

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

Diplomarbeit

Potentialabschätzung von Kleinwind-energie im urbanen Raum

Strategische Standortsuche mit GIS Methoden

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.Prof. Mag. Dr. Rudolf Giffinger und

Univ.Ass. Dipl.Ing. Robert Kalasek als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

Fachbereich Stadt- und Regionalforschung E 280/2

Department für Raumplanung

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät Architektur und Raumplanung

von

Daniel Latzer

0331158

Illstraße 7, 6710 Nenzing

e: daniel.latzer@me.com

Wien, am 7. Juni 2013

Diplomarbeit

Potentialabschätzung von Kleinwind- energie im urbanen Raum

Strategische Standortsuche mit GIS Methoden

Unter der Leitung von

Univ.Prof. Mag. Dr. Rudolf Giffinger und

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Robert Kalasek als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

der Technischen Universität Wien

Mit freundlicher Unterstützung von

MMag. Michael Maritschnegg

Dipl.-Ing. Dr. Mirza Popovac

Mag^a Drⁱⁿ Renate Teppner

des AIT Austrian Institute of Technology

eingereicht von

Daniel Latzer

0331158

Illstraße 7, 6710 Nenzing

e: daniel.latzer@me.com

Wien, am 7. Juni 2013

Ventis secundis.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit bei Begriffen auf die Anführung von maskulinen und femininen Formen verzichtet, die maskuline Schreibweise, auch jene des Plurals, bezieht stets Frauen und Männer mit ein.

Kurzfassung

Um das ehrgeizige Ziel, den Anteil an regenerativen Energiequellen deutlich zu erhöhen, auch zu erreichen, bedarf es neben einem Ausbau von Wasserkraft, Solar- und Bioenergie einen entsprechenden Ausbau der Windenergie.

Diese Arbeit widmet sich den Möglichkeiten und Herausforderungen der Windenergie im Kleinen sowie deren Einsatzmöglichkeiten und Potentialen im urbanen Umfeld. Diese sogenannte Kleinwindenergie erfreut sich erhöhter Aufmerksamkeit. Vorteilhaft scheint vor allem der Aspekt einer dezentralen Energiebereitstellung zu sein, indem elektrische Energie genau dort erzeugt wird, wo sie auch benötigt und verbraucht wird.

Eine gewichtige Fragen scheint dabei bisweilen unzureichend beantwortet:

Gibt es Möglichkeiten das Kleinwindpotential für einen Stadtraum modellhaft abzubilden um mögliche Potentiale zu identifizieren?

Diese Fragestellung und solche den möglichen Konfliktraum Stadt betreffende, technische und rechtliche Rahmenbedingungen, umweltrelevante und soziale Aspekte werden behandelt.

Ein in Kooperation mit dem Austrian Institute of Technology entwickeltes GIS-Werkzeug zeigt eine Möglichkeit der Modellbildung. Für einen Stadtraum und verschiedenen städtebaulichen Konfigurationen werden darüber hinaus Potentialabschätzungen bezüglich Kleinwindenergie demonstriert.

Es wird dargestellt, dass bei aller Komplexität der Thematik durchaus nicht nur Möglichkeiten einer Formalisierung mittels GIS Methoden, sondern auch gewisse Potentiale für eine kleine Energieerzeugung bestehen.

Abstract

In order to also achieve the ambitious goal of the European Union to increase the share of renewable energy sources in gross final energy consumption significantly, it requires not only an expansion of hydropower, solar energy and biomass but also a corresponding expansion of wind energy.

This master thesis is dedicated to the opportunities and challenges of wind energy on a small scale as well as its capability and potentials in the urban environment. Small wind energy generally enjoys increasing attention. A significant advantageous aspect of small wind power generation is the issue of decentralised energy supply: electrical energy is produced exactly where it is needed and consumed.

Until now, a very important question seems to be answered just insufficiently:

Are there any opportunities to depict the potential of small wind power for urban spaces?

This question and others, dealing with the potential conflictual setting of urban spaces as well as with technical aspects of wind power, the existing legal framework and environmental as well as social aspects are reviewed and intensely discussed.

One chapter of this thesis deals with a specific GIS-tool, which had been developed in close cooperation with the Austrian Institute of Technology (AIT); this tool illustrates one method of modelling the small wind power potential in urban areas. Additionally the thesis discusses a case study in Vienna as well as different urban configurations underlining the wind power potential of different buildings heights and densities.

The thesis shows that – due to the high complexity of the topic – there do not only exist possibilities of formalization using GIS methods, but also some potential for small scale energy production.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	IV
Abstract.....	V
Inhaltsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Problemabriss und Zielsetzung	2
1.2 Aufbau der Arbeit.....	3
2 Grundlagen in Wind und Windenergie.....	5
2.1 Meteorologische Determinanten	5
2.2 Physikalische Determinanten.....	12
2.3 Allgemeines zu Windenergieanlagen.....	22
2.3.1 Typische Unterscheidung von Windenergieanlagen	23
2.3.2 Horizontalachsenrotoren.....	24
2.3.3 Vertikalachsenrotoren.....	25
2.4 Abriss zu Kleinwindenergieanlagen.....	27
2.4.1 Abgrenzung von Kleinwindenergieanlagen	28
2.4.2 Dimensionierung und Anlageneignung	28
3 Windenergienutzung im urbanen Raum.....	33
3.1 Technische Herausforderungen.....	33
3.1.1 Gebäudegeometrie.....	33
3.1.2 Statik	35
3.1.3 Dynamik.....	35
3.1.4 Elektrotechnik	36
3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	37
3.2.1 Bauordnung für Wien	38
3.2.2 Wiener Elektrizitätswirtschaftsgesetz 2005.....	40
3.2.3 Wiener Umweltschutzgesetz	41
3.2.4 Wiener Naturschutzgesetz	42
3.2.5 Ökostromgesetz 2012	42

3.2.6 Sonstige Gesetze und Verordnungen	42
3.3 (Stadt-)Planerische und umweltrelevante Aspekte	43
3.3.1 Systembezogene Umweltverträglichkeit.....	43
3.3.2 Standortbezogene Umweltverträglichkeit	44
3.3.3 Standortbezogene „Quartiersverträglichkeit“	47
3.4 Sozialwissenschaftliche Aspekte	49
4 Potentialabschätzung mit GIS-Methoden.....	52
4.1 Methodik und Datengrundlagen.....	53
4.1.1 Mathematische Modellannahmen.....	53
4.1.2 Datengrundlagen und Herangehensweise	57
4.2 Modellierung des Windenergiepotenzials	59
4.3 Oberfläche und Nutzung des Werkzeugs.....	72
5 Modellierungsergebnisse	76
5.1 Variante 0 Fallbeispiel „Kagran“	76
5.2 Variante 1	79
5.3 Variante 2	80
5.4 Variante 3	82
5.5 Variante 4	83
6 Resümee und Empfehlungen	86
6.1 Forschungsempfehlungen	88
6.2 Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des GIS-Werkzeugs	89
7 Quellenverzeichnis	90
7.1 Literaturquellen.....	90
7.2 Onlinequellen	93
7.3 Rechtsquellen.....	95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit.....	4
Abbildung 2: Ausgleichsströmungen am Äquator	6
Abbildung 3: Globale Zirkulation	7
Abbildung 4: Ekman Spirale	9
Abbildung 5: Land- / Seewind Zirkulation	10
Abbildung 6: Hangwindssystem und Berg-Tal-Windsystem	11
Abbildung 7: Idealisierter Strömungsverlauf bei einer frei umströmten Windturbine	16
Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit	18
Abbildung 9: Gebäudeabhängiger Turbulenzbereich	19
Abbildung 10: Geländeabhängiger Beschleunigungsbereich.....	20
Abbildung 11: Vertikales Windprofil in Abhängigkeit der Rauigkeitslänge und Versatzhöhe.....	21
Abbildung 12: Vertikales Windprofil in Abhängigkeit der Rauigkeitslänge.....	22
Abbildung 13: Schematische Darstellung und Aufnahme eine horizontalachsgelagerten WEA	25
Abbildung 14: Beispiele vertikalachsgelagerten WEA	26
Abbildung 15: Übersicht der Bauarten von (K)WEA	27
Abbildung 16: Leistungskennlinie und Leistungsbeiwert.....	29
Abbildung 17: Strömungsablösung bei senkrecht auftreffender Windströmung.....	34
Abbildung 18: Systemgrenze einer Ökobilanzuntersuchung.....	44
Abbildung 19: Lärmimmissionsgrenzwerte nach ÖNORM	46
Abbildung 20: Drei Dimensionen sozialer Akzeptanz erneuerbarer Energieinnovationen .	49
Abbildung 21: Geometrie, Windprofil und Windrichtungsverteilung für einen städtebaulichen Ausschnitt.....	54
Abbildung 22: Idealisierte urbane Konfiguration	55
Abbildung 23: Flussdiagramm des fertigen Modelles.....	59
Abbildung 24: Schemadarstellung Flussdiagramm	60
Abbildung 25: Flussdiagramm Teilbereich A	60
Abbildung 26: Schemadarstellung Teilbereich A.....	61
Abbildung 27: Flussdiagramm Teilbereich B.....	61

Abbildung 28: Schemadarstellung Teilbereich B	61
Abbildung 29: Flussdiagramm Teilbereich C	62
Abbildung 30: Schemadarstellung Teilbereich C	62
Abbildung 31: Flussdiagramm Teilbereich D	63
Abbildung 32: Schemadarstellung Teilbereich D	63
Abbildung 33: Flussdiagramm Teilbereich E.....	64
Abbildung 34: Schemadarstellung Teilbereich E	65
Abbildung 35: Submodell für die Berechnung des Anteils an überbauter Fläche	66
Abbildung 36: Flussdiagramm Teilbereich F.....	66
Abbildung 37: Schemadarstellung Teilbereich F.....	66
Abbildung 38: Flussdiagramm Teilbereich G	67
Abbildung 39: Schemadarstellung Teilbereich G.....	68
Abbildung 40: Flussdiagramm Teilbereich H.....	68
Abbildung 41: Schemadarstellung Teilbereich H.....	69
Abbildung 42: Flussdiagramm Teilbereich I.....	70
Abbildung 43: Schemadarstellung Teilbereich I.....	70
Abbildung 44: Flussdiagramm Teilbereich J.....	71
Abbildung 45: Schemadarstellung Teilbereich J.....	71
Abbildung 46: Inhalte der „Toolbox“	72
Abbildung 47: Eingabemaske.....	73
Abbildung 48: Eingabemaske Fallbeispiel Kagran	77
Abbildung 49: Energiedichte Fallbeispiel Kagran.....	78
Abbildung 50: Energiedichte Fallbeispiel Kagran in 3D	79
Abbildung 51: Energiedichte Variante 1.....	80
Abbildung 52: Energiedichte Variante 2.....	81
Abbildung 53: Energiedichte Variante 3.....	82
Abbildung 54: Energiedichte Variante 4.....	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beaufort-Skala.....	13
Tabelle 2: Dichte der Luft in Abhängigkeit der Temperatur bei einem Luftdruck von 1bar (1.000 hPa)	15
Tabelle 3: Leistungskategorien von KWEA.....	28
Tabelle 4: Eignungskategorien für Kleinwind	76
Tabelle 5: Inputparameter Fallbeispiel Kagran.....	77
Tabelle 6: Inputparameter Variante 1.....	79
Tabelle 7: Inputparameter Variante 2.....	80
Tabelle 8: Inputparameter Variante 3.....	82
Tabelle 9: Inputparameter Variante 4.....	83

1 Einleitung

Klimawandel und Ressourcenverknappung, Umweltbelastungen, Nachhaltigkeit und Resilienz: die Bedeutung von erneuerbaren Energieträgern nimmt nach wie vor zu.

Auf europäischer Ebene und nicht zuletzt durch die Mitgliedstaaten wurde ein Zielpaket geschnürt, welches sich diesem Phänomen annimmt. Daraus wurden durchaus ambitionierte Ziele zum Klimaschutz formuliert, wobei ein großes Gewicht zur Zielerreichung dabei der Energiebereitstellung und -effizienz zugemessen wird. Diese **20-20-20 Ziele**, bestehend aus

- 20 % weniger Treibhausgasemissionen bezogen auf 2005,
- 20 % Anteil an erneuerbaren Energien und
- 20 % mehr Energieeffizienz,

sollen wesentliche Pfeiler zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 sein. Das nationale Zielprogramm in Österreich sieht darüber sogar einen Anteil an erneuerbaren Energieträgern am Brutto-Endenergieverbrauch von 34% für das Jahr 2020 vor (vgl. E-Control 2013: online).

Um diesen ehrgeizigen Anteil an regenerativen Energiequellen zu erreichen, bedarf es demnach einen Ausbau von Solar-, Bio-, Windenergie und Wasserkraft als Alternativen zur Energieerzeugung auf fossiler Basis.

Die vorliegende Arbeit widmet sich den Möglichkeiten und Herausforderungen der Windenergie im Kleinen sowie deren Einsatzmöglichkeiten und Potentialen im urbanen Umfeld. Diese sogenannte Kleinwindenergie ist aus ihrem wenig beachteten Nischendasein im kontinentalen Europa nun zu einem vertieften Forschungsgegenstand herangewachsen; eine Vielzahl aktueller Studien deutet darauf hin. Vorteilhaft scheint vor allem der Aspekt einer dezentralen Energiebereitstellung zu sein, indem elektrische Energie genau dort erzeugt wird, wo sie auch benötigt und verbraucht wird.

Eine gewichtige Frage scheint bisweilen allerdings unzureichend beantwortet: Existiert aus energetischer Sicht ein ausreichendes Potential für Kleinwindenergieanlagen im städtischen Raum?

Diese Fragestellung und solche den möglichen Konfliktraum Stadt betreffende, technische und rechtliche Rahmenbedingungen sollen in dieser Thesis behandelt und modellierte Potentialabschätzungen für beispielhafte städtebauliche Konfigurationen beispielhaft gezeigt werden. Ein Anspruch auf Vollständigkeit besteht dabei freilich nicht, jedoch aber jener, für die aktuellen Forschungsbestrebungen mit objektiven und formalisierten Modellierungsmöglichkeiten einen Beitrag zu leisten.

1.1 Problemabriss und Zielsetzung

Der Bereich der erneuerbaren Energieträger ist in der Zeit der angestrebten Energiewende von äußerst hoher Wichtigkeit. Eine mögliche regenerative Quelle ist auch die Windenergie. Diese hat in den letzten Dekaden einen deutlichen Aufschwung erlebt und soll gemäß unterschiedlicher Energiefahrplänen (vgl. Amt der NÖ LReg 2011, BMWFJ, BMLFUW 2010) auch weiterhin ausgebaut werden.

Im Themenfeld Windenergie werden zudem auch immer wieder Off-Shore Projekte und – wenn man so will – als Gegenpol dazu die Kleinwindenergie diskutiert. Diese Diskussionen sind dabei durchaus kontrovers und spiegeln darüber hinaus die Debatten über die strategische Ausrichtung von zentraler versus dezentraler Energiebereitstellung wider.

In der jüngeren Vergangenheit ist die Kleinwindenergie vermehrt in den Fokus von einzelnen Studien und Leitfäden gerückt, die teilweise zu sehr unterschiedlichen Erkenntnissen und Resümees gelangen sind. Es gibt Aussagen, die dem Kleinwind vor allem im urbanen Raum überhaupt keine Bedeutung zumessen aber auch jene Forderungen, die eine verstärkte praxisorientierte Forschung einfordern.

Die Leitfrage der vorliegenden Arbeit lautet daher:

Besitzt „kleiner Wind“ großes Potential?

Der Zweck dieser Arbeit liegt nun darin, diese Potentialfrage, wenn auch nur für beispielhafte Gebietsstrukturen, zu beantworten. Dabei werden grundlegende Herausforderungen vorwiegend in technischer Hinsicht behandelt. Darüber hinaus werden außerdem Aspekte aus dem Rechtsbereich, umweltrelevante und planerische Aspekte sowie sozialwissenschaftliche Themenfelder gestreift; ökonomische Aspekte werden größtenteils nicht behandelt. Das Hauptaugenmerk liegt aber in der formalen Modellierungsmöglichkeit des Kleinwindpotentials im Stadtraum.

Ein Stadtraum als Untersuchungsrahmen erfordert zu einer Modellbildung entsprechende Werkzeuge. Werkzeuge mit denen man räumliche Sachverhalte abbilden und mit ortsbezogenen Daten auch analytisch arbeiten kann sind Geographische Informationssysteme (GIS). Unter der Voraussetzung ein GIS zur Analyse bzw. Modellbildung von Kleinwind zu verwenden stellt sich die nächste wichtige Frage:

Wie können Kleinwindpotentiale im urbanen Raum durch geographische Informationssystemen abgebildet und berechnet werden?

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde eine beispielhafte GIS-Modellierung entwickelt, welche in dieser Arbeit auch entsprechend vorgestellt wird.

Eine Modellierung von Windverhältnissen – davon hängt in erster Linie das energetische Potential ab – ist eine äußerst komplexe Angelegenheit und wird deshalb sehr häufig stark

vereinfacht durchgeführt. Eine formale Vereinfachung findet auch in dieser Arbeit statt, wobei eine GIS-Modellierung des Kleinwindpotentials generell noch nicht weit verbreitet scheint. Hervorzuheben ist, dass der vorgestellte Ansatz nicht rein von bestehenden Windkartendaten ausgeht und diese entsprechend der vorherrschenden Bebauung an der jeweiligen Stelle abschätzt, sondern hier die jeweilige (und variable) Nachbarschaft in die Berechnung mit einfließt. Die Ergebnisse sind daher besonders auf kleine Teilräume einer Stadt abgestimmt und nicht auf ganze Städte. Dies wird wie gesagt anhand von beispielhaften städtebaulichen Konfigurationen dargestellt, wobei sich sogleich eine weiterführende Fragestellung ergibt:

Wie hoch ist das Potential für Kleinwind in einem bestimmten Stadtteil?

Hierzu wird eines Fallbeispiele des Wiener Stadtraums graphisch demonstriert und erläutert, wobei sich bei Heranziehung der behandelten Herausforderungen die folgende Frage stellt:

Welche Empfehlungen können für die Stadt Wien formuliert werden?

Für die Stadt Wien sollen Empfehlungen für den Forschungs- und Förderungsbereich formuliert werden, um einen möglichen zukünftigen Umgang mit dieser Art der Energiebereitstellung zu skizzieren.

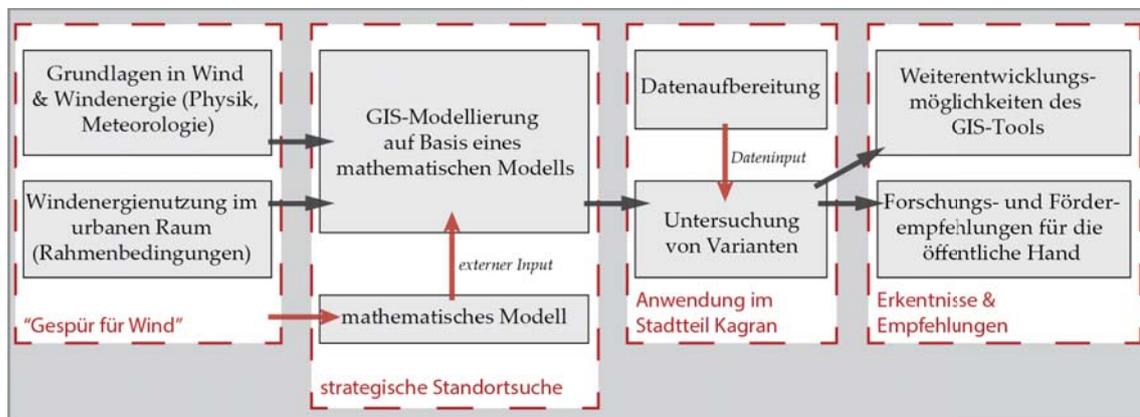
Abschließend werden verschiedene **Weiterentwicklungsmöglichkeiten des GIS-Tools** thematisiert.

1.2 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit ist im Wesentlichen in vier Abschnitte (vgl. Abbildung 1) gegliedert, wobei im ersten Teil die meteorologischen und physikalischen Grundlagen sowie die Bedingungen und Herausforderungen des urbanen Raumes behandelt werden. Diese Themenfelder sind dafür bedeutsam, um ein richtiges „Gespür für Wind“ zu bekommen, da ohne ein grundlegendes Verständnis für Windeigenschaften und die urbanen Spezifika der Windenergie eine Implementierung von formaler Mathematik in eine Modellierung nicht möglich erscheint.

Diese Modellierung wird auf Grundlagen eines mathematischen Modelles im zweiten Abschnitt der Arbeit vorgestellt. Dieser Teil ist mit Unterstützung des AIT Austrian Institute of Technology entwickelt worden. Das AIT hat das mathematische Beschreibungsmodell zur Verfügung gestellt, außerdem stellte es fachliche Beratung und Betreuung sowie die nötige Infrastruktur zur GIS-Modellierung bereit. Die Modellierung ist dabei durch Ergebnisse von vorangegangenen Untersuchungen des AIT, welche eine andere Methodik verwenden haben, verifiziert worden.

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit



Quelle: eigene Bearbeitung 2013

Es folgt im dritten Abschnitt neben entsprechender Datenaufbereitung eine Untersuchung des Fallbeispiels Kagran mit unterschiedlichen Modifikationen sowie die Visualisierung der Modellierungsergebnisse. Dies soll einerseits die Verwendbarkeit des entwickelten Werkzeugs demonstrieren und andererseits beispielhafte Diskussion auf Basis eines konkreten Raumes in Wien ermöglichen.

Im letzten Teil der Arbeit werden Empfehlungen für die öffentliche Hand und auch beispielhafte Weiterentwicklungsmöglichkeiten des GIS-Werkzeuges behandelt, die aus den vorangehenden Bearbeitungsschritten ableitbar sind.

Dem Autor als äußerst wichtig erscheinende Zusammenhänge und Sachverhalte sind durch eine graue Box hervorgehoben.

2 Grundlagen in Wind und Windenergie

Im vierten Jahrhundert vor Christus ist Aristoteles in seinen Abhandlungen zur Meteorologie von insgesamt acht Winden ausgegangen, bestehend aus den Hauptrichtungen und den ersten Nebenrichtungen. Der Turm der Winde in Athen zeugt noch heute von dieser mythischen Zeit, in der den jeweiligen Himmelsrichtungen verschiedene Gottheiten – die Anemoi – zugeschrieben wurden (vgl. Häckel 2012: 252).

Zweitausend Jahre später hat der Wind einen Teil dieser rätselhaften Essenz eingebläht, er wird definiert als:

- Wind ist „*spürbar stärker bewegte Luft im Freien*“ (Duden 2012: online).
- „*Die Bewegung der Luft bezeichnet man als Wind*“ (Austro Control 2012: online).

In dieser Bewegung der Luft ist allerdings schon eine physikalische Eigenschaft gegeben, welche sich die Menschheit vermutlich schon im vorchristlichen Babylon zu nutzen machte, die kinetische Energie. Angenommen wird, dass erste Windmühlen schon im 18. Jhd. v.Chr. gedient haben (vgl. HTW Saar 2012: online). Bis zur Erfindung der Dampfmaschine waren Windmühlen – nebst Wassermühlen – die einzigen Maschinen, welche (kinetische) Energie in mechanische Arbeit umgewandelt hatten und bis zuletzt noch damit beschäftigt waren, um beispielsweise Getreide in Schrot und Mehl zu mahlen. Die modernen Windenergieanlagen können als Weiterentwicklung dieser Kraftmaschinen betrachtet werden, welche nunmehr statt mechanischer Energie elektrische Energie erzeugen sollen.

Wind entsteht aufgrund unterschiedlicher Erwärmung der Atmosphäre durch die Sonneneinstrahlung, bedingt durch sich unterschiedlich aufwärmende Gebiete der Planetenoberfläche. Dies führt letztlich zu Dichte-, Druck- und Temperaturunterschieden, die ausgeglichen werden. Wind ist also eine von der Sonne abgeleitete indirekte Art der Sonnenenergie (vgl. Jarass et al. 2009: 23).

2.1 Meteorologische Determinanten

Die Entstehung des Windes ist durch seine sehr komplexen Eigenschaften auf unterschiedlichen Maßstabsebenen eine äußerst vielschichtige Thematik. Um ein einfaches Verständnis für diese Zusammenhänge zu erwerben, werden die klimatischen Eigenschaften in der Meteorologie meist in

- eine Makrobetrachtung, den globalen Zusammenhang betreffend,
- eine Mikrobetrachtung, einen bestimmten (Stadt-)Raum betreffend und in
- eine Mesobetrachtung, die Schicht direkt am Boden betreffend

eingeteilt. Das Gesamtphänomen Wind besteht dann, wenn man so will, aus der Summe dieser Betrachtungen, während die Windeigenschaften der einzelnen Ebenen freilich voneinander abhängen und sich wechselseitig beeinflussen können.

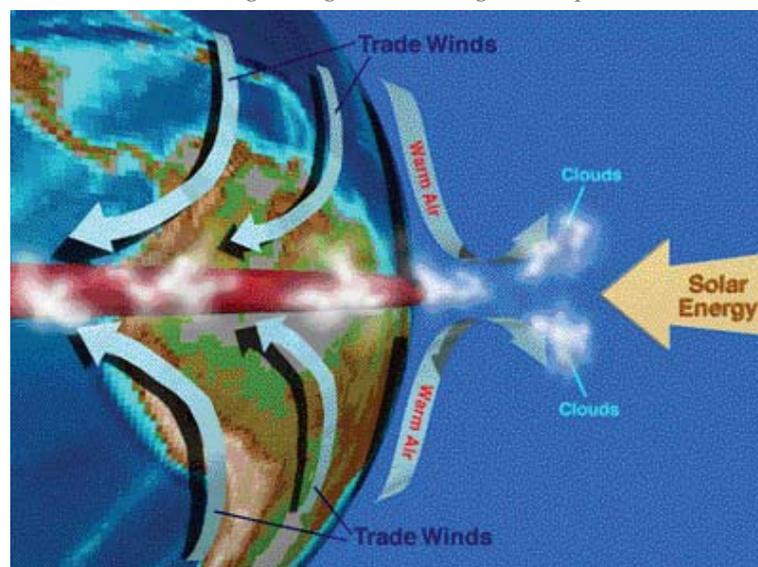
Für ein „Gefühl“ welche Eigenheiten Windströmungen im Stadtraum aufweisen können ist deshalb eine Betrachtung auf allen Ebenen notwendig. In diesem Abschnitt wird dabei rein auf die Makroebene bezuggenommen, wobei größtenteils auf sonstige in Zusammenhang stehende klimatische Bedingungen verzichtet wird. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird dann die Darstellung vor allem hin zum städtebaulichen Maßstab vertieft.

Globale Zirkulation in der Atmosphäre

Als Ursache für Winde gilt die Einstrahlung von Sonnenenergie, dabei werden die Luftschichten an Äquatorzonen am stärksten, jene an den Polen am schwächsten aufgewärmt. Zudem werden vor allem in der wärmeren Jahreszeit die Kontinentalflächen relativ stärker erwärmt als die Meeresflächen (vgl. Jarass et al. 2009: 23).

Durch das relative Strahlungsüberangebot am Äquator kommt es zu großräumigen Druckunterschieden und somit zu Ausgleichsströmungen zwischen Äquator und Polen (vgl. Quaschnig 2006: 214).

Abbildung 2: Ausgleichsströmungen am Äquator



Quelle: NASA 2012: online

Die Luft in der Äquatorzone steigt temperaturbedingt aufgrund ihrer relativ geringeren Dichte bis an die untere Grenze der Stratosphäre (Höhen von 10km und mehr) auf, und bewegt sich von dort zu den beiden Polen. Dadurch entsteht ein Bereich (relativ) tiefen

grund der Coriolisabweichung nach rechts – also nach Westen – abgelenkt. Somit entstehen diese idealtypischen Westwinde oder Trades (vgl. Jarass et al. 2009: 24f).

Eine weitere Folge der „Trägheit der Massen“ bzw. der Corioliserscheinung ist die Entstehung von sich im Uhrzeigersinn drehenden Hochdruckwirbel. Tiefdruckgebiete drehen dagegen stets gegen den Uhrzeigersinn. Dies gilt für die Nordhalbkugel, auf der südlichen Halbkugel sind diese Vorgänge jeweils umgedreht². Diese Großraumwirbel können sich in mehrere kleinere Wirbel aufspalten. Nach Westen wandernde abgespaltene linksdrehende Wirbel („Tief“ oder „Sturmtief“) prägen sehr häufig das Wetter in Westeuropa, eine (lokale) Wettervorhersage wird auch deswegen sehr erschwert, weil sich diese meist instabilen Wirbel wiederum in noch kleiner turbulente Windströmungen aufteilen können (vgl. Jarass et al. 2009: 24f)³.

Ohne die Corioliskraft würden sich die Luftmassen senkrecht auf die Isobaren (gedachte Linien gleichen (Luft-)Drucks) bewegen, dies würde stets eine Strömung vom höheren Druck zum niedrigeren Druck darstellen. Aufgrund der Erdrotation werden die Luftteilchen jedoch so abgelenkt, dass damit eine isobarenparallele Strömung entsteht. Der so entstehende Wind wird **geostrophischer Wind** genannt, welcher in dieser Form nur bei Außerachtlassung von Bodenreibung – also in großen Höhen – vorhanden ist (vgl. Häckel 2012: 266).

Grenzschicht Zirkulation in der Atmosphäre

Die angesprochene Bodenreibung ist jedoch jene Eigenschaft, die – neben unterschiedlichen Erwärmungen der Erdoberfläche – wohl den stärksten Einfluss auf die Ausbildung von (vor allem kleinräumigen) Druckgebieten ausübt.

Ohne die Bodenreibung zu berücksichtigen könnte vor allen Dingen auch nicht erklärt werden, weshalb auf der Erde ständig an irgendeinem Ort Hoch- und Tiefdruckgebiete entstehen und dann wieder zusammenfallen. Bei einer rein parallel zu den Isobaren gerichteter Luftströmung würde kein Druckausgleich mehr stattfinden. Das Ergebnis wäre somit ein mehr oder weniger „statisches“ System, was den Erfahrungen der meteorologischen Bedingungen jedoch gänzlich widersprechen würde (vgl. Häckel 2012: 267).

Um es vorwegzunehmen: Die Abbremsung der Luftströmungen nimmt zum Boden hin deutlich zu. Unterhalb der freien Atmosphäre (in etwa 0,5km bis hin zu etwa 2km über der Erdoberfläche, in Abhängigkeit der Oberfläche) befindet sich die sogenannte planetare Grenzschicht, in dieser Schicht finden der gesamte Wärme- und Wasserdampfausgleich

² Dieser Umstand nennt sich auch „Barisches Windgesetz“

³ In diesem Zusammenhang verweisen Jarass et al. auch auf den „Schmetterlings-Effekt“, welcher die Schwierigkeit im Zusammenhang mit Wetter- und Klimamodellierung sehr anschaulich darstellt. Es kann hierzu auch auf die Chaostheorie verwiesen werden.

sowie sämtliche Luftbewegungen zwischen der Erdoberfläche (Boden bzw. Wasser) und der freien Atmosphäre statt. Die Luftmassebewegungen sind hier allesamt „turbulent“. Wichtig sind hier die „Ekman-Schicht“ (ab ca. 50m ü.G.), in welcher sich erhebliche Windrichtungsänderungen abspielen und die „Prandtl-Schicht“ (bis etwa 50m ü.G.) in welcher die Windgeschwindigkeit zum Boden hin sehr stark abnimmt (vgl. Häckel 2012: 60).



Quelle: Häckel 2012: 267

In der Ekman-Schicht wird der geostrophische Wind (in höchster Höhe) durch Bodennäherung schrittweise durch Kombination aus Corioliskraft und der vom Wind bestimmten Strömungsrichtung zur tatsächlichen Windrichtung. Zudem nimmt auch die Geschwindigkeit reibungsbedingt ab. Aus der Vogelperspektive betrachtet ergibt dies die Form einer Spirale, der sogenannten „Ekman-Spirale“ (Abbildung 4).

Die Windströmung ist daher nicht mehr isobarenparallel, sondern tendiert in Richtung des tieferen Druckes. Das ist auch der Grund, weshalb sich Tiefdruckgebiete anfüllen, wird Wind durch solche Komponenten wie Reibung (oder auch Wirbeldichte, etc.) beeinflusst, spricht man auch von **ageostrophischem Wind** (vgl. Jarass et al. 2009: 25).

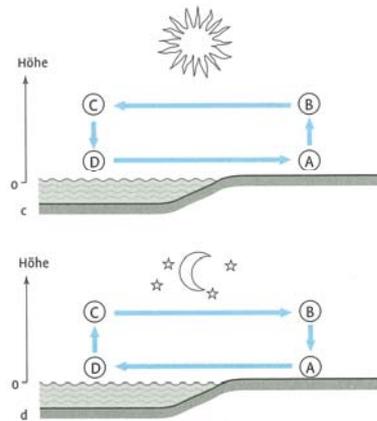
Die Prandtl-Schicht bzw. bodennahe vertikale Windprofile werden auf Seite 21 und 55 eigens erläutert.

Land- / Seewind Zirkulation

Eine weitere wichtige idealtypische Entstehung von Wind existiert ganz allgemein an Küstengebiete. Durch die Sonne erwärmt sich das Festland und das Wasser, die Temperatur der Luft über Land steigt jedoch relativ stärker an, als jene über Wasser. Somit steigt die Luft über Land auf, erhöht den Luftdruck in der Höhe während er am Boden anfangs noch gleichbleibt. In der gleichen Höhe über dem Wasserspiegel ist der Luftdruck nun geringer als über Land, somit strömt die Luft in Richtung Meer bzw. See. So steigt wiederum der Luftdruck „in der Höhe“ über dem Wasser, Luft strömt nach unten, wo der Druck noch geringer ist. Nun steigt auch der Luftdruck „direkt“ über dem Wasser. Augenblicklich ist

dieser höher als „direkt“ über Land und Luftmassen setzen sich in Richtung Land in Bewegung. Ab diesem Zeitpunkt herrscht ein geschlossenes Zirkulationssystem vor.

Abbildung 5: Land- /Seewind Zirkulation



Quelle: Häckel 2012: 257

Tagsüber spricht man von Seewind, wenn in der bodennahen Schicht Luftströme aus der See aufs Land ziehen und in größeren Höhen wieder zurückströmen. In der Nacht kehrt sich dieser Prozess um und der Wind weht vom Land in Richtung See oder Meer; man spricht daher von Landwind (siehe Abb. 4)⁴.

In den gemäßigten Breitengraden ist die Höhe eines solchen Windsystems tagsüber in etwa bei einigen 100 Metern, am Boden bewegt sich die vertikale Ausdehnung in einem Bereich von 10 bis 20 km (vgl. Häckel 2012: 256ff).

Hangwindzirkulation und Berg-Tal-Windsysteme

Im Gebirge gibt es zu den genannten globalen und regionalen Windsystemen noch zwei weitere wichtige Systeme, welche auch für etwaige Windenergienutzung von Interesse sind.

Zum einen ist dies die Hangwindzirkulation, die vor allem dann entsteht, wenn nach Osten abfallende Hänge sich in der Sonne eher erwärmen als jene, die noch im Schatten liegen. Es entstehen kleine Luftblasen, die den Hang hinaufgleiten und bei entsprechender Dichte an „Wärmeblasen“ einen Hangaufwind entstehen lassen können. Als Ausgleich dazu, strömt Luft aus der Talmitte bzw. vom unbesonnenen Hang nach; eine Hangwindzirkulation – analog dem Land-See-Wind-System – entsteht. Je nach Orientierung (Nord-Süd-

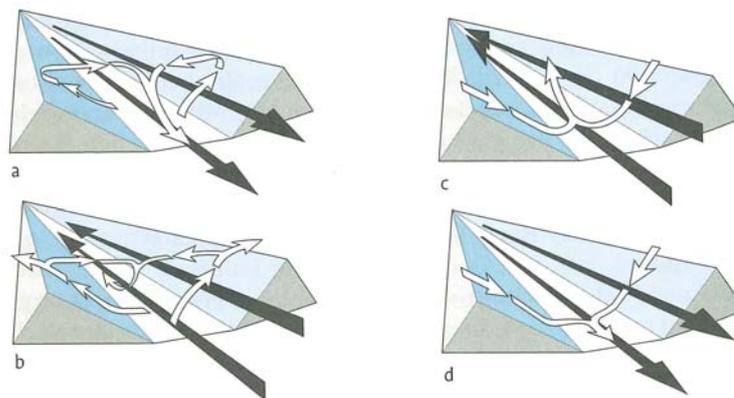
⁴ Diesen Umstand machen sich Fischer noch heute zu Nutzen, sie lassen sich nachts vom Landwind auf die See tragen, in den Morgenstunden, sobald der Seewind einsetzt, kommen sie zurück ans Land.

oder Ost-West-Orientierung) eines Gebirgstales sind diese Vorgänge unterschiedlich. Allen gemein ist, dass sich in der Nacht dieser Prozess zum Hangabwind umkehrt⁵.

Zum anderen entstehen ganze Talquerschnitte erfassende Berg-Tal-Windsysteme; diese unterliegen abermals den gleichen Prinzipien: Am Tag strömen Luftmassen vom Vorland talaufwärts, dies stellt den Talwind dar. In der Nacht kehrt sich die Windrichtung zum Bergwind um und Winde strömen Richtung Vorland aus. Nicht immer entsteht hier eine klare Ausgleichsströmung, weshalb dabei auch nicht von Zirkulation gesprochen werden kann (vgl. Häckel 2012: 258-261).

In Kombination ergeben diese beiden Windsysteme oft sehr regionscharakteristische Windverhältnisse, welche meistens jedoch äußerst komplex sind. Eine grafische Annäherung bietet die folgende Abbildung.

Abbildung 6: Hangwindsystem und Berg-Tal-Windsystem



Quelle: Häckel 2012: 260

Sobald die Sonne aufgeht setzt der Hangwind ein (Situation a), während der Bergwind noch talauswärts weht. Die Hangwinde können, aufgrund unterschiedlicher Intensität der Sonne, durchaus auch sehr stark variieren und sind lediglich bei entsprechendem Sonnenstand annähernd gleich. Die Hangwinde werden in die Bergwindströmung miteinbezogen und strömen mit ihr aus dem Tal. Im Laufe des Vormittages setzt dann der Talwind als Hauptströmung ein und die Hangwinde werden mit ihm taleinwärts mittransportiert (Situation b). Am späteren Nachmittag dreht sich nun der Hangwindprozess um (Situation c), bis dann der mit der Nacht kommende Bergwind einsetzt und auch die hangabwärtsgleitende Luft wieder talauswärts mittransportiert (Situation d) (vgl. Häckel 2012: 260).

⁵ Im allgemeinen Sprachgebrauch wird dieser Hangabwind fälschlicherweise auch oft als Bergwind bezeichnet, da er „vom Berg kommt“. Hangabwinde sind jedoch nur in Oberflächennähe vorhanden und unterscheiden sich somit vom eigentlichen Bergwind.

Neben den vorgestellten Windsystemen existieren auch weitere Formen von kleinräumigen Windsystemen, wie etwa die katabatischen Winde (Fallwinde), welche immer dann entstehen, wenn sich an Hängen die unterste Schicht besonders stark abkühlt und ins Tal strömt (Beispiel Gletscherwind) (vgl. Häckel 2012: 261). Für ein Windsystem im urbanen Raum (Wien) spielen diese Phänomene allerdings eine untergeordnete Rolle.

Anschließend sollen nun Gesetzmäßigkeiten der Physik im Zusammenhang mit Wind und Windenergie erläutert werden.

2.2 Physikalische Determinanten

Neben den meteorologischen Entstehungen der Winde sind für das Verständnis der Windenergiegewinnung vor allem dessen physikalische Gesetzmäßigkeiten von Belange.

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der Windenergieerzeugung, die Unterschiede von großen und kleinen Windenergieanlagen sowie verschiedene Grundtypen skizziert, wobei nur auf die wesentlichsten formalen Zusammenhänge und Einflussgrößen eingegangen wird. Die spezielle Situation im urbanen Raum sowie die der Potentialabschätzung zu Grunde liegender mathematischer Formalie folgt in Punkt 4.

Anfänge der Windenergie

Windmühlen waren die ersten Anlagen der Menschen, welche die in der Luft enthaltene Energie genutzt haben. Neben den bereits erwähnten vermuteten Windkraftanlagen in Babylon, sind spätestens seit dem 7. Jahrhundert n. Chr. Windkraftanlagen – Windmühlen – in Afghanistan nachgewiesen. In Europa hat die Windkraft vor allem seit dem 12. Jahrhundert eine große Bedeutung. Im 17. und 18. Jahrhundert gab es beispielsweise in Holland Zehntausende Windmühlen, welche der Polderentwässerung dienten und durchaus fortschrittlich waren. Im nördlichen Amerika sind die zum Pumpen verwendeten „Westermills“ berühmt. Mit der Motorenentwicklung im frühen 20. Jahrhundert und der darauf folgenden Entwicklung der Elektrizität(-snetze) wurde die Windkraft jedoch unbedeutend.

Seit den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts, zur Zeit der ersten Ölkrisen, hat die Windkraft wieder an Bedeutung gewonnen, wenngleich sie heute fast ausschließlich zur Gewinnung von elektrischer Energie genutzt wird (vgl. Quaschnig 2013: 255).

Einteilung der Windgeschwindigkeiten

Um qualitative Beschreibungen der Windstärke zu vereinheitlichen, wurde ein eigenes System, die Beaufort Skala⁶, eingeführt. Nachstehende Tabelle veranschaulicht diese Einteilung.

Tabelle 1: Beaufort-Skala

Beaufort-Grad	Bezeichnung	Auswirkung im Binnenland	Geschwindigkeit in 10m Höhe	
			m/s	km/h
0	Still	Windstille, Rauch steigt gerade empor.	0 – 0,2	1
1	leiser Zug	Windrichtung angezeigt nur durch Zug des Rauches, aber nicht durch Windfahne.	0,3 – 1,5	1 – 5
2	leichte Brise	Wind am Gesicht fühlbar, Blätter säuseln, Windfahne bewegt sich.	1,6 – 3,3	6 – 11
3	schwache Brise	Blätter und dünne Zweige bewegen sich, Wind streckt einen Wimpel.	3,4 – 5,4	12 – 19
4	mäßige Brise	Hebt Staub und loses Papier, bewegt Zweige und dünnere Äste.	5,5 – 7,9	20 – 28
5	frische Brise	Kleine Laubbäume beginnen zu schwanken. Schaumköpfe bilden sich auf Seen.	8,0 – 10,7	29 – 38
6	starker Wind	Starke Äste in Bewegung, Pfeifen in Telegraphen-Leitungen, Regenschirme schwierig zu benutzen.	10,8 – 13,8	39 – 49
7	steifer Wind	Ganze Bäume in Bewegung, fühlbare Hemmung beim Gehen gegen den Wind.	13,9 – 17,1	50 – 61
8	stürmischer Wind	Bricht Zweige von den Bäumen, erschwert erheblich das Gehen im Freien.	17,2 – 20,7	62 – 74
9	Sturm	Kleinere Schäden an Häusern (Rauchhauben und Dachziegel werden abgeworfen).	20,8 – 24,4	75 – 88
10	schwerer Sturm	Entwurzelt Bäume, bedeutende Schäden an Häusern.	24,5 – 28,4	89 – 102
11	orkanartiger Sturm	Verbreitete Sturmschäden (sehr selten im Binnenland)	28,5 – 32,6	103 – 117
12	Orkan	Schwerste Verwüstungen.	32,7 – 36,9	118 – 133

Quelle: Häckel 2012: 401f

⁶ Benannt nach Francis Beaufort (1774–1857), Hydrograph.

Die Beaufort-Skala hat heute etwas an Relevanz verloren, da sie aus einer Zeit stammt, in der technische Hilfsmittel (vor allem in der Windvorhersage und -messung sowie der Kommunikation) eingeschränkt waren. Allerdings lässt sich durch diese qualitative Einteilung eine bestehende Situation auch heute noch ohne Hilfsmittel einschätzen, was vor allem in der Nautik immer noch von Wichtigkeit ist, weshalb sie an dieser Stelle auch Erwähnung findet.

Windenergienutzung

Die durch Dichte- und Druckunterschiede entstehenden Winde sind für die Windenergienutzung vor allem in der bodennahen Schicht von Interesse, wobei die Windgeschwindigkeit generell mit abnehmender Höhe bis auf Null (direkt am Boden) sinkt.

Entscheidend für die Windenergienutzung ist die zu erwartende Windgeschwindigkeit in einer bestimmten Höhe an einem definierten oder zu beobachtenden Standort. Die Abhängigkeit der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von dieser Höhe kann durch physikalische Näherungsmodelle beschrieben werden. Hierzu gibt es verschiedene Modelle mit unterschiedlicher Komplexität welche auch auf topographische Parameter, die nähere Umgebung oder auch auf detailliertere atmosphärische Schichtungen eingehen (vgl. Jarass et al. 2009: 27).

Was allen Modellierungen zu Grunde liegt ist die im Wind mitgeführte **kinetische Energie**. Bei einer Windgeschwindigkeit v beträgt die kinetische Energie E :

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad [2.1]$$

Wird nun die Energie nach der Zeit differenziert, ergibt sich bei einer (konstanten) Windgeschwindigkeit v die Leistung P :

$$P = \dot{E} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 \quad [2.2]$$

Wobei sich der **Luftmassenstrom** \dot{m} aus

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot A \cdot \dot{s} = \rho \cdot A \cdot v \quad [2.3]$$

ergibt. A ist hierbei die Fläche die von der Luft mit der Dichte ρ und der Geschwindigkeit v durchströmt wird. Für die **Leistung des Windes** ergibt sich somit:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \dot{m} \cdot v^3 \quad [2.4]$$

Die Dichte der Luft ist abhängig von der Temperatur ϑ als auch von dem Luftdruck p . Die Dichte verändert sich proportional zum Luftdruck, der Einfluss der Temperaturänderung kann aus der folgenden Tabelle entnommen werden (vgl. Quaschnig 2013: 263).

Tabelle 2: Dichte der Luft in Abhängigkeit der Temperatur bei einem Luftdruck von 1bar (1.000 hPa)

Temperatur ϑ in °C	-20	-10	0	10	20	30	40
Dichte ρ in kg/m ³	1,377	1,324	1,275	1,230	1,188	1,149	1,112

Quelle: Quaschnig 2013: 263 nach VDI 1994, adaptiert

Bei einem Sturm mit der Windstärke 11 (orkanartiger Sturm, Windgeschwindigkeit 30 m/s) hätte der Wind bei einer Temperatur von 10 °C eine Leistung von 16,6 Kilowatt je Quadratmeter; die Folge daraus wären schwere Verwüstungen (vgl. Quaschnig 2013: 263).

Interessant dabei ist auch, dass „der Wind [...] deutlich höhere Leistungsdichten als die eintreffende Sonnenenergie [erreicht]. Im Gegensatz zur maximalen solaren Bestrahlungsstärke von etwa 1 kW/m² auf der Erde werden beim Wind bei einem schweren Sturm Leistungsdichten von 10 kW/m² und bei Orkanstärke sogar bis über 25 kW/m² erreicht. Tornados und Hurricans kommen sogar auf über 100 kW/m²“ (Quaschnig 2006: 213).

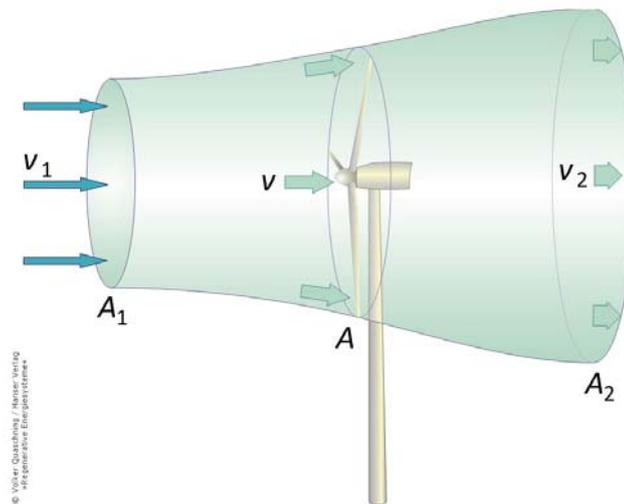
Betz-Limit⁷

Bei Nutzung der Windkraft durch eine Windenergieanlage wird dem Wind ein Teil seiner Energie bzw. seiner Leistung entnommen. Dies funktioniert indem die Leistungsdifferenz der Windgeschwindigkeit v_1 „vor“ der Windturbine und der Windgeschwindigkeit v_2 „nach“ der Turbine nutzbar gemacht wird, da der durchströmende Wind abgebremst wird (vgl. Quaschnig 2013: 263).

Da der Massestrom \dot{m} vor und nach einer Turbine gleich bleiben muss, ist die (theoretische) Fläche A_2 , die vom Wind nach der Windturbine mit einer geringeren Geschwindigkeit v_2 durchströmt wird, größer.

⁷ Benannt nach Albert Betz (1885-1968), Physiker.

Abbildung 7: Idealisierter Strömungsverlauf bei einer frei umströmten Windturbine



Quelle: Quaschning 2013: 264

Wie in Abbildung 7 dargestellt ist, gilt bei konstantem Luftdruck und konstanter Dichte der Luft:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot A \cdot v = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 = \text{konst.} \quad [2.5]$$

Die Geschwindigkeit v bei der Turbine wird aus v_1 und v_2 arithmetisch gemittelt (vgl. Quaschning 2013: 264).

Da die Luft nach der Turbine nicht auf Null abgebremst werden kann, kann nicht die gesamte enthaltene Bewegungsenergie genutzt bzw. übertragen werden. Albert Betz hatte diesbezüglich zu Beginn des letzten Jahrhunderts für propellerartige Windturbinen das „Betz'sche Gesetz“ formuliert. Vereinfacht ausgedrückt besagt es, dass die maximal ausnutzbare Energie der anströmenden Luft bei $16/27$ liegt. Dies ist genau dann der Fall, wenn die Anströmgeschwindigkeit v_1 durch die Turbine auf $\frac{1}{3} \cdot v_1$ abgebremst wird. Man spricht auch vom **Betz'schen Leistungsbeiwert** $c_{p,Betz}$ (vgl. Jarass et al. 2009: 31).

$$c_{p,Betz} = \frac{16}{27} \approx 0,593 \approx 59,3\% \quad [2.6]$$

Dieses theoretische Maximum wird bei realen Anlagen freilich nicht erreicht, wobei gute moderne Anlagen bereits Leistungsbeiwerte von etwa 0,5 aufweisen können⁸.

Moderne Windenergieanlagen sind im Stande etwa 50% der im Wind enthaltenen Leistung zu entnehmen.

Häufig wird auch der tatsächliche Wirkungsgrad η – also jener, bezogen auf das theoretische Maximum – angegeben. Er bezieht sich von der tatsächlich entzogenen Leistung zur maximal möglichen und liegt bei ausgereiften Anlagen bereits bei über 0,8 bzw. 80% (vgl. Quaschnig 2013: 265).

Verteilung der Windgeschwindigkeit

Wie in [2.4] ersichtlich, ist die Leistung des Windes durch eine kubische Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit gegeben. Dies bedeutet bei einer Verdoppelung der Windgeschwindigkeit eine Verachtfachung der Energieausbeute.

Somit ist klar, dass die (nicht nur durchschnittliche) Windgeschwindigkeit bei der Nutzung von Wind als Energiequelle das entscheidende Maß darstellt.

Wind weht über einen längeren Zeitraum gesehen äußerst unregelmäßig. Windgeschwindigkeiten ändern sich, mitunter jahreszeitbedingt, und variieren auch im Tagesverlauf. Um das Jahresangebot an entnehmbarer Leistung an einem bestimmten Standort abschätzen zu können, werden Windgeschwindigkeitsverteilungen herangezogen. Solche Verteilungen werden entweder durch Messungen selbst oder durch statistische Ableitungen vorhandener Informationen hergestellt.

Eine **relative Häufigkeitsverteilung** $h(v)$ wie in Abbildung 8 dargestellt, wird oft zur genaueren Betrachtung eines Standortes verwendet. Windgeschwindigkeiten werden (meist) in Klassen von 1m/s eingeteilt und aufgrund ihrer relativen Häufigkeit als Balken dargestellt. Die Güte dieser Information hängt im Wesentlichen von der Wahl des Messintervalls ab, meistens werden die einzelnen Werte über mehrere Minuten zu einem Mittelwert zusammengefasst. Weisen die Intervalle eine zu hohe Zeitspanne auf, wo geben die Häufigkeitsverteilungen nur ungenau Information über den betrachteten Standort wieder, da die mittlere Geschwindigkeit nicht angibt, ob an einem Standort lange Flauten, starke Böen oder eher gleichmäßige Windverhältnisse vorherrschen. Dennoch ist die mittlere Windgeschwindigkeit für eine erste Klassifizierung ein wichtiges Maß (vgl. Quaschnig 2013: 258).

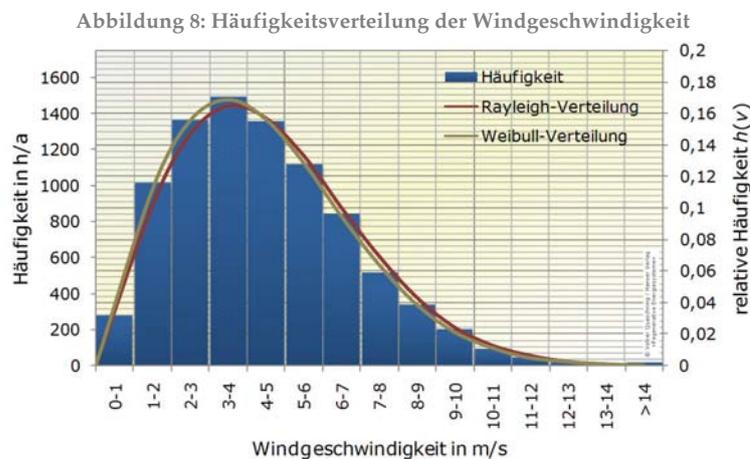
Die **mittlere Windgeschwindigkeit** wird ermittelt durch:

⁸ Anmerkung: Diese Aussage bezieht sich auf große Windenergieanlagen mit horizontaler Drehachse, Vertikalachsrotoren (Darrieus-Bauart) erreichen an die 0,4 (vgl. Quaschnig 2013: 272).

$$\bar{v} = \sum h(v) \cdot v \quad [2.7]$$

Obgleich die mittlere Windgeschwindigkeit erste Anhaltspunkte für einen betrachteten Standort liefern kann, ist eine (genaue) Häufigkeitsverteilung wesentlich aussagekräftiger. Diesbezüglich werden gerne stetige Wahrscheinlichkeitsfunktionen verwendet, da mit diesen auch besser gerechnet werden kann. Als solche statistischen Funktionen werden vorwiegend die sogenannten **Rayleigh-Verteilung** sowie die **Weibull-Verteilung** verwendet (siehe auch Abbildung 8) (vgl. Quaschnig 2013: 258f).

In dieser Arbeit wird im weiteren Verlauf lediglich auf die Weibull-Verteilung Bezug genommen.



Quelle: Quaschnig 2013: 259

Die **Weibull-Verteilung** einer bestimmten Windgeschwindigkeit v wird durch einen Shape-Parameter (Formparameter) k und einem Scale-Parameter (Skalierungsfaktor) a definiert:

$$f_{Weibull}(v) = \frac{k}{a} \cdot \left(\frac{v}{a}\right)^{k-1} \cdot e^{-\frac{v^k}{a}} \quad [2.8]$$

Diese Parameter sind vom jeweiligen Standort abhängig. Quaschnig (2013) zeigt für Deutschland einige Beispiele unterschiedlicher Standorte, so hat zum Beispiel Stuttgart einen Shape-Parameter k von 1,23 und einen Scale-Parameter a von 6,8 bei einer mittleren Windgeschwindigkeit v (10m Höhe) von 6,0 m/s⁹.

Der Skalierungsfaktor ist dabei proportional zum Mittelwert der Windgeschwindigkeit.

⁹ Für die Stadt Wien sind dem Autor keine gängigen Werte bekannt; sie werden daher in der Modellierung abgeschätzt.

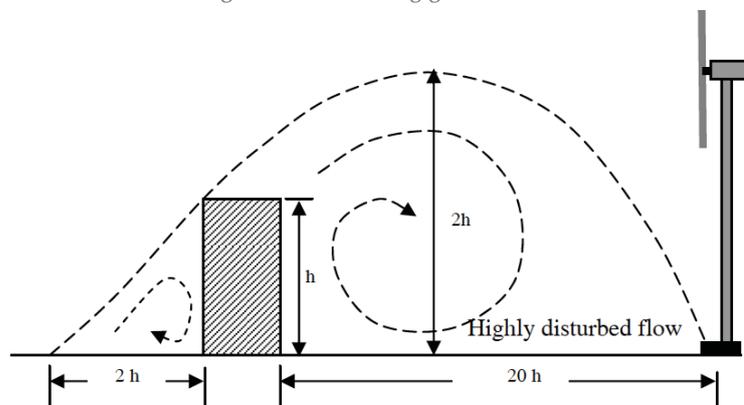
Eine möglichst genaue Windgeschwindigkeitsverteilung ist für eine gute Ertragsabschätzung von hoher Wichtigkeit. Selbst Schwankungen im Minutenbereich können großen Einfluss auf die tatsächliche Ausbeute ausüben. Die Windenergie ist keine linear abhängige Größe der Windgeschwindigkeit, sondern steht, wie gezeigt, in kubischem Zusammenhang.

Doppelte Windgeschwindigkeit bedeutet achtfach enthaltene Energie.

Rauigkeit und Turbulenzen

Eine weitere wichtige Größe in der Berechnung/Modellierung von Windenergie ist die „Rauigkeit“. Sie charakterisiert die Umgebung beziehungsweise verschiedene Geländeoberflächen, welche auch Einfluss auf die tatsächlich vorhandene Windgeschwindigkeit ausüben. Durch Geländeänderungen können Windeigenschaften bereits in kurzen Entfernungen stark schwanken. Zur Oberfläche gehören Gegenstände, Pflanzen, Bodenunebenheiten oder bauliche Anlagen; ist eine Windenergieanlage in ausreichender Höhe und Entfernung angebracht, spielen einzelne – auch größere – Hindernisse keine Rolle.

Abbildung 9: Gebäudeabhängiger Turbulenzbereich

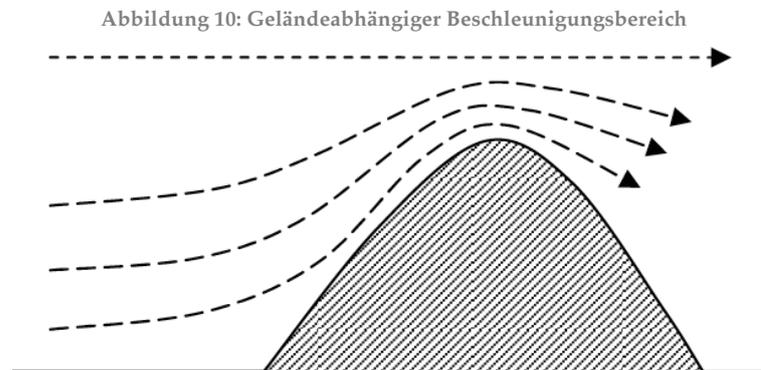


Quelle: Sathyajith 2006: 50

Je nach Situation sollte die Turbine in etwa der dreifachen Höhe des Hindernisses und einer Entfernung bis zur 35-fachen Höhe des Hindernissen situiert sein (vgl. Quaschnig 2013: 260f).

Andere Quellen sprechen einer zweifachen Objektüberhöhung und einem 20fachen Objektabstand das Ausreichen zu, um außerhalb des turbulenten Bereiches gelegen zu sein (Abbildung 9).

Neben Gebäuden und Oberflächenbeschaffenheit kann auch die topographische Situierung vermehrt Einfluss ausüben, so ist zum Beispiel auf Kuppen ein Beschleunigungseffekt beobachtbar (Abbildung 10) (vgl. Sathyajith 2006: 50f).



Quelle: Sathyajith 2006: 51

Hinzu kommen auch lokale Wind(-Zirkulations-)systeme die eine hochrangige Standortqualität für Windenergieanlagen unterstreichen können, oder diese im Gegenteil vermindern können. Die Leeseite (Windschattenseite) einer Geländeerhöhung oder eines Bauwerkes ist aufgrund von Turbulenzen generell für die Windenergienutzung meist ungeeignet¹⁰.

Das Gelände beziehungsweise die Rauigkeit dessen ist auch maßgeblich dafür verantwortlich, dass die Windgeschwindigkeit zum Boden hin – wie bereits erwähnt – abnimmt. Deshalb spricht man auch von einem vertikalen Windprofil bzw. von dem **logarithmischen Grenzschichtprofil**¹¹ (vgl. Quaschnig 2013: 261).

In der Literatur sind einige Varianten der logarithmischen Profilgleichung zu finden, folgender Ausdruck ist aus Quaschnig (2013: 261) entnommen:

$$v(h_2) = v(h_1) \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_2 - d}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1 - d}{z_0}\right)} \quad [2.9]$$

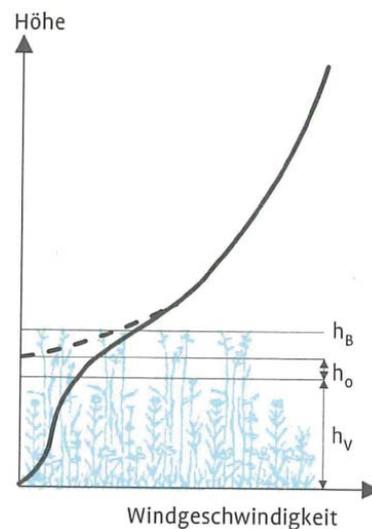
Hier wird unterstellt, dass es durch Hindernisse am Boden zu einem Verschieben der Grenzschicht kommt, das vertikale Windprofil beginnt also erst „weiter oben“ und wird

¹⁰ Sobald Wind von Hindernissen „zerschnitten“ wird entstehen sogenannte Leewirbel; diese sind stets turbulent (vgl. Häckel 2012: 347).

¹¹ Die Bezeichnung logarithmisches Profil stammt von der Möglichkeit die Windgeschwindigkeitsänderung mit einer Logarithmusfunktion zu beschreiben. Es gibt durchaus auch andere Ansätze für diese Beschreibung (vgl. Quaschnig 2013: 261f).

mit dem Parameter d angegeben. Sind die Hindernisse am Boden weit gestreut wird dieser Parameter – man spricht auch von der Versatzhöhe – Null gesetzt, ansonsten mit etwa 70% der Hindernishöhe abgeschätzt. Die Konstante z_0 ist die **Rauigkeitslänge**, sie gibt an in welcher Höhe der Wind auf Null abgebremst wird. Die Gesamthöhe vom Bodenniveau, bei welcher der Wind mit Null angenommen wird, ist somit $z_0 + d$ (siehe Abbildung 11); die Rauigkeitslänge ist dabei immer ungleich Null.

Abbildung 11: Vertikales Windprofil in Abhängigkeit der Rauigkeitslänge und Versatzhöhe



Quelle: Häckel 2012: 360

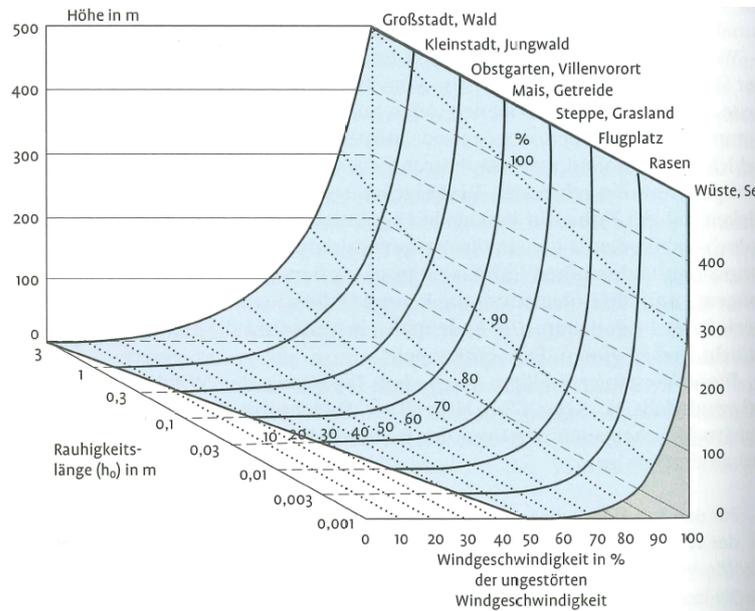
Aus obiger Gleichung lässt sich außerdem ablesen, dass bei höherer Geländerauigkeit der Profilverlauf „flacher“ ist als bei geringerer Rauigkeit, bei welcher der Verlauf demnach ein „steilerer“ ist (Abbildung 12) (vgl. Quaschnig 2013: 261f).

Durchschnittlich klingen bei sehr kleinen Rauigkeitslängen der Einfluss der Bodenreibung in etwa 200-250m Höhe ab, bei sehr großen erst in einer Höhe von etwa 500m. Klar ersichtlich ist hierbei, dass große Rauigkeiten – wie etwa im dicht bebauten Gebiet vorhanden – den Wind äußerst stark bis auf annähernd Null bremsen können, während bei glatter Oberfläche (bei Wasseroberflächen bzw. in Wüstengebiet) immer noch Rund die Hälfte der Windgeschwindigkeit in Bodennähe vorhanden ist. Der Bodeneinfluss in höhere Höhen ist auch der Grund dafür, dass Windenergieanlagen im Binnenland tendenzielle eine höhere Nabenhöhe aufweisen als in Küstengebieten oder Off-Shore (vgl. Häckel 2012: 342-345).

Mit einer zu bestimmenden Rauigkeitslänge ist es ein einfaches eine Windgeschwindigkeit auf einer anderen Höhe zu berechnen, vorausgesetzt die Geschwindigkeit am Boden (gemessen meist in 10m Höhe) oder in höheren Höhen (wie etwa 50m oder 100m ü.G.) ist bekannt. Allerdings werden atmosphärische Druckschichtungen und Temperaturänderungen nicht berücksichtigt. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass diese atmosphäri-

schen Eigenschaften übers Jahr hinweg in etwa ausgeglichen werden, sodass für die Berechnung die Rauigkeitslänge maßgeblich ist (Gasch 2013: 129ff).

Abbildung 12: Vertikales Windprofil in Abhängigkeit der Rauigkeitslänge



Quelle: Häckel 2012: 344

In Abbildung 12 sind auch gängige Rauigkeitslängen ablesbar, diese reichen im Binnenland typischerweise von 0,003m bei offenem (Kurz-)Rasen bis 3m im Großstadtbereich. Für die in Abschnitt 4 folgende Modellierung wurde diese Rauigkeitslänge eigens berechnet.

Für das vertikale Windprofil ist die Rauigkeit der Oberfläche maßgeblich. Für ein dicht bebautes Stadtgebiet bedeutet dies, dass die gleichen Windgeschwindigkeiten in relativ höherer Höhe liegen als im Umland.

2.3 Allgemeines zu Windenergieanlagen

In diesem Abschnitt soll ein knapper Überblick über die wichtigsten und gängigsten Windenergieanlagen geboten werden. Auf technische Details der Rotor- oder Turmbauweisen sowie dafür verwendete Materialien und auch auf etwaige Sonderbauweisen wird in der Übersicht allerdings verzichtet. Vielmehr soll eine Übersicht über die Prinzipien von (Groß-)Windenergieanlagen, die grundlegenden Einsatzmöglichkeiten sowie Vor- und Nachteile skizziert werden.

In der Literatur herrschen zu Windenergieanlagen teilweise unterschiedliche Termini und Begrifflichkeiten wie etwa Windmühle, Windkraftanlage, Windrad, etc. vor. In dieser Arbeit wird ausschließlich der bereits verwendete Begriff Windenergieanlage (WEA) weitergeführt, wobei im Laufe des Kapitels zwischen Großwindenergieanlagen (GWEA) und Kleinwindenergieanlagen (KWEA) unterschieden wird. Ferner wird allen diesen Anlagen unterstellt, dass sie dem Zweck der „Energiegewinnung“ bzw. genauer gesagt der **Energieumwandlung** dienen und in zwei Schritten aus der Windströmung elektrische Energie erzeugen. Die erste Stufe besteht immer darin, die kinetische Energie, welche im Wind enthalten ist, zu einem Teil (siehe theoretisches Limit nach Betz auf Seite 15) in mechanische Arbeit eines Rotors umzuwandeln. Ein Generator formt diese Drehbewegung im zweiten Schritt letztlich in elektrische Energie um. Gerätschaften zur Umformung in elektrische Energie (Generatoren), als auch anschließende etwaige Transformatoren (Gleichrichter) und Einspeisvorrichtungen sind nicht Gegenstand der Arbeit.

2.3.1 Typische Unterscheidung von Windenergieanlagen

Es gibt unterschiedliche Bauarten und auch Funktionsprinzipien bei WEA. Unterscheidungen werden vor allem bezüglich der

- aerodynamischen Wirkungsweise,
- der Drehgeschwindigkeit, gegebenenfalls
- der Anzahl der Rotorblätter,
- der Stellung im Wind und
- der Drehachsenausrichtung

vollzogen (vgl. HTW 2013: 28f, Kirchweger 2009: 37-40).

Da sich moderne Anlagen allerdings größtenteils die grundlegenden Eigenschaften – mit Ausnahme der Lage der Drehachse – teilen, wird an dieser Stelle auf die vier übrigen Ausprägungen nur kurz Bezug genommen.

Aerodynamische Wirkungsweise

Bei der aerodynamischen Wirkungsweise wird lediglich dahingehend unterschieden, ob ein Rotor einer WEA den **aerodynamischen Auftrieb** ausnützt – wie etwa bei einem Flügel eines Fluggerätes – oder nicht. Reine Widerstandsläufer werden nicht mehr gebaut, nur der Savonius-Rotor stellt eine Mischform dar (vgl. Kirchweger 2009: 37).

Drehgeschwindigkeit

WEA können weiters bezüglich ihrer Drehgeschwindigkeit unterschieden werden. Dies geschieht durch die Schnelllaufzahl, welche durch Division der Geschwindigkeit der Rotorblattspitze (Umfangsgeschwindigkeit) durch die Windgeschwindigkeit ermittelt wird.

Ist dieser Wert kleiner als 2,5 wird der Rotor als Langsamläufer bezeichnet, ansonsten als sogenannte Schnellläufer. Zur Stromerzeugung genutzte WEA sind fast ausschließlich **Schnellläufer** (vgl. Kirchweger 2009: 38).

Anzahl der Rotorblätter

Eine weitere mögliche Unterscheidung besteht hinsichtlich der Anzahl an Rotoren. Heute haben sich – bei WEA mit horizontaler Drehachse – die **3-Blatt-Rotoren** aufgrund ihrer positiven Eigenschaften, wie zum Beispiel Verhältnis von Drehgeschwindigkeit und physischer Blattfläche, durchgesetzt (vgl. Hau 2008: 138f).

Stellung im Wind

Unterschieden werden können WEA auch betreffend ihrer Rotorstellung zum Turm bzw. zum Wind. Bei Luvläufern befindet sich der Rotor in Windrichtung vor dem Turm an der windzugewandten Seite, bei Leeläufer sind die Rotoren an der windabgewandten Leeseite hinter dem Turm (in Windrichtung) angebracht. Dominierend in der Verwendung sind heute die **Luvläufer** (vgl. Gasch 2013: 52f).

Ausrichtung der Drehachse

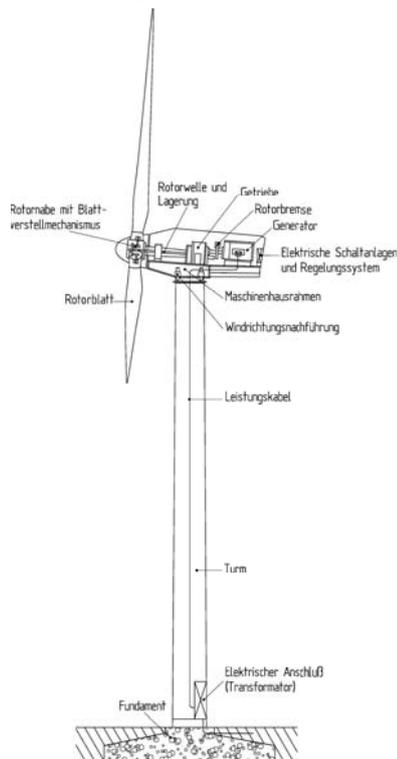
Das derzeit wohl wichtigste Unterscheidungsmerkmal von WEA ist die Lage der Drehachse des Rotors. Man unterscheidet zwischen Rotoren mit vertikaler Drehachse – **Vertikalläufer** – und jenen mit horizontaler Drehachse des Rotors – sogenannte **Horizontalläufer**. Diese beiden Typen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

2.3.2 Horizontalachsenrotoren

Vor allem bei GWEA sind fast ausschließlich horizontalachsgelagerte Rotoren im Einsatz, da sie eine Reihe von Vorteilen bieten:

- Bei Propeller-Rotoren, welche die heute häufigste Bauform mit meist drei Blättern darstellen, kann durch eine Blattwinkeländerung die Drehzahl und somit die Leistung geregelt werden. Durch diese motorisierte Regelung ist auch hoher Schutz gegen zu hohe Windgeschwindigkeiten und im schlimmsten Fall Beschädigungen an der Anlage gewährt, da sich die Anlagen somit „aus dem Wind drehen“ können.
- Aus vorwiegend aerodynamischen Gründen erreichen Horizontalläufer die höchsten Wirkungsgrade
- Diese Art der Rotoren sind, obwohl sie „jünger“ sind als Vertikalläufer, am besten erforscht und getestet (vgl. Hau 2008: 69).

Abbildung 13: Schematische Darstellung und Aufnahme eine horizontalachselgelagerten WEA



Quelle: Hau 2008: 71

Quelle: eigene Aufnahme

Ein typischer schematischer Aufbau in Gegenüberstellung zur WEA Donauinsel zeigt die vorhergehende Abbildung 13.

Die Anlage auf der Wiener Donauinsel, ist die älteste der Wien Energie und stammt aus dem Jahre 1997. Es ist eine 300 Kilowatt (300kW) Anlage mit einem Rotordurchmesser von 30m und einer Nabenhöhe von 50m. Sie liefert rund 350 Megawattstunden (350 MWh) Strom in einem Jahr (vgl. Wien Energie 2013: online).

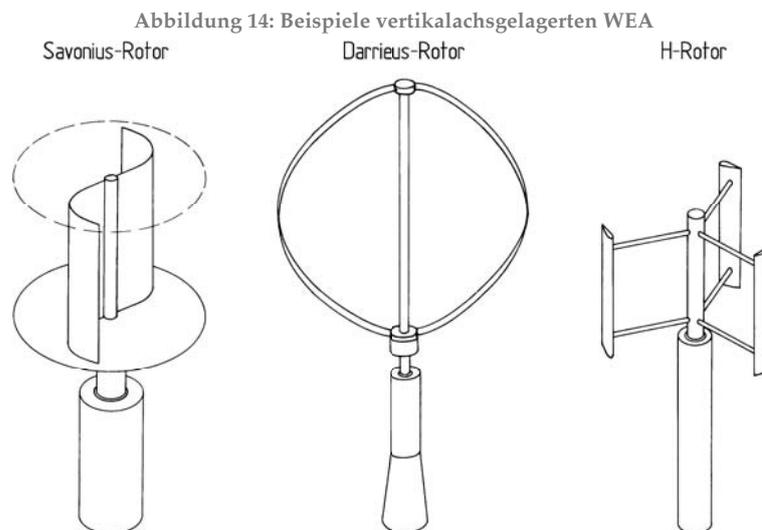
2.3.3 Vertikalachsenrotoren

Vertikalachselgelagerte Rotoren sind die älteste Art der Windräder und Windmühlen, welche – wie eingangs bereits erwähnt – schon im 18. Jhd. v. Chr. Verwendung gefunden haben sollen. Sie waren in ihren Ursprüngen als reine Widerstandsläufer konzipiert; unterteilt werden diese meist in

- den Savonius-Rotor,
- den Darrieus-Rotor sowie
- den H-Rotor (siehe Abbildung 14).

Savonius-Rotoren findet man häufig als „Lüfterrad“ bei Lieferwagen oder Eisenbahnwagons, sowie als das aus der Messung bekannte Schalenkreuz. Gelegentlich wird er auch noch als mechanischer Antrieb für kleinere Wasserpumpen verwendet. Für den Bereich der elektrischen Energie hat diese Rotorart jedoch keine Bedeutung.

Moderne **Darrieus-Rotoren** sind auch im Stande den aerodynamischen Auftrieb (effizient) auszunutzen, sodass der Darrieus-Bauweise erhöhte Aufmerksamkeit in der Entwicklung zukommt. Normalerweise werden neuere Anlagen – analog den Propeller-Rotoren – mit drei Blättern (selten auch mit zweien) ausgeführt. Die großen Vorteile, welche eine solche Bauweise bieten, sind insbesondere die Unabhängigkeit von der Windrichtung, sowie die Möglichkeit das Getriebe und den Generator am Boden anbringen zu können. Allerdings bergen diese Rotoren auch Nachteile, da sie nicht von selbst anlaufen können und es keine Möglichkeit gibt, die Drehzahl bzw. Leistungsabgabe durch Blattwinkeländerung zu steuern (vgl. Hau 2008: 66ff).



Quelle: Hau 2008: 66

Der **H-Rotor** ist eine Abwandlung des Darrieus-Rotors und unterscheidet sich im Wesentlichen durch gerade Rotor-Blätter anstatt gebogener Blätter. Aus wirtschaftlicher Sicht hat diese Rotorform allerdings keinerlei Bedeutung mehr, da bis dato alle Versuche die Herstellungskosten zu senken und die Effizienz zu steigern gescheitert sind (vgl. Hau 2008: 68).

In dicht bebauten Gebieten bekommen Vertikalachsrotoren (in kleiner Bauweise als KWEA) in jüngster Zeit jedoch erhöhte Aufmerksamkeit und aus der jüngeren Literatur (vgl. AEE 2013, Energon 2013, HTW 2013, Hübner, Pohl 2010) ist ersichtlich, dass die Forschungsintensität für solche Anlagen im Moment weiter erhöht wird.

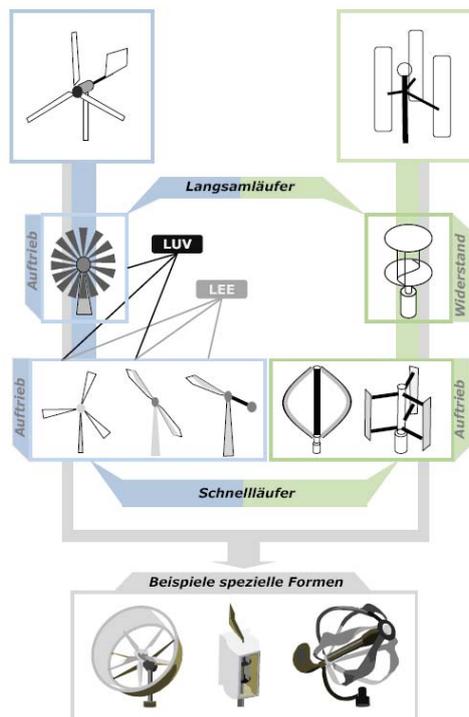
2.4 Abriss zu Kleinwindenergieanlagen

Für den Einsatz in bebautem Gebiet, und hier vor allem im dicht bebauten urbanen Raum, sind KWEA von besonderem Interesse. Das liegt vorwiegend daran, dass aufgrund von eingeschränktem Platzangebot, rechtlichen Rahmenbedingungen sowie aus technischen und vor allem stadtplanerischen Überlegungen GWEA für dicht bebauten urbanen Raum nur bedingt geeignet sind.

Da die in Kapitel 4 folgende Potentialabschätzung rein auf urbane Räume in der Stadt (Wien) beruht, soll an dieser Stelle den KWEA auch entsprechender Platz eingeräumt werden. Die bereits genannten Eigenschaften und Charakteristika von WEA haben freilich auch für KWEA ihre Gültigkeit, allerdings sollen für diese Kleinanlagen auch noch entsprechende Eigenschaften vorgestellt werden, die für eine Auswahl der richtigen Anlage für einen bestimmten Standort essentiell sind.

Zusammenfassend für voranstehende Seiten zeigt Abbildung 15 die unterschiedlichen Bauarten grafisch, welche weithin für alle Anlagengrößen gelten.

Abbildung 15: Übersicht der Bauarten von (K)WEA



Quelle: BWE 2011a: 14

2.4.1 Abgrenzung von Kleinwindenergieanlagen

Der (Bei-)Name „Klein“ lässt schon erahnen, dass es sich bei KWEA um entsprechend kleinere Varianten von großen Anlagen handeln muss. Eine einheitliche Definition und Abgrenzung von Kleinwindenergieanlagen ist bisher allerdings nicht vorhanden.

So kann man Anlagen in vielerlei Hinsicht unterscheiden, die häufigsten Unterscheidungsmerkmale sind aufgrund

- des Anwendungsfalls (netzferner, netzgekoppelter Betrieb),
- der Spannungsebene (Klein-, Nieder-, Mittelspannung),
- der überstrichenen Rotorfläche¹² oder
- der Nennleistung (vgl. HTW 2013: 28).

Unter den rechtlichen Rahmenbedingungen in Abschnitt 3.2 wird hierauf nochmals Bezug genommen; aktuelle Literatur (vgl. Energon 2013: 8, Denkstatt 2011: 4, HTW 2013: 28) bezieht sich auf den Bundesverband Windenergie e.V. und deren Einteilung basierend auf der Nennleistung der Anlagen (siehe folgende Tabelle).

Tabelle 3: Leistungskategorien von KWEA

Einsatzgebiet	Spannung	Nennleistung	Bezeichnung	Vereinfachung
Batteriegestütztes Inselsystem	12/24/48V DC			
Anlage auch netz- gekoppelt	230V AC	0 – 1,5kW		
Gebäudeintegrier- te Installation	230V AC	1,5 – 5kW	Mikrowindenergieanlage	Leistungsklasse 1
Freie Aufstellung				
Gewerbegebiete, Landschaft	400V AC	5 – 30kW	Miniwindenergieanlage	Leistungsklasse 2
Gewerbegebiete, Landschaft	400V/20kV AC	30 – 100kW	Mittelwindenergieanlage	Leistungsklasse 3

Quelle: BWE 2011a: 13, adaptiert

2.4.2 Dimensionierung und Anlageneignung

Wie dargelegt existieren unterschiedliche Typen und Klassen von KWEA. Für eine möglichst effiziente Nutzung dieser Geräte ist eine optimale Anpassung an den Standort von Priorität. Deshalb soll im Folgenden erläutert werden, nach welchen Gesichtspunkten eine Anlage aus der Vielzahl am Markt befindlicher Typen ausgewählt werden soll. Im letzten Marktbericht des Bundesverband Windenergie e.V. sind beispielsweise über 200 Klein-

¹² Dies ist jene gedachte Kreisfläche, welche ein Rotor bei einer Umdrehung „überstreicht“.

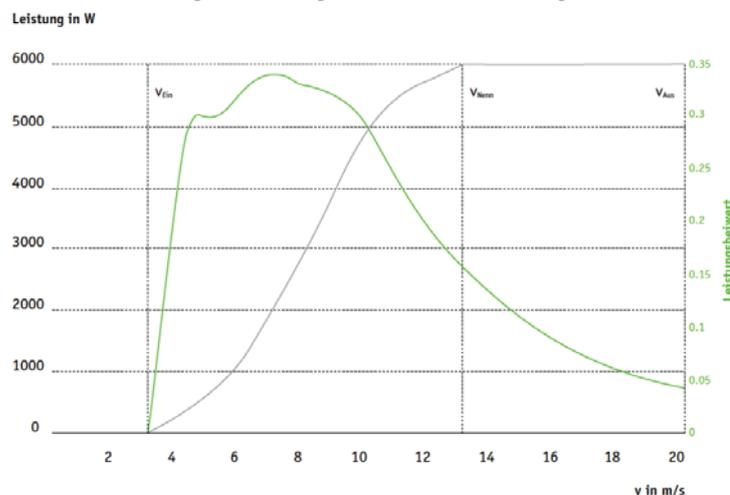
windanlagen mit ihren Spezifikationen sowie den Herstellerdaten in Form von Datenblättern dokumentiert; von unter 100 Watt bis 75 Kilowatt sind zahlreiche Hersteller und Bauweisen aufgearbeitet (vgl. BWE 2011b: 54-169).

Nennleistung

Als erstes Bewertungskriterium kann die Nennleistung einer Anlage genannt werden, dies ist die Leistung die eine KWEA ab einer bestimmten Geschwindigkeit abgibt und welche nicht (bzw. nur äußerst geringfügig) überschritten wird. Diese Geschwindigkeit wird Nenngeschwindigkeit (v_{Nenn}) – „nominal speed“ – genannt. Eine Fünf-Kilowatt Anlage liefert demnach ab ihrer Nenngeschwindigkeit eben diese fünf Kilowatt, liefe sie eine Stunde lang konstant bei v_{Nenn} lieferte sie fünf Kilowattstunden Energie.

WEA können aber nicht ständig Leistung abgeben, da unter einem bestimmten Wert der Windgeschwindigkeit der Widerstand der Anlage gegenüber der Kraft des Windes zu hoch ist¹³. Die Geschwindigkeit ab der eine Anlage zu arbeiten beginnt – sozuzsagen „anfährt“ – wird als Einschaltgeschwindigkeit (v_{Ein}) – „cut-in speed“ – bezeichnet. Die abzugebende Leistung im Zwischenbereich ist allerdings nicht linear, weshalb rechtsschaffende Anbieter für ihre Anlagen eine Kennlinie bereitstellen.

Abbildung 16: Leistungskennlinie und Leistungsbeiwert



Quelle: HTW 2013: 32

Eine beispielhafte **Leistungskennlinie** ist in Abbildung 16 in grauer Farbe dargestellt. Idealerweise sind solche Kennlinien nach der EN 61400-12 Norm gemessen um eine Vergleichbarkeit mit anderen Anlagen gewährleisten zu können.

¹³ Vergleichbar mit dem (Masse-)Trägheitsmoment aus der klassischen Mechanik.

Außerdem ist in grüner Farbe der Leistungsbeiwert dargestellt. Er zeigt den Wirkungsgrad der Anlage nach der Geschwindigkeit (vgl. HTW 2013: 31).

Um die Rotoren nicht zu überdrehen, schalten sich WEA bei einer gewissen Geschwindigkeit – der sogenannten Ausschaltgeschwindigkeit v_{Aus} bzw. „cut-out speed“ – wieder ab; eine KWEA ist also auf einen optimalen Windgeschwindigkeitsbereich ausgerichtet. Um Vergleiche unterschiedlicher Anlagen anzustellen eignet sich besonders die **spezifische Flächenleistung**, berechnet mittels Nennleistung dividiert bei der überstrichenen Rotorfläche. Sie gibt außerdem einen ersten Anhaltspunkt darüber ob es sich um eine **Schwachwindanlage** oder eine **Starkwindanlage** handelt. An Standorten mit niedrigen Windgeschwindigkeiten sind insbesondere Schwachwindanlagen geeignet, diese weisen eine spezifische Flächenleistung von ca. 100-200W/m² auf. Starkwindanlagen sind im Gegensatz dazu eher für Starkwindregionen geeignet, ihre spezifische Flächenleistung beträgt bis zu 500W/m² und auch mehr (vgl. HTW 2013: 32).

Um für einen bestimmten Standort die geeignete KWEA zu identifizieren, wird ein Vergleich der relativen Geschwindigkeitsverteilung mit der Leistungskennlinie einer Anlage empfohlen.

Windklasse

In der EN 61400-2 Norm werden unterschiedliche Windklassen beschrieben, nach denen Hersteller ihre KWEA auslegen können; dies trifft vor allem für zertifizierte Anlagen zu. Je nach Standortwindgeschwindigkeit lassen sich so in Frage kommende KWEA zumindest grundlegend filtern. In dieser Norm werden fünf Klassen beschrieben, wobei für KWEA vor allem die Windgeschwindigkeitsklassen II-IV von Relevanz sein dürften (vgl. HTW 2013: 30).

Batterie, Netz, Eigennutzung

Anlagentypen könne auch nach ihrem „Anwendungsfall“ klassifiziert werden, also danach, in welcher Form die elektrische Energie vorliegt und genutzt wird. Dazu kann eine Unterscheidung in

- Batterieladung,
- Netzeinspeisung und
- Eigenstromnutzung

getroffen werden (vgl. HTW 2013: 34ff).

Batterielader dienen häufig als Energiequelle von Segelbooten, Caravans oder Messstationen und sind meist im Nennleistungsbereich von kleiner einem Kilowatt angesiedelt. Sie sind meist in der Spannungsebene von zwölf, 24 oder 48 Volt Gleichstrom vorhanden.

Bei **Netzeinspeisung** in ein öffentliches Verteilnetz ist die Abstimmung der Anlagenleistung am einfachsten, hier sollte auf die Einspeiskapazität des Verteilnetzes geachtet werden. Bei dieser Variante wird die gesamte erzeugte Energiemenge in das Verteilnetz geleitet, somit hängt die Erzeugung also nicht mit dem Eigenenergiebedarf zusammen (vgl. HTW 2013: 34f).

Eingespeister Strom wird in Österreich auf Basis der Einspeisetarifverordnung (siehe 3.2.5) vergütet. Eine Unterscheidung von Groß- und Kleinwindanlagen existiert hierbei nicht und der Vergütungspreis liegt deutlich unter dem Strompreis. Aus diesem Grund lohnt sich eine Einspeisung ins öffentliche Netz derzeit generell nicht.

Eine **Eigenstromnutzung** ist die derzeit verbreitetste und ökonomisch attraktivste Einsatzmöglichkeit von KWEA. Um eine optimale Anlagengröße zu wählen, die das Hausnetz speist, sollten aber einige Punkte beachtet werden:

Wichtig ist primär, ein von Fachkräften hergestellter und genehmigter Anschluss an das Hausnetz. Eine optimale Ausnützung liegt freilich dann vor, wenn jede erzeugte Kilowattstunde im Haus auch verbraucht wird. Ansonsten muss entweder die Anlage abgeschaltet werden oder nicht vergütet ins Verteilernetz eingespeist werden. Das heißt, dass genaue Kenntnisse über den Tagesverlauf der verbrauchten Leistung notwendig sind. Die Nennleistung der KWEA sollte dann in etwa der Grundlast des Gebäudes entsprechen. Bei größeren Wohngebäuden sowie gewerblich/industriell oder landwirtschaftlich genutzten Gebäuden sollte es kein Problem sein eine vernünftige Nennleistung für eine KWEA zu wählen. Mit „smarter Technologie“¹⁴ sollte es des Weiteren möglich sein den Energieverbrauch möglichst der bereitgestellten Energie anzupassen. Eine Eignung der KWEA für das öffentliche Netz sollte jedoch auch bei Eigennutzung gewährleistet sein (vgl. HTW 2013: 35f).

Die maximale Nennlast der KWEA sollte der minimalen Grundlast der zu versorgenden Gebäude entsprechen.

Sicherheitsaspekte

Obwohl es sich bei seriösen Anbietern meist um Anlagen mit **Sturmsicherung** handelt, wird auf die verschiedenen Varianten kurz verwiesen. Prinzipiell werden Sicherheitssy-

¹⁴ An dieser Stelle sei pauschal auf die Themen und Konzepte wie Smart Grid, Smart City, Smart Meter, Smart Home, etc. verwiesen.

steme in aktive und passive Systeme unterteilt passiv bedeutet, dass die WEA automatisch bei zu hohen Geschwindigkeiten aus dem Wind drehen (wie bereits in Punkt 2.3.2 angesprochen). Als Beispiel für horizontalachsgelagerten WEA kann außerdem die sogenannte „Helikoptersicherung“ genannt werden, hier dreht der Rotor über ein Gelenk in eine horizontale Lage und verringert so maßgeblich die Windlast. Aktive Systeme werden mittels eines Kontrollsystems (etwa Drehzahlmessung) aktiviert. Dies kann eine sogenannte Pitch-Regelung sein, bei der sich die Rotorblätter verdrehen um den Auftrieb am Blatt – in diesem Fall – zu verringern. Pitch-Regelungen können auch passiv ausgelegt sein, zudem gibt es vor allem bei vertikalachsgelagerten Rotoren aktive Bremssysteme, welche den Rotor mittels (Scheiben-) Bremsen zum Stillstand bringen.

Insbesondere bei Anlagen auf Gebäuden sollte zudem auch ein **Blitzschutz** vorhanden sein, der die Anlage an den Gebäudeblitzschutz anbinden kann (vgl. HTW 2013: 34).

Nichtsdestotrotz kann selbst die richtig dimensionierte und als ideal erscheinende Anlage am falschen Standort nur unzureichend befriedigende Ergebnisse erreichen. Der Frage des richtigen Standorts – vor allem bezüglich urbaner Standortsuche – widmen sich die folgenden Kapitel.

3 Windenergienutzung im urbanen Raum

Wie in [2.4] unverkennbar dargestellt, ist für die richtige Situierung einer WEA vor allem eines ausschlaggebend: die jeweils vorherrschenden Windbedingungen, die Windgeschwindigkeit. Vor allem für städtisches Gebiet wäre jedoch eine Standortbestimmung rein auf Grundlage der meteorologischen Verhältnisse weit zu kurz gegriffen.

Da der urbane Raum vorwiegender Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist, werden einige damit verbundene zu berücksichtigende Herausforderungen aufgerissen. So werden nachfolgend Fragestellungen unterschiedlicher Art im Rahmen des städtischen Umfeldes behandelt. Sowohl technische und planerische Herausforderungen (etwa Fragen der Statik und Raumsituation sowie Lärm) als auch rechtliche Rahmenbedingungen (aktuelle Gesetzeslage) und sozialwissenschaftliche Aspekte („drei Dimensionen der sozialen Akzeptanz“) werden dabei berücksichtigt.

3.1 Technische Herausforderungen

Ist ein „idealer“ Standort (in mikro-klimatischem Sinne) identifiziert, stellen sich unweigerlich Fragen der generellen Machbarkeit. Hier sollen zunächst grundsätzliche Frage- und Problemstellungen aus technischen Gesichtspunkten erläutert werden. Es wird dabei angenommen, dass frei stehende Anlagen im urbanen Raum eine eher untergeordnete Rolle spielen und vermehrt die Installation von Anlagen auf Gebäuden angestrebt wird.

Doch nicht jedes Gebäude eignet sich grundsätzlich zur Installation einer KWEA, erhöhte Vorsicht und detaillierte Betrachtung ist vor allem bei nachträglich zu installierenden WEA geboten, da manche Gebäude mitunter dafür schlicht nicht ausgelegt sind.

3.1.1 Gebäudegeometrie

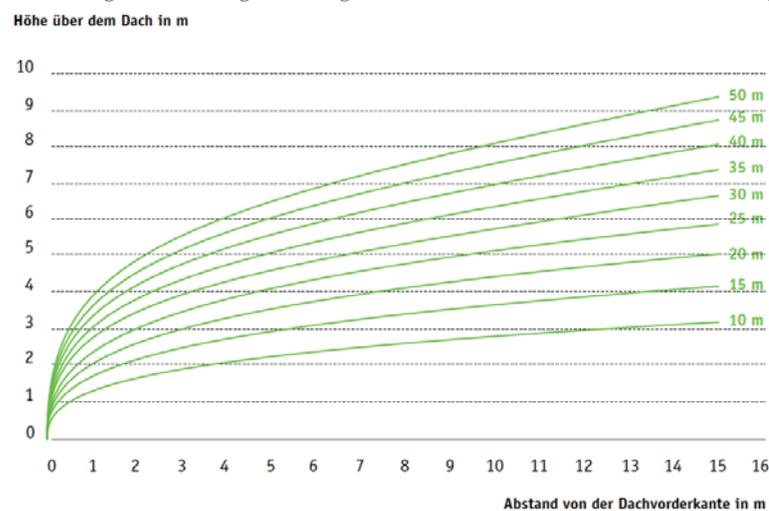
Äußerst wichtig für einen idealen Installationsort ist die Geometrie des Gebäudes, auf welchem die KWEA aufgestellt werden soll. Dabei kann in erster Linie freilich die **Höhe** des Gebäudes genannt werden, wobei sich diese auch aus den Windverhältnissen ableiten lässt. Je höher ein Gebäude, desto relativ höhere Windgeschwindigkeiten gelten im Allgemeinen.

Die **Dachform** ist ein weiteres grundlegendes Kriterium. Aus naheliegenden Gründen ist ein Flachdach für eine Installation deutlich besser geeignet als geneigte Dächer wie etwa Sattel- oder Pultdächer. Dies trifft vor allem auf KWEA im Nennleistungsbereich jenseits der ein Kilowatt zu, die aufgrund ihrer Größe und ihres Gewichts nur mit komplizierten Zusatzkonstruktionen errichtet werden könnten. Flachdächer eignen sich auch deshalb

deutlich besser, da zu einer einfacheren Installation auch eine allgemein bessere Zugänglichkeit zu Wartungszwecken gegeben ist (vgl. HTW 2013: 18f).

Im Forschungsbericht der HTW Berlin (2013) wurde außerdem darauf hingewiesen, dass sich an der Dachvorderkante eines Gebäudes die auftreffende Strömung ablöst und eine **Ablöseblase** bildet. Somit ist in geringer Höhe über dem Dach turbulente und auch abgebremste Windströmung vorhanden. Dieser Effekt tritt vor allem bei senkrecht auf das Gebäude auftreffender Windströmung auf. Die Ablöseblase war bereits Gegenstand verschiedener Untersuchungen, Abbildung 17 veranschaulicht die zu erwartende Turbulenzhöhe bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 2,4m/s graphisch.

Abbildung 17: Strömungsablösung bei senkrecht auftreffender Windströmung



Quelle: HTW 2013: 20

Die grünen Kurven zeigen den zu erwarteten ungeeigneten Bereich am Dach im Bereich der jeweiligen Gebäudehöhe. Unter dieser Höhe kommt es zu den erwähnten Turbulenzen und mitunter auch zu geringeren Windgeschwindigkeiten (vgl. HTW 2013: 20 nach Muro et al. 2010).

Mit praktischen Messungen konnte dieser theoretische Verlauf der Ablösung auf den ersten fünf Meter von der Dachkante beobachtet werden, der Rotor der KWEA sollte dementsprechend über den Wert an dieser Stelle hinausgehen. Ist eine Anlage mit sehr kleiner Nabenhöhe angedacht, so empfiehlt sich eine Situierung näher an der Dachkante. Ist eine KWEA gegenüber Schräganströmung empfindlich, ist diese Situierung allerdings ebenfalls ungeeignet (vgl. HTW 2013: 20).

Die Geometrie und Lage des Gebäudes ist auch wesentlich für eine genaue **Anlagenpositionierung** am Dach. Bei etwaigen Dachniveauunterschieden sollte die KWEA wenn möglich an der höchsten Stelle positioniert werden. Jedenfalls sollten, zumindest in Haupt-

windrichtung, keine Baumassen die Anlage verschatten, auch die Gebäudeecken sind wegen Verwirbelungen generell ungeeignet (vgl. HTW 2013: 21).

3.1.2 Statik

Entscheidenden Einfluss auf die Montage einer KWEA auf einem Gebäude hat gewiss die statische Eignung dessen. Die **Tragfähigkeit** der Gebäudekonstruktion sollte von einem Baustatiker unbedingt überprüft und bestätigt werden. Die HTW (2013) empfiehlt dabei grundsätzlich zwischen analgenseitigen und gebäudeseitigen Komponenten zu unterscheiden. Bei vorliegender Information über die geplante Anlage ist eine Berechnung für die Tragfähigkeit mit den anlagenspezifischen und standortspezifischen Lastannahmen durchzuführen. Die zusätzlichen statischen Lasten setzen sich im Wesentlichen aus dem Eigengewicht der Anlage, den Druckkräften der (maximalen) Windanströmung sowie allen sonstigen nachzuweisenden Lastfällen – etwa der Schneelast – zusammen. Eine Überprüfung durch einen Bautechniker wird ab 60m² Rotorfläche auch von den technischen Amtssachverständigen des Bundesministeriums für Wirtschaft, Familie und Jugend empfohlen (vgl. BMWFJ 2012: 5).

Einhergehend mit einer statischen Überprüfung, muss auch die **Standicherheit** der Anlage gewährleistet werden. Grundsätzlich kann eine KWEA auf zwei verschiedene Arten am Dach angebunden werden, zum einen durch eine **feste Verankerung** mit dem Dach beispielsweise mittels Verschraubung und zum anderen durch eine **freie Aufständigung** durch Aufbringung von zusätzlichem Ballast. Vorteil einer Verankerung ist demnach eine Gewichtersparnis, die je nach Dachaufbau auch notwendig sein kann. Demgegenüber stehen die Nachteile, dass vor allem bei nachträglich installierten Anlagen der Dachaufbau beschädigt werden könnte. Eine Neuabdichtung der Dachhaut ist jedenfalls erforderlich. Zudem muss für die Verankerung auch Zugfestigkeit nachgewiesen werden, da durch den seitlichen Druck des Windes die windzugewandten Verankerungen Zugbeanspruchung erfahren. Die freie Aufständigung hat demzufolge den Vorteil, dass eben keine Verankerung notwendig ist und die Dachhaut nicht durchdrungen werden muss. So sind der Auf- und eventuelle Abbau mit deutlich weniger Aufwand verbunden. Durch den zusätzlich anzubringenden Ballast ist auf die erhöhte (punktuelle) Druckbelastung zu achten. Unter Umständen kann die vorhandene Dachabdeckung als Teil des Ballasts herangenommen werden (vgl. HTW 2013: 45f).

3.1.3 Dynamik

Neben den erläuterten Anforderungen an die Statik sind auch dynamische Anforderungen an ein Gebäude zu berücksichtigen. Beim Betrieb einer Anlage entstehen durch (verschiedene) Rotationen Schwingungen, welche maßgeblich von der Größe (Rotorfläche) und dem Anlagentypus abhängig sind und ein breites Frequenzspektrum umfassen können. Da

KWEA aus verschiedenen einzelnen Komponenten und auch Materialien bestehen, herrschen dementsprechend eine Vielzahl an Eigenfrequenzen, die, sofern sie angeregt werden, bestehende Schwingungen auch verstärken können. Herstellerseitig sollte auf Schwingungsanregungen Bedacht genommen werden.

Es gibt unterschiedliche Quellen für Schwingungen wobei der größte Anteil aus Unwuchten resultiert. Ist die Masse des Rotors nicht genügend ausgewuchtet, so spricht man von einer **Massenunwucht**, bei Betrieb der Anlage treten somit erhöhte Schwingungen auf. Salopp gesagt ist der Rotor der Anlage dann nicht mehr im Gleichgewicht. Eine weitere Schwingungsquelle geht aus ungleichen Anstellwinkeln der Rotorblätter, bei nicht symmetrischer Blattanordnung oder bei auftretenden Lastwechseln hervor. Man spricht in diesem Fall von **aerodynamischer Unwucht**. Ein Sonderfall stellen hierbei KWEA mit vertikaler Rotorachse dar, durch deren Bauart die Rotorblätter nicht gleichmäßig angeströmt werden, da sich ihre Achse nicht in der Strömungsrichtung befindet. Die einzelnen Blätter haben immer unterschiedliche Anströmungsverhältnisse und somit befindet sich die Anlage in ständiger aerodynamischer Unwucht.

Durch Nachlaufwirbel, welche von den Rotorblättern auf den Turm auftreffen, können zusätzliche Schwingungen entstehen. Dies wird als (unvermeidliche) **Blatt-Turm-Interaktion** bezeichnet, welche bei Resonanzen mit Gebäude oder Anlagenaufbau bereits bei Schwachwind auftritt.

Auch der **Generator** als dynamische Einheit ist Quelle für Schwingungen, da er hochfrequent vibriert, wobei diese Vibrationen wesentlich von der Drehzahl abhängig sind. Auch wenn sich diese Schwingung meist nicht auf die Stabilität einer Anlage auswirkt, können sich diese Vibrationen, wenn sie ungedämpft bleiben, im Gebäude als **Körperschall** ausbreiten.

Allen Schwingungsquellen gemein ist, dass sie einerseits Schallquellen darstellen können (in Form von **Luftschall** und **Körperschall**), andererseits kann vor allem der Körperschall langfristig zur Materialermüdung beitragen. Eine KWEA sollte deshalb etwa durch Fußdämpfer schwingungstechnisch entkoppelt werden. Als letzte Möglichkeit bleibt die Überwachung des Schwingungsverhaltens und gegebenenfalls die Abschaltung der Anlage bei Überschreiten eines kritischen Wertes (vgl. HTW 2013: 46f).

3.1.4 Elektrotechnik

Auch wenn die elektrotechnischen Installationen und Geräte in dieser Abhandlung nur eine ungeordnete Rolle spielen, sollen sie kurz Erwähnung finden, da es mit dem alleinigen Aufstellen einer KWEA nicht getan ist.

Für die Wahl des richtigen **Wechselrichters**¹⁵ ist der Spannungsbereich – ausgangsseitig bei der Anlage und eingangsseitig beim Richter – ausschlaggebend. Es sollte darauf geachtet werden, dass der Wechselrichter auf eine KWEA ausgelegt wurde, möglicherweise deren Kennlinie einprogrammiert hat und über einen Überspannungsschutz verfügt. Bei Leitungen und Kabel sollte auf einen entsprechenden UV-Schutz geachtet werden und grundsätzlich sollte der Weg zwischen Wechselrichter und Anlage möglichst kurz sein (vgl. HTW 2013: 48ff).

Ferner sollte die Anlage (wie bereits erwähnt) über einen **Blitzschutz** verfügen und entweder in den vorhandenen Gebäudeblitzschutz integriert werden oder mittels externer Fangeinrichtung realisiert werden. Zudem sollte dazu ein **Überspannungsschutz** vorgesehen werden.

Die Thematik der **Netzkoppelung** wurde bereits kurz aufgegriffen, soll an dieser Stelle aber nochmals erwähnt werden. Hier gilt vor allem auf die Anschlussbedingungen des betreffenden EVU zu verweisen.

Auch wenn die KWEA rein für den **Eigenverbrauch** geplant ist und ins Hausnetz einspeist, sollte die zuständige EVU verständigt werden um vor allem den potentiellen Störfall abzuklären (vgl. HTW 2013: 48ff).

3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Bei der Errichtung kleiner Windenergieanlagen ist eine Vielzahl an Rechtsregelungen unterschiedlicher Bereiche von Belange. Dabei können sowohl landesrechtliche als auch bundesrechtliche Vorschriften relevant sein. In dieser Arbeit werden in Abhängigkeit vom genauen Projektvorhaben auf die, dem Autor am wichtigsten erscheinenden, Gesetze und Verordnungen in geltender Fassung Bezug genommen, welche für die Stadt Wien relevant sind:

Landesrecht

- Wiener Stadtentwicklungs-, Stadtplanungs- und Baugesetzbuch (Bauordnung für Wien – BO für Wien)
Insbesondere §§ 4, 5, 6 und 7
- Gesetz über die Neuregelung der Elektrizitätswirtschaft (Wiener Elektrizitätswirtschaftsgesetz 2005 – WelWG 2005)
Insbesondere §§ 5, 7, 9 und 11

¹⁵ Ein Wechselrichter wandelt den Gleichstrom des Generators in 1-3-phasigen Wechselstrom um.

- Gesetz über Einrichtungen zum Schutz der Umwelt (Wiener Umweltschutzgesetz)
Insbesondere § 6
- Gesetz mit dem das Wiener Naturschutzgesetz erlassen wird (Wiener Naturschutzgesetz)

Bundesrecht

- Bundesgesetz über die Förderung der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energieträgern (Ökostromgesetz 2012 – ÖSG 2012) sowie der Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend, mit der die Einspeisetarife für die Abnahme elektrischer Energie aus Ökostromanlagen auf Grund von Verträgen festgesetzt werden, zu deren Abschluss die Ökostromabwicklungsstelle ab 1. Juli 2012 bis Ende des Jahres 2013 verpflichtet ist (Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2012 – ÖSET-VO 2012)

Insbesondere §§ 7 und 12 sowie § 6 der Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2012

3.2.1 Bauordnung für Wien

In der Wiener Bauordnung (BO für Wien) sind keine Regelungen für große oder kleine Windenergieanlagen getroffen. Es sind somit weder Ausnahmebestimmungen (etwa als bewilligungsfreies Vorhaben gemäß § 62a Abs. 1) noch Zusatzbestimmungen formuliert. „Nach welchen Grundsätzen der geordnete Ausbau der Stadt vor sich gehen soll“ (§ 4 Abs. 1), wird generell durch die §§ 4 und 5 (Flächenwidmungs- und Bebauungspläne) bestimmt, wobei § 6 die zulässigen Nutzungen, § 7 Schutzzonen, und die §§ 7a bis 7f sonstige wichtige Zonen definieren.

Im Gegensatz zu Niederösterreich (gem. § 19 Abs. 2 Z. 19 NÖ ROG existiert eine eigene Grünlandwidmung „Windkraftanlagen“) können in Wien WEA grundsätzlich nur in Bauland (§ 4 Abs. 2 B. C) und in Sondergebieten (§ 4 Abs. 2 B. D) bewilligt werden. In Frage kommen hierbei prinzipiell

- „gemischte Baugebiete, in denen örtlich begrenzte Teile zusätzlich als Geschäftsviertel oder Betriebsbaugebiete [...] ausgewiesen werden können“ (§ 4 Abs. 2 B. C lit. c),
- „Industriegebiete, in denen örtlich begrenzte Teile zusätzlich bestimmten Industriezweigen oder bestimmten industriellen Verwendungs- bzw. Nutzungsarten vorbehalten oder von solchen ausgenommen werden können“ (§ 4 Abs. 2 B. C lit. d) sowie
- „sonstige Grundflächen für die Errichtung bestimmter, nicht unter eine andere Widmung fallender Gebäude beziehungsweise für nicht unter eine andere Widmung fallende Nutzungen“ (§ 4 Abs. 2 B. D lit. h).

Dabei ist zu beachten, dass

- *„in gemischten Baugebieten [...] keine Bauwerke oder Anlagen errichtet werden [dürfen], die geeignet sind, durch [...] Geräusche, Wärme, Erschütterungen oder sonstige Einwirkungen, Gefahren oder unzumutbare Belästigungen für die Nachbarschaft herbeizuführen“* (§ 6 Abs. 8),
- *„in als Betriebsbaugebiete ausgewiesenen Teilen des gemischten Baugebietes [...] nur Bauwerke oder Anlagen für Betriebs- oder Geschäftszwecke aller Art mit Ausnahme von Beherbergungsbetrieben errichtet werden [dürfen]“* (§ 6 Abs. 9),
- *„in Industriegebieten [...] nur Bauwerke oder Anlagen für Betriebs- oder Geschäftszwecke aller Art mit Ausnahme von Beherbergungsbetrieben errichtet werden [dürfen]“* (§ 6 Abs. 11) und
- *„in Sondergebieten [...] nur solche Bauwerke und Anlagen errichtet werden [dürfen], für die das Sondergebiet bestimmt ist“* (§ 6 Abs. 14).

Des Weiteren können im Flächenwidmungs- und Bebauungsplan *„[...]wegen ihres örtlichen Stadtbildes in ihrem äußeren Erscheinungsbild erhaltungswürdigen Gebiete als in sich geschlossenes Ganzes (Schutzzone) ausgewiesen werden“* (§ 7 Abs. 1) sowie in Bebauungsplänen *„Beschränkungen der im festgesetzten Widmungsgebiet zulässigen Emissionen sowie den Ausschluß bestimmter Emissionserreger zur Minderung der Einwirkungen auf das Widmungsgebiet [...]“* (§ 5 Abs. 4 lit. m) festgelegt werden, welche Berücksichtigung finden müssen.

Der Begriff des Stadtbildes ist in der Wiener Bauordnung recht häufig zu finden, hierbei könnte auch von Relevanz sein, dass der *„Fachbeirat für Stadtplanung und Stadtgestaltung [...] von der Behörde mit der Begutachtung einzelner Bauvorhaben befaßt werden [kann], wenn sie von maßgeblichem Einfluß auf das örtliche Stadtbild sind [...]“* (§ 67 Abs. 2).

Für die nachzuweisenden Pläne und Belege für eine Baubewilligung wird auf die §§ 63 und 64, für das Verfahren – analog zu anderen Bauwerken – auf den § 70 der Bauordnung für Wien verwiesen.

Ferner sollten die §§ 114 Abs. 2 (Blitzschutz), 116 sowie 117 (Schallschutz) und § 134a Abs. 1 lit. e (subjektiv-öffentliche Nachbarrechte bezüglich Immissionen) beachtet werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass KWEA prinzipiell bewilligungspflichtig und nur bei entsprechenden Voraussetzungen des Widmungs- und Bebauungsplans auch bewilligungsfähig sind. In Schutzzone gemäß § 7 kommen KWEA somit nicht in Betracht. Anträge sind bei der Magistratsabteilung 37, der Baupolizei einzubringen.

3.2.2 Wiener Elektrizitätswirtschaftsgesetz 2005

Im Gegensatz zur Bauordnung sind im ELWG 2005 für Windkraftanlagen genehmigungsbezogene Belange angeführt. Grundsätzlich gilt, dass *„die Errichtung, wesentliche Änderung und der Betrieb einer örtlich gebundenen Erzeugungsanlage [...] einer elektrizitätsrechtlichen Genehmigung [bedürfen]“* (§ 5 Abs. 1), wobei als Erzeugungsanlage ein Kraftwerk oder Kraftwerkspark definiert ist. Ein Entfall der Genehmigungspflicht ist gemäß § 6 nur für mobile Erzeugungsanlagen möglich; da dies auf KWEA nicht zutrifft, ist jedenfalls eine Genehmigung nach dem ELWG 2005 erforderlich.

Für kleine WEA ist ein vereinfachtes Verfahren durchzuführen. Wenn die Erzeugungsanlage *„mit [...] Wind [...] betrieben wird [...] und die installierte Engpassleistung maximal 250 kW beträgt [...], so hat die Behörde den Antrag und die Projektunterlagen für einen vier Wochen nicht überschreitenden Zeitraum aufzulegen“* (§ 7 Abs. 1). Diese *„Auflage ist durch Veröffentlichung auf der Internetseite www.gemeinderecht.wien.at und durch Anschlag durch das örtlich zuständige Magistratische Bezirksamt in den unmittelbar angrenzenden Häusern sowie in dem Haus, in dem die Anlage errichtet wird, mit dem Hinweis bekannt zu geben, dass Nachbarn (§ 9) innerhalb dieses Zeitraumes von ihrem Recht, begründete Einwendungen im Sinne des § 11 Abs. 1 Z 1 und 2 gegen die Erzeugungsanlage zu erheben, Gebrauch machen können. Nach Ablauf der Auflagefrist hat die Behörde unter Bedachtnahme auf die eingelangten Einwendungen der Nachbarn die die Anwendung des vereinfachten Verfahrens begründende Beschaffenheit der Anlage mit Bescheid festzustellen, sofern auf Grund der geplanten Ausführung der Anlage zu erwarten ist, dass die Interessen des § 11 Abs. 1 ausreichend geschützt sind. Erforderlichenfalls sind geeignete Auflagen, Bedingungen und Befristungen zum Schutz der gemäß § 11 Abs. 1 wahrzunehmenden und nach § 12 Abs. 4 zu berücksichtigenden Interessen vorzuschreiben. Dieser Bescheid gilt als Genehmigungsbescheid für die Erzeugungsanlage. Die Behörde hat diesen Bescheid binnen drei durch Auflagen, Bedingungen und Befristungen die gemäß § 11 Abs. 1 wahrzunehmenden und nach § 12 Abs. 4 zu berücksichtigenden Interessen nicht hinreichend geschützt werden, ist der Antrag abzuweisen.“* (§ 7 Abs. 1).

Nachbarn im Sinne dieses Gesetzes sind *„alle Personen, die durch die Errichtung, den Bestand oder den Betrieb einer Erzeugungsanlage gefährdet oder belästigt oder deren Eigentum oder sonstige dingliche Rechte gefährdet werden könnten. Als Nachbarn gelten nicht Personen, die sich vorübergehend in der Nähe der Erzeugungsanlage aufhalten und nicht im Sinne des vorherigen Satzes dinglich berechtigt sind. Als Nachbarn gelten jedoch die Inhaber von Einrichtungen, in denen sich, wie etwa in Beherbergungsbetrieben, Krankenanstalten und Heimen, regelmäßig Personen vorübergehend aufhalten, hinsichtlich des Schutzes dieser Personen und die Erhalter von Schulen hinsichtlich des Schutzes der Schüler, der Lehrer und der sonst in Schulen ständig beschäftigten Personen“* (§ 9).

Voraussetzung für eine Genehmigung ist, dass

- „1. eine Gefährdung des Lebens oder der Gesundheit von Menschen oder eine Gefährdung des Eigentums oder sonstiger dinglicher Rechte ausgeschlossen ist,*
- 2. Belästigungen von Nachbarn (wie Geruch, Lärm, Erschütterung, Wärme, Schwingungen, Blendung und dergleichen) auf ein zumutbares Maß beschränkt bleiben und*
- 3. das Ortsbild nicht wesentlich beeinträchtigt wird“ (§ 11 Abs. 1).*

Welche Unterlagen und Nachweise der Behörde zur Genehmigung einer KWEA vorzulegen sind, ist in § 5 Abs. 3 Z. 1 bis 8 aufgelistet und wird an dieser Stelle nicht wiedergegeben; für weitere Informationen wird auf die Website der MA 64 verwiesen (vgl. Wien 2013a: online).

Für KWEA besteht nach dem ELWG 2005 jedenfalls Genehmigungspflicht, Anträge sind bei der Magistratsabteilung 64, für Energieangelegenheiten einzubringen.

3.2.3 Wiener Umweltschutzgesetz

Im Wiener Umweltschutzgesetz ist die Wiener Umweltschutzbehörde festgelegt: „Zur Wahrung der Interessen des Umweltschutzes in Vollziehung von Landesgesetzen wird beim Amt der Wiener Landesregierung eine Umweltschutzbehörde eingerichtet“ (§ 3 Abs. 1), dessen wesentliche Aufgabe es ist, die Interessensvertretung des Umweltschutzes in UVP- und landesrechtlichen Verfahrensangelegenheiten wahr zu nehmen (vgl. WUA 2013: online). Dies beinhaltet auch eine Teilnahme mit Parteienstellung an Verwaltungsverfahren, denn *„die Umweltschutzbehörde hat zur Wahrung der Interessen des Umweltschutzes [...] auf Grund von landesgesetzlichen Bestimmungen durchzuführenden Verwaltungsverfahren Parteistellung sowie das Recht, gegen den das Verfahren abschließenden Bescheid Beschwerde an den Verwaltungsgerichtshof zu erheben [...]“* (§ 6 Abs. 1). Für KWEA sind insbesondere Verwaltungsverfahren nach der Bauordnung für Wien von Belange, vor allem betreffend einer *„Bevollmächtigung von Anlagen, die geeignet sind, eine Gefahr für das Leben oder die Gesundheit von Menschen herbeizuführen oder die Nachbarschaft in einer das örtlich zumutbare Ausmaß übersteigenden Weise zu belästigen gemäß § 61 [der Bauordnung für Wien, Anmerkung]“* (§ 6 Abs. 1 Z. 2 lit. c).

Darüber hinaus kommt der Umweltschutzbehörde Wien *„auch in den sonstigen auf Grund landesgesetzlicher Vorschriften durchzuführenden Verwaltungsverfahren, die auch eine Vermeidung einer erheblichen oder dauernden Schädigung der Umwelt zum Gegenstand haben, das Recht auf Akteneinsicht, auf Teilnahme an mündlichen Verhandlungen sowie auf Stellungnahme zum geplanten Vorhaben zu“* (§ 6 Abs. 2).

Aus dem Wiener Umweltschutzgesetz lassen sich keine direkten oder indirekten bewilligungsrelevanten Pflichten ableiten, wenngleich auf die Parteistellung der Umweltschutzbehörde Bedacht zu nehmen ist.

3.2.4 Wiener Naturschutzgesetz

Zu WEA sind keine speziellen Bestimmungen des Wiener Naturschutzgesetzes vorhanden, dennoch können – in Abhängigkeit des genauen Standorts – Naturschutzaspekte im Verfahren Bedeutung erlangen wenn sie auf Grundlage einer Interessensabwägung zu berücksichtigen sind (vgl. KWK 2013: online). Da KWEA für gewöhnlich nicht in Schutzgebieten gemäß des Naturschutzgesetzes angedacht werden, sind dadurch lediglich etwaige Bestimmungen des Artenschutzes von Relevanz.

3.2.5 Ökostromgesetz 2012

Das Ökostromgesetz regelt im Wesentlichen die Anerkennung einer Anlage als Ökostromanlage, das Netzanschlussrecht und die Kontrahierungspflicht (Abnahmeverpflichtung) sowie die Förderung von Strom aus solchen Anlagen. Anzuerkennen ist eine Anlage *„als Ökostromanlage [...] zur Erzeugung elektrischer Energie, die ausschließlich auf Basis erneuerbarer Energieträger betrieben wird. Die Verwendung nicht erneuerbarer Primärenergieträger ist im für den Betrieb technisch erforderlichen Ausmaß zulässig“* (§ 7 Abs. 1 Z. 1). Ist eine KWEA per Bescheid als Ökostromanlage anerkannt, so ist *„die Ökostromabwicklungsstelle [...] verpflichtet, [...] den ihr angebotenen Ökostrom zu den durch Verordnung gemäß § 19 bestimmten Einspeisetarifen und für die gemäß § 16 festgelegte Dauer [...] zu kontrahieren“* (§ 12 Abs. 1), dies gilt unter anderem auch für *„Ökostromanlagen auf Basis von Windkraft“* (§ 12 Abs. 1 Z. 1 lit. a) für die Dauer von mindestens 13 Jahren (§ 16 Abs. 1 Z. 2). Der Einspeisetarif (Preis pro kWh) wird per Verordnung festgelegt und beträgt bei *„bei Antragstellung im Jahr 2013 9,45 Cent/kWh“* (§ 6 Z. 1 Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2012).

Generell kann jede WEA zu diesen tariflichen Bedingungen ins lokale Netz einspeisen, zwischen großen und kleinen Anlagen wird hierbei nicht unterschieden.

Anträge sind bei der Magistratsabteilung 64 für Energieangelegenheiten einzubringen und können auch gemeinsam mit Anträgen gemäß WEIWG 2005 gestellt werden. Für weitere Informationen wird auf das Web der MA 64 verwiesen (vgl. Stadt Wien 2013: online).

3.2.6 Sonstige Gesetze und Verordnungen

Gegebenenfalls können weitere Gesetze (und Verordnungen) bei der Errichtung einer KWEA von Belangen sein. Denkbar sind insbesondere

- das Bundesgesetz vom 2. Dezember 1957 über die Luftfahrt (Luftfahrtgesetz – LFG), sofern die Anlage eine bestimmte Höhe überschreitet,
- das Bundesgesetz über Eisenbahnen, Schienenfahrzeuge auf Eisenbahnen und den Verkehr auf Eisenbahnen (Eisenbahngesetz 1957 – EisbG), sofern die Anlage im unmittelbaren Umgebungsbereich zu einer Eisenbahnanlage errichtet werden soll,

- das Bundesgesetz vom 16. Juli 1971, betreffend der Bundesstraßen (Bundesstraßengesetz 1971 – BStG 1971), sofern die Anlage in einem Plan- oder Baugebiet sowie im unmittelbaren Umgebungsbereich zu einer Bundesautobahn errichtet werden soll, sowie
- das Bundesgesetz betreffend dem Schutz von Denkmälern wegen ihrer geschichtlichen, künstlerischen oder sonstigen kulturellen Bedeutung (Denkmalschutzgesetz – DMSG), sofern die Anlage im, auf oder unmittelbar bei einem unter Schutz gestellten Denkmal errichtet werden soll (vgl. Energon 2013: 28-31).

Für die Anlage selbst und deren fachgerechter Installation kommen darüber hinaus noch eine Vielzahl an Richtlinien, Verordnungen sowie Normen zum Tragen. Eine Arbeitsgruppe technischer Amtssachverständigen hat dazu einen „Anforderungskatalog für die Beurteilung von kleinen Windenergieanlagen samt Erläuterungen“ für das Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend erstellt (BMWfJ 2012), in welchem eine Vielzahl an zu beachtenden und teilweise zwingend verpflichtenden Anforderungen an eine KWEA aufgearbeitet sind.

3.3 (Stadt-)Planerische und umweltrelevante Aspekte

Abgesehen von technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen sind für ein Stadtgefüge noch eine Vielzahl an weiteren Herausforderungen vorhanden, die mitunter nicht immer nach pragmatischen Gesichtspunkten behandelt werden können. Dies trifft überwiegend auf wahrnehmungsbezogene Aspekte oder auf solchen die neuen Erkenntnissen zugrunde liegen, zu. Im Folgenden sollen die wichtigsten umweltrelevanten Gesichtspunkte in kompakter Form thematisiert werden, vor allem jene, welche KWEA adressieren, wie auch Herausforderungen, die sich aus einer städtebaulichen Konfiguration heraus ergeben können.

3.3.1 Systembezogene Umweltverträglichkeit

Ein wichtiger Aspekt bei WEA bzw. bei allen erneuerbaren Energien ist zweifellos deren systembezogene Umweltbilanz oder Ökobilanz. Um solche umfangreiche Bilanzen zu erstellen, werden zum Beispiel der Energiebedarf

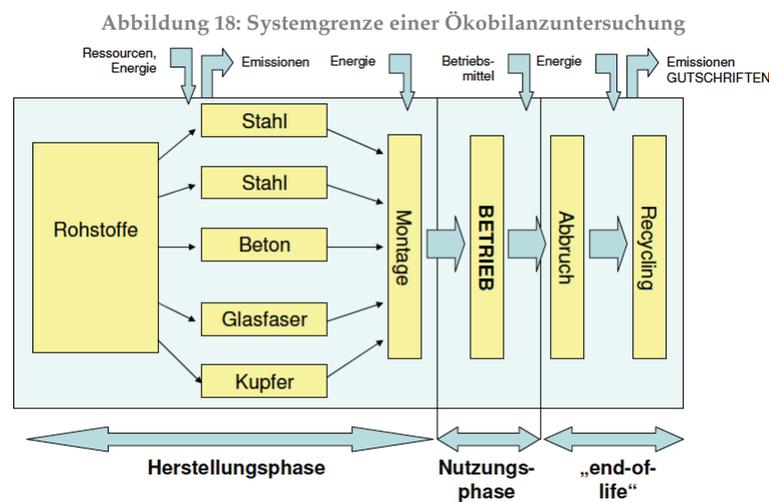
- zur Herstellung der benötigten Materialien (inklusive etwaiger Speicherkomponenten),
- für einen Abbruch,
- für das Recycling und die gesamte Entsorgungsphase

der Betriebslebenszeit mit der kumulierten erzeugten Strommenge gegenübergestellt (Primärenergiebedarf und erzeugte Energie). Das erzeugte Gesamtvolumen an Energie respek-

tive Strom wird anschließend mit der Umweltlast der eingesparten Energie aus dem öffentlichen Netz verglichen (vgl. Hübner, Pohl 2010: 31).

Eine Ökobilanz gilt stets nur für eine bestimmte Anlage, da sich unterschiedliche WEA in ihrem Aufbau, Materialausstattung und damit einhergehender Materialherstellung und -gewinnung, etc. unterscheiden können. Eine Bilanz kann an dieser Stelle somit lediglich exemplarischen Charakter aufweisen. Als Beispiels für die Systemgrenze einer solchen Bilanzierung dient Abbildung 18.

In einer Untersuchung von Fehrenbach (2009) wurden unter anderem Wirkungen in Bezug auf Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung, Krebsrisikopotential und Feinstaubbelastung abgeschätzt. Bezogen auf den deutschen Strommix (aus 2009) ergibt sich bei der untersuchten Anlage ein CO₂-Äquivalentne von rund 4% (26g CO₂-Äq. der Anlage bezogen auf 630g CO₂-Äq. des Strommixes) pro Kilowattstunde.



Quelle: Fehrenbach 2009: 18

Bezogen auf die angesprochenen Wirkungen sind lediglich die krebserzeugenden Emissionen wegen den getroffenen Annahmen zu Herstellung und Recycling negativ, alle sonstigen untersuchten Wirkungen sind deutlich positiv (vgl. Fehrenbach 2009: 31).

Bei Großanlagen sind die Einsparungen auf Grund ihrer besseren Wirkungsgrade und den auf ihre Nennleistung bezogenen geringeren Materialverbrauch entsprechend höher.

3.3.2 Standortbezogene Umweltverträglichkeit

Wie dargestellt, zeigt sich die „globale“ Ökobilanz erwartungsgemäß durchaus positiv. Für eine positive standortbezogene Bewertung bedarf es nun unter anderem einer Berücksichtigung spezifischer Umwelteigenschaften in der Umgebung.

Umgebungsgefahren

Bei WEA gehen besondere Gefahren für den Menschen allenfalls durch die sich bewegenden Rotorblätter aus. Zum einen könnte sich bei einem **schweren technischen Versagen** ein Rotorblatt lösen und zum anderen besteht die Gefahr – entsprechende meteorologische Bedingungen vorausgesetzt – von Eisbildung und darauffolgendem **Eiswurf**.

Dem möglichen technischen Versagen ist entgegenzuhalten, dass selbst im denkbar schlechtesten Fall die Auswirkungen nicht so drastischen wären, wie bei einem ähnlich kritischen technischen Versagen eines Luftfahrzeuges oder dergleichen (vgl. Hau 2008: 598). Eine Gefährdung durch abfallende Eisstücke kann unter Umständen insbesondere bei sich in Betrieb befindlichen Anlagen bestehen; Eisansätze können zudem zu mechanischer Unwucht am Rotor führen. Mit anlagentechnischen Maßnahmen, wie etwa der Beheizung oder Abschaltung bei entsprechenden Bedingungen oder auch speziellen wasserabweisenden Beschichtungen kann diese Gefahr deutlich minimiert werden. In Österreich kommen beispielsweise bei höher gelegenen Anlagen sensorgesteuerte Blattbeheizungen zum Einsatz (vgl. Kaltschmitt, Streicher 2009: 222).

Im Hinblick auf kleine WEA ist einer Verletzungsgefahr für den Menschen so gut wie nicht vorhanden.

Schattenwurf und Reflexionen

Wie auch alle sonstigen Bauwerke werfen WEA bei entsprechender Wetterlage und Sonnenstand Schatten. Bei stehenden Rotoren stellt dies im Allgemeinen kein Problem dar, bei sich bewegenden Flügeln durchschneiden diese periodisch das Sonnenlicht was zudem meist als unangenehm empfunden wird und zum sogenannten **Diskoeffekt** führt. Diese optische Immission wird deshalb nur bis zu einer bestimmten Grenze als zumutbar angesehen (vgl. Hau 2008: 614f). Als Richtlinie für die maximale Beschattungsdauer in dieser Form können 30 Stunden im Jahr bzw. 30 Minuten am Tag herangezogen werden. Eine Schattenwurfprognose sollte jedenfalls dann erstellt werden, wenn im Umfeld von der fünffachen Gesamthöhe einer WEA an einem geplanten Standort relevante, also schutzwürdige, Objekte oder Flächen liegen (vgl. BMWFJ 2012: 25). Bei modernen Anlagen ist es außerdem möglich den maximalen Schattenwurf unter Berücksichtigung des Sonnenstandes durch eine Abschaltautomatik zu kontrollieren, wenngleich dies die einzige technische Möglichkeit ist um unangenehme Diskoeffekte zu minimieren (vgl. Energon 2013: 20). Diese Effekte können durch zusätzliche **Lichtreflexionen** verstärkt werden, was aber mit entsprechender Rotorblattbeschichtung (wie mittelreflektierenden Farben und matten Glanzgraden) reduziert werden kann (vgl. Kaltschmitt, Streicher 2009: 221).

Wenngleich die optischen Immissionen von KWEA nicht auszuschließen sind, so sind deren Auswirkungen aufgrund der vergleichsweise kleinen Rotoren tendenziell gering. Im

urbanen Umfeld kann jedoch durch räumliche Nähe eine Überprüfung erforderlich sein. Für vertikalachsgelagerte KWEA sind Schatten und Reflexionen kaum problematisch (vgl. Energon 2013: 23).

Lärm

Betriebene Windenergieanlagen verursachen auf zweierlei Arten Schallimmissionen, einerseits durch die bewegenden Teile wie Getriebe und Generator („**mechanischer Schall**“) und andererseits durch **aerodynamischen Schall**, welcher durch die Strömung von Luftmassen durch die Rotorblätter entsteht. Letzterer nimmt folglich mit steigender Windgeschwindigkeit zu. Die aerodynamischen Geräuschquellen sind vorwiegend bei kleinen und mittleren Windgeschwindigkeiten von Relevanz, da bei höheren Windgeschwindigkeiten meist das natürliche Geräusch der Windströmung dominiert; mechanische Geräusche können durch entsprechende lärmdämmende Maßnahmen deutlich reduziert werden (vgl. Kaltschmitt, Streicher 2009: 220).

Dieser Hörschall kann ab einem bestimmten Pegel als Lärm empfunden werden. Im Handbuch Umgebungslärm (HB Umgebungslärm 2009) sind dabei nachfolgende Pegelgrenzwerte angeführt:

Abbildung 19: Lärmimmissionsgrenzwerte nach ÖNORM

Planungsrichtwerte gemäß ÖNORM S 5021, Teil 1					
Kat.	Gebiet und Standplatz	Planungsrichtwerte bzw. zul. Immissionsgrenzwerte ¹⁾			
		L _{A,Gg,TAG}	L _{A,eq,TAG}	L _{A,Gg,NACHT}	L _{A,eq,NACHT}
BAULAND					
1	Ruhegebiet, Kurgebiet, Krankenhaus	35	45	25	35
2	Wohngebiete in Vororten, Wochenendhausgebiete, ländliches Wohngebiet, Schulen	40	50	30	40
3	städtisches Wohngebiet, Gebiet für Bauten land- und forstwirtschaftlicher Betriebe mit Wohnungen	45	55	35	45
4	Kerngebiet (Büros, Geschäfte, Handel, Verwaltung ohne wesentliche Emission störender Schalls, Wohnungen), Gebiet für Betriebe ohne Schallemission	50	60	40	50
5	Gebiet für Betriebe mit geringer Schallemission (Verteilung, Erzeugung, Dienstleistung, Verwaltung)	55	65	45	55

Quelle: ÖNORM S 5021, Teil 1; entnommen aus HB Umgebungslärm 2009: 36

Für den amplitudenbewerteten Dauerschallpegel¹⁶ ($L_{A,eq}$) gelten somit für städtisches Wohngebiet in der Nacht 45 dB(A) und tagsüber 55 dB(A), diese Werte stellen somit die

¹⁶ Der amplitudenbewertete Pegel kommt dem subjektiven Höreindruck am nächsten und wird deshalb sehr häufig für Kennwerte verwendet (vgl. Hau 2008: 602f).

Mindestanforderung für KWEA dar. Speziell ausgelegte kleine WEA sind, bezogen auf Schallemissionen, durchaus für sensiblere Standorte geeignet. Sehr leise Anlagen sind schon im Bereich von 35 - 45 dB mit einem Abstand von 40 - 60m verfügbar (vgl. Raberger 2011: 9).

Mit Gefährdung oder Belästigung im nicht hörbaren Infraschallbereich ist im Allgemeinen nicht zu rechnen (vgl. Kaltschmitt, Streicher 2009: 220).

Um die Grenzwerte einhalten zu können besteht zudem die Möglichkeit KWEA mit einer Abschaltautomatik (z.B. bei bestimmten Windgeschwindigkeiten in der Nacht) zu versehen. Bei einer Installation auf Gebäuden ist zudem auf den bereits in 3.1.3 hingewiesenen Körperschall Rücksicht zu nehmen, was (bei nachträglicher Installation) auf Wohngebäuden durchaus problematisch sein kann (vgl. BMWFJ 2012: 26).

Beeinträchtigung der Fauna

Unter Umständen können WEA Auswirkungen auf die Tierwelt und hier vor allem auf fliegende Lebewesen ausüben. Bei Vögeln zählt neben Kollisionen (Vogelschlag) auch Meideverhalten zu den Störfaktoren, wobei das Risiko von Vogelschlag in der Regel für die meisten Arten als gering eingeschätzt wird. Das Risikopotential steigt jedoch mit dem Nutzungsverhalten und -frequenz von verschiedenen Arten (vgl. Kaltschmitt, Streicher 2009: 223). Daraus lässt sich für den urbanen Raum ein geringes Risiko ableiten, welches aber bei unterschiedlichen Gattungen auch variieren kann.

Bei – vorwiegend tagesaktiven – Insekten könnte der Schattenwurf der Rotoren zur Meidung von Standorten führen und dadurch lebensraumeinschränkend wirken (vgl. Kaltschmitt, Streicher 2009: 223). Bei kleineren WEA ist diese Einschränkung entsprechend geringer.

Obwohl Fledermäuse sich von größeren Anlagen nicht wesentlich gestört fühlen, können sie bei kleinen WEA ein gewisses Meideverhalten aufzeigen. Größere Einflüsse auf den Lebensraum von Fledermäusen sind vor allem dann gegeben, wenn Anlagen in ohnehin bereits begrenzten Habitaten errichtet werden (vgl. Minderman et al. 2012: 5f).

Beeinträchtigung der Flora

Die Beeinträchtigungen, welche auf die Pflanzenwelt ausgeübt werden können, beschränken sich im Wesentlichen auf den Nahbereich von etwaigen Fundamenten. Mesoklimatische Auswirkungen sind dabei nicht zu erwarten (vgl. Kaltschmitt, Streicher 2009: 222f).

3.3.3 Standortbezogene „Quartiersverträglichkeit“

Als besonderen zu berücksichtigen Aspekt im bebauten Umfeld einer Stadt ist die Verträglichkeit einer (K)WEA mit der vorherrschenden Raumsituation zu nennen. Diese Thematik

könnte zwar, einem UVP-Ansatz folgend im Sinne von Kultur- und Sachgüter, auch zur Umweltverträglichkeit zugerechnet werden, soll aber an dieser Stelle aufgrund ihrer Bedeutsamkeit unter dem Begriff „Quartiersverträglichkeit“ subsummiert werden.

Wie aus den vorangegangenen Kapiteln bereits bekannt ist, sind die Energieausbeute betreffend ideale Installationsorte vor allem jene, die möglichst hoch und deren Umgebung möglichst niedrig liegen. Idealtypischer Standort auf einem Dach wäre somit ein möglichst vielgeschossiges Hochhaus mit möglichst niedriger Bebauung im Umfeld und dabei eine möglichst hohe Nabenhöhe (Turmhöhe) der Anlage (siehe hierzu Variante 1 der Modellierungsergebnisse). Bei entsprechender Rotordimension wäre eine solche Anlage freilich schon von weitem sichtbar und mitunter nicht sonderlich mit der bestehenden Silhouette und dem bestehenden Stadtbild verträglich.

Eine Standortfrage kann durch einen solchen Ansatz womöglich nicht gelöst werden, das ausschlaggebende Kriterium liegt zweifelsohne in der Größenordnung bzw. einer angebrachten Maßstäblichkeit.

Das soll nun nicht bedeuten, dass auf Hochhäusern keine entsprechenden Anlagen errichtet werden können, aber wenn dies geschieht, dann sollte dies in „quartiersverträglichem“ Maße stattfinden. Erster Ansatzpunkt für ein solches Maß sind die Baumassen und Geschosse in der direkten Umgebung, sowie deren Nutzungsschwerpunkt (Widmung). Befindet sich kulturelles, denkmalgeschütztes Erbe in der Umgebung oder könnte eine wesentliche Sichtbeziehung gestört werden, so ist von einer Anlage abzusehen, ganz ungeachtet rechtlicher Rahmenbedingungen. In sehr dicht bebautem Gebiet ist zudem durch die hohe Rauigkeit eine energetisch sinnvolle Anlage in Frage zu stellen.

Wie sich KWEA optisch ins Stadtbild einfügen ist mitunter auch eine Gestaltungsfrage der Anlagen selbst, eine gewisse Grundakzeptanz und Grundinteresse der Bevölkerung an dieser Technologie scheint bisher gegeben (vgl. Hübner, Pohl 2010: 43).

Aufgrund der Nutzungen und der daraus folgenden geringeren Sensibilität des Raumgefüges scheinen insbesondere gemischte Baugebiete und Gewerbezone interessant, zudem sind bei Stadterweiterungs- und Stadterneuerungsprojekten durchaus gebäudeintegrierte Konzepte denkbar.

Um die tatsächlichen Wirkungen von KWEA im Stadtkörper besser einschätzen zu können eignet sich auch das Experimentieren mit diesen Anlagen, da sie vergleichsweise einfach montiert als auch demontiert sind. Doch selbst wenn sich die Stadt(-verwaltung) Projekte oder Projektreihen umsetzen möchte, können daraus folgend keine allgemeingültigen Bestimmungen bezüglich der Einbettung ins Stadtbild abgeleitet werden, die städtebauliche Bewertung von KWEA wird eine Einzelfallprüfung bleiben.

Die Herausforderung eines abgestimmten Stadtbildes ist darüber hinaus freilich keine rechtliche oder rein planerische Fragestellung, sondern primär eine Frage der Akzeptanz

durch die ansässige Bevölkerung bzw. durch die Stadtgesellschaft. Den sozialen Aspekten der Windenergie widmet sich das nachfolgende Unterkapitel.

3.4 Sozialwissenschaftliche Aspekte

Wichtige Aspekte in Zusammenhang mit der Realisierung von WEA-Projekten sind stets auch sozialen Ursprungs. Um das ambitionierte 20/20/20 Ziel der Europäischen Union (vgl. EU 2013: online) zur Erreichen, benötigt es unter anderem auch den Ausbau von Windenergie. In der Innovationsforschung wird deshalb der hohe Stellenwert von **sozialer Akzeptanz** (gegenüber Windenergie) bereits seit den 1980er Jahren diskutiert (vgl. Geissmann, Huber 2011: 8-11, Huber, Horbaty 2012: 13f, Wüstenhagen et al. 2007: 2683-2691).

Die verschiedenen Interessenslagen, welche bei den in ein Projekt involvierten Akteuren bestehen können lassen sich nach Wüstenhagen et al. (2007) grob in drei Dimensionen zusammenfassen (Abbildung 20):

- die sozio-politische Akzeptanz
- die Marktakzeptanz sowie
- die lokale gesellschaftliche Akzeptanz (vgl. Wüstenhagen et al. 2007: 2684)

Abbildung 20: Drei Dimensionen sozialer Akzeptanz erneuerbarer Energieinnovationen



Quelle: Wüstenhagen et al. 2007: 2684

Sozio-politische Akzeptanz

Als sozio-politische Akzeptanz wird die soziale Akzeptanz auf einer sehr breiten und grundlegenden Ebene verstanden. Sie spiegelt die öffentliche Meinung sowie die Ausrichtung von Politik und Medien wider (vgl. Geissmann, Huber 2011: 8).

In Österreich scheint die Akzeptanz von Windenergie auf dieser gesellschaftlichen Ebene recht hoch zu sein, deuten doch viele Umfragen auf eine ungedämpfte und positive Stimmung hin (vgl. IG Windkraft 2013a: online).

Bei einer im Sommer 2011 durchgeführten Umfrage mit über 1.200 Befragten sprachen sich 77% für den Ausbau von Windenergieanlagen aus, somit liegt die Zustimmung zu Windenergie in der Bevölkerung knapp hinter der Sonnenenergie an zweiter Stelle aller Stromerzeugungsarten. Nur drei Prozent der Befragten haben sich explizit gegen einen Ausbau der Windenergie ausgesprochen (vgl. IG Windkraft 2013b: online).

Als sozio-politische Akteure werden vor allem Behörden, Magistrate, Politik, Tourismus, Planer, Experten, Meinungsmacher, Ausbilder, NGO und nicht zuletzt die Medien adressiert (vgl. Huber, Horbaty 2010: 26ff).

Marktakzeptanz

Die Marktakzeptanz von Windenergie zeigt sich bei den Abnehmern von Ökostrom bzw. „Windstrom“, wobei als Marktakzeptanz der Prozess der Marktadaption von Innovationen – in diesem Fall von Energie aus WEA – bezeichnet wird und auch der Prozess der Akzeptanz von erneuerbaren Energien in den EVU selbst. Für Windenergie oder erneuerbare Energien im Allgemeinen laufen diese Prozesse der Innovationsverbreitung anders als bei sonstigen Marktgeschehen ab, da sie leitungsgebunden sind auch teilweise anderen Marktregeln unterstehen, für die unter anderem auch die Politik ausschlaggebend ist. Neben Energieversorgungsunternehmen, Investoren, Finanzinstitute und Projektentwickler sind hier vor allem die Energie-Control Austria sowie die Abwicklungsstelle für Ökostrom von Bedeutung (vgl. Wüstenhagen et al. 2007: 2685f).

Lokale gesellschaftliche Akzeptanz

Die wichtigste Dimension dieses „Akzeptanzdreieckes“ ist wohl auf der lokalen Ebene zu finden. Unter anderem sind durch die politischen Ausrichtungen der EU bereits Richtungen eingeschlagen, zu welchen sich die nationalen Regierungen auch bekannt haben. Dies zeigt sich ferner in dem Netzanschlussrecht und der Kontrahierungspflicht, welche im Ökostromgesetz festgelegt wurden. Sofern es bei der Realisierung von WEA zu Auseinandersetzungen kommt, sind diese meist durch lokale Akteure gegeben. Im Vordergrund stehen dabei meist die folgenden Themen:

- Lebensqualität,

- Kosten- und Nutzenverteilung sowie
- Bevölkerungsbeteiligung (vgl. Geissmann, Huber 2011: 8).

Unter dem Begriff der **Lebensqualität** wird häufig die Situation von Anrainer diskutiert. Diese können sich etwa von Geräuschemissionen einer WEA gestört fühlen, wobei dies vor allem in Gebieten mit ansonsten niedrigeren Geräuschpegeln der Fall ist. Unter der Kenntnis, dass Lärm auch immer eine psychologische Komponente einnimmt, können sich Menschen bei entsprechender Beteiligung – mitunter auch finanzieller Art – deutlich weniger durch WEA gestört fühlen. Ferner werden häufig der Verlust von natürlichen Lebensräumen und Gefährdungen bestimmter Tierarten (vor allem Vögel) befürchtet (vgl. Geissmann, Huber 2011: 8f). Selbst wenn diese Befürchtungen vor allem auf große WEA zutreffen, so können überdies die bereits erwähnten Umweltaspekte im vorangegangenen Abschnitt auch bei Realisierungsprojekten von KWEA wesentlichen Einfluss ausüben.

Neben den genannten Befürchtungen sind (bei GWEA) auch Aspekte der **Verteilungsgerechtigkeit** von Brisanz. Dies bezieht sich vorwiegend auf die lokale Wertschöpfung, Entschädigungen und allenfalls Beteiligungen (vgl. Geissmann, Huber 2011: 9f). Wertschöpfungseffekte und Entschädigungsansprüche (Standortgemeinde, Grundeigentümer) fallen bei kleinen, auf Gebäuden installierten Anlagen in einem größeren Umfang überwiegend weg.

Der wichtigste Punkt auf der lokalen gesellschaftlichen Ebene – und dies gilt für große als auch kleine Anlagen gleichermaßen – ist gewiss eine ausreichende **Einbeziehung der ansässigen Bevölkerung**.

Damit Installationen von (K)WEA als legitim und der Bewilligungs- und Kommunikationsprozess als fair empfunden wird, bedarf es der Einbeziehung der Bevölkerung in den Planungs- und Entscheidungsablauf. Die Einwendungen und Ideen der Anrainer sollen dabei nicht als Renitenz sondern als wertvolle Vorschläge zu einer Projektoptimierung verstanden werden; dies setzt auch dementsprechende Anpassungsbereitschaft der beteiligten Planer voraus. Erfahrung mit Windprojekten zeigen, dass das frühzeitige Einbinden und eine offene Kommunikation die Kooperation und folglich den gesamten Realisierungsprozess maßgeblich erleichtert, wobei bei allen Projekten stets auf dessen Spezifika einzugehen ist (Landschaftsraum, Ökosysteme, Geschichte und Strukturen) (vgl. Geissmann, Huber 2011: 10).

Beteiligungsformen im (Wiener) Stadtraum könnten dabei sehr vielfältig gestaltet sein, beispielsweise könnte die lokale Bevölkerung – nach entsprechender Aufklärung – darüber entscheiden, welche Anlagentypen installiert werden sollen oder Ähnliches. Eine andere Möglichkeit wäre interessierte Personen – in einem ersten Schritt in Wien – an Forschungs- und Versuchsanlagen aktiv zu beteiligen. Generell sollte hier durchaus die Devise des Experimentierens gelten.

4 Potentialabschätzung mit GIS-Methoden

Eine der wesentlichen Fragestellungen dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung, ob Geographische Informationssysteme einen Beitrag zur Potentialabschätzung für Kleinwindenergie leisten können. In der gegenwärtigen Literatur scheinen methodische Ansätze mittels GIS bisweilen fast nicht vorhanden. Dies mag zwar an der sehr hohen Komplexität der Windverhältnisse im urbanen Umfeld liegen, verwundert aber dennoch, da gerade bei räumlichen Fragestellungen wie jener eines geeigneten Standortes ein GIS im Allgemeinen ein profundes Werkzeug darstellt¹⁷.

In diesem Kapitel wird dargelegt, wie – auf Basis entsprechender mathematischer Grundannahmen – ein **allgemeingültiges Modell** für eine bebaute Umwelt entwickelt werden kann. Anhand eines Fallbeispiels wird in weitere Folge gezeigt, wo sich Potentialflächen im Stadtraum befinden können und wie diese visualisiert werden können.

Eines sei jedoch vorweg hervorgehoben:

Ergebnis dieses Modellierungsansatzes sind lediglich generelle Potentialflächen. Die Ergebnisse hängen stets von der Güte der zugrunde gelegten Eingangsparameter ab und bauen auf einer empirisch entwickelten Schätzfunktion auf. Tatsächliche Energieerträge sind somit bestenfalls innerhalb einer gewissen Bandbreite ableitbar.

Wenngleich es von hoher Wichtigkeit bei Energiepotentialmodellierungen ist, immer darauf hinzuweisen, dass eine solche Modellierung nicht im Stande ist eine genaue und ausreichend lange Messung zu ersetzen, so sind die Erkenntnisse daraus nicht minder Wert zu schätzen. Vor allem in einem frühen Stadium einer (strategischen) Planung ist das Wissen über denkbare Standorte von hohem Stellenwert.

Die Resultate der Modellierung beruhen zudem auf mathematischen Annahmen und sind insofern auch nur innerhalb dieser Annahmen gültig. Diese Systemgrenze sowie benötigte Datengrundlagen werden auf den folgenden Seiten vorgestellt.

¹⁷ Für die Ermittlung von geeigneten Standorten für große WEA werden GIS freilich längst verwendet.

4.1 Methodik und Datengrundlagen

Für die Vorhersage von Windverhältnissen im Kontext der Windenergie eignen sich im Wesentlichen zwei Arten,

- die Modellierung sowie
- die Messung.

Eine Messung erscheint im städtebaulichen Maßstab zur Potentialfindung zu aufwendig, sie ist dann geeignet (und auch notwendig), wenn bereits bestimmte zu untersuchende Standorte feststehen.

Für eine modellhafte Abbildung sind insbesondere Methoden der Strömungsmechanik bzw. der numerischen Strömungsmechanik (CFD, Computational Fluid Dynamics)¹⁸ sowie der Geographischen Informationssystemen geeignet. Numerische Methoden scheiden hieran ab einer bestimmten Größe des Untersuchungsraumes aus Rechenkapazitätsgründen aus.

Somit bleibt lediglich die Möglichkeit mittels GIS Methoden zu arbeiten. Im Folgenden werden die mathematischen Modellannahmen gezeigt; sie sind ihrerseits aus einem CFD-Ansatz sowie den bereits diskutierten physikalischen Determinanten entstanden (vgl. Abschnitt 2.2).

4.1.1 Mathematische Modellannahmen

Wie im Kapitel zu Grundlagen in Wind und Windenergie bereits beschrieben, können Windströmungen und -schichtungen sehr komplexe Verhältnisse darstellen. Es wurde auch gezeigt, dass die vertikalen Windprofile im Wesentlichen aus der darunterliegenden Oberflächenbeschaffenheit resultieren.

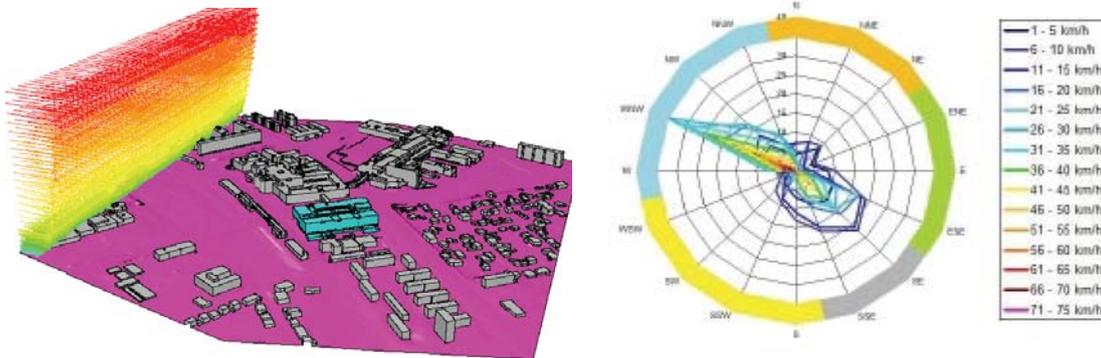
Um diesen Umstand detaillierter zu untersuchen, hat ein Team vom Austrian Institute of Technology (AIT) um Mirza Popovac im Jahr 2011 einen Ausschnitt des Kagraner Stadtteils genauer betrachtet und aus einer numerischen Simulation einen allgemeinen Formel Ausdruck entwickelt. Diese Studie des AIT liegt der vorliegenden Arbeit als wesentlicher Input zu Grunde. Wenngleich an dieser Stelle auf eine detaillierte Abhandlung der Formelentwicklung verzichtet werden muss, sollen die wichtigsten Eckpunkte und Erkenntnisse kurz erläutert werden.

Abbildung 21 zeigt den Untersuchungsteilraum der Donaustadt. Links im Bild ist das vertikale Geschwindigkeitsprofil für eine Windrichtung dargestellt, sie beruht auf einem Exponentialansatz. Rechts im Bild ist die lokaltypische Windverteilung dargestellt. Die Be-

¹⁸ Bekanntestes Beispiel aus der numerischen Strömungsmechanik dürfte die Finite-Elemente-Methode sein. Sie wird beispielsweise bei statischen Problemstellungen verwendet.

rechnungen wurden in fünf Windrichtungsgruppen durchgeführt und sind entsprechend ihrer relativen Häufigkeit überlagert worden.

Abbildung 21: Geometrie, Windprofil und Windrichtungsverteilung für einen städtebaulichen Ausschnitt



Quelle: Popovac et al. (2011: 2)

Auf die Weibullverteilung wurde bereits eingegangen (S. 17), außerdem können die Windgeschwindigkeitsvarianten auch mittels der Weibullfunktion

$$f(u) = k \cdot \frac{u^{k-1}}{c^k} \cdot e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k} \quad [4.1]$$

beschrieben werden, wobei u hier die Geschwindigkeit bezeichnet und c sowie k die bereits bekannten Scale- und Shapeparameter darstellen.

Für das n -te Moment dieser Verteilung gilt indes

$$m_n = c^n \cdot \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right) \quad [4.2]$$

wobei Γ die Gammafunktion kennzeichnet. Beim ersten Moment ($n=1$) besteht weiters der Zusammenhang $m_1 = u$. Für das dritte Moment der Verteilung ($n=3$) kann nun eine grobe, aber dadurch einfache und schnelle Abschätzung der effektiven Energiedichte abgeleitet werden:

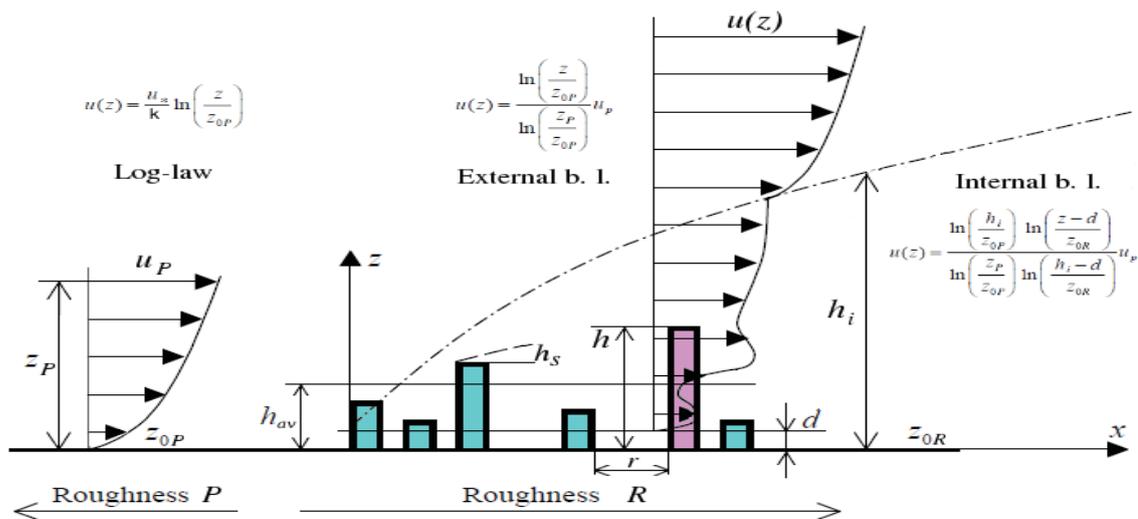
$$E_{eff} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot m_3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[c^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \right] \quad [4.3]$$

Popovac et al. (2011) haben in ihrer Arbeit auch den Einfluss der Gebäudehöhe auf die Energiedichte nachweisen können. Eine signifikante Änderung der Leistungsdichte bei horizontalem Verschieben von Gebäuden (bis 20m) konnte dagegen nicht nachgewiesen werden. Die Autoren erklären dies zum einen dadurch, dass die Windgeschwindigkeit bekanntlich zur dritten Potenz in die Leistungsberechnung eingeht (siehe auch [2.4]) und so die Gebäudehöhe wesentlich mehr Einfluss ausübt. Zum anderen lässt sich dies dadurch begründen, dass durch Veränderung der geometrischen Komplexität auch die Komplexität verschiedener Strömungseffekte (Separationseffekte, etc.) zunimmt, die sich wiederum gegenseitig beeinflussen können (vgl. Popovac et al. 2011: 5f).

Bei Bekanntsein der Windgeschwindigkeit u ($=m_1$) an der observierten Stelle, ist es somit möglich eine effektive Energiedichte zu modellieren.

Wenn nun keine Messung möglich oder sinnvoll erscheint, muss die Geschwindigkeit am Untersuchungsstandort bzw. den Standorten ebenfalls errechnet werden. Eine Möglichkeit dies zu bewerkstelligen ist in Abbildung 22 illustriert.

Abbildung 22: Idealisierte urbane Konfiguration



Quelle: Popovac (2012a)

Tritt eine Windströmung in eine Stadt ein, erfährt sie eine Änderung der Rauigkeitslänge (Bodenrauigkeit) von z_{0p} nach z_{0r} . Dabei entsteht eine neue Grenzschicht (innere Grenzschicht, internal boundary layer) bis zu einer gewissen Höhe h_i . Bis zu dieser Höhe gilt nun nachfolgender Zusammenhang (vgl. Mertens 2006: 22f, Popovac 2012a):

$$u(z) = \frac{\ln\left(\frac{h_i}{z_{0p}}\right) \cdot \ln\left(\frac{z-d}{z_{0r}}\right)}{\ln\left(\frac{z_p}{z_{0p}}\right) \cdot \ln\left(\frac{h_i-d}{z_{0r}}\right)} \cdot u_p \quad [4.4]$$

Die Höhe der inneren Grenzschicht an der Stelle x kann ermittelt werden durch

$$h_i(x) = 0,28 \cdot z_{0r} \cdot \left(\frac{x}{z_{0r}}\right)^{0,8} \quad [4.5]$$

wobei für x auch näherungsweise $100 \cdot h$ angenommen werden kann, sofern sich das untersuchte Gebiet nicht unmittelbar am Stadtrand befindet (vgl. Popovac 2012a).

Die bereits erwähnte Versatzhöhe d kann durch den Ausdruck

$$d = h_{av} - 4,3 \cdot z_{0r} \cdot (1 - A_h) \quad [4.6]$$

ermittelt werden, wobei h_{av} die durchschnittliche Gebäudehöhe und A_h den Anteil der bebauten Fläche kennzeichnet. In der Literatur werden hierzu typische Werte genannt und empfohlen (vgl. Mertens 2006: 21), in der GIS-Modellierung werden diese jedoch genau berechnet. Selbiges gilt für die Rauigkeitslänge im urbanen Raum (z_{0r}), die häufig mit 0,8m angenommen wird und in diesem Modell mit

$$z_{0r} = 0,08 \cdot A_h \cdot h_{av} \quad [4.7]$$

Berücksichtigung findet.

Die in [4.4] erläuterte Beziehung wird in der Arbeit von Popovac (2011) noch mit einem Profilkorrekturfaktor ψ versehen. Er stellt den Ausdruck

$$\psi = \frac{d^{0,292}}{r_b^{0,044} \cdot h^{0,248}} \quad [4.8]$$

dar, wobei sich der „Turbulenzabstand“ r_b aus den Parametern des zu untersuchenden Gebäudes mittels

$$r_b = (W_b \cdot L_b \cdot A_h)^{\frac{1}{2}} \quad [4.9]$$

berechnen lässt; W_b bezeichnet die Gebäudebreite (quer zur Windrichtung) und L_b die Gebäudelänge (in Windrichtung).

Um nun die Geschwindigkeit u in der Höhe z (entspricht der Gebäudehöhe zuzüglich einer Ablösehöhe oder Separationshöhe, ähnlich der Versatzhöhe) berechnen zu können, gilt für ein Gebäude der Zusammenhang

$$z = h + h_s = h + 0,28 \cdot W_{eff}^{\frac{2}{3}} \cdot L_{eff}^{\frac{1}{3}} \quad [4.10]$$

wobei die effektive Länge in Windrichtung L_{eff} mit $\frac{1}{2} \cdot L_b$ genähert wird und für die effektive Breite quer zur Windrichtung die Beziehung

$$W_{eff} = \min[(h - d), W_b]^{\frac{2}{3}} \cdot \max[(h - d), W_b]^{\frac{1}{3}} \quad [4.11]$$

gilt.

Die Aufgabenstellung an den Autor der vorliegenden Arbeit war es nun, diese mathematischen Beziehungen in einen räumlichen Zusammenhang zu bringen und mittels einer Form der Programmierung in ein einfach zu verwendendes Werkzeug zu gießen.

Dazu waren bestimmte Datengrundlagen und eine strategische Herangehensweise von Nöten die im Folgenden kurz aufgezeichnet werden soll.

4.1.2 Datengrundlagen und Herangehensweise

Da die Arbeit von Mirza Popovac (2011) als Grundlage einer städtebaulichen Konfiguration einen Ausschnitt in Kagran gewählt hatte, wurde auch das Modell anhand der selben dreidimensionalen Daten entwickelt. Dies konnte auch eine Verifizierung der Ergebnisse gewährleisten, darüber hinaus ist für die Modellierungsarbeit somit die Datenbeschaffung weggefallen.

Die verwendeten Grundlagendaten waren Baukörpermodelle als Dreiecksvermaschungen sowie ein digitales Geländemodell als Dreiecksvermaschungen für den Bereich Kagran, im Bereich der U-Bahnstation Kagran bzw. des Donauzentrums. Dieser Ausschnitt wurde auch deshalb gewählt, da hier sehr unterschiedliche Bebauungsformen auf einer relativ kleinen Fläche vereint sind.

Vorab wurden mit dem AIT gemeinsam einige Grundsatzentscheidungen getroffen, die ein möglichst zufriedenstellendes Ergebnis ermöglichen sollen.

- Verwendete Software ist die ArcGIS Produktfamilie aus dem Hause Esri (kommerzielle Software).
- Es wird versucht, tunlichst ohne Skriptsprache (Python) das Auslangen zu finden, um möglichst vielen Nutzern auch eine Weiterentwicklung bzw. tieferes Verständnis zu ermöglichen.
- Daher sollte ein Flowchart-Modell mit Hilfe des „Modell-Builder“ verwendet werden.
- Ergebnis soll eine einfache „Toolbox“ sein, welche bei Eingabe der notwendigen Input-Faktoren einen beliebigen Stadtraumausschnitt bezüglich Kleinwindenergiepotential bewerten kann → allgemeingültiges Modell.

Aufbauend auf diesen Grundsätzen und aufgrund der Tatsache, dass es sich um komplexe mathematische Zusammenhänge handelt die modelliert werden sollten, wurde an erster Stelle eine Art „Machbarkeitscheckliste“ erstellt die unter anderem folgende Fragen zum Inhalt hatte:

- Ist mit den vorhandenen Daten eine Modellierung (auf Zellebene) voraussichtlich möglich?
- Wenn nein, welche Grundlagendaten werden vermutlich benötigt?
- Gibt es Punkte/Bereiche die für eine Implementierung als äußerst schwierig erscheinen?
- Wenn ja, welche Punkte/Bereiche sind davon betroffen?
- Ist eine Lösung mit den vorgegebenen Mitteln möglich, oder muss auf Alternativen zurückgegriffen werden?

Um mögliche Hindernisse oder gar Ausschlusskriterien einer Modellbearbeitung möglichst frühzeitig klären zu können, sollten stets die schwierigsten Problemstellungen als erstes behandelt werden. Ist dies geschehen steht einer erfolgreichen Weiterbearbeitung nichts mehr im Wege.

Für das in dieser Arbeit vorgestellte Modell haben sich zwei Punkte als schwierig, schließlich dann aber doch als „knackbar“ erwiesen. Zum einen war dies die nicht vorhandene Möglichkeit einer Objektmessung innerhalb eines Model-Builder-Flowcharts (MB-Chart) und zum anderen eine nicht vorhandene Gamma-Funktion (zumindest bei Verzicht auf Skriptsprache) innerhalb des Model-Builder (MB).

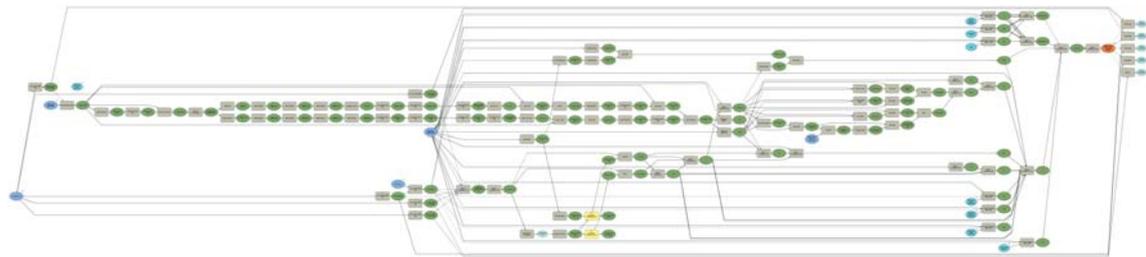
Auf diese Gegebenheiten wird auch im nächsten Abschnitt noch eingegangen, welcher das entwickelte Modell näher spezifizieren und veranschaulichen soll.

4.2 Modellierung des Windenergiepotenzials

Das Modell wurde in einem Step-by-Step Ansatz mit ständiger Plausibilitäts- und Stichprobenüberprüfung entwickelt, wobei in den ersten Schritten die komplexesten Aufgabenstellungen bearbeitet wurden. Das Ergebnis dieses Prozesses ist in Abbildung 23 als Flussdiagramm (MB-Chart) stark verkleinert dargestellt¹⁹.

Da es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist auf das komplette Modell mit all seinen Knoten²⁰ einzugehen, werden diese im Folgenden in Prozessstränge zusammengefasst und kurz erläutert. Selbst wenn an dieser Stelle versucht wird eine allgemeinverständliche Sprache zu verwenden sei darauf hingewiesen, dass durchaus auch Fachbegriffe verwendet werden, die bei mit GI-Systemen nicht vertrauten Lesern vermutlich Fragen aufwerfen.

Abbildung 23: Flussdiagramm des fertigen Modelles



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Der gesamte MB-Chart ist in die insgesamt zehn Teilbereiche

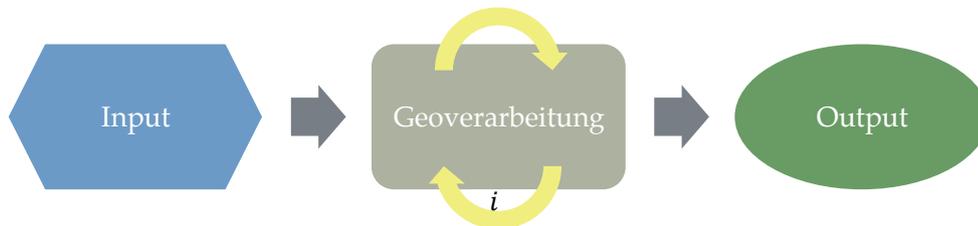
- A | Erstellung von Ordner und Geodatenbanken
- B | Berechnung der Gebäudegeometrie
- C | Berechnung der Separationshöhe
- D | Berechnung der Geschossanzahl und Filterung der überbauten Fläche
- E | Berechnung der durchschnittlichen Gebäudehöhe sowie dem Anteil der überbauten Fläche
- F | Berechnung der Rauigkeitslänge, Versatzhöhe und Profilkorrekturfaktor
- G | Berechnung der Analysemaske
- H | Berechnung von konstanten Parametergrids
- I | Berechnung der effektiven Windgeschwindigkeit u („ u “)
- J | Berechnung der effektiven Energiedichte

¹⁹ In der Beilage befindet sich dieser MB-Chart in annähernder Originalgröße

²⁰ Ein Knoten bedeutet in der MB-GIS-Sprache ein Modellprozess bestehend aus (mindestens) einem Eingangsdatensatz (oder Parameter), dem **Input**, genau einer Operation (Berechnung) mittels **Geoverarbeitungswerkzeug** und dem daraus resultierenden Ergebnis, einem **Output**.

unterteilt worden; diese werden jeweils mit rot strichlierter Umrandung gekennzeichnet und in einem Knoten gemäß folgendem Schema zusammengefasst:

Abbildung 24: Schemadarstellung Flussdiagramm



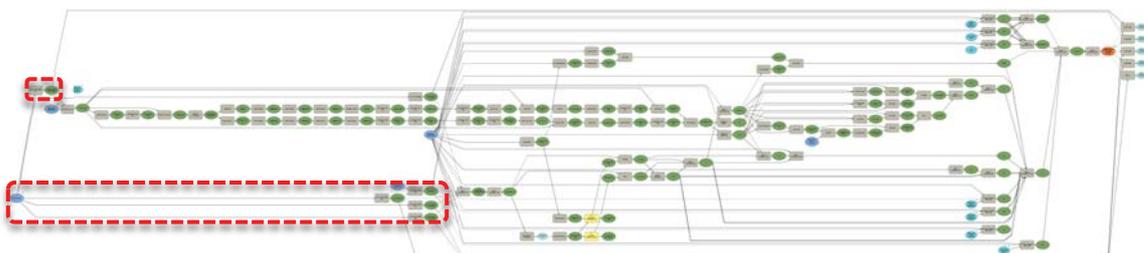
Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Die Inputgrößen können aus Basiseingangsdaten, freilich aber auch aus Zwischenergebnissen von anderen Strängen bestehen, diesfalls wird darauf hingewiesen. Die Outputgrößen sind mit Ausnahme des Endergebnisses (in Abbildung 23 in oranger Farbe rechts oben dargestellt bzw. unter J) hierbei immer Zwischenergebnisse der einzelnen Analyseschritte. Iterationen werden gegebenenfalls mit gelben Pfeilen und der jeweiligen Anzahl an Durchgängen gekennzeichnet. Die Outputs werden als mathematischer Ausdruck in der Form X_y und als die im MB-Chart wiederzufindende Dateibezeichnung in der Form „Outputname“ dargestellt.

A | Erstellung von Ordner und Geodatenbanken

Als vorbereitende Schritte werden in diesem Modell zuerst zwei zu definierende Unterordner und darin insgesamt fünf Geodatenbanken erstellt. Dies dient in erster Linie dazu, Zwischenergebnisse, welche nach einem erfolgreichen Rechenvorgang nicht mehr benötigt werden von jenen, welche für weitere Berechnungen benötigt werden, zu trennen. Außerdem hat der Benutzer somit die Kontrolle über den Speicherort und kann gegebenenfalls eine schnellere Platte zur Verarbeitung angeben, was wiederum Bearbeitungszeit einspart.

Abbildung 25: Flussdiagramm Teilbereich A



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Anzahl an Berechnungsschritten bzw. Knoten: $n = 5$

Abbildung 26: Schemadarstellung Teilbereich A



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Input

- Zielordner (Pfadeingabe aus der Eingabemaske)

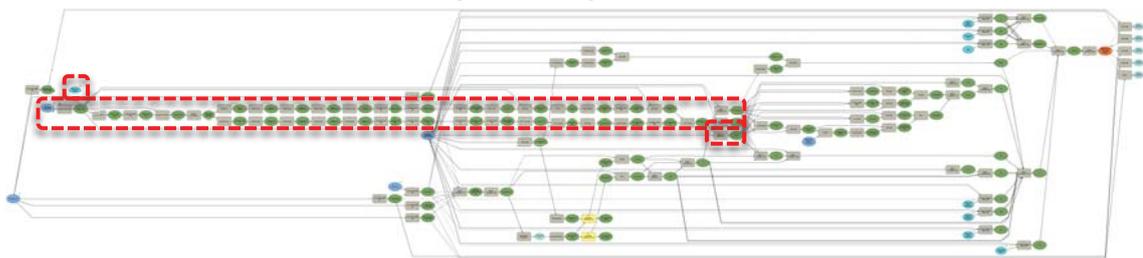
Geoverarbeitung / Output

Die Geoverarbeitung erstellt in den angegebenen Ordnern Geodatenbanken, in welche die (Zwischen-)Ergebnisse abgelegt werden.

B | Berechnung der Gebäudegeometrie

In diesem Teilbereich werden die Gebäudeparameter (W_b, L_b für Ausdruck [4.9]) aller Gebäude des Untersuchungsgebietes berechnet.

Abbildung 27: Flussdiagramm Teilbereich B



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Anzahl an Berechnungsschritten bzw. Knoten: $n = 36$

Abbildung 28: Schemadarstellung Teilbereich B



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Input

- Untersuchungsgebiet im Vektorformat (aus der Eingabemaske)
- Windrichtung (aus der Eingabemaske) als numerische Eingabe von 0-360

Geoverarbeitung

Die Geoverarbeitung beinhaltet folgende Berechnungsschritte:

- Kopie des Vektorfiles anlegen, Gebäude mit eindeutiger ID versehen
- Mittelpunkte der Gebäudegeometrien erzeugen, mit Koordinaten versehen
- Linien in Abhängigkeit vom Winkel der eingegebenen Windrichtung konstruieren (quer zur Windrichtung sowie längs in Windrichtung)
- Verschneidung der konstruierten Linien mit den Gebäudegeometrien (Intersection)
- Übertragen der übergebliebenen Längen in die Kopie des Vektorfiles (Table Join)
- Umwandlung des Vektorfiles in zwei Rastergrids

Output

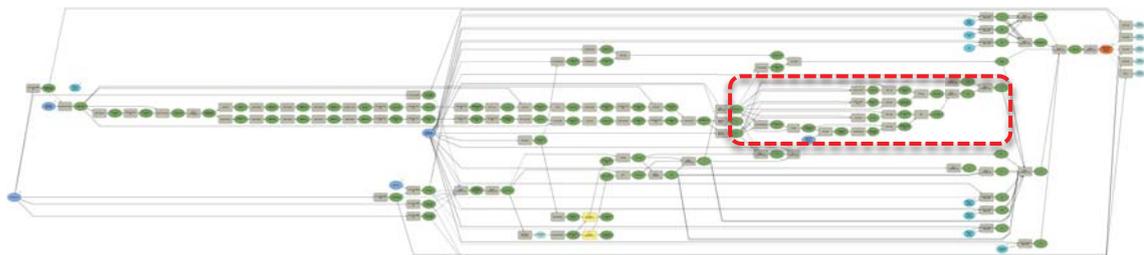
Die Ergebnisse dieses Stranges sind zwei Rastergrids, die für jede Zelle die Länge und Breite des Gebäudes (Längsrichtung, Querrichtung) beinhalten, wobei nicht bebaute Zellen den Wert „noData“ erhalten:

- W_b („w_b“)
- L_b („l_b“)

C | Berechnung der Separationshöhe

In diesem Strang wird die Separationshöhe (h_s für Ausdruck [4.10]) aller Gebäude des Untersuchungsgebietes berechnet.

Abbildung 29: Flussdiagramm Teilbereich C



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Anzahl an Berechnungsschritten bzw. Knoten: $n = 16$

Abbildung 30: Schemadarstellung Teilbereich C



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Input

- W_b
- L_b

Geoverarbeitung

Die Geoverarbeitung beinhaltet folgende Berechnungsschritte:

- Die Berechnung der maximalen und minimalen Breite
- Die Berechnung der effektiven Breite
- Die Berechnung der Separationshöhe

Output

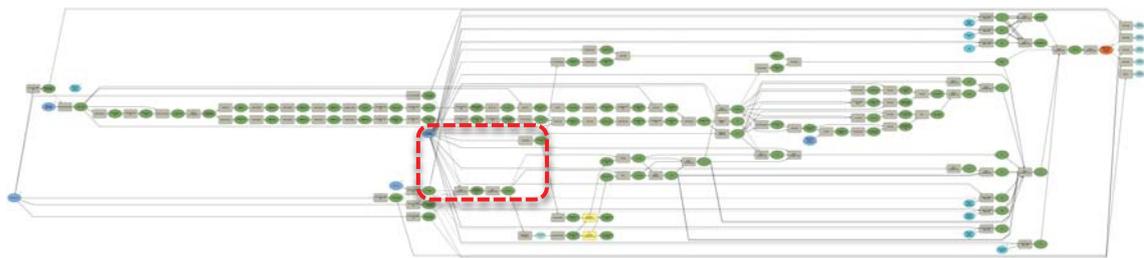
Ergebnisse dieses Stranges sind zwei Rastergrids, die für jede Zelle die effektive Breite des Gebäudes (Querrichtung zum Wind) beinhaltet, sowie die Separationshöhe:

- W_{eff} („w_eff“)
- h_s („h_s“)

D | Berechnung der Geschossanzahl und Filterung der überbauten Fläche

In diesem Strang wird der Anteil an überbauter Fläche (A_h) sowie die Anzahl an Geschossen für jedes Gebäude berechnet.

Abbildung 31: Flussdiagramm Teilbereich D



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Anzahl an Berechnungsschritten bzw. Knoten: $n = 3$

Abbildung 32: Schemadarstellung Teilbereich D



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Input

- Digitales Höhenmodell der Gebäude (Eingabemaske)

Geoverarbeitung

Die Geoverarbeitung beinhaltet folgende Berechnungsschritte:

- Runden der Gebäudehöhe auf ganze Zahlen (Umwandlung in Integer)
- Feststellen der Anzahl der Geschosse (je 3m)

- Reklassifizierung der Zellen in 1 (überbaut) und noData (nicht überbaut)

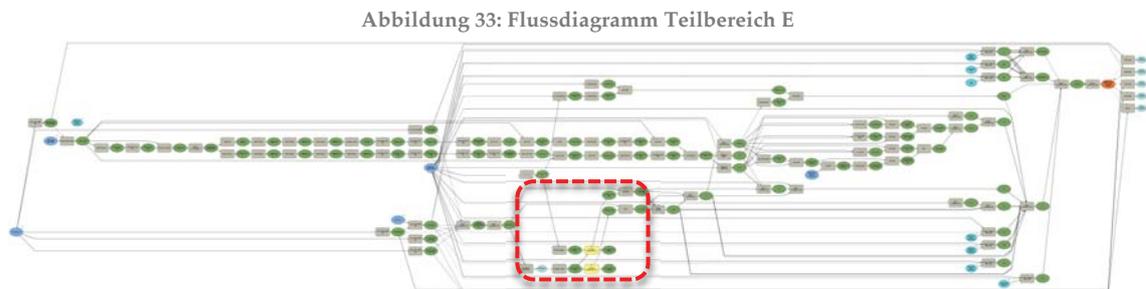
Output

Ergebnisse sind zwei Rastergrids, die für jede Zelle NoData bzw. den Wert 1 beinhalten, sowie für jede bebaute Zelle den Werte der Geschossanzahl enthalten; diese beiden Rastergrids dienen lediglich als Zwischenergebnisse:

- „occupied_cells“
- „geschosse“

E | Berechnung der durchschnittlichen Gebäudehöhe sowie dem Anteil der überbauten Fläche

Der rechenintensivste Teilbereich des Modelles ist die Berechnung der durchschnittlichen Gebäudehöhe sowie dem Anteil der überbauten Fläche.



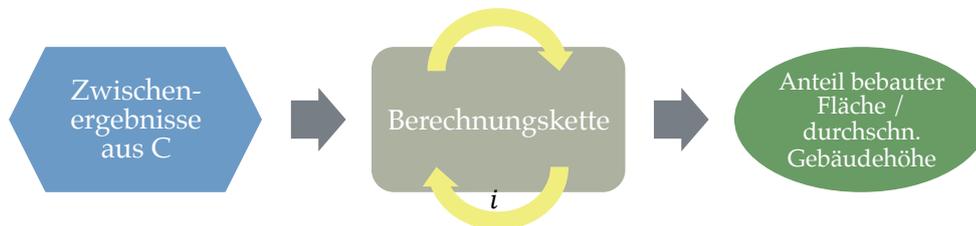
Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Im Gegensatz zu den unter Punkt 2.2 gezeigten Abschätzungsmöglichkeiten, werden diese Werte nicht geschätzt sondern für jedes Gebäude (Zelle), in Abhängigkeit zu dessen Höhe, eigenes berechnet. Höhenabhängig bedeutet dabei, dass in einem Radius von der 30-fachen Gebäudehöhe der Anteil an überbauter Fläche (Zellen) berechnet wird (A_h für die Ausdrücke [4.6], [4.7] und [4.9]), sowie in einem Radius von der dreifachen Gebäudehöhe die durchschnittliche Gebäudehöhe berechnet wird (h_{av} für die Ausdrücke [4.6] und [4.7]). Die Gebäudehöhe ist hierbei mit der Geschossanzahl (siehe D) mal 3m gerundet.

Eine Iteration (eines Submodelles) führt diese Berechnung für jedes Geschoss (alle 3m) durch, wobei sich die Anzahl an Iterationen (i) aus der maximalen Gebäudehöhe – genauer gesagt aus der maximalen Geschosshöhe – im Untersuchungsgebiet ergibt.

Anzahl an Berechnungsschritten bzw. Knoten: $n = 5 + 2 \cdot i$

Abbildung 34: Schemadarstellung Teilbereich E



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Input

- „occupied_cells“
- „geschosse“

Geoverarbeitung

Die Geoverarbeitung beinhaltet folgende Berechnungsschritte:

- Berechnung der maximalen Geschossanzahl
- Reklassifizierung der Zellen in 1 (überbaut) und 0 (nicht überbaut)
- Iteration (Submodell) für den Anteil überbauter Fläche mittels Nachbarschaftsfunktion jeweils im Radius der 20-fachen maximalen Geschosshöhe (i)
- Iteration (Submodell) für die durchschnittliche Gebäudehöhe mittels Nachbarschaftsfunktion jeweils im Radius der dreifachen maximalen Geschosshöhe (i)
- Zuweisen des berechneten Teilergebnisses von A_h (je Geschoss) zur tatsächlichen Geschosshöhe („pick“)
- Zuweisen des berechneten Teilergebnisses von h_{av} (je Geschoss) zur tatsächlichen Geschosshöhe („pick“)

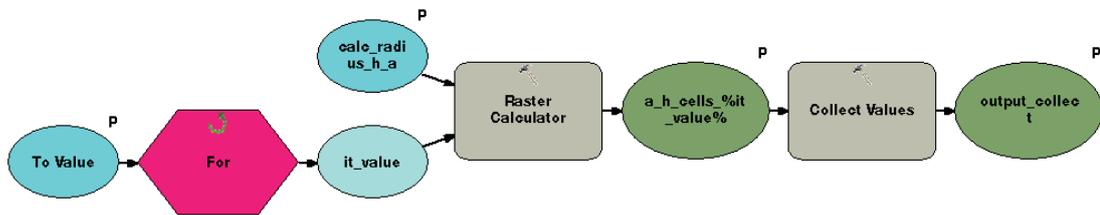
Output

Die Ergebnisse dieses Modellbereichs sind je ein Rastergrid für den Anteil an überbauten Zellen im Nachbarschaftsbereich sowie ein Rastergrid für die durchschnittlichen Gebäudehöhe je Zelle im Nachbarschaftsbereich:

- A_h („a_h_calc“)
- h_{av} („h_av_calc“)

Folgende Abbildung zeigt den Iterationsprozess (Submodell) für die Berechnung des Anteils an überbauter Fläche bzw. Zellen als Beispiel. Das Submodell für die Berechnung der durchschnittlichen Gebäudehöhe ist dieser Abbildung sehr ähnlich (siehe hierzu auch die Abbildungen in der Beilage).

Abbildung 35: Submodell für die Berechnung des Anteils an überbauter Fläche

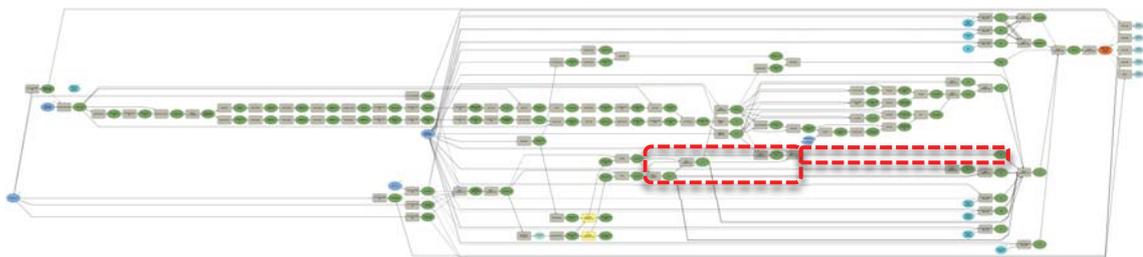


Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

F | Berechnung der Rauigkeitslänge, Versatzhöhe und Profilkorrekturfaktor

Im Bereich F des Modelles werden die Rauigkeitslänge (z_{0r} für Ausdruck [4.4], [4.5] und [4.6]), die Versatzhöhe (d für Ausdruck [4.4] und [4.8]) sowie der Profilkorrekturfaktor (ψ für Ausdruck [4.8]) für jedes Gebäude (Zelle) berechnet.

Abbildung 36: Flussdiagramm Teilbereich F



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Anzahl an Berechnungsschritten bzw. Knoten: $n = 4$

Abbildung 37: Schemadarstellung Teilbereich F



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Input

- W_b
- L_b
- A_h
- h_{av}

Geoverarbeitung

Die Geoverarbeitung beinhaltet folgende Berechnungsschritte:

- Berechnung der (urbanen) Rauigkeitslänge

- Berechnung der Versatzhöhe
- Berechnung des Profilkorrekturfaktors

Output

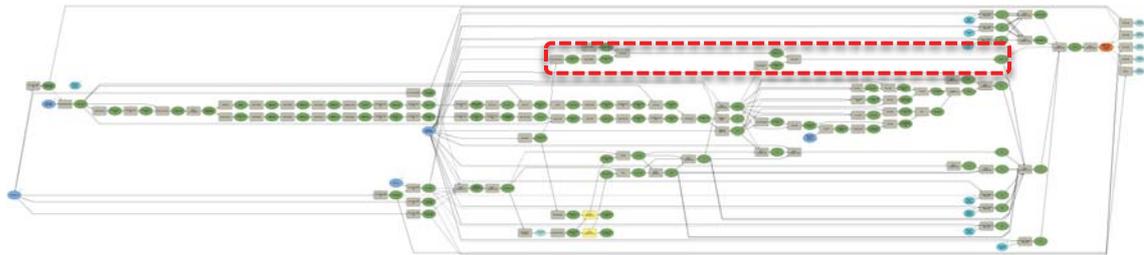
Ergebnisse sind drei Rastergrids, die für jede Zelle die Rauigkeitslänge, die Versatzhöhe sowie den Vertikalprofilkorrekturfaktor repräsentieren:

- z_{0r} („ z_{0r} “)
- d („ d “)
- ψ („ ψ “)

G | Berechnung der Analysemaske

In diesem Modellstrang wird eine sogenannte Analysemaske berechnet, welche dazu dient bestimmte Gebiete bzw. Zellen von einer Potentialberechnung gänzlich auszuschließen.

Abbildung 38: Flussdiagramm Teilbereich G



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Solche Analysemasken haben den Zweck bestimmte Bereiche („NoGo-Gebiete“) gewissermaßen auszublenden. Eine derartige Maske ist freilich sehr vielfältig definierbar, in diesem Modell wurden Gebiete (Zellen) ausgeschlossen, welche

- kleiner oder gleich 3m sind (Nebengebäude oder sehr kleine Häuschen) bzw.
- weniger als 9m² zur Verfügung haben (Installationsfläche) oder
- direkt an einer Gebäudekante liegen sowie
- kleinere Gebäudehöhen als die Versatzhöhe derselben aufweisen („Nachbarn“ zu hoch)

Es wird darauf hingewiesen, dass diese Restriktion vom Autor definiert wurde; darüber hinaus sind auch andere Restriktionen denkbar, wie etwa Schutzgebiete oder dergleichen.

Anzahl an Berechnungsschritten bzw. Knoten: $n = 6$



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Input

- „occupied_cells“
- d
- Digitales Höhenmodell der Gebäude (Eingabemaske)

Geoverarbeitung

Die Geoverarbeitung beinhaltet folgende Berechnungsschritte:

- Berechnung der Fläche in unmittelbarer Umgebung ($9m^2$ gleicher Höhe)
- Reklassifikation von der Höhe in NoData (kleiner 3m) und 1 (größer 3m)
- Berechnung der Differenz von Versatzhöhe und Gebäudehöhe (je Zelle)

Output

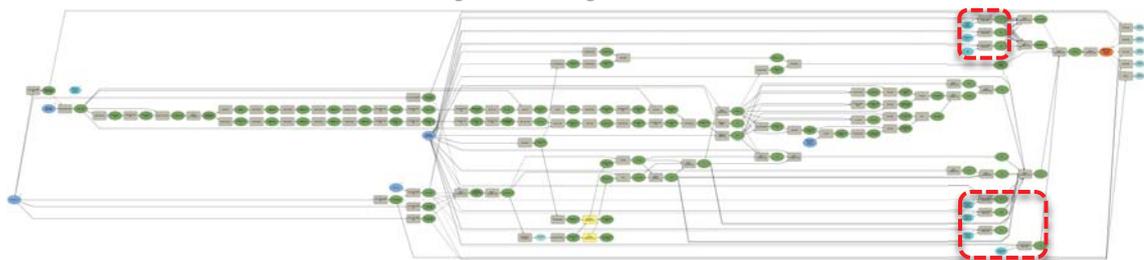
Ergebnis ist ein Rastergrid, welcher die Analysemaske repräsentiert:

„Mask“

H | Berechnung von konstanten Parametergrids

In Teil H des Modelles werden für die Endberechnung notwendige Parameter in sogenannte konstante Raster konvertiert.

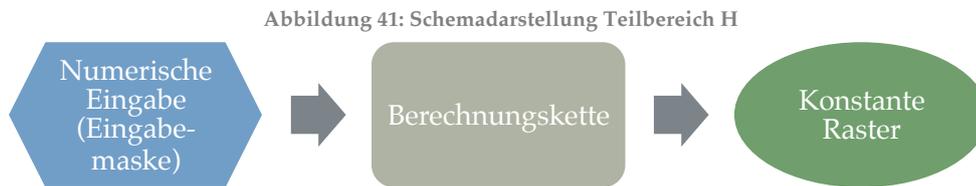
Abbildung 40: Flussdiagramm Teilbereich H



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Mit Ausnahme von „euler“ (der Eulerkonstante) und μ (My für die Approximation der Gammafunktion) werden die Werte aus der Eingabemaske übergeben. Ergebnisse sind Rastergrids, welche in jeder Zelle denselben Wert besitzen.

Anzahl an Berechnungsschritten bzw. Knoten: $n = 7$



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Input

- k (Weibull Shape-Parameter)
- „euler“ (die Eulerkonstante)
- $\mu(k)$ (My, für die Approximation der Gammafunktion, siehe unten)
- z_p (Referenzhöhe der bekannten Windgeschwindigkeit)
- z_{0p} (Referenzrauigkeitslänge der bekannten Windgeschwindigkeit)
- u_p (Referenzwindgeschwindigkeit)
- ρ (Luftdichte)

Geoverarbeitung / Output

Die Geoverarbeitung erstellt für alle numerischen Ausdrücke ein konstantes Rastergrid.

Approximation der Gammafunktion

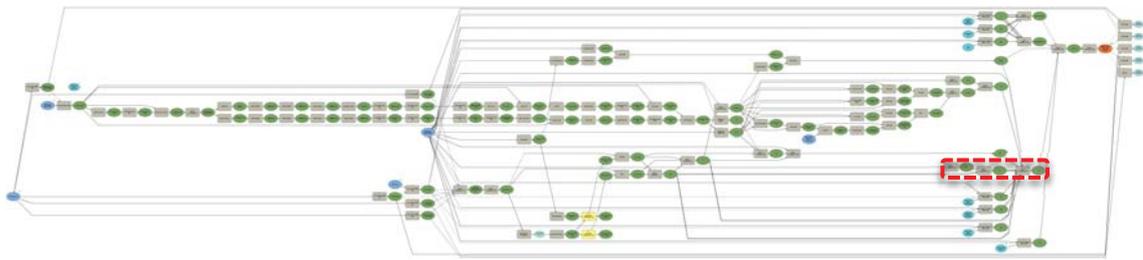
Da im MB nicht ohne weiteres mit der Gammafunktion gerechnet werden kann, wurde diese mit der nachstehenden Stirling-Formel abgeschätzt und mit $\mu(x) = 0,9898$ für Windgeschwindigkeiten $u < 12 \text{ m/s}$ kalibriert (vgl. Academic 2013: online).

$$\Gamma(x) = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi}{x}} \cdot \left(\frac{x}{e}\right)^x \cdot e^{\mu(x)} \quad [4.12]$$

I | Berechnung der effektiven Windgeschwindigkeit

Im vorletzten Abschnitt des Modelles wird zuerst die Höhe der internen Grenzschicht (h_i für Ausdruck [4.4]) und der Grenzschichtabstand (x für Ausdruck [4.5]) und anschließend die effektive Windgeschwindigkeit (u für Ausdruck [4.1] sowie [4.4]) berechnet.

Abbildung 42: Flussdiagramm Teilbereich I



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Anzahl an Berechnungsschritten bzw. Knoten: $n = 3$

Abbildung 43: Schemadarstellung Teilbereich I



Quelle: eigene Bearbeitung 2013

Input

- z_{0r}
- ψ
- Digitales Höhenmodell der Gebäude (Eingabemaske)
- z_p
- z_{0p}
- u_p
- z_{0r}

Geoverarbeitung

Die Geoverarbeitung beinhaltet folgende Berechnungsschritte:

- Die Kalkulation der Höhe der internen Grenzschicht
- Die Kalkulation des Grenzschichtabstandes
- Die Berechnung der effektiven Windgeschwindigkeit

Output

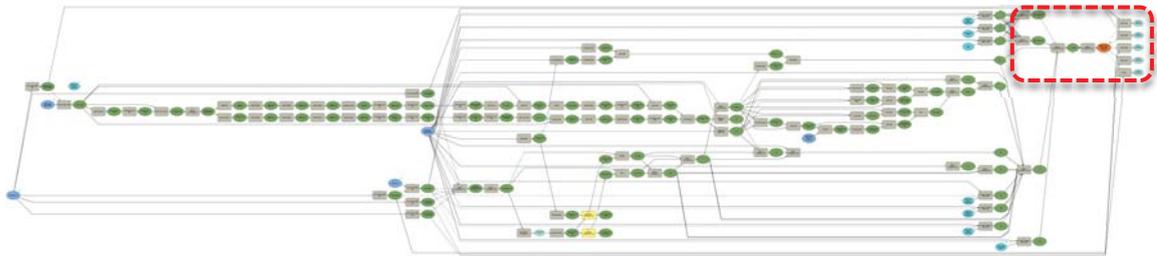
Ergebnis ist das für die Endberechnung notwendige Grid der effektiven Windgeschwindigkeit:

- $u („u“)$

J | Berechnung der effektiven Energiedichte

Der letzte Abschnitt des Modelles beinhaltet die „Endberechnung“ der effektiven Energiedichte (E_{eff} gemäß [4.3]).

Abbildung 44: Flussdiagramm Teilbereich J



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Dazu werden zwei Gammaausdrücke ($\Gamma(1 + \frac{1}{k})$, $\Gamma(1 + \frac{3}{k})$ für Ausdruck [4.2] und [4.3]) benötigt. Im Anschluss an die Endberechnung werden außerdem die nicht mehr benötigten Geodatenbanken gelöscht.

Anzahl an Berechnungsschritten bzw. Knoten: $n = 9$

Abbildung 45: Schemadarstellung Teilbereich J



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Input

- „gam1plus3_k“
- „gam1plus1_k“
- Analysemaske
- Effektive Windgeschwindigkeit
- Luftdichte

Geoverarbeitung

Die Geoverarbeitung beinhaltet folgende Berechnungsschritte:

- Die Berechnung der zwei Gammaausdrücke
- Die Berechnung der effektiven Energiedichte unter Berücksichtigung der Analysemaske
- Das Löschen von Geodatenbanken mit Zwischenergebnissen

Output

Endergebnis ist ein Rastergrid, welcher für jede Zelle innerhalb der Analysemaske die effektive Energiedichte E_{eff} beinhaltet.

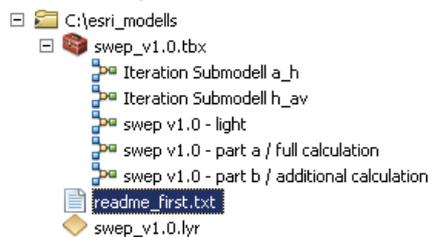
4.3 Oberfläche und Nutzung des Werkzeugs

Nach den Erläuterungen wie dieses Werkzeug „im Inneren“ aussieht, soll an dieser Stelle dessen Nutzung kurz erläutert werden. Gleichwohl der MB-Chart aufgerufen werden kann um etwa daran weiter zu arbeiten, ist das Tool auch ohne MB-Oberfläche nutzbar.

Getauft wurde das Werkzeug auf den Namen „swep“ (Small Wind Energy Potential) und liegt im Rahmen dieser Arbeit sozusagen in der Version 1.0 vor. Das Tool ist in eine sogenannten „Toolbox“ eingebettet (swep_v1.0.tbx) und sollte stets im Ordner C:\ersri_modells abgelegt werden (siehe Abbildung 46).

Inhalte der Toolbox sind das „swep“ in drei unterschiedlichen Varianten sowie die dazugehörigen Submodelle, ein kurzes „Readme“ sowie ein „Layer-File“ (.lyr), welches eine einheitliche Symbolisierung der Endergebnisse gewährleistet. Die unterschiedlichen Varianten sind im Hintergrund einer Rechenzeitoptimierung entstanden, wobei „part a“ die gesamte, im vorgehenden Abschnitt vorgestellte Modellierung enthält. Da diese lediglich eine Windrichtung abbilden kann, kann mittels „part b“ das effektive Energiepotential für weitere Windrichtungen berechnet werden, ohne Prozesse neu berechnen zu müssen, deren Ergebnisse durch eine Änderung der Windrichtung gleichbleiben²¹. Variante „light“ eignet sich um die Eingangsdaten auf ihre Konformität zu testen, sollte jedoch zur Potentialerhebung nicht angewandt werden.

Abbildung 46: Inhalte der „Toolbox“



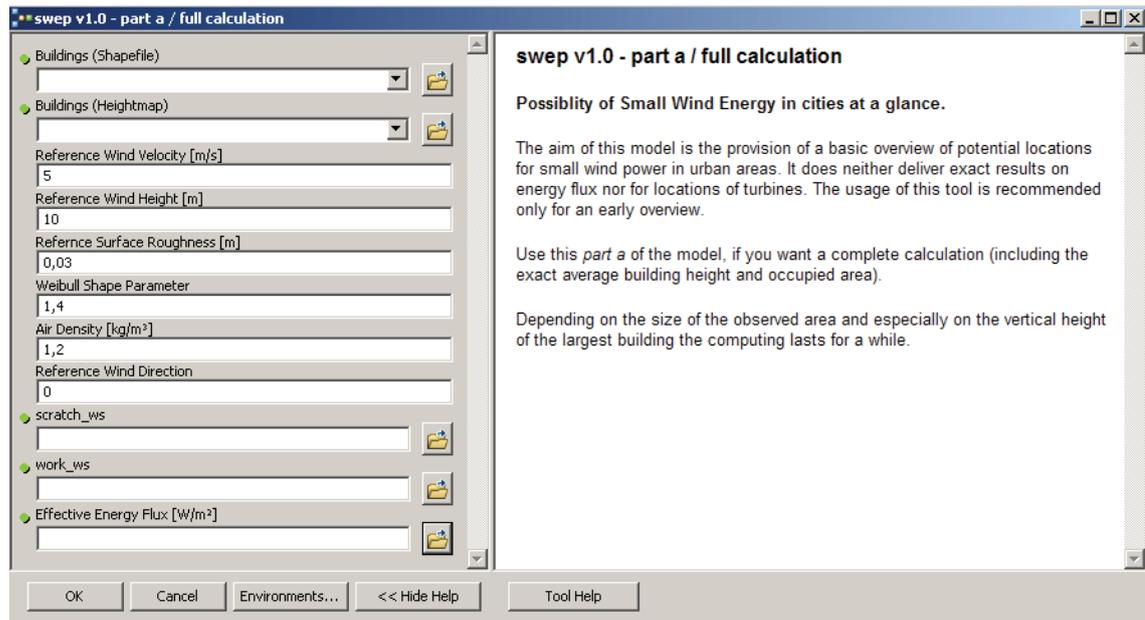
Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

²¹ Dies betrifft vor allem die rechenintensiven Aufgaben der Berechnung der durchschnittlichen Gebäudehöhe als auch dem Anteil an überbauter Fläche in der Nachbarschaft.

Beim starten des Tools unter „ArcEditor“²² öffnet sich die bereits mehrmals erwähnte „Eingabemaske“ (Abbildung 47). Im rechten Teil der Maske ist stets eine Beschreibung zu finden, die sich beim Anwählen der jeweiligen Felder entsprechend ändert.

Sind alle Felder konformgemäß mit Werten bzw. Pfaden gefüllt, kann das Programm mit „Ok“ gestartet werden.

Abbildung 47: Eingabemaske



Quelle: eigene Konzeption und Darstellung 2013

Um einen reibungslosen Ablauf zu ermöglichen sind nachfolgende Punkte zu beachten:

Buildings (Shapefile):

Die Datei die hier angegeben wird muss im Vektor-Format (Polygon-Shape-Format) vorliegen und projiziert sein, es muss die zweidimensionale Geometrie der Gebäude beinhalten und darf weder topologische Eigenschaften („m values“) noch 3D-Shape Eigenschaften („z values“) aufweisen.

Dieser Eingangsdatensatz muss höchst wahrscheinlich erst vorbereitet werden, was je nach Güte der zur Verfügung stehenden Daten mehr oder weniger großen Aufwand bedeuten kann. Außerdem muss der Datensatz die gleichen Gebäude beinhalten wie der zweite Datensatz (Buildings(Heightmap)), da diese gemeinsam den Untersuchungsbereich definieren.

²² Teil der ArcGIS Familie.

Buildings (Heightmap):

Der Raster welcher hier angegeben wird muss im Esri-Grid-Format vorliegen und sollte die gleiche Projektion aufweisen wie der erste Eingangsdatensatz, sowie als Zellwert die Höhenangabe (DHM²³, allerdings nur die Gebäude zum Inhalt). Dieser Datensatz muss die gleiche Ausdehnung besitzen wie der Shape-Datensatz. Da das DHM aus dem Shapefile erzeugt werden kann (sowie auch umgekehrt), genügt bei einer etwaigen Datenanforderung ein Baukörpermodell in einem Vektorformat.

Reference Wind Velocity:

Referenzwindgeschwindigkeit in Meter pro Sekunde.

Reference Wind Height:

Die Höhe der gemessenen Referenzgeschwindigkeit in Meter.

Reference Surface Roughness:

Die Rauigkeitslänge (in Meter) an der Stelle an dem die Windgeschwindigkeit gemessen wurde.

Weibull Shape Parameter:

Der Parameter k aus der Weibullverteilung.

Air Density:

Durchschnittliche Luftdichte am Untersuchungsort in Kilogramm je Kubikmeter.

Reference Wind Direction:

Die (Haupt-)Windrichtung für jene das Energiepotential berechnet werden soll (Eingabe von 0-360).

scratch_ws:

Ordnerangabe für Zwischenergebnisse, welche nach Beendigung wieder gelöscht werden. Der Ordnerpfad sollte auf die schnellste verfügbare lokale Platte (SSD, Ramdisk) verweisen.

work_ws:

Ordnerangabe für Zwischenergebnisse, welche nach Beendigung nicht gelöscht werden. Der Ordnerpfad sollte auf die schnellste verfügbare lokale Platte (SSD, Ramdisk) verweisen.

²³ Ein DHM bezeichnet ein Digitales Höhenmodell in einem Rasterformat, wobei jede Zelle (Pixel) den Höhenwert (oder Farbwert) enthält.

Effektive Energy Flux:

Ordner- und Dateiname des Endergebnisses. Diese Datei kann an einer beliebigen Stelle abgespeichert werden (Hinweis: Sollte das File nicht in einer Geodatenbank abgespeichert werden, besteht die Restriktion von 13 Zeichen für den Dateinamen).

5 Modellierungsergebnisse

Nach erfolgreichem Testen des modellierten Wekzeuges sind an Hand vom Fallbeispiel des Ausschnitts Kagran sowie theoretische Varianten genaueren Betrachtung unterzogen und deren Ergebnisse mit einander verglichen worden. Als Varianten wurden in diesem Zusammenhang einzelne Baukörper hinsichtlich ihrer Höhe wie auch die Bebauungsdichte modifiziert, Variante 4 zeigt mögliche Auswirkungen auf die erzielbare Leistungsdichte bei geringfügiger Erhöhung der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit.

Im Folgenden werden diese Ergebnisse graphisch illustriert und diskutiert, auch deren zu Grunde liegenden Eingangsparameter (Eingabemaske) werden näher erläutert.

An dieser Stelle wird nochmals betont, dass die Ergebnisse lediglich als generelle Potentialflächen interpretiert werden sollen, sie besitzen letztendlich nur im Rahmen der umrissenen mathematischen Systemgrenzen Gültigkeit.

Um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten, sind das Fallbeispiel Kagran und dessen Varianten auf Basis der potentiell erzielbaren Werte in vier qualitative Stufen eingeordnet worden (siehe nachfolgende Tabelle). Eine Aussage die sich daraus jedenfalls ableiten lässt, ist die Priorität für etwaige gesonderte Standortuntersuchungen und Messungen. Die erzielbare Menge an elektrischer Energie, welche in einer Jahressumme resultieren könnte, ließe sich wie bereits erwähnt nur in einer Bandbreite bzw. für beispielhafte Anlagen abschätzen und entfällt daher in dieser Gegenüberstellung.

Tabelle 4: Eignungskategorien für Kleinwind

Standorteigenschaft	Leistungsdichte [W/m ²]
nicht geeignet	< 100
mäßig geeignet	100 - 160
gut geeignet	160 - 250
sehr gut geeignet	> 250

Quelle: eigene Bearbeitung 2013, in Anlehnung an AEE 2013: 13

5.1 Variante 0 | Fallbeispiel „Kagran“

Als Fallbeispiel wird der Bereich Kagran herangezogen, dieser hat bereits in der Modelentwicklung als Versuchsausschnitt gedient. Die Eingangswerte für die Berechnung sind Tabelle 5 zu entnehmen, wobei die Referenzwindgeschwindigkeit aus AuWiPot (2013) stammt. In Abbildung 48 sind diese Werte nochmals anhand einer beispielhaften und voll-

ständig ausgefüllten Eingabemaske des GIS-Werkzeugs mit Angabe aller Werte und Pfade dargestellt.

Abbildung 48: Eingabemaske Fallbeispiel Kagran

Quelle: eigene Bearbeitung 2013

Tabelle 5: Inputparameter Fallbeispiel Kagran

Windgeschwindigkeit	4,5 m/s
Referenzhöhe	50m
Referenzrauigkeit	0,8m
Weibull Shape	1,4
Luftdichte	1,2 kg/m ³
Windrichtung	125 / WNW

Quelle: eigene Bearbeitung 2013

Die Gesamtkalkulation für diesen Untersuchungsausschnitt dauerte in etwa 30 Minuten, das finale Ergebnis ist in Abbildung 49 dargestellt. In der Darstellung lassen sich die unterschiedlichen Bebauungsmuster in Kagran gut erkennen. Gebäudeteile, die mit keiner Energiedichte ausgewiesen sind, deuten auf eine zu große Versatzhöhe hin; diese Bereiche sind für KWEA gänzlich ungeeignet. Geeignet scheint hingegen ein Bereich im südöstlichen Ausschnitt dieser Darstellung, hier ist eine Energiedichte von in etwa 230 W/m² errechnet. Dieses Gebäude respektive dessen Dachaufbau müsste nun genauer untersucht werden, um festzustellen ob es für eine Installation einer KWEA tatsächlich in Frage kommt (siehe Technische Herausforderungen). Selbiges gilt für das Gebäude im mittleren Bereich des Kartenausschnitts, hier sind Werte von in etwa 115 W/m² potentiell möglich.

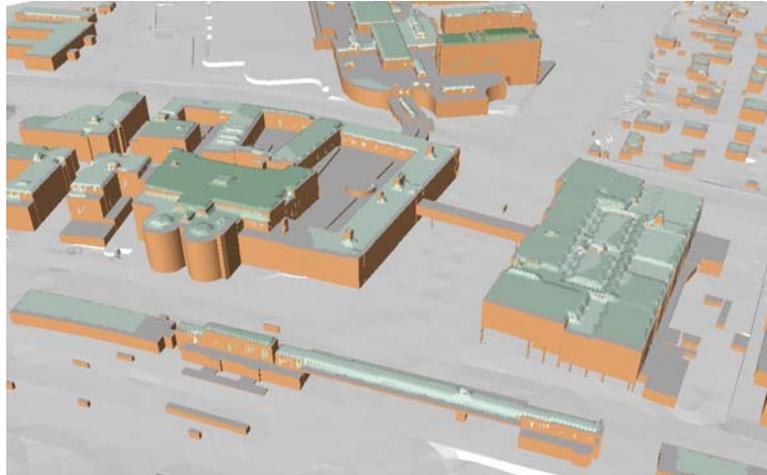
Abbildung 49: Energiedichte Fallbeispiel Kagran



Quelle: eigene Bearbeitung 2013

Abbildung 50 zeigt einen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes exemplarisch in drei Dimensionen (Blickrichtung Ost-Südost). Hier ist gut zu erkennen weshalb einige Bereiche kein ausgewiesenes Potential besitzen (nicht eingefärbte Dachflächen); die Nachbarflächen (Nachbardächer) sind an diesen Stellen schlicht zu hoch. Eine 3D-Darstellung wie in Abbildung 50 ist, wenngleich sie mit höherem Erstellungsaufwand verbunden ist, mit Sicherheit die beste Möglichkeit um das Kleinwindenergiepotential zu demonstrieren, da zweidimensionale Karten deutlich schwieriger zu lesen sind. Nichtsdestotrotz soll diese Darstellung nur beispielhaft aufzeigen wie die Potentiale graphisch aufbereitet werden können, um es thematisch nicht Versierten, wie zum Beispiel beteiligten Akteuren eines KWEA Projektes, in der Ergebnisinterpretation zu unterstützen

Abbildung 50: Energiedichte Fallbeispiel Kagran in 3D



Quelle: eigene Bearbeitung 2013

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass in diesem städtischen Teilraum unter den getroffenen Annahmen zumindest zwei Gebäude(-teile) zur Kleinwindnutzung erwägenswert sind. Das nördlichere der beiden Gebäude kann als **mäßig geeignet** und das südöstlich liegende als **gut geeignet** beurteilt werden.

5.2 Variante 1

Die erste Variante des Fallbeispiels Kagran soll den Einfluss der Gebäudehöhe auf die potentiell erzielbare Leistungsdichte veranschaulichen. Dazu wurde ein Teil des Gebäudes in der Bildmitte um in etwa 20m auf insgesamt 50m erhöht, bei sonstigem Beibehalten aller Eingangsgrößen (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Inputparameter Variante 1

Windgeschwindigkeit	4,5 m/s
Referenzhöhe	50m
Referenzrauigkeit	0,8m
Weibull Shape	1,4
Luftdichte	1,2 kg/m ³
Windrichtung	125 / WNW

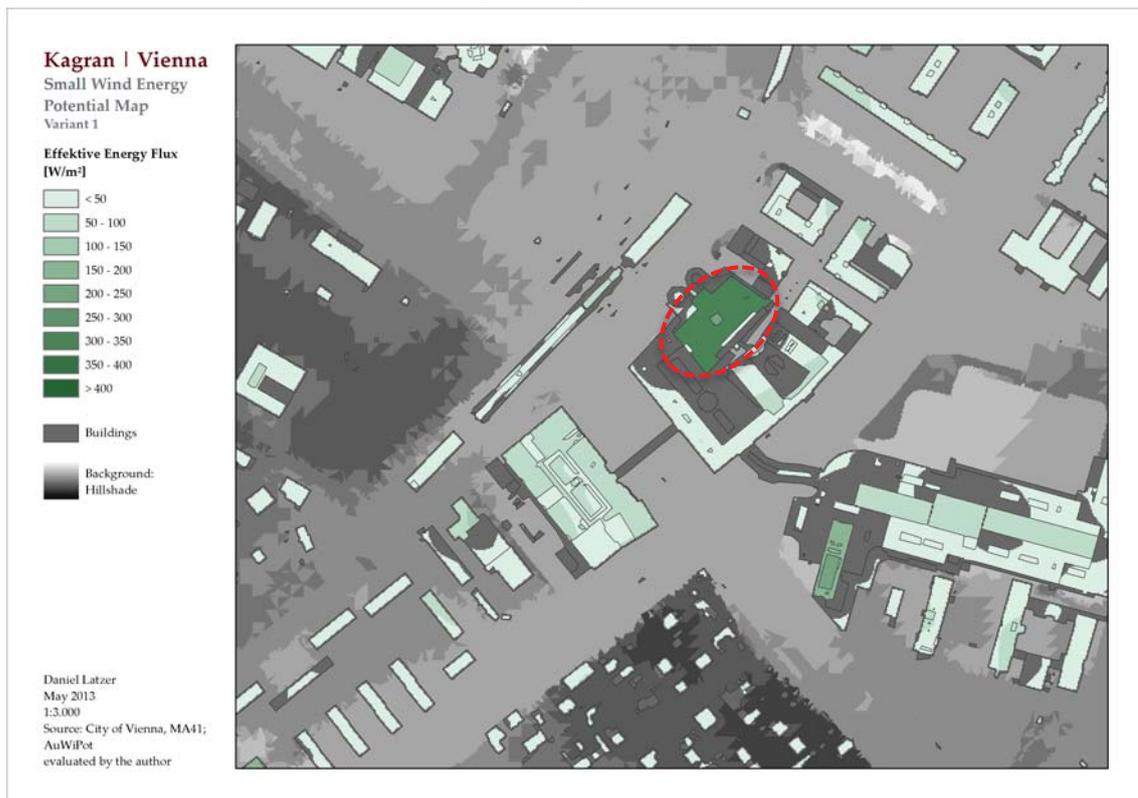
Quelle: eigene Bearbeitung 2013

Die Erhöhung des Gebäudes geht mit einer deutlichen Erhöhung des Energiepotentials einher. Während sich die Potentiale abseits des Gebäudekomplexes in der Bildmitte nicht wesentlich ändern, wird die Energiedichte auf dem erhöhten Gebäude von 115 auf in etwa

345 W/m² angehoben, der Standort wäre somit **sehr gut** für eine Windenergienutzung **geeignet**.

Abzulesen ist dabei außerdem der Einfluss der veränderten Gebäudehöhe auf die unmittelbar benachbarte Dachlandschaft, die du nun teilweise keinerlei Potential mehr aufweist.

Abbildung 51: Energiedichte Variante 1



Quelle: eigene Bearbeitung 2013

5.3 Variante 2

Als Gegenüberstellung zur ersten Variante wird in Variante 2 das Umfeld des gegenständlichen Gebäudes modifiziert und dabei schlicht „entfernt“. Auch hier werden die sonstigen Eingangsgrößen beibehalten.

Tabelle 7: Inputparameter Variante 2

Windgeschwindigkeit	4,5 m/s
Referenzhöhe	50m
Referenzrauigkeit	0,8m
Weibull Shape	1,4

Luftdichte	1,2 kg / m ³
Windrichtung	125 / WNW

Quelle: eigene Bearbeitung 2013

Abbildung 52: Energiedichte Variante 2



Quelle: eigene Bearbeitung 2013

Abbildung 52 zeigt sehr deutlich, dass selbst beim Wegfall der gesamten nachbarschaftlichen Bebauung, rein optisch kaum Veränderungen feststellbar sind. Die Energiedichte auf dem Gebäude wird von 115 auf in etwa 130 W/m² lediglich leicht erhöht. Dies deutet darauf hin, dass die „Rauigkeit“ der Umgebung deutlich weniger Einfluss auf das Energiepotential auf dem Dach eines Bauwerkes ausübt als dessen Höhe, was auf den logarithmischen Zusammenhang des vertikalen Windprofils zurückzuführen ist²⁴.

In dieser Variante wäre der Standort für eine KWEA nach wie vor **mäßig geeignet**.

²⁴ Anmerkung: Der Beginn der inneren Grenzschicht wird, wie dargelegt, mit $100 \cdot h$ angenommen; bei einer solch isolierten Lage wäre dies auf annähernd Null zu setzen, was die Werte der potentiellen Leistungsdichte weiter erhöhen würde. Um nur den Einfluss der Rauigkeit zu demonstrieren, wurde dieser Sachverhalt jedoch nicht berücksichtigt.

5.4 Variante 3

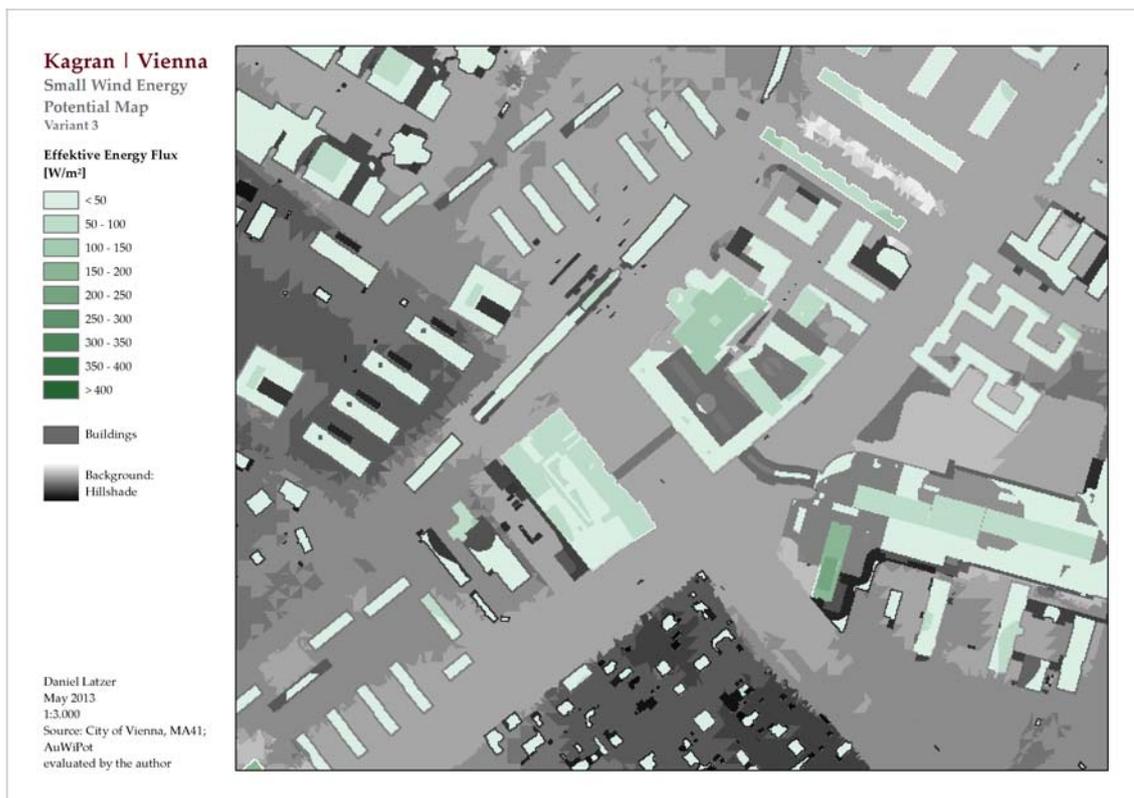
In der dritten Variante wird im Gegensatz zur letzteren Untersuchung nachgeprüft, wie die Auswirkungen auf selbiges Gebäude sind, wenn die Rauigkeit der Umgebung erhöht wird (bei sonstigem Belassen der Eingangsparameter).

Tabelle 8: Inputparameter Variante 3

Windgeschwindigkeit	4,5 m/s
Referenzhöhe	50m
Referenzrauigkeit	0,8m
Weibull Shape	1,4
Luftdichte	1,2 kg/m ³
Windrichtung	125 / WNW

Quelle: eigene Bearbeitung 2013

Abbildung 53: Energiedichte Variante 3



Quelle: eigene Bearbeitung 2013

Hierfür wurden Baukörper in die Umgebung „eingefügt“, welche in ihrem Typ der umgebenden Bebauung entsprechen. Allen Gebäuden gemein ist, dass sie eine niedrigere Bauhö-

he aufweisen, als das observierte Gebäude in der Mitte des Ausschnitts, damit dieses zu im Rahmen des Analyseziels auch nicht in den Windschatten geraten kann.

Wie in Abbildung 53 erkennbar ist, sind auch hier die Auswirkungen auf das Potential eher gering; optisch sind bei dieser Klasseneinteilung kaum Unterschiede zur Nullvariante auszumachen. Die Werte ändern sich äußerst geringfügig und sind nun im Bereich von 110 W/m² angesiedelt.

Eine Erhöhung der Rauigkeit, übt somit ebenfalls nur leichten Einfluss auf das Potential aus; der Standort bleibt auch in diesem Fall **mäßig geeignet**.

5.5 Variante 4

Als vierte Variante soll nun gezeigt werden, welche Auswirkungen eintreten, wenn die Windgeschwindigkeit, bei sonstigem Belassen der Eingangsparameter, verändert wird, an der Bebauungsstruktur aber keine Modifikationen vorgenommen werden.

Tabelle 9: Inputparameter Variante 4

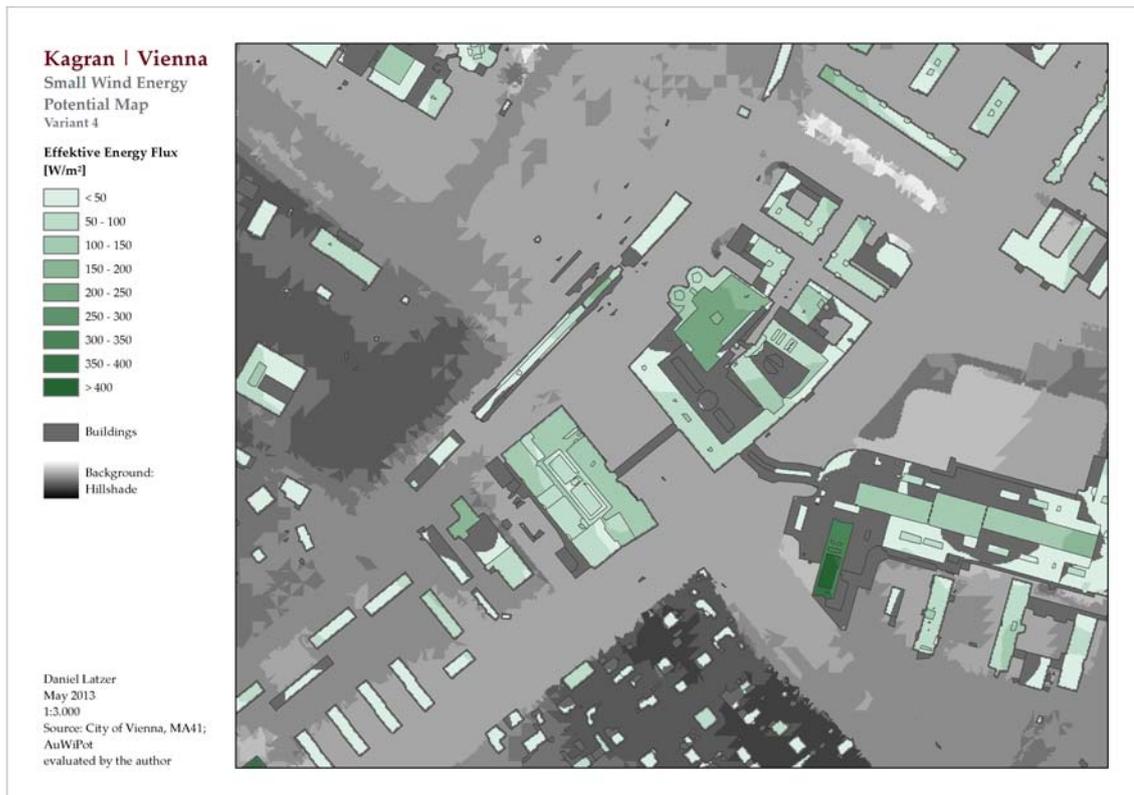
Windgeschwindigkeit	5,5 m/s
Referenzhöhe	50m
Referenzrauigkeit	0,8m
Weibull Shape	1,4
Luftdichte	1,2 kg/m ³
Windrichtung	125 / WNW

Quelle: eigene Bearbeitung 2013

Bei einer Veränderung der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit ergibt sich nachstehende Abbildung; schon rein optisch ist eine Veränderung der Klassenzugehörigkeit zu erkennen. Die Abweichungen zur Nullvariante sind auch in Zahlen ausgedrückt durchaus eindrucklich. Während auf dem Gebäude in der Mitte des Ausschnitts nunmehr eine potentielle Energiedichte von in etwa 215 W/m² nunmehr existiert (Nullvariante: 115 W/m²), ist beim südöstlichen Gebäudedach sogar eine Energiedichte von 410 W/m² (Nullvariante: 230 W/m²) errechnet worden.

Das nördlichere der beiden Gebäude kann nun mit **gut geeignet** und das südöstlich liegende mit **sehr gut geeignet** beurteilt werden.

Abbildung 54: Energiedichte Variante 4



Quelle: eigene Bearbeitung 2013

Fazit

Was sich aus dem mehrmals erwähnten kubischen Zusammenhang der Windgeschwindigkeit mit der Energiedichte bereits ableiten lässt, kann durch diese kurze Variantendarstellungen nachvollzogen werden:

- Eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit von 1 m/s bedeutet eine sehr deutliche Erhöhung des Energiedichtepotentials, wobei aber beachtet werden sollte, dass eine Veränderung von 1 m/s im Jahresmittel durchaus eine bedeutsam abgeänderte Windsituation darstellt.
- Die Gebäudehöhe steht mit der Windgeschwindigkeit durch das Vertikalprofil in direktem Zusammenhang, weshalb eine modifizierte Gebäudehöhe auch maßgeblichen Einfluss auf die Potentiale ausüben kann.
- Für die Rauigkeit konnte indes der Einfluss in dieser Größenordnung nicht festgestellt werden, sogar bei isolierter Gebäudelage ändern sich Energiedichtepotentiale nur unwesentlich.

- Das im Wiener Stadtraum grundsätzlich Potential vorhanden ist, zeigt allein die Situation am gezeigten Fallbeispiel. Anzumerken ist noch, dass die mittleren Jahreswindgeschwindigkeit in 50m Höhe in Wien zwischen 3,5 und 5,5 m/s liegt und in Stadtrandbereichen sogar bis zu 6,5 m/s beträgt. In Kargan wurde die mittlere Geschwindigkeit mit 4,5 m/s angenommen (vgl. AuWiPot 2013) und es konnten bereits gut geeignete Standorte identifiziert werden.

6 Resümee und Empfehlungen

Hat die Windenergie in den letzten Dekaden einen starken Aufschwung erlebt, so erfreuen sich Kleinwindenergieanlagen zur jetzigen Zeit erhöhter Aufmerksamkeit. Eine dezentrale Versorgung mit Windenergie erscheint als äußerst anziehend.

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass bei aller Komplexität der Thematik durchaus nicht nur Möglichkeiten einer Formalisierung, sondern auch gewisse Potentiale für eine kleinteilige Energieerzeugung bestehen. Doch ein Vergleich selbst mit der ältesten großen Windenergieanlage zeigt, dass aufgrund der deutlich geringeren erzielbaren Ausbeute eine allzu große Euphorie unter Umständen nicht angebracht ist. Dennoch sollte man Kleinwind keinesfalls außer Acht lassen. Kleinwind wird die Energiefrage des 21. Jahrhunderts wohl nicht lösen können, aber einen gewissen Anteil Teil dazu beitragen, wobei dieser dezentrale Beitrag – ohne wesentliche Infrastrukturbeanspruchungen – nicht gering zu schätzen ist.

Auf die Frage, wie hoch nun das Potential von Kleinwind in Summe ist, muss auf die Standortabhängigkeit verwiesen werden, die meteorologischen Bedingungen üben einen zu hohen Einfluss auf dieses aus, um allgemeine Aussagen treffen zu können. Es war auch nicht Aufgabenstellung dieser Arbeit Gesamtpotentiale abzuschätzen. Wie eine Formalisierung in einem GIS-methodischen Ansatz zu einem allgemeingültigen Modell führen kann, wurde hingegen deutlich dargelegt.

Die Frage des urbanen Kleinwindpotentials besteht jedoch nicht rein aus formal modellierbaren Zusammenhängen, sondern besitzt speziell in sensiblen Stadträumen eine Vielzahl an Herausforderungen.

So sind die technischen Anforderungen die an Bauwerke und an die Anlagen selbst gestellt werden keinesfalls zu unterschätzen. Es bestehen zahlreiche, aber durchaus lösbare Anforderungen an Gebäudegeometrie, Statik und Dynamik sowie Elektrotechnik. Rechtliche Rahmenbedingungen, verschiedene Materien und Bereiche betreffend, ergeben auch in dieser Hinsicht herausfordernde Verflechtungen; die wichtigsten Rechtsnormen sind hierbei sicherlich die Bauordnung (für Wien) als auch das (Wiener) Elektrizitätswirtschaftsgesetz.

Als sehr bedeutsame Herausforderungen zeigen sich ferner eine umweltbezogene sowie eine quartiersbezogene Verträglichkeit. Letztere scheint im (sozialen) Stadtgefüge, insbesondere im Rahmen vom Schutz kulturellen Erbes, als substantiell. Ein vorhandener positiver Grundtenor in der Bevölkerung in Verbindung mit zeitgemäßer Beteiligungsmöglichkeit hat jedoch die Voraussetzung für einen fruchtenden Aushandlungsprozess.

Um diesem umfangreichen Themenspektrum ein technisches Vehikel zur Verfügung zu stellen, welches mathematische Zusammenhänge in einem Werkzeug zusammenfasst, ist das vorgestellte Modell entwickelt worden. Damit wird aufgezeigt, wie sich städtebauliche Konfigurationen zum Thema Kleinwind verhalten und auf welche Art und Weise solche Modelle entwickelt werden können. Da es niemals Modelle gibt, welche sämtliche Zusammenhänge abbilden können und deshalb immer anwendungsbezogen sind, kann dieses Modell – auch wenn es den Anspruch erhebt für topographisch einfache Gebiete in Stadtteilgröße allgemeingültig zu sein – nur exemplarischen Charakter haben und nur im Rahmen der systemischen Modellgrenzen Gültigkeit aufweisen.

Für die Standortfrage aus energiephysikalischer Sicht zeigt sich folglich, dass die Windbedingungen in erster Linie und daraus folgend die jeweilige Gebäudehöhe in zweiter Linie die entscheidenden Kriterien darstellen.

Es zeigt sich darüber hinaus:

Kleinwindenergie besitzt in der Stadt Wien ein noch unbekanntes und somit erforschungswürdiges Potential; Hinweise auf sehr gut geeignete Standorte bestehen.

Ferner wurde festgestellt, dass es mit Geographischen Informationssystemen möglich ist auf sehr einfache Art und Weise Kleinwindpotentiale zu modellieren. Weiterentwickelt und ausgebaut für einen gesamten Stadtraum bedeutet dies:

Es ist mittels einfachen GIS-Methoden möglich das Kleinwindpotential für den gesamten Wiener Stadtraum zu modellieren.

Aus diesen hervorgehobenen Erkenntnissen können erste Empfehlungen, welche sich aus den vorangegangenen Grundlagen sowie den exemplarischen Varianten formulieren lassen, für die urbane Windenergienutzung in Form von Kleinwindenergieanlagen, formuliert; Adressat ist hier die Stadt im Allgemeinen und die Stadt Wien im Besonderen. Sofern sich die Stadtverwaltung zu einem Weiterführen dieses Themenfeldes bekennt, können die folgenden Anmerkungen zu einer positiven Entwicklung anregen.

- Eine sinnvolle Nutzung von Kleinwindenergie ist an ein durchaus komplexes Bündel von Voraussetzungen gebunden, welche im Wesentlichen die in dieser Arbeit thematisierten Begebenheiten betreffen.
- Allen voran ist hier das gegebene Potential in energetischer Hinsicht zu nennen, denn an Standorten welche keine grundsätzliche Eignung vorweisen, ist eine tiefe-

re Untersuchung obsolet. Eine GIS-basierte Modellierung soll hierzu eine geeignete Hilfestellung sein.

- Darauf aufbauend sollten in grundsätzlich geeigneten Gebieten die technischen Gegebenheiten einzelner Bauwerke bei allfällig nachträglicher Installation überprüft und in Kombination mit den rechtlichen Rahmenbedingungen bewertet werden. Als methodischen Ansatz sei an dieser Stelle nochmals die Möglichkeit der „Analysemaske“ eines GIS erwähnt.
- Durch diese Filterung sollten „Eignungsstandorte“ identifiziert werden können und mit entsprechender Beteiligung der Bevölkerung und Fachleuten in einen offenen Diskurs über Herausforderungen, Vorbehalt aber auch Ängste zu Themen wie Stadtbild und Lärm getreten werden.
- Dabei sind auch eine Reihe von und Forschungs- und Fördermöglichkeiten für die Stadt gegeben um auch projektorientiert Erfahrungen zu sammeln.

6.1 Forschungsempfehlungen

Dem Gegenstandsbereich von Forschung und Entwicklung im Bereich der urbanen Windenergienutzung sind freilich kaum Grenzen gesetzt, eine Vielzahl an Möglichkeiten ist gegeben. Deshalb sollen hier nur erste Ideen und Anregungen dargelegt werden, welche in der Zeit der Erstellung dieser Arbeit entstanden sind.

- In diesem Zusammenhang ist in erster Linie die herstellerseitige Anlagenforschung und Weiterentwicklung zu nennen um etwa bessere Wirkungsgrade oder Schalleigenschaften zu erzielen. Vertikale Anlagen bedürfen ohnehin einer vertiefenden Entwicklung.
- Die Stadt selbst kann dazu als Forschungspark dienen bzw. können bestimmte Quartiere von der Stadtverwaltung zum „Kleinwindlabor“ erklärt werden. Auch ein Zusammenschluss von Grundlagenforschung, Anlagenforschung, Verwaltung und EVU ist anstrebenswert.
- Auch im Bereich der Sozialforschung sind Anknüpfungspunkte möglich indem zum Beispiel „neue Beteiligungsformen“ erprobt werden, so könnten mögliche Kleinwindlabore im Stadtraum durch das partizipative Element ergänzt und komplettiert werden.
- Im Bereich der rechtlichen Rahmenbedingungen sollte überprüft werden welcher besonderen Vorgangsweise die Planung und Genehmigung einer KWEA bedarf; eine Möglichkeit wäre beispielsweise die Verfahrensumsetzung ähnlich der eines konzentrierten Verfahrens – das zum Beispiel aus dem Bereich der UVP bekannt ist

- um den Genehmigungsprozess zu vereinfachen und so urbane Windnutzung an geeigneten Standorten zu forcieren.

6.2 Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des GIS-Werkzeugs

Auch im Bereich des GIS-basierten Werkzeuges sind viele Weiterentwicklungen denkbar, die nachfolgenden Punkte sind nur beispielhaften Charakters:

- Erweiterung der Analysemaske:
Dachaufbauten, Vegetation und Schutzgebiete können genauso Berücksichtigung in der Maske finden wie etwa Sichtbeziehungen und Abstandsflächen oder sonstige (rechtliche) Rahmenbedingungen.
- Weiterentwicklung im Bereich der Potentialabschätzung:
Im vorgestellten Werkzeug wird lediglich die Hauptwindrichtung für die Potentialberechnung berücksichtigt, da sie auch für eine Anlagenpositionierung ausschlaggebend ist. Es können zwar für ein „Gesamtpotential“ weitere Windrichtungen herangezogen und diese dann überlagert werden, eine Weiterentwicklung ist jedoch sicherlich möglich.
- Verwendung differenzierter Windgeschwindigkeiten:
Für größere Gebiete wären differenzierte (mittlere) Geschwindigkeiten zielführend, die mittels „Geschwindigkeits-Grids“ Umsetzung finden könnten.

Welche Bedeutung der Kleinwindenergie als Bestandteil integrativer Energieplanung in Zukunft zugesprochen wird, ist heute schwer abzuschätzen. Die Möglichkeiten, welche diese Art der Energieerzeugung bietet, sollte jedoch genutzt und weiter erforscht werden.

7 Quellenverzeichnis

7.1 Literaturquellen

- AEE (2013): *Kleinwindkraft. Ein Leitfaden zur Planung und Umsetzung*, Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie NÖ-Wien, URL:
<http://www.aee-now.at/cms/fileadmin/downloads/allgemein/Kleinwind/Kleinwindkraft%20Leitfaden.pdf>
- Amt der NÖ LReg (2011): *NÖ Energiefahrplan 2030*, Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, St. Pölten
- BMWFJ (2012): *Anforderungskatalog für die Beurteilung von kleinen Windenergieanlagen samt Erläuterungen*, Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Wien, URL:
<http://www.bmwfj.gv.at/Unternehmen/gewerbetechnik/Documents/Windenergieanlagen.pdf>
- BMWFJ, BMLFUW (2010): *Energiestrategie Österreich. Maßnahmenvorschläge*, Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, URL:
http://www.energiestrategie.at/images/stories/pdf/longversion/energiestrategie_oestreich.pdf
- Böhm, M. (2012): *The Social Costs and Benefits of Wind Energy. Environmental Impact and Life-Cycle Assessment of Wind Turbines*, Masterarbeit an der Technischen Universität Wien, URL: <http://www.ub.tuwien.ac.at/dipl/2012/AC07813535.pdf>
- BWE (2011a): *Qualitätssicherung im Sektor der Kleinwindenergieanlagen. Bildung von Kategorien, Anforderungen an technische Anlagen*, Bundesverband Windenergie e.V., Berlin
- BWE (2011b): *Kleinwindanlagen. Handbuch der Technik, Genehmigung und Wirtschaftlichkeit kleiner Windräder*, Bundesverband Windenergie e.V., Berlin
- Christian, R.; Bolz, R. (2011): *Windkraft – Chancen für Österreich?. Ökologische und ökonomische Aspekte der Nutzung des erneuerbaren Energieträgers Wind mit spezifischer Berücksichtigung der Verhältnisse im urbanen Raum*, Forum Wissenschaft & Umwelt, Wien, URL:
<http://www.fwu.at/mediashare/9w/i6vlbv55lpgbzjwv1ezludoziih5p-org.pdf>
- Denkstatt (2011): *Untersuchung des technologischen und ökonomischen Potenzials von Kleinwindenergieanlagen in bewohnten Gebieten in Österreich*, nicht publiziert, Wien

- Emeis, S. (2013): *Wind Energy Meteorology. Atmospheric Physics for Wind Power Generation*, Berlin: Springer
- Energon (2013): *Standorte für Windkraftanlagen in Wien unter bestimmten Rahmenbedingungen – Update*, im Auftrag der MA 19, Wien
- Fehrenbach, H. (2009): *Pilotstudie zur Akzeptanz vertikaler Windenergieanlagen. Abschlussberichts zum BMU-EE-Querschnitts-Forschungsvorhaben. Arbeitspaket Umweltverträglichkeit und Ökobilanz vertikaler Windenergieanlagen*, Heidelberg, URL:
<http://www.ifeu.de/energie/pdf/UV%20und%20Oekobilanz%20vertikaler%20Windenergieanlagen.pdf>
- Gasch, R. (2013): *Windkraftanlagen. Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg
- Geissmann, M.; Huber, S. (2011): *Soziale Akzeptanz von Windenergie. Erfolgsfaktoren und Good-Practice-Beispiele aus einer Arbeitsgruppe der Internationalen Energieagentur IEA*, in: Bulletin SEV/VSE, Nr. 3/2011, 102. Jahrgang, S. 8-11; URL:
http://www.socialacceptance.ch/images/VSE_Bulletin_Task28_2011.pdf
- Halbhuber, W. (2009): *Betrieb von Kleinwindkraftanlagen. Ein Überblick über Markt, Technik und Wirtschaftlichkeit*, Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, URL:
<http://www.ub.tuwien.ac.at/dipl/2009/AC07806512.pdf>
- Hau, E. (2008): *Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*, 4. Auflage, Berlin: Springer
- Häckel, H. (2012): *Meteorologie*, 7. Auflage, Stuttgart: Ulmer
- HTW (2013): *Empfehlungen zum Einsatz kleiner Windenergieanlagen im urbanen Raum. Ein Leitfaden*, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin, URL:
http://kleinwind.htw-berlin.de/website/fileadmin/data/Download/Kleinwind_Handlungsempfehlungen_HTW-Berlin.pdf
- Huber, S.; Horbaty R. (2010): *State-Of-The-Art Report Social Acceptance Of Wind Energy*, IEA Wind Task 28 Technical Report, URL:
http://www.socialacceptance.ch/images/IEA_Wind_Task_28_technical_report_final_20110421.pdf
- Huber, S.; Horbaty R. (2012): *Final Report Social Acceptance Of Wind Energy Projects*, IEA Wind Task 28 Final Report, URL:
http://www.socialacceptance.ch/images/Task_28_final_report_2012.pdf

- Hübner, G.; Pohl, J. (Hrsg.) (2010): *Pilotstudie zur Akzeptanz vertikaler Windenergieanlagen. Kurzfassung des Abschlussberichts zum BMU-EE-Querschnitts-Forschungsvorhaben*, Halle (Saale), URL:
<http://mmvr-des.burg-halle.de/~schikora/workshop/documents/VWEA-Abschlussbericht.pdf>
- Jarass, L.; Obermair, G.; Voigt, W. (2009): *Windenergie. Zuverlässige Integration in die Energieversorgung*, 2. Auflage, Berlin: Springer
- Kaltschmitt, M.; Streicher, W. (Hrsg.) (2009): *Regenerative Energien in Österreich. Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung. Praxis*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner
- Kirchweiger, C. (2009): *Kleinwindkraft in der Praxis. Grundlagen, Markt, Potenziale, Probleme*, Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, Norderstedt: Grin
- HB Umgebungslärm (2009): *Handbuch Umgebungslärm. Minderung und Ruhevorsorge*, 2. Auflage, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft, Wien
- Manwell, J.F.; McGowan, J.G.; Rogers, A.L. (2009): *Wind Energy Explained. Theory, Design And Application*, 2. Auflage, Chichester: Wiley
- Mertens, S. (2006): *Wind Energy in the Built Environment. Concentrator Effects of Buildings*, Dissertation an der Technischen Universität Delft, URL:
http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:959694f4-6666-488a-8754-6c58124f4a10/ae_mertens_20060905.pdf
- Minderman, J.; Pendlebury C.J.; Pearce-Higgins J.W.; Park K. J. (2012): *Experimental Evidence for the Effect of Small Wind Turbine Proximity and Operation on Bird and Bat Activity*, PLOS one, Volume 7, Issue 7, e41177, URL:
<http://www.plosone.org/article/fetchObject.action?uri=info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0041177&representation=PDF>
- Popovac, M.; Teppner, R.; Rudolph, M. (2011): *Analysis of the Building Geometry Influence on Energy Efficient Integration of Small Wind Turbines in Building Envelopes*, International Scientific Conference - CleanTech for Sustainable Buildings CISBAT11, Lausanne
- Popovac, M. (2012a): *Calculation of an effective annual power output in an urban configuraton*, Excel-Tool, nicht publiziert, Wien
- Popovac, M. (2012b): *Estimation of the Energy Output of Small Wind Turbines Integrated in Building Envelopes. Figures*, nicht publiziert, Wien

- Satyajith, M. (2006): *Wind Energy. Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, Berlin: Springer
- Shea, K.; Howard, B.C. (2012): *Build Your Own Small Wind Power System*, New York: McGraw-Hill
- Sioshani, F.P. (Hrsg.) (2012): *Smart Grid. Integrating Renewable, Distributed & Efficient Energy*, Amsterdam: Academic Press
- Sørensen, J.D.; Sørensen, J.N. (2011): *Wind Energy Systems. Optimising Design And Construction For Safe And Reliable Operation*, Woodhead Publishing Series In Energy Number 10, Cambridge: Woodhead Publishing
- Twele, J. (Hrsg.) (2013): *Empfehlungen zum Einsatz kleiner Windenergieanlagen im urbanen Raum. Ein Leitfaden*, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
- Twidell, J. (2011[1987]): *A Guide To Small Wind Energy Conversion Systems*, New York: Cambridge University Press
- Quaschnig, V. (2006): *Regenerative Energiesysteme. Technologie – Berechnung - Simulation*, 4. Auflage, München: Hanser
- Quaschnig, V. (2013): *Regenerative Energiesysteme. Technologie – Berechnung - Simulation*, 8. Auflage, München: Hanser
- Raberger, Angela (2011): *Kleinwindkraft als stadtverträgliche erneuerbare Energiequelle für Wien?*, Wiener Umwelthanwaltschaft, URL: <http://wua-wien.at/home/images/stories/energie/kleinwindkraft-wien.pdf>
- VDI (Hrsg.) (1994): *Stoffwerte von Luft*, in: VDI-Wärmeatlas, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf: VDI-Verlag
- Wüstenhagen, R.; Wolsink, M.; Bürer, M.J. (2007): *Social acceptance of renewable energy innovation. An introduction to the concept*, in: Energy Policy, Volume 35, Issue 5, S. 2683-2691, Amsterdam: Elsevier

7.2 Onlinequellen

- Academic (2013): *Stirling-Formel*, URL: <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/1334603> [Dezember 2012]
- Austro Control (2012): *Wetterlexikon. Wind*, URL: http://www.austrocontrol.at/jart/prj3/austro_control/main.jart?rel=de&reserve-mode=active&content-id=1311169872854&lex-term=Wind [Dezember 2013]

- AuWiPot (2013): *Austrian Wind Potential. Windatlas und Windpotentialstudie Österreich*, URL: http://ispacevm11.researchstudio.at/index_v.html [April 2013]
- Duden (2013): *Wind*, URL: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Wind#Bedeutung> [Dezember 2013]
- E-Control (2013): *20-20-20-Ziele*, URL: <http://www.e-control.at/de/konsumenten/oekoenergie/klima-und-umwelt/20-20-20-ziele> [April 2013]
- EU (2013): *European Commission. Climate Action*, URL.: http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm [Jänner 2013]
- HTW Saar (2012): *HTW-Online Nr. 66*, URL: <http://www.htw-saarland.de/organisation/htwonline/htw-online-2010/66/windenergie> [Dezember 2012]
- IG Windkraft (2013a): *Windkraft in Umfragen*, URL: [http://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY\[0\]=1054](http://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY[0]=1054) [März 2013]
- IG Windkraft (2013b): *Überwältigende Mehrheit will Windkraftausbau*, URL: <http://www.igwindkraft.at/redsystem/mmedia/2011.10.25/1319530430.pdf> [März 2013]
- NASA (2012): *The Spherical Shape Of The Earth*, URL: <http://sealevel.jpl.nasa.gov/overview/overviewclimate/overviewclimateshapeofearth/> [Dezember 2012]
- KWK (2013): *Kleinwindkraft in Wien*, URL: <https://kleinwindkraft.wordpress.com/kleinwindkraft-in-wien/> [April 2013]
- Voelker, D. (2012): *Oberflächenströmungen*, URL: <http://meeresgeo.geoinf.fu-berlin.de/inhalt/oberflaechenstroemung.php?js=1&sg=12> [Dezember 2012]
- Stadt Wien (2013): *Genehmigung einer Windkraftanlage und Anerkennung als Ökostromanlage – Antrag*, URL: <http://www.wien.gv.at/amtshelfer/bauen-wohnen/baurecht/elektrizitaet/windkraftanlage.html> [Mai 2013]
- Wien Energie(2013): *Weitere Windparks*, URL: <http://www.wienenergie.at/eportal/ep/channelView.do/pageTypeId/11893/channelId/-26986> [April 2013]
- WUA (2013): *Wiener Umweltanwaltschaft. Über uns*, URL: <http://wua-wien.at/home/ueber-uns/> [Mai 2013]

7.3 Rechtsquellen

Landesrecht

BO für Wien: Wiener Stadtentwicklungs-, Stadtplanungs- und Baugesetzbuch (Bauordnung für Wien – BO für Wien) idF vom 1. Mai 2013; URL:

https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/LrW/LRWI_B020_000/LRWI_B020_000.pdf

WelWG: Gesetz über die Neuregelung der Elektrizitätswirtschaft (Wiener Elektrizitätswirtschaftsgesetz 2005 – WelWG 2005) idF vom 1. Mai 2013; URL:

<http://www.wien.gv.at/recht/landesrecht-wien/rechtsvorschriften/pdf/b4800000.pdf>

Wiener Umweltschutzgesetz: Gesetz über Einrichtungen zum Schutz der Umwelt (Wiener Umweltschutzgesetz) idF vom 1. Mai 2013; URL:

https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/LrW/LRWI_L010_000/LRWI_L010_000.pdf

Wiener Naturschutzgesetz: Gesetz mit dem das Wiener Naturschutzgesetz erlassen wird idF vom 1. Mai 2013; URL:

https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/LrW/LRWI_L480_000/LRWI_L480_000.pdf

Bundesrecht

ÖSG 2012: Bundesgesetz über die Förderung der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energieträgern (Ökostromgesetz 2012 – ÖSG 2012) idF vom 20. Mai 2013; URL:

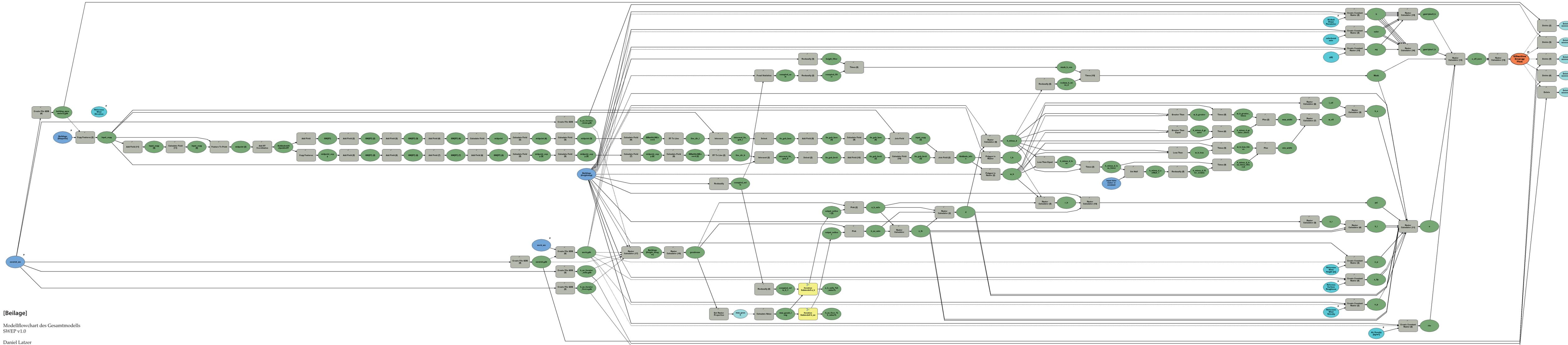
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/20007386/%C3%96SG%20A02012%2c%20Fassung%20vom%2020.05.2013.pdf>

ÖSET-VO 2012: Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend, mit der die Einspeisetarife für die Abnahme elektrischer Energie aus Ökostromanlagen auf Grund von Verträgen festgesetzt werden, zu deren Abschluss die Ökostromabwicklungsstelle ab 1. Juli 2012 bis Ende des Jahres 2013 verpflichtet ist (Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2012 – ÖSET-VO 2012) idF vom 20. Mai 2013; URL:

<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/20007993/%C3%96SET-VO%20A02012%2c%20Fassung%20vom%2020.05.2013.pdf>

LFG 1957: Bundesgesetz vom 2. Dezember 1957 über die Luftfahrt (Luftfahrtgesetz – LFG) idF vom 20. Mai 2013; URL:

<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/10011306/LFG%2c%20Fassung%20vom%2020.05.2013.pdf>



[Beilage]

Modellflowchart des Gesamtmodells
SWEP v1.0

Daniel Latzer
Wien, im Mai 2013