



Markus Auer; Kathrin Baumann-Stanzer; Kurz Leonhartsberger; Ines Lindmeier; Renate Teppner

Numerische Strömungssimulation eines urbanen Kleinwindkraft-Standorts

116 – Energy, Environment & Transportation

Abstract

Buildings account for over a third of the energy consumption within Europe. In order to reduce carbon emissions and to shift buildings from energy consumers to energy producers, the EU-directive 2010/31/EU was introduced. Nearly Zero Energy Buildings should contribute towards a sustainable, carbon free environment. Energy consumers are mainly focused in densely populated areas. Energy sources are limited in these areas. Concerning integration of renewable energy into building or building complexes, possible energy sources are limited. Wind energy can be harvested by small scale wind turbines (SWT) and is bearing potential to contribute to a positive energy balance of buildings. In co-generation with other renewable energy sources, a positive effect regarding volatility arises. Integrating SWT's into or next to building complexes is difficult. Assessing suitable sites with good energy yields is by far more complex than e.g. planning photovoltaic power plants. Currently, a lack of planning standards and product certification exists. These problems are addressed by the project urban wind energy. As a part of this project, a SWT at an urban site, installed at the rooftop of an office complex, was investigated. Both measurements (ultrasonic and sonic detection and ranging) and simulations (steady state CFD code) are used to evaluate energy generation potential and site assessment. Measurement results were used for CFD-simulation boundary conditions and result validation. The simulation confirmed the large impact of surrounding building geometries at the local, highly turbulent wind field of the SWT site. Investigating the main wind directions, different flow fields arose. The in advance chosen, supposedly best site showed wind fields of low wind speeds and high turbulence intensity. SWT's can be an essential contribution to renewable energy generation of buildings. More in depth planning processes are needed. CFD simulation results can provide the needed input for further site assessment investigations.

Keywords:

Windkraft, Windkraftanlagen, Urbane Windenergie, CFD, Erneuerbare Energietechnologien, dezentrale Energieerzeugung, Gebäudeintegration, Standortevaluierung

Einleitung

Die im Juni 2010 von der Europäischen Kommission verabschiedeten Kernziele für das Jahr 2020 hinsichtlich Klimawandel und Energie sehen vor, Treibhausgase um 20% zu verringern, den Anteil erneuerbarer Energie auf 20% zu erhöhen und die Energieeffizienz um 20% zu steigern (Europäische Kommission 2010). Die Windkrafttechnologie, welche unterteilt werden kann in Großwindkraftanlagen

(GWKA) und Kleinwindkraftanlagen (KWKA), kann hierbei einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie an der elektrischen Energieproduktion erbringen.

Die von Österreich national übernommenen „2020-Ziele“ für den Anteil erneuerbarer Energie an der elektrischen Energieproduktion wurden mit 34 % festgelegt. Der Windkrafttechnologie wird neben der Photovoltaiktechnologie und dem weiteren Ausbau von Wasserkraft ein hohes technisches Potenzial zugesprochen (BMWFJ 2010).

Gebäude sind noch immer für über ein Drittel des Energieverbrauchs im europäischen Raum verantwortlich. Daher werden europaweit auch zusehends im Gebäudebereich Maßnahmen gesetzt, um die Emission von Treibhausgasen durch Steigerung der Energieeffizienz zu reduzieren. Dies geschieht im Rahmen der Energieeffizienzrichtlinie 2012/27/EU (Europäische Kommission 2012). Der maßgebliche Ansatz liegt in der Implementierung von *Nearly Zero Energy* Gebäudestandards. Diese Gebäude zeichnen sich einerseits durch einen niedrigen Energieverbrauch im Betrieb aus, zum anderen wird durch Energieerzeuger am oder im Gebäude Energie bereitgestellt. Damit wird ein Wandel der Gebäude vom Energieverbraucher zum Energieerzeuger herbeigeführt. Die Kleinwindkraft kann in besiedeltem Gebiet, installiert auf Gebäudedächern oder integriert in die Gebäudestruktur, einen Beitrag zur Verbesserung der Gesamtenergiebilanz von Gebäuden leisten.

Kleinwindkraftanlagen können Teil einer dezentralen Energieerzeugungsstruktur werden und haben im Verbund mit anderen erneuerbaren Energieressourcen wie Solarenergie und Wasserkraft den Vorteil, die Volatilität der einzelnen Energiequellen auszugleichen (Ahmed et al. 2008; Delucchi / Jacobson 2011) und einen Teil des Eigenenergiebedarfs von Gebäuden abdecken zu können (Reiterer 2014).

Herausforderungen bei der Standortwahl von Kleinwindkraftanlagen in besiedeltem Gebiet

Die Kleinwindkrafttechnologie unterscheidet sich in der Bauweise, Baugröße und den Standorteigenschaften wesentlich von Großwindkraftanlagen (GWKA). Zeigt sich bei GWKA der Trend zu hohen Anlagenleistungen von bis zu 7.5 MW, zu großen Nabenhöhen von bis zu 135 m und zu großen Rotordurchmessern von bis zu 127 m, ist bei KWKA das Gegenteil der Fall. Mit einer umstrichenen Rotorfläche von maximal 200 m² (IEC 61400-2:2013) bzw. einem Rotordurchmesser von maximal 16 m und Anlagenleistungen im ein- bis zweistelligen Kilowatt-Bereich, haben diese Anlagen viel geringere bewegte Massen und werden daher stärker beeinflusst von schwankenden Windbedingungen wie Windböen bzw. Turbulenzen.

GWKA werden fast ausschließlich an exponierten Lagen mit geringer Verbauung und mit möglichst großer Nabenhöhe installiert. Dies garantiert eine turbulenzarme Strömung hoher Windgeschwindigkeit, welche von besonderer Relevanz für die Energieerzeugung ist, da die enthaltene Leistung im Wind (Gleichung 1) mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit steigt (Hau 2014). Zudem stellt die Turbulenz der Strömung ein Maß für die dynamische Beanspruchung der Windanlagenkonstruktion dar und sollte daher somit möglichst gering sein (Hau 2014).

$$P = \frac{1}{2} A \rho v^3 \quad (1)$$

P ... Mechanische Leistung des Luftmassenstroms in W

A ... Vom Rotor umstrichene Fläche in m²

ρ ... Dichte der Luft in kg/m³

v ... Anströmgeschwindigkeit in m/s

Betrachtet man nun die Standortwahl von KWKA, so zeigen sich einige Nachteile im Vergleich mit der Großwindkraft:

- Die Nabenhöhe der Anlagen relativ zum Boden ist deutlich geringer. Somit ist auch die mittlere Windgeschwindigkeit an Standorten in der bodennahen, atmosphärischen Grenzschicht, deutlich niedriger. Die Geschwindigkeit steigt in dieser Schicht annähernd exponentiell mit der Höhe (Plate 1995).
- Der Anlagenstandort liegt oftmals in unmittelbarer Umgebung zu verbautem Gebiet und somit zu Strömungshindernissen. Dadurch können turbulente Strömungsablösungen auf die Anlage übertragen werden und Windschatten entstehen.

An potenziellen Anlagenstandorten in städtischem Gebiet unterliegt das lokale Strömungsfeld großen Schwankungen in Raum und Zeit. Diese Turbulenzen stellen einen stochastischen (zeitabhängigen) Zufallsprozess dar (Oertel et al. 2011), und nehmen mit komplexen Oberflächenstrukturen wie Bebauung, Bewuchs und Geländeform zu. Diese Effekte haben hohen Einfluss auf den Energieertrag und die mechanische Beanspruchung der Anlagen. Daher ist gerade in besiedeltem Gebiet von höchster Priorität den potenziellen Windkraft-Standort richtig einzuschätzen und auszuwählen.

Die Bestimmung des Energieertrags alleinig durch Betrachtung von Häufigkeitsverteilungen der mittleren Windgeschwindigkeiten und deren Anwendung auf Leistungskennlinien der Windkraftanlage, zeigt sich dabei an hochturbulenten Standorten als nicht ausreichend (Carpman 2011; Lubitz 2014; Trivellato et al. 2012). Es ist daher notwendig, durch den Einsatz umfassender Untersuchungen die hochkomplexen Strömungsvorgänge in städtischem Gebiet zu charakterisieren. Darauf aufbauend können neue und einfach anwendbare Methoden zur Standortbegutachtung entwickelt werden.

Methodik

Eine stationäre, numerische Strömungssimulation mit der Software *ANSYS Fluent* auf Basis von RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) Turbulenzmodellierung diente der Berechnung des Strömungsfeldes im Stadtteil um das Gebäude ENERGYbase im 21. Wiener Gemeindebezirk für drei spezifische Windrichtungen und -geschwindigkeiten. Numerische Strömungssimulationen haben sich als geeignetes Werkzeug für die Analyse von Strömungsbedingungen etabliert. Bei diesem Anwendungsfall handelt es sich um eine atmosphärische Strömung bezogen auf ein weit ausgedehntes Berechnungsgebietes, kombiniert mit komplexen Geometrien, welche teils hochturbulente Strömungssituationen bedingen. Daher waren vorab jedoch Evaluierungen der Simulationsmodelle (Turbulenzmodelle) und im Anschluss Vergleiche mit Messungen unabdingbar.

Zusammengefasst wurden folgende, für die Durchführung von Strömungssimulation allgemein gültige, Schritte durchgeführt:

- Auswahl eines geeigneten Simulationsmodelles (Solver und Turbulenzmodell)
- Vorab-Evaluierung des gewählten Turbulenzmodells an Hand eines umströmten Körpers welcher bereits mit Strömungskanal-Messdaten belegt ist
- Vereinfachung des 3D-Geometriemodells des betrachteten Simulationsgebiets (Stadtteil)
- Diskretisierung des Simulationsgebietes mit einer endlichen Anzahl an Berechnungszellen
- Definition der Strömungs-Randbedingungen am Eingang des Simulationsgebietes
- Simulation der relevanten Szenarien, also der dominanten Hauptwindrichtungen am Standort
- Vergleich der Simulation, mit am Standort aufgezeichneten Messdaten

Simulationsmodell

Die Strömungssimulation löst die dreidimensionalen Bewegungsgleichungen, in diesem Fall die partiellen Differentialgleichungen für die Erhaltung von Masse und Impuls. Thermische Effekte werden für diese Simulation vernachlässigt. Bei der Parametrierung der Simulation und des Geometriemodells wurden Empfehlungen im Bereich „Urban Physics“ eingehalten (Blocken 2015; Blocken et al. 2007, Franke / Hellsten 2011). Ein besonderes Augenmerk galt der Abbildung turbulenter Strömungen im gebäudenahen Bereich. Als Turbulenzmodell wurde das Reynolds Stress Modell für die Stadtteilsimulation gewählt, da es im Gegensatz zu Wirbelviskositätsmodellen die Reynoldsspannungen direkt löst und somit richtungsabhängige Turbulenz abbildet.

Es wurde der Pressure-Based Solver angewendet. Das gewählte Turbulenzmodell ist das Reynolds Stress Modell mit Linear Pressure Strain, aktiviertem Wall Reflection Term und Standard Wall Functions. Die Modellkonstanten entsprechen den Standardeinstellungen in ANSYS Fluent. Das Berechnungsgebiet rund um den Kleinwindkraft-Standort erstreckt sich über rund 1200 m Länge und 900 m Breite bei einer Höhe von 330 m. Zur Diskretisierung wurden 14 Millionen Polyeder-Zellen erstellt.

Randbedingungen

Numerische Strömungssimulationen erfordern definierte Strömungsbedingungen am Strömungseingang. Die Randbedingungen der Simulation entstammten gemittelten Messdaten und bilden daher real aufgetretene Strömungsbedingungen ab. Das Geschwindigkeitsprofil am Standort wurde aus kombinierten Messdaten eines akustischen Fernerkundungssystems vor Ort und einer TAWES-Messstation mit Schalenkreuzanemometer und Windfahne der ZAMG in Großenzersdorf gewonnen.

Zur Abbildung des Verlaufs der Windgeschwindigkeit über die Höhe wurde das Potenzgesetz nach Hellmann laut Gleichung 2 angewendet. Gültigkeit hat diese Geschwindigkeitsverteilung jedoch nur für die Prandtlschicht, deren Höhe nicht konstant (ca. 50 bis 200 m) ist und von der Temperaturschichtung abhängig ist (Plate 1995).

Der Hellmann Exponent α spiegelt die Rauheit der Geländestrukturen, ähnlich der Rauheitslänge z_0 , wieder. Zusätzlich wird mit dem Exponenten die Abhängigkeit der atmosphärischen Schichtung berücksichtigt. Er beträgt bei neutraler Schichtung für Wiesen und Felder rund 0,15 und für dichte Bebauung rund 0,30. In der nachfolgenden untersuchten Windepisode D der Stadtteilsimulation beträgt der Hellmannexponent 0,24.

$$v_h = v_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad (2)$$

v_h, v_{ref} ... Windgeschwindigkeit in der Höhe h bzw. in Referenzhöhe h_{ref} in m/s

h, h_{ref} ... Höhe bzw. Referenzhöhe in m

α ... Hellmann-Exponent

Beim akustischen Fernerkundungssystem (Sonic Detection and Ranging - SODAR) handelt es sich um ein Doppler-SODAR, Type PCS.2000-24/LP der Firma Metek. Dieses misst die dreidimensionalen Windgeschwindigkeitskomponenten über eine Höhe von 15 - 300 m mit bis zu 10 m minimalem Schichtabstand. Dadurch konnte ein vertikales Windprofil (10 – 200 m) am Standort generiert werden.

In der Stadtteilsimulation wurden die drei spezifischen Windepisoden 135°, 270° und 300° (Abbildung 2), entsprechend der dominanten Windrichtungen im Gebiet simuliert und die hochturbulente Strömung am Dach des Gebäude ENERGYbase, einem mehrstöckigen Bürogebäude im 21. Wiener Gebäudebezirk, charakterisiert (Abbildung 3).

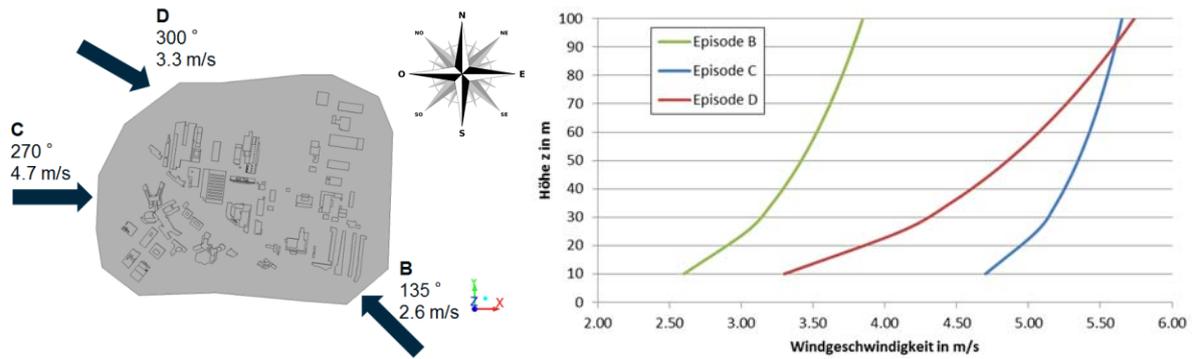


Abbildung 1: Übersicht der Stadtteilsimulation-Randbedingungen
Links) Simulierte Anströmrichtungen und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe
Rechts) Geschwindigkeitsprofile am Strömungseingang von 10 – 100 m Höhe

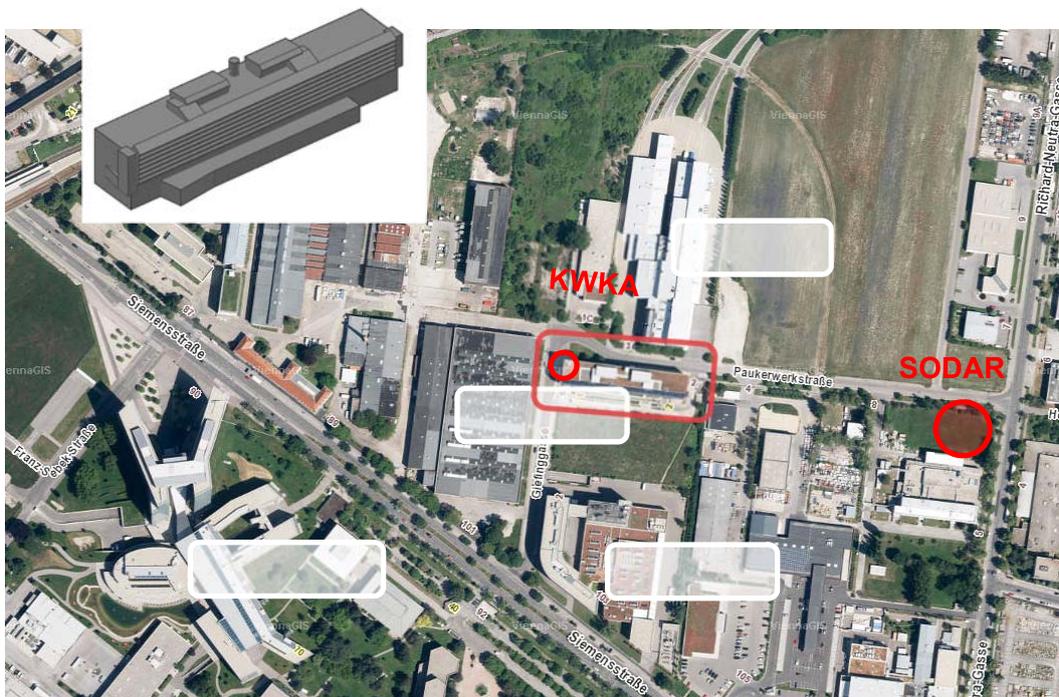


Abbildung 2: Luftbildaufnahme des Stadtteils um das Gebäude ENERGYbase (ViennaGIS, www.wien.gv.at/viennagis) und CAD Modell des Gebäudes

Ergebnisse der Strömungssimulation

Es wird zunächst die Strömung im gesamten Stadtteil betrachtet und dann auf die Gebäudeumströmung am ENERGYbase eingegangen. Die Auswertung erfolgt qualitativ mit Contour-Plots in horizontalen und vertikalen Schnittebenen durch das Berechnungsgebiet sowie quantitativ mit Plots der vertikalen Verteilung der Windgeschwindigkeit an zwei Auswertelinien. Die betrachteten Strömungsparameter sind der Betrag der Windgeschwindigkeit und die Turbulenzintensität (TI) der Strömung.

Die Ergebnisse der drei Simulationen zeigten sehr unterschiedliche Strömungsbilder, abhängig von der angeströmten Windrichtung und -geschwindigkeit. Teils zeigten sich am Standort niedrige Windgeschwindigkeiten bei gleichzeitig hohen Turbulenzintensitäten und hohen vertikalen Gradienten über die Rotorhöhe der KWKA. Dies kann die Performance von KWKA in Bezug auf Energieertrag und Lebensdauer wesentlich beeinflussen.

Im Folgenden wird auf die Hauptwindrichtung Nordost bzw. 300° eingegangen (Episode D, lt. Abbildung 2). Eine Übersicht über die Simulation im Stadtteil ist im horizontalen Schnitt in Abbildung 4 in der Auswerteebenen 30 m Höhe – auf Nabenhöhe der KWKA - dargestellt. Bei näherer Betrachtung ist eine verringerte Windgeschwindigkeit im Bereich der ENERGYbase erkennbar. Dieser Effekt wurde bei der Standortwahl nicht berücksichtigt und stellt eine Strömungsablösung an der nordöstlichen Gebäudekante des benachbarten Gebäudes (Lagerhalle) dar.

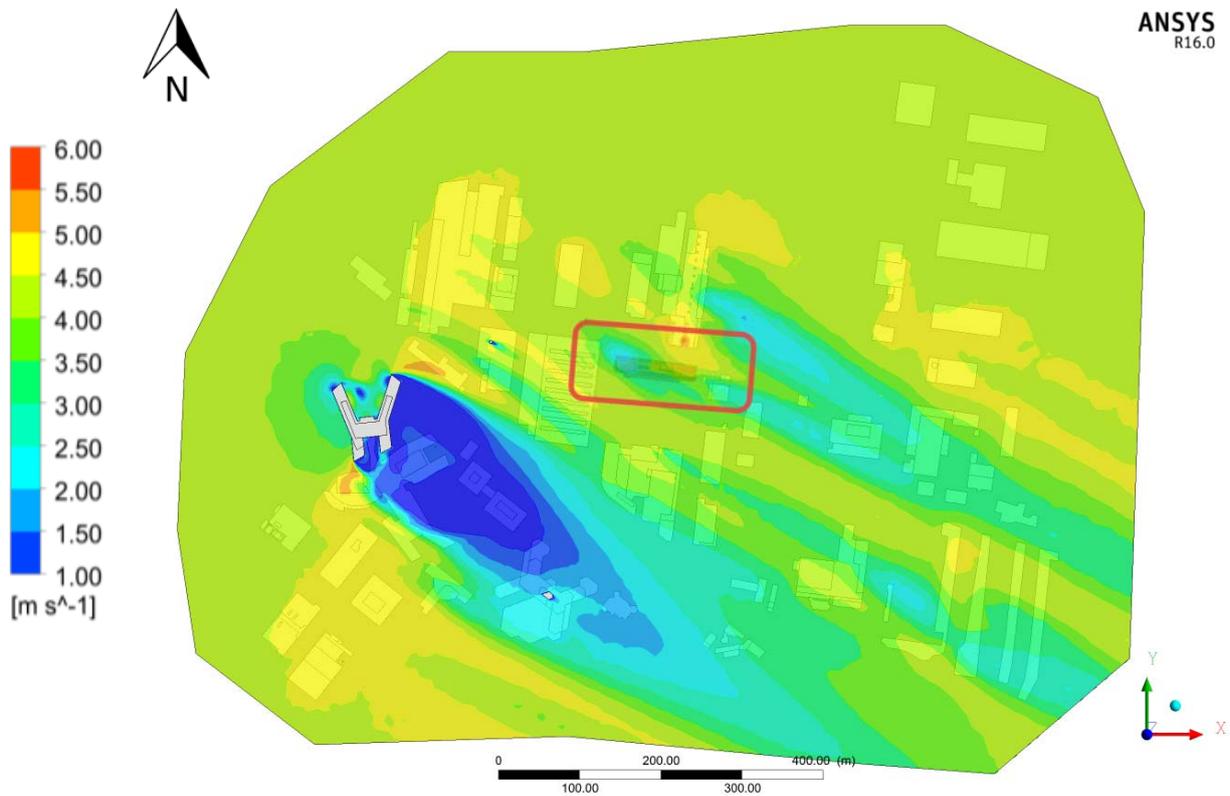


Abbildung 3: Horizontalschnitt in Z=30m Höhe der Windepisode D.
Betrag der Windgeschwindigkeit in m/s. Gebäude ENERGYbase hervorgehoben.

Eine Detailbetrachtung der Strömung am Gebäude ENERGYbase ist der Darstellung Abbildung 5 und Abbildung 6 zu entnehmen. Daraus ersichtlich ist ein Gebiet niedriger Windgeschwindigkeit (kleiner 2,5 m/s) und hoher Turbulenzintensität größer 0,50 über der nordwestlichen Dachkante der ENERGYbase, am Standort der KWKA. Die Strömung trifft zunächst auf die Nachbargebäude im Westen. Dies bewirkt, dass der Wind über die nordöstliche Gebäudekante der Lagerhalle strömt. Eine nähere Betrachtung der Simulationsergebnisse in diesem Bereich zeigte eine Strömungsablösung über der nordöstlichen Gebäudekante der Lagerhalle. Eine entsprechende Auswertung in Vektorform in Abbildung 3 verdeutlicht dies. Dieser Effekt resultiert in einem Gebiet sehr niedriger Windgeschwindigkeit am Standort der KWKA am ENERGYbase.

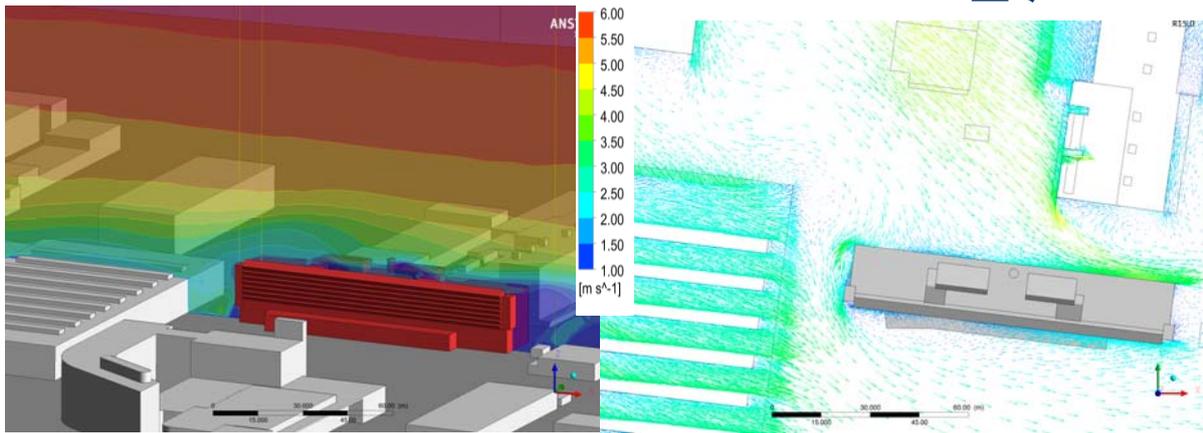


Abbildung 4: Betrag der Windgeschwindigkeit als Ansicht (links) sowie Windrichtungsvektoren (rechts) in Horizontalschnitt in der Auswerteebene 13 m am ENERGYbase für Episode D: 300°.

Die horizontale Verteilung der Windgeschwindigkeit und der Turbulenzintensität in Abbildung 6 zeigt, dass sich das Gebiet niedriger Windgeschwindigkeit und hoher TI genau über den Standort der KWKA erstreckt.

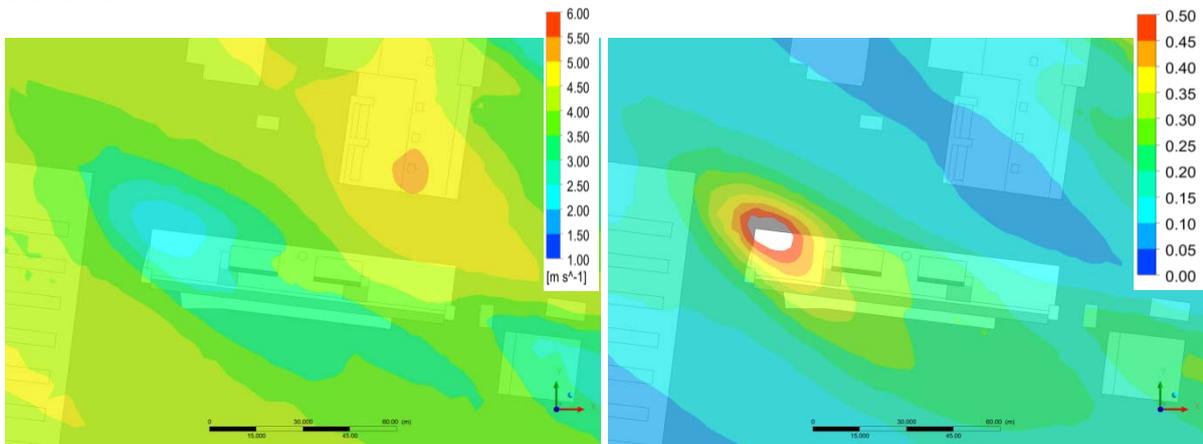


Abbildung 5: Betrag der Windgeschwindigkeit (links) sowie Turbulenzintensität (rechts) am ENERGYbase für Episode D: 300°. Horizontalschnitt in der Auswerteebene 30 m.

Der Verlauf der Windgeschwindigkeit und die um den Faktor 10 skalierte Turbulenzintensität am Dach des ENERGYbase wird über eine Höhe von 20 - 40 m über Grund am Standort der KWKA in Abbildung dargestellt. Aus dem Diagramm ist der Effekt der von der Lagerhalle im Westen hervorgerufenen Strömungsablösung erkennbar. Die Windgeschwindigkeit erreicht erst ab einer Höhe von 27 m Werte höher 2 m/s und besitzt im Bereich der KWKA einen sehr hohen Gradient. Die TI erreicht im Bereich der KWKA Werte bis zu 0,62. Die Turbulenzintensität liegt damit weit über dem bei GWKA zu erwartenden Bereich von rund 0,10 (IEC 61400-12-1:2005) und auch über dem bei KWKA zu erwartenden Bereich von > 0,20 (Carpman 2011).

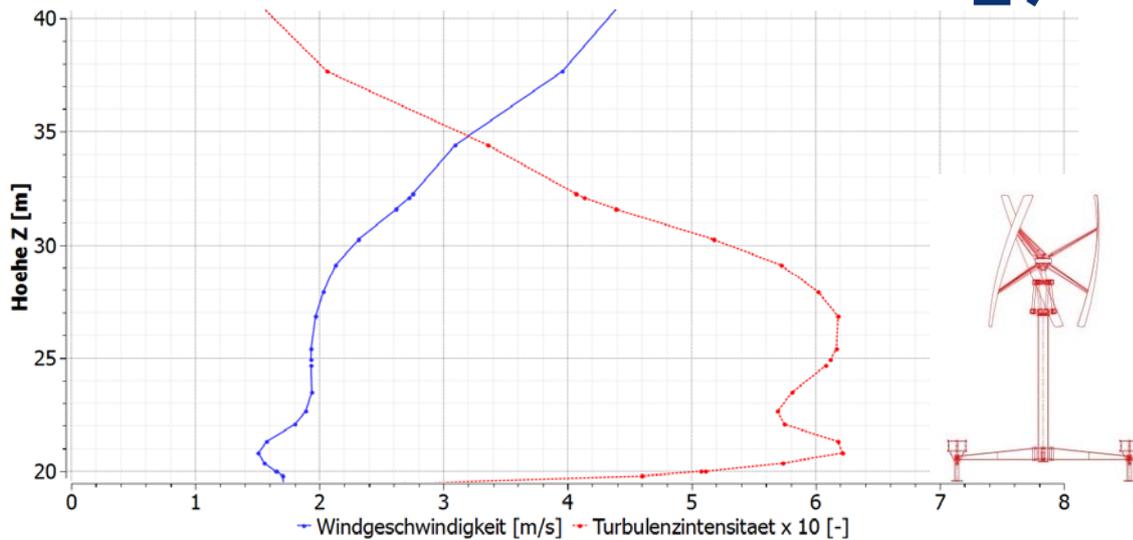


Abbildung 6: Verlauf der Windgeschwindigkeit und skalierte Turbulenzintensität über die Höhe am Standort der KWKA am ENERGYbase für Episode D: 300°.

Beispielhaft wird für die untersuchte Windepisode D die Performance der KWKA am Standort in Form von einer theoretisch erreichten mechanischen Leistung in Tabelle 1 angegeben. Ausgehend von 4,3 m/s Windgeschwindigkeit, gemessen in 30 m Höhe, kann auf den Einfluss des Standorts rückgeschlossen werden.

Bei einer mittleren Anströmgeschwindigkeit von 2,2 m/s ergibt sich eine maximal entziehbare theoretische Anlagenleistung $P_{KWKA,24.3m^2}$ von 98 W (Gleichung 1 unter Einbeziehung des Betz Limits von 0,59). Eine 200 m² KWKA hätte bei dieser Anströmung einen idealen Leistungsoutput von 932 W. Die Turbulenzintensität beträgt im Mittel 0,56. Die vertikalen Gradienten der Strömungsparameter betragen 0,8 m/s hinsichtlich Windgeschwindigkeit, respektive 113 W für $P_{KWKA,24.3m^2}$ und 0.14 in Bezug auf die Turbulenzintensität.

Episode D: 300°						
	V _{wind}	P _{wind}	P _{betz}	P _{KWKA,200m²}	P _{KWKA,24.3m²}	TI
Position	m/s	W/m ²	W/m ²	W	W	-
Oberkante	2.7	12.1	7.1	1429.8	173.7	0.48
Nabenhöhe	2.1	5.7	3.4	672.7	81.7	0.57
Unterkante	1.9	4.2	2.5	498.3	60.5	0.62
Mittel	2.2	6.8	4.0	809.2	98.3	0.56
Gradient	0.8	7.9	4.7	931.6	113.2	0.14

Tabelle 1: Kenngrößen zur Windleistung und Turbulenzintensität am Standort ENERGYbase

Die vom SODAR aufgezeichneten Messdaten für Windgeschwindigkeit werden in Abbildung 8 den Simulationsergebnissen am SODAR Standort (siehe Abbildung 3) gegenübergestellt. Die Simulationsergebnisse zeigen im Bereich 35 – 85 m eine hohe Übereinstimmung mit den Messungen. Die Abweichung in 35 m Höhe beträgt 0,05 m/s. In 25 m Höhe ist eine deutliche Abweichung von 1,29 m/s zu erkennen. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der ungenauen Vorhersage der Strömungsablösung des Gebäudes Railtec (siehe Abbildung 3) im Vorlauf des SODAR Standorts. Dieser Effekt kann von stationären Turbulenzmodellen auf Basis von RANS nicht mit ausreichender Präzision simuliert werden. Über 140 m verfehlen die in diesem Bereich ungültigen Modellannahmen die korrekte Bestimmung der von geostrophischem Wind beeinflussten Windgeschwindigkeit. Das Potenzgesetz nach Hellmann ist in diesem Bereich nicht mehr gültig.

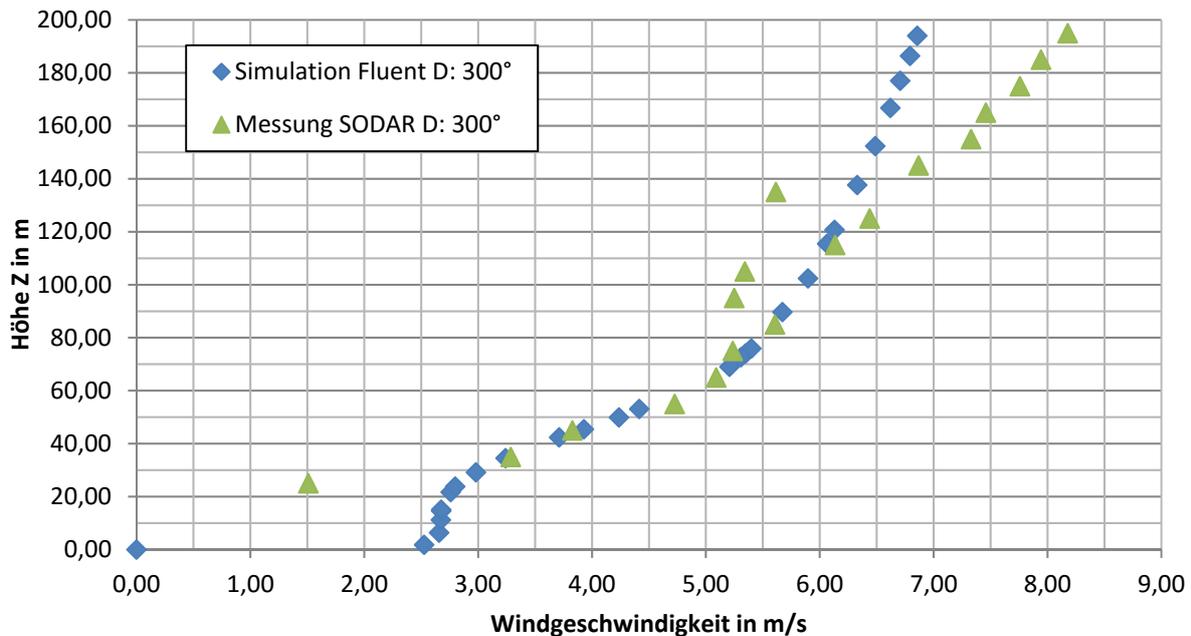


Abbildung 7: Vergleich der Strömungssimulation mit SODAR Messwerten des Betrags der Windgeschwindigkeit. Episode D: 300°. Auswertelinie am Standort SODAR.

Conclusio und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen auf, welche Schwierigkeiten und Herausforderungen sowohl bei der numerischen Strömungssimulation umströmter Gebäude, als auch bei der Integration von KWKA in hochturbulenten Standorten auftreten.

Turbulenzmodelle auf Basis von RANS sind durch die vereinfachten Modellannahmen teils nicht in der Lage, eine vollständig richtige Prognose der Umströmung stumpfer Körper zu liefern. Besonders instationäre Phänomene werden nicht korrekt abgebildet. Es ist daher in Bezug auf KWKA-Standort-Simulationen erforderlich, nähere Untersuchungen der RANS Modellabweichungen im Installationsbereich von KWKA mithilfe von Messtechnik durchzuführen und gegebenenfalls exaktere Modelle wie beispielsweise eine Large Eddy Simulation (LES) anzuwenden.

Das *Reynolds Stress* Turbulenzmodell wurde mit einem Windkanal-Experiment verglichen, welches nur Daten zu Windgeschwindigkeit und Turbulenz ab einer Höhe von 1.2 H über Dach aufweist. Ein Vergleich des auftretenden Rezirkulationsgebietes mit Messungen kann weitere Informationen über die Modellgenauigkeit bringen.

In Bezug auf die Integration von KWKA im urbanen Raum zeigten die Simulationsergebnisse, dass bei der Hauptwindrichtung niedrige Windgeschwindigkeiten mit hoher Turbulenzintensität am Standort zu erwarten sind. Ebenso wurden hohe Gradienten der Windgeschwindigkeit und TI über die Höhe der

KWKA festgestellt. Diese Beobachtungen müssen zunächst durch Messungen überprüft werden. In weiterer Folge ist die Auswirkung dieser Effekte auf die Performance und Lebensdauer (erhöhte dynamische Belastung der KWKA) zu untersuchen.

Im weiteren Projektverlauf wurden Messmasten mit Ultraschall-Anemometer am Dach des ENERGYbase installiert. Diese haben bereits gezeigt, dass der aktuelle Standort am westlichen Ende des Gebäudedaches nicht optimal ist und sich die Gebäudemitte als besserer Standort eignet (Klappacher et al. 2016). Zudem kann die Messtechnik für einen Vergleich der simulierten mit gemessenen Strömungsparametern am Dach genutzt werden. Die durch ein Monitoring aufgezeichnete Momentanleistung der KWKA in Abhängigkeit der Strömungsverhältnisse kann in weiterer Folge mit den gemessenen und simulierten Windverhältnissen verglichen werden. Somit kann eine Aussage über die Abhängigkeit der Anlagenperformance von den Strömungseigenschaften getätigt werden.

Nach der Einbeziehung der geplanten Messtechnik und der KWKA, ermöglicht das Forschungsprojekt *Urbane Windenergie* und dessen Folgeprojekt *SmallWindPower@Home* einen für die Kleinwindkraftforschung ganzheitlichen methodischen Ansatz der Performance-Messung. Diese Ergebnisse können ein tieferes Verständnis der Beeinflussung von KWKA durch die in urbanen Standorten oftmals turbulenten Strömungseigenschaften erzielen. Sowohl Planer als auch Entwickler könnten von den abgeleiteten Ergebnissen zur Standortwahl und Charakterisierung der Windströmung in urbanen Umgebungen profitieren.

Literaturverzeichnis

Ahmed, N.A., Miyatake, M., Al-Othman, A.K., 2008. Power fluctuations suppression of stand-alone hybrid generation combining solar photovoltaic/wind turbine and fuel cell systems. *Energy Conversion and Management* 49, 2711–2719.

Auer, M., Baumann-Stanzer, K., Klappacher, J., 2016 *Urban Wind Energy: Planning approaches for urban areas*. 2. Internationale Kleinwindkrafttagung 2016, Wien.

Bechmann, A., Sørensen, N.N., 2010. Hybrid RANS/LES method for wind flow over complex terrain. *Wind Energy*. 13, 36–50.

Blocken, B., 2015. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment* 91, 219-245.

Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., 2007. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric Environment* 41, 238–252.

Carpman, N., 2011. *Turbulence Intensity in Complex Environments and its Influence on Small Wind Turbines*. Uppsala University, Department of Engineering Sciences.

Delucchi, M.A., Jacobson, M.Z., 2011. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies. *Energy Policy* 39, 1170–1190.

Energiestrategie Österreich. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Bundesministerium für Land-und Forstwirtschaft, 2010. BMWFJ, BMLFUW.

Europa 2020 – EU-Kernziele für das Wirtschaftswachstum - Europäische Kommission, 2010. http://ec.europa.eu/europe2020/targets/eu-targets/index_de.htm (aufgerufen am 9.2.2015).

Europäische Union, 2012. Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden.

Franke, J., Hellsten, A., 2011. The COST 732 Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary. International Journal of Environment and Pollution 44, 419–427.

Hau, E., 2014. Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.

International Electrotechnical Commission, 2005. IEC 61400-12-1:2005 Wind turbines - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines.

International Electrotechnical Commission, 2013. IEC 61400-2:2013 Wind turbines - Part 2: Small wind turbines.

Leitl, B., Schatzmann, M., 2010. CEDVAL Universität Hamburg: Compilation of Experimental Data for Validation of Microscale Dispersion Models. <http://www.mi.uni-hamburg.de/cedval>. (aufgerufen am 12.08.2015)

Lindmeier, I., Heschl, C., Clauss, G., Heck, U., 2010. Prediction of the flow around 3D obstacles using open source CFD-Software, CWE2010, The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering. Chapel Hill, North Carolina, USA.

Lubitz, W.D., 2014. Impact of ambient turbulence on performance of a small wind turbine. Renewable Energy, World Renewable Energy Congress – Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden 61, 69–73.

Oertel, H., Böhle, M., Reviol, T., 2011. Strömungsmechanik: Grundlagen - Grundgleichungen - Lösungsmethoden - Softwarebeispiele. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.

Plate, E.J., 1995. Windprobleme in dichtbesiedelten Gebieten: Vortragsband der 3. Dreiländertagung D - A - CH '93 der Windtechnologischen Gesellschaft e.V. am 19. November 1993 an der Universität Karlsruhe. Windtechnolog. Ges. e.V.

Reiterer, D., 2014a. Kleinwindkraftanlagen zur Eigenlastabdeckung in Plusenergiegebäuden, Projekt Kleinwindkraft Plus. Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie NÖ-Wien.

Trivellato, F., Battisti, L., Miori, G., 2012. The ideal power curve of small wind turbines from field data. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 107–108, 263–273.