Universität Flensburg
Energie- und Umweltmanagement
Sommersemester 2013

Laborbericht

Environmental Science

Eingereicht von:	Johannes Pelda
Matrikelnummer.:	541058
Betreuer:	Dr. H. van Radecke
Abgabetermin:	1. Juli 2013

Inhaltsverzeichnis

A Programm WindPRO 4

1 Einführung 4

1.1 Windkraftanlage ENERCON E-30 4

2 Energieprognose „E-30 Campus Flensburg“ 5

2.1 Ergebnis und Interpretation der Energieprognose „E-30 Campus Flensburg“ (ohne Campushalle) 6

2.2 Ergebnis und Interpretation der Energieprognose „E-30 Campus Flensburg“ (mit Campushalle) 7

2.3 Ergebnis und Interpretation der Energieprognose „E-30 Campus Flensburg“ (veränderte Windstatistik) 7

2.4 Ergebnis und Interpretation der Energieprognose „E-30 Campus Flensburg“ (veränderte Rauigkeiten) 8

2.5 Zusammenfassung der Energieprognose „E-30 Campus Flensburg“ 8

3 Wind Met Tower 8

4 Ergebnis und Interpretation „Wind Met Tower“ 9

5 Geräuschimmissionen 10

5.1 Ergebnis und Interpretation „Geräuschimmissionen“ 10

6 Schattenwurf 11

6.1 Ergebnis und Interpretation „Schattenwurf“ 11

7 Photomontage 12

B Programm WindFarmer 14

1 Einführung 14

2 Energieertrag und Windparkoptimierung 14

3 Geräuschimmissionen 17

4 Schattenwurf 18

5 Windparkvisualisierung und Wirkung 19

6 Literaturverzeichnis 21

7 Abbildungsverzeichnis 22

8 Tabellenverzeichnis 22

9 Anhang A 23

10 Anhang B 23

A Programm WindPRO

1 Einführung

Das Windkraftsimulationsprogramm WindPRO ist eine in der Windbranche weitverbreitete Software und wurde von der Firma Energi- og Miljødata (EMD) aus Aalborg in Dänemark entwickelt. Mit WindPRO lässt sich die Machbarkeit einer neu zu bauenden Windkraftanlage über Ertrags- bzw. Betriebsprognosen und somit deren Wirtschaftlichkeit bestimmen. Das Programm klärt Umweltverträglichkeitsfragen wie Schattenwurf und Lärmimmissionen. Außerdem lässt sich die geplante Windkraftanlage durch Animation in die reale Landschaft einbinden und somit ihr Auswirken auf das Landschaftsbild visualisieren. [1]

Im ersten Teil des Labors werden die Möglichkeiten von WindPRO praktisch durchgeführt und kennengelernt. Dafür wird die am Campus Flensburg stehende ENERCON E-30 als Versuchsanlage in der logisch aufgebauten Arbeitsanweisung benutzt.

1.1 Windkraftanlage ENERCON E-30

Die in WindPRO betrachtete Anlage ENERCON E-30 wurde im Jahr 1997 am Campus Flensburg errichtet. Im Jahr 2011 wurden erstmals Wartungsarbeiten, verbunden mit technischen Verbesserungen, durchgeführt. [2]

Die ENERCON E-30 ist eine Dreiblattrotor-Anlage mit aktiver Blattverstellung und drehzahlvariabler Betriebsweise mit direktgetriebenem Generator. Die Anlage ist ein Produkt des größten Herstellers für Windkraftanalgen in Deutschland, der Enercon GmbH mit Hauptsitz in Aurich, Ostfriesland. Die Windrichtung wird ständig durch eine eigene Messstation gemessen und der eingebaute Windnachführungsmechanismus stellt eine Auslegung gegen den Wind sicher. Über einen Pulswechselrichter erfolgt die Netzeinspeisung ins lokale 400 Volt Niederspannungsnetz. Laut Hersteller hat die Anlage eine Nennleistung von 200 KW. Die Nabenhöhe befindet sich auf einer Höhe von 50 Meter über dem Grund, der Rotordurchmesser ist mit 30 Metern angegeben. [3]

Die technischen Daten sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Allgemeines	
Typenbezeichnung	ENERCON 30
Nennleistung	200 KW
Rotordurchmesser	30m
Nabenhöhe	50m
Windgeschwindigkeit	
Einschaltwind	3 m/s
Nennwind	11 m/s
Abschaltwind (10 min.)	25 m/s

Rotor mit Blattverstellung	
Typ	Luvläufer mit aktiver Blattverstellung
Drehrichtung	Uhrzeigersinn
Blattanzahl	3
Rotorfläche	707 m^2
Blattmaterial	GFK/Epoxidharz
Nenndrehzahl	43 min-1
Betriebsbereich	14-45 min-1
Generator	
Nabe	Starr
Generator	ENERCON Ringgenerator
Bremssystem	Drei autarke Blattverstellsysteme
Windnachführung	Aktiv über Stellgetriebe 45°/min
Elektrischer Anschluss	
Netzspannung	400V
Netzfrequenz	50/60 Hz

Tabelle 1: Technische Daten: ENERCON E-30 am Campus Flensburg

2 Energieprognose „E-30 Campus Flensburg“

Im ersten Schritt der Laboranweisung wurde das Programm WindPRO registriert und die Lizenz hinterlegt. Eine bereits erstellte Datei mit voreingestellten Karten und Parameter sollte anschließend mit dem Programm hochgeladen werden. Nachdem die fünf verschiedenen geografischen Karten mit den „Gauß-Krüger-Koordinatensystem“ abgeglichen wurden, konnten diese als Grundlage für die Laboruntersuchung dienen.

Mit diesen Grundeinstellungen wurden folgende Schritte bearbeitet:

- Windturbinenstandort

  Die Anlage wurde an einem bereits festgelegten Standort in die Karten eingefügt.
- Analgentyp

  Der Windturbinenanlage musste der entsprechende Typ ENERCON E-30-2.30 200 30.0 !0! aus dem WindPRO Katalog zugeordnet und die weitere Parameter, wie zum Beispiel die Nabenhöhe von 50m, laut Arbeitsanweisung eingestellt werden.
- Rauigkeitslängen

  Die Rauigkeit hat einen großen Einfluss auf die Windgeschwindigkeit und somit auf den Ertrag einer Anlage. Während z.B. Wälder den Wind bremsen, bewegt sich der Wind auf Wasseroberflächen weitgehendst ungebremst. In der Aufgabe musste ein Wechsel der Rauigkeitslänge vor der Stadt Tastrup von der Größe 1,6 auf 2,5 erhöht und entsprechend nach der Stadt von 2,5 auf 2,0 verringert werden. Innerhalb der Windrichtungssektoren können dementsprechend viele Rauigkeitslängen definiert werden.
- Windstatistik

Für die Ertragsberechnung der Anlage liegen die Daten von den Meteorologie-Stationen „List Sylt“ und „DK Skrydstrup“ in Dänemark vor. Aufgrund der geografischen Nähe wurde dem Standort Dänemark eine prozentuale Gewichtung von 58 und dem Standort Sylt von 42 zugeordnet.

- Orthographie/Geländekonturen
  Neben der Rauigkeitslänge des Geländes spielt vor allem auch die Orthographie eine gewichtete Rolle. Um eine detaillierte Windertragsberechnung durführen zu können, müssen die Geländekonturen mit den entsprechenden Höhenlinien in die Karten eingezeichnet werden.
- Gebäude
  Auch Hindernisse wie Gebäude mindern den Windertrag einer Windkraftanlage. Beim Einsetzen der Gebäude ist darauf zu achten, dass nur die Silhouette des Gebäudes abgebildet wird (aus Sicht der Anlage). Hintereinander aufgereihte Gebäude können nicht berechnet werden. Die Änderung der Gebäudekarte ist im Anhang unter „Gebäude_vor“ und „Gebäude_nach“ nachzuvollziehen.
- Energieprognose
  Die Ertragsberechnung wird nach dem Einrichten diverser Einstellungen in WindPRO durchgeführt. Folgende Reports werden dabei automatisch generiert:
    - Analyse der Windverhältnisse
    - Hauptergebnis
    - Karte
    - Leistungskennlinien-Analyse
    - Produktionsanalyse
    - Terrain
    - Windprofil

Die wichtigsten Ergebnisse können im Report „Hauptergebnisse“ ermittelt werden. Dabei sind die „Jährliche Energie Produktion“, die „Jährliche Energie Produktion abzüglich 10%“ [4] sowie der „Kapazitätsfaktor“ [5] von hauptsächlicher Bedeutung.

Mit den oben genannten Einstellungen sollte die Auswirkung der Campushalle auf den Energieertrag der am Campus stehenden Windkraftanlage ermittelt werden. Hierfür wurde der Energieertrag ohne Campushalle errechnet und der Energieertrag mit Campushalle berechnet.

2.1 Ergebnis und Interpretation der Energieprognose „E-30 Campus Flensburg“ (ohne Campushalle)

In Tabelle 2 ist der Energieertrag ohne Hindernis der Campushalle der Windkraftanlage Enercon E-30/2.30 aufgelistet. Die Daten wurden dem Report des Programmes WindPRO entnommen.

Detaillierte Daten sind im Anhang unter „E-30 Campus Flensburg ohne Campushalle (Mainresults, Productionanalysis)“ zu finden.

Typ	Leistung
Windenergie	2 489 kWh/m²a
Mittlere Windgeschwindigkeit	6,3 m/s
Äquivalente Rauigkeit	2,4
Energieertrag der Windkraftanlage	525,2 MWh/a
Kapazitätsfaktor	30 %

Tabelle 2: Energieprognose "E-30 Campus Flensburg" ohne Campushalle

2.2 Ergebnis und Interpretation der Energieprognose „E-30 Campus Flensburg“ (mit Campushalle)

In Tabelle 3 ist der Energieertrag mit Hindernis der Campushalle (Baujahr im Ende der 90iger Jahre) der Windkraftanlage Enercon E-30/2.30 aufgelistet. Die Daten wurden dem Report des Programmes WindPRO entnommen. Weitere Daten sind im Anhang unter „E-30 Campus Flensburg mit Campushalle“ zu finden.

Typ	Leistung
Windenergie	2 479 kWh/m²a
Mittlere Windgeschwindigkeit	6,2 m/s
Äquivalente Rauigkeit	2,4
Energieertrag der Windkraftanlage	522,9 MWh/a
Kapazitätsfaktor	29,8 %

Tabelle 3: Energieprognose "E-30 Campus Flensburg" mit Campushalle

Die Campushalle nimmt geringen Einfluss auf die Energiebilanz der Windkraftanlage. Die Windenergie nimmt um 10 kWh/m² pro Jahr ab. Somit fällt der Energieertrag der Windkraftanlage um 2,3 MWh/a. Dies bedeutet eine Energieeinbuße von 0,44 Prozent.

2.3 Ergebnis und Interpretation der Energieprognose „E-30 Campus Flensburg“ (veränderte Windstatistik)

Tabelle 4 zeigt die Leistung des Standortes Campus Flensburg bei veränderter Windstatistik. Dabei ist die Wetterstation DE List-Sylt mit 10% (vorher 42%) gewichtet und die Wetterstation DK Skrydstrup mit 90% (vorher 58%) gewichtet. Die Berechnung bezieht die Campushalle mit ein. Somit ergeben sich folgende Werte:

Typ	Leistung
Windenergie	2 571 kWh/m²a
Mittlere Windgeschwindigkeit	6,2 m/s
Äquivalente Rauigkeit	2,4
Energieertrag der Windkraftanlage	523,0 MWh/a
Kapazitätsfaktor	29,8 %

Tabelle 4: Energieprognose "E-30 Campus Flensburg" mit veränderter Windstatistik

Tabelle 4 ist zu entnehmen, dass der Windenergieertrag um 82 kWh/m²a zunimmt. Der Energieertrag der Windturbine fällt jedoch um 2,2 MWh/a geringer aus. Unterschiede in der Dauer von

Windgeschwindigkeiten, die für die Windkraftanlage in Grenzarbeitsbereichen liegen, können hierfür Ursachen sein. Allgemein ist jedoch kein erheblicher Unterschied der Jahresleistung festzustellen. Die Nähe der beiden Wetterstationen bedeutet fast identische Wetterdaten. Demzufolge kann, aus meteorologischer Sicht, Sylt nicht als Insel betrachtet werden. Weitere Werte sind im Anhang unter „E-30 Campus Flensburg veränderte Windstatistik (Mainresults)“ zu finden.

2.4 Ergebnis und Interpretation der Energieprognose „E-30 Campus Flensburg“ (veränderte Rauigkeiten)

Um den Einfluss der Rauigkeit der Umgebung auf den Ertrag der Windkraftanlage festzustellen, wurden eine Kalkulation mit einer allgemeinen Rauigkeit von 1,5 und eine weitere Kalkulation mit einer Rauigkeit von 2,2 durchgeführt. Diese Rauigkeiten wurde für alle Sektoren der Umgebung der Windkraftanlage gleichermaßen verwendet. Die wesentlichen Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt.

Typ	**Leistung bei 1,5 Rauigkeit**	**Leistung bei Ursprungs-Rauigkeit**	**Leistung bei 2,2 Rauigkeit**
Windenergie	2 546 kWh/m²a	2 479 kWh/m²a	2 495 kWh/m²
Mittlere Windgeschwindigkeit	6,3 m/s	6,2 m/s	6,3 m/s
Äquivalente Rauigkeit	2,3	2,4	2,4
Energieertrag der Windkraftanlage	532,6 MWh/a	522,9 MWh/a	526,0 MWh/a
Kapazitätsfaktor	30,4 %	29,8 %	30,0 %

Tabelle 5: Energieprognose bei veränderter Rauigkeit

Wie vermutet steigt die Windenergie bei geringerer Rauigkeiten und sie fällt bei höheren Rauigkeitswerten. So Steigt der Energieertrag der Windkraftanlage um 2 Prozent bei einer Rauigkeit von 1,5. Der Energieertrag ist auch bei einer Rauigkeit von 2,2 höher. Dies liegt an der höheren mittleren Geschwindigkeit und lässt darauf schließen, dass die Ursprungs-Rauigkeit im Allgemeinen einen höheren Wert hat als 2,2. Details sind im Anhang unter „Production Analysis_roughness 1,5, „Production Analysis_roughness original“ und „Production Analysis_roughness 2,2“ zu finden.

2.5 Zusammenfassung der Energieprognose „E-30 Campus Flensburg“

Aus den vorangegangenen Untersuchungen geht hervor, dass es bei einer Energieprognose für den Standort einer Windkraftanlage vor allem auf die richtige Einbettung der Umgebungswerte ankommt. Bestehende oder geplante Gebäude, die Windstatistik und die Rauigkeit spielen eine wesentliche Rolle. Ihr Einfluss auf den Standpunkt der Windkraftanlage kann sehr exakt bestimmt werden. Deshalb ist es notwendig bei der Bedienung des Programmes genau vorzugehen und exakte, der Realität entsprechende Werte einzugeben.

3 Wind Met Tower

Der Windkraftanlage „E-30 am Campus Flensburg“ eigene Windmast liefert Winddaten direkt am

Standort (STATGEN). Die folgende Aufgabe befasste sich mit dem importieren und interpretieren der vor Ort erfassten Windmessdaten. Die Messdaten liegen für die Messhöhen 35 und 50 Meter über dem Grund vor. Das Importieren der Daten erfolgte nach genauer Arbeitsanweisung. Dabei mussten das Meteo-Objekt (der Windmasten) erstellt und die in Excel-Form vorliegenden Daten importiert werden. In einem nächsten Schritt wurde das Meteo-Objekt dem Anlangenstandort auf der Karte zugeordnet. In der Aufgabe „Wind Met Tower“ sind lediglich die Reports Hautergebnis und Produktionsanalyse von signifikanter Bedeutung.

4 Ergebnis und Interpretation „Wind Met Tower“

Im Folgenden sind die Hauptergebnisse sowie die Energieerträge der einzelnen Sektoren für die Windstatistik Wind Met Tower 50 m Höhe aufgeführt. Als Vergleich wurde die Energieprognose „E-30 Campus Flensburg“ mit Campushalle herangezogen.

Typ	Wind Met Tower (50m)	E-30 Campus Flensburg
Windenergie	2 272 kWh/m²a	2 479 kWh/m²a
Mittlere Windgeschwindigkeit	6,1 m/s	6,2 m/s
Äquivalente Rauigkeit	2,4	2,4
Energieertrag der Windkraftanlage	487,4 MWh/a	522,9 MWh/a
Kapazitätsfaktor	27,8 %	29,8 %

Tabelle 6: Main Results Wind Met Tower und E-30 Campus Flensburg

Typ	Sektor in MWh/a												
	0 N	1 NNE	2 ENE	3 E	4 ESE	5 SSE	6 S	7 SSW	8 WSW	9 W	10 WNW	11 NNW	Total
Wind Met Tower (50m)	4,1	18,0	64,3	10,5	18,4	58,7	109,1	87,5	77,4	26,8	7,6	5,0	487,4
E-30 Campus Flensburg	14,9	12,9	29,9	51,2	65,0	17,3	24,7	50,3	80,4	89,0	56,9	30,5	522,9

Tabelle 7: Energieertrag Wind Met Tower und E-30 Campus Flensburg nach Sektoren

Der Energieertrag sinkt bei Heranziehen der Windprognose Wind Met Tower um 7 Prozent. Die Auswertung der Tabelle 7 zeigt einen höheren Energieertrag in S und SSW Richtung. Hingegen nimmt der Energieertrag in E und ESE ab. Allgemein zeigen die Ergebnisse welchen Einfluss die Windprognose auf den Energieertrag nimmt. Es ist notwendig die Windprognose so exakt wie möglich zu eruieren um eine bestmögliche Auslegung der Windkraftanlage zu bewerkstelligen.
Die Messdaten von STATGEN sind im Anhang unter „STATGEN – Overview“ einzusehen. Weitere Daten wie jährlicher Energieertrag und die Produktionsanalyse finden sich im Anhang unter „METEO – Main Results“ und „METEO – Production Analysis“.

5 Geräuschimmissionen

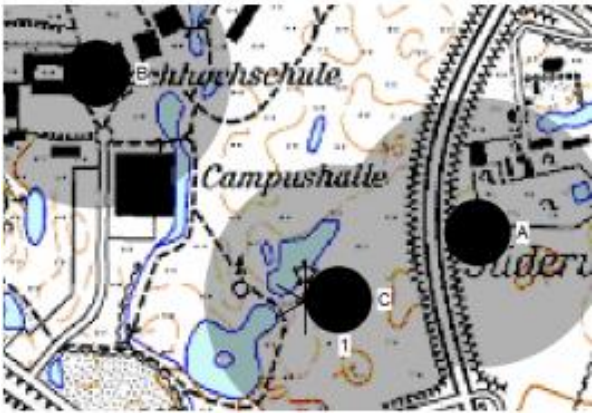
Für die Bewilligung von Windkraftprojekten spielen Geräuschimmissionen auf benachbarte Gebiete eine immense Rolle. Eine Windkraftanlage emittiert aus folgenden Gründen Lärm:

- Aerodynamische Geräusche entstehen durch Luftströmungen an den Rotorblättern
- Laufgeräusche entstehen innerhalb des Getriebes (sofern vorhanden) und des Generators.

Art der zu schützenden Nutzung	Tag 6 Uhr bis 22 Uhr	Nacht 22 Uhr bis 6 Uhr
Kurgebiete, Krankenhäuser und Pflegeanstalten	45 dB(A)	35 dB(A)
reine Wohngebiete	50 dB(A)	35 dB(A)
allgemeine Wohngebiete und Kleinsiedlungsgebiete	55 dB(A)	40 dB(A)
Kerngebiete, Dorfgebiete und Mischgebiete	60 dB(A)	45 dB(A)
Gewerbegebiete	65 dB(A)	50 dB(A)
Industriegebiete	70 dB(A)	70 dB(A)

Tabelle 8: TA-Lärm nach Bundesemissionsschutzgesetz [6]

In WindPRO sind zu allererst die Orte zu markieren, an denen eine Schallimmissionsmessung vorgenommen werden soll. In diesem Aufgabenteil wurden drei relevante Standorte und ein Immissionsstandort als Referenzpunkt eingestellt. Diese zeigt Abbildung 1.



1. Standort A: Bebauungsgrenze Süderup (273 m Entfernung zur WEA)
2. Standort B: D-Gebäude der Fachhochschule (448 m Entfernung zur WEA)
3. Standort C: 50 Meter westlich der WEA

Abbildung 1: Standorte der drei Immissionsmessungen

Als maximal zulässiger Immissionswert wurden 45 dB(A) für alle drei Standorte vor der Berechnung festgelegt.

5.1 Ergebnis und Interpretation „Geräuschimmissionen“

Eine Übersicht der Immissionen an den drei Standorten kann Tabelle 9 entnommen werden.

Standort	Entfernung WEA in Metern	Wert in dB(A)	OK?
A	273	42 dB(A)	√
B	448	35,8 dB(A)	√
C	50	55,6 dB(A)	×

Tabelle 9: Geräuschimmissionen am Standort A,B und C

Standort Süderup und Fachhochschule überschreiten nicht den Immissionswert von 45 dB(A) und sind somit nicht weiter zu beachten. Standort C jedoch überschreitet den Grenzwert um 11,6 dB(A).

Da die Lautstärkeskala logarithmisch aufgebaut ist, entspricht dies einem erheblichen Lärmanstieg an Standort C.

Details zur Lärmimmission können dem Anhang „DECIBEL – Main Results“ entnommen werden.

6 Schattenwurf

Neben den Geräuschimmissionen nehmen auch der Schattenwurf und die daraus resultierenden Lichtimmissionen Einfluss auf die Umwelt. Laut Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) darf der Immissionsrichtwert für die maximal mögliche Beschattungsdauer von 30 Stunden pro Kalenderjahr nicht überschritten werden. Der Immissionsrichtwert für die tägliche Beschattungsdauer beträgt 30 Minuten. [7] Wie beim Lärm kann mit dem Programm WindPRO der Schattenwurf für ausgesuchte Standorte untersucht werden. In unserer Aufgabe wurde der sogenannte Schattenwurfrezeptor (direkter Untersuchungsstandort) an der Ostseite des D-Gebäudes der Fachhochschule platziert.

6.1 Ergebnis und Interpretation „Schattenwurf“

Im Jahr treten drei Monate auf, in denen die Windkraftanlage Schatten auf den Untersuchungsstandort am D-Gebäude wirft. Tabelle 10 zeigt die Monate Januar, November und Dezember, in denen Schattenwurf am Untersuchungsstandort auftreten.

Monat	Schattenwurf in Minuten	Maximale Schattenwurfdauer in Minuten
Januar	260	16
November	186	16
Dezember	74	14
Gesamt	**8 Std. 40 Minuten**	

Tabelle 10: Schattenwurf in relevanten Monaten

Die maximale Schattenwurfdauer pro Tag übersteigt 16 Minuten nicht und somit auch nicht die Vorgaben des BImSchG. Die Gesamtdauer des Schattenwurfes pro Jahr beträgt 8 Stunden und 40 Minuten bzw. maximal 4 Stunden und 20 Minuten im Januar. Auch dies ist für die Zulassung der Windkraftanlage unproblematisch. Die Karte der Verschattung, erstellt von WindPRO, zeigt deutlich, dass an keinem anderen Ort, der unter die BImSchG fällt, der Grenzwert des Schattenwurfes überschritten wird. Die Karte ist in Abbildung 2 zu sehen.

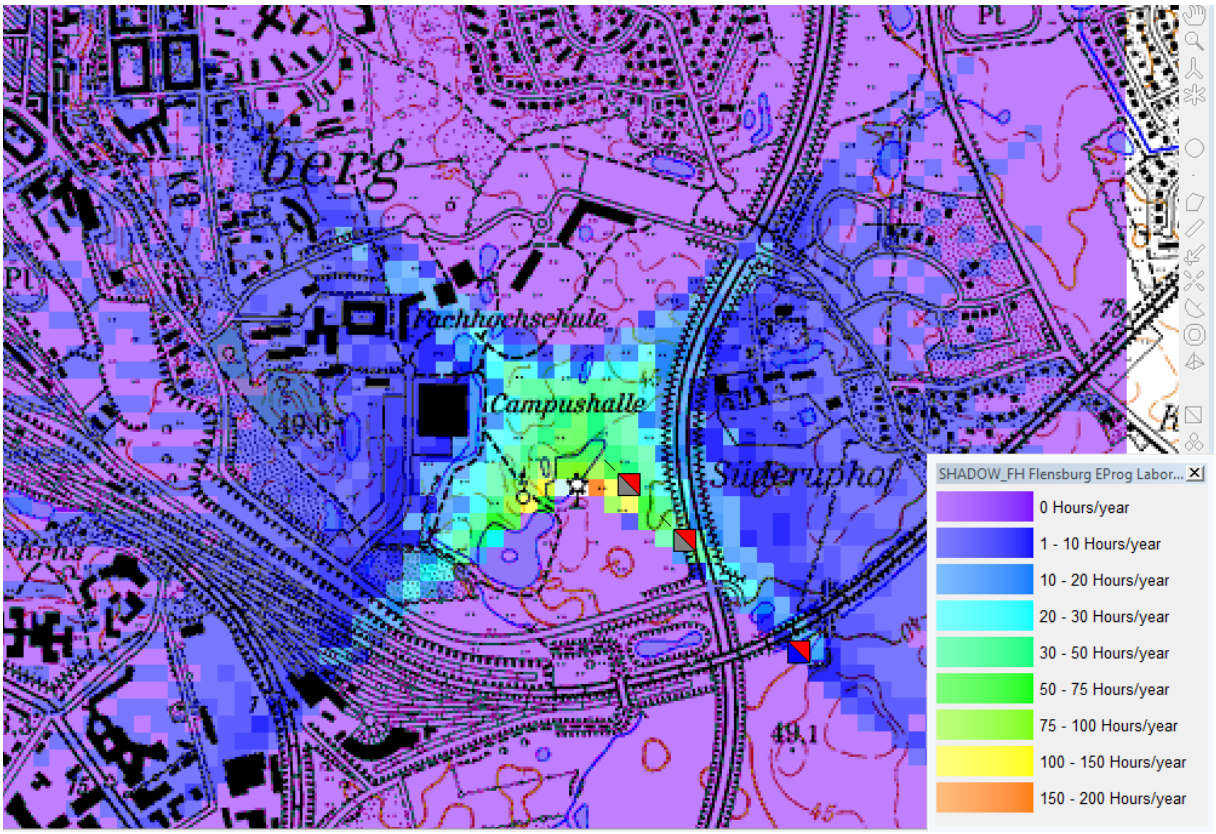


Abbildung 2: Shadowing Map

Weitere Ergebnisse können im Anhang unter „Shadowing Main Results“ eingesehen werden.

7 Photomontage

WindPRO ist neben der Berechnung relevanter Daten und Parameter auch ein nützliches Tool um eine geplante Windkraftanlage grafisch zu modellieren und phototechnisch in die Landschaft einzufügen. Die Visualisierung stellt alle Einflüsse der Windkraftanlage auf die Umwelt dar und hilft bei der Planung. Darüber hinaus hilft sie bei Bürgerbegehren auftretende Ängste der Anwohner zu zerstreuen.

Im Laborversuch sollte eine neue Windkraftanlage des Typs Vestas V90 mit einer Nabenhöhe von 80 Metern hinter der Campushalle visualisiert werden. Der Blick des Betrachters geht dabei vom D-Gebäude Richtung der bestehenden Windkraftanlage Enercon. Folgende Schritte wurden nach Laboranweisung durchgeführt:

- Ein vom Dach des D Gebäudes der FH erstelltes Photo wurde in das Programm importiert. Der Photografie wurden dann die Gauß-Krüger Koordinaten (X, Y und Z) der Kameraposition sowie diverse Wettereinstellungen zugeordnet.
- Im nächsten Schritt wurde die neue Windkraftanlage am bestimmten Standort südwestlich der Enercon in das Photo eingefügt.
- Unter dem Punkt „Rendering and Erasing“ wurden die Feinjustierung der Anlage

vorgenommen sowie von der Campushalle verdeckte Stellen der neuen Windkraftanlage manipuliert.

- Abschließend konnte man die Photomontage animieren und die Rotorblätter rotieren lassen.

Abbildung 3 zeigt die fertige Photomontage. Weitere Ergebnisse können im Anhang „Photomontage (Main Results), Photomontage (Map), Photomontage (Fullpagephoto)“ eingesehen werden. Die Animation der Windturbinen kann im Anhang unter „Animation“ betrachtet werden

Abbildung 3: Photomontage der Vestas V80-2.0MW

B Programm WindFarmer

1 Einführung

Der zweite Teil des Laborprojekts befasste sich mit dem Windkraftsimulationsprogramm WindFarmer. Das Programm wurde von der britischen Gesellschaft Garrad Hassan and Partners LTD entwickelt. Gutachter, Planer, Betreiber und Hersteller aber auch Behörden setzen dieses Programm ein. Neben dem Energieertrag können auch Schallkarten, Schattenwurfkarten, Photomontage und weitere Parameter ermittelt werden. Das Programm kann außerdem die beste Verteilung der zu bauenden Windkraftanlagen auf einem festgelegten Gebiet kalkulieren. Dabei wird der Feldwirkungsgrad herangezogen. Er beschreibt das Verhältnis des Energieertrages des gesamten Windparks zur Summe der Erträge ungestörter Anlagen derselben Anzahl. [8] Die Effizienz der Aufstellung spiegelt sich im Feldwirkungsgrad wieder. Somit lässt sich der Energieertrag optimieren. Auch hier war das Ziel den Teilnehmer in das Programm WindFarmer einzuführen und das Programm näher zu bringen. Anhand einer praktisch ausgerichteten Laboranweisung sollte ein virtueller Windpark in Schottland mit anfänglich sechs Windkraftanlagen bearbeitet werden. Dabei standen folgende Aufgaben im Vordergrund:

- Energieertrag und Energieertragsoptimierung
- Geräuschimmissionen
- Schattenwurf
- Visualisierung

In folgenden Kapiteln werden Vorgehensweise und Ergebnisse beschrieben.

2 Energieertrag und Windparkoptimierung

Die im Programm geladene Arbeitsmappe „Demosite.wow“ zeigt den Windpark unter den örtlichen Bedingungen. Abbildung 4 zeigt sechs Windturbinen als grüne Kreise und die Windenergie im Gebiet des zu planenden Windparks. Blau bedeutet niedrige Windenergie, rot hingegen eine sehr hohe Windenergie.

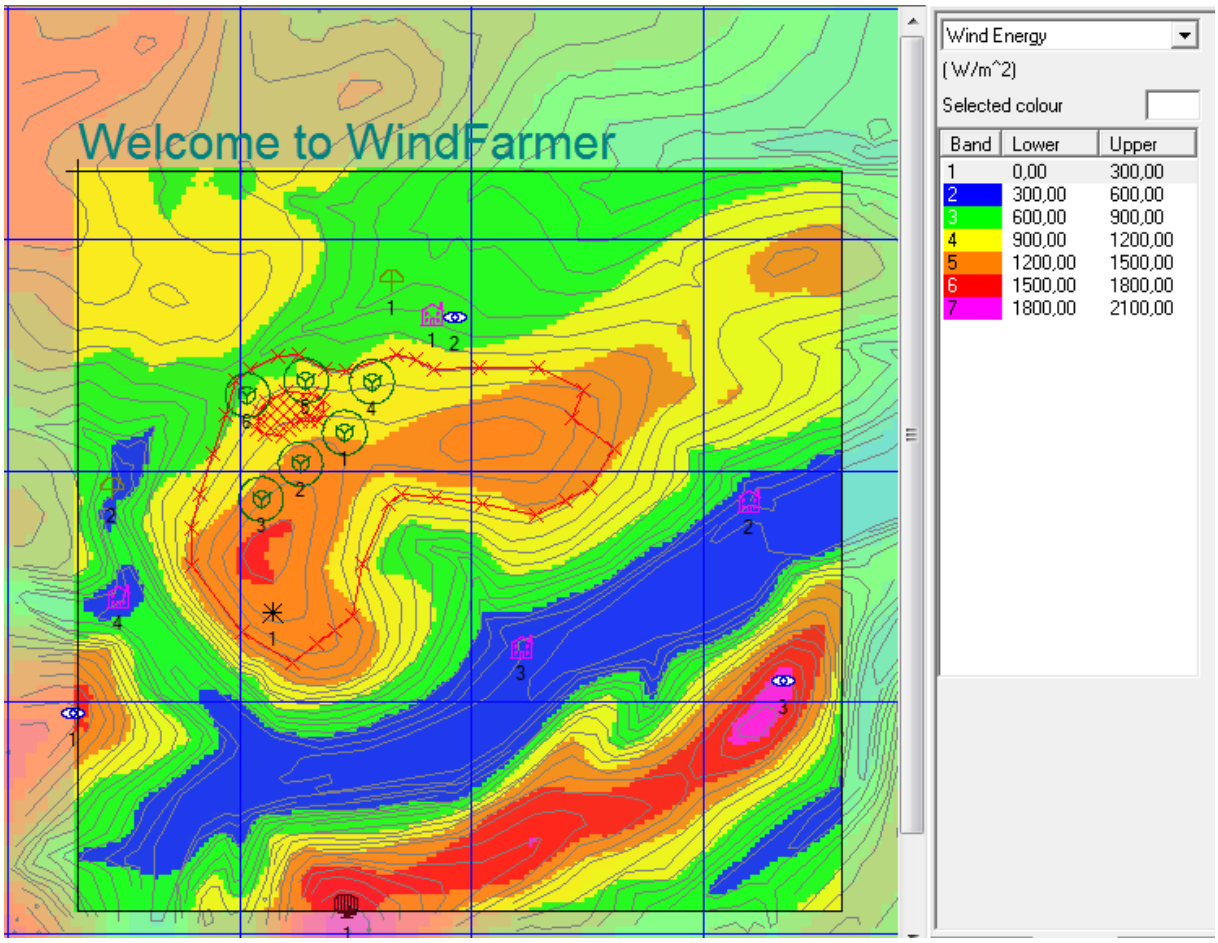


Abbildung 4: Arbeitsmappe "Demosite.wow"

Als erstes errechnete das Programm den Energieertrag und Feldwirkungsgrad.

- Energieertrag: 18,6 GWh/a
- Feldwirkungsgrad: 96,70 %

Anschließend sollte manuell, durch Versetzen der sechs Windkraftanlagen innerhalb des rot umrandeten Gebietes, der Energieertrag gesteigert und der Feldwirkungsgrad optimiert werden. Außerdem wurde die Anzahl der Windkraftanlagen auf zehn angehoben. Der Energieertrag und Feldwirkungsgrad betrug nun:

- Energieertrag: 33 GWh/a
- Feldwirkungsgrad: 97,63 %

Abbildung 5 zeigt die Standorte der manuell versetzten Windkraftanlagen.

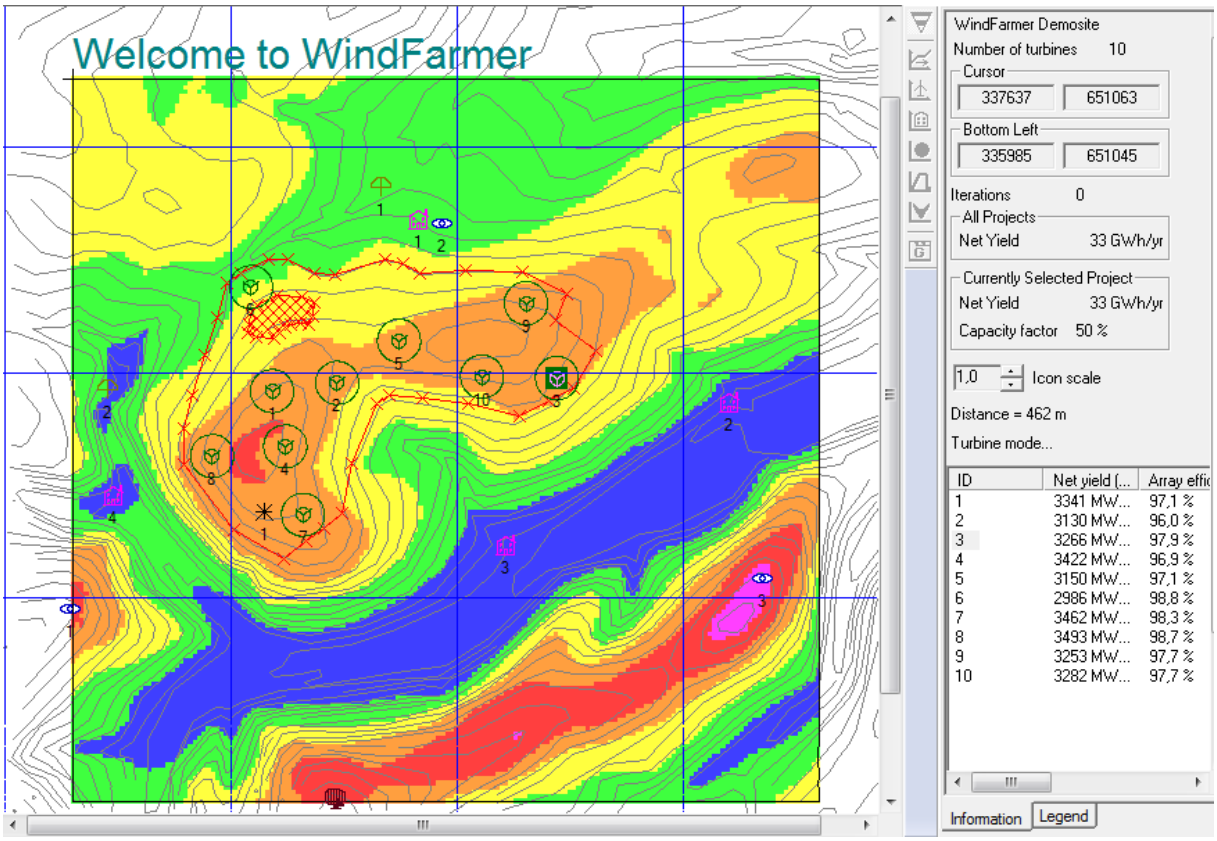


Abbildung 5: Arbeitsmappe "Demosite.wow" mit zehn Windkraftanlagen

Wie auf Seite 14 unter Einführung beschrieben verfügt WindFarmer über einen Algorithmus, der die Aufstellung der Windkraftanlagen automatisch optimiert. Jede Berechnung bedeutet eine verschiedenartige Aufstellung der Windturbinen. Pro Optimierungszyklus wurden 200 Berechnungen durchlaufen, da ab dieser Berechnungsanzahl, wie Abbildung 6 zeigt, keine weiteren, wesentlichen Änderungen im Energieertrag auftraten.

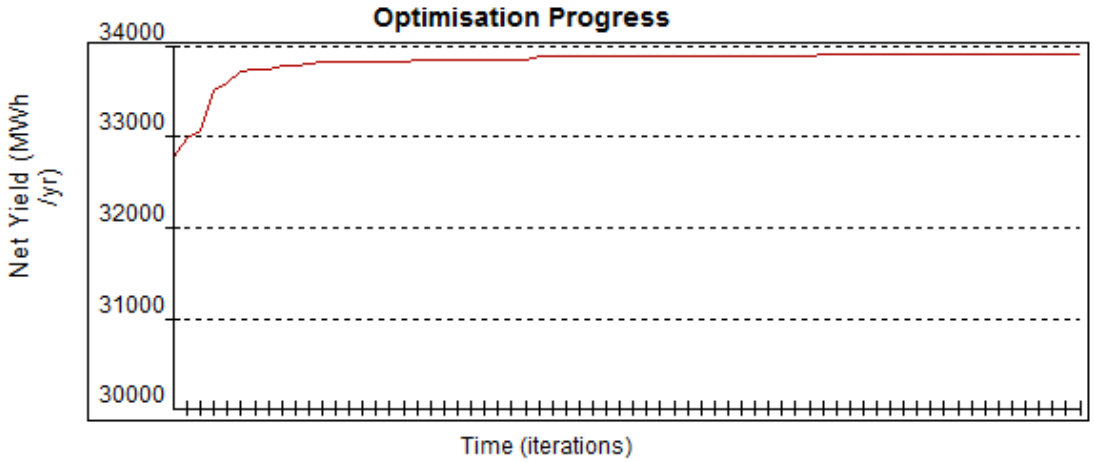


Abbildung 6: Energieertragsverlauf innerhalb des Optimierungsprozesses

Nach der automatischen Optimierung ergab sich folgender Energieertrag sowie Feldwirkungsgrad:

- Energieertrag: 34 GWh/a
- Feldwirkungsgrad: 96,91 %

Durch die Optimierung konnte eine Ertragsverbesserung von 3,4 Prozent erzielt werden. Die Ergebnisse der Daten von „Exercise 3“ sind im Anhang unter demselben Namen zu finden.
In Aufgabe 9 wurden die elektrischen Verluste bei Anschluss von drei Windkraftanlagen berechnet. Die Windkraftanlagen wurden mit entsprechenden Kabeln an einem Transformator angeschlossen. Von dort lief eine Hochspannungsleitung zum Einspeisepunkt des nahegelegenen Ortes. Mit dem Kabellayout konnte die Effizienz des Anschlusses mit 97,77 Prozent errechnet werden.

3 Geräuschimmissionen

In Aufgabe 4 waren vier Standorte zur Geräuschimmissionsmessung angegeben. Die Standorte spiegeln die bestehenden Siedlungen nahe dem Windpark wieder. Zuerst musste die Lage des Immissionsortes 1 (Haus 1) vom Park wegverschoben und die Lärmgrenze für alle Immissionsstandorte auf 38 dB(A) eingestellt werden. Da die Auslegung des vorhin projektierten Windparks die Schallgrenze überschritt sollte eine automatische Windparkanpassung durchgeführt werden, mit dem Ziel, die Immissionsgrenzwerte einzuhalten. Die Erträge des neuen Windparklayouts sind folgend aufgeführt:

- Energieertrag: 34 GWh/a
- Ertragsverbesserung: 6,1 %
- Feldwirkungsgrad: 96,7 %

Die Ertragsverbesserung beträgt 6,1 Prozent obwohl der Feldwirkungsgrad leicht sinkt. Der gesamt Energieertrag blieb konstant auf 34 GWh/a. Das neue Layout des Windparks ist in Abbildung 7 zu sehen.

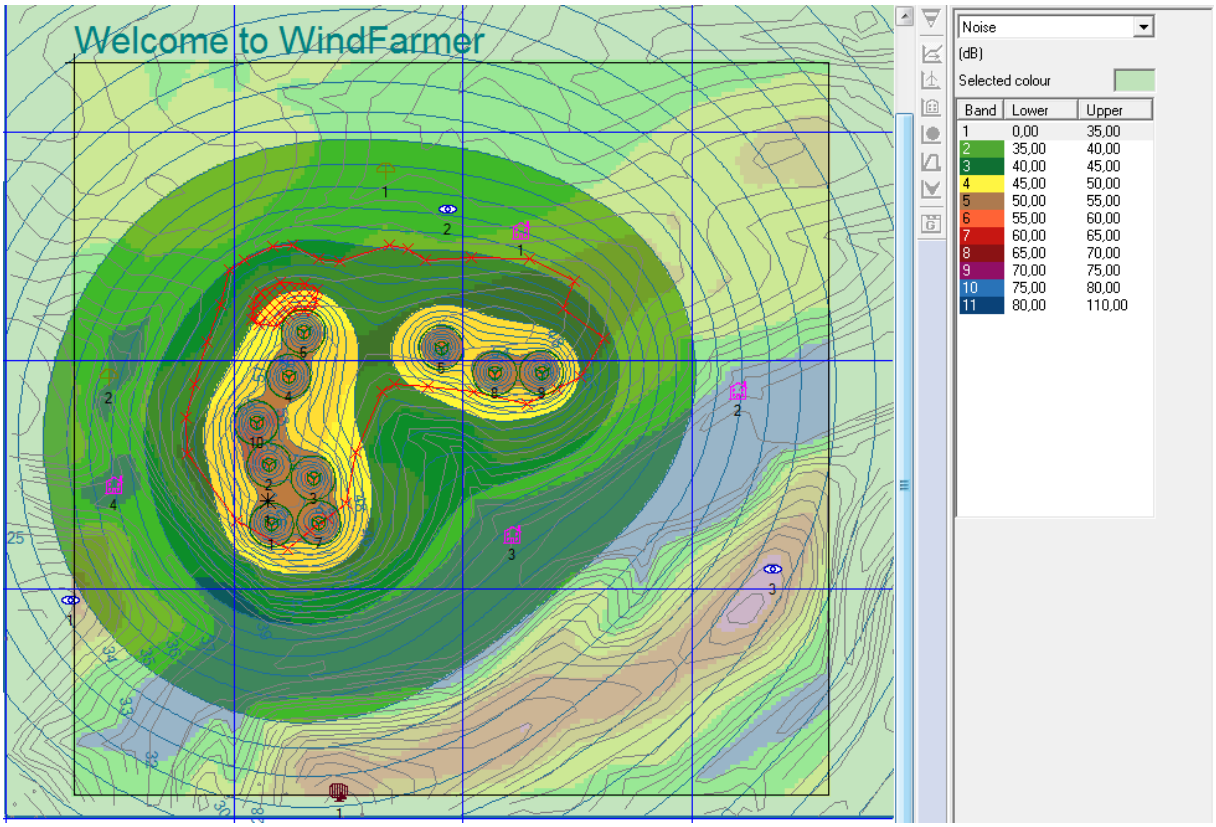


Abbildung 7: Layout berücksichtigt Geräuschimmissionen

4 Schattenwurf

Anhand des in Kapitel 3 Geräuschimmissionen erarbeiteten Windparklayouts sollte nun der Schattenwurf bestimmt werden. Lila eingefärbte Bereiche weißen einen Schattenwurf von über 50 Stunden pro Jahr auf. Rote Bereiche 41 – 50 Stunden, Orange 31 – 40 Stunden, Gelb 21 – 30 Stunden, Grün 11 – 20 Stunden und Blau 1 – 10 Stunden. Weiße Bereiche werden nicht vom Windpark beeinflusst. Haus 2 und 3 befinden sich im blauen Bereich mit 1 – 10 Schattenstunden pro Jahr. Haus 1 und 4 hingegen liegen im grünen Bereich und liegen somit zwischen 11 – 20 Stunden im Schatten der Windkraftanlagen. Der grüne Bereich ist laut Bundesimmissionsschutzgesetzt nicht hinnehmbar.

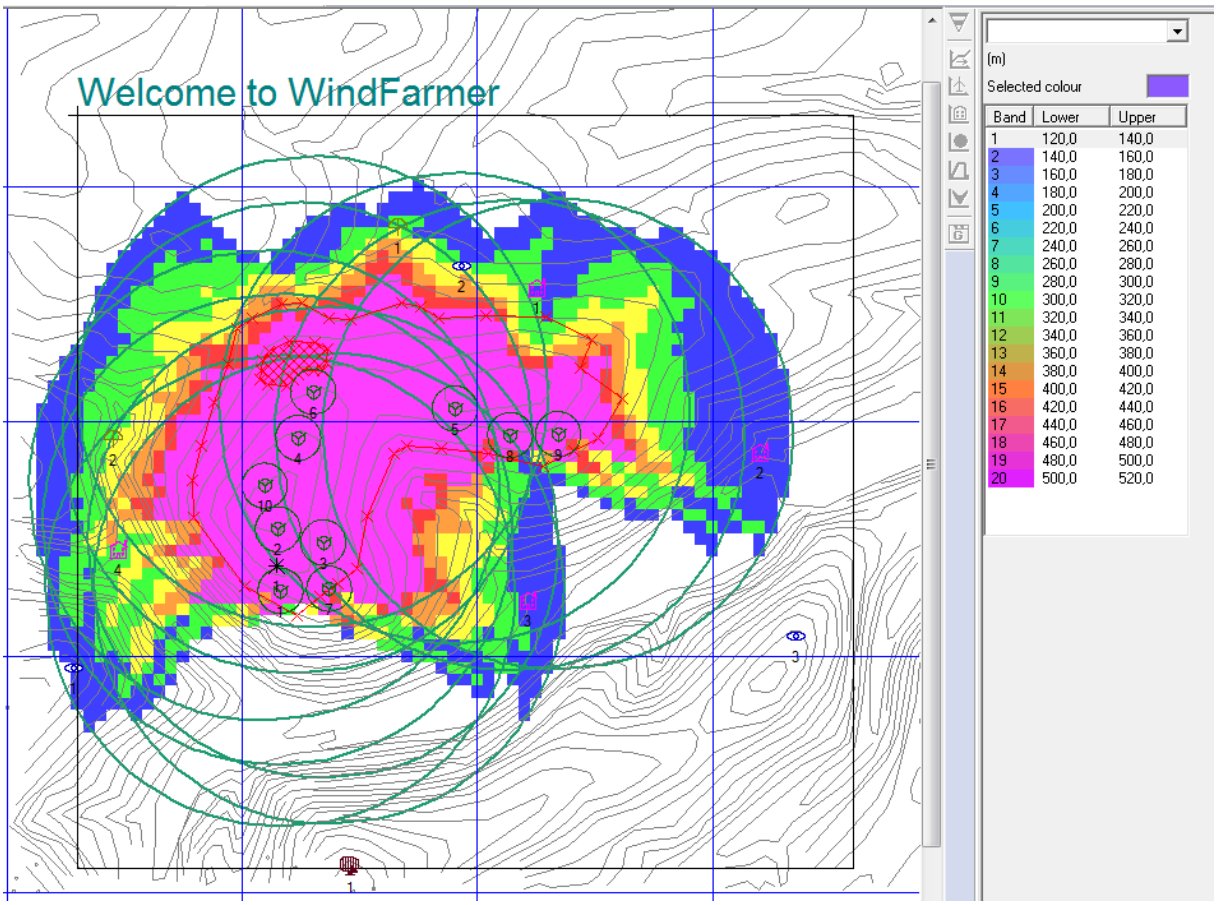


Abbildung 8: Schattenwurf des Windparks aus 3 Geräuschimmissionen

5 Windparkvisualisierung und Wirkung

Zum Abschluss der Untersuchung des Windparks in Schottland sollte dieser mit WindFarmer visualisiert werden. Dazu wurde zuallererst eine Karte mit dem visuellen Einfluss des von uns projektierten Windparks erstellt, diese ist in Abbildung 9 zu sehen. Lila Bereiche zeigen die Orte an, von denen alle zehn Windturbinen zu sehen sind. Dunkellila zeigt Gebiete von denen sechs Windturbinen gesehen werden. Von weiß eingefärbten Orten kann keine Windturbine gesehen werden.

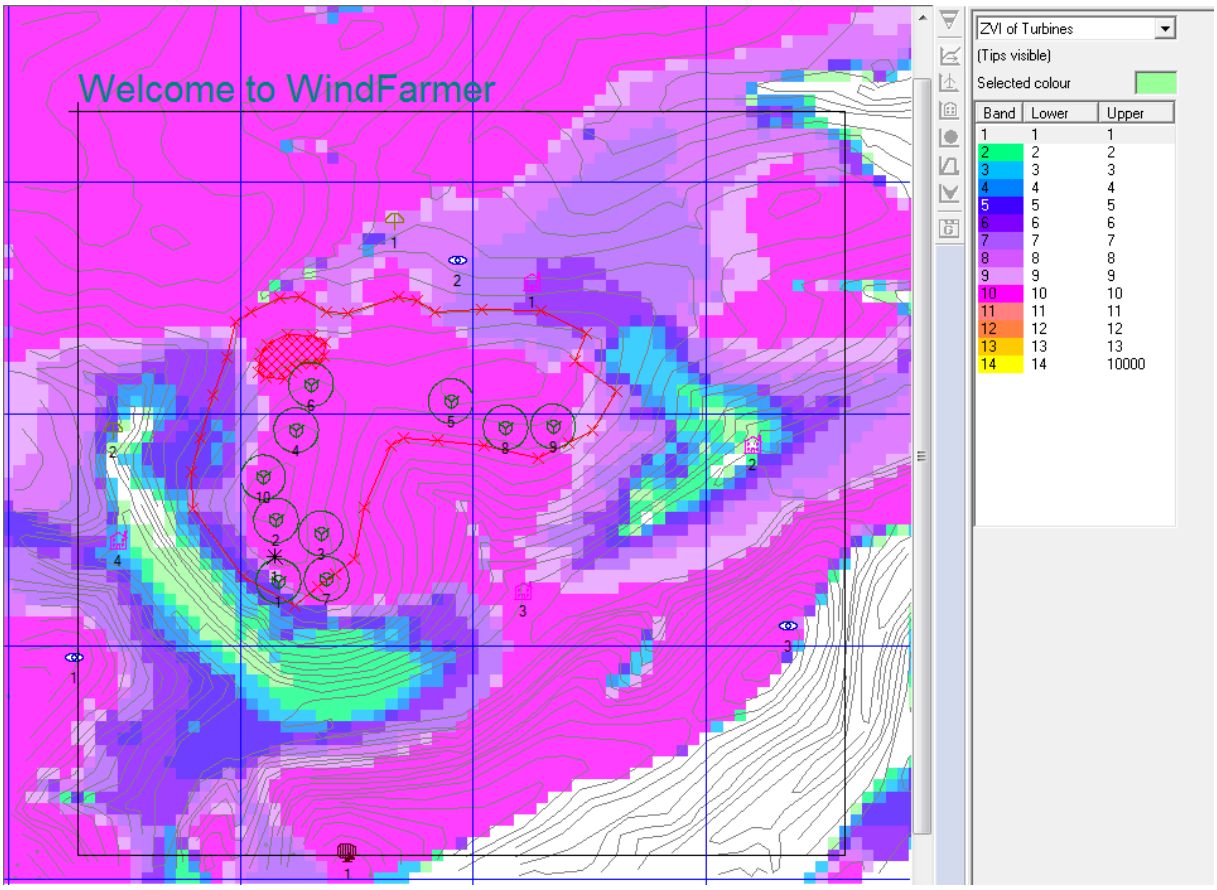


Abbildung 9: Visueller Einfluss des Windparks auf die Umgebung

Für eine 3-D Visualisierung des Windparks wurden drei Sicht- bzw. Aussichtpunkte eingetragen die mit dem Symbol auf der Karte zu sehen sind. Dafür musste der Ort, der Azimut und die Blickhöhe angegeben werden. Anschließend generierte WindFarmer 3-D Bilder des Windparks von den angegebenen Standorten aus. Auch gab WindFarmer die Anzahl und Häufigkeit der zu sehenden Rotorblätter bzw. Narben der Windturbinen aus. Genauere Details der Standpunkte und der zusehenden Windkraftteile finden sich im Anhang unter „Exercise 6_viewpoint1“ und „Exercise 6_viewpoint2“. Die 3-D Bilder können im Anhang unter „Exercise 7 (allviews1, allviews2, allviews3, allviews4, visualisation)“ eingesehen werden.

Eine Übersicht der Ergebnisse umweltrelevanter Themen sind im Anhang unter „Exercise 8“ zu finden.

6 Literaturverzeichnis

[1] (2013, Jun.) [Online]. http://www.volker-quaschning.de/artikel/windsimulation/index.php

[2] (2013, Jun.) [Online]. http://www.erlebe-flensburg.de/nachrichten/forschungtechnik/article:3487

[3] (2013, Jun.) [Online]. http://www.fh-flensburg.de/ret/

[4] (2013, Jun.) [Online]. http://www.regierung.oberfranken.bayern.de/imperia/md/content/regofr/energiewende

[5] (2013, Jun.) [Online]. http://www.mb-oekoprojekt.de/windenergie.html

[6] (2013, Jun.) [Online]. http://www.ratgeber-recht24.de/Nachbarrecht_Teil_2/TALaerm.html

[7] (2013, Jun.) [Online]. http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/wea_schattenwurf_hinweise.pdf

[8] (2013, Jun.) [Online]. http://www.volkerquaschning.de/software/windertrag/info1.html

[9] (2013, Jun.) [Online]. http://www.mb-oekoprojekt.de/windenergie.html

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Standorte der drei Immissionsmessungen 10
Abbildung 2: Shadowing Map 12
Abbildung 3: Photomontage der Vestas V80-2.0MW 13
Abbildung 4: Arbeitsmappe "Demosite.wow" 15
Abbildung 5: Arbeitsmappe "Demosite.wow" mit zehn Windkraftanlagen 16
Abbildung 6: Energieertragsverlauf innerhalb des Optimierungsprozesses 16
Abbildung 7: Layout berücksichtigt Geräuschimmissionen 18
Abbildung 8: Schattenwurf des Windparks aus 3 Geräuschimmissionen 19
Abbildung 9: Visueller Einfluss des Windparks auf die Umgebung 20

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Daten: ENERCON E-30 am Campus Flensburg 5
Tabelle 2: Energieprognose "E-30 Campus Flensburg" ohne Campushalle 7
Tabelle 3: Energieprognose "E-30 Campus Flensburg" mit Campushalle 7
Tabelle 4: Energieprognose "E-30 Campus Flensburg" mit veränderter Windstatistik 7
Tabelle 5: Energieprognose bei veränderter Rauigkeit 8
Tabelle 6: Main Results Wind Met Tower und E-30 Campus Flensburg 9
Tabelle 7: Energieertrag Wind Met Tower und E-30 Campus Flensburg nach Sektoren 9
Tabelle 8: TA-Lärm nach Bundesemissionsschutzgesetz [6] 10
Tabelle 9: Geräuschimmissionen am Standort A,B und C 10
Tabelle 10: Schattenwurf in relevanten Monaten 11

9 Anhang A

A1 Gebäude_vor

A2 Gebäude_nach

A3 E-30 Campus Flensburg ohne Campushalle (Mainresults, Productionanalysis)

A4 E-30 Campus Flensburg mit Campushalle (Mainresults, Productionanalysis)

A5 E-30 Campus Flensburg veränderte Windstatistik (Mainresults)

A6 Production Analysis_roughness 1,5, Mainresults_roughness 1,5

A7 Production Analysis_roughness original, Mainresults_roughness original

A8 Production Analysis_roughness 2,2, Mainresults_roughness 2,2

A9 STATGEN – Overview

A10 METEO – Main Results

A11 METEO – Production Analysis

A12 DECIBEL – Main Results

A13 Shadowing Main Results, Shadowing Calender

A14 Photomontage (Main Results), Photomontage (Map), Photomontage (Fullpagephoto)

A15 Animation

10 Anhang B

B1 Exercise 3

B2 Exercise 6_viewpoint1

B3 Exercise 6_viewpoint2

B4 Exercise 7 (allviews1, allviews2, allviews3, allviews4, visualisation)

B5 Exercise 8