen [Leventhall 2006] bislang nicht nachgewiesen. Aufgrund der Dimension einer VWEA sowie der räumlichen Trennung von Rotor und Konverter ist daher davon auszugehen, dass diese Art Anlagen kein Potenzial zu nennenswerter Infraschall beinhalten.

## Zusammenfassung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Geräuschemissionen einer einzelnen VWEA sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in empfindlicheren Gebieten (Kurgebiete, Krankenhäuser und Pflegeanstalten) – so die Rotoren nicht unmittelbar an den Gebäuden mit hohen Anforderungen angebracht sind – im Bereich des nach TA Lärm Zulässigen bewegen werden.

Durch Einzelanlagen sind somit „erhebliche negative Einflüsse auf die Umweltschutzgüter“, insbesondere die Gesundheit von Anwohnern in der Umgebung einer VWEA aus gesetzlicher Sicht auszuschließen. Der Belastungsaspekt „Lärm“ hätte somit keine Einschränkungen auf die Standortwahl.

Es ist jedoch anzunehmen, dass die zwar niedrigen, aber episodisch auftretenden Geräuschemissionen einen subjektiv störend empfundenen Charakter aufweisen, der eine enge Nachbarschaft zu empfindlichen Gebieten (v.a. Kurgebiete, Krankenhäuser und Pflegeanstalten) ausschließt. Die Empfindung einer eher geringfügigen Belästigung ist hier im Lichte der geringen Ertragswirkung der Anlage zu sehen.

Unsicherheiten der Schallbewertung bestehen grundsätzlich für den Fall einer gehäuft Installation von VWEAs. Für diesen Fall sollten Schallimmissionsmessungen durchgeführt und ausgewertet werden, bevor Anlagengruppen in Wohnbereichen errichtet werden.

## 2.3.2 Belastungsaspekt elektromagnetische Strahlung

### Beurteilungsgrundlage von elektromagnetischer Strahlung

Statische elektrische und magnetische Felder (Gleichfelder) von nennenswerter Feldstärke hat es schon immer auf der Erde gegeben. Luftbewegungen in der Atmosphäre sowie die ionisierende Wirkung kosmischer Strahlung in den höheren Luftschichten (Ionosphäre) erzeugen ein elektrisches Gleichfeld zwischen Erdoberfläche und Ionosphäre. Wechselfeldanteile bei Frequenzen, wie sie in der Energieversorgung Verwendung finden, treten praktisch nicht auf. Die natürliche Hintergrundfeldstärke bei 50 Hz beträgt lediglich 0,1 mV/m. Das statische magnetische Feld ist von seiner Wirkung auf eine Kompassnadel bekannt. Es ist zeitlich nahezu konstant und beträgt in Deutschland ca. 42  $\mu\text{T}$  ( $\mu\text{T}$  = Mikrottesla). Ursache des Gleichfeldes sind Kreisströme im Erdinneren. Extrem hohe Feldstärken können in der Nähe von Blitzen auftreten (bis zu 1 T, was zu Herzstillstand beim Menschen führen kann).

Der Mensch ist heute zusätzlich zivilisatorisch bedingten elektromagnetischen Feldern ausgesetzt, deren Feldstärken die seit Urzeiten bedingten natürlichen Feldstärken teilweise übertreffen. Im niederfrequenten Bereich sind die technischen Feldquellen häufig erheblich stärker als die in der Umwelt natürlich auftretenden Felder. Es handelt sich dabei überwiegend um Energieversorgungseinrichtungen, die zur Erzeugung und zur Verteilung elektrischer Energie dienen bzw. um die technischen Verbraucher selbst. Hierzu gehören industrielle Anlagen, private Installationen und Verbraucher (z.B. Haushaltsgeräte) sowie öffentliche Transportsysteme (z.B. U-Bahn, Fernbahn). Die Klärung der Wirkungsweise dieser Felder auf lebende Organismen ist derzeit weltweiter Forschungsgegenstand, zumal mögliche gesundheitliche Folgen in der Öffentlichkeit und in Fachkreisen kontrovers diskutiert werden.

Zusätzlich zu den Feldimmissionen großtechnischer Anlagen ist der Mensch heute im Haushalt und an Arbeitsplätzen von einer Vielzahl von Quellen elektrischer und magnetischer Felder umgeben, deren Feldanteile sich summieren und deren Feldstärken die der zuvor genannten Anlagen übertreffen können.

Zum Schutze der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen leiten sich aus diesem Basis-Vorsorgewert für die äußeren elektrischen und magnetischen Feldstärken die Grenzwerte ab, die seit dem 01.01.1997 in Deutschland durch die 26. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz [26. BImSchV] gesetzlich bindend sind. Die Grenzwerte für Niederfrequenzanlagen – im Sinne der Verordnung determiniert als „ortsfeste Anlagen zur Umspannung und Fortleitung von Elektrizität einer Spannung von 1.000 Volt oder mehr“ – sind in Tab. 4 zusammengestellt.

Unter bestimmten Bedingungen darf hiervon abweichend die magnetische Flussdichte kurzzeitig und die elektrische Feldstärke kleinräumig die Werte um 100 % überschreiten. Zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen sind Freileitungen, Erdkabel, Bahnstromoberleitungen und Elektroumspannanlagen so zu errichten und zu betreiben, dass in ihrem Einwirkungsbereich in Gebäuden und auf Grundstücken, die nicht nur zum vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung und unter Berücksichtigung von Immissionen durch andere Niederfrequenzanlagen die Grenzwerte der elektrischen Feldstärke und magnetischen Flussdichte nicht überschritten werden.

**Tab. 4 Grenzwerte der 26. BImSchV für ortsfeste Niederfrequenzanlagen**

Frequenz in Hz	Effektivwert der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte	
	elektrische Feldstärke in kV/m	magnetische Flussdichte in $\mu\text{T}$
50 Hz-Felder	5	100
16 2/3 Hz-Felder	10	300

### Beurteilung einer VWEA

Die maßgebliche Maßnahme zur Vermeidung von elektrischen Feldstärken in für die Allgemeinbevölkerung zugänglichen Bereichen ist das „Einhausen“ des Inverters. Dadurch werden elektrische Felder der Anlage von den Gebäudewänden abgeschirmt. Im Übrigen ist der Inverter EMV-zertifiziert (Elektromagnetische Verträglichkeit). Auch der Generator ist vollständig gekapselt und abgeschirmt.

Somit ist davon auszugehen, dass die Einhaltung der Grenzwerte – die nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand vor gesundheitlichen Beeinträchtigungen bei den im Alltag vorkommenden Expositionen schützen – gewährleistet ist. Die Einwirkung durch die mit dem Betrieb einer VWEA verbundenen elektromagnetischen Felder ist daher unabhängig von der Standortwahl als unproblematisch einzustufen.



### 2.3.3 Flächeneingriff, Flächenumwandlung, Versiegelung

VWEA zeichnen sich durch ausgesprochen geringen Flächenbedarf aus. Durch die vertikale Bauweise ist die Aufstandsfläche sehr klein (2,4 m x 2,4 m bei Fertigteilfundament und Schwedenfuß). Abspannungen werden dabei keine mehr benötigt. Die effektiv versiegelte Fläche ist somit auch bei Anlagen mit dreifüßigem Mast vernachlässigbar klein.

Somit kann auch der Flächeneingriff als unerheblich bewertet werden.

Die Sachlage ist differenzierter zu bewerten, wenn man die Flächeninanspruchnahme in Relation zum energetischen Ertrag sieht. Nach den oben angeführten Zahlen liegt die Relation grob gesehen bei 1 m<sup>2</sup> pro kW. Extrapoliert man dies auf die Leistung eines Großkraftwerks von z.B. 500 MW, so würde eine Fläche von 50 ha benötigt (reine Aufstellfläche, nicht die notwendigen Zwischenabstände berücksichtigt). Ein Großkraftwerk dieser Dimension würde jedoch inklusive Außenbereiche im Bereich eines Zehntels dieser Fläche in Anspruch nehmen.

Wenngleich der Flächeneingriff einer Anlage vernachlässigbar klein ist, so ist diese Art der Stromerzeugung gemessen am Ertrag durchaus flächenintensiv und erfordert somit eine sinnvolle Einbindung in die Flächennutzungspotenziale am Standort mit der Empfehlung, bereits beanspruchte bzw. versiegelte Flächen zur Aufstellung zu nutzen.

### 2.3.4 Optische Einflüsse

Je nach Betrachter wird die Bewertung der Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch ein neues „Bauwerk“ recht subjektiv und damit unterschiedlich ausfallen (mit einer Bandbreite von positiv bis negativ für das gleiche Bauobjekt). Gerade in Bezug auf die hier diskutierten VWEAs wird der Aspekt der Ästhetik bei der Gestaltung eine wesentliche Rolle spielen. Nach den Befragungsergebnissen der Uni Halle werden die verschiedenen Designvarianten von VWEAs überwiegend positiv bewertet. Dabei fällt die Bewertung umso besser aus, je schlichter und geradliniger die Anlage gestaltet ist, vergleichbar mit dem Beispiel in Abb. 3.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die vertikale Struktur einer VWEA je nach den räumlichen Verhältnissen am Standort ggf. über weitere Strecken hin optisch sichtbar ist. Bei Masthöhen von im Bereich 10 bis 15 m können jedoch auch in flachem Gelände bereits mittelhohe Bäume von vergleichbarer Höhe bewirken, dass sich die Struktur in rund 50 m Distanz zum Betrachter kaum mehr am Horizont abzeichnet.

Diese Aussage ist ggf. zu relativieren, wenn VWEAs gruppenweise auf vergleichsweise engem Raum aufgestellt werden. Der subjektive Aspekt der Beeinflussung bzw. Veränderung des Landschaftsbildes kann sich dann deutlich stärker ausprägen.

Dagegen ist die Frage von Schattenschlag aufgrund der vergleichsweise geringen Höhe auch für gruppenweise aufgestellte VWEAs nicht relevant. Die von horizontalen Anlagen bei niedrigem Sonnenstand ausgehenden Schattenbewegungen treten bei Vertikalläufnern systembedingt nicht auf.



Auswirkungen auf die Schutzgüter durch spezifische optische Einflüsse sind daher – eingedenk der subjektiv geprägten Empfindung gegenüber spezieller Anlagendesigns – höchstens geringfügig erheblich.



**Abb. 3** Fotomontage einer konfigurierten VWEA an einem realistischen Standort

### 2.3.5 Mechanische Bewegung

Durch die Drehbewegung der Rotoren können potenziell Tiere wie Vögel, Fledermäuse, Fluginsekten getötet oder schwer verletzt werden. An großen horizontalen WEAs wird dieses Phänomen beobachtet und teilweise stark problematisiert.

Bisher liegen kaum Beobachtungen an bestehenden Anlagen vor, die Anlass zur Vermutung geben, dass dieses Phänomen auch an VWEAs auftritt. Bisher wurde nicht in einem einzelnen Fall ein ursächlich durch den Rotor getöteter Vogel oder eine Fledermaus am Mastfuß vorgefunden. Auch liegen keine speziellen Funde von Fluginsekten (insbesondere besonders schützenswerte Arten) vor.

Eine aktuelle Untersuchung an der Loughborough University of Technology zeigt jedoch, dass gerade vertikal rotierende Systeme für Fledermäuse ein Risiko darstellen können (Long et al. 2009). Es sind im Wesentlichen akustische Wechselwirkungen, die durch die rasche Bewegung Doppler-Effekte entwickeln und den Rotor insbesondere im rechten Winkel auf die Welle zu (horizontale Richtung auf eine VWEA) für Fledermäuse schwer mit ihrem Echolotsystem erkennen lassen.

Abgesehen von dieser Studie liegen derzeit Hinweise vor, dass von kleinen VWEAs bei Einzelanlagen schädliche Wirkungen durch mechanische Bewegung auf das Schutzgut Tier durch Einzelanlagen zu befürchten sind. Es muss jedoch auf die gerin-

gen Erfahrungswerte hingewiesen werden. Insbesondere von Anlagengruppen können störende bis vertreibende Wirkungen für Vögel oder auch Fluginsekten (ggf. bei Nachbarschaft von Bienenzucht) auftreten. Zwar werden diese Störwirkungen auf den unmittelbar umgebenden Raum der Anlagengruppen beschränkt bleiben, was sich bei einer entsprechend ausgedehnten Gruppe jedoch durchaus signifikant niederschlagen kann.

Bei Anlagengruppen, insbesondere solche, die im Bereich von typischen Vogelhabitaten (z.B. Kleingartenanlagen) errichtet werden, sollte dieses Störpotenzial am konkreten Standort untersucht werden. Auch die beschriebene desorientierende Wirkung auf Fledermäuse bedarf unbedingt einer weiteren Vertiefung.

### **2.3.6 Auswirkungen durch Betriebsstörungen und Unfallrisiken**

Aufgrund der deutlich geringeren Masse und deutlich kleineren Drehradien gegenüber Horizontalläufern sind VWEAs mit erheblich geringeren Drehmomenten verbunden. Sie bieten weniger Angriffsfläche und sind im Fall von Brüchen und Rissen in den Materialien daher gegenüber anderen vergleichbaren statischen Gebilden keine wesentlichen Unfallrisiken verbunden.

Auch wurde ein an horizontalen WEAs in kalten Monaten öfters auftretender Eiswurf bei VWEAs bisher nie beobachtet. Es ist davon auszugehen, dass diese systembedingt nicht auftreten, da die Drehradien zu klein und auch die Rotorgrößen nur geringe Ausmaße und Bildungsfläche für Eisplatten bieten.

## 2.4 Zusammenfassung der standortbezogenen Umweltverträglichkeit

Eingangs zu Kapitel 2.3 wurden die potenziellen Belastungsaspekte, die im Rahmen von UVP-Verfahren im Rahmen von Genehmigungen üblicherweise abgearbeitet werden, aufgelistet. Aspekte, die grundsätzlich für VWEAs relevant sein könnten, wurden im vorausgehenden Abschnitt überprüft. Dabei wurde analog der üblichen Vorgehensweise bei einer Umweltverträglichkeitsuntersuchung für eine BImSchG-Genehmigung vorgegangen.

Im Resultat ist festzustellen, dass eine formale Überprüfung der **potenziellen Belastungsaspekte einer vertikalen Windkraftanlage keine erheblichen Auswirkungen auf die Umweltschutzgüter (Mensch, Tier, Pflanze, Boden etc.) erwarten lässt.**

Diese Aussage ist in Bezug auf die an jüngsten Messungen in Großbritannien für Feldmäuse u.U. zu relativieren. Ferner lässt sie sich nicht ohne weiteres auf die Installation größerer Anlagengruppen übertragen. Insbesondere die Frage möglicher Lärmbelastung wie auch die optische Wirkung muss in solchen Fällen nochmals konkret überprüft werden.

In Tab. 5 sei dies nochmals übersichtsweise und im Zusammenhang mit den einzelnen Schutzgütern zusammengefasst.

Bezüglich einer differenzierten Bewertung für unterschiedliche Standorte ist festzustellen, dass die Geringfügigkeit der Umweltwirkung von VWEA nach den Maßstäben des UVPG grundsätzlich für jeglichen Standort (z.B. Wohngebiet, landwirtschaftlicher Betrieb) gilt, unabhängig davon, ob die Anlage in Deutschland oder in anderen Ländern (Schwellen- und Entwicklungsländer einbezogen) betrieben wird.

In die Betrachtung der Auswirkungen am Standort wurden mögliche Substitutionseffekte durch die Stromerzeugung nicht einbezogen. Diese Frage kann gerade für unterversorgte und infrastrukturell abgeschiedene Regionen in Schwellen- und Entwicklungsländern von erheblicher Konsequenz sein. Geht man von der Standardsituation eines Ersatzes von mit Diesel betriebenen Stromaggregaten aus, so ist umgekehrt durch eine VWEA ein erheblicher Einfluss zur Minderung von toxischen Luftschadstoffemissionen gegeben. Dieser Aspekt wird in der ökobilanziellen Bewertung (Kapitel 3) berücksichtigt.

**Tab. 5 Zusammenfassende Matrix zur Bewertung möglicher Umweltauswirkungen durch VWEA am Standort**

Belastungsaspekt	Luftschadstoffe, Gerüche	Lärm, Infraschall	Abwasser	Abfälle	Licht, Wärme	Elektromagn. Felder	Flächenverbrauch	Optische Effekte	Mechanische Bewertung		
Mensch		gering		vernachlässigbar		gering	vernachlässigbar	gering			
Tiere, Pflanzen		gering				-		gering	gering u.U. mäßig		
Boden		-				-		-	-		
Wasser		-				-		-	-		
Luft		-				-	-	-			
Klima großräumig		-				-	-	-			
kleinräumig		-				-	-	-			
Landschaft		-				-	-	gering	-		
sonstige Kultur- u. Sachgüter		-				-	-	gering	-		
Prüfbedarf		Anlagenhäufung				-	-	-	Fläche rel. zu Ertrag	Design Akzeptanz	Fledermäuse, Anlagenhäufung

**Bewertungsmuster**

vernachlässigbar = die Einwirkung tritt in kaum quantifizierbarer Höhe in Erscheinung; Nennung erfolgt hier nur zur Bekräftigung dieser Feststellung

gering = die Einwirkung ist in Bezug auf die angesetzten Richtwerte von geringer Relevanz und kann grundsätzlich vernachlässigt werden;

mäßig = die Einwirkung ist nicht vernachlässigbar, bleibt in Bezug auf angesetzte Richtwerte jedoch deutlich unterhalb kritischer Größenordnungen;

hoch = die Einwirkung ist relevant und erreicht in Bezug auf die angesetzten Richtwerte signifikante Wirkungsschwellen;

kritisch = die Einwirkung überschreitet in Bezug auf die angesetzten Richtwerte signifikante Wirkungsschwellen.

- = tritt nicht auf.

### 3 Ökobilanz einer Vertikalwindanlage

Die grundsätzlichen Schritte in einer Ökobilanz sind entsprechend der Norm DIN EN ISO 14040 in Abb. 4 dargestellt. Sie bestehen in der Rahmen- und Zielfestlegung der zu bewertenden Systeme, der Erhebung der Sachbilanzdaten für die definierten Verwertungswege und der Abschätzung der Wirkungen, die sich durch die verschiedenen Verwertungsoptionen bedingen. Abschließend erfolgt die Auswertung in Verbindung mit der letztendlichen Anwendung der gefundenen Ergebnisse.

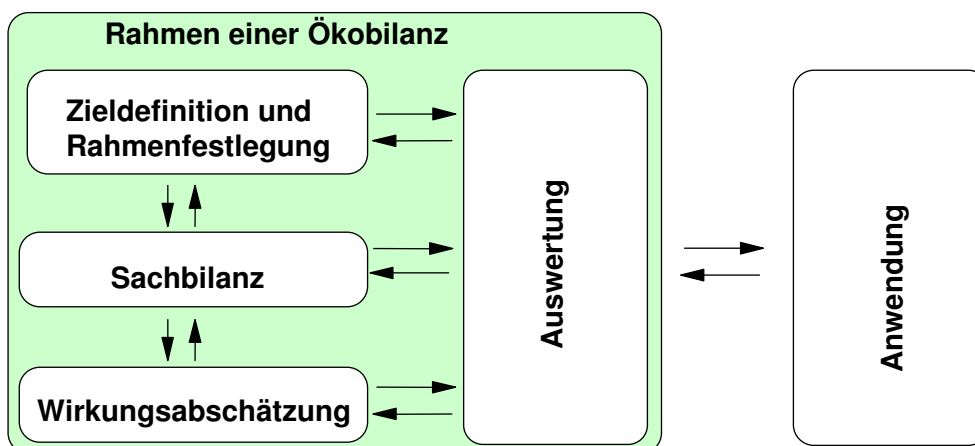


Abb. 4: Schritte einer Ökobilanz (nach DIN EN ISO 14040)

#### 3.1 Zieldefinition und Rahmenfestlegung

Das **Ziel** dieser Untersuchung wird wie folgt definiert:

Es soll auf Basis einer grundlegenden Stoffstrombilanz untersucht werden, wie sich der ökologische Aufwand von Herstellung, Betrieb und Entsorgung einer Vertikalwindanlage in Bezug auf den Lebenszeitnutzen (Strom) verhält.

Die Untersuchung soll ein durchschnittliches Bild liefern. Aspekte, die sich als besonders relevant im Hinblick auf die Bewertung ergeben, sollen herausgearbeitet werden. Die Betrachtung soll sowohl von einem Standort in Deutschland als von einem Standort in einem Land mit ungünstigen Netzverhältnissen, was die Stromversorgung betrifft, ausgehen (z.B. von Versorgung abgeschlossener oder unterversorgter Regionen in Schwellen- und/oder Entwicklungsländern).

Der **Untersuchungsrahmen** umfasst die Herstellung der Ausgangsmaterialien, deren Anlieferung, Montage, Aufwendungen aus dem Betrieb sowie die Entsorgung (ggf. Recycling bzw. Verwertung der Materialien). Ein Schema zur Systemgrenze findet sich in Abb. 5.

Die Bilanzierung erfolgt für den Lebensweg einer bis 5 kW Anlage. Das Bilanzergebnis wird normiert auf 1 kWh Strom. Dies stellt somit die **funktionale Einheit** dar.

Diesem Ergebnis wird als **Referenzsystem** die Bilanz der Erzeugung von 1 kWh Strom auf herkömmlichem Weg gegenübergestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Wahl des Referenzsystems zu unterschiedlichen Ergebnissen führen kann, da folgende grundsätzliche Ansätze möglich sind:

- ein *Durchschnittswert* für die Stromerzeugung; das wäre der allgemeine mittlere Netzmix. Dieser Ansatz wird hier gewählt für den Bilanzraum Deutschland
- eine *Marginalbetrachtung*; das wäre die spezielle Art Stromerzeugung, die tatsächlich durch die zusätzliche Stromerzeugung (hier durch VWEA) ersetzt wird. Dieser Ansatz wird hier gewählt für Fälle von typischer Inselstromerzeugung (Bilanzraum in unterversorgten Regionen in Schwellen- und/oder Entwicklungsländern).

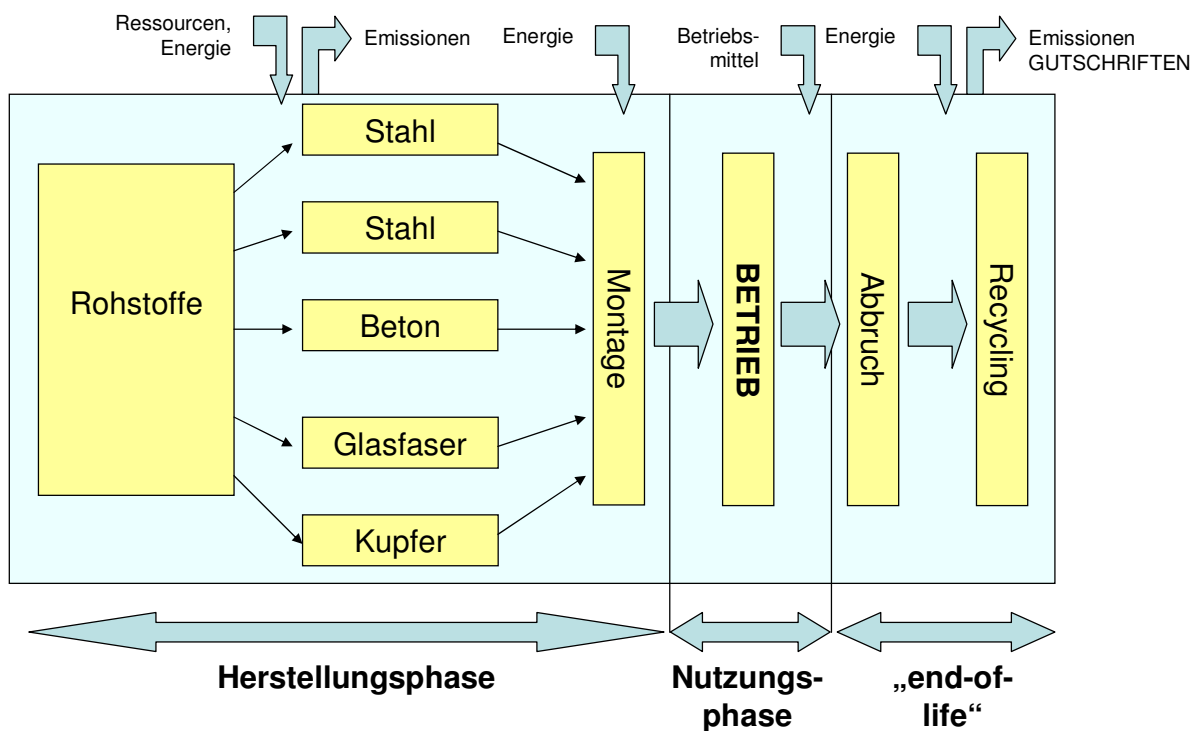


Abb. 5: Systemgrenze der Untersuchung

## 3.2 Sachbilanz

Die zentralen Größen für die Sachbilanz sind

- die Materialaufwendungen für die Errichtung einer Anlage
- Lebensdauer der Anlage mit der über die Nutzungsphase hinweg kumulativ erzeugte Strommenge
- der Verbrauch an Betriebsmitteln und Energie im Laufe der Nutzungsphase
- die Aufwendung und Gutschrift aus Abbruch und stofflicher Verwertung.

Außerdem ist im Rahmen der Sachbilanz auch die Bilanzierung der Referenzsysteme zu erstellen.

Die Grunddaten, die für die Erstellung der Sachbilanz benötigt werden, können umfassenden Ökobilanz-Datenbanksystemen entnommen werden (Umberto, GEMIS, E-COINVENT).

### 3.2.1 Herstellung und Errichtung

In Tab. 6 sind Materialien und Mengen zur Herstellung einer Vertikalwindanlage gemäß den Angaben von TASSA zusammengestellt. Die Ökoinventare zu den einzelnen Materialien werden der IFEU Datenbank Umberto 5.5 sowie ECOINVENT entnommen.

Der Energieaufwand für die Montage der Komponenten wird mit 10 kWh Strom pro Anlage abgeschätzt.

**Tab. 6 Materialien und Mengen zur Herstellung einer Vertikalwindanlage; Angaben TASSA.**

Komponente	Material	Menge in kg/Anlage
Mast	Stahlbeton B95 – Schleuderbeton - darin enthalten Zement: - darin enthalten Stahl	1.800 kg ...250 kg 180 kg
Fundament	Beton B25  - darin insgesamt enthalten	3.200 kg Fertigteil + 12.000 kg Beton 2.200 kg Zement
Rotorblätter	Glasfaser	60 kg
Rotor	Mischbauweise (Stahl, Composite – Holz, Harz)	380 kg
Generator	Elektromotor	145 kg
Leitungen	Kupfer	11,2 kg Länge: 50 m, Ø 2,5mm <sup>2</sup>
<b>Gesamtmasse</b>		<b>ca. 17.800 kg</b>
<b>Bilanzierte Materialien:</b>		
Stahl		700 kg
Kupfer		20 kg
Zement		2.450 kg
Kies, Sand		12.400 kg

### 3.2.2 Nutzungsphase, Verbräuche und Gesamt-Stromerzeugung

Als konservativer Ansatz für die Dauer der Nutzungsphase wird der bei der Berechnung der Stromgestehungskosten angesetzte Abschreibungszeitraum von 20 Jahren angesetzt.

Als Verbräuche im Zuge der Nutzungsphase werden folgende angenommen:

Schmierfett für Lager: 5 kg /Jahr → 100 kg im Lebenszyklus

Die Netto-Stromerzeugung beläuft sich gemäß der Wirtschaftlichkeitsberechnung auf **7.620 kWh pro Jahr** [Daum 2007]. Hochgerechnet auf die Nutzungsphase sind dies etwa **152 MWh**.

Für Anlagen, die in Schwellen- bzw. Entwicklungsländern ohne Einspeisung in ein Netz betrieben werden, wird ferner die Herstellung von Speicherbatterien in die Betrachtung einbezogen. Dabei wird von 48 V-Blöcken mit je 24 Zellen ausgegangen, von denen angenommen wird, dass über die Laufzeit einer VWEA drei Stück benötigt werden. Dieser apparative Aufwand entspricht der aktuellen Praxis. In der Entwicklung befindliche neue Batterietypen können hier mit belastbaren Daten noch nicht in die Betrachtung mit einbezogen werden.

**Tab. 7 Materialien und Mengen zur Herstellung eines 48-V-Speicherblocks und eines Insel-Gleichrichters; Einschätzung nach Angaben PSE.**

Speicherbatterie	Lebensdauer 14 Jahre	Hochgerechnet auf 20 Jahre
Blei	700 kg	1.000 kg
PVC-Formteile	121 kg	173 kg
Elektrolyt (20 % Schwefelsäure)	345 kg	493 kg
Gesamtmasse Speicherbatterie	1.166 kg	1.666 kg
Insel-Gleichrichter		
Kupfer		50 kg
PVC-Formteile		13 kg
Gesamtmasse Gleichrichter		63 kg

Zu beachten ist bei der Eingrenzung des Bedarfs an Materialien und Prozessen der Nutzungsphase, dass eine VWEA bei der Insel-Konstellation vor Ort grundsätzlich im als Hybridsysteme mit beigestelltem Dieselstrom-Aggregat eingerichtet werden. Dies könnte nahe legen, dass zusätzlich zu einer VWEA die Herstellung eines solchen Aggregats eingerechnet werden müsste. Da, wäre die VWEA nicht vorhanden, in den entsprechenden entlegenen Regionen der Strom sowieso per Aggregat erzeugt würde (siehe auch Abschnitt 3.2.4), ergibt sich effektiv von der betrieblichen Seite kein Mehraufwand einer VWEA gegenüber der Situation ohne VWEA. Ein faktischer Unterschied wäre allein darauf zu begründen, dass in den Phasen des VWEA-Betriebs (und damit des Nicht-Betriebs des Aggregats) für das Dieselstrom-Aggregat dennoch im Stillstand ebenso eine Abnutzung anzunehmen wäre. Damit würde sich seine Lebenslaufzeit gegenüber einer reinen dieselpbasierten Stromerzeugung verkürzen. Dieser Aspekt soll im Rahmen der Sensitivitätsanalyse nochmals aufgegriffen werden.



### 3.2.3 **Aufwendung und Gutschrift aus Abbruch und stofflicher Verwertung**

In der Nachnutzungsphase stehen die Anlage und die Materialien zur Demontage und Entsorgung an. Dabei kann ein erheblicher Anteil der Stoffe einem Recycling zugeführt werden. Für die Verwertung von Abbruchbeton ist bereits heute eine Nutzung als Sekundärbaustoff Stand der Praxis. Metalle werden angesichts der hohen Preise heutzutage bereits nahezu vollständig als Schrotte verwertet.

Es werden angesichts dessen folgende Recyclingquoten angesetzt:

85 % beim Stahl (als Fe-Schrott in Stahlkonvertern zum Ersatz von Roheisen)

75 % bei Kupfer (als Sekundär-Rohkupfer zum Ersatz von Primärrohkupfer)

70 % des Betons (gebrochen als Recycling-Baustoff)

Den Aufwendungen der Demontage und des Recyclings (5 kWh Strom pro Anlage angenommen) werden die durch Substitution der Primärprodukte jeweils Gutschriften (vermeidene Lasten der Herstellung) gegengerechnet.

Grundsätzlich können auch die Speicherbatterien recycelt werden. In Deutschland und der EU gibt es dazu eine entsprechende Batterie-Verordnung. Deutlich schwieriger ist es, das Einsammeln und Wiederverwerten Recyceln in Schwellen- bzw. Entwicklungsländern zu skizzieren. Zwar sind in solchen Ländern derartige arbeitsaufwändige Aktivitäten dank der geringen Lohnkosten und der Verdienstmöglichkeiten denkbar und ggf. auch sehr attraktiv, doch muss andererseits mit einer ggf. schlechten Praxis gerechnet werden. Schlecht insofern, als die Aufarbeitung händisch erfolgt und mit primitiven Werkzeugen. Nach einer Untersuchung des Blacksmith Institute [2008] wird zu den zehn am schlimmsten verschmutzten Orten der Welt ein Standort in der Dominikanischen Republik gezählt, an welchem Batterieaufarbeitung betrieben wird.<sup>1</sup>

Für diese Betrachtung wird daher ein Recycling im Basisfall außer Acht gelassen. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse soll dieser Aspekt jedoch nochmals diskutiert werden.

### 3.2.4 **Referenzsysteme**

Der von der Vertikalwindanlage erzeugte Strom stellt eine Alternative zur Stromerzeugung an anderer Stelle dar. Die Frage, welche Art der Stromerzeugung dadurch faktisch ersetzt wird – der marginal verdrängte Strom – ist sehr komplex und in einer komplexen Energiewirtschaft wie in Deutschland nicht eindeutig zu beantworten. Ökonomische Modelle können hierzu zwar plausible Analysen liefern, letztlich kann bei hochintegrierten Netzen mit komplexer Erzeugungsstruktur jedoch keine „Wahrheit“ über diesen Sachverhalt ermittelt werden, zumal diese Frage aufgrund des dynamischen Energiemarktes im Verlaufe vergleichsweise kurzer Zeitabschnitte erheblichen Veränderungen unterworfen ist.

So wurde bis vor wenigen Jahren noch beobachtet, dass ältere Steinkohlekraftwerke stillgelegt und nicht durch Neuanlagen ersetzt wurden. Für neu erzeugten Strom aus

<sup>1</sup> <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,443481,00.html>

erneuerbaren Quellen war davon auszugehen, dass er somit Steinkohlestrom ersetzt. Inzwischen sind massive Kapazitätswachse von Steinkohlekraftwerken in Planung.

Heute ist eher anzunehmen, dass ein steigendes Angebot erneuerbarer Quellen den Zubau von Gaskraftwerken mit hocheffizienter GuD-Technik abbremsen wird. Der Realisierung dieser von der Investition her eher kostengünstigen Kraftwerke werden die aktuell steigenden Erdgaspreise entgegengehalten.

An dieser Stelle kann die Frage, welche Art Strom eine VWEA substituiert somit nicht abschließend beantwortet werden. Aus diesem Grund wird für die vorliegende Betrachtung der als „robust“ zu wertende Ansatz des allgemeinen mittleren Netzmixes, was den Bilanzraum Deutschland betrifft, gewählt.

Für infrastrukturell unterversorgte Regionen in Schwellen- und/oder Entwicklungsländern trifft dieser Ansatz nicht zu. Dort wird im Gros der Fälle eine Stromerzeugung aus Dieselmotoren ersetzt. Aus diesem Grund wurde für ein Szenario „Schwellen-/Entwicklungsland“ dieses Referenzsystem angesetzt.

## 3.3 Wirkungsabschätzung

### 3.3.1 Methodische Grundlagen

Die Vielzahl der in der Sachbilanz bilanzierten Stoffparameter (z.B. CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Erdölverbrauch etc.) werden in der **Wirkungsabschätzung** auf die wesentlichen negativen Umweltwirkungen aggregiert. Aus den Erfahrungen vergangener und aktueller Arbeiten ist folgende vorläufige Liste mit Wirkungskategorien als geeignet anzusehen. Sie deckt sich weitgehend mit den in Deutschland wie auch Europa gängigen Standardlisten. Wichtig ist, dass alle in relevanter Weise betroffenen Umweltschutzgüter bei der Bewertung berücksichtigt werden (siehe hierzu Tab. 8).

**Tab. 8**    **Verwendete Wirkungskategorien und zugeordnete Sachbilanzgrößen**

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>Datenkategorien der Sachbilanz</b>
Ressourcenbeanspruchung	<i>fossile Energieträger</i> : Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle
Treibhauseffekt	fossiles Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ), Methan (CH <sub>4</sub> ), Lachgas (N <sub>2</sub> O)
Versauerung	Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> ), Stickstoffoxide, Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), Chlorwasserstoff (HCl), Fluorwasserstoff (HF), Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S)
Eutrophierung	<i>terrestrisch</i> : Stickstoffoxide, Ammoniak
Humantoxizität	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Krebsrisikopotenzial</i>: kanzerogene Schwermetalle und Dioxine/Furane, Benzo(a)Pyren, PCB</li> <li>• <i>Feinstaub (PM<sub>10</sub>)<sup>a)</sup></i>: Primärpartikel, Sekundärpartikel aus SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, NMVOC.</li> </ul>

a) PM<sub>10</sub>: Staubpartikel <10 µm Durchmesser

### 3.3.2 Ergebnisse

In Tab. 9 sind die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zusammengestellt. Dabei werden die einzelnen Lebenswegabschnitte separat aufgeführt. Es zeigt sich, dass die größeren Anteile in der Bilanz des Lebenswegs in den meisten Wirkungskategorien durch die Herstellung von Stahl und Zement verursacht werden.

**Tab. 9 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung unterteilt nach den Systemabschnitten**

	Treib- hauseffekt pro kWh	Versauer- ung g SO <sub>2</sub> -Äq.	Eutrophie- rung g PO <sub>4</sub> <sup>3+</sup> -Äq.	Krebsrisi- kopotenzial mg As-Äq.	Feinstaub- belastung g PM <sub>10</sub> -Äq.	foss. Ress. KEA fossil kJ
<b>Herstellung</b>						
Stahl	13,0	0,064	0,0048	0,00085	0,076	113
Kupfer	0,18	0,001	0,0001	0,00000	0,0002	10
Zement	18,0	0,029	0,0044	0,00025	0,009	90
Transport	4,10	0,030	0,0049	0,00041	0,010	53
Montage	0,04	0,0001	<0,0001	<0,00001	0,00002	0,43
<b>Betrieb</b>	0,69	0,004	0,0002	0,0004	0,00072	36,2
Demontage/Recycling	0,02	0,00004	<0,0001	<0,00001	0,00001	0,21
<b>(Speicherbatterie)<sup>a)</sup></b>	<i>16,3</i>	<i>0,219</i>	<i>0,0159</i>	<i>0,995</i>	<i>0,0543</i>	<i>216</i>
<b>Gutschrift:</b>	0,69	0,004	0,0002	0,0004	0,00072	36,2
Recyclingstoffe	-10,2	-0,053	-0,0040	-0,00075	-0,05	-93
<b>SUMME:</b>						
ohne Gutschrift	36	0,13	0,01	0,0019	0,1	303
mit Gutschrift	25,8	0,07	0,01	0,0012	0,04	210
<i>(mit Speicherbatt.)<sup>a)</sup></i>	<i>42,1</i>	<i>0,293</i>	<i>0,026</i>	<i>0,996</i>	<i>0,097</i>	<i>426</i>
<b>Referenzsystem:<sup>b)</sup></b>						
Strommix	630	1,14	0,09	0,012	0,28	6.500
Strom Dieselaggregat	968	10,4	1,45	0,26	3,57	12.700
<b>NETTO – Einsparung</b>						
Deutschland	-604	-1,06	-0,08	-0,0079	-0,23	-6.340
Schwellen- / Entwick- lungsland <sup>a)</sup>	-926	-10,1	-1,42	+0,74	-3,47	-12.300
Erläuterung: Nettoeinsparung versteht sich als Einsparung gegenüber dem Referenzsystem: Summe (inkl. Gutschrift) minus Referenzsystem; negative Werte bedeuten einen Gesamteinspareffekt.						
a) In der Bilanz für Schwellen- / Entwicklungsländer ist die Herstellung und Nutzung von Speicherbatterien eingerechnet						
b) Einsparung durch Stromerzeugung und Substitution über die Lebenszeit						

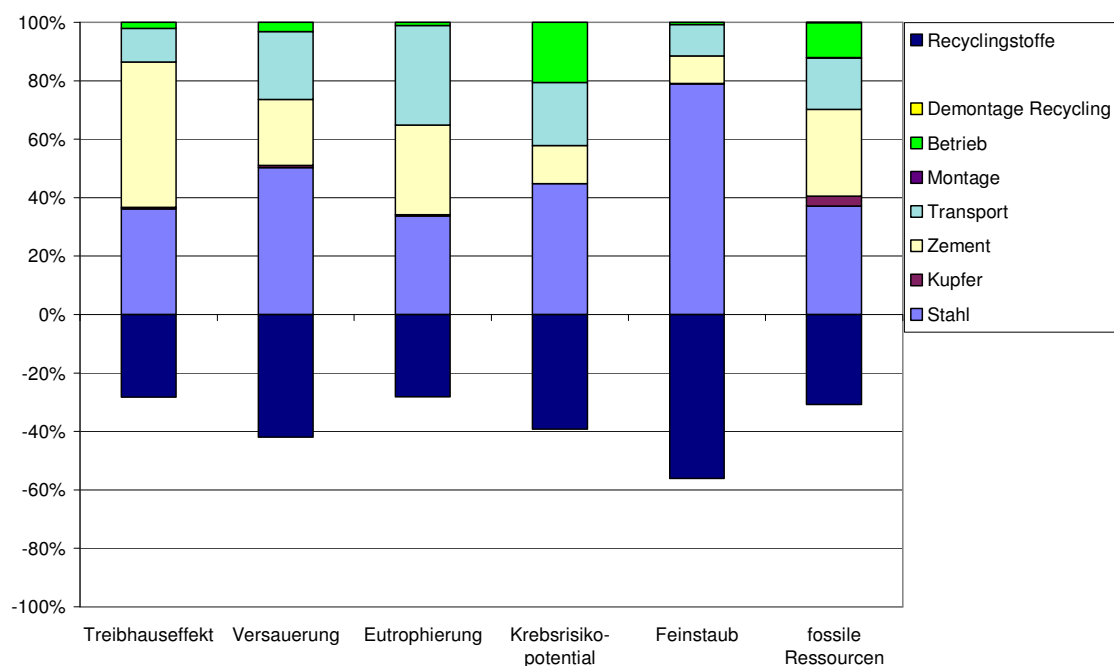
Dies wird auch in Abb. 6 nochmals deutlich herausgestellt. Als dritt wichtigste Systemkomponente stellt sich der Transport (summarisch über alle angelieferten Materialien bzw. die Anlage selbst) dar. Der Betrieb verursacht lediglich im Punkt fossile Ressour-

cen (Schmierstoff) einen erkennbaren Beitrag. Montage und Demontage sind weitgehend mit vernachlässigbaren Beiträgen verbunden.

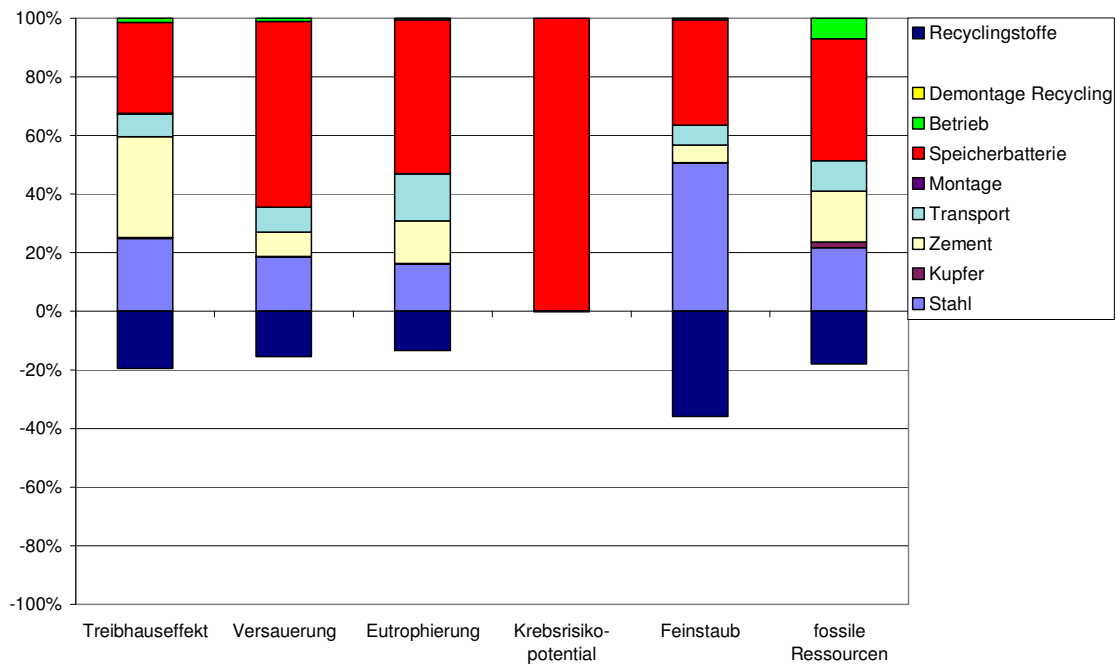
Der großen Bedeutung des Stahls sind umgekehrt die Gutschriften aus der Metallverwertung nach Abbruch der Anlage gegenüberzustellen. Bei einer Verwertungsquote von 85 % verbessert sich die Gesamtbilanz im „Netto-Ergebnis“ (nach Abzug der Gutschrift) somit in vielen Kategorien nochmals deutlich.

Abb. 7 enthält auch die Herstellung der Speicherbatterien für den Betrieb in infrastrukturschwachen Regionen in Schwellen-/Entwicklungsländern. Hierin wird deutlich, dass die Batterieherstellung im Hinblick auf die Freisetzung krebserzeugender Stoffe (v.a. Arsen bei der Verhüttung von Blei) einen erheblich größeren Beitrag einnimmt als die anderen Systemkomponenten. Obwohl bereits der eingesparte Strom aus dem Dieselaggregat mit sehr hohen Frachten an kanzerogenen Emissionen verbunden ist (v.a. Benzo(a)pyren), übertreffen die Arsenemissionen bei der Herstellung der Speicherbatterien (1 t Blei pro VWEA mit 150 g As Emission bei der Verhüttung) diese eingesparten Emissionen um das nahezu Vierfache. Der erhebliche Materialaufwand zur Herstellung der Speicherbatterien schlägt sich auch bei den übrigen Wirkungskategorien signifikant nieder, wenngleich nicht in dieser Dimension.

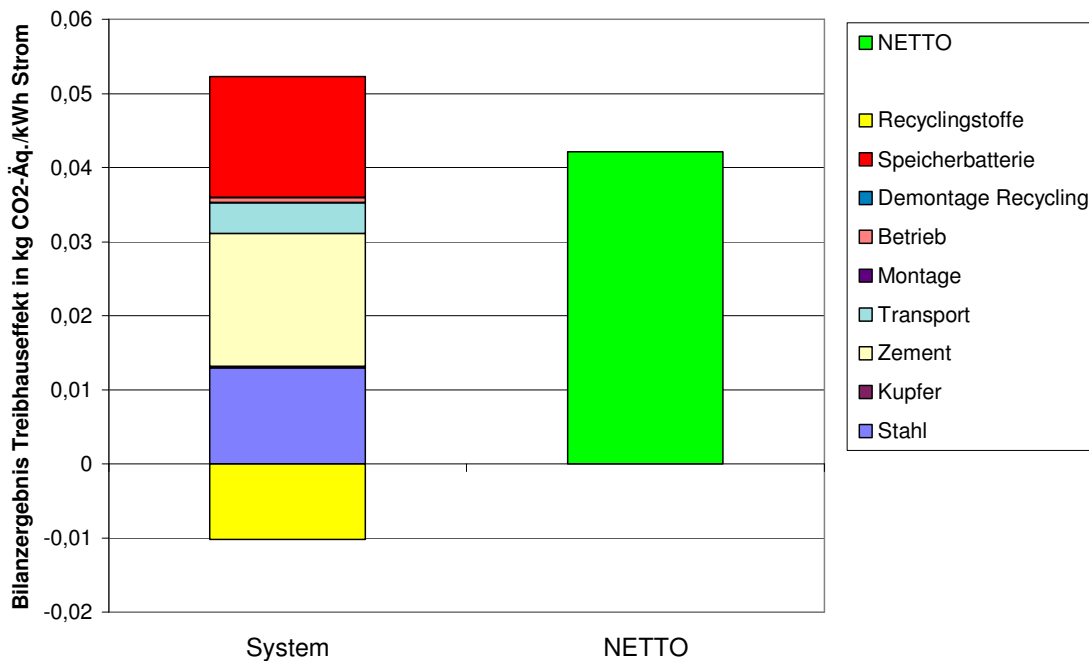
In Abb. 8 wird beispielhaft für die Kategorie Treibhauseffekt diese Aufgliederung nochmals an den absoluten Werten dargestellt. Daraus ist abzulesen, dass pro kWh 36 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente ohne Gutschrift und 26 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente mit Gutschrift resultieren. Stellt man dies der Klimalast von einer kWh aus dem mittleren deutschen Strommix gegenüber, wird der hohe Einspareffekt des Stroms aus der Vertikalwindanlage deutlich: mit 26 zu 630 verursacht diese lediglich rund 4 % der Treibhausgasemissionen wie der deutsche Durchschnittstrom.



**Abb. 6** Anteile der Lebensweg- Systemabschnitte zum jeweiligen Bilanzergebnis der Wirkungskategorien in Prozent; Recyclingstoffe als Gutschriften.



**Abb. 7** Anteile der Lebensweg- Systemabschnitte (inklusive Speicherbatterie für Nutzung in Schwellen-/Entwicklungsländern) zum jeweiligen Bilanzergebnis der Wirkungskategorien in Prozent; Recyclingstoffe als Gutschriften.



**Abb. 8** Bilanzergebnis Treibhauseffekt untergliedert nach Systemabschnitten (linke Balkengruppe) und Nettoergebnis aus Last aus Herstellung und Betrieb minus Gutschrift aus Recycling (rechter Balken); Referenzsysteme nicht einbezogen.

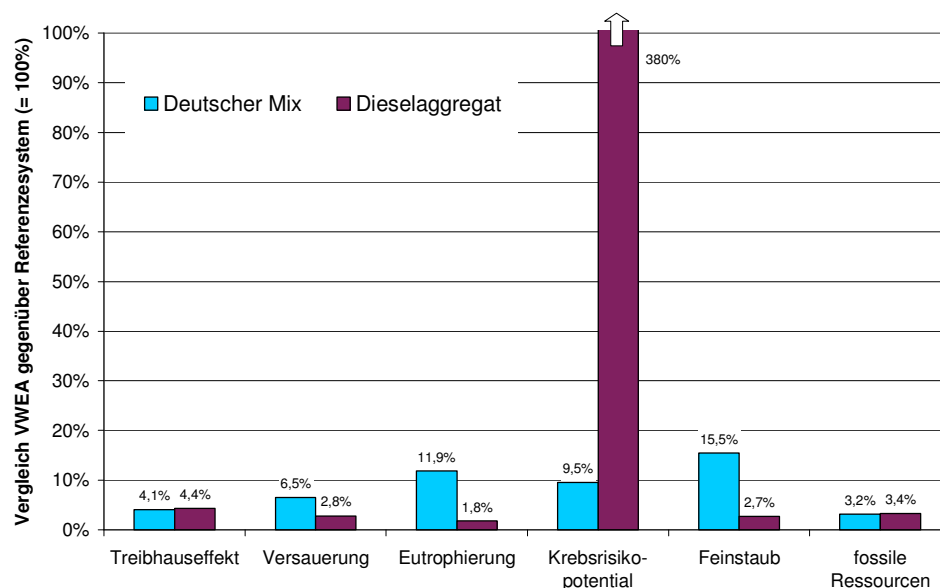
Dabei ist zu beachten, dass im System der Vertikalwindanlage der gesamte Lebensweg enthalten ist, im Wert für das Referenzsystem jedoch nur die Emissionen aus der Nutzungsphase (Errichtung und Abbruch von Kraftwerken tragen zur Gesamtbilanz nach überschlägigen Rechnungen deutlich weniger als 10 % bei).

Der für den Treibhauseffekt beschriebene Sachverhalt der deutlichen Gesamteinsparung von Umweltlasten durch Strom aus Vertikalwindkraftanlagen trifft mit einer Ausnahme auch für alle anderen Wirkungskategorien zu.

Abb. 9 zeigt über alle Wirkungskategorien die prozentualen Verhältnisse zwischen den Bilanzen von Vertikalwindkraftanlage und Referenzsystemen. Dadurch wird nochmals plastisch, dass alle Wirkungen der Vertikalwindkraftanlage weit unter 20 % der Referenzwerte bleiben, mit einer Ausnahme.

Diese Ausnahme bilden erneut die krebserzeugenden Emissionen im Szenario Inselanlage in Schwellen- und Entwicklungsländern aufgrund der hohen Arsenemissionen bei der Bleiverhüttung für die Speicherbatterien. Anders als bei den übrigen Wirkungskategorien, bei welchen fast durchgehend nochmals höhere Einsparungen an Umweltbelastungen erreicht werden durch die Substitution der emissionsträchtigen und wenig effizienten Dieselaggregate, dreht sich die Nettobilanz bei den kanzerogenen Emissionen (Krebsrisikopotenzial) – trotz der hohen lokalen Emissionen (v.a. Benzo(a)pyren) – um. Gegenüber den eingesparten Emissionen verursacht das VWEA-System (inkl. Batterien) die Freisetzung von etwa der vierfachen Fracht.

Würde man – vorausgesetzt eine gute Praxis wird eingesetzt – das Blei der Speicherbatterien im dem entsprechenden Land sammeln und recyceln und dabei knapp 80 % des Bleis wieder in den Wirtschaftskreislauf zurückbringen, würde die durch die Primärbleiverhüttung verursachte Fracht an Arsen in ihrer Wirksamkeit die am Standort eingesparten Emissionen nicht mehr übertreffen. In diesem Aspekt lägen Vor- und Nachteil dann gleichauf und die Vorteile in allen anderen Wirkungskategorien würde dann eindeutig für die VWEA im Inselssystem sprechen (siehe auch Abschnitt 3.4.2, Sensitivitätsanalyse).



**Abb. 9 Bilanz der Vertikalwindkraftanlage in Prozent der Bilanzen der Referenzsysteme**

## 3.4 Interpretation und Bewertung

Ein Ziel der **Bewertung** lautet, die Signifikanz des Ergebnisses herauszuarbeiten und insbesondere auch die für das Ergebnis signifikanten Parameter zu analysieren.

Im vorliegenden Fall ist die Ergebnislage bereits nach Abschluss der Wirkungsabschätzung vergleichsweise eindeutig: in nahezu allen Indikatoren weist die Vertikalwindkrafttechnik eine positive Ökobilanz auf, die Umwelt wird durch auf diese Weise erzeugten Strom durch Substitution von konventionell erzeugtem Strom entlastet. Die einzige Ausnahme – der nicht unbedeutende Indikator „Krebsrisikopotenzial“ – gilt es jedoch in Relation zu all den anderen Vorteilen zu bewerten.

### 3.4.1 Normierung der Ergebnisse

Um diese Art der Gegenläufigkeit von Vor- und Nachteilen abzuwägen, wird der Bewertungsansatz der Normierung verwendet. Er stellt ein von der DIN EN ISO 14044 empfohlenes Bewertungselement dar und wird in Ökobilanzen des Umweltbundesamtes wie des IFEU standardmäßig eingesetzt. Die Grundfrage dabei lautet: Sind die Unterschiede relevant?

Als Hilfsgröße wird dazu der „spezifische Beitrag“ errechnet, den eine Option mehr als eine andere zu einer Gesamtumweltlast beiträgt. Die Belastung wird dazu in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) angegeben, d.h. die Beiträge der einzelnen Varianten werden auf die Gesamtemissionen in Deutschland, bezogen auf einen Einwohner, normiert. (Bsp.: Der Vorteil von Option A gegenüber Option B von 5.000 EDW beim Treibhauseffekt entspricht dem mittleren Emissionsbeitrag von 5.000 Bundesbürgern).

Auf diese Weise lässt sich nicht nur der eine Nachteil gegenüber den zahlreichen Vorteilen abwägen. Der Ansatz dient außerdem dazu, die Umweltwirksamkeit einer (in diesem Falle) Windkraftanlage quantifizierend zu bewerten: in welcher Größenordnung schafft diese Anlage eine Umweltentlastung?

Um eine Vergleichsebene zu schaffen, wird die auf 1 kWh bezogene Bilanz auf den Ertrag eines Jahres hochskaliert – das sind 7.620 kWh – und mit der jährlichen Pro-Kopf-Last eines Einwohners der Bundesrepublik (Einwohnerdurchschnittswert, EDW) ins Verhältnis gesetzt.

In Tab. 10 sind die skalierten Bilanzergebnisse sowie die Einwohnerdurchschnittswerte zusammengestellt. In Abb. 10 sind die Normierungsergebnisse nochmals grafisch dargestellt. Daraus sind folgende wesentliche Erkenntnisse zu ziehen:

- a) Die Wirkungskategorie mit dem größtem spezifischen Beitrag zur Entlastung ist der Treibhauseffekt.
- b) Mit Werten im Bereich von knapp 0,4 EDW (bei Treibhauseffekt oder Ressourceneinsparung) wird deutlich, dass es rund 2 ½ Vertikalwindanlagen bedarf, um die mittlere Last durch einen Bundesbürger auf Null auszugleichen.
- c) Für einen Einwohner des als Referenz herangezogenen Entwicklungs-/Schwellenlandes würde – angenommen er hätte die gleiche Treibhausgaslast wie ein deutscher Einwohner – weniger als eine halbe Anlage zu seiner vollständigen CO<sub>2</sub>-Kompensation benötigt.
- d) Für den gleichen Einwohner des Entwicklungs-/Schwellenlandes sieht bei den anderen Kategorien das Bild weit extremer aus, mit sehr positiven Ergebnissen



bei Feinstaub, Eutrophierung und Versauerung (2 bis 3 EDW Einsparung) und dem bereits mehrfach problematisierten Krebsrisikopotenzial mit etwa 1,2 EDW Zusatzlast.

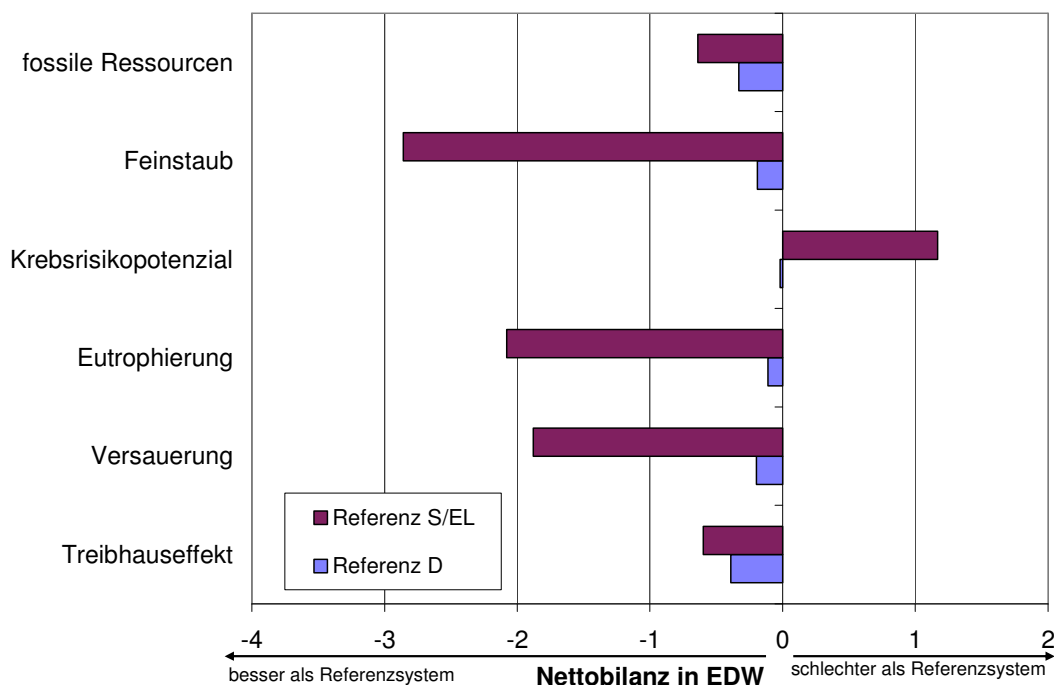
**Tab. 10 Normierung der Bilanzergebnisse auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW)**

	Netto-Jahresbilanz <sup>a)</sup> minus Referenzsystem		Einwohner- durchschnittswert Last pro Kopf <sup>b)</sup>		Normiert in EDW <sup>c)</sup>	
	DE	S-/ EL			Referenz Deutschland	Referenz S-/EL
Treibhauseffekt	-4.610	-7.620	11.800	kg CO <sub>2</sub> Ä	-0,39	-0,6
Versauerung	-8	-77	41	kg SO <sub>2</sub> Ä	-0,2	-1,9
Eutrophierung	-0,6	-11	5,2	kg PO <sub>4</sub> Ä	-0,11	-2,1
Krebsrisikopotenzial	-0,08	+5,6	48	g As-Äq.	-0,02	+1,17
Feinstaub	-1,8	-26	9,3	kg PM <sub>10</sub> Ä	-0,19	-2,86
fossile Ressourcen	-48,3	-93,6	146	GJ	-0,33	-0,64

a) bezogen auf den Jahresertrag von **7620 kWh**

b) Datengrundlage Umweltdaten-Online des Umweltbundesamts sowie verschiedene Daten des IFEU

c) Nettobilanz dividiert durch EDW; negative Vorzeichen bedeuten Netto-Entlastung gegenüber Referenzsystem



**Abb. 10 Normierte Nettobilanz (in EDW) der Vertikalwindkraftanlage**

### 3.4.2 Sensitivitätsanalyse

Anhand der Normierung konnte u.a. die Relevanz der Vorteile und des Nachteils eingeschätzt werden. Damit lassen sich aber auch die im Rahmen dieser Untersuchung gegebenen Datenunsicherheiten sowie ggf. Ansätze von Optimierungen identifizieren. Eine kurze Sensitivitätsbetrachtung soll hier die wesentlichen Aspekte nochmals zusammenführen:

- a) das Gesamtergebnis mit allen Umweltindikatoren im deutlich ökologischen Vorteil gegenüber dem Referenzsystem (Fall in Deutschland) ist als stabil anzusehen, da die maßgeblichen Datenunsicherheiten (Schätzwerte ohne empirischen Daten) in Bereichen liegen, die auch mit großen Schwankungsbreiten keinen Einfluss auf das Ergebnis haben. Das sind insbesondere die Aufwendungen für Montage und Demontage, sowie Betriebsmittel (Schmieröl) und diverse Transporte.
- b) Dies gilt in noch stärkerem Maße für den Referenzfall Schwellen- und Entwicklungsland, wo im unterstellten Fall des Ersatzes von Dieselaggregaten eine noch deutlichere positive Bilanz festzustellen ist – mit dem gegenteiligen Bild bei den krebserzeugenden Emissionen wegen den Emissionen der Blei-Speicherbatterien. Die Basisdaten zu Arsenemissionen der Bleiverhüttung haben hierbei extremen Einfluss auf das Ergebnis.
- c) In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwieweit sich das Recycling von alten Speicherbatterien im Ergebnis niederschlagen würde. Zunächst wäre es eine Frage des technischen Standards. Bei schlechten Standards (händisches Aufarbeiten der Bleiakkus) sind die Gesundheits- und Umweltgefahren eher sehr negativ zu werten. Bei einem guten Standard und mit etwa 80 % Recyclingquote, würde die durch die Primärbleiverhüttung verursachte Fracht an Arsen in ihrer Wirksamkeit die am Standort eingesparten Emissionen nicht mehr übertreffen. In diesem Aspekt lägen Vor- und Nachteil dann gleichauf und die Vorteile in allen anderen Wirkungskategorien würden dann eindeutig für die VWEA im Inselsystem sprechen. Im Übrigen besteht durch neue technische Entwicklungen auf absehbare Zeit die Möglichkeit, die derzeit üblichen Bleiakumulatoren zu ersetzen.
- d) Zu beachten ist, dass im Inselsystem grundsätzlich Dieselstrom-Aggregate im Standby benötigt werden. Dies könnte grundsätzlich das Ergebnis des VWEA-Systems verschlechtern, wenn die Betriebsstundenzeit des Aggregats sich über die Lebenszeit aufgrund langer Standzeiten verringern würde. Die Masse an Eisen und Stahl eines Aggregats liegt in der Größenordnung von 1 Tonne und kann sich bei verkürzter Lebensleistung signifikant auswirken. Ob dieser Fall in der Praxis jedoch relevant ist, wäre über diese Untersuchung hinausgehend zu prüfen.
- e) Auch die Wahl eines anderen Referenzsystems für die Situation in Deutschland würde das Ergebnis nicht erheblich verändern: unterstellt man die marginale Substitution von Steinkohlestrom würde dies die Bilanz in allen Punkten deutlich günstiger ausfallen lassen. Umgekehrt wäre das Ergebnis bei einer Substitution von Strom aus einem (verhinderten) GuD-Kraftwerk jedoch im Indikator *krebserzeugende Emissionen* tendenziell ungünstiger.
- f) Die angesetzte Lebensdauer von 20 Jahren, analog zum Abschreibungszeitraum, geht bei dieser Betrachtung als sehr sensibler Parameter ein. Dies beruht darauf, dass die Hauptlast der Bilanz aus der Herstellungsphase rührt, die linear über die Betriebszeit umgelegt wird. Eine real längere Lebensdauer (Ge-

samerträge) hat entsprechend positive Wirkung auf das Ergebnis. Umgekehrt wäre ein geringer Lebenszeitertrag entsprechend negativ für das Ergebnis.

### 3.5 Zusammenfassung der Ökobilanz

Die Lebenswegbilanz einer Vertikalwindkraftanlage fällt insgesamt überwiegend positiv aus. Während die Nutzungsphase nahezu lastenfrei ist, beruhen die Einschränkungen im Ergebnis auf der Herstellung der Materialien (v.a. Stahl). Diese Lebenswegphase ist bei Großkraftwerksanlagen angesichts der höheren Umsatzleistung bezogen auf das verbaute Material dagegen eher unbedeutend.

In jeder Hinsicht positiv verhalten sich die Treibhausgase, die Bilanz fossiler Ressourcen aber auch Versauerung und Eutrophierung, vergleicht man die Lebenswegaufwendungen des VWEA-Stroms mit dem aus dem durchschnittlichen Strom aus dem deutschen Netz.

Dies stellt sich noch deutlicher dar, wenn die VWEA in einer infrastrukturarmen Region in einem Schwellen- oder Entwicklungsland betrieben wird. Dann ist von einer Substitution dieselbasierter Stromerzeugung (Stromaggregate) auszugehen. In der Ökobilanz resultiert dies in einer noch deutlicheren Entlastung in allen Wirkungskategorien.

Eine Ausnahme bilden die krebserzeugenden Emissionen mit umgekehrtem Ergebnis aufgrund der Daten und Annahmen zur Herstellung sowie geringen und schlechten Recyclings von Speicherbatterien. Würde diese Last aus der Materialvorkette minimiert werden, wäre eine Verbreitung des VWEA-Einsatzes nach den Ergebnissen der Ökobilanz insbesondere in infrastrukturarmen Regionen in Schwellen- oder Entwicklungsländern zu begrüßen, da der Substitutionseffekt dort gerade auch an den Standorten die Vermeidung toxischer Schadstoffemissionen ermöglicht.

## 4 Literatur

- Blacksmith Institute: The World's Worst Pollution Problems: The Top Ten of the Toxic Twenty; New York, Zürich 2008;  
[www.worstpolluted.org](http://www.worstpolluted.org)
- DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung der EN ISO 14040:1997, August 1997, 16 S.
- Daum, J.: Abschlussbericht über die weiterführenden Arbeiten am Projekt „Pilotstudie zur Akzeptanz vertikaler Windenergieanlagen“; Bericht des IFEU, 2007
- Daum, J.: Vertikale Windenergieanlagen – Einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit; Diplomarbeit; Heidelberg 2007
- ECOINVENT: ecoinvent v2.01 - <http://www.ecoinvent.org/>
- GEMIS – Fritsche, U. et al.: Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme, Darmstadt/Kassel, Version 4.1:  
<http://www.oeko.de/service/gemis/deutsch/index.htm>
- Leventhall, G.: Infrasound From Wind Turbines – Fact, Fiction Or Deception; Canadian Acoustics No. 29 - Vol. 34 No.2 (2006)
- Long, C. V., Flint, J. A., Lepper, P. A., Dible, S. A.: Wind turbines and bat mortality: interactions of bat echolocation pulses with moving turbine rotor blades; Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol.31. Pt.1 2009
- Pantazopoulou, G.: Noise issues and standards for domestic wind turbines, 2009
- Windpower: <http://www.windpower.org/de/tour/env/sound.htm>