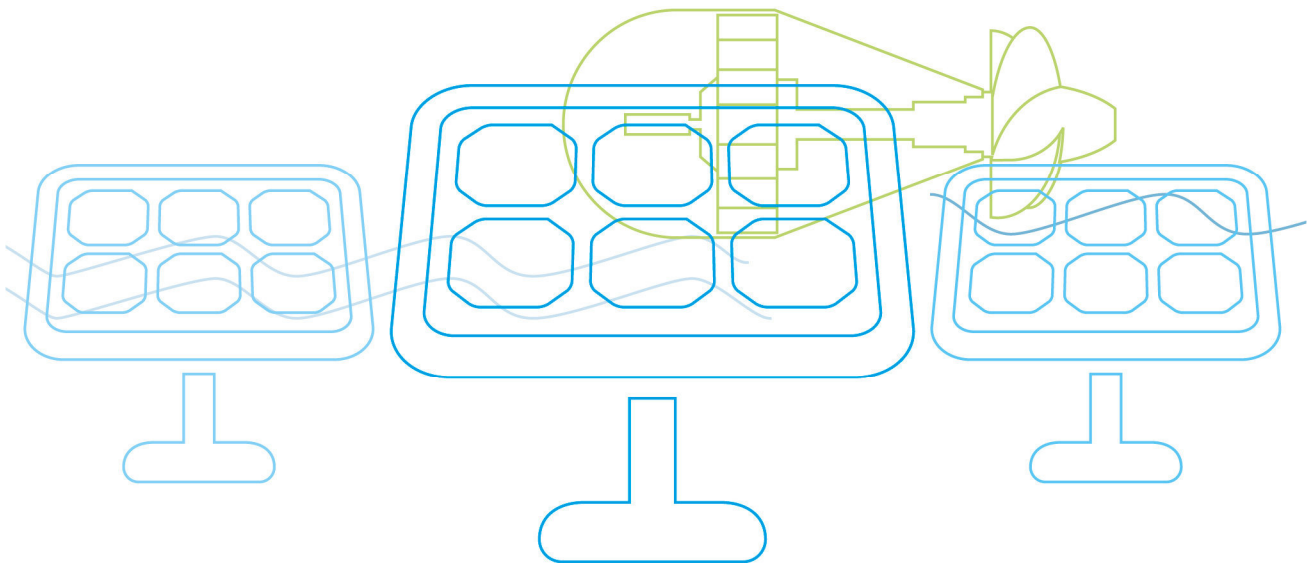




Einsatz numerischer Strömungssimulation zur optimalen Positionierung von Kleinwindkraftanlagen im städtischen Bereich



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	3
1. Einleitung	4
2. Inhaltliche Darstellung	5
3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen	11
4. Ausblick und Empfehlungen	14
5. Literaturverzeichnis	16
6. Abbildungsverzeichnis	17

Kurzfassung

Eine allgemeine Empfehlung über eine optimale Position einer KWKA auf einer Dachoberfläche lässt sich aus dieser Messreihe kaum ableiten. Zu spezifisch sind die Einflüsse rund um das jeweilige Gebäude und auch die Effekte der Dachstruktur und Dachaufbauten auf die Windströmung. Zusammengefasst kann gesagt werden das KWKA auf Gebäuden sehr wohl einen Sinn machen, da man durch die Gewinnung an Höhe in eine stärkere Luftströmung gelangt, jedoch ist die Installation auf jedem Gebäudedach getrennt zu untersuchen. Die folgende Vorgehensweise wäre sehr interessant: ausgehend von den Wetterdaten der ZAMG wird über die Strömungssimulation ein Punkt am Gebäude ausgewählt und die endgültigen Ergebnisse werden mit der lokalen Messung bestätigt.

Die Resultate der in diesem Projekt durchgeführten numerischen Strömungssimulationen verdeutlichen, dass die numerische Strömungssimulation (computational fluid dynamics – CFD) das beste ingenieurtechnische Werkzeug darstellt, um all die Informationen bereitzustellen, die für das Verständnis der Probleme, die bei der genauen Positionierung von KWKA im städtischen Bereich auftreten können, nötig sind. Um ein städtisches Windströmungsfeld zu bestimmen, ist aufgrund der großen Abmessungen eine ausreichende Datensammlungen durch Feldmessungen praktisch unmöglich. Bei Laborexperimenten besteht das Problem, dass die reale Windcharakteristik nur sehr schwer reproduziert werden kann. Hingegen liefert die Lösung der physikalischen Grundgleichungen für den Transport der Luft durch das Berechnungsgebiet unter Berücksichtigung der herrschenden Randbedingungen vollen Einblick in die dreidimensionale städtische Windströmungssituation und alle relevanten Strömungseffekte. Aber auch für CFD Simulationen ist die Wahl geeigneter Randbedingungen, d.h. speziell die Modellierung der Windverhältnisse am Rand des Berechnungsgebietes essentiell. Diese kann aus Feldmessungen abgeleitet werden. Die Kombination der Durchführung von Feldmessungen mit der Durchführung von numerischen Simulationen, in die die Messdaten als Randbedingungen eingehen, liefert die optimalen Ergebnisse.

Abstract

A general recommendation on the optimal position of a KWKA on a roof surface can hardly be derived from this single project, given the specific influences around the respective building as well as the effects of the roof structure and roof structures to the wind flow. In a summary it can be said that SWT buildings can make sense, because of the higher velocities reached: the installation, however, must be examined separately for each building roof. Nevertheless, the following procedure could be very interesting: based on the flow simulations (using the meteorological data of the ZAMG for boundary conditions, and the wind class distribution) one specific point on the building is selected, and then the final results confirmed with the local measurement.

From the results of the performed numerical simulations it can clearly be seen that the computational fluid dynamics (CFD) is the best engineering tool which can provide all information necessary for understanding the problems of exact positioning of SWT in urban environment – and more importantly, gives the solutions to these problems. Namely, on such a large scale it is practically impossible to acquire by means of field measurements a sufficient amount of data necessary to reconstruct the urban flow field totality, whereas the laboratory measurements can hardly reproduce the actual wind characteristics. On the other hand, however, by solving the governing equations CFD provides a full insight into urban flow situation and all relevant flow characteristics. The open issues for CFD simulations, such as the boundary conditions and wind characteristics, can be estimated from the field measurements, and in that respect the combination of numerical simulations supplied with the field data obtained from measurements

1. Einleitung

Die Frage der exakten Positionierung ist sehr wichtig für die Kleinwindkraftanlagen (KWKA) in städtischen Umgebungen. In diesen Umgebungen sind die Strömungscharakteristika, die entscheidend für die Energieeffizienz und Sicherheit von KWKA sind, sehr instabil und von vielen Parametern beeinflusst. Diese Parameter sind sowohl die Geometrie und Orientierung als auch die Anordnung der Gebäude. Diesbezüglich können bisher angewandte punktuelle Messungen nicht genügend Informationen über das Strömungsfeld liefern und Messungen über das gesamte betrachtete Feld sind praktisch unmöglich. Daher sind numerische Simulationen der einzige Weg, um zu Informationen über ein dreidimensionales Strömungsfeld zu gelangen.

Um die Parameter, die übergeordnete, stationäre Strömungsfelder in städtischen Gebieten bestimmen, zu untersuchen, wurden stationäre numerische Simulationen der Windströmungsverhältnisse für eine Basisvariante (Flachdach) und vier Varianten, die sich hinsichtlich Gebäudeabstand und Gebäudehöhe unterscheiden, berechnet. In einem ersten Schritt wurden Referenzdaten aus Messungen an mehreren Punkten an einem Standort gewonnen und mit den Ergebnissen der Simulation für genau diese Gebäudekonfiguration verglichen (Basisvariante). Nach dieser ersten Phase wurde eine Reihe von weiteren Berechnungen der lokalen Windströmungsverhältnisse durchgeführt: zuerst wurde der Gebäudeabstand modifiziert (+10 m = Variante 1; +20 m = Variante 2), danach wurde die Gebäudehöhe (+10 m = Variante 3; +20 m = Variante 4) verändert. Dadurch wird der Einfluss von verschiedenen Gebäudeanordnungen qualitativ und quantitativ erfasst.

Das Ergebnis der Studie ist die numerische Simulation von dreidimensionalen Strömungsfeldern um Gebäude zur Bestimmung der Positionierung von KWKA anhand vier Varianten. Somit leistet dieses Projekt einen Beitrag zu Energieeffizienz, Betriebssicherheit und Akzeptanz von KWKA in städtischen Gebieten. Auch für eine Veränderung von Gebäudeparametern, die in dieser Studie noch nicht berücksichtigt werden, können Schätzwerte durch Interpolation der in diesem Projekt berücksichtigten Parameter abgeleitet werden, wodurch sich eine hohe Aussagekraft für eine Vielzahl von Strömungsfeldern in urbanen Gebieten ergibt.

Darüber hinaus ebnet diese Studie den Weg für ein umfassenderes Projekt über Einflussgrößen für die optimale Positionierung von Kleinwindkraftanlagen im städtischen Gebiet. An diesem Projekt waren die drei Partner Österreichisches Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal Ges.m.b.H. (AIT Austrian Institute of Technology), Silent Future Tec GmbH, AEE - Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE beteiligt. Die Arbeit gliederte sich in die vier Arbeitspakete AP1 – Projektmanagement, AP2 – Messungen, AP3 – Numerische Simulationen, AP4 – Publikation und Verbreitung der Ergebnisse. Das Österreichische Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal Ges.m.b.H. wird nachstehend kurz AIT genannt.

2. Inhaltliche Darstellung

- **SFT Messungen**

Verwendete Messinstrumente:

Anemometer ANEO kalibriert (je Messstation 2 Stk, 1x Messhöhe 6 m, 1x Messhöhe 10 m)

Windrichtungsgeber UNI-12 (Messhöhe 10 m)

Messmast 10 m, 3seitig abgespannt

Datentransfergerät DTG

Datenlogger Wico PC

Wir messen schon seit längerer Zeit mit dieser Gerätekombination und haben damit gute Erfahrungen gemacht.

Zeiterfassung Datenlogger:

Zur Abstimmung mit den Messdaten, die von AEE erhoben wurden, wurden die Zeiten der Messdaten mit einem Zeitserver (uhrzeit.org abgeglichen).

Unsere Messung ist er über die gesamte Messdauer auf Sommerzeit gelaufen (Vermeidung von Doppelter Zeiterfassung).

Messperiode:

Um aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten wurden die Messungen über eine Periode von 3,5 Monaten durchgeführt. Als Messperiode waren ursprünglich drei Wochen geplant. Dieser Zeitraum ist laut Auskunft der Energiewerkstatt jedoch oft zu kurz, um eine umfassende Analyse (hinreichende Streuung von Windgeschwindigkeiten aus allen Windrichtungen) zu ergeben. Da das Messsystem mit einer Ferndatenauslesung versehen wurde, konnte während der Messungen überprüft werden, ab wann ein Messpunkt hinreichend genau vermessen wurde. Erst danach wurde dann die Position gewechselt. Der Gesamtzeitraum für alle durchgeführten Messungen betrug drei Monate.

- **AEE Messungen**

Verwendete Messinstrumente:

3D Ultrasonic – Ultraschall Anemometer Typ: Gil WindMaster

Datenlogger Ammonit Meteo 32

Die Wahl der eingesetzten Geräte erfolgte aufgrund der Beratung durch den hinzugezogenen

Windmessexperten (Hans Winkelmeier, Energiewerkstatt). Durch die dreidimensionale Messung werden auch Auf- und Abwinde erfasst. Dies ist für eine detaillierte Analyse der Strömungsverhältnisse vor Ort essenziell. Da auch die Simulation auf einem 3D-Strömungsmodell basiert, sind diese Daten für die Evaluierung des Modelles hilfreich. Aufgrund der höheren Mietkosten für das 3D Anemometer, wurde die Messperiode reduziert.

Messperiode:

Die Messung erfolgte jeweils für ca 6 Wochen an einem Standort. Nach dieser Periode wurde die Messung versetzt, um einen 2. Messpunkt zu untersuchen.

Zeiterfassung Datenlogger:

Zur Korrelation mit den Messdaten, die von Silent Future Tec erhoben wurden, wurde die Zeit mit einem Zeitserver (uhrzeit.org abgeglichen)

PC Clock: 07.10.2010 at 17:27:27

Logger Clock: 07.10.2010 at 16:24:09

Der Logger geht also um 3min 18s (MEZ) nach. Weiters ist er über die gesamte Messdauer auf Winterzeit gelaufen (Vermeidung von doppelter Zeiterfassung).

Messposition1

Die Positionierung erfolgte am Südwestlichsten Teil des Gebäudekomplexes;

Messhöhe: 5,5m über Dachniveau (Die Messung überragt alle Dachaufbauten in der Umgebung);

Abstand zu den Gebäudekanten: Südostkante - 18m, Südwestkante: 8m;

Messperiode: Start: 19.August -06.Oktober.

GPS Koordinaten: AEE1: 48.241559,16.433519

Messposition2

Die Positionierung erfolgte am östlichen Teil des Gebäudekomplexes;

Messhöhe: 5,5m über Dachniveau (Die Messung überragt alle Dachaufbauten in der Umgebung);

Abstand zu den Gebäudekanten: Nordost -10m, Nordwest -12m;

Messperiode: Start: 04.Oktober – 23.11.2010

GPS Koordinaten: AEE2: 48.242039,16.433731

• AIT Numerische Simulationen

Für die numerischen Strömungssimulationen wurde das kommerzielle Computational Fluid Dynamics (CFD) Softwarepaket FLUENT verwendet. Die numerische Strömungsanalyse gliederte sich in drei Teile. Im ersten Teil wurde für die reale Gebäudekonfiguration des Donauzentrums und seiner Umgebung ein exaktes virtuelles geometrisches Abbild geschaffen und für dieses virtuelle Geometriemodell eine Serie von numerischen Windumströmungsberechnungen durchgeführt. Dies mit dem Hintergrund und Ziel numerische Winddaten anhand der nach dem Stand der Wissenschaft vorliegenden Modellierungsansätze für exakt dieselbe Konfiguration zu errechnen in der auch die experimentellen Messungen am realen Standort durchgeführt wurden und so eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Das virtuelle Geometriemodell wird ausgehend von den Stadtvermessungsdaten des Stadtteils mit den Abmessungen von ca. 1km als mit dem weiteren Berechnungsablauf kompatibles CAD-Modell erstellt. Im Rahmen der numerischen Windströmungsberechnungen müssen an den Grenzflächen des Berechnungsgebietes Vorgaben über die Windverhältnisse gemacht werden. Diese Vorgaben wurden aus dem Datenmaterial langjähriger statistischer Winddaten (relative Häufigkeit von stündlicher Windrichtung und mittlerer Windgeschwindigkeit) der Windmessstation der ZAMG in Unterlaa abgeleitet. Im zweiten Teil wurde das komplexe der realen Konfiguration entsprechende Geometriemodell durch ein vereinfachtes Modell ersetzt. Die dominanten geometrischen Eigenschaften wurden dabei beibehalten. Die sich dadurch ergebenden Unterschiede im numerischen Windströmungsfeld wurden für ausgewählte Simulationsszenarien analysiert. Im dritten und letzten Teil wurden die Geometrievariationen hinsichtlich Gebäudeabstand und Gebäudehöhen durchgeführt: (Gebäudeabstand – Variante 1 und 2, und Gebäudehöhe – Variante 3 und 4). Ziel war die Untersuchung des Einflusses dieser Geometrieparameter auf das Umströmungsfeld der Gebäudekonfiguration und in weiterer Folge auf den möglichen Energieertrag von KWKA an verschiedenen Standorten am Dach des Donauzentrums.

Modellierung und Interpretation der Windverhältnisse

Die Weibull Wahrscheinlichkeitsverteilung findet breite Verwendung zur Abschätzung von Variationen der Windgeschwindigkeit. Die zweiparametrische Formulierung dieser Wahrscheinlichkeitsverteilung wurde in diesem Projekt verwendet. Die Wahrscheinlichkeitsdichte ist in diesem Fall:

$$f(x) = \left(\frac{b}{a}\right) \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}$$

wobei $x > 0$ für den Betrag der Referenzwindgeschwindigkeit steht, und die Wahrscheinlichkeit für die Abweichung von diesem Wert durch die Funktion $F(x)$ berechnet wird. $a > 0$ ist ein Skalierungsparameter in Zusammenhang mit der Referenzwindgeschwindigkeit, und $b > 0$ bestimmt den Kurvenverlauf der Verteilungsfunktion (abhängig vom betrachteten Standort). Der Mittelwert und das n^{th} Moment der Weibull Verteilung werden unter Verwendung der Gamma Funktion Γ angegeben als:

$$E[X] = a\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$$

$$m_n = a^n\Gamma\left(1 + \frac{n}{b}\right)$$

Die Parameter der Weibull Verteilung für den Standort Donauzentrum wurden aus den Daten der dort durchgeführten Windmessungen aus Fitfunktionen bestimmt. Damit kann eine Abschätzung der Energie- und Leistungsgewinne erfolgen. Die effektive Energiestromdichte (in W/m²) wird abgeschätzt als:

$$E_{effective} = \frac{1}{2}\rho m_3 = \frac{1}{2}\rho \left\{ a^3\Gamma\left(1 + \frac{3}{b}\right) \right\}$$

wobei a für die in den Simulationen konstante Dichte der Luft, und m₃ für das dritte Moment der Weibull Verteilung steht. Anhand dieses Ansatzes kann eine zwar grobe aber schnelle Abschätzung für den möglichen Energieertrag an einem ausgewählten Windturbinenstandort gemacht werden.

Es sei hier auch darauf hingewiesen, dass es sich bei anderen Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen wie der Exponentialverteilung oder der Rayleigh Verteilung, die auch zur Modellierung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit herangezogen werden können, um Spezialfälle der Weibull Verteilung handelt. Wird b=1 in der Weibull Dichte Funktion f(x) gesetzt, so ergibt sich die exponentielle Dichtefunktion. Die Rayleigh Verteilung ergibt sich für a=2 in der Weibull Verteilung.

Numerische Simulation der Windströmungsverhältnisse

Aus dem Datenmaterial langjähriger statistischer Winddaten (relative Häufigkeit von stündlicher Windrichtung und mittlerer Windgeschwindigkeit) der Windmessstation der ZAMG in Unterlaa wurden die zwei am Standort häufigsten Windrichtungen und fünf weitere Windrichtungen ausgewählt. Bei der Auswahl spielte die Positionierung und die Form des Donauzentrums eine Rolle. Ziel war es, die Strömungssituationen, die aufgrund von Winden an den Grenzen des Berechnungsgebietes, die grundsätzlich Windrichtungen von 0° bis 360° haben können, durch sieben Simulationen abzuschätzen. Für die ausgewählten Windrichtungen wurden die numerischen Windsimulationen durch Vorgabe von Winden ausgewählter Windgeschwindigkeit an den äußeren Grenzflächen des numerischen Berechnungsgebietes durchgeführt. Für die Berechnung der Strömung aus einer Windrichtung wird ein atmosphärisches Grenzschichtprofil für den Geschwindigkeitsverlauf am Rand des Berechnungsgebietes vorgegeben. In dem Geschwindigkeitsprofil wird in Referenzhöhe (Messhöhe der Winddaten) jene Windgeschwindigkeit (Stundenmittelwert) als Referenzwert verwendet, die in diesem Windrichtungssektor den Mittelwert der Windereignisse darstellt.

Der Wind wird bei dieser Art numerischer Strömungssimulationen als zeitlich konstant betrachtet. D.h. die Windvorgaben am Rand des Berechnungsgebietes sind unveränderlich und die sich im Berechnungsmodell einstellenden, lokalen Windverhältnisse im Stadtteil stellen einen zeitlichen Mittelwert unter den gemachten fixen Vorgaben dar. Ergebnis der Berechnungen ist für jede simulierte Windrichtung die quasistationäre Geschwindigkeitsverteilung im Berechnungsgebiet.

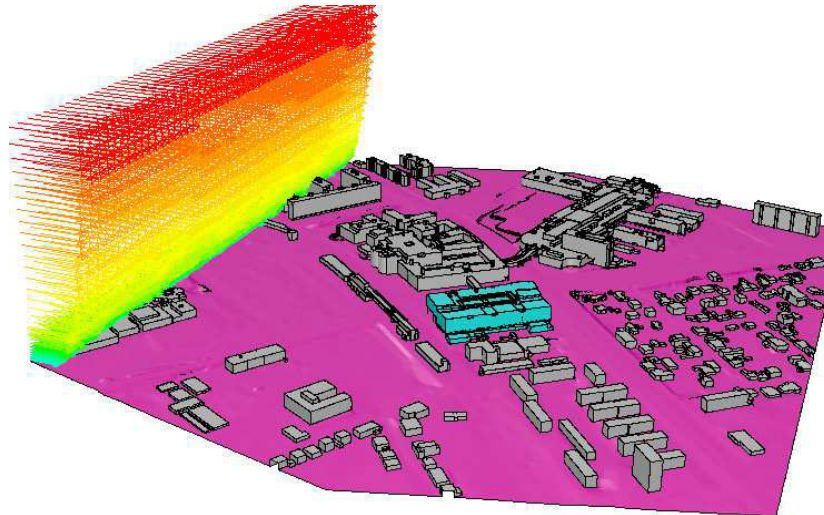


Abbildung 1: Virtuelles Geometriemodell des Stadtteils um das Donauzentrum mit dem angenommenen atmosphärischen Grenzschichtprofil für die Windgeschwindigkeitsverteilung am linken Rand des Berechnungsgebiets im Fall der Windrichtung Nord (0°).

Aufsicht auf die Verteilung des Windgeschwindigkeitsbetrages in der dem Dach des Donauzentrums nächsten Zellschicht des diskretisierten Luftraumes; für jeder der sieben berechneten Windrichtungen unter Berücksichtigung der jeweils unterschiedlichen Referenzwindgeschwindigkeit.

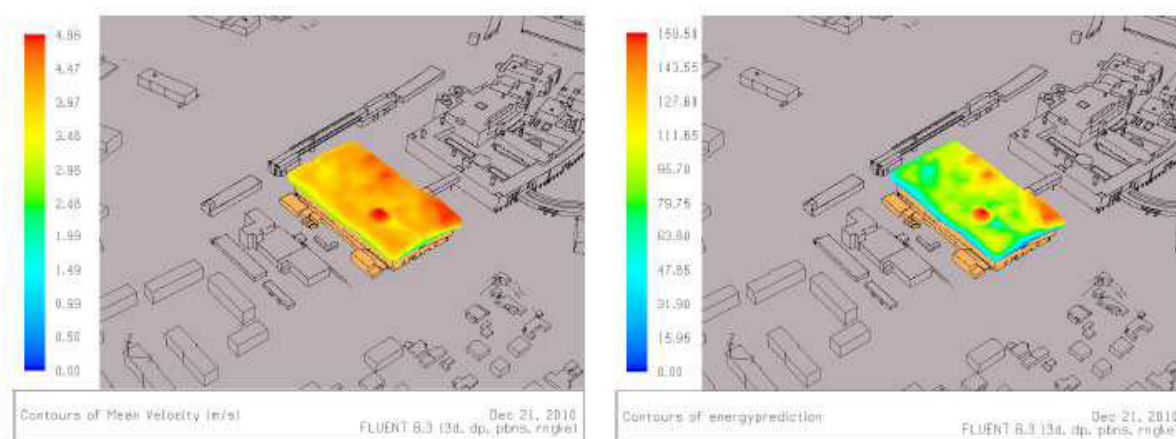
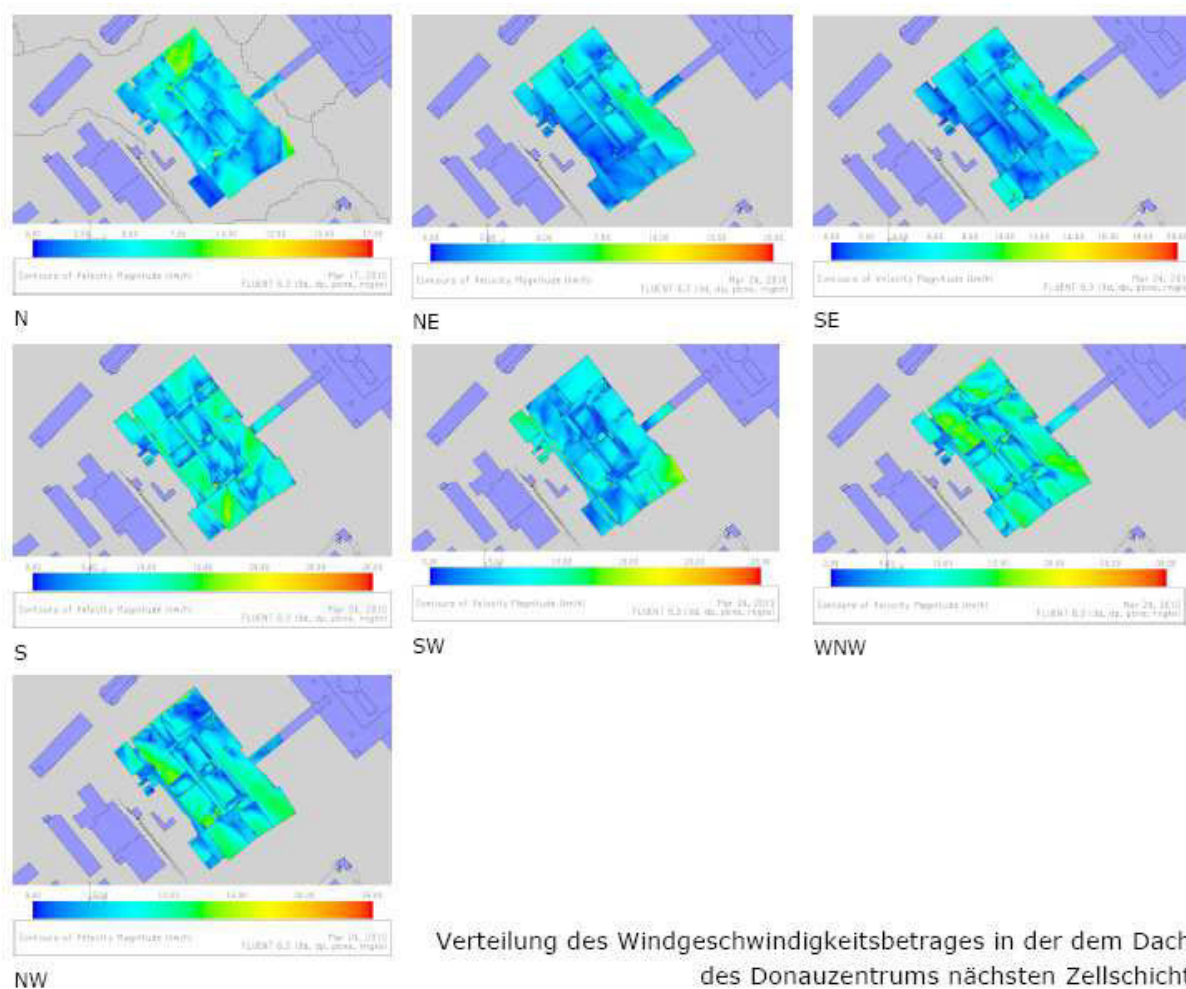


Abbildung 2: Isofläche in 6 m Abstand zur Gebäudeoberfläche gefärbt - links - mit dem Betrag der Windgeschwindigkeit in [m/s] und - rechts - mit dem Betrag der zugehörigen Energiestromdichte [W/m²], in beiden Fällen Jahresmittelwert über die simulierten Windrichtungen.

3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Auswirkung von Geometriev Variationen im vereinfachten Geometriemodell (Gebäudeabstand – Variante H10 und H20, und Gebäudehöhe – Variante V10 und V20)

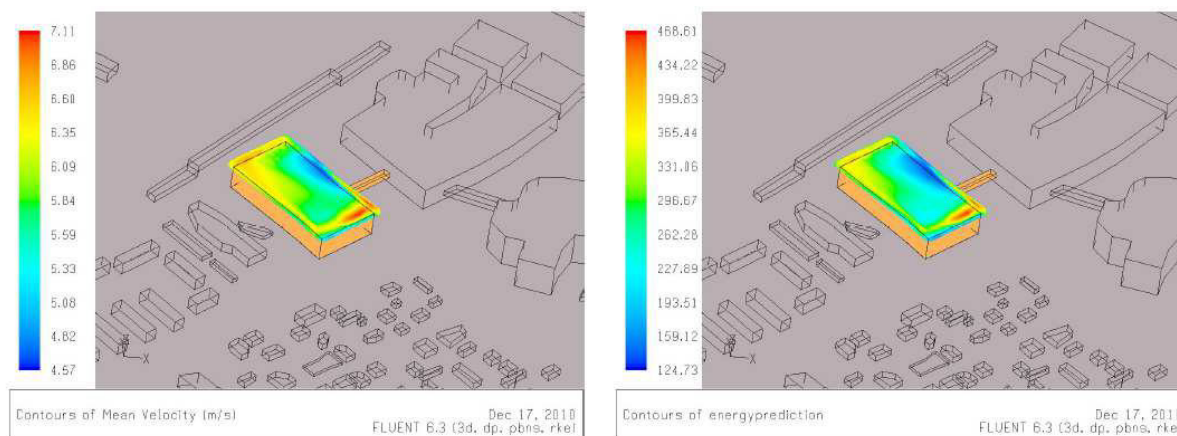


Abbildung 3: **Basisvariante vereinfachtes Geometriemodell:** Isofläche in 6 m Abstand zur Gebäudeoberfläche gefärbt - links - mit dem Betrag der Windgeschwindigkeit in [m/s] und - rechts - mit dem Betrag der zugehörigen Energiestromdichte [W/m²], in beiden Fällen Jahresmittelwert über die simulierten sieben Windrichtungen. (Man beachte die Farbskala.)

Erste Geometrievariante: die Schmalseite des vereinfachten Donauzentrums wurde um 10 m horizontal extrudiert. D. h. der Abstand zu den Nachbargebäuden wurde um 10 m verringert.

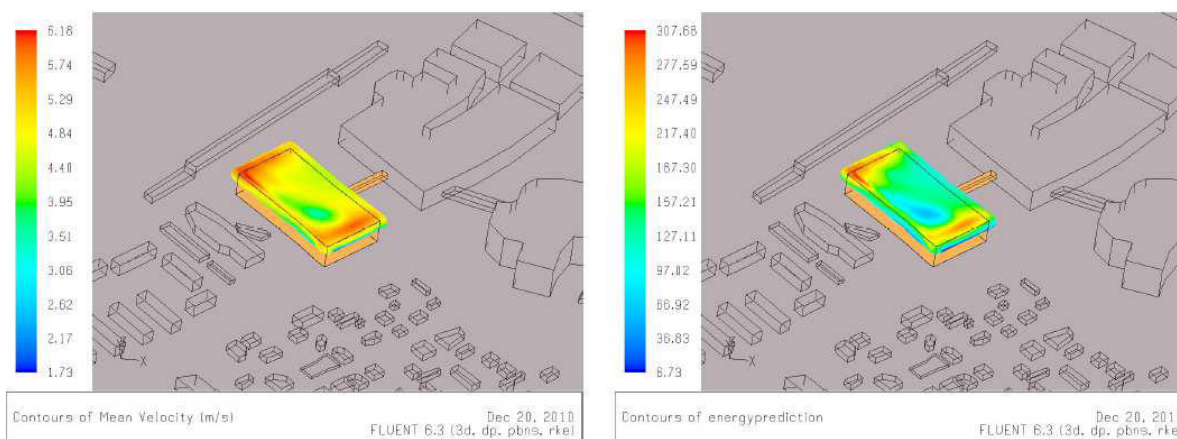


Abbildung 4: H10 - Isofläche in 6 m Abstand zur Gebäudeoberfläche gefärbt - links - mit dem Betrag der Windgeschwindigkeit in [m/s] und - rechts - mit dem Betrag der zugehörigen Energiestromdichte [W/m²], in beiden Fällen Jahresmittelwert über die simulierten sieben Windrichtungen.

Zweite Geometrievariante: die Schmalseite des vereinfachten Donauzentrums wurde um 20 m horizontal extrudiert. D. h. der Abstand zu den Nachbargebäuden wurde um 20 m verringert.

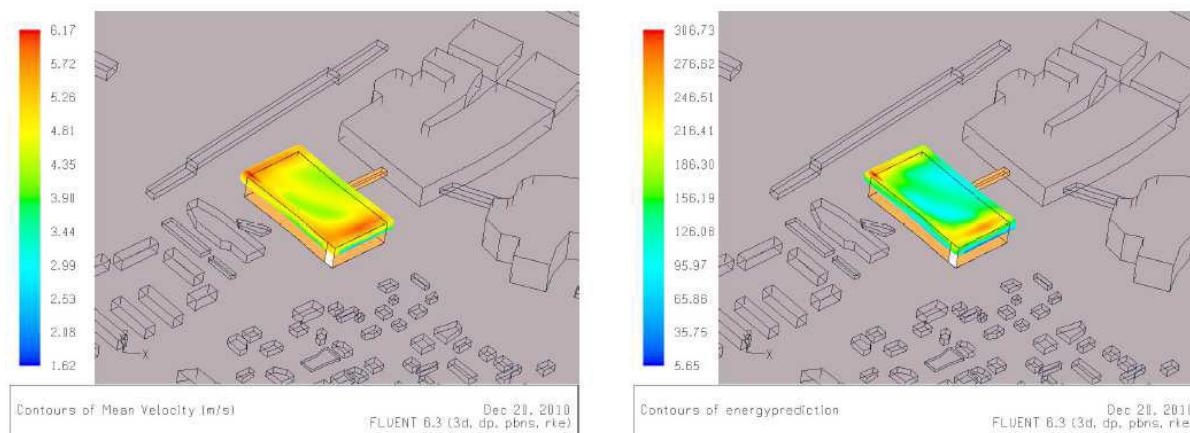


Abbildung 5: H20 - Isofläche in 6 m Abstand zur Gebäudeoberfläche gefärbt - links - mit dem Betrag der Windgeschwindigkeit in [m/s] und - rechts - mit dem Betrag der zugehörigen Energiestromdichte [W/m²], in beiden Fällen Jahresmittelwert über die simulierten sieben Windrichtungen.

Dritte Geometrievariante: ausgehend von der zweiten Geometrievariante wurde das Dach des vereinfachten Donauzentrums um 10 m vertikal extrudiert. D. h. die Gebäudehöhe relativ zu den Nachbargebäuden wurde um 10 m erhöht.

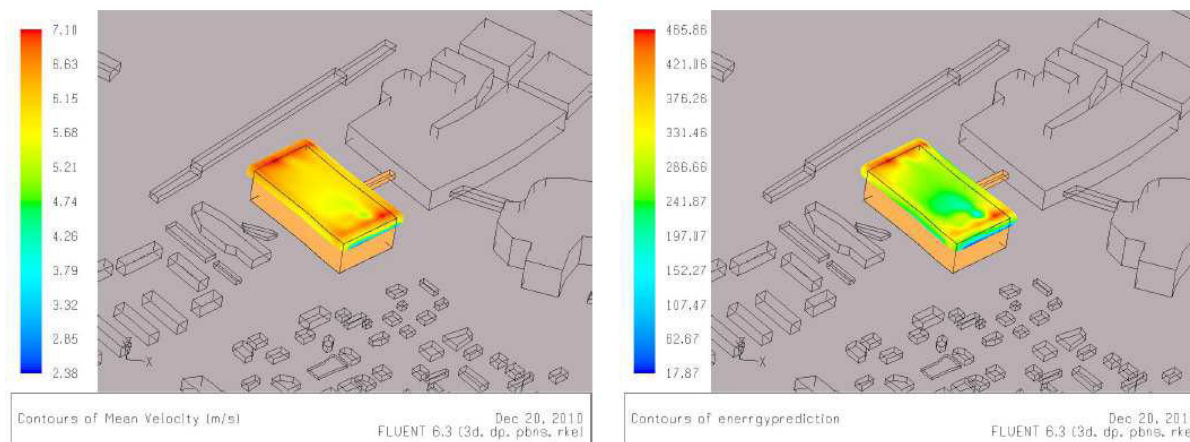


Abbildung 6: V10 - Isofläche in 6 m Abstand zur Gebäudeoberfläche gefärbt - links - mit dem Betrag der Windgeschwindigkeit in [m/s] und - rechts - mit dem Betrag der zugehörigen Energiestromdichte [W/m²], in beiden Fällen Jahresmittelwert über die simulierten sieben Windrichtungen.

Vierte Geometrievariante: ausgehend von der zweiten Geometrievariante wurde das Dach des vereinfachten Donauzentrums um 20 m vertikal extrudiert. D. h. die Gebäudehöhe relativ zu den Nachbargebäuden wurde um 20 m erhöht.

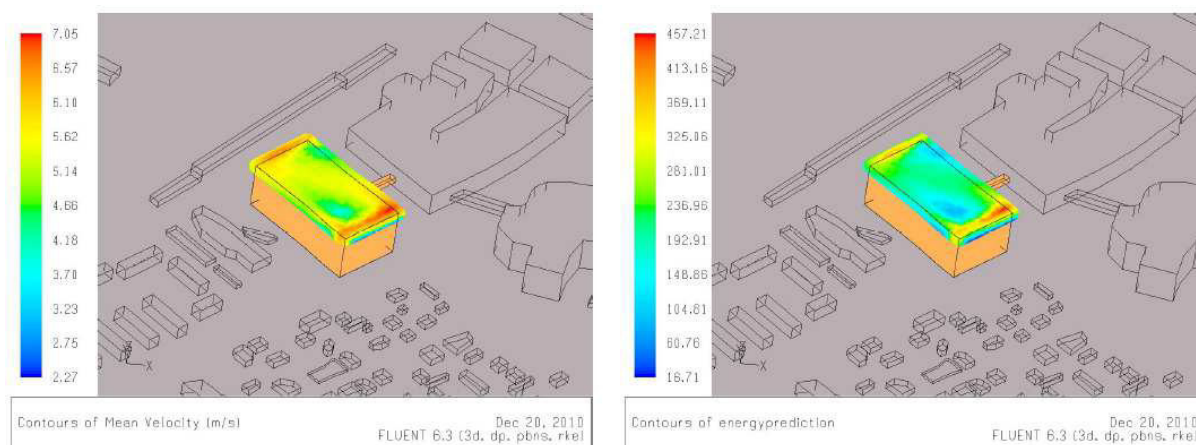


Abbildung 7: V20 - Isofläche in 6 m Abstand zur Gebäudeoberfläche gefärbt - links - mit dem Betrag der Windgeschwindigkeit in [m/s] und - rechts - mit dem Betrag der zugehörigen Energiestromdichte [W/m²], in beiden Fällen Jahresmittelwert über die simulierten sieben Windrichtungen.

4. Ausblick und Empfehlungen

Fasst man die Resultate der in diesem Projekt durchgeführten Arbeiten zusammen, so kann gesagt werden, dass dieses kleine Sondierungsprojekt erfolgreich abgeschlossen wurde. Alle Projektzeile wurden erreicht – wenigsten bis zu einem gewissen Ausmaß. Das wichtigste Ziel war die Anregung weiter führender Forschung zum Thema Kleinwindkraftanlagen (KWKA) im urbanen Kontext. Das Ausmaß der Erreichung dieses Ziels hängt von den zukünftigen Projekten und technologischen Entwicklungen ab. Ein erster Schritt in diese Richtung konnte bereits gemacht werden, da die Projektpartner die Förderung für ein weiteres Projekt in Zusammenhang mit KWKA in der städtischen Umgebung bekommen haben (FFG Projekt "STEP-A", Projektnummer 825371). Der Einsatz von KWKA im Stadtgebiet hat seinen Höhepunkt noch lange nicht erreicht, aber dieses kleine Sondierungsprojekt zeigte definitiv den Weg in diese Richtung.

Die Resultate der in diesem Projekt durchgeführten numerischen Strömungssimulationen verdeutlichen, dass die numerische Strömungssimulation (computational fluid dynamics – CFD) das beste ingenieurtechnische Werkzeug darstellt um all die Informationen bereitzustellen, die für das Verständnis der Probleme, die bei der genauen Positionierung von KWKA im städtischen Bereich auftreten können, nötig sind. Um ein städtisches Windströmungsfeld zu bestimmen ist aufgrund der großen Abmessungen eine ausreichende Datensammlungen durch Feldmessungen praktisch unmöglich. Bei Laborexperimenten besteht das Problem, dass die reale Windcharakteristik nur sehr schwer reproduziert werden kann. Hingegen liefert die Lösung der physikalischen Grundgleichungen für den Transport der Luft durch das Berechnungsgebiet unter Berücksichtigung der herrschenden Randbedingungen vollen Einblick in die dreidimensionale städtische Windströmungssituation und alle relevanten Strömungseffekte. Aber auch für CFD Simulationen ist die Wahl geeigneter Randbedingungen, d.h. speziell die Modellierung der Windverhältnisse am Rand des Berechnungsgebietes essentiell. Diese kann aus Feldmessungen abgeleitet werden. Die Kombination der Durchführung von Feldmessungen mit der Durchführung von numerischen Simulationen, in die die Messdaten als Randbedingungen eingehen, liefert die optimalen Ergebnisse. Es gibt viele Aspekte, die für den Einsatz von numerischer Strömungssimulation (CFD) bei der Ermittlung der optimalen Positionierung von KWKA im städtischen Bereich sprechen. Da gemäß obene Gleichung der Betrag der Windgeschwindigkeit mit der dritten Potenz in die Formel zur Abschätzung der Energiestromdichte eingeht, ist offensichtlich, dass die Genauigkeit der Vorhersage des Energieertrages entscheidend von der Genauigkeit der Vorhersage des Betrages der Windgeschwindigkeit über das Jahr abhängt. Egal ob Fehler in der Messdatenerfassung vor Ort oder in der numerischen Modellierung der Windströmungssituation entstehen, sie gehen mit der dritten Potenz in die Gleichung zur Prognose der Energiestromdichte ein. In obene Abbildung sind die typischen Strömungseffekte (Anströmung, Strömungsablösung, etc.) eines Geschwindigkeitsfeldes im städtischen Bereich dargestellt, die auch einer gegenseitigen Beeinflussung unterliegen. Daraus ergibt sich bei steigender Komplexität der städtischen Bebauung eine ansteigende Wechselwirkung der einzelnen Strömungsfelder um jedes Gebäude und ihre jeweiligen Strömungseffekte. Daher ist das resultierende Strömungsfeld im städtischen Bereich ohne 3D Simulation besonders schwer vorherzusagen. Daraus wird die Bedeutung einer das Strömungsfeld dreidimensional auflösenden numerischen Simulation ersichtlich, besonders unter dem Aspekt, dass die Strömungsgrößen im wandnahen Bereich (das ist genau der für die Positionierung von KWKA im städtischen Umfeld vorgesehene Bereich) am stärksten durch die geometrische Komplexität der Gebäude beeinflusst werden.

Die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse müssen unter unterschiedlichen Blickwinkeln beurteilt werden, da es bei den durchgeführten Berechnungen des städtischen

Strömungsfeldes eine Vielzahl an zu analysierenden Gesichtspunkten gibt. Im ersten Teil der in Arbeitspaket drei erstellten numerischen Simulationen wurde das Strömungsfeld für exakt die Geometrie berechnet, für die auch die realen Messungen stattgefunden haben. In diesem Fall gaben die implementierten Randbedingungen (abgeleitet aus Messdaten der ZAMG) die realen Bedingungen so gut als möglich wieder. Dennoch muss gesagt werden, dass auch die Feldmessungen vor Ort einem sehr großen Unsicherheitsfaktor unterliegen, da diese Messungen auf eine Vielzahl von äußeren Einflüssen anfällig sind. Der Unterschied zwischen den gemessenen Werten und den numerischen Ergebnissen muss unter diesem Gesichtspunkt gesehen werden. Der Unterschied von 20-30% zwischen gemessenen und simulierten mittleren Geschwindigkeitswerten dargestellt.

Die Vorgehensweise zur Erstellung des Jahresmittelwertes liefert das repräsentative mittlere Windgeschwindigkeitsfeld eines Jahres, das zur Analyse die möglichen Positionierungen einer KWKA herangezogen wird. Aus der Darstellung des Geschwindigkeitsbetrages in der Isofläche 6 Meter über dem Dach des Donauzentrums können die Orte hoher Energiestromdichte direkt identifiziert werden, da die lokale Energiestromdichte von der dritten Potenz des lokalen Geschwindigkeitsbetrages abhängt. Andererseits ist auch naheliegend, dass nicht grundsätzlich alle Orte hoher Energiestromdichte wirklich zur Aufstellung einer Kleinwindkraftanlage geeignet sind. Auf einem Kamin oder ähnlichen hervorragenden Gebäudeteilen muss eine Anbringung ausgeschlossen werden. Daher müssen Lokalisationen ohne Einwände zur Positionierung von KWKA gefunden werden. Genauere Information über den Einfluss geometrischer Details auf das lokale Umströmungsfeld und damit die vorausgesagte Energieproduktion ist in obiger Abbildung dargestellt. In dieser Abbildung zu Teil 2 von Arbeitspaket 3 ist der Unterschied in den Strömungsfeldern für die komplexe Originalgeometrie und für die vereinfachte Geometrie, bei der kleinere Erhabenheiten und Hindernisse vernachlässigt wurden, angegeben. Es zeigt sich, dass die dominanten Teile des Strömungsfeldes für beide Geometrien qualitativ ähnlich sind. Quantitativ unterscheiden sich lokal die beiden Fälle und es wurde bereits ausgeführt, dass genau diese lokale Information sehr wichtig ist zur optimalen Positionierung einer KWKA. Ähnlich sind die Schlüsse, die aus den Ergebnissen zu Teil drei von Arbeitspaket drei – den Variationen der vereinfachten Geometrie hinsichtlich Gebäudeabstand und Gebäudehöhe – geschlossen werden können. Hierbei handelt es sich um den interessantesten Teil der numerischen Untersuchungen. Die Ergebnisse, die in den Abbildungen oben dargestellt sind, zeigen die erwarteten Tendenzen. Vergleicht man die Ergebnisse für die vereinfachte Ausgangsgeometrie mit denen für die unterschiedlichen horizontalen Gebäudeabstände so kann man erkennen, dass sich das Windgeschwindigkeitsfeld für Geometrien gleicher Höhe aber unterschiedlichem horizontalem Abstand in der unmittelbaren Umgebung nicht signifikant ändert. Im Gegensatz dazu zeigt ein Vergleich von den Ergebnissen für die vereinfachte Ausgangsgeometrie mit denen für die unterschiedlichen vertikalen Gebäudehöhen des Donauzentrums, dass die zunehmende Gebäudehöhe den resultierenden Geschwindigkeitsbetrag (und damit die zugehörige Energiestromdichte) erhöht. Das Ausmaß des Anstieges ist allerdings geringer als ursprünglich erwartet. Grund für so ein Ergebnis ist die Wechselwirkung der komplexen Strömungseffekte, die Teil der sich ergebenden Strömungssituation sind. Diese wechselseitige Abhängigkeit der unterschiedlichen Einflussfaktoren macht eine Verallgemeinerung der erarbeiteten Ergebnisse schwierig. Daher ist für eine Richtlinie zur optimalen Positionierung von KWKA im städtischen Gebiet nur diese qualitative Beschreibung möglich.

5. Literaturverzeichnis

[1] B. Kubicek, M. Popovac, A. Frohner, M. Rudolph, R. Teppner (2010). "*Fluent als Plattform: z-f Turbulenzmodellierung und spectrales Path/Raytracing*"; ANSYS Conference & CADFEM Austria Users Meeting, Wien, Österreich.

[2] M. Popovac (2010). "*Conjugate Heat Transfer Simulations Using Zero Wall Boundary Condition Eddy Viscosity Turbulence Model With Elliptic Relaxation*"; 8th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements (ETMM8), Marseille, Frankreich.

[3] M. Popovac (2010). "*Robust Eddyviscosity Turbulence Modeling with Elliptic Relaxation for External Building Flow Analysis*"; SimBuild2010 - 4th National Conference of IBPSA-USA, New York, USA.

6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Virtuelles Geometriemodell des Stadtteils um das Donauzentrum mit dem angenommenen atmosphärischen Grenzschichtprofil für die Windgeschwindigkeitsverteilung am linken Rand des Berechnungsgebiets im Fall der Windrichtung Nord (0°).....	9
Abbildung 2: Isofläche in 6 m Abstand zur Gebäudeoberfläche gefärbt - links - mit dem Betrag der Windgeschwindigkeit in [m/s] und - rechts – mit dem Betrag der zugehörigen Energiestromdichte [W/m ²], in beiden Fällen Jahresmittelwert über die simulierten Windrichtungen.....	10
Abbildung 3: Basisvariante vereinfachtes Geometriemodell: Isofläche in 6 m Abstand zur Gebäudeoberfläche gefärbt - links - mit dem Betrag der Windgeschwindigkeit in [m/s] und - rechts – mit dem Betrag der zugehörigen Energiestromdichte [W/m ²], in beiden Fällen Jahresmittelwert über die simulierten sieben Windrichtungen. (Man beachte die Farbskala.)..	11
Abbildung 4: H10 - Isofläche in 6 m Abstand zur Gebäudeoberfläche gefärbt - links - mit dem Betrag der Windgeschwindigkeit in [m/s] und - rechts – mit dem Betrag der zugehörigen Energiestromdichte [W/m ²], in beiden Fällen Jahresmittelwert über die simulierten sieben Windrichtungen.....	11
Abbildung 5: H20 - Isofläche in 6 m Abstand zur Gebäudeoberfläche gefärbt - links - mit dem Betrag der Windgeschwindigkeit in [m/s] und - rechts – mit dem Betrag der zugehörigen Energiestromdichte [W/m ²], in beiden Fällen Jahresmittelwert über die simulierten sieben Windrichtungen.....	12
Abbildung 6: V10 - Isofläche in 6 m Abstand zur Gebäudeoberfläche gefärbt - links - mit dem Betrag der.....	12
Abbildung 7: V20 - Isofläche in 6 m Abstand zur Gebäudeoberfläche gefärbt - links - mit dem Betrag der Windgeschwindigkeit in [m/s] und - rechts – mit dem Betrag der zugehörigen Energiestromdichte [W/m ²], in beiden Fällen Jahresmittelwert über die simulierten sieben Windrichtungen.....	13

IMPRESSUM

Verfasser

AIT Austrian Institute of Technology

Mirza Popovac

Giefinggasse 2, 1210 Vienna

T: +43 (0) 50 550-6487

F: +43 (0) 50 550-6613

E-Mail: mirza.popovac@ait.ac.at

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds

Gumpendorfer Straße 5/22

1060 Wien

office@klimafonds.gv.at

www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH