

**OCF** Consulting



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

*Hamburg University of Applied Sciences*

HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN HAMBURG

FAKULTÄT LIFE SCIENCES

---

# Urbane Kleinwindkraft

-

**Einsatzmöglichkeiten und Vorgehen zur Standortanalyse im  
Rahmen des Integrierten Klimaschutzkonzepts  
Hamburg-Bergedorf**

---

BACHELORARBEIT

FACHBEREICH UMWELTTECHNIK

Hamburg, 20. Mai 2016

*vorgelegt von:*

Helge Henning HANSEN

Matr. Nr. 2054904

*Gutachter:*

Prof. Dr. Holger SCHWARZE

Dr.-Ing. Manuel GOTTSCHICK

## Kurzfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird eine Standortanalyse für den Einsatz von Kleinwindenergieanlagen vorgenommen. Zunächst wird ein Überblick über physikalische und technische Grundlagen sowie über allgemeine Rahmenbedingungen gegeben. Da sich der betrachtete Standort im städtisch bebauten Gebiet des Hamburger Bezirks Bergedorf befindet, liegt ein besonderer Schwerpunkt der Betrachtung auf den Besonderheiten urbaner Windverhältnisse. Nach der Berechnung des Windgeschwindigkeitsprofils unter Zuhilfenahme von frei verfügbaren Geoinformationsdaten wird hierauf aufbauend die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Kleinwindenergieanlagen zur Stromerzeugung anhand eines Beispiels untersucht. Als Resultat lässt sich feststellen, dass eine Investition zum Zweck der Selbstversorgung unter bestimmten Rahmenbedingungen finanziell sinnvoll sein kann, wobei hierfür mehrere Aspekte berücksichtigt werden müssen. Die Stromerzeugung zum Zweck der gesetzlich vergüteten Einspeisung ergibt auf Grund des derzeit geltenden niedrigen Tarifs ökonomisch keinen Sinn. Abschließend werden Einsatz- und Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt, die z.B. im Rahmen des *Integrierten Klimaschutzkonzepts Bergedorf* umgesetzt werden können.

## Abstract

This Bachelorthesis makes a site-analysis of small wind energy operation. Firstly an overview about physical, technical and important frame conditions is given. Since the considered location is part of the urban zone of Hamburg-Bergedorf, the work is focused on the special wind conditions in urban areas. After calculating the wind profile based on the use of geographic data, the cost efficiency of small wind energy turbines is investigated as a particular focus. The result shows that after a few years of operation the investment in wind turbines would make financial sense, if the turbine is primarily used for the substitution of grid-power by the user and with several other factors combined. The current feed-in tariff for energy produced by wind is far too low to calculate as cost-effective. However, there are certain imaginable cost effective applications given in the context of the *Integrierte Klimaschutzkonzept Bergedorf* (Integrated Climate Protection Concept Bergedorf), which are shown at the end of the work.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Integriertes Klimaschutzkonzept Hamburg-Bergedorf</b>	<b>8</b>
2.1	Bezirk Hamburg-Bergedorf . . . . .	8
2.2	Integriertes Klimaschutzkonzept . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Grundlagen Kleinwindkraft</b>	<b>12</b>
3.1	Physikalische Grundlagen . . . . .	12
3.2	Technische Realisierung von kleinen Windenergieanlagen . . . . .	16
3.3	Marktanalyse und Kostenübersicht . . . . .	21
3.4	Rechtliche Aspekte . . . . .	22
3.5	Akzeptanz und Umwelt . . . . .	24
3.6	Besonderheiten urbaner Windverhältnisse . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Standortanalyse, Wirtschaftlichkeit und Anwendungsbeispiele</b>	<b>38</b>
4.1	Winddargebot am Beispiel Wettermast Billwerder . . . . .	38
4.2	Schleusengraben: Standortanalyse mittels urban boundary layer Modell . . . . .	44
4.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung . . . . .	48
4.4	Anwendungsmöglichkeiten in Bergedorf . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>55</b>

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Karte: Hamburg-Bergedorf . . . . .	9
2.2	Verlaufsschema des IKK Bergedorf . . . . .	11
3.1	Windgeschwindigkeitsprofil in unterschiedlichen atmosphärischen Schichten . . . . .	13
3.2	Auftriebsprinzip am Rotorblatt . . . . .	16
3.3	Rotorbauformen . . . . .	18
3.4	Leistungskurve . . . . .	20
3.5	Beispiel für die Montage auf einem Flachdach . . . . .	22
3.6	Marktübersicht und -prognose . . . . .	22
3.7	Landschafts- und Naturschutzgebiete in Bergedorf . . . . .	23
3.8	Umweltbilanz von Kleinwindenergieanlagen relativ zum Strommix . . . . .	27
3.9	Beispiel für Turbulenz anhand einer Computer-Simulation . . . . .	29
3.10	Anlagenleistung in Abhängigkeit von der Turbulenzintensität . . . . .	29
3.11	urban boundary layer Modell . . . . .	30
3.12	urban boundary layer Modell MH . . . . .	31
3.13	Beispiel für eine großflächige Windpotentialabschätzung . . . . .	33
3.14	Simulation unterschiedlicher Anströmwinkel . . . . .	34
3.15	Simulation des Canyon-Effekts . . . . .	34
3.16	Auswirkungen von Dachformen und Montagepositionen auf die Leistung . . . . .	35
3.17	Beispiele für Konzentratorwirkung . . . . .	36
3.18	Beispielsergebnisse von Potenzialabschätzungen mittels Geoinformationsdaten . . . . .	37
4.1	Windkarte für Hamburg, Niedersachsen und Bremen . . . . .	39
4.2	Billwerder: Windgeschwindigkeits- und Energieverteilung in 10 m Höhe . . . . .	40
4.3	Billwerder: Windgeschwindigkeitsverteilungen in 50 m Höhe . . . . .	42
4.4	Billwerder: Räumliche Windgeschwindigkeits- und Energieverteilung . . . . .	43
4.5	Karte: Schleusengraben . . . . .	45
4.6	Berechnetes Windgeschwindigkeitsprofil Schleusengraben . . . . .	47
4.7	Sensitivitätsanalyse der Stromgestehungskosten . . . . .	51
4.8	Beispiel für eine ökonomischen Bilanz einer Kleinwindenergieanlage . . . . .	52
4.9	Konzepte gebäudeintegrierter Windenergieanlagen . . . . .	53
4.10	Einsatzmöglichkeiten von KWEA im öffentlichen Raum . . . . .	54

## Häufig verwendete Abkürzungen

ABKÜRZUNG	BEDEUTUNG
WEA	Windenergieanlage
KWEA	Kleinwindenergieanlage
IKK	Integriertes Klimaschutzkonzept
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
GIS	Geoinformationssystem
ALKIS	Amtliches Liegenschaftskataster-Informationssystem
CFD	computational fluid dynamics
HAWT	horizontal axis wind turbine
VAWT	vertical axis wind turbine
BL	boundary layer
UBL	urban boundary layer
CL	canopy layer

## Häufig verwendete Symbole und ihre Einheiten

ZEICHEN	BEDEUTUNG	EINHEIT
$u$	Windgeschwindigkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
$\bar{u}$	mittlere Windgeschwindigkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
$u_{Nenn}$	Nennwindgeschwindigkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
$A$	Rotorfläche	$\text{m}^2$
$P$	Leistung	W
$P_{Nenn}$	Nennleistung	W
$c_p$	Leistungsbeiwert	-
$c_A$	Auftriebsbeiwert	-
$c_W$	Widerstandsbeiwert	-
$\lambda$	Schnelllaufzahl	-
$z$	Höhe	m
$z_0$	Rauhigkeitslänge	m
$h_m$	mittlere Hindernishöhe	m
$d$	displacement height	m
$bl$	blending height	m
$k$	Weibull-Faktor	-
$E_a$	jährlicher Anlagenertrag	Wh
$VBD$	Vollbenutzungsdauer	h
$K_I$	Investitionskosten	€
$k_I$	leistungsspezifische Investitionskosten	$\frac{\text{€}}{\text{W}}$
$k_B$	leistungsspezifische Betriebskosten	$\frac{\text{€}}{\text{W}}$
$A_F$	Annuitätsfaktor	-
$\zeta$	Zinssatz	-
$k_{el}$	Stromgestehungskosten	€/Wh

# 1 Einführung

Stromerzeugung aus Wind ist in den vergangenen dreieinhalb Jahrzehnten vor allem dadurch zu einer erfolgreichen Technologie ausgebaut worden, dass Windenergieanlagen (WEA) stetig größer und leistungsfähiger gebaut wurden [Hau 2014]. Die qualitative Entwicklung kleiner Anlagen wurde weniger stark vorangetrieben, was sich jedoch in den letzten Jahren zu ändern begonnen hat [Leonhartsberger 2015]. Kleinwindenergieanlagen (KWEA) bieten die Möglichkeit, Strom aus einer regenerativen Quelle dezentral und verbrauchsnahe zu erzeugen und gehen dadurch mit einem geringen Übertragungsaufwand einher [Grieser u. a. 2015]. Die World Wind Energy Association rechnet bis 2020 mit einer jährlichen Zuwachsrate der weltweit installierten KWEA-Leistung von 20 % auf ca. 3 GW [Gsänger 2014]. Wie auch im Fall von Groß-WEA ist jedoch eine genaue Kenntnis der jeweiligen Windverhältnisse am Standort für eine wirtschaftlich darstellbare Anwendung notwendig [Franken 2013].

Im Rahmen des Integrierten Klimaschutzkonzepts (IKK) im Hamburger Bezirk Bergedorf werden Potenziale und Maßnahmen zur Reduktion klimarelevanter Emissionen geprüft, wobei im Bereich der Stromerzeugung ein relativ großes Potenzial festgestellt werden kann [OCFC 2016]. In Bergedorf sind bisher keine an das Netz angeschlossene KWEA im Betrieb [BNetzA 2015]. Ebenso wenig gibt es z.B. detaillierte Informationen über das Winddargebot - abgesehen von Windkarten niedriger Auflösung [DWD 2016] -, weshalb einer Prüfung der Standortanalyse und der Einsatzmöglichkeiten grundlegende Bedeutung zukommt.

Das Ziel der Arbeit ist eine erste Einschätzung über die Anwendungsmöglichkeiten von KWEA im Rahmen des IKK Bergedorf. Es werden hierzu vorhandene Methoden und Erkenntnisse zur Windenergiepotenzialanalyse mit Schwerpunkt auf dem städtischen Bereich in einer Literaturrecherche vorgestellt. Anschließend wird anhand eines Beispiels die Wirtschaftlichkeit einer Anlage am konkreten Standort in Bergedorf betrachtet. Für die Analyse werden vorhandene Daten aus Windmessungen sowie Geoinformationsdaten der Stadt Hamburg verwendet. Die Ergebnisse der Arbeit werden abschließend in Form von Anwendungsmöglichkeiten sowie ausblickend als Handlungsvorschläge zur Förderung von KWEA in Hamburg-Bergedorf formuliert.

## 2 Integriertes Klimaschutzkonzept Hamburg-Bergedorf

An erster Stelle sollen in diesem Abschnitt das Gebiet sowie die Struktur des in dieser Arbeit betrachteten Bezirks Bergedorf kurz beschrieben werden. Weiterhin werden Ziel und Vorgehen des IKK erläutert.

### 2.1 Bezirk Hamburg-Bergedorf

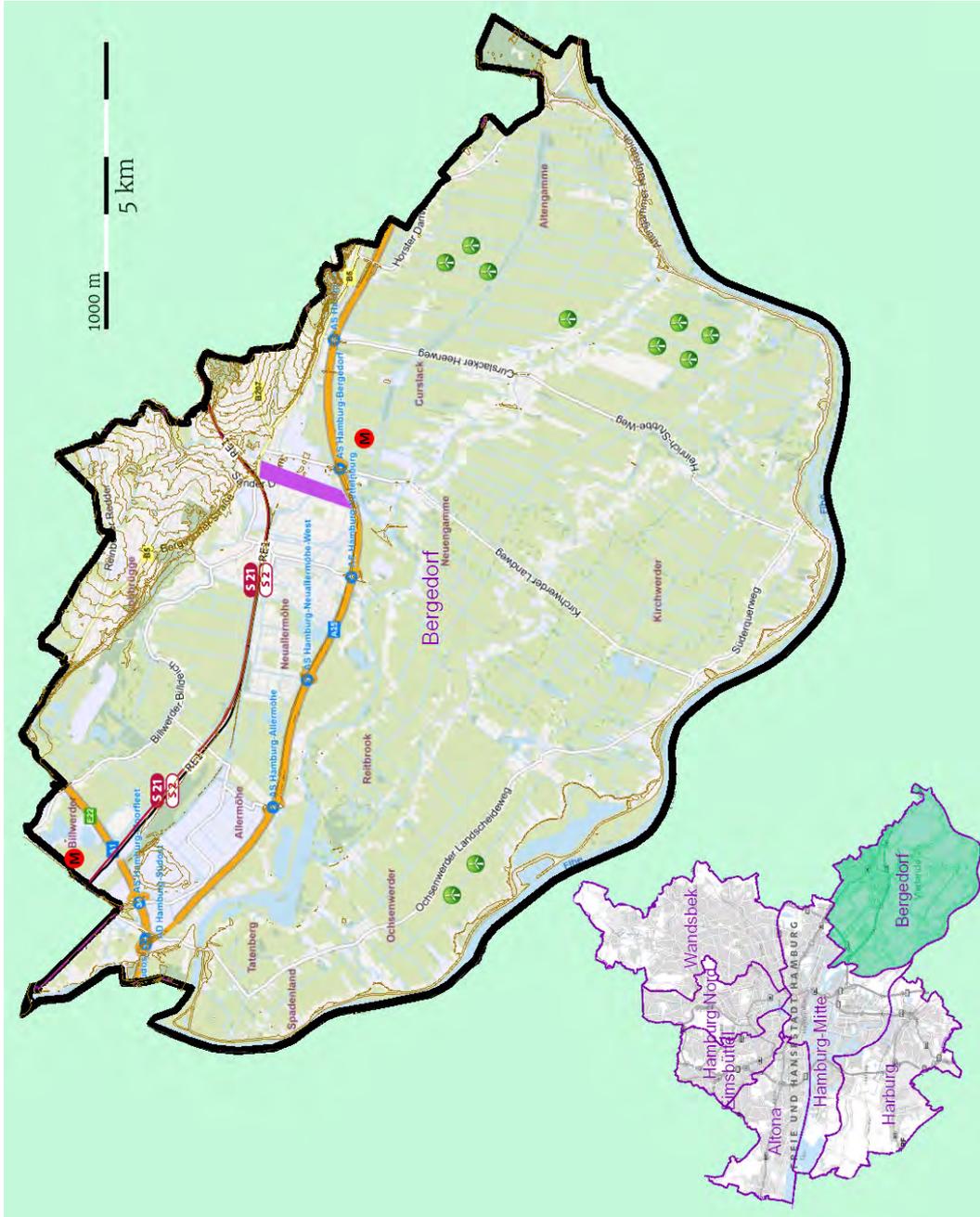
Der Verwaltungsbereich des Bezirks Bergedorf liegt im Südosten Hamburgs. Die Verwaltung obliegt dem Bezirksamt und beruht auf Artikel 4 Absatz 2 der Verfassung der Freien und Hansestadt Hamburg. Die Leitung des Bezirksamts wird von der Bezirksversammlung gewählt. Die Verwaltungsaufgaben der Bezirke werden von den in Dezernaten zusammengefassten Fachämtern übernommen [FHH 2016].

**Geografie** Bergedorf ist in weiten Teilen durch flaches Marschland geprägt, durchzogen von Wasserläufen wie der Bille, der Dove Elbe und der Gose Elbe. Im Nordosten erstreckt sich Bergedorf auf den Geesthang des Elb-Tals (s. Abbildung 2.1).

**Infrastruktur und Bevölkerung** Die Gesamtfläche Bergedorfs beläuft sich auf 154,76 km<sup>2</sup>, davon sind 18,7% Gebäude- und Freiflächen, 18,3% sind Wasser-, Erholungs- oder Waldflächen und 55,4% landwirtschaftlich genutzte Flächen [StatN 2015].

Ähnlich wie die Geografie unterscheidet sich auch die Struktur der einzelnen Bergedorfer Stadtteile, was sich auch in der Bevölkerungsdichte ablesen lässt.

Diejenigen Teile südlich der in Ost-West-Richtung verlaufenden Bundesautobahn 25 sind fast vollständig als ländlich zu bezeichnen. Hier befinden sich auch die aktuell vorhandenen WEA-Standorte. Die zwischen Autobahn und Elbe gelegenen Stadtteile Reitbrook und Ochsenwerder weisen Bevölkerungsdichten von lediglich 74 bzw. 180 Personen pro km<sup>2</sup> auf [ebd.]. Nördlich der A25 liegen hingegen eher städtische Bereiche, allen voran das historische Stadtgebiet Bergedorfs (3322 Personen pro km<sup>2</sup>) im Nordosten des Bezirks an der Nah- und Fernbahntrasse [ebd.]. Der westlich hiervon gelegene Stadtteil Allermöhe ist ebenfalls von gemischter Struktur - dörflich, großstädtisch und industriell. Mit der Boberger Niederung befindet sich jedoch auch nördlich der Autobahn ein großes und vielfältiges Naturschutzgebiet aus Wald, Moor, Heide und Dünen.



**Abb. 2.1:** Bergedorf: Lage (kleine Karte), Infrastruktur (Gebäude- und Freiflächen: grau), Höhenlinien (5 m, braun); außerdem eingezeichnet: Positionen bestehender Groß-WEA (grün) und der Messstationen (rot) - Billwerder im äußersten Nordwesten und Curslack südöstlich des Entwicklungsgebiets Schleusengraben (lila); eigene Darstellung nach [LBGV 2016b]

Das Amtliche Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS) listet für Bergedorf insgesamt 39 225 Gebäude, davon 55 % Wohngebäude [LBGV 2016a].

**Lage der Messstationen** In Abbildung 2.1 sind zusätzlich die Standorte der Windmessstationen Billwerder und Curslack eingezeichnet (rot). Der Wettermast Billwerder liegt im äußersten Nordwesten des Bezirks, wo die Boberger Niederung an die Logistik-, Gewerbe- und Industriegebiete im Osten des vom Hafen geprägten Bezirks Hamburg-Mitte angrenzt. Die Station in Curslack befindet sich direkt südlich der A25 auf dem Gelände des dort geplanten Windkraftparks.

## 2.2 Integriertes Klimaschutzkonzept

Bergedorf ist der erste der sieben Hamburger Bezirke, der sich zur Erstellung und Durchführung eines IKK entschlossen hat. Da das IKK Bergedorf den Anlass zur vorliegenden Arbeit gegeben hat, soll hier das Konzept kurz erläutert werden.

Das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderte Instrument des IKK hat letztlich das Erreichen der aus internationalen Übereinkünften resultierenden nationalen Klimaschutzziele auf kommunaler Ebene über die sogenannte Kommunalrichtlinie<sup>1</sup> zum Ziel. Mit Ratifizierung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der Europäischen Union (EU) verpflichtete sich die Bundesrepublik Deutschland u.a. zu einem Ausbau des Anteils der Erneuerbaren Energien (EE) am Bruttoendenergieverbrauch auf mind. 18 % bis 2020<sup>2</sup>. Im vorvergangenen Jahr 2014 lag der EE-Anteil bei 13,9 % [BMWi 2016].

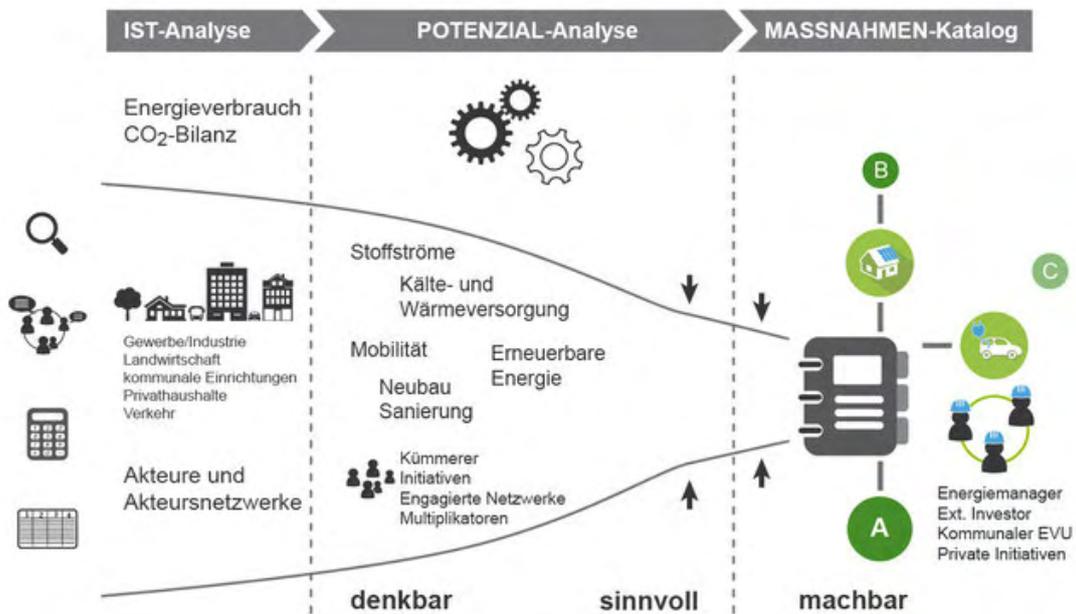
Dem IKK Bergedorf ging der sog. *Masterplan Klimaschutz Hamburg* voraus. In ihm wurden Ziele, Potentiale und Maßnahmen insbesondere zur Reduzierung von  $CO_2$ -Emissionen festlegt. Die Reduzierung der jährlich produzierten Menge an  $CO_2$  soll demnach bis 2050 um ca. 10 000 kg auf 2000 kg pro Person in Hamburg gesenkt werden. Hierzu wurde u.a. die Verdopplung der installierten Windanlagenleistung im Stadtgebiet, und eine hierdurch gesteigerte Erzeugung auf 225 GWh/a bis 2020 als Maßnahme genannt, deren Umsetzung in erster Linie durch den Ersatz älterer Anlagen (*Repowering*) erreicht werden soll [FHH 2013]. Das IKK Bergedorf setzt nun - entsprechend kleinräumiger und detaillierter - auf Bezirksebene an, wobei das Verfahren in drei Phasen eingeteilt ist: Nach einer Analyse des energetischen IST-Zustands unter Einbeziehung möglichst vieler gesellschaftlicher Bereiche und Handelnder wird eine Potenzial-Analyse für die einzelnen Sektoren (z. B. EE) vorgenommen

---

<sup>1</sup>BMU: Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten in sozialen, kulturellen und öffentlichen Einrichtungen im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative vom 22. September 2015

<sup>2</sup>EE-RL 2009/28/EG - Umsetzung der Vereinbarungen aus dem Kyoto-II-Protokoll innerhalb des "Green-Package" der EU [Prall u. a. 2014]

und hieraus anschließend ein Katalog aus sinnvollen und machbaren Maßnahmen erstellt (s. Abbildung 2.2).



**Abb. 2.2:** Geplanter Ablauf des IKK Bergedorf (EVU: Energieversorgungsunternehmen); [OCFC 2016]

Die Auswertung des IST-Zustands ergibt, dass die Nutzung elektrischen Stroms in einer Gesamtmenge von ca. 0,5 TWh/a ungefähr ein Viertel des Energiebedarfs in Bergedorf ausmacht. Dieser Anteil verursacht demgegenüber die Hälfte der für Bergedorf kalkulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>3</sup> [Gottschick 2016; OCFC 2016]. Im Stromsektor kann somit ein erhebliches Reduzierungspotenzial in Hinblick auf klimarelevante Emissionen festgestellt werden.

Die Stromerzeugung durch kleine Windenergieanlagen wird dieses Potenzial für ein dicht bewohntes Gebiet wie den städtischen Teil Bergedorfs zwar aller Voraussicht nach nicht alleine ausschöpfen können, könnte jedoch ebenso wie die Erzeugung durch Groß-WEA, Photovoltaikanlagen, Wasserkraftwerke und Biogasanlagen einen Baustein innerhalb der Wende zu einer regenerativen und dezentralen Energieversorgung bilden. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag hierzu leisten, indem Möglichkeiten der Anwendung sowie bestehende Herausforderungen aufgezeigt werden.

<sup>3</sup>Werte stark gerundet wegen mangelhafter Datenlage [Gottschick 2016]

## 3 Grundlagen für den Einsatz von Kleinwindenergieanlagen

Zum Einstieg in das Thema urbane Kleinwindkraft sollen in diesem Kapitel zunächst grundlegende Begriffe sowie physikalische, technische und weitere Grundlagen für den Einsatz von KWEA erläutert werden.

**Definition und Abgrenzung** In der Literatur werden unterschiedliche Ansätze zur Einordnung von KWEA vorgeschlagen. Die international gültige Norm der International Electrotechnical Commission (IEC) nennt eine solche Windenergieanlage klein, die

*“mit 200 m<sup>2</sup> oder weniger vom Rotor überstrichener Fläche die kinetische Energie des Windes in elektrische Energie umwandelt.“ [IEC 2013]*

Dies ist eine deutliche Abgrenzung zu modernen Großanlagen im Megawatt-Leistungsbereich, deren Rotorfläche mehrere Tausend m<sup>2</sup> beträgt. Allerdings kann eine KWEA nach IEC immerhin noch einen Rotordurchmesser von 6 m aufweisen, was im Hinblick auf Kosten und Handhabung nicht mehr ohne weiteres als klein bezeichnet werden kann. In der vorliegenden Arbeit wird die vom Bundesverband Windenergie (BWE) empfohlene Sprachregelung angewandt, nach der KWEA - neben anderen Merkmalen und in Abgrenzung zu Mittelwindanlagen - eine Nennleistung bis zu 30 kW besitzen [Franken 2013].

### 3.1 Physikalische Grundlagen

Der Einsatz von KWEA und vor allem die Bestimmung eines wirtschaftlichen Standorts setzen ein Verständnis der zur Stromerzeugung genutzten Ressource voraus, weshalb an dieser Stelle zunächst eine meteorologische Einführung gegeben werden soll.

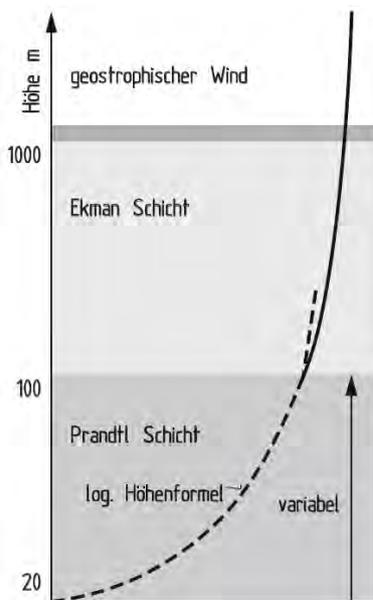
#### Entstehung von Wind

Wind als nahezu alltägliches Naturphänomen ist zum größten Teil eine indirekte Folge der auf die Erdatmosphäre treffenden solaren Strahlungsenergie. Während letztere sowohl zeitlich als auch räumlich als nahezu konstant angesehen werden kann, schwankt das Winddargebot bekanntermaßen einerseits jahreszeitlich, täglich, und sogar im Sekundenbereich stark. Andererseits gibt es komplexe räumliche Zusammenhänge zwischen den global vorherrschenden Windregimes, die das Temperatur- bzw. Druckgefälle zwischen Äquator- und Polarregionen als Ursache haben [Quaschnig 2011, S. 240 f.]. Hinzu kommt die vertikale Teilung der

Atmosphäre in Schichten, die - teilweise wiederum zeitlich schwankend - unterschiedliche Ausdehnungen und Eigenschaften aufweisen.

### Struktur der Erdatmosphäre

Abbildung 3.1 zeigt die ungefähre Lage dreier dieser atmosphärischen Schichten, sowie den ungefähren Verlauf des *Windgeschwindigkeitsprofils*: Während der geostrophische Wind in der sogenannten freien Atmosphäre ab ungefähr 1 km Höhe in Geschwindigkeit und Richtung unabhängig vom Einfluss der Oberfläche ist und nur vom Druckgradienten und der Erddrehung bestimmt wird, kehrt sich dies mit sinkender Höhe um. Die Ekman-Schicht kann dabei als Übergang zur Prandtl-Schicht (oder *boundary layer* (BL)<sup>1</sup>) gesehen werden, in welcher die Oberflächenbeschaffenheit eine große Rolle für die Windgeschwindigkeit spielt [Hau 2014; Hupfer 2005]. Während aus diesen Gründen versucht wird, Groß-WEA möglichst weit in der Ekman-Schicht mit konstanteren Windverhältnissen zu installieren, arbeiten KWEA auf Grund ihrer Größe nahezu ausschließlich im BL<sup>2</sup>.



**Abb. 3.1:** Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Höhe, dargestellt in unterschiedlichen Schichten der Atmosphäre: Während in der bodennahen Prandtl-Schicht der Oberflächeneinfluss dominiert und daher die Windgeschwindigkeit mit größerer Entfernung zur Oberfläche zunimmt, ist in der freien Atmosphäre oberhalb der Ekman-Schicht die Geschwindigkeit unabhängig von der Oberfläche und daher auch in unterschiedlichen Höhen nahezu konstant [Hau 2014].

<sup>1</sup>auch Grenzschicht oder planetary boundary layer [Konow 2014]

<sup>2</sup>Eine mögliche Ausnahme ist die Installation auf im Vergleich zur Umgebung sehr hohen Gebäuden, die jedoch im Weiteren nicht explizit behandelt wird.

Innerhalb des BL kann von einem logarithmischen Geschwindigkeitsprofil ausgegangen werden. Die Windgeschwindigkeit  $u$  verhält sich in Abhängigkeit der Höhe über dem Grund  $z$  nach

$$u(z) = u(z_{ref}) \frac{\ln \left[ \frac{z}{z_0} \right]}{\ln \left[ \frac{z_{ref}}{z_0} \right]} \quad (3.1)$$

mit  $u(z_{ref})$  als Referenzwindgeschwindigkeit in der Höhe  $z_{ref}$  sowie der *Rauhigkeitslänge*  $z_0$ .  $z_0$  beschreibt diejenige Höhe über dem Boden, in der  $u$  auf Null abgebremst wird. Diese Höhe ist in bebautem Gebiet nur schwer zu bestimmen, weil der Wind je nach Richtung auf unterschiedliche Hindernisse trifft, und schwankt zusätzlich jahreszeitlich durch den Einfluss von Vegetation [Konow 2014]. Sie liegt zwischen 0,0002 m (glatte See) und 2 m (Stadtkern) [Quaschnig 2011, S. 245], wobei für städtische Bereiche in der Literatur nur selten eine feinere Abstufung als *urban* und *suburban* vorgenommen wird [Drew u. a. 2013].

### Stromerzeugung aus Windenergie

Unabhängig von ihrer Größe können WEA ganz allgemein als Energiekonverter bezeichnet werden; Sie dienen dazu, die kinetische Energie im Wind in mechanische (und diese weiter in elektrische) Energie zu wandeln [Quaschnig 2011, S. 255]. Alle gängigen Konzepte stützen sich dabei auf das Antreiben eines Generators durch einen vom Wind in Drehung versetzten Rotor. Andere im Prototyp-Stadium befindliche Ideen verfolgen z. B. die Nutzung von Lenkdrachen an Stelle des Rotors [Khammas 2013] oder die direkte Stromerzeugung mittels Elektrostatik [TU Delft 2013].

### Im Wind enthaltene Leistung

Die im Wind enthaltene Leistung  $P$  entspricht der zeitlichen Ableitung der kinetischen Energie  $E_{kin}$  der bewegten Luftmoleküle:

$$P = \dot{E}_{kin} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m}_L \cdot u^2 \quad (3.2a)$$

Der Luftmassenstrom  $\dot{m}_L$  ergibt sich aus dem Volumenstrom  $\dot{V}$  und der Dichte der Luft  $\rho_L$ , wobei  $\dot{V}$  durch das Produkt der vom Volumen  $V$  durchströmten (Rotor-)Fläche  $A$  und der Windgeschwindigkeit  $u$  dargestellt werden kann, mit  $s$  als Länge des entsprechenden Zylindervolumens:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot \dot{V} \cdot u^2 \quad (3.2b)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A \cdot \dot{s} \cdot u^2 \quad (3.2c)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A \cdot u^3 \quad (3.2d)$$

Damit hängt  $P$  maßgeblich von der Windgeschwindigkeit  $u$  sowie weiterhin von der Fläche  $A$  ab; der Einfluss von  $\rho_L$  ist zunächst vernachlässigbar.

Zu Vergleichszwecken wird häufig die *flächenspezifische Leistungsdichte*  $p$  als Quotient aus  $P$  und  $A$  mit  $[p] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  verwendet.

### Aus dem Wind entnehmbare Leistung

Nach der Bestimmung der physikalisch im Wind enthaltenen Leistung im Wind kann jedoch gezeigt werden, dass die mechanisch maximal entnehmbare Leistung kleiner ist; dies lässt sich dadurch verdeutlichen, dass die Entnahme mit einer Verlangsamung des Luftstroms verbunden ist, weshalb eine Umwandlung der gesamten Energie zu einem völligen Stillstand der Luft direkt hinter dem Rotor, und dies wiederum zu einem Stillstand der Anlage führen würde. Das Verhältnis der entnommenen zur enthaltenen Leistung wird durch den dimensionslosen *Leistungsbeiwert*  $c_p$  des Rotors ausgedrückt.

Der physikalisch maximal entnehmbare Anteil der Leistung wird durch den von Betz ermittelten idealen Leistungsbeiwert  $c_{p,ideal} \approx 0,59$  beschrieben [Hau 2014, S. 85].

### Widerstands- und Auftriebsprinzip

Die Dynamik von Körpern - also beispielsweise eines Rotors - in einem strömenden Fluid wie dem Wind lässt sich nach zwei zu Grunde liegenden Prinzipien einteilen:

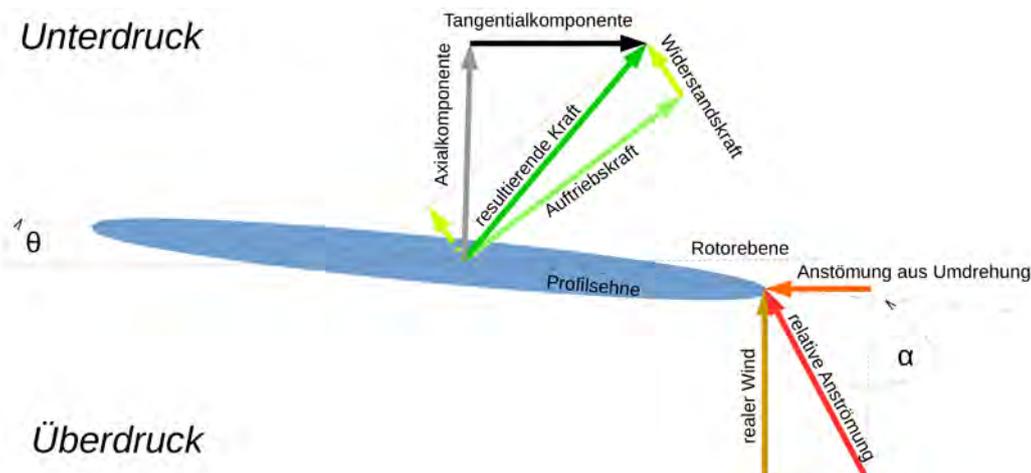
Ein im Wind befindlicher Gegenstand erfährt eine Widerstandskraft abhängig von der Windgeschwindigkeit  $u$ , der Projektionsfläche im Wind  $A$ , sowie seines Widerstandswerts  $c_W$ .

Das häufig zur Messung der Windgeschwindigkeit verwendete Schalenkreuzanemometer beruht auf diesem *Widerstandsprinzip*.

Moderne Windkraftanlagen arbeiten in erster Linie jedoch fast ausschließlich mit dem zweiten, dem *Auftriebsprinzip*: Dafür entscheidend ist der durch asymmetrisch geformte Körper (Profile) erzwungene Druckunterschied zwischen Vorder- und Rückseite, also dem Wind zu- (Luv) und abgewandter (Lee) Seite (s. Abbildung 3.2).

Auf Seiten der Anlage bestimmt hier maßgeblich der Auftriebsbeiwert  $c_A$  die Auftriebskraft, deren tangential Komponente den Rotor in Drehung versetzt. Diese Komponente verän-

dert sich je nach Größe von  $\alpha$ , dem Anströmwinkel zwischen Profilebene und der relativen Anströmung des Rotorblatts, welche wiederum aus dem realen Wind und der Anströmung aus der Umdrehungsgeschwindigkeit  $u_R$  resultiert. Das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten wird als *Schnelllaufzahl*  $\lambda = \frac{u_R}{u}$  ausgedrückt und ist ein Kriterium für die Einteilung unterschiedlicher Bauformen von Rotoren (s. Abbildung 3.3a).



**Abb. 3.2:** Auftriebsprinzip: Geschwindigkeiten und Kräfte am Rotorblatt; eigene Darstellung nach [Quaschnig 2011]

Der letztlich für die Bewertung eines Rotors bzw. seines Vermögen, die kinetische Windenergie in mechanische Energie umzuwandeln entscheidende Leistungsbeiwert  $c_P$  wird üblicherweise als Polynom dritter Ordnung in Abhängigkeit von  $\lambda$  dargestellt (Abb 3.3b).

Während der maximal mögliche Leistungsbeiwert bei sog. Widerstandsläufern ca.  $c_{p,max} \approx 0,2$  beträgt, erreichen heute Auftriebsläufer Werte von  $c_{p,max} \approx 0,5$  [Quaschnig 2011, S. 253 f.].

Mit der Größe der Anlage sinkt tendenziell auch der Leistungsbeiwert, da sich z. B. Fehler im Profil stärker auswirken [Hübner u. a. 2010].

### 3.2 Technische Realisierung von kleinen Windenergieanlagen

Im Folgenden soll ein Überblick über die wichtigsten technischen Komponenten erfolgen, die für den sicheren Betrieb einer KWEA notwendig sind.

Obwohl KWEA - wie alle anderen regenerativen Energiesysteme auch - an netzfernen Standorten für den Betrieb eines Inselnetzes genutzt werden können, wird sich hier auf Systemkonzepte für den Netzparallelbetrieb konzentriert, wie er in Deutschland auf Grund der vorhandenen Infrastruktur und der tageszeit- und witterungsunabhängigen Nachfrage nach elektri-

scher Energie - abgesehen von mobilen Anwendungen wie z. B. im maritimen Bereich oder beim Camping - der Normalfall ist<sup>3</sup>.

### Rotorformen

Während nahezu alle großen WEA weltweit eine horizontale Achse mit zumeist drei Rotorblättern besitzen, gibt es im Segment der KWEA eine größere Konzeptvielfalt. Neben horizontalachsigen Anlagen (HAWT - *horizontal axis wind turbine*) mit zwei bis acht oder mehr Rotorblättern gibt es eine größere Anzahl vertikalachsiger Anlagenkonzepte (VAWT) [Franken 2013, S. 189 ff.]. Abbildung 3.3a zeigt eine Systematik von Rotorbauformen anhand aerodynamischer und konstruktiver Merkmale.

Bei VAWT steht der Rotor zu jedem Zeitpunkt sowohl in Luv als auch im Lee. Dies ist ein konzeptioneller Nachteil gegenüber HAWT und führt zu einem verminderten Leistungsbeiwert von  $c_{p,max} \approx 0,42$  etwa für Darrieus-Rotoren [Hau 2014, S. 164].

Die Notwendigkeit einer Windnachführung entfällt jedoch gänzlich, und die für HAWT äußerst ungünstige Schräganströmung kann bei einem Darrieus- bzw. H-Rotor sogar zu einer Leistungssteigerung führen [Mertens u. a. 2003]. An Standorten mit turbulenten Bedingungen wie z. B. im städtischen Bereich sind VAWT deshalb eher im Vorteil [Twele 2013].

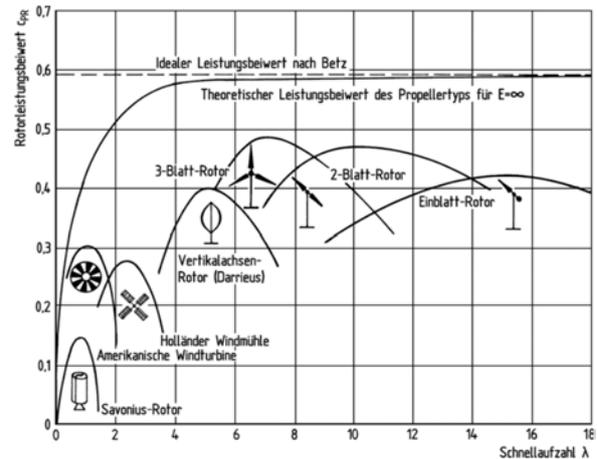
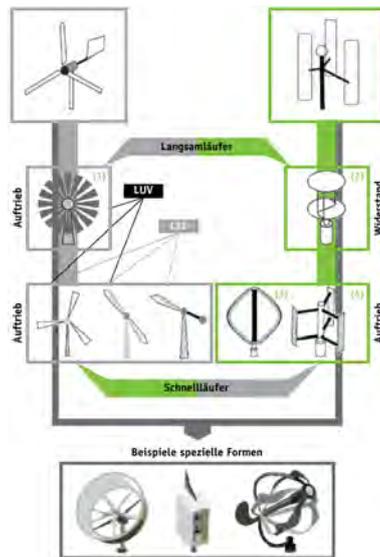
Weiterhin ist die optimale Schnelllaufzahl  $\lambda_{opt} = \lambda(c_{p,max}) \approx 5$  ungefähr halb so groß wie bei vergleichbaren HAWT-Anlagen, was eine geringere Blattspitzengeschwindigkeit und damit geringere Geräuschemissionen zur Folge hat [Hübner u. a. 2010]. Die langsamere Drehung erfordert jedoch wiederum ein höheres Drehmoment für die Erzeugung der selben Leistung, und das daraus resultierende höhere Gewicht der Anlage schlägt sich in den höheren spezifischen Kosten pro kW Leistung nieder. Allerdings ist die Möglichkeit zur Unterbringung schwerer Komponenten wie Generator und ggf. Getriebe am Fuß des Masts für Installation und Wartung von Vorteil [Hau 2014, S. 164].

### Windrichtungsnachführung

Die Nachführung von (Luv-)HAWT übernimmt im kleinen Leistungsbereich fast immer eine Windfahne [Halbhuber 2009]. Andere Konzepte sind Hilfsräder oder - wie bei Großanlagen - Azimutmotoren [Heier 2009, S. 59 f.].

---

<sup>3</sup>Demgegenüber ist in weiten Teilen der Welt der Inselbetrieb üblich, wobei je nach zu versorgender Last unterschiedliche Anforderungen an die eingesetzte KWEA-Anlage gestellt werden müssen, siehe hierzu z. B. [Heier 2007], [Gipe 2009] oder [Halbhuber 2009].



(a) Systematik; 1)Westernmill 2)Savonius- 3)Darrieus- 4)H-Rotor [Twele 2013]

(b) Konstruktionsbedingter maximaler Leistungsbeiwert in Abhängigkeit der Schnelllaufzahl [Hau 2014]

**Abb. 3.3:** Rotorbauformen - Systematik (a) und Leistungsbeiwert (b)

### Mechanisch-Elektrischer Triebstrang

Der auf den Rotor folgende Teil der Anlage dient primär der Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie, sowie außerdem der Regelung und Leistungsbegrenzung zum Schutz der Anlage, nachgeschalteter Komponenten und der Umgebung.

### Getriebe

Als kosten-, wartungs- und auch geräuschintensive Bauteile kommen Getriebe in Anlagen mit einer Leistung bis zu einigen kW kaum vor. Dies wird durch größere Rotordrehzahlen bei kleinerem Durchmesser sowie durch den Einsatz vielpoliger Generatoren ermöglicht [Gipe 2009].

### Generatortypen

**Permanenterregte Synchrongeneratoren** Als Generatoren kommen in KWEA hauptsächlich permanenterregte Synchrongeneratoren (PMSG) zum Einsatz. Varianten sind *inside-out*-Designs [ebd.] oder Scheibenläufergeneratoren [Halbhuber 2009].

Die Regelung erfolgt bei PMSG über indirekte Netzkopplung: Die Frequenz des Drehfelds im Stator wird mittels Gleichstromzwischenkreis und Frequenzumrichter variiert, wodurch bei  $u < u_{Nenn}$  (s. Abbildung 3.4) eine optimierte Leistungsabgabe ermöglicht bzw. bei Errei-

chen der Nennwindgeschwindigkeit  $u_{Nenn}$  die Drehzahl durch Generatorkurzschluss konstant gehalten und somit die Stall-Regelung (s.u.) genutzt wird [Hau 2014, S. 420].

**Direkt-gekoppelte Asynchrongeneratoren** Bei Anlagen mit einer Leistung von einigen zehn kW werden auch direkt-gekoppelte Asynchrongeneratoren verwendet. Insofern sind diese Anlagen mit frühen WEA nach dem sogenannten *Dänischen Konzept* vergleichbar und wie diese relativ robust und durch den variablen Schlupf zur gedämpften Aufnahme von starken Böen in der Lage bzw. ebenfalls Stall-geregelt. Für diese Ausführung ist jedoch immer ein gegenüber der Rotorleistung überdimensionierter Generator nötig [Halbhuber 2009].

### Leistungsregelung

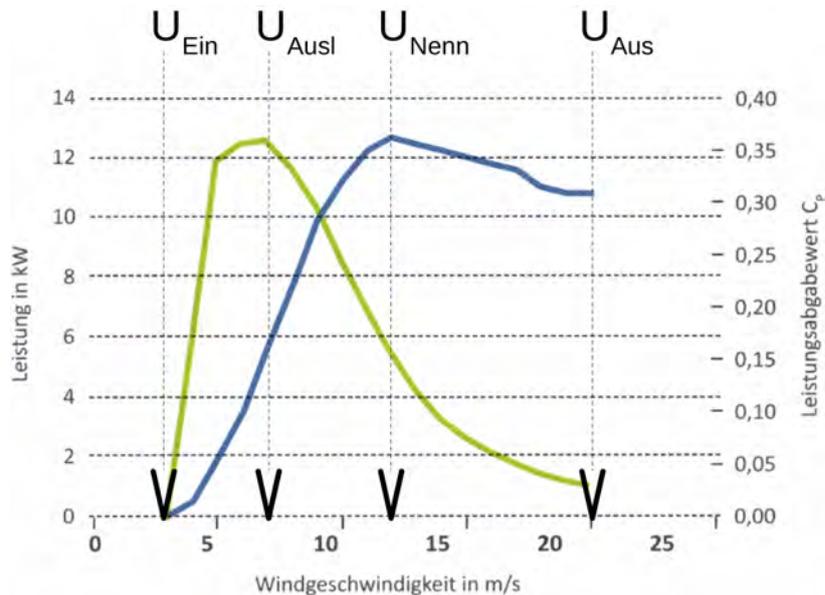
Einrichtungen zur Leistungsregelung dienen einerseits der Sicherheit und dem Schutz der Anlage, da bei Überschreiten derjenigen Windgeschwindigkeit, bei der der Generator seine maximale Dauerleistung erreicht (in der Regel bei Nennleistung  $P_{Nenn}$ ), eine weitere Drehmomenterhöhung sicher verhindert werden muss. Andererseits wird teilweise auch bei KWEA eine Anpassung der Drehzahl im Teillastbereich vorgenommen, um die Leistungsentnahme zu optimieren.

### Aerodynamische Leistungsbegrenzung

**passiv Stall** Die einfachste - und daher bei KWEA am häufigsten verwendete - Art der Leistungsbegrenzung funktioniert nach dem (passiven) *Stall-Effekt*. Voraussetzung ist die Möglichkeit, die Drehzahl des Generators und damit des Rotors konstant zu halten. Dadurch wird bei zunehmendem  $u$  der Anströmwinkel  $\alpha$  größer (s. Abbildung 3.2), die im Idealfall bei  $u_{Nenn}$  laminare Strömung reißt ab und der Rotor wird aerodynamisch gebremst [Hau 2014, S. 111]. Dieses Verfahren ist robust und einfach, resultiert allerdings in einer verringerten Leistung oberhalb von  $u_{Nenn}$  (s. blaue Kurve in Abbildung 3.4).

Bei Netzausfall oder Fehlern in der Elektronik ist außerdem vor allem in größeren Anlagen durch eine zweite, unabhängige Leistungsbegrenzung sicherzustellen, dass die Anlage bei hohen Windgeschwindigkeiten nicht außer Kontrolle gerät, sich selbst zerstört und die Umgebung gefährdet.

**passiv Pitch** Hierbei werden die Rotorblätter einzeln oder gemeinsam durch entsprechend ausgelegte Federmechanik mittels Fliehkraft in den Wind gedreht: Der Blatteinstellwinkel  $\theta$  wird größer, der Anströmwinkel  $\alpha$  wird kleiner, die relative Anströmgeschwindigkeit und damit die Leistungsabgabe sinken [Halbhuber 2009].



**Abb. 3.4:** Leistungskurve (blau, linke Ordinate) und Leistungsbeiwertkurve (grün, rechte Ordinate) einer Stall-geregelten KWEA [Franken 2013]: Die Nennleistung  $P_{Nenn}$  beträgt ca. 12,5 kW. Zusätzlich eingetragen sind die entsprechende Windgeschwindigkeit  $u_{Nenn}$  ( $\approx 12 \frac{m}{s}$ ), die Einschaltgeschwindigkeit  $u_{Ein}$ , die Auslegungsgeschwindigkeit  $u_{Ausl}$  bei maximalem Leistungsbeiwert  $c_{p,max}$  sowie die Ausschaltgeschwindigkeit  $u_{Aus}$ .

**activ Pitch** Dieses bei modernen Großanlagen übliche Verfahren wurde inzwischen auch in KWEA umgesetzt [Gipe 2009]. Hierbei geschieht die Vergrößerung des Blatteinstellwinkels bis hin zur sog. Fahnenstellung elektrisch oder hydraulisch und ist entsprechend aufwändiger. Allerdings lässt sich somit die Leistungsabgabe insbesondere oberhalb von  $u_{Nenn}$  konstant halten [Hau 2014, S. 111].

**Aus-dem-Wind-Drehen** Da die Leistung auch von der Angriffsfläche im Wind abhängt, lässt sich weiterhin eine wirksame Leistungsbegrenzung durch deren Verringerung realisieren. Dies geschieht durch Druck (evtl. auf eine entsprechend ausgelegte zweite, querstehende Fahne), wodurch der Rotor entweder seitlich um eine Gierachse aus der direkten Windrichtung gelenkt wird, oder durch ein Federglenk, welches die Anlage nach oben in die sog. Helikopterstellung kippen lässt [Halbhuber 2009].

### Leistungselektronik

Die Ausgangsspannung der Anlage muss für den Netzparallelbetrieb den Kriterien entsprechen, die ein Zuschalten erlauben (bzgl. Amplitude, Frequenz und Phasenlage). Für maximalen Ertrag ist außerdem eine Lastregelung im Sinne eines *maximum power point* (MPP) *tracking* wünschenswert. Die Anforderung an Wechselrichter mit MPP-Technik für KWEA

unterscheidet sich allerdings grundlegend von solchen für Photovoltaikanlagen: Während letztere mit Leistungsschwankungen im Minutenbereich auf Grund von Einstrahlungsänderung umgehen müssen, kann sich die drehzahlabhängige Spannung und damit die Leistungsabgabe einer KWEA bei starken Böen in wenigen Sekunden oder schneller um ein Vielfaches erhöhen [Hallenga 2010]. Ist das MPP-Technik nicht entsprechend ausgelegt wird potenziell verstrombare Energie verschenkt.

Letztlich ist für die optimale Anpassung die Kenntnis der Anlagenkennlinie und der momentanen Windgeschwindigkeit notwendig, wobei es auch weniger aufwändige und entsprechend weniger effiziente Trackingverfahren gibt [Halbhuber 2009].

Eine weitere Aufgabe für die Steuerung ist zu verhindern, dass die Anlage etwa bei Wartungsarbeiten im Ortsnetz mit vorheriger Trennung vom Verbundnetz ein temporäres Inselnetz erzeugt. Dies erfolgt mittels sog. *Einrichtung zur Netzüberwachung mit zugeordneten Schaltorganen* (ENS). Auch Systeme zum Zu- oder Abschalten von Batteriespeichern und Heizwiderständen können Bestandteil der Steuerung sein [ebd.].

### **Mast und Montage**

Rotor und - zumindest im Fall von HAWT - Generator werden mittels Mast in der geplanten Höhe positioniert. Hierbei ist zu beachten, dass typische Drehzahlen von KWEA im Bereich der Eigenfrequenz eines Mastes liegen und somit durch Resonanz hohe dynamische Belastungen auftreten können. Zur Vermeidung dessen ist neben größeren Rohrdurchmessern eine Gitter- oder auch z. B. Holzbauweise möglich [Hübner u. a. 2010]. Die Montage auf Hallen- oder Hausdächern erfordert besondere Aufmerksamkeit bei der Planung, da die Struktur in den seltensten Fällen für derartige Anwendungen ausgelegt sein dürfte und daher im Einzelfall die Möglichkeiten genau geprüft werden sollten. Abbildung 3.5 zeigt exemplarisch eine solche Installation.

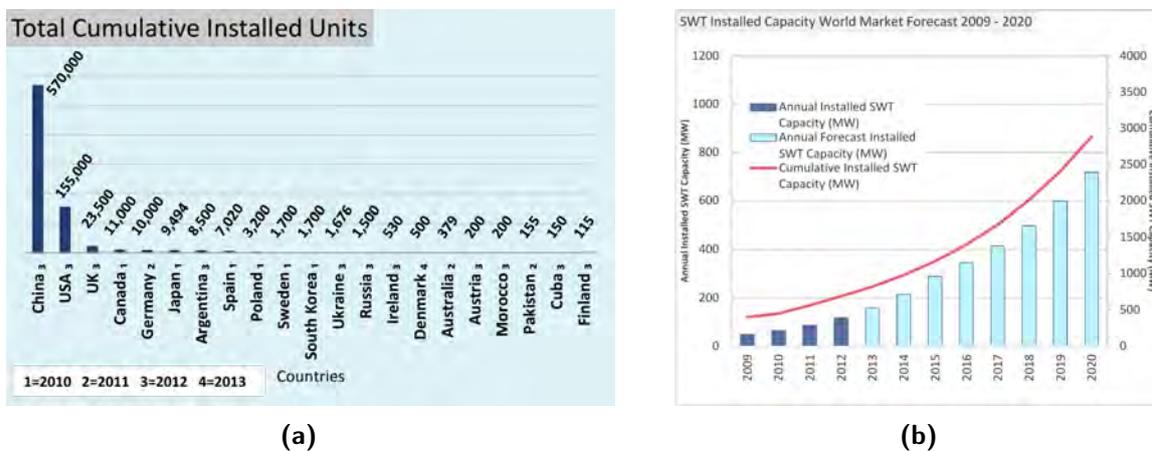
### **3.3 Marktanalyse und Kostenübersicht**

Die Kosten für KWEA variieren deutlich stärker als bei Großanlagen. Während für letztere durch Förderung in den vergangenen zwei Jahrzehnten der Entwicklungszyklus vorangetrieben und die spezifischen Investitionskosten bei gleichzeitiger Leistungs- und Wirkungsgradsteigerung auf ca. 800 € bis 1000 € pro kW Nennleistung gesenkt werden konnten [Hau 2014, S. 878], unterscheidet sich die Situation bei kleinen Anlagen deutlich. Verschiedene Kostenstudien kommen pro kW auf Werte zwischen 1060 € bis 10 000 € [Franken 2013; Hain 2014; Halbhuber 2009], wobei jeweils zu beachten ist, welche Komponenten neben Rotor und Generator noch enthalten sind. Es ist langfristig durchaus mit einer Senkung der Kosten durch steigende Produktionszahlen auf Grund der weltweiten Nachfrage zu rechnen. Allerdings sei



**Abb. 3.5:** Beispiel einer Montage auf einem Flachdach: Anbindung an die oberste Geschosdecke mittels Stahlträgern [Bolsius 2014]

auch hier wieder auf die große Anlagenvielfalt hingewiesen, die einen Vergleich bezüglich Kosten und Ertrag erschwert. Eine mögliche Abhilfe schaffen könnte hier eine Vereinheitlichung und die Umsetzung von Zertifizierungsverfahren, wie z. B. dem des IEC [Franken 2013]. Abbildung 3.6 zeigt den weltweiten Stand des Ausbaus von KWEA sowie eine deutliche Prognose für die kommenden Jahre.



**Abb. 3.6:** Existierende Anlagen nach Ländern (a) und Marktprognose der installierten Leistung (b) von KWEA weltweit [Gsänger 2014]

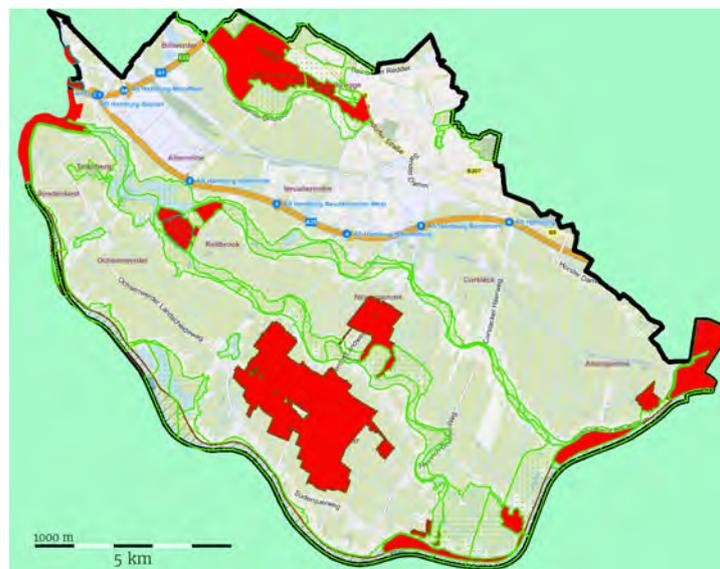
### 3.4 Rechtliche Aspekte

KWEA mit Netzanschluss fallen in Deutschland unter das sog. *Erneuerbare Energien Gesetz* (EEG). Dies betrifft neben der für einen festgelegten Zeitraum von derzeit 20 Jahren garantierten Vergütung der eingespeisten Strommenge (s. Abschnitt 4.3) vor allem die Anschluss-

und Abnahmegarantie durch Ortsnetzbetreiberfirmen. Daneben gibt es weitere für Installation und Betrieb von KWEA relevante Rechtsnormen.

Nach Hamburger Bauordnung (HBauO) gibt es - im Gegensatz zu vielen anderen Bundesländern - für KWEA keine Genehmigungsfreistellung. Nach § 60 HBauO gibt es jedoch eine Verfahrensfreistellung für Anlagen zur technischen Gebäudeausrüstung nach Anlage I Nr. 2.3., sowie für Anlagen zur öffentlichen Stromversorgung nach Nr. 3.2. Ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren kann gem. § 61 I Nr. 1 & 2 HBauO zur Anwendung kommen. Das Genehmigungsverfahren hat eine Konzentrationswirkung (§§ 72 I 1 & 62 HBauO). Die Festlegung der Abstandsfläche erfolgt in § 6 V HBauO.

Auf bundesrechtlicher Ebene muss ein Vorhaben besonders in Hinblick auf §§ 29 - 38 Baugesetzbuch (BauGB), ggf. auch nach dem Immissionsschutzgesetz (BImSchG), dem Naturschutz- und dem Straßenrecht und Denkmalschutzgesetz geprüft werden. Abbildung 3.7 zeigt die Lage der hiernach für den Einsatz von KWEA in Bergedorf grundsätzlich ausgeschlossen Gebiete [Fest 2013].



**Abb. 3.7:** Landschafts- (grün) und Naturschutzgebiete (rot) im Bezirk Bergedorf [LBGV 2016b]

Kommen KWEA in bebautem Gebiet zum Einsatz, können sie als Nebenanlage nach § 14 I Nr. 1 Baunutzungsverordnung gewertet werden [ebd.]. Hier kann jedoch eine Unzulässigkeit durch die von hoher Grundstückszahl und dichter Bebauung geprägte Eigenart des Gebiets gegeben sein<sup>4</sup>.

Auf Grund der Seltenheit von KWEA gegenüber großen Anlagen kann es bei Genehmigungsbehörden mangelnde Erfahrung mit Normen und Rechtsprechung geben. Dieser sollte im

<sup>4</sup>Urteil Bundesverwaltungsgericht 4 C 18.81

Zweifel mit frühest möglicher Kontaktaufnahme und Transparenz des Vorhabens begegnet werden [Fest 2013].

### 3.5 Akzeptanz und Umwelt

Wie für jede Technologie ist auch für den Erfolg von KWEA die Akzeptanz und die daraus resultierende Nutzung und positive kommunikative Verbreitung ein entscheidender Faktor [Hübner u. a. 2015]. Da Akzeptanz auch durch die Verbreitung von Wissen über vorhandene und nicht vorhandene Einflüsse auf die Umwelt gefördert werden kann, werden diese beiden Bereiche im Folgenden gemeinsam betrachtet.

#### Akzeptanz

WEA sind seit längerem Gegenstand öffentlicher Diskussionen, hauptsächlich in Bezug auf ihren Einfluss auf das Landschaftsbild, Risiken für bestimmte Tierarten und Belastungen durch visuelle und akustische Effekte [Scholz 2014].

In einer Pilotstudie im Auftrag des BMU wurde die Akzeptanz und Umweltverträglichkeit vertikaler Windenergieanlagen untersucht [Fehrenbach 2009; Hübner u. a. 2010]. Da es sich hierbei ausschließlich um KWEA handelt, können die Ergebnisse zumindest in weiten Teilen diesbezüglich verallgemeinert und daher auch auf kleine Horizontalanlagen bezogen werden. Eine weitere Untersuchung zur Akzeptanz fand außerdem an der Hochschule Zittau/Görlitz statt<sup>5</sup> [Scholz 2014].

Die Frage nach der Akzeptanz lässt sich grob teilen in diejenige durch anwendende und andere betroffene Personen.

Für erstere stellt [Hübner u. a. 2010] fest, dass eine ansprechende Anlagengestaltung - neben wirtschaftlichen Aspekten - eine wichtige Voraussetzung für die Anschaffung ist.

Vom Einsatz von KWEA betroffene Personen erwarten zu 17 % negative Auswirkungen bei weiterem Ausbau in ihrer Umgebung, 31 % rechnen mit positiven Auswirkungen. Als bevorzugte Installationsorte werden Gewerbegebiete von 93 % befürwortet, öffentliche Einrichtung von 68 % und Freiflächen und Parkplätze von 45 % [Scholz 2014].

Neben der Einhaltung geltender Immissionswerte kann vor allem eine frühzeitige Beteiligung aller Betroffenen zur Akzeptanz eines KWEA-Projekts führen. Wichtig ist hierbei, dass neben Transparenz bezüglich der Ziele und Probleme auch eine echte Möglichkeit zur Einbringung von Bedenken und Ideen zu ihrer Verminderung vorhanden ist und diese nicht voreilig verworfen werden [Hübner u. a. 2015].

---

<sup>5</sup>Diese Studie ist nicht repräsentativ, wird jedoch aus Mangel an Alternativen an dieser Stelle erwähnt

### Umweltverträglichkeit

Bedenken bezüglich der Umweltverträglichkeit von KWEA lassen sich in solche mit und ohne Standortbezug einteilen. Für erstere denkbar sind im Falle von KWEA z. B.

- Emission von Schall,
- mechanische Bewegung,
- Flächeneingriff, -umwandlung, -versiegelung,
- optische Einflüsse
- sowie Auswirkungen durch Betriebsstörungen, Unfallrisiken, etc.

**Schallemission** Die von KWEA erzeugten Schallemissionen lassen sich in zwei Bereiche unterscheiden. Zum einen sind dies die durch Drehung der Rotorblätter erzeugten Luftschallwellen, zum anderen die als Körperschall auf z. B. als Aufstellungsort dienende Gebäude übertragenen Schwingungen. Erstere sind auf Grund der geringen Größe der Anlage und der Tatsache, dass ein Auftreten mit einer gewissen Windgeschwindigkeit und diese wiederum selbst mit einem gewissen akustischen Pegel verbunden ist, im Prinzip zu vernachlässigen [Fehrenbach 2009]. Nach [VDI 2002] können die Emissionen solcher Anlagen als unkritisch betrachtet werden, deren Rotordurchmesser weniger als 3 m beträgt. Die Problematik des Körperschalls hingegen ist besonders bei Wohngebäuden als Aufstellungsort zu beachten, da hier bereits geringe Windgeschwindigkeiten zu einer als möglicherweise störend empfundenen Geräuschentwicklung führen können. Eine Möglichkeit der Vermeidung sind Systeme zur Schwingungsentkopplung [Halbhuber 2009].

**Mechanische Bewegung: Gefährdung von Vögeln und Fledermäusen** Nicht ausgeschlossen werden kann eine erhebliche Auswirkung von KWEA auf Fledermäuse [Hübner u. a. 2010]. Dies sollte daher Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Bis dahin sollte eine Anlage zumindest nicht in häufig frequentierten Flugschneisen von Fledermäusen betrieben werden oder den möglichen Gefahren durch entsprechende Maßnahmen - z. B. Abschalten während der Dämmerungsstunden oder Einhausung mit Gittern oder Netzen [Franken 2013] - begegnet werden.

**Flächeneingriff, -umwandlung, -versiegelung** Bei der Nutzung von Windkraftanlagen innerhalb von bebautem Gebiet ist eine negative Auswirkung durch den Flächenbedarf nicht zu erwarten. Wird für eine KWEA eine unbebaute Fläche genutzt, entstehen durch diesen Eingriff jedoch umweltrelevante Aspekte wie z. B. Abflussprobleme in Folge der Versiegelung.

Der *leistungsspezifische Flächenbedarf* ist hierbei mit geschätzt  $1 \frac{\text{m}^2}{\text{kW}}$  um ein Vielfaches größer als bei konventionellen Kraftwerken, deren Leistung auf wenigen Hektar in den Bereich von hunderten MW reicht [Fehrenbach 2009]. Für eine vollständige Betrachtung müssten zusätzlich allerdings ebenfalls die für Abbau und Transport der zum Betrieb benötigten Ressourcen, im Falle von Kernenergie zusätzlich bei Entsorgung entstehenden Flächeneingriffe, sowie außerdem der Bedarf an Netzinfrastruktur für die zentrale Stromerzeugung hinzugezogen werden. All dies entfällt bei einer dezentralen und nah am Ort des Bedarfs gelegenen regenerativen Energieumwandlung.

**Schattenwurf** Wie bei Großanlagen auch ist für KWEA die Faustformel zu beachten, nach der benachbarte Grundstücke nicht mehr als 30 Stunden pro Jahr und 30 Minuten am Tag vom Schattenwurf einer Anlage betroffen sein sollen [Franken 2013]. Im urbanen Bereich ist jedoch eine größere Anzahl an Standorten, etwa in Industrie und Gewerbegebieten, aber auch auf höheren Wohnhäusern denkbar, bei denen es kaum hiervon Betroffene geben dürfte.

### Umweltbilanz

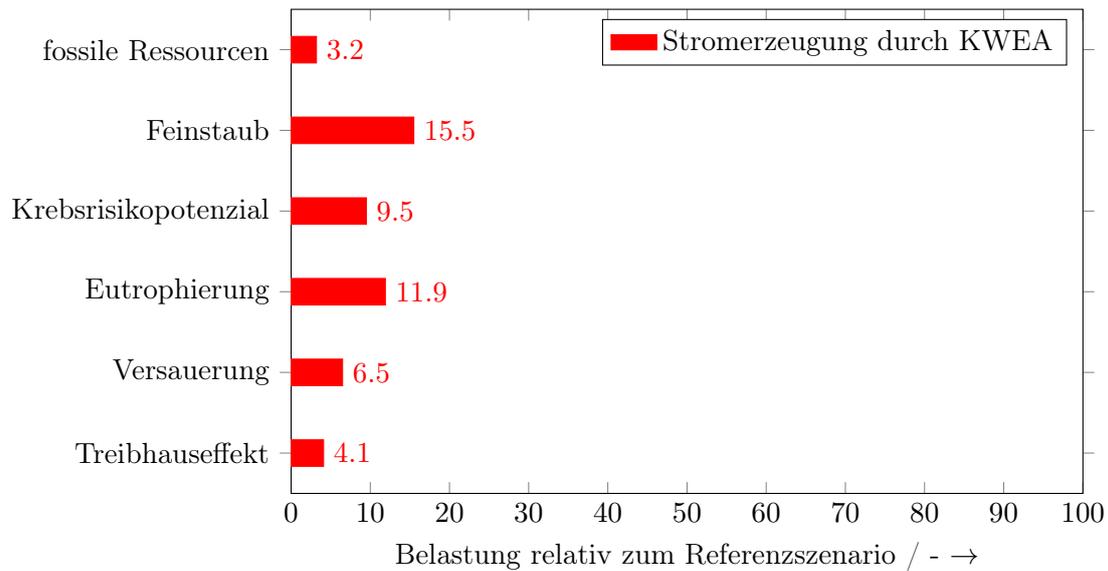
Neben standortbezogenen Umweltverträglichkeitsaspekten lässt sich der von KWEA erzeugte Strom einer Bilanzierung im Hinblick auf die hiermit während des gesamten Lebenszyklus der Anlage verbundene Freisetzung diverser schädlicher Stoffe in die Umwelt unterziehen. Dabei ist im Kontext der Energiewende zur Reduzierung des anthropogenen Klimawandels vor allem die Emission von relevanten Treibhausgasen zu nennen. Abbildung 3.8 zeigt die Bilanz in Hinblick auf einige Wirkkategorien relativ zu den Werten des Referenzszenarios "Deutscher Strommix".

Eine genauere Betrachtung soll an dieser Stelle für die Kategorie *Treibhauseffekt* vorgenommen werden<sup>6</sup>: Die Stromerzeugung durch KWEA produziert eine Menge an CO<sub>2</sub>-Äquivalent (CO<sub>2</sub><sup>eq</sup>) von 36 g(CO<sub>2</sub><sup>eq</sup>)/kWh <sup>7</sup> [Fehrenbach 2009]. Damit liegt sie zumindest in der Nähe derjenigen großer Anlagen (onshore), deren Emission auf Werte von 13 g(CO<sub>2</sub><sup>eq</sup>)/kWh bis 31 g(CO<sub>2</sub><sup>eq</sup>)/kWh bilanzierbar ist [Kaltschmitt u. a. 2014, S. 532]. Im Vergleich dazu beträgt die Bilanz aus dem Strommix 630 g(CO<sub>2</sub><sup>eq</sup>)/kWh [Fehrenbach 2009].

---

<sup>6</sup>Die Bilanzierung erfolgte für eine vertikalachsig KWEA mit 5 kW Nennleistung und einer Volllaststundenzahl von 1524 h. Die Übertragung auf HAWT dürfte zu keinen höheren Werten führen, da der maßgebliche Materialaufwand hier eher geringer ist.

<sup>7</sup>bzw. 26 g(CO<sub>2</sub><sup>eq</sup>)/kWh bei einer Stahlrecycling-Quote von 85 % [Fehrenbach 2009]



**Abb. 3.8:** Umweltbilanz von durch KWEA erzeugtem Strom, aufgeteilt in verschiedene Wirkungskategorien - alle betrachteten Einflüsse liegen deutlich unterhalb derjenigen des Bezugs aus dem Strommix (jeweils 100 %); eigene Darstellung nach [Fehrenbach 2009]

### 3.6 Besonderheiten urbaner Windverhältnisse

Nach den allgemeinen Grundlagen soll nun auf die zu berücksichtigenden Besonderheiten der Windverhältnisse in urbanen Gebieten eingegangen und Schlussfolgerungen für den wirtschaftlichen Einsatz von KWEA in Bergedorf gezogen werden.

Die Installation in städtischem Umfeld bzw. auf hier bereits vorhandenen Gebäuden verspricht auf den ersten Blick scheinbar klare Vorteile [Balduzzi u. a. 2012b]:

- der Rotor kann auf dem Dach mit geringem baulichem Aufwand eine größere Höhe und so den Bereich potenziell höherer Windgeschwindigkeiten erreichen als auf freiem Feld
- die Stromerzeugung findet am Ort bzw. in direkter Nähe zum Verbrauch statt

Dem gegenüber stehen jedoch große Schwierigkeiten bei der Auswahl eines wirtschaftlich darstellbaren Standorts, welche durch die Besonderheiten der Strömungssituation bedingt und ein Grund dafür sind, dass zum jetzigen Zeitpunkt kaum KWEA in städtischen Gebieten zu finden sind.

Der Einfluss der Höhenstruktur der direkten Umgebung auf die entnehmbare Leistung sinkt mit der Größe der Anlage [Lubitz 2014] und steigt mit der Komplexität der lokalen Umgebung, weil die größere Rauigkeitslänge (s. Abschnitt 3.1, S. 13) neben einer Verringerung der mittleren Windgeschwindigkeit im Vergleich zu offenem Gelände auch zu deutlich mehr

Turbulenz führt - eine verhältnismäßig ungünstige Ausgangslage für den erfolgreichen Einsatz von KWEA.

**Begriffsklärung: Turbulenz im Kontext Windenergie** Trifft (laminare) Strömung auf ein Hindernis, entsteht Turbulenz, die sich als sog. *separation bubble* bis weit über und vor allem hinter die Hinderniskante erstreckt [Hau 2014, S. 566 ff.]. Abbildung 3.9 lässt erahnen, welche Komplexität die Windverhältnisse in der Realität einer dicht bebauten Umgebung aufweisen. Die oft geäußerte Aussage, die Ablösung der Turbulenz und der damit einhergehende optimale Abstand einer WEA hinter einem Gebäude betrage das Zwanzigfache seiner Höhe [Gipe 2009], ist nur bedingt richtig. Genauer betrachtet ist die Ausdehnung umgekehrt proportional zur Rauigkeit  $z_0$  [Mertens 2003].

Turbulenz bezeichnet hier den Anteil der Fluktuation  $u_B(t)$ , der die über längere Zeit  $t$  stetige Windgeschwindigkeit  $\bar{u}$  in alle Richtungen überlagert:

$$u(t) = \bar{u} + u_B(t) \quad (3.3)$$

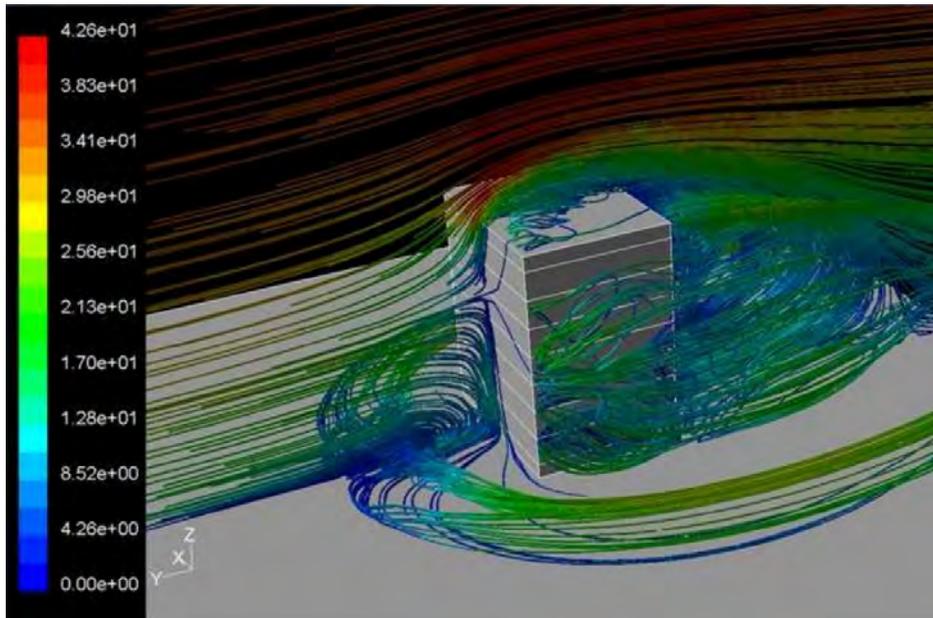
Die Turbulenz wird entsprechend dargestellt durch die Turbulenzintensität TI (oder  $\sigma_0$ ) als Verhältnis der Standardabweichung zum Mittelwert des Messintervalls [Gasch u. a. 2010, S. 136 f.]:

$$TI = \frac{\sigma_v}{\bar{u}} = \frac{\sqrt{u^2}}{\bar{u}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u(t) - \bar{u})^2 dt}}{\bar{u}} \quad (3.4)$$

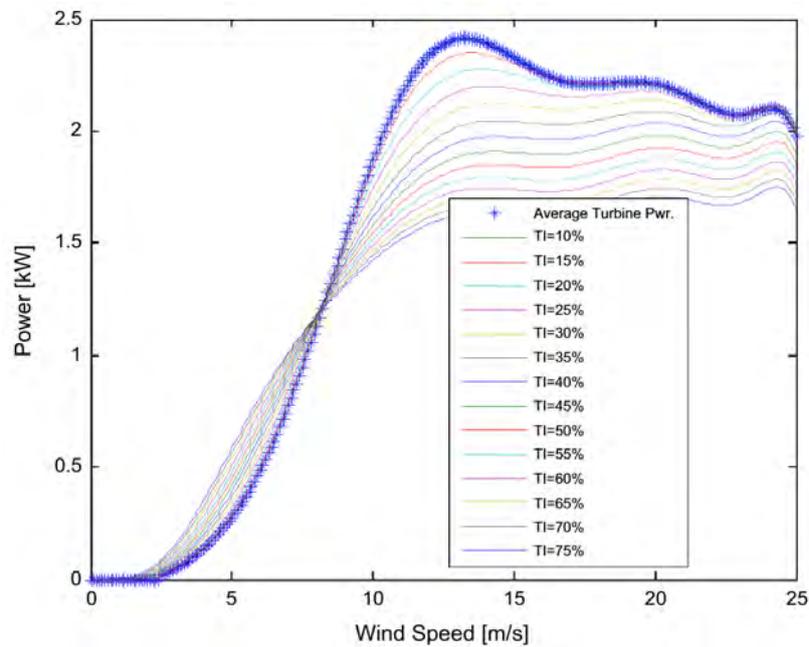
Auf die Leistung einer KWEA hat die Turbulenz unterschiedliche Effekte: Unterhalb einer gewissen Geschwindigkeit führen die turbulenten Anteile zu einem Leistungsanstieg, darüber zu einem deutlichen Abfall, z. B. auf Grund der Trägheit der Nachführmechanik [Sunderland 2013]. Abbildung 3.10 zeigt dieses Verhalten am Beispiel der Leistungsabgabe einer 2,4 kW-Anlage mit variierter Turbulenzintensität über einen weiten Geschwindigkeitsbereich.

### Methoden zur Abschätzung der Windgeschwindigkeit in urbanem Raum

Die speziellen strömungsmechanischen Verhältnisse in urbanem Gebiet sind seit längerem Gegenstand der Forschung - insbesondere allerdings in Hinblick auf Schadstoffverteilung und mit dem stadtplanerischen Ziel der Komforterrhöhung im städtischen Raum [Walker 2011]. Einerseits existieren analytische Modelle, die aufbauend auf dem in Abschnitt 3.1 vorgestellten boundary layer (BL) eine detailliertere Beschreibung liefern. Andererseits werden numerische Verfahren genutzt, um die Strömungsverhältnisse in Städten nachzuvollziehen. Im Folgenden werden sowohl analytische als auch numerische Betrachtungen erläutert.



**Abb. 3.9:** (CFD-)Simulation der Strömungsverhältnisse an Hindernissen (15 m Höhe)- Darstellung der Geschwindigkeit als farbige Linien von  $0 \frac{m}{s}$  (blau) bis  $4,3 \frac{m}{s}$  (rot), mtl. Windgeschwindigkeit  $\bar{u} = 2,4 \frac{m}{s}$  [Sáenz-Diez Muro 2010b]

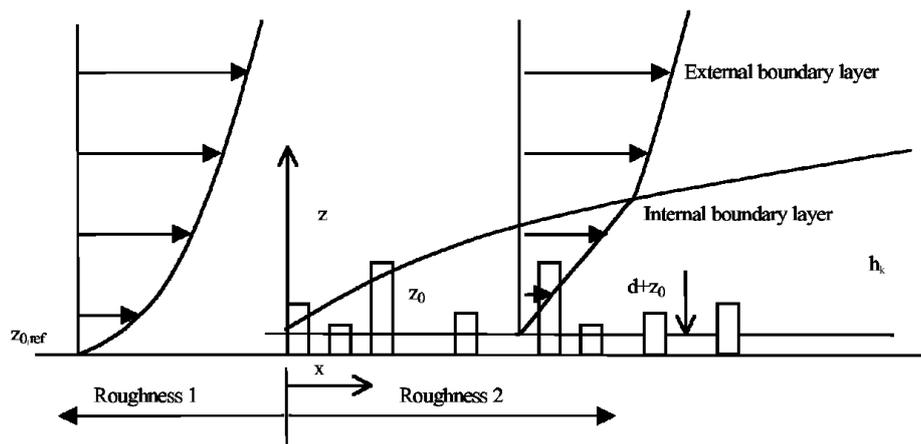


**Abb. 3.10:** Ergebnis einer hochauflösenden Messung der Leistung über der Windgeschwindigkeit mit Turbulenzintensitäten von  $TI = 0 \dots 75 \%$  [Sunderland 2013]

### Analytisch

Während viele Betrachtungen zumeist mit sehr groben Abschätzungen bezüglich der Rauigkeit von bebautem Gebiet Vorlieb nehmen (Einordnung entweder als “Stadt” oder als “Vorstadt”), ist für eine hinreichend aussagekräftige Prognose der Windgeschwindigkeit innerhalb der Stadt eine feinere Abstufung notwendig. Diese kann auf Messung, Berechnung oder Abschätzung der Hindernisgrößen basieren.

**urban boundary layer Modell** Der relativ plötzliche Anstieg der Rauigkeit am Übergang von offenem Land zur Stadt führt zur Ausbildung einer zusätzlichen atmosphärischen Schicht innerhalb des BL. Innerhalb dieser Schicht, des *urban boundary layer* (UBL), verhält sich der Wind nicht nach dem Grenzschichtprofil aus Gleichung (3.1); es kommt - resultierend aus dem Einschluss von Luftmassen zwischen den Gebäuden - zunächst zu einer von der Bebauung abhängigen vertikalen Verschiebung des Windgeschwindigkeitsprofils<sup>8</sup>, der *displacement height*  $d$  (s. Abbildung 3.11).



**Abb. 3.11:** Änderung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe  $z$  auf Grund einer plötzlichen Änderung der Geländerauhigkeit  $z_0$ , Ausbildung des urban boundary layer und der folgenden vertikalen Verschiebung  $d$  des Windgeschwindigkeitsprofils; [Mertens u. a. 2003]

Die Rauigkeit  $z_0$  an einem bestimmten Punkt kann nach [Mertens 2003] via

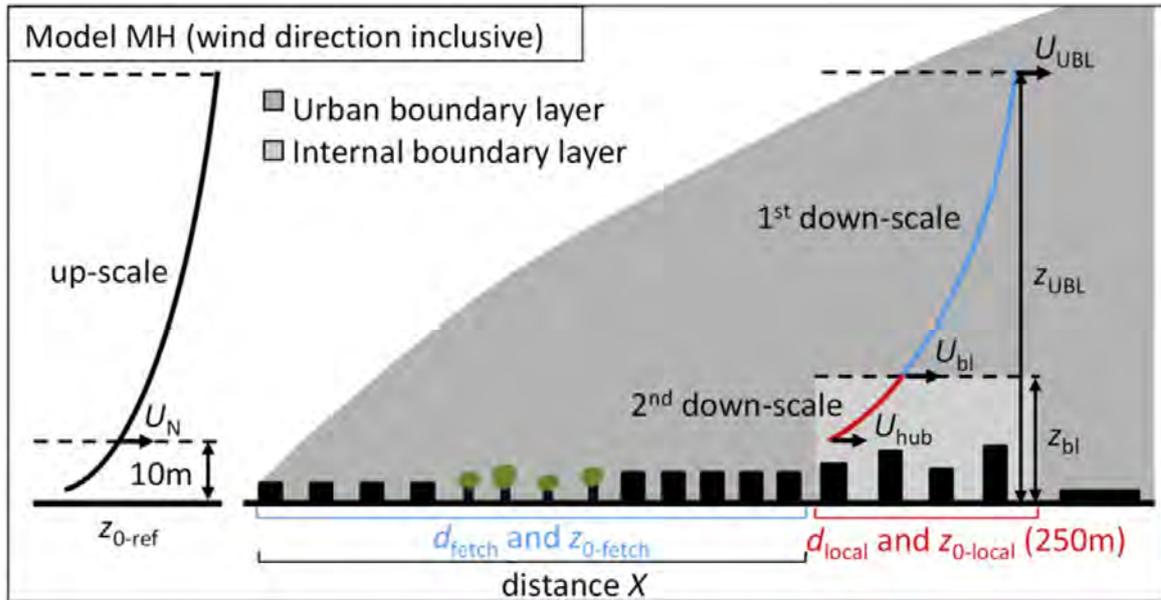
$$z_0 = 0,5 \cdot A_h \cdot h_m \quad (3.5)$$

durch den Anteil der von Gebäuden bedeckten Fläche  $A_h$  und der mittleren Gebäudehöhe  $h_m$  in diesem Gebiet beschrieben werden, wobei die Ränder dieses Gebiets vom betrach-

<sup>8</sup>für eine detailliertere Betrachtung der städtischen Atmosphäre s. [Hupfer 2005; Konow 2014]

teten Punkt aus mindestens den Abstand  $x \geq 10 \cdot h_m$  aufweisen sollten. Für die vertikale Verschiebung des Windgeschwindigkeitsprofils ergibt sich in diesem Fall

$$d \approx 0,75 \cdot h_m \quad (3.6)$$



**Abb. 3.12:** Modell nach Millward-Hopkins (MH): Schrittweise Anpassung der Windgeschwindigkeit an urbane Verhältnisse: Aufwärtsskalierung über freiem Feld bis auf Höhe des UBL (links), dann zweifache Reduktion zunächst auf Höhe BL, dann auf Nabenhöhe  $u_{hub}$  (rechts). Die mit *fetch* und *local* bezeichneten Parameter beziehen sich auf das Gebiet vom Rauigkeitsanstieg am Stadtrand (in Windrichtung) bis zur betrachteten Stelle bzw. auf die direkte Umgebung; [Mil.-Hop. 2013b]

Weitere Parameter finden Berücksichtigung im Model MH nach [Mil.-Hop. 2013b]. Abbildung 3.12 veranschaulicht das Vorgehen, nach welchem die Windgeschwindigkeit  $u(z)$  zunächst von einem Referenzpunkt mit Höhe  $z_{ref} = 10\text{ m}$ , der Rauigkeit  $z_{0-ref}$  und der Referenzwindgeschwindigkeit  $u_N = u_{ref}$  nach dem Modell der logarithmischen Grenzschicht (s. Gleichung (3.1)) auf die Höhe  $z_{UBL}$  skaliert wird:

$$u(z_{UBL}) = u_N \cdot \frac{\ln\left(\frac{z_{UBL}}{z_{0-ref}}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_{0-ref}}\right)} \quad (3.7a)$$

Von dort erfolgt eine zweifache Abwärts-Skalierung zunächst auf die *blending height*

$$z_{bl} = 2 \cdot h_m \quad (3.7b)$$

zu

$$u(z_{bl}) = u(z_{UBL}) \cdot \frac{\ln\left(\frac{z_{bl} - d_{fetch}}{z_0 - fetch}\right)}{\ln\left(\frac{z_{UBL} - d_{fetch}}{z_0 - fetch}\right)} \quad (3.7c)$$

Die mit *fetch* bezeichneten Parameter ergeben sich aus der Bebauung im Bereich vom Stadtrand bis zur nächsten - der lokalen - Skalierungsebene auf Nabenhöhe  $z_{hub}$ .

$$u(z_{hub}) = u(z_{bl}) \cdot \frac{\ln\left(\frac{z_{hub} - d_{local}}{z_0 - local}\right)}{\ln\left(\frac{z_{bl} - d_{local}}{z_0 - local}\right)} \quad (3.7d)$$

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass dieser Zusammenhang genau genommen nur für Höhen oberhalb einer weiteren Schicht, des sog. *canopy layer* (CL) gilt, der bis  $h_m$  reicht. Innerhalb des CL lässt sich das Windgeschwindkeitsprofil mittels eines exponentiellen Zusammenhangs beschreiben:

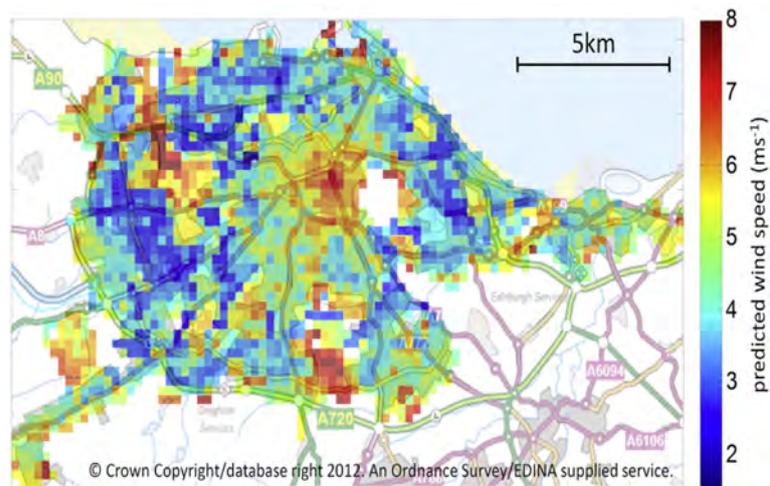
$$u(z_{CL}) = u(h_{m-local}) \cdot \exp\left(9,6 \cdot \lambda_f \cdot \frac{z_{hub}}{h_{m-local} - 1}\right) \quad (3.7e)$$

Hierbei ist  $u(h_{m-local})$  die nach Gleichung (3.7d) bestimmte Windgeschwindigkeit in der lokalen mittleren Hindernishöhe  $h_{m-local}$ .  $\lambda_f$  ist das dimensionslose Verhältnis der Fassadenfläche (in Windrichtung) zur betrachteten Erdoberfläche. Für städtische Bereiche kann für  $\lambda_f$  ein Wert zwischen 0,2 und 0,3 angenommen werden. Mit dem Parameter  $\sigma$  als Standardabweichung zu  $h_m$  existiert eine weitere Anpassung von Gleichung (3.7e) - seine Auswirkung kann jedoch als vergleichsweise gering betrachtet werden, weswegen er im folgenden Verlauf unberücksichtigt bleibt [Mil.-Hop. 2013b].

Weitere Quellen verwenden ebenfalls das Modell des UBL für eine flächendeckende Abschätzung des Windenergiepotentials. Hier wurden z. B. mehrere Ballungszentren in Großbritannien (GB) untersucht [Drew u. a. 2013].

### Numerisch

In den letzten Jahren gibt es vermehrt Untersuchungen mit dem Ziel der Ermittlung potenziell geeigneter Standorte für KWEA in urbanem Gebiet - dank verfügbarer Rechnerleistung



**Abb. 3.13:** Beispiel für eine großflächige Windgeschwindigkeitsabschätzung für den Raum Edinburgh (GB) auf Grundlage des UBL-Modells in  $250\text{ m}^2$ -Rastern [Mil.-Hop. 2013a]

verstärkt mittels sog. *computational fluid dynamics* (CFD), also numerischer Strömungsbe-  
rechnung. Hierbei werden zwei- oder dreidimensionale Gittermodelle einer zu untersuchenden  
Konfiguration erzeugt und die Strömungsverhältnisse dazwischen basierend auf einem ma-  
thematischen Modell diskret mittels z. B. Finiter-Volumen-Methode approximiert. Abbildung  
3.9 (S. 29) z. B. ist das Ergebnis einer solchen CFD-Simulation.

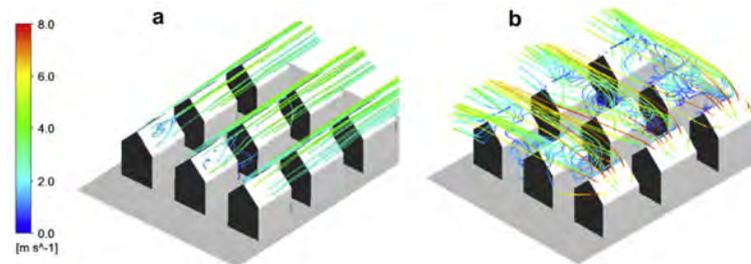
Numerische Berechnungen liefern zwar potenziell deutlich exaktere Ergebnisse als analytische  
Methoden, diese hängen jedoch maßgeblich vom Aufwand bei der Erstellung des Gitters ab  
und sind entsprechend zeit- und kostenintensiv. Aus den erwähnten allgemeinen Untersu-  
chungen lassen sich dennoch wertvolle Hinweise u.a. bezüglich der optimalen Positionierung  
von KWEA gewinnen:

- **Installationshöhe:** Bei einer zentral auf einem Dach installierten WEA sollten die  
Blattspitzen nicht niedriger als 25 % der Gebäudehöhe über dem Dach liegen, bei  
gleichzeitig max. 20 % der Gebäudehöhe betragendem Rotordurchmesser (im Gegensatz  
dazu nennt [Mertens 2003] für die Nabenhöhe über dem Dach 25 % der Gebäudehöhe)  
[Bussel 2013].

Beispiel: Das höchste Gebäude in Bergedorf ist ein 18-stöckiges Wohnhaus  
im nördlichen Stadtteil Lohbrügge [LBGV 2016a]. Bei einer aus einer ge-  
schätzten Geschosshöhe von 3 m resultierenden Gesamthöhe von 54 m und  
einem Rotordurchmesser von 5 m ergibt sich demnach eine Nabenhöhe von  
16 m über dem Dach.

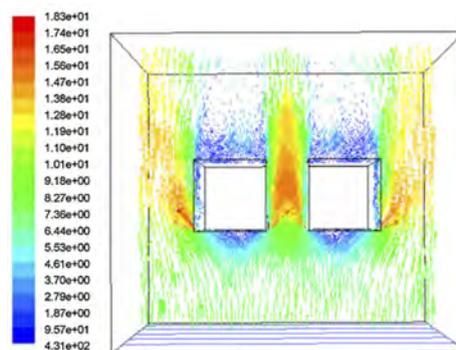
- **Anströmwinkel:** Die Anströmung eines typischen Giebeldachs erzeugt um so weniger

Turbulenzen, desto giebelständiger sie erfolgt (s. Abbildung 3.14). Entsprechend sind solche Dächer eher geeignet, deren Giebel an der vorherrschenden Hauptwindrichtung orientiert ist.



**Abb. 3.14:** Simulierte Strömungslinien bei (a) giebelständiger Anströmung und (b) rechtwinklig dazu [Ledo u. a. 2011]

- **Rampeneffekt:** Ist dem Installationsgebäude in Hauptwindrichtung ein anderes Gebäude vorgelagert, entscheiden einerseits die Differenz deren Höhen zueinander sowie zu der durchschnittlichen Gebäudehöhe der Umgebung und außerdem der Winkel  $\beta$  zwischen den Dächern (bzw. der Abstand der beiden Lee-Dachkanten) über eine Leistungszunahme. Deren Maximum wurde bei  $\beta = 30^\circ \dots 40^\circ$  gefunden. In der selben Konfiguration kann eine leichte Dachschräge auf dem Installationsgebäude von ca.  $8^\circ$  ebenfalls die Leistung um einige Prozent steigern [Balduzzi 2012a].
- **Canyon-Effekt:** Die Strömungsgeschwindigkeit zwischen zwei relativ hohen Gebäuden kann stark zunehmen, bei gleichzeitig geringer Turbulenzintensität (s. Abbildung 3.15).



**Abb. 3.15:** Canyon-Effekt: Im Vergleich zum Vorfeld (grün) hohe Windgeschwindigkeiten (rot) zwischen den Gebäuden, Draufsicht [Ayhan u. a. 2012]

- **Formation:** Werden mehrere Anlagen in relativer Nähe zueinander aufgestellt ist die sog. *fish-schooling formation* vorteilhaft, bei welcher die Anlagen in zueinander versetz-

ten Reihen installiert werden. Nebeneinander stehende vertikalachsige Anlagen sollten außerdem optimalerweise gegenläufig betrieben werden [Tiju 2015].

- **Rotorposition** Tabelle 3.1 ist eine Zusammenfassung aus [Abohela u. a. 2013]. Es wurden 25 unterschiedliche Montagepositionen auf jeweils 6 Dachformen auf Leistungsdifferenz gegenüber der selben Höhe in Luv des Gebäudes miteinander verglichen. Es sei erwähnt, dass es sich hier um idealisierte Gebäudekonfigurationen handelt und die direkte Übertragung in eine reale Umgebung nicht möglich ist. Dennoch sei der Schluss erlaubt, dass es bei einer der idealen Dachform angenäherten Umgebung an ähnlicher Position ebenfalls eine Leistungszunahme geben dürfte.

**Tabelle 3.1:** Optimale Position des Rotors in Abhängigkeit von der Dachform nach [ebd.]

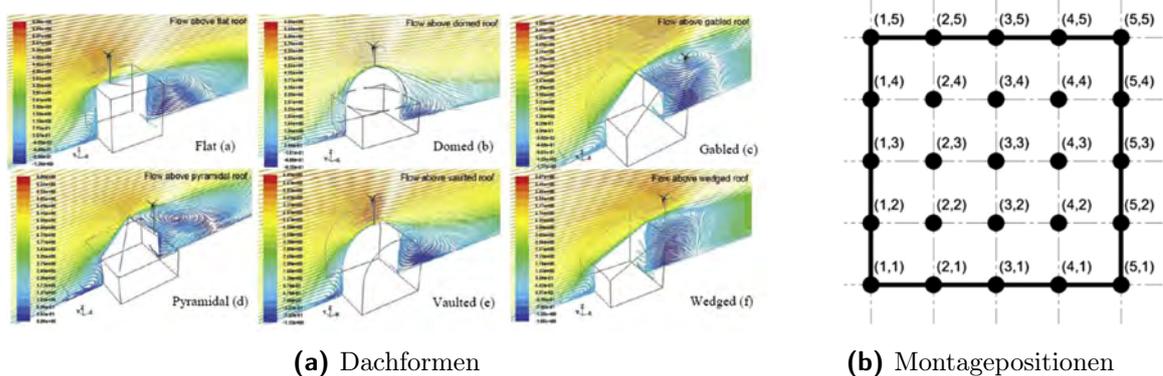
Dachform <sup>a</sup>	Position <sup>b</sup>	Höhe über Grund <sup>c</sup>	Leistungszunahme <sup>d</sup>
flach (flat)	2,3	1,45	31,3 %
Kuppel (domed)	3,3	1,30	40,5 %
Giebel (gabel)	5,1	1,60	15,8 %
pyramidal	2,3	1,45	31,3 %
gewölbt (vaulted)	3,3	1,30	56,1 %
schräg (wedged)	5,1	1,45	9,3 %

<sup>a</sup> nach Abbildung 3.16a

<sup>b</sup> nach Abbildung 3.16b

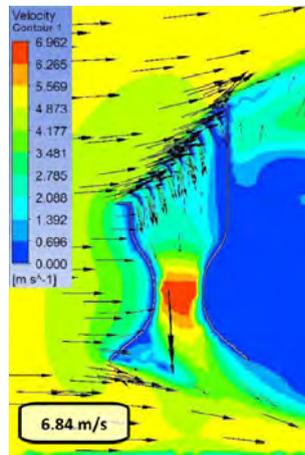
<sup>c</sup> rel. zu  $H =$  Quaderhöhe

<sup>d</sup> gegenüber dem laminaren, ungestörten Feld auf gleicher Höhe

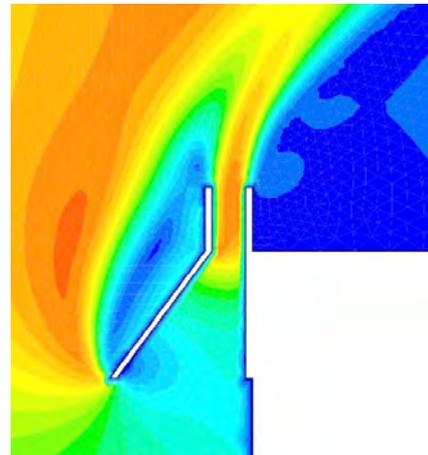


**Abb. 3.16:** CFD-Simulationsergebnisse der Umströmung unterschiedlicher Dachformen (a) und Erklärung der Positionen aus Tabelle 3.1 (b) [Abohela u. a. 2013]

- **Konzentratorwirkung:** Mittels einer geeigneten Kollektorinstallation kann die Windströmung konzentriert und beschleunigt werden (s. Abbildungen 3.17a und 3.17b). Eine nachgeschaltete KWEA kann hierdurch effizienter betrieben werden.



(a) Konzentratoreinsatz: Die zweidimensionale CFD-Simulation zeigt eine Steigerung der Windgeschwindigkeit um ca. 25 % gegenüber der freien Strömung [Ahmed 2013].



(b) Fassadenanströmung: Ein geeigneter Kollektor an der Fassadenkante kann die aufwärts gerichtete Strömung konzentrieren [Sáenz-Diez Muro 2010a].

**Abb. 3.17:** Beispiele für Konzentratorwirkung

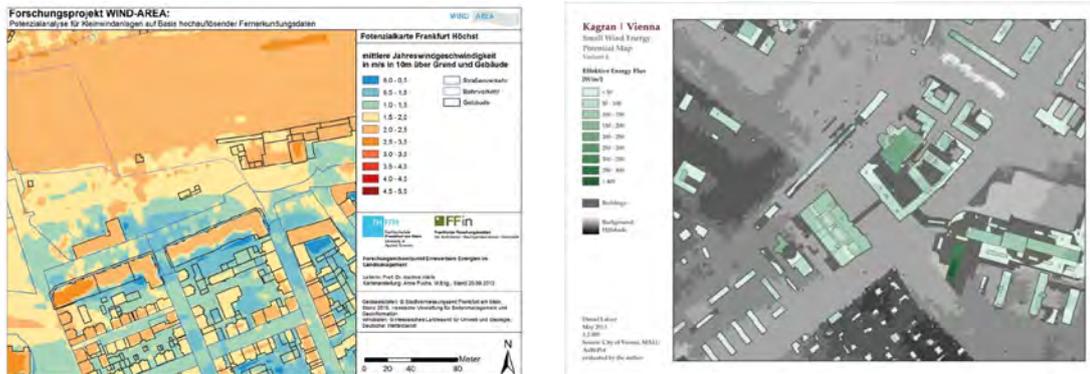
Die numerische Methode könnte in Zukunft an Bedeutung gewinnen, ist zum jetzigen Zeitpunkt jedoch aus Kostengründen für private Anwendungen kaum praktikabel. Für ein genaueres Verständnis der kleinräumigen Unterschiede in der Strömungssituation ist sie aber bereits sehr hilfreich.

### Potentialabschätzung unter Verwendung von Geoinformationsdaten

Sowohl für die numerische als auch für die analytische großflächige Abschätzung des urbanen Windkraftpotentials können künftig Daten aus Geoinformationssystemen (GIS) eine Rolle spielen. Für den Bereich der Solarenergie existieren bereits Anwendungen, die es interessierten Personen ermöglichen, z. B. das Potential auf dem eigenen Hausdach einzusehen. In Hamburg gibt es hierzu den Hamburger Solaratlas [HHEn 2012]. Die Datengrundlage ist das aus LiDAR<sup>9</sup>-Messungen erzeugte 3D-Stadtmodell, welches neben der genauen räumlichen Lage auch die Höhe und Dachform sämtlicher Gebäude im Stadtgebiet beinhaltet und regelmäßig aktualisiert wird. Vorhanden sind außerdem 2D-GIS-Datensätze auf Grundlage des

<sup>9</sup>LiDAR: light detection and ranging

Liegenschaftskatasters, in denen z. B. Nutzungsarten und Geschossanzahl sämtlicher Gebäude verzeichnet sind [LBGV 2016a].



(a) Wind-Area [Klärle u. a. 2014]

(b) SWEP v1.0 [Latzer 2013]

**Abb. 3.18:** Windkarten als Ergebnisse zweier unterschiedlicher Potentialberechnungen auf Grundlage von GIS-Daten

Für den Bereich der Windenergie ist eine solche Vorhersage auf Grund der stärker fluktuierenden Ressource Wind schwieriger. Dennoch bestehen Angebote wie z. B. die Methode *Wind-Area* [Klärle u. a. 2014], oder die Software *SWEP* [Latzer 2013]. Abbildung 3.18 zeigt jeweils beispielhaft die Ergebnisse dieser beiden Berechnungsmethoden in Form hochauflöster Kartenausschnitte der betrachteten Gebiete mit Einfärbung nach errechneter mittlerer Windgeschwindigkeit bzw. Leistungsdichte. Die Kosten für derartige Berechnungen liegen jedoch mit mindestens 7000 € im Fall von *Wind-Area* [Ament 2016] für Einzelpersonen wie -unternehmen vermutlich ebenfalls über dem für die Standortanalyse verfügbaren Kapital.

## 4 Standortanalyse, Wirtschaftlichkeit und Anwendungsbeispiele

Im folgenden Kapitel soll geklärt werden, nach welchen Kriterien die Bewertung eines Standortes für die wirtschaftliche Nutzung von Windenergie erfolgen kann. Hierbei wird neben der Erläuterung allgemeiner Zusammenhänge eine besondere Betrachtung der Situation in Bergedorf am Beispiel eines im Rahmen des IKK geplanten Entwicklungsgebiets vorgenommen.

### 4.1 Winddargebot am Beispiel Wettermast Billwerder

Die Wirtschaftlichkeit des Betriebs einer WEA hängt - neben anderen Faktoren wie z. B. der Form von bzw. Entfernung zu elektrischen Verbrauchern bzw. Netzanschluss oder Lebensdauer der einzelnen Komponenten - in erster Linie vom Ertrag der Anlage und dieser wiederum vom Winddargebot am jeweiligen Standort ab.

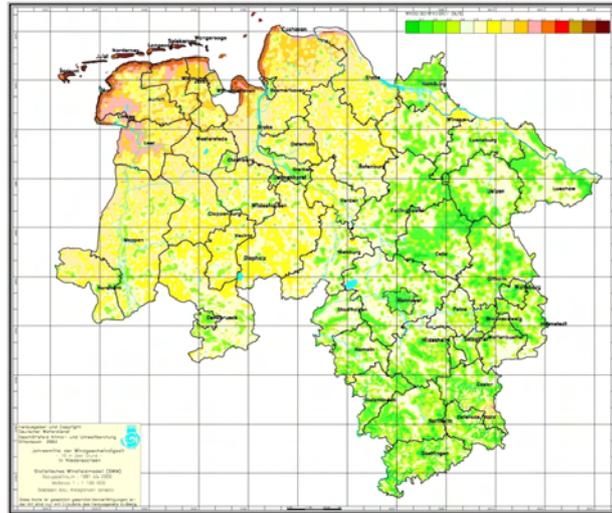
Messkampagnen für WEA decken in der Regel einen Zeitraum von mindestens einem Jahr ab. Damit sind sie entsprechend aufwendig und die Kosten dafür gerade im Bereich kleiner Anlagen kaum verhältnismäßig [Halbhuber 2009].

In den z. B. beim Deutschen Wetterdienst (DWD) erhältlichen Windkarten ist üblicherweise die mittlere (Jahres-)Windgeschwindigkeit  $\bar{u}$  flächendeckend verzeichnet, u. a. in einem 200 m x 200 m-Raster. Aus Abbildung 4.1 ist jedoch selbst in voller Größe lediglich ersichtlich, dass die Windgeschwindigkeit im Hamburger Osten in der unteren Hälfte der Skala rangiert (bis ca.  $4,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ). Für eine erste grobe Einschätzung mag dies hilfreich sein, eine konkrete Standortanalyse ist hiermit allerdings - zumal in bebautem Gebiet - nicht möglich.

#### Häufigkeitsverteilung

Aus Gleichung (3.2) (S. 14) ist außerdem bereits erkennbar, dass die Windgeschwindigkeit kubisch in die Leistung einfließt. Daher ist  $\bar{u}$  nur ein sehr ungefährender Anhaltspunkt für den erwartbaren Ertrag.  $\bar{u}$  kann für zwei Standorte identisch sein, die sich jedoch durch z. B. jahreszeitlich auftretende Stark- oder Schwachwindperioden deutlich im Winddargebot unterscheiden, wobei derjenige Standort mit der höheren *häufigsten Windgeschwindigkeit* der ertragreichere ist [Hau 2014].

Eine andere mögliche Datenquelle können nahegelegene Messstationen sein. Das Meteorologische Institut der Universität Hamburg betreibt im äußersten Nordwesten Bergedorfs im Stadtteil Billwerder eine solche Station. Diese ist im Westen, Norden und teilweise im Süden



**Abb. 4.1:** Windkarte für Hamburg, Niedersachsen und Bremen; Darstellung der mittleren Windgeschwindigkeit in  $z = 10$  m in einer Auflösung von  $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$  [DWD 2016]

umgeben von Lagerhallen und Bahnanlagen im Industriegebiet Billwerder/Morfleet, im Osten liegt das waldige Naturschutzgebiet der Boberger Dünen (s. auch Abbildung 2.1, S. 9) [Konow 2014].

Die Windgeschwindigkeit wird üblicherweise in einer Höhe von  $z = 10$  m als 10-Minuten-Mittelwert gemessen (in Billwerder außerdem in 50 m, 110 m, 175 m und 250 m Höhe).

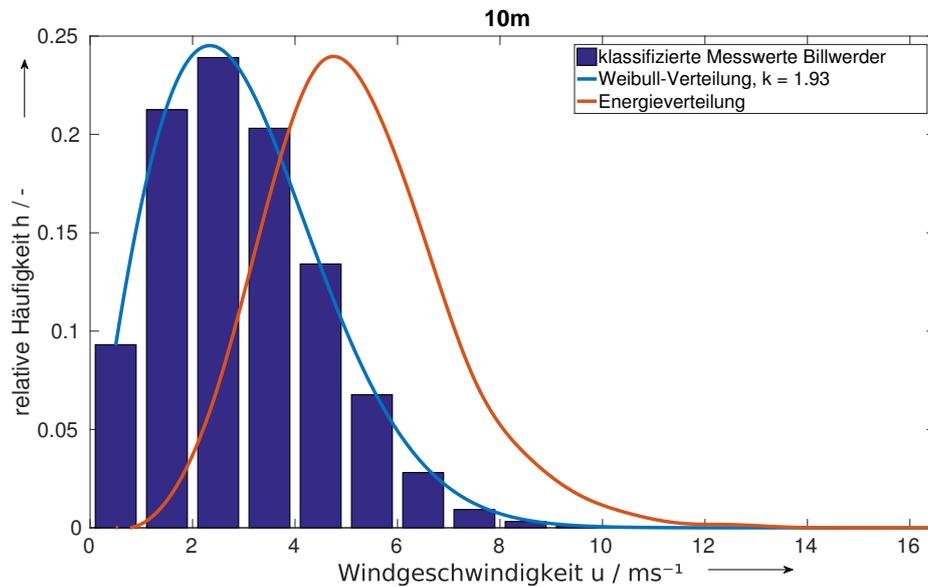
Ausgehend von den vom Wettermast Billwerder vorliegenden Werten soll nun eine mögliche Vorgehensweise für die Standortanalyse beschrieben werden.

Abbildung 4.2 zeigt die Messergebnisse für die Jahre 2012 bis 2015 als relative Häufigkeit der Geschwindigkeitsklassen (blaue Säulen). Daneben ist weiterhin die nach Energieinhalt gewichtete Verteilung dargestellt, die auf Grund des Zusammenhangs aus Gleichung (3.2) in Richtung höherer Windgeschwindigkeiten verschoben ist. Das ist für die korrekte Auslegung insofern wichtig, als dass die Nennleistung einer Anlage im Maximum der Energieverteilung liegen sollte [Twele 2013].

Ein Zusammenhang zwischen der Häufigkeit der Windgeschwindigkeitsklassen  $u_{W,i}$  und der mittleren Windgeschwindigkeit

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (4.1)$$

ergibt sich näherungsweise über die *Weibull-Verteilung* (s. blaue Kurve in Abbildung 4.2) entsprechend



**Abb. 4.2:** Verteilung der Häufigkeit der Windgeschwindigkeitsklassen am Standort Billwerder in 10 m Höhe (Säulen), außerdem die Weibullfunktion der Windgeschwindigkeit mit  $k = 1,9$  (blaue Kurve), sowie die Verteilung der Energie (rote Kurve; entscheidend für die Auslegung der Anlage), gemessen über drei Jahre von 2012 bis 2015 [Lange 2016]; eigene Darstellung

$$h(u) = \frac{k}{a} \cdot \left(\frac{u}{a}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{u}{a}\right)^k\right] \quad (4.2a)$$

wobei  $k = 1 \dots 3$  ein dimensionsloser Formparameter, der dementsprechend mit der Variabilität der Windgeschwindigkeit sinkt, und  $a$  ein Skalierungsfaktor mit  $[a] = \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ist. Für den Fall von  $k = 2$  ergibt sich die sog. *Rayleigh-Verteilung* [Heier 2009, S. 394 ff.]:

$$h(u) = \frac{2u}{a^2} \cdot \exp\left[-\left(\frac{u}{a}\right)^2\right] \quad (4.2b)$$

$a$  folgt dann direkt aus der mittleren Windgeschwindigkeit,

$$a = \bar{u} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \quad (4.3)$$

### Anwendung des logarithmischen Grenzschichtprofils

Da die Nabenhöhe selbst von KWEA in der Regel deutlich größer als 10 m ist muss der in dieser Höhe gemessene Wert entsprechend angepasst werden. Hierbei kommt das Modell des *logarithmischen Grenzschichtprofils* aus Abschnitt 3.1 zur Anwendung.

Für das Beispiel Billwerder mit

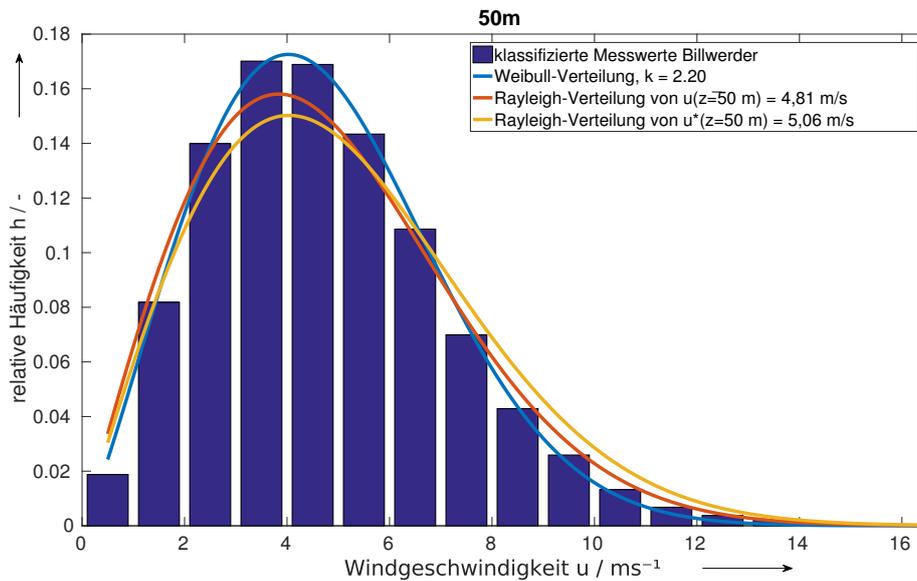
$$\bar{u}(z_{ref} = 10 \text{ m}) = 2,98 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

und einer durch die bisherigen Kenntnisse bezüglich der Rauigkeit des umliegenden Geländes (s. Abschnitt 2.1, S. 10) begründeten Annahme von  $z_0 = 1 \text{ m}$  ergibt sich nach Gleichung (3.1) für  $z = 50 \text{ m}$  eine berechnete (mittlere) Windgeschwindigkeit  $u^*$  von

$$\begin{aligned} u^*(z) &= u(z_{ref}) \cdot \frac{\ln \left[ \frac{z}{z_0} \right]}{\ln \left[ \frac{z_{ref}}{z_0} \right]} & (4.4) \\ &= 2,98 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{\ln \left[ \frac{50 \text{ m}}{1 \text{ m}} \right]}{\ln \left[ \frac{10 \text{ m}}{1 \text{ m}} \right]} \\ &= 5,06 \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Abbildung 4.3 zeigt nun für  $z = 50 \text{ m}$  Wingschwindigkeitsverteilungen resultierend aus drei unterschiedlichen Ermittlungsmethoden: In Balken dargestellt ist wieder die gemessene Häufigkeit der Windgeschwindigkeitsklassen. Die blaue Kurve zeigt ebenfalls wieder den hierzu gehörigen "Weibull-Fit" mit  $k = 2,20$ . Außerdem wurde zwei Mal die Rayleigh-Verteilung berechnet; zum einen mit der tatsächlich gemessenen mittleren Windgeschwindigkeit  $\bar{u}(z = 50 \text{ m}) = 4,81 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  (rote Kurve), zum anderen mit der in Gleichung (4.4) mit der zu  $z_0 = 1 \text{ m}$  geschätzten Rauigkeit berechneten mittleren Windgeschwindigkeit  $u^*(z = 50 \text{ m}) = 5,06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  (gelbe Kurve).

Es wird deutlich, dass beide Rayleigh-Verteilungen eine ungefähre Vorstellung der Windverhältnisse ermöglichen, wobei das Resultat aus der tatsächlich gemessenen mittleren Windgeschwindigkeit der Weibull-Funktion am nächsten kommt. Wird die zu Grunde liegende mittlere Windgeschwindigkeit hingegen erst über das logarithmische Grenzschichtprofil berechnet, führt dies zu einem fälschlicherweise größeren Anteil in Richtung der energiereicheren höheren Windgeschwindigkeit.



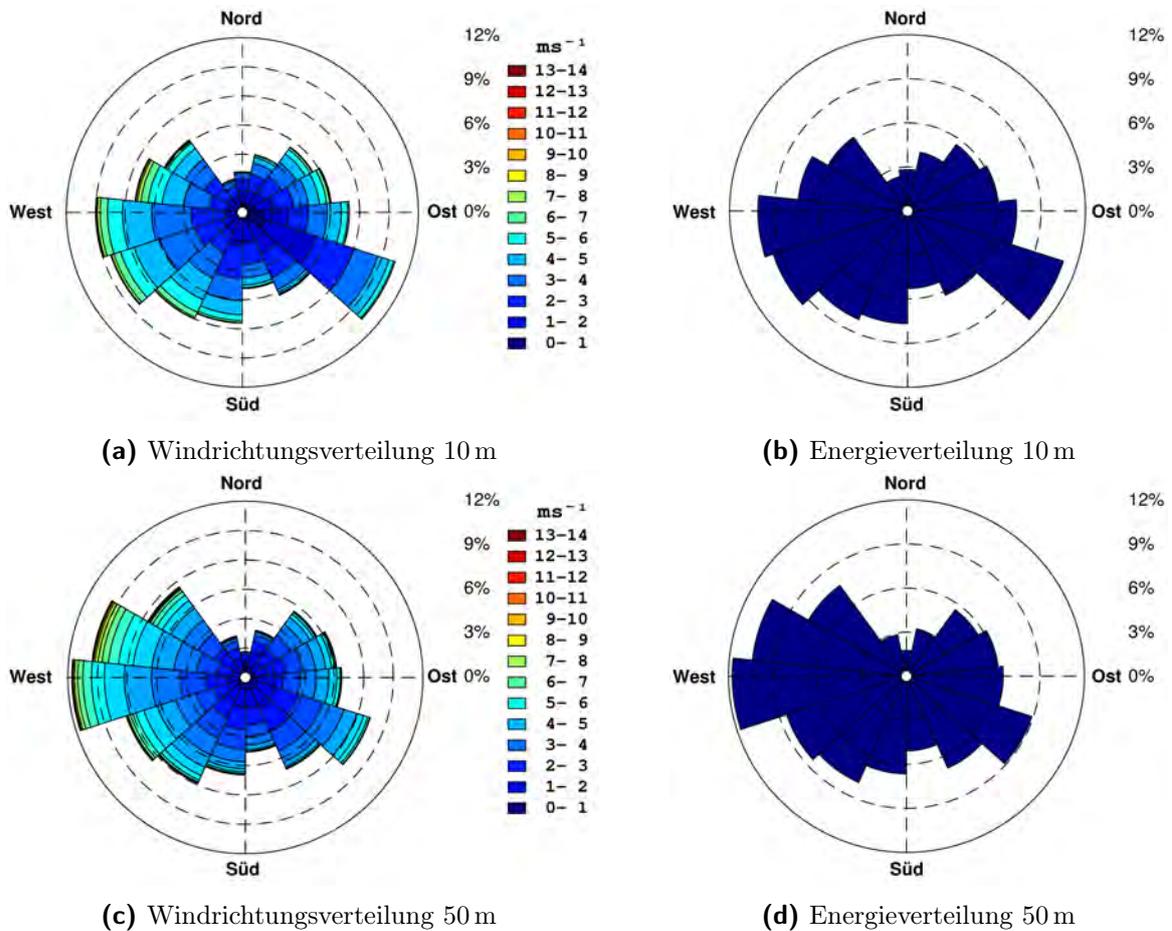
**Abb. 4.3:** Drei unterschiedlich Verteilungen der Windgeschwindigkeit am Standort Billwerder in 50 m Höhe: gemessen (Säulen) [Lange 2016], zugehöriger Weibull-Fit (blaue Kurve), Rayleigh-Verteilung berechnet aus  $\bar{u}(z = 50 \text{ m})$  (rote Kurve) sowie aus dem logarithmischen Grenzschichtmodell nach Gleichung (3.1) mit  $z_0 = 1 \text{ m}$  und  $\bar{u}(z_1 = 10 \text{ m})$  (gelbe Kurve); eigene Darstellung

### Hauptwindrichtung

Als weitere Größe wird besonders für den Einsatz von KWEA, die auf Grund ihrer geringeren Höhe von Abschattung durch Hindernisse betroffen sein können, in bebautem Gebiet die (Haupt-)Windrichtung benötigt. Am Standort Billwerder wird diese ebenfalls gemessen. Interessant ist jedoch auch hier nicht die am häufigsten auftretende Windrichtung, sondern wiederum diejenige mit dem höchsten Energieinhalt [Twele 2013].

Die Messungen ergeben entsprechend die Windrosen nach Abbildung 4.4. Unter Berücksichtigung der Messungen aus 10 m und 50 m kann die Hauptwindrichtung hier hinreichend genau auf den Bereich zwischen  $240^\circ$  und  $288^\circ$ , also in westlicher Richtung bestimmt werden<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Es sei erwähnt, dass die 50-Meter-Messung des nördlichen Sektors wegen der Position des Auslegers in nahezu südlicher Richtung durch den Mast gestört ist [Konow 2014].



**Abb. 4.4:** Räumliche Verteilung der gemessenen Windgeschwindigkeitsklassen (links) und des Energieinhalts (rechts) in 10 m (oben) und 50 m (unten); die für die Standortanalyse relevante Hauptwindrichtung ist erst in der Energieverteilung ersichtlich: In 50 m Höhe kommen ca. 40% der Energie aus den vier westlichsten Sektoren à 24°; eigene Darstellung der Daten nach [Lange 2016]

### Berechnung der Rauigkeitslänge

Für den Standort Billwerder, an dem die Windgeschwindigkeit im selben Zeitraum in unterschiedlichen Höhen gemessen wird, lässt sich nach Gleichung (3.1) die ortsspezifische Rauigkeitslänge

$$z_0 = \exp \left[ \frac{\bar{u}(z_1) \cdot \ln(z_2) - \bar{u}(z_2) \cdot \ln(z_1)}{\bar{u}(z_1) - \bar{u}(z_2)} \right] \quad (4.5a)$$

bestimmen. Es folgt

$$z_0 = \exp \left[ \frac{\bar{u}(z = 10 \text{ m}) \cdot \ln(50 \text{ m}) - \bar{u}(z = 50 \text{ m}) \cdot \ln(10 \text{ m})}{\bar{u}(z = 10 \text{ m}) - \bar{u}(z = 50 \text{ m})} \right] \quad (4.5b)$$

$$= \exp \left[ \frac{2,98 \text{ m/s} \cdot \ln(50 \text{ m}) - 4,81 \text{ m/s} \cdot \ln(10 \text{ m})}{2,98 \text{ m/s} - 4,81 \text{ m/s}} \right] \quad (4.5c)$$

$$= 0,73 \text{ m} \quad (4.5d)$$

Dies ist insofern nur eine Vereinfachung, als dass mit der Berechnung mittels  $\bar{u}$  - welche die Windgeschwindigkeiten aus allen Richtungen gleichermaßen beinhaltet - vorausgesetzt wird, dass auch die Geländebeschaffenheit in alle Richtungen gleich verteilt ist, was je nach betrachtetem Radius im heterogenen städtischen Raum wenig realistisch ist. Eine detailliertere Untersuchung der Rauigkeitslänge im Umfeld des Wettermastes Billwerder liefert [Konow 2014]: Nach sektorweiser Einteilung der Windgeschwindigkeiten (s.o.) wurden für jeden Sektor zwei lineare Terme zur Erweiterung von Gleichung (4.5) ermittelt. Hiermit wird die Rauigkeitslänge für die oben ermittelte Hauptwindrichtung zu 0,70 m bzw. 0,81 m berechnet. Die Vereinfachung führt also zu einem ähnlichen Ergebnis und kann insofern als zulässig betrachtet werden.

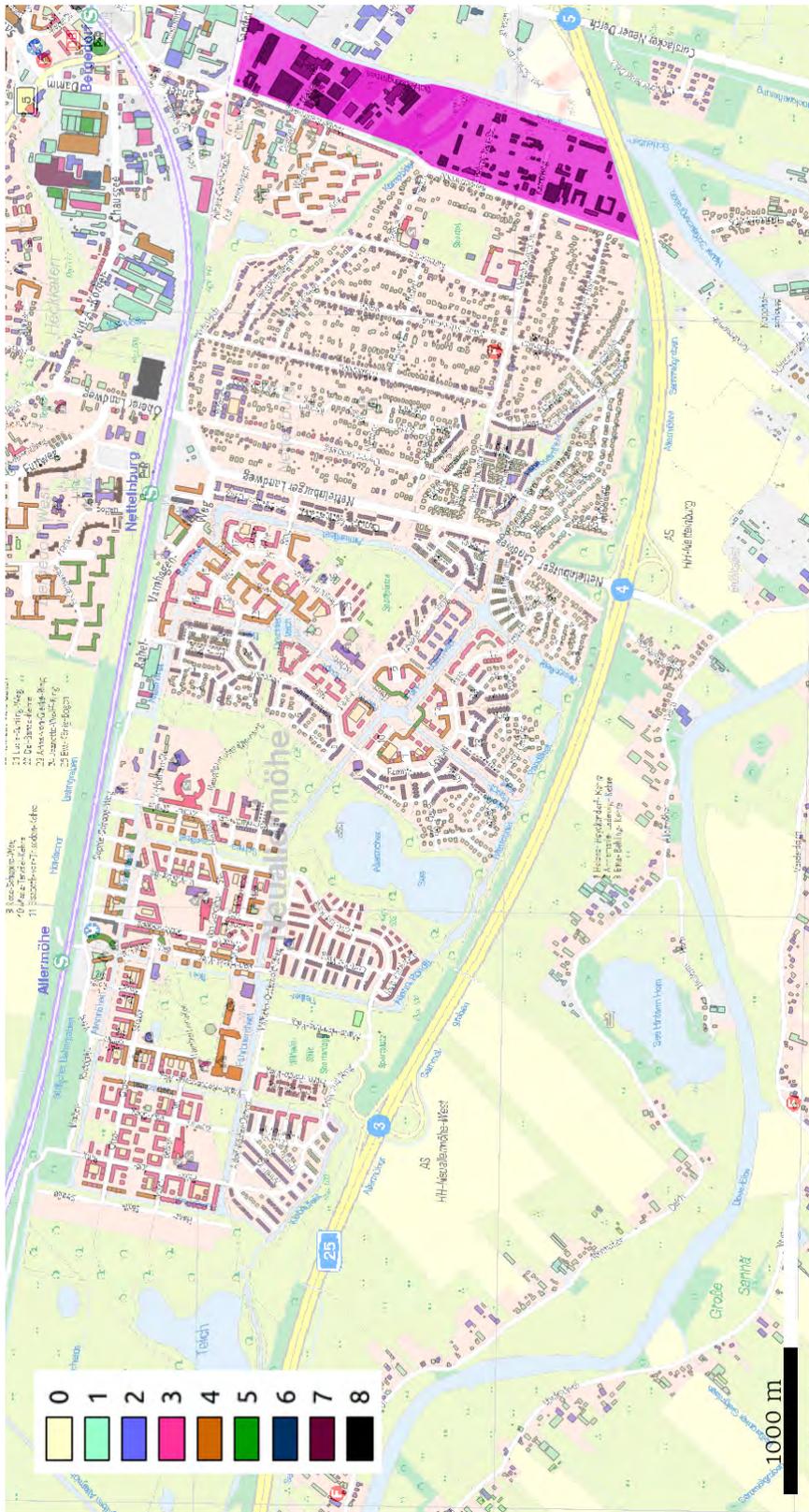
## 4.2 Schleusengraben: Standortanalyse mittels urban boundary layer Modell

Nach dem vorangegangenen Überblick über Methoden zur Analyse der Windverhältnisse im urbanen Raum in Abschnitt 3.6 (S. 30 ff.) soll im Hinblick darauf nun der Bereich Schleusengraben in Bergedorf genauer betrachtet werden. Hierzu wird das vorgestellte *urban boundary layer* Modell verwendet.

Eine Vergleichsmöglichkeit der Ergebnisse bietet sich hier durch die Daten einer weiteren Messung im Rahmen des geplanten Windparks Curslack, ca. 1 km westlich des Entwicklungsgebiets und südlich der Autobahn. Die dortige Messkampagne mittels LiDAR erfolgte in Höhen von 40 m bis 275 m [Rauert 2016].

### Entwicklungsgebiet Schleusengraben

Im Rahmen des IKK sollen in dem mit bis zu 1400 Wohnungen für 2500 Personen, Gewerbe- und Handwerksbetrieben geplanten Entwicklungsgebiet Schleusengraben zwischen Bahntrasse und Autobahn (s. Abbildungen 2.1, S. 9 und 4.5, S. 45) die Sektoren Energie und Mobilität entsprechend dem Konzept entwickelt werden [BSU 2015].



**Abb. 4.5:** Lage des Entwicklungsgebiets Schleiengraben (lila) und westlich (Hauptwindrichtung) gelegene Stadtteile Nettelburg und Allermöhe - Gebäude eingefärbt nach Geschosshöhen (s. Legende); eigene Darstellung mit *Qgis 2.0.1* auf Grundlage der Daten aus [LBGV 2016a]

Abbildung 4.5 zeigt die räumliche Lage des Schleusengrabens sowie den weiter westlich gelegenen Bereich Neuallermöhe. Die städtische Bebauung reicht ca. 3 km weit westlich, anschließend folgt waldiges Gebiet und flaches Marschland (s. auch Kapitel 2.1). Auf Grundlage von [LBGV 2016a] wurde mittels der freien GIS-Software *Qgis* eine Kategorisierung der vorhandenen Gebäude nach Geschossanzahl vorgenommen. Es ist erkennbar, dass im Bereich südlich der Bahnlinie insgesamt nur wenige Gebäude mit mehr als drei Geschossen stehen.

In direkter Nähe zum Schleusengraben stehen ein- bis viergeschossige Gebäude. Als Geschosshöhe wird pauschal 3 m angenommen. Für den Bereich um den Schleusengraben ergeben sich damit bei durchschnittlich zweieinhalb Etagen und einer angenommenen Dachgesosshöhe von 2,5 m eine geschätzte durchschnittliche lokale Hindernishöhe von

$$h_{m-local} = 10 \text{ m}$$

Anschließend folgt in westlicher Richtung ein Bereich mit ein- oder zweigeschossigen Einfamilienhäusern. Erst im ca. 2 km weit entfernten Bereich südlich des S-Bahnhofs Nettelnburg befinden sich wieder höhere Gebäude mit zwei bis fünf Geschossen. Der Bereich bis zur Rauigkeitsstufe am Rand der städtischen Bebauung wird daher auf drei Geschosse geschätzt, woraus sich eine mittlere Hindernishöhe von

$$h_m = 11,5 \text{ m}$$

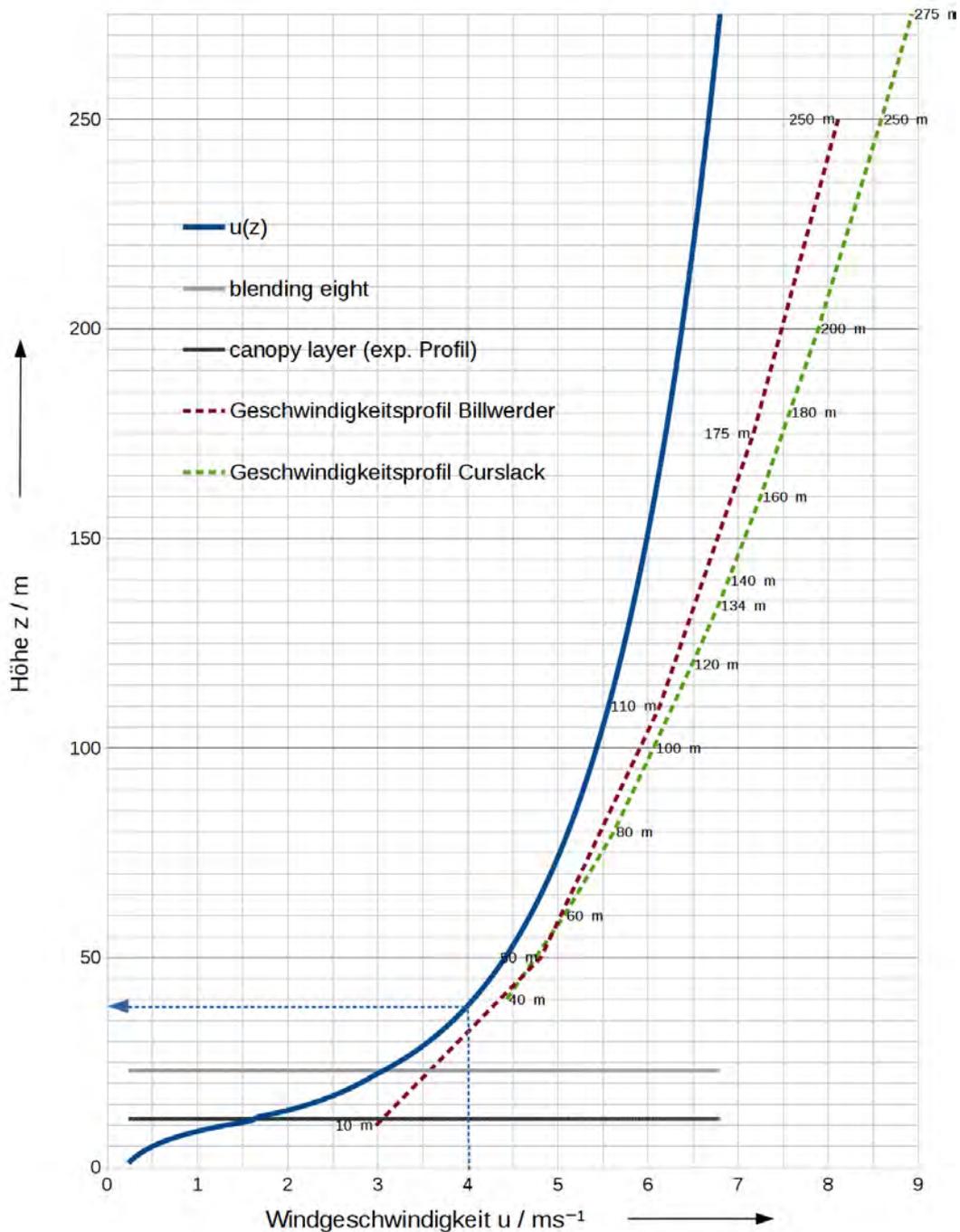
ergibt.

Die Rauigkeiten können hier ebenfalls nur geschätzt werden. Ausgehend von Abschnitt 4.1 bzw. der von [Konow 2014] ermittelten Werte für Billwerder und basierend auf ALKIS wird

$$z_{0-fetch} = 1,3 \text{ m}$$

$$\text{und } z_{0-local} = 0,8 \text{ m}$$

gesetzt. Alle gewählten oder berechneten Parameter sind mit Erklärung noch einmal in Tabelle 4.1 aufgeführt. Abbildung 4.6 zeigt die abschnittsweise nach [Mil.-Hop. 2013b] berechnete Funktion der Windgeschwindigkeit  $u$  in Abhängigkeit der Höhe  $z$ : In dem für die Anwendung relevanten Bereich unterhalb von  $z \approx 50 \text{ m}$  konvergiert die Funktion mit sinkender Höhe zunächst mit den beiden gemessenen Windgeschwindigkeitsprofilen; ab ca. 25 m über dem Boden sinkt die berechnete Geschwindigkeit erwartungsgemäß stärker, was auf die Bebauung und die damit einhergehende Ausbildung der displacement height und des canopy layer, sowie auf die erhöhte Turbulenzintensität zurückgeführt werden kann. Da das Ergebnis dieser Berechnung auf mehreren Annahmen bezüglich der Geländebeschaffenheit beruht, wäre eine unabhängige Überprüfung des Resultats oder jener Annahmen sinnvoll.



**Abb. 4.6:** Das nach [Mil.-Hop. 2013b] berechnete Windgeschwindigkeitsprofil  $u(z)$  für das Gebiet Schleusengraben (blau) unter Verwendung der mittleren Windgeschwindigkeit aus Billwerder (10 m) nach [Lange 2016] und der angenommenen Geländebeschaffenheit nach [LBGV 2016a]; Zum Vergleich das östlich in Curslack gemessene Profil (grün) nach [Rauert 2016] und das in Billwerder gemessene Profil (rot) nach [Lange 2016], jeweils unter Angabe der Messhöhen. Der blau gestrichelte Pfeil markiert diejenige Höhe, in der das Modell eine Geschwindigkeit von  $u = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  vorhersagt. Außerdem eingezeichnet: Die Höhe des canopy layer (schwarz,  $z_{CL} = 11,5$  m), unterhalb derer das Modell ein exponentielles Profil vorsieht, sowie die blending height (grau,  $z_{bl} = 23$  m). Beide ergeben sich aus der angenommenen mittleren Hindernishöhe  $h_m$ . Alle Parameter sind in Tabelle 4.1 zu finden.

**Tabelle 4.1:** Eingangsparameter der Funktion  $u(z)$  zur Beschreibung des Windgeschwindigkeitsprofils Schleusengraben

Parameter	Beschreibung	Wert	Referenz
$u_N$	Geschwindigkeit	2,98 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Messung Billwerder
$z_N$	Höhe	10 m	
$z_{0-ref}$	Rauhigkeitslänge	0,7 m	Abschnitt 4.1, S. 43
$h_m$	mittlere Hindernishöhe	11,5 m	ALKIS
$d_{fetch}$	displacement height luvwärts	8,6 m	(= 0.75 · $h_m$ )
$z_{0-fetch}$	Rauhigkeitslänge	1,3 m	
$h_{m-local}$	mittlere Hindernishöhe lokal	10 m	ALKIS
$d_{local}$	displacement height	7,5 m	(= 0.75 · $h_{m-local}$ )
$z_{0-local}$	Rauhigkeitslänge	0,8 m	
$\lambda_f$	frontal area ratio	0,25	[Mil.-Hop. 2013b]

### 4.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Im folgenden soll die Wirtschaftlichkeit von KWEA betrachtet werden. Da es zum jetzigen Zeitpunkt noch kein geplantes Projekt im Rahmen des IKK Bergedorf gibt, geschieht dies anhand eines fiktiven Beispiels.

#### Ertragsprognose mittels Leistungskennlinie

Bei nun hinreichend genau bekannten Windverhältnissen lässt sich der (jährliche) Anlagenenertrag einer KWEA

$$E_a = \sum_{i=1}^n E_i \quad (4.6)$$

als Summe der Klassenerträge  $E_i$  in den Windgeschwindigkeitsklassen  $i = 1 \dots n$  ermitteln. Dabei gilt für

$$E_i = 8760 \text{ h} \cdot P_i \cdot H_i \quad (4.7)$$

mit  $H_i$  als der Häufigkeit der Klasse und  $P_i$  als der anlagenspezifischen Leistung bei jeweiliger Windgeschwindigkeit  $u_i$  (entsprechend der Leistungskennlinie, bspw. Abbildung 3.4, 20) [Heier 2009, S. 397 ff.].

Daraus folgt eine weitere Kennzahl, die der Volllaststundenzahl oder *Vollbenutzungsdauer*

$$VBD = \frac{E_a}{P_{Nenn}} \quad (4.8)$$

Sie ist bereits ein Maß für die Wirtschaftlichkeit einer Anlage am Standort und ermöglicht somit einen Vergleich [Halbhuber 2009]. Für WEA in Deutschland sind dies durchschnittlich ca. 2100 h, wobei dieser Wert stark von den örtlichen und anlagenspezifischen Gegebenheiten abhängt [Bofinger 2012].

### Stromgestehungskosten

Als wichtiger wirtschaftlicher Kennwert lassen sich die Stromgestehungskosten  $k_{el}$  einer Windenergieanlage aus dem (jährlichen) Ertrag  $E_a$  der Anlage sowie den insgesamt anfallenden Kosten  $K_{ges}$ , bestehend aus Investitionskosten sowie Betriebskosten, berechnen.

Tabelle 4.2 listet beispielhaft absolute und leistungsspezifische Kosten für eine Anlage der Firma Aventa mit einer Nennleistung von 6,5 kW bei  $u_{Nenn} = 6 \frac{m}{s}$  auf.

**Tabelle 4.2:** Kostenrechnung am Beispiel *Aventa AV-7*

Index	Position	Kosten $K$ / €	spez. Kosten $k$ / $\frac{€}{kW}$
<i>I</i>	Investitionskosten		
	= Anlagenkosten <sup>a</sup>	99 000	15 231
	+ Kosten Mast	(inkl.)	(inkl.)
	+ Kosten Wechselrichter <sup>b</sup>	2300	353
	+ Aufbau, Installation, Anschluss <sup>b</sup>	4300	662
	+ Transportkosten <sup>b</sup>	1700	262
	+ Genehmigung <sup>b</sup>	2400	369
	+ (ggf. sonst. Kosten)	-	-
	=	109 700	16 877
<i>B</i>	Betriebskosten (jährlich)		
	= Instandhaltung und Wartung <sup>c</sup>		32
	+ Versicherung <sup>c</sup>		13
	+ (ggf. sonst. Kosten)	-	-
	=		45
			( $\hat{=} 0,003 \cdot k_I$ )

<sup>a</sup> vgl. Datenblatt [Franken 2013, S. 213]

<sup>b</sup> vgl. [Hain 2014]

<sup>c</sup> vgl. [ebd.]: Werte übernommen vom Institut f. solare Energieversorgungstechnologie (ISET)

Bei Wahl eines Standorts mit  $\bar{u} = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  in Nabenhöhe - dies entspricht am Schleusengraben nach Abschnitt 4.5 einer Höhe von ca. 38 m (s. blauer Pfeil in Abbildung 4.6) - und  $k = 1,8$  ergibt sich laut Datenblatt ein Ertrag von  $E_a = 19\,441 \text{ kWh/a}$ , woraus nach Gleichung (4.8) folgt

$$VBD = 2991 \text{ h}$$

Es wird ein Zinssatz von  $\zeta = 0,01$  und eine Laufzeit von  $\tau = 20 \text{ a}$  angesetzt. Diese Konditionen sind je nach Bonität im Rahmen von Förderprogrammen z. B. der KfW möglich [Franken 2013]. Hieraus ergibt sich mit dem *Annuitätsfaktor*

$$A_F = \frac{\zeta \cdot (1 + \zeta)^\tau}{(1 + \zeta)^\tau - 1} = 0,0554 \quad (4.9)$$

der jährlich zurückzuzahlende Anteil der Darlehens, womit sich anschließend die Stromgestehungskosten berechnen lassen [Halbhuber 2009]:

$$k_{el} = \frac{K_{ges}}{E_a} \quad (4.10a)$$

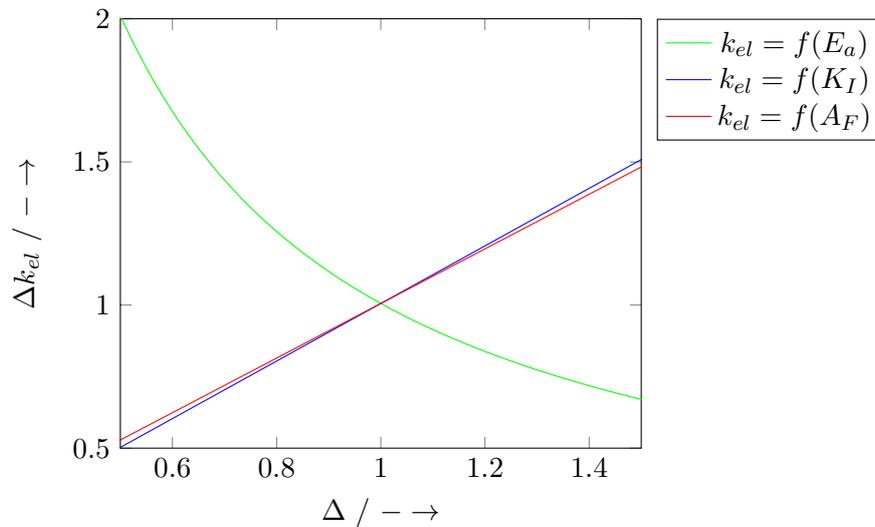
$$= \frac{k_I \cdot (A_F + \frac{k_B}{K_I})}{VBD} \quad (4.10b)$$

$$= \frac{16\,877 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot (0,0554 + \frac{45 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 6,5 \text{ kW}}{109\,700 \text{ €}})}{2991 \text{ h}} \quad (4.10c)$$

$$= 0,328 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \quad (4.10d)$$

Dieser Wert liegt ca. 14% über dem aktuellen Strombezugspreis für private Haushalte von  $k_{Netz} \approx 0,29 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$  und erscheint daher wenig attraktiv, zumal Industriebetriebe, aber auch öffentliche Einrichtungen Strom teilweise sogar um die Hälfte günstiger beziehen [BDEW 2016]. Dies deckt sich mit Aussagen von z. B. [Grieser u. a. 2015], nach denen eine wirtschaftliche Nutzung für Privathaushalte unter den gegebenen Umständen in Deutschland unterhalb einer mittleren Windgeschwindigkeit von  $\bar{u} = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  kaum gegeben ist.

Abbildung 4.7 zeigt die Sensitivität  $\Delta k_{el}$  der Stromgestehungskosten auf die relative Änderungen  $\Delta$  der Parameter  $E_a$ ,  $K_I$  und  $A_F$ , ausgehend von obigen Werten. Eine Ertragszunahme von ca. 40% wie sie laut Herstellerangaben durch eine Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit auf  $\bar{u} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  erwartet werden kann, führt demnach zu einer Kostenreduktion um ca. 30%. Die Veränderung der Investitionskosten und des - allerdings bereits sehr



**Abb. 4.7:** Sensitivitätsanalyse der nach Gleichung (4.10) ermittelten Stromgestehungskosten  $k_{el}$  in Bezug auf die Parameter  $E_a$ ,  $K_I$  und  $A_F$

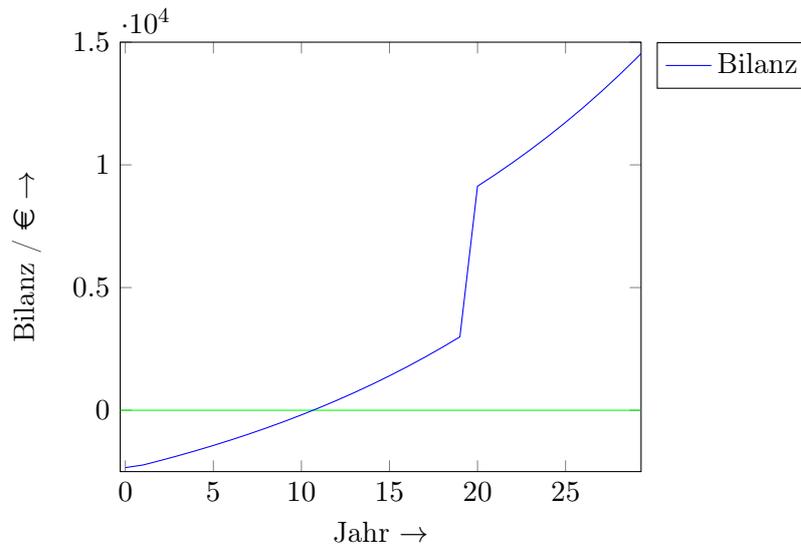
niedrigen - Annuitätsfaktors hat einen linearen Einfluss auf die Stromgestehungskosten und ist zudem nicht standortabhängig, weshalb dieses Potenzial unbedingt bei einer Entscheidung beachtet werden sollte.

### Netzeinspeisung vs. Eigenabnahme

Derzeit gilt nach dem EEG ein Einspeisetarif von ca.  $0,08 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ <sup>2</sup>. Dieser ist nicht - wie z. B. vom BWE [Franken 2013] gefordert - nach Leistung oder Jahresertrag abgestuft und gilt somit gleichermaßen für KWEA wie für Anlagen im Megawattbereich, deren Stromgestehungskosten ab  $0,04 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$  betragen [Kost 2013]. Dieser Mangel an energiepolitischer Förderung führt dazu, dass - von Anlagen an sehr guten Standorten abgesehen - eine Produktion durch KWEA mit dem primären Ziel der Netzeinspeisung wirtschaftlich keinen Sinn ergibt. Stattdessen sollte bei der Planung ein möglichst hoher Eigennutzungsanteil angestrebt werden. Dies wird in erster Linie durch entsprechende Auslegung in Verbindung mit Lastanpassung und ggf. Speichersystemen erreicht [Grieser u. a. 2015]. Für die Abgabepflicht auf von EEG-geförderten Anlagen produzierten und durch die Erzeugenden selbst verbrauchten Strom in Höhe eines Anteils der EEG-Umlage von z.Zt. 40 % gilt zumindest eine Bagatellgrenze. Diese liegt nach § 61 Nr. 4 EEG bei  $P_{Nenn} = 10 \text{ kW}$  und  $E_a = 10 \text{ MWh/a}$ .

Wird ein Anteil von 0,75 % des erzeugten Stroms selber genutzt und ersetzt damit Netzstrom, welcher einer jährlichen Teuerungsrate von 3 % unterliegt [Hain 2014], lässt sich für die Anlage

<sup>2</sup>Die Höhe der Vergütung richtet sich nach dem Datum der ersten Stromproduktion und wird quartalsweise, abhängig von der installierten Leistung in Deutschland, angepasst (§§ 37 & 49 EEG 2014)



**Abb. 4.8:** Beispiel für eine ökonomische Bilanz der Anlage *Aventa AV-7* am Standort Billwerder unter Annahme der in Tabelle 4.2 genannten Werte, einem Eigenbezug von 75% und der in Gleichung (4.10) verwendeten Finanzierungsbedingungen. Die Bilanz erreicht nach ungefähr der Hälfte der Kreditlaufzeit von 20 Jahren den positiven Bereich.

mit besagter Finanzierung und unter der Annahme einer inflationsbedingten Erhöhung der Betriebskosten von jährlich 1% eine Bilanz, bestehend aus der Differenz der Gewinne durch Einsparung und Einspeisevergütung und der Aufwendungen in Form von Finanzierungs- und Betriebskosten, wie in Abbildung 4.8 gezeigt darstellen.

Es wird ersichtlich, dass die Anlage nach ungefähr der Hälfte der Kreditlaufzeit von 20 Jahren einen bilanziellen Gewinn erwirtschaften kann.

Dennoch ist unter den gegebenen Umständen zu überlegen, ob eine Investition in wenigen Jahren unter Annahme einer Senkung der notwendigen Investitionskosten und möglicherweise sogar einer verbesserten Förderungspolitik mehr Sinn ergibt als heute.

#### 4.4 Anwendungsmöglichkeiten in Bergedorf

Basierend auf den vorangegangenen Kapiteln sollen nun einige denkbare Anwendungsbeispiele von KWEA in Bergedorf aufgezeigt werden.

**Einsatz zur Reduzierung der Strombezugskosten** Wie gezeigt wurde, ist der Einsatz mit dem Ziel der Netzeinspeisung auf absehbare Sicht nicht rentabel. Aus diesem Grund kommen zunächst stromintensive Betriebe als Einsatzort in Frage, die einen signifikanten Anteil der erzeugten Strommenge selber verbrauchen und somit ihre Strombezugskosten senken können.

Dieser Anteil kann durch Batteriespeicher und Wärmeerzeugung mittels Heizwiderstands oder Wärmepumpenbetriebs weiter gesteigert werden [Franken 2013].

Zum anderen existieren im eher ländlichen Teil des Bezirks zahlreiche landwirtschaftliche Betriebe, die ihre laufenden Kosten mit einer eigenen Anlage direkt senken könnten - vorausgesetzt, die Anlage kann in einer Höhe mit ausreichender Windgeschwindigkeit betrieben werden. Die Möglichkeit hierzu kann jedoch in Hinblick auf die bereits im Bezirk vorhandenen Groß-WEA und die größtenteils flache Landschaft (s. Abschnitt 2.1, S. 8) zumindest für einige Standorte als gegeben betrachtet werden, zumal hier genügend Platz für die eventuell notwendige Abstimmung entsprechend hoher Masten vorhanden sein dürfte.

Im städtischen Teil Bergedorfs ist die Standortwahl wegen der durch die vorhandene Bebauung verringerten Windgeschwindigkeit schwierig. Dennoch sind auch hier Einsatzmöglichkeiten gegeben. Hohe (Wohn-)Häuser bieten eine Möglichkeit zur Installation bei gleichzeitig höherem Strombedarf als z.B. im Falle von Einfamilienhäusern. Hierbei kann auch auf entsprechend ausgelegte Konzepte zurückgegriffen werden, wie z. B. die beiden in Abbildung 4.9 gezeigten. Sie nutzen die bereits erwähnte erhöhte Windgeschwindigkeit an Hausfassaden und Dachkanten. Ein Nachteil besteht darin, dass andere als die durch die Installation vorgegebene Windrichtung kaum genutzt werden. Weiterhin sind für solche und ähnliche Anlagen auf Grund des frühen Entwicklungsstadiums kaum Erfahrungswerte vorhanden, weshalb die Angaben der herstellenden Unternehmen selbst entsprechend genau geprüft werden sollten.



(a) Modell *Crossflex* [Sáenz-Diez Muro 2010a]



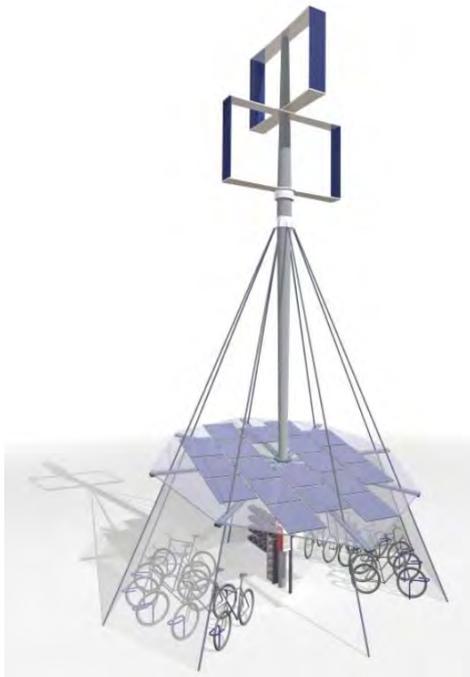
(b) Modell *WindRail* in Kombination mit Photovoltaikmodulen [Anerdgy 2015]

**Abb. 4.9:** Zwei Beispiele von gebäudeintegrierten Windenergieanlagen; in beiden Fällen handelt es sich um horizontal betriebene Vertikalanlagen nach dem Darrieus-Prinzip, welche die an der Fassade aufsteigende Strömung nutzen sollen

Insgesamt existieren im Bezirk Bergedorf sechzehn Gebäude mit zwölf oder mehr Stockwerken [LBGV 2016a], was bei der angenommenen Geschosshöhe von 3 m eine Höhe von mindestens

36 m ergibt. Dies entspricht bereits der Höhe, in der nach Abschnitt 4.2 eine mittlere Windgeschwindigkeit von ungefähr  $4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  zu erwarten ist, bei der ein wirtschaftlicher Betrieb möglich sein kann.

**Anlagen im öffentlichen Raum** Anlagen wie das in Abbildung 4.10a gezeigte *Hybridsystem* aus Photovoltaikmodulen und einer KWEA können im öffentlichen Raum Strom z. B. für das Laden von Batterien von Elektrofahrzeugen oder -autos und mobilen elektronischen Geräten bereitstellen. Die in Abbildung 4.10b dargestellte KWEA lädt ebenfalls in Verbindung mit Photovoltaik Batterien für die Beleuchtung durch LED<sup>3</sup>-Lampen. Solche Anlagen zielen nicht primär auf einen wirtschaftlichen Betrieb ab und verknüpfen außerdem das Endprodukt Strom direkt mit seiner Erzeugung. Die Akzeptanz von Erneuerbaren Energien kann somit gerade durch Projekte wie das Integrierte Klimaschutzkonzept Bergedorf erhöht werden.



(a) KWEA im Verbund mit PV-Modulen als Ladestation für Elektrofahrzeuge [Bauer 2007]



(b) Einsatz zum Betrieb einer energieeffizienten LED-Straßenbeleuchtung [Rachaeledwards 2016]

**Abb. 4.10:** Einsatzmöglichkeiten von KWEA im öffentlichen Raum

<sup>3</sup>LED: light emitting diode

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde der wachsende Sektor der Kleinwindenergieanlagen (KWEA) untersucht. Der Fokus lag hierbei auf dem Einsatz im städtischen Bereich, der auf Grund der durch die komplexeren Windverhältnisse schwieriger erreichbaren Wirtschaftlichkeit bislang noch wenig erfolgt und auch erst in den letzten Jahren näher erforscht wurde. KWEA sind bei entsprechendem Winddargebot in der Lage, elektrische Energie am Ort des Bedarfs bereitzustellen oder in das vorhandene Stromnetz einzuspeisen. Dabei verursachen sie deutlich weniger klimarelevante und andere kritische Emissionen als die Erzeugung des durchschnittlichen Strommix. Somit können sie - ähnlich wie Photovoltaikanlagen und besonders in Kombination mit ihnen - einen Beitrag zu einer ressourcenschonenden Stromerzeugung leisten.

Nach einem Überblick über geeignete analytische und numerische Methoden zur Standortanalyse in Form einer Literaturrecherche wurde das im Rahmen des *Integrierten Klimaschutzkonzepts Bergedorf* (IKK) in Hinblick auf nachhaltigen Energieeinsatz zu entwickelnde Gebiet Schleusengraben auf Eignung für den Einsatz von KWEA unter Anwendung des Modells des *urban boundary layer* analysiert.

Es konnte gezeigt werden, dass das Windgeschwindigkeitsprofil unter Zuhilfenahme vorhandener Geoinformationsdaten (GIS) plausibel abgeschätzt werden kann. Die Plausibilität ergibt sich aus dem Vergleich mit den Daten zweier unabhängiger mehrjähriger Messungen an weiteren Standorten. Das Ergebnis zeigt eine nur bedingt vorhandene Eignung zum wirtschaftlichen Einsatz von Kleinwindenergieanlagen. Erst ab einer Nabenhöhe von 38 m wird laut Analyse eine mittlere jährliche Windgeschwindigkeit von ca. vier Meter pro Sekunde erreicht. Diese gilt als Minimum für einen wirtschaftlichen Betrieb innerhalb privater Anwendung. Zur Überprüfung dieser Ergebnisse sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig.

Unabhängig von der konkreten Berechnung des Windgeschwindigkeitsprofils wurde deutlich, dass die Stromerzeugung mittels KWEA unter bestimmten Voraussetzungen, wie z. B. dem möglichst vollständigen Eigenverbrauch des Stroms, sowie einem langfristig steigenden Strombezugspreis aus dem öffentlichen Netz an Standorten mit einer mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit von vier Meter pro Sekunde bereits nach wenigen Jahren eine positive finanzielle Bilanz aufweisen kann. Für das fiktive Beispiel ergaben sich noch Stromgestehungskosten von 14% über dem aktuellen Netzbezugspreis. Die Wirtschaftlichkeit ist insgesamt stark von dem tatsächlichen Winddargebot am Standort abhängig.

Während die Anschaffung und der Betrieb einer KWEA keine außergewöhnlichen Hürden

darstellen, ist die zuvor empfehlenswerte Standortanalyse derzeit jedoch nicht ohne größeren Aufwand machbar. Eine belastbare Messung erfordert neben fachlichen Kenntnissen insbesondere viel Zeit. Alternative Methoden wie die großräumige Simulation oder Analyse mittels GIS sind zwar bereits vorhanden, wären jedoch für Einzelpersonen wie auch -unternehmen mit erheblichen Kosten verbunden.

Wie bereits eingangs erwähnt und in den vorangegangenen Kapiteln belegt, ist das Potenzial zur Stromerzeugung und damit zur Reduktion von klimarelevanten Emissionen durch KWEA im städtischen Raum begrenzt, zumal der ökonomische Anreiz in Form eines geeigneten Einspeisetarifs in Deutschland derzeit vollkommen fehlt. Allerdings sind gerade im Rahmen eines Projektes wie des IKK Bergedorf, bei dem die Einbeziehung möglichst vieler Handelnder in unterschiedlichen gesellschaftlichen Bereichen und Energiesektoren vorgesehen ist, eine Reihe von Maßnahmen denkbar, um vorhandenes Potenzial nutzbar zu machen.

**Windatlas** Wenn Kleinwindenergie in der Stadt erfolgreich als dezentrale Technologie etabliert werden soll, ist eine flächendeckende Analyse des Potenzials notwendig. Ähnlich dem frei verfügbaren *Solaratlas* könnte auf Basis der bereits flächendeckend vorhandenen 3D-LiDAR-Daten und mit Hilfe zur Verfügung stehender und hier vorgestellter Methoden ein *Kleinwindatlas* für Bergedorf erstellt werden. Mit solch einem Instrument wären potenziell Interessierte in der Lage, eine erste Einschätzung bezüglich der Eignung des eigenen Hauses oder Grundstücks für den Einsatz von KWEA vorzunehmen, und zuständige Behörden könnten gezielter Fördermaßnahmen ergreifen.

**Vereinfachung von Verfahren** Die für Bauvorhaben zuständige Abteilung des Bezirksamts Bergedorf könnte prüfen, inwiefern eine administrative Unterstützung von KWEA-Projekten umsetzbar ist. Hierbei wäre z. B. die Festlegung einer Verfahrensfreiheit auch für höhere Anlagen denkbar, bei gleichzeitiger Einhaltung geltender Immissionsschutzwerte. Eine Bündelung der Verantwortlichkeit in Verbindung mit der Verfügbarmachung von Informationen und notwendigen Formularen kann ebenfalls zu einer Vereinfachung beitragen.

**Finanzielle Förderung** Neben einem politischen Engagement für eine nach Leistung abgestufte Vergütung ist eine vom EEG unabhängige Förderung z. B. durch günstige Finanzierungsangebote vorstellbar, ebenso wie ein ggf. in Zusammenarbeit mit Elektrizitätsversorgungsunternehmen garantierter Einspeisetarif für eine begrenzte Anzahl von Anlagen.

**Öffentliche Einrichtungen** Öffentliche Bauprojekte könnten generell auf ihre Eignung zur Integration von KWEA geprüft werden, ebenso wie bestehende Bauwerke und Plätze. Die

Realisierung kann als positives Beispiel für die dezentrale und regenerative Stromerzeugung wirken und die Technologie sichtbar machen.

**Kleinwind-Pilotprojekt** Ebenfalls in Kooperation mit Versorgungsunternehmen sowie mit Firmen und Verbänden aus der (Klein-)Windenergiebranche und Forschungseinrichtungen könnte außerdem die Initiierung eines Pilotprojekts mit einer begrenzten Anzahl von Anlagen an ausgewählten, repräsentativen Standorten im Bezirk neben Erkenntnissen zu technischen Lösungen und Standortbedingungen vor allem auch ein Signal für die angestrebte Energiewende auf lokaler Ebene bewirken. Hierbei hat Bergedorf das Potenzial, als Teil der Metropole Hamburg und durch das gleichzeitige Vorhandensein ländlicher wie auch städtischer Strukturen innerhalb des Bezirks einen Modellcharakter mit überregionaler oder sogar bundesweiter Relevanz zu erlangen.

**Maßnahmen zur Akzeptanzsteigerung** Bei allen zu realisierenden Projekten sollten die Transparenz und die frühzeitige Einbeziehung der Betroffenen beachtet werden, um vorhandenen Bedenken und Einwänden angemessen begegnen zu können. Die durchgeführten Maßnahmen und Projektinformationen könnten zusammen mit weiteren wichtigen Angaben wie z. B. zu Kontaktpersonen in der Verwaltung, über ein Online-Portal zur Verfügung gestellt werden. Dieses könnte durch entsprechende Öffentlichkeitsmaßnahmen auch im Rahmen des IKK bekannt gemacht werden.

## Literatur

- Abohela, Islam, Neveen Hamza, and Steven Dudek (2013): “Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines”. In: *Renewable Energy* 50, pp. 1106–1118.
- Ahmed, N.A. (2013): “A novel small scale efficient wind turbine for power generation”. In: *Renewable Energy* 57, pp. 79–85.
- Ament, Björn (2016): *Informationen zu Wind-Area - Persönliche Mitteilung vom 12.02.2016*.
- Ayhan, Dursun and Safak Saglam (2012): “A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, pp. 1040–1049.
- Balduzzi, Francesco et al. (2012a): “Feasibility analysis of a Darrieus vertical-axis wind turbine installation in the rooftop of a building”. In: *Applied Energy* 97, pp. 921–929.
- Balduzzi, Francesco, Alessandro Bianchini, and Lorenzo Ferrari (2012b): “Microeolic turbines in the built environment: Influence of the installation site on the potential energy yield”. In: *Renewable Energy* 45, pp. 163–174.
- Bauer, Lorenz (2007): *Windstation - Ein Konzept für die Nutzungs- und Publikationsmöglichkeit der Vertikalrotoranlage der Firma Tassa*. Burg Giebichenstein. URL: <http://www.burg-halle.de/~schikora/wind/windwasserstoff/lorenz/Dokumentation-Windstation.pdf> (besucht am 11.05.2016).
- Bofinger, Stefan u. a. (2012): *Potenzial der Windenergienutzung an Land - Kurzfassung*. Berlin. URL: [https://www.windenergie.de/sites/default/files/download/publication/studie-zum-potenzial-der-windenergienutzung-land/bwe\\_potenzialstudie\\_kurzfassung\\_2012-03.pdf](https://www.windenergie.de/sites/default/files/download/publication/studie-zum-potenzial-der-windenergienutzung-land/bwe_potenzialstudie_kurzfassung_2012-03.pdf) (besucht am 23.01.2016).
- Bolsius, Jens u. a. (2014): *Gebäudeintegrierte Windenergie - Forschungsbericht*. Wissenschaftliche Berichte 123. Zittau: Hochschule Zittau/Görlitz. URL: <http://f-w.hszg.de/forschung/forschungsprojekte/windkraftanlagen/download.html> (besucht am 18.12.2015).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016): *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*. URL:

- [http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2015.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=6) (besucht am 30.04.2012).
- Bussel, Gerard van (2013): "Electricity Generation with Small Wind Turbines". In: *Renewable Energy Systems*. Ed. by Martin Kaltschmitt. New York, pp. 696–727.
- Drew, D. R., J. F. Barlow, and T. T. Cockerill (2013): "Estimating the potential yield of small wind turbines in urban areas - a case study for Greater London, UK". In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 115, pp. 104–111.
- Fehrenbach, Horst (2009): *Pilotstudie zur Akzeptanz vertikaler Windenergieanlagen - Arbeitspaket Umweltverträglichkeit und Ökobilanz vertikaler Windenergieanlagen*. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. URL: <http://www.ifeu.de/energie/pdf/UV%20und%20ökobilanz%20vertikaler%20Windenergieanlagen.pdf> (besucht am 25.12.2015).
- Fest, Phillip (2013): »Genehmigungsrecht von Kleinwindanlagen«. In: *Kleinwindanlagen - Handbuch der Technik, Genehmigung und Wirtschaftlichkeit kleiner Windräder*. Hrsg. von Bundesverband WindEnergie e.V. 2. Aufl. Berlin, S. 159–167.
- Franken, Marcus (2013): *Kleinwindanlagen - Handbuch der Technik, Genehmigung und Wirtschaftlichkeit kleiner Windräder*. Hrsg. von Bundesverband WindEnergie e.V. 2. Aufl. Berlin.
- Gasch, Robert und Jochen Twele (2010): *Windkraftanlagen - Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*. 6. Aufl. Wiesbaden.
- Gipe, Paul (2009): *Wind Energy Basics - A Guide to Home- and Community-Scale Wind Energy Systems*. 2nd ed. White River Junction, Vermont.
- Gottschick, Manuel (2016): *Daten zur Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz Bergedorf - Persönliche Mitteilungen vom 25. und 28.04.2016*.
- Grieser, Benno, Yasin Sunak, and Reinhard Madlener (2015): "Economics of small wind turbines in urban settings: An empirical investigation for Germany". In: *Renewable Energy* 78, pp. 334–350.
- Gsänger, Stefan et al. (2014): *Small Wind World Report*. Bonn: World Wind Energy Association. URL: [http://worldwideenergy.org/wwe/desktop/en/ostigreen/service/link/track?searchId=6a703498-fbea-460a-9eab-9c69bb71b2ae&type=RESULT&collectionCode=WWE-GWC&redirectUrl=http%3A%2F%2Fwww.dewek.de%2Ffileadmin%2Fdownloads%2FBook\\_of\\_Abstracts\\_2015.pdf%23xml%3Dhttp%3A%2F%2Fwebindexer.osti.gov%2Fcgi-bin%2Ftaxis%2Fwebinator%2Fsearch%2Fpdfhi.txt%3Fquery%3Dsmall%2Bwind%2Burban%26pr%3Dwwe\\_etde\\_de%26prox%3Dpage%26rorder%3D500%26prox%3D500%](http://worldwideenergy.org/wwe/desktop/en/ostigreen/service/link/track?searchId=6a703498-fbea-460a-9eab-9c69bb71b2ae&type=RESULT&collectionCode=WWE-GWC&redirectUrl=http%3A%2F%2Fwww.dewek.de%2Ffileadmin%2Fdownloads%2FBook_of_Abstracts_2015.pdf%23xml%3Dhttp%3A%2F%2Fwebindexer.osti.gov%2Fcgi-bin%2Ftaxis%2Fwebinator%2Fsearch%2Fpdfhi.txt%3Fquery%3Dsmall%2Bwind%2Burban%26pr%3Dwwe_etde_de%26prox%3Dpage%26rorder%3D500%26prox%3D500%)

- 26rdfreq%3D500%26rwfreq%3D500%26rlead%3D500%26rdepth%3D0%26sufs%3D0%26order%3Dr%26cq%3D%26id%3D5663850d7 (visited on 02/27/2016).
- Hain, Ancilla (2014): »Wirtschaftlichkeit«. In: *Gebäudeintegrierte Windenergie - Forschungsbericht*. 123. Zittau: Hochschule Zittau/Görlitz. Kap. 12, S. 66–70. URL: <http://f-w.hszg.de/forschung/forschungsprojekte/windkraftanlagen/download.html> (besucht am 18.12.2015).
- Halbhuber, Winfried (2009): »Betrieb von Kleinwindkraftanlagen - ein Überblick über Markt, Technik und Wirtschaftlichkeit«. Diplomarbeit. Wien: TU Wien - Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft. URL: <http://www.ub.tuwien.ac.at/dipl/2009/AC07806512.pdf>.
- Hau, Erich (2014): *Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg.
- Heier, Siegfried (2007): *Nutzung der Windenergie*. 5. Aufl. Informationspaket. Berlin: Solarpraxis AG.
- (2009): *Windkraftanlagen - Systemauslegung, Netzintegration und Regelung*. 5. Aufl. Wiesbaden.
- Hübner, Gundula und Johannes Pohl (2015): *Mehr Abstand - mehr Akzeptanz? Ein umweltpsychologischer Studienvergleich*. Berlin: Fachagentur Windenergie an Land. URL: [http://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Akzeptanz/FA-Wind\\_Abstand-Akzeptanz\\_Broschuere\\_2015\\_web.pdf](http://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Akzeptanz/FA-Wind_Abstand-Akzeptanz_Broschuere_2015_web.pdf) (besucht am 26.12.2015).
- Hübner, Gundula, Johannes Pohl u. a. (2010): *Pilotstudie zur Akzeptanz vertikaler Windenergieanlagen - Kurzfassung Abschlussbericht*. Halle/Saale: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. URL: <http://www.ifeu.de/energie/pdf/UV%20und%20Ekobilanz%20vertikaler%20Windenergieanlagen.pdf> (besucht am 27.12.2015).
- Hupfer, Peter (2005): *Witterung und Klima*. Hrsg. von Peter Hupfer. Wiesbaden.
- Kaltschmitt, Martin, Wolfgang Streicher und Andreas Wiese (2014): *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Hrsg. von Andreas Wiese. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg.
- Klärle, Martina und Ute Langendörfer (2014): »WIND-AREA – Automatisierte Standortanalyse für Kleinwindkraftanlagen auf der Basis von 3D-Geodaten«. In: *gis.Science* 27, S. 73–76.
- Konow, Heike (2014): »Tall wind profiles in heterogeneous terrain«. Diss. Universität Hamburg, Fachbereich Geowissenschaften.
- Kost, Christoph u. a. (2013): *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien*. Freiburg: Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen->

- pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.pdf (besucht am 26.04.2016).
- Lange, Ingo (2016): *Daten vom Wettermast Hamburg Billwerder des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg aus dem Zeitraum 2012 bis 2015 - Persönliche Mitteilungen vom 31.01. und 06.04.2016.*
- Latzer, Daniel (2013): »Potentialabschätzung von Kleinwindenergie im urbanen Raum - Strategische Standortsuche mit GIS Methoden«. Diplomarbeit. TU Wien, Fakultät Architektur und Raumplanung. URL: <http://www.ub.tuwien.ac.at/dipl/2013/AC10774871.pdf> (besucht am 07.02.2016).
- Ledo, L., P.B. Kosasih, and P. Cooper (2011): "Roof mounting site analysis for micro-turbines". In: *Renewable Energy* 36, pp. 1379–1391.
- Leonhartsberger, Kurt u. a. (2015): »Kleinwindkraftanlagen - Qualitätssicherung, Netzeinbindung und Standortbewertung«. In: 9. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien. Wien. URL: [http://eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at\\_pages/events/iewt/iewt2015/uploads/fullpaper/P\\_318\\_Leonhartsberger\\_Kurt](http://eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at_pages/events/iewt/iewt2015/uploads/fullpaper/P_318_Leonhartsberger_Kurt) (besucht am 10.01.2016).
- Lubitz, William David (2014): "Impact of ambient turbulence on performance of a small wind turbine". In: *Renewable Energy* 61, pp. 69–73.
- Mertens, Sander (2003): "The energy yield of roof mounted wind turbines". In: *Wind Engineering* 27.6, pp. 507–518.
- Mertens, Sander, Gijs van Kuik, and Gerard van Bussel (2003): "Performance of a H-Darrieus in the Skewed Flow on a Roof". In: *Journal of Solar Energy Engineering* 125, pp. 433–440.
- Millward-Hopkins, J. T. et al. (2013a): "Assessing the potential of urban wind energy in a major UK city using an analytical model". In: *Renewable Energy* 60, pp. 701–710.
- (2013b): "Mapping the wind resource over UK cities". In: *Renewable Energy* 55, pp. 202–211.
- Our Common Future Consulting (2016): »Bergedorf setzt Klimazeichen«. In: Integriertes Klimaschutzkonzept Bergedorf. Hamburg.
- Prall, Uwe und Wolfgang Ewer (2014): »Klimaschutz durch Energierecht«. In: *Umweltrecht*. Hrsg. von Hans-Joachim Koch. München. Kap. 9.
- Quaschnig, Volker (2011): *Regenerative Energiesysteme - Technologie, Berechnung, Simulation*. 7. Aufl. München.
- Rauert, Thes (2016): *Daten der LiDAR-Messung Curslack des Competence Center Erneuerbare Energien und Energieeffizienz (CC4E) der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg aus dem Zeitraum 2012 bis 2015 - Persönliche Mitteilung vom 31.03.2016.*

- Sáenz-Diez Muro, J. C. et al. (2010a): “Cornice modular wind collector© for collection and amplification of the vertical wind component in buildings for generation of small wind electric energy”. In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality. URL: <http://www.icrepq.com/icrepq'11/642-saenz.pdf> (visited on 02/25/2016).
- (2010b): “Two-Dimensional Model of Wind Flow on Buildings to optimize the Implementation of Mini Wind Turbines in Urban Spaces”. In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality. URL: <http://icrepq.com/icrepq'10/671-Saenz-Diez.pdf> (visited on 02/25/2016).
- Scholz, Katharina (2014): »Gesellschaftliche Akzeptanz - eine Untersuchung im ostsächsischen Raum«. In: *Gebäudeintegrierte Windenergie - Forschungsbericht*. 123. Zittau. Kap. 10, S. 44–53. URL: <http://f-w.hszg.de/forschung/forschungsprojekte/windkraftanlagen/download.html> (besucht am 18.12.2015).
- Sunderland, Keith et al. (2013): “Small wind turbines in turbulent (urban) environments: A consideration of normal and Weibull distributions for power prediction”. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 121, pp. 70–81.
- Tiju, Willy et al. (2015): “Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations”. In: *Renewable Energy* 75, pp. 50–67.
- Twele, Jochen u. a. (2013): *Empfehlungen zum Einsatz kleiner Windenergieanlagen im urbanen Raum - Ein Leitfaden*. Berlin: Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin. URL: [http://kleinwind.htw-berlin.de/website/fileadmin/data/Download/Kleinwind\\_Handlungsempfehlungen\\_HTW-Berlin.pdf](http://kleinwind.htw-berlin.de/website/fileadmin/data/Download/Kleinwind_Handlungsempfehlungen_HTW-Berlin.pdf) (besucht am 10.01.2016).
- Walker, Sara Louise (2011): “Building mounted wind turbines and their suitability for the urban scale—A review of methods of estimating urban wind resource”. In: *Energy and Buildings* 43, pp. 1852–1862.

## Online-Quellen

- Anerdgy (2015): *Windrail*. URL: <http://www.enerdgy.com/de/windrail-home-de> (besucht am 09.05.2016).
- Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg (BSU) (2015): *Schleusenegraben Bergedorf*. URL: <https://www.hamburg.de/bsw/wohnungsbauprojekte/4327982/schleusenegraben-bergedorf/> (besucht am 01.05.2016).
- Bundesnetzagentur (2015): *Anlagenregister EEG*. URL: [http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen\\_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Anlagenregister/](http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Anlagenregister/)

- V0eFF\_Anlagenregister/2015\_12\_Veroeff\_AnIReg.xls?\_\_blob=publicationFile&v=2 (besucht am 25.02.2016).
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2016): *Strompreisanalyse Januar 2016*. URL:  
[https://bdew.de/internet.nsf/res/70842D8DCAE68ED3C1257F45003858BC/\\$file/160119\\_BDEW\\_Strompreisanalyse\\_Januar2016.pdf](https://bdew.de/internet.nsf/res/70842D8DCAE68ED3C1257F45003858BC/$file/160119_BDEW_Strompreisanalyse_Januar2016.pdf) (besucht am 12.04.2016).
- DWD - Deutscher Wetterdienst (2016): *Windkarten*. URL:  
<http://www.dwd.de/DE/leistungen/windkarten/windkarten.html> (besucht am 04.04.2016).
- Finanzbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg (2016): *Organisation der Bezirksämter*. URL: <http://www.hamburg.de/bezirke/74112/organisation/> (besucht am 09.05.2016).
- Hallenga, Uwe (2010): *Kleinwindanlagen.de*. URL:  
[http://www.kleinwindanlagen.de/Homepage/index.php?option=com\\_content&view=article&id=119:netzeinspeisung&catid=43:thema-tipps&Itemid=129](http://www.kleinwindanlagen.de/Homepage/index.php?option=com_content&view=article&id=119:netzeinspeisung&catid=43:thema-tipps&Itemid=129) (besucht am 30.04.2016).
- Hamburg Energie (2012): *Hamburger Solaratlas*. URL:  
<http://www.hamburgenergie.de/privatkunden/energieerzeugung/solaratlas/> (besucht am 24.04.2016).
- Khammas, Achmed A. W. (2013): *Buch der Synergie*. URL: [http://www.buch-der-synergie.de/c\\_neu\\_html/c\\_08\\_09\\_windenergie\\_andere\\_systeme.htm#Drachen](http://www.buch-der-synergie.de/c_neu_html/c_08_09_windenergie_andere_systeme.htm#Drachen) (besucht am 02.02.2016).
- Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Hamburg (2016a): *ALKIS® in Hamburg*. URL: <https://www.hamburg.de/bsw/alkis/> (besucht am 30.04.2016).
- (2016b): *GEO-Portal Hamburg*. URL:  
<http://www.geoportal-hamburg.de/Geoportal/geo-online/index.html> (besucht am 23.04.2016).
- Rachaeledwards (2016): URL: <http://rachaeledwards.com/focus/solar-energy-companies-in-india-list-of-solar-power-companies.html> (visited on 05/09/2016).
- Senat der Freien und Hansestadt Hamburg (2013): *Masterplan Klimaschutz*. URL:  
<http://www.hamburg.de/contentblob/4050236/data/masterplan-klimaschutz.pdf> (besucht am 24.04.2012).
- Statistikamt Nord (2015): *Daten für meine Region: Hamburg*. URL:  
<http://region.statistik-nord.de/detail/10000000000000/2/0/227752/> (besucht am 23.04.2016).
- TU Delft (2013): *Windenergy convertor EWICON animation*. URL:  
<https://www.youtube.com/watch?v=tqksCHWROBU> (visited on 02/08/2016).

## **Normen**

International Electrotechnical Commission (IEC) (2013): *IEC 61400-2*.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2002): *VDI Richtlinie 6012*.