

Visualisierung geplanter Windkraftanlagen im Rahmen der Landschaftsbildbewertung – Möglichkeiten und Grenzen

GOTTHARD MEINEL¹ & KAI WALTER²

Abstract: Windkraftanlagen beeinflussen das Landschaftsbild entscheidend. Um Grundlagen für eine Bewertung geplanter Windkraftanlagen in der Landschaft im Rahmen des Genehmigungsverfahrens zu schaffen, wird dringend eine realitätsnahe Visualisierung benötigt. Die vorliegende Arbeit beschreibt, wie auf Basis hochauflösender Satellitenbilddaten, digitaler Höhenmodelle und einfacher DXF-Konstruktionsmodelle von Windkraftanlagen eine 3D-Visualisierung erfolgen kann. Sichtbarkeitsberechnungen überlagert mit topographischen Karten ermöglichen die Bestimmung von Standorten mit möglichen kritischen Sichtbeziehungen, die für das Genehmigungsverfahren visualisiert werden sollten. Weiterhin werden die Grenzen der Güte von 3D-Visualisierungen aufgezeigt und ein Verfahren für eine sichere maßstabstreue Fotomontage von Windkraftanlagen auf Basis von 3D-Visualisierungen beschrieben.

1 Einleitung

Der Weltmarkt für regenerative Energietechniken boomt. Das zunehmende Bewusstsein über die Endlichkeit der fossilen Energieträger, die steigenden Bemühungen um den Klima- und Umweltschutz und das kritische Verhältnis zur Kernenergie fördern diese Entwicklung. Rund 2 800 Mrd. Kilowattstunden Strom werden aus regenerativen Energiequellen weltweit jährlich erzeugt, was einen Anteil von ca. 20 % an der Weltstromerzeugung darstellt. Der mit Abstand größte Anteil entfällt dabei auf die Wasserkraft (2 690 Mrd. kWh), gefolgt von geothermischen Anlagen und der Windenergie mit 23 Mrd. kWh. Europa ist der wichtigste Wachstumsmarkt in der Windenergieleistung. Deutschland wiederum dominiert den Windenergiemarkt mit einem Anteil von 32,6 % an der weltweiten Gesamtleistung (rund 13,5 GW). Auch in der Jahreszuwachsrate spielt Deutschland eine führende Rolle (1999 wurden hier 42 % der weltweit neu installierten Leistung von 3,7 GW errichtet).

In Deutschland sind zum 31. März 2000 ca. 8 050 Windturbinen mit einer Gesamtleistung von 4,6 GW installiert. Diese Anlagen erzeugen rund 8,5 Mrd. kWh Strom, was einen Anteil von 2 % des bundesweiten Strombedarfs ausmacht. Das im April 2000 in Kraft getretene Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) wird eine weitere dynamische Entwicklung in der deutschen Windenergiebranche befördern. Es schreibt u. a. eine gegenüber früher deutlich höhere Einspeisevergütung aller Arten erneuerbarer Energien fest.

Der Trend zu immer leistungsstärkeren und damit größeren WKA hält unvermindert an. Die Nennleistung erhöhte sich im Laufe der letzten 10 Jahre von 50 kW auf 1,5 MW. Abbildung 1 verdeutlicht symbolisch die Dimensionen heutiger Windkraftanlagen. Durch eine in der Vergangenheit teilweise ungenügende Prüfung der Genehmigungsfähigkeit der Anlagen hinsichtlich ihres Einflusses auf das Landschaftsbild oder ungerechtfertigte Baugenehmigungen ist inzwischen in einigen Gegenden Deutschlands eine Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch WKA festzustellen. Im Rahmen eines Entwicklungsprojekts zur Nutzung von Satellitenbilddaten

¹ Dr. Gotthard Meinel, Institut für ökologische Raumentwicklung e. V., Weberplatz 1, 01217 Dresden, email: G.Meinel@ioer.de

² Dipl.-Ing. (FH) Kai Walter

in der Raumplanung wurde auch der Frage der Möglichkeiten und Grenzen einer 3D-Visualisierung von WKA für die Genehmigungsverfahren nachgegangen. Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

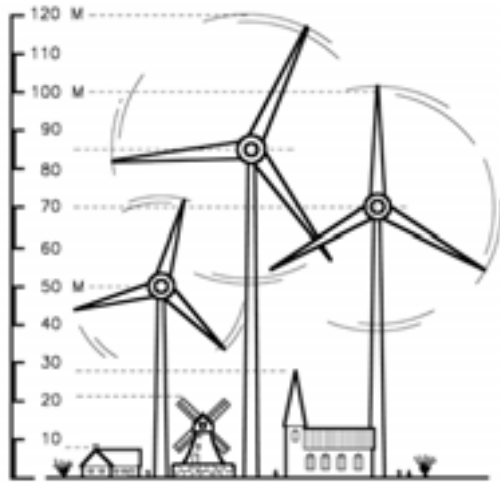


Abb. 1:
Größenvergleich moderner WKA mit anderen
Bauwerken

2 Genehmigungsverfahren

Windkraftanlagen unterliegen grundsätzlich einem komplexen baurechtlichen Genehmigungsverfahren. In diesem sind u. a. die Einhaltung von Forderungen des Natur- und Landschaftsschutzes (ökologische Gutachten), des Immissionsschutzes (Schallimmissionsprognosen) sowie der Belange von Raumordnung und Landesplanung (z. B. Schattenwurfanalysen) zu prüfen. Eine geordnete Entwicklung der Windkraft wird im Hinblick auf die raumbedeutsame Wirkung der Windenergieanlagen vorrangig über die Ausweisung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten in den Regionalplänen angestrebt. Im Zuge der stärkeren Windenergienutzung wird zunehmend auch die Landschaftsverträglichkeit der Anlagen in den Mittelpunkt gerückt. Auch wenn sich letztlich diese Frage schwer objektivieren lässt, so sind für die Bewertung doch möglichst aussagekräftige, realitätsnahe Vorwegnahmen des Bildes der Landschaft mit der/den geplanten Windkraftanlagen sehr hilfreich. Derartige Visualisierungen wurden aber in der Vergangenheit nur in Ausnahmefällen und meist nur in Form von Fotomontagen realisiert, denen aber die Grundlage für eine größenrichtige Wiedergabe der Anlagen fehlte. Nunmehr soll auf Basis realer Bestandssituationen und von 3D-Visualisierungssoftware der Versuch einer realitätsnahen WKA-Visualisierung vorgenommen werden.

3 Grundlegende Daten einer 3D-Landschaftsvisualisierung

Die Basis für eine 3D-Landschaftsvisualisierung von Windkraftanlagen (WKA) bilden digitale Geländehöhenmodelle (DGM), hochaufgelöste Satelliten- und/oder Luftbilddaten und Konstruktionsmodelle der Windkraftanlagen im DXF-Format. Im Folgenden werden die Anforderungen an die Daten und Modelle diskutiert.

3.1 Digitale Geländehöhenmodelle

Die Realitätsnähe einer Landschaftsbildvisualisierung wird entscheidend von der Qualität des verwendeten DGM bestimmt. Dieses betrifft sowohl die Genauigkeit der Höhenwerte als auch die Rasterweite des Höhenmodells. Prinzipiell stehen in Deutschland das ATKIS-DGM 25, das

DGM der militärtopographischen Karte (DHM/M 745) sowie gebietsweise auch höherauflösende DGM zur Verfügung (Tab. 1). Diese drei Quellen wurden hinsichtlich ihrer Eignung für eine Landschaftsvisualisierung geprüft. Abbildung 2 veranschaulicht den Einfluss des Netzkpunkt- abstandes auf die Wiedergabetreue der Geländecharakteristik.

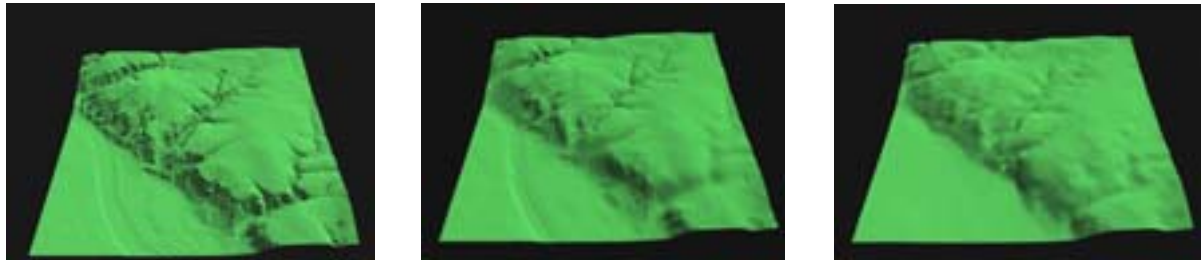


Abb. 2: DGM unterschiedlicher Auflösung (Überhöhungsfaktor 2); links: Laser-Scanner DGM (5 m Raster), Mitte: ATKIS-DGM 25 (20 m Raster), rechts: DHM/M 745 (25 m Raster)

Während ATKIS und das DHM/M 745 mit jeweils mittlerer Auflösung deutschlandweit zur Verfügung stehen, sind höherauflösende DGM derzeit nur für Teilräume verfügbar. Da Windkraftanlagen immer im Außenbereich errichtet, hochauflösende digitale Geländehöhenmodelle aber eher für städtische Bereiche erzeugt werden, wird in der Regel kein hochauflösendes digitales Geländehöhen- oder Oberflächenmodell für die Landschaftsvisualisierung von Windkraftanlagen zur Verfügung stehen. Wenn auch die Rasterung von ATKIS-DGM 25 und DHM/M 745 mit 25 bzw. 20 m annähernd vergleichbar ist, ist doch die Höhengenaugkeit des ATKIS-Modells wesentlich besser (Tab. 1). Um nun Fehler in der Sichtbarkeitsberechnung von WKA zu minimieren, muss das DGM über eine große Höhengenaugkeit verfügen, womit das ATKIS-DGM 25 zur bevorzugten Datenquelle für 3D-Visualisierungen im Landschaftsraum wird.

| | ATKIS-DGM 25 | DHM/M 745 | Hochauflösende DHM |
|------------------------|---|---|--|
| Daten- grundlage | Photogrammetrische Luft- bildauswertung und Relief- digitalisierung der TK 10 | Reliefdigitalisierung der Militärtopographischen Karte 1 : 50 000 (M 745) | Photogrammetrische Erfassung, Laserscanner, HRSC |
| Höhen- genauigkeit | < ±2 m bei Luftbildauswer- tung | < ±5 m im Flachland < ±9m im Berg- und Hügelland < ±15 m im Gebirge | < ±1 m |
| Netzkpunkt- abstand | 20 (40) m | 25 (200) m | 1-5 m |

Tab. 1: Parameter wichtiger Digitaler Höhenmodelle

Wenn nun das DGM im nächsten Arbeitsschritt mit Satelliten- oder Luftbilddaten überlagert wird, liegen alle Bodenbedeckungs-/Bodennutzungsklassen flach auf der Geländeoberfläche, was eine realistische Visualisierung beeinträchtigt (besonders sichtbar bei Siedlungs-, forst- und landwirtschaftlichen Flächen). Diese Beeinträchtigung wirkt sich bei bodennahen Betrachterstandorten besonders stark aus, wie Abbildung 3 zeigt. Besser wäre darum für die 3D-Visualisierung ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) geeignet, welches die tatsächliche Höhe einschließlich des Objektinventars (Gebäude, Bäume etc.) enthält. Die Anwendung von hochauflösenden digitalen Oberflächenmodellen bedingen einen deutlichen Realitätsgewinn für die 3D-Landschaftsvisualisierung.

Steht kein DOM zur Verfügung, könnte aus einem DGM und einer Bodenbedeckungsklassifikation ein virtuelles DOM abgeleitet werden, indem für Bedeckungsklassen mit größerer Höhe wie

z. B. Siedlungen bzw. Waldflächen eine mittlere Höhe (evtl. variiert durch einen Zufallsgenerator) zu dem Raster-DOM addiert wird. Eigene Versuche in dieser Richtung führten letztlich aber zu wenig überzeugenden Visualisierungsergebnissen, da die sichtbare Rasterung der angehobenen Flächen wenig realitätsnah wirkt.



Abb. 3: 3D-Visualisierungsergebnisse in Abhängigkeit von der Betrachterhöhe
(links: 1 000 m, Mitte: 100 m, rechts: 2 m)

3.2 Rasterbilddaten

Für eine 3D-Visualisierung muss über das DGM die bildliche Darstellung der Landschaft gelegt werden. Um den menschlichen Sehgewohnheiten zu entsprechen, sind Naturfarbbilder Infrarot- oder Schwarz-Weiß-Aufnahmen vorzuziehen. Als Rasterbilddaten wurden ein Naturfarbfusionsprodukt von IRS-1C-Satellitenbilddaten (5 m Raster), ein Naturfarbfusionsprodukt aus IKONOS-Satellitenbilddaten (1 m Raster) und ein digitales Orthobild (1 m Raster) getestet. Den Einfluss der Rasterweite der Bilddaten auf die Visualisierungsqualität wird in Abschnitt 5 diskutiert. Hier soll nur auf das Problem der Bilddatenmengen verwiesen werden (Tab. 2), denn mit der Rasterbildauflösung steigt das Datenvolumen quadratisch an, was in der praktischen Arbeit zu der Notwendigkeit einer Beschränkung der Untersuchungsausschnitte führt.

| | Rasterweite [m] | Bildgröße [Pixel] | Datenmenge [MB] |
|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| IRS-1C LISS-III | 20 | 500 x 500 | 0,75 |
| IRS-1C (Fusion) | 5 | 2000 x 2000 | 12,0 |
| IKONOS (Fusion) | 1 | 10000 x 10000 | 300,0 |

Tab. 2: Datenvolumen von Farbbildern unterschiedlicher Rasterauflösung
für ein 10 x 10 km umfassendes Untersuchungsgebiet

3.3 3D-Konstruktionsmodelle von Windkraftanlagen (WKA)

Bestimmend für die Visualisierung von Windkraftanlagen sind vor allem die Nabenhöhe, der Fußpunktdurchmesser sowie der Rotordurchmesser, während andere Baudetails für die Visualisierungsaufgabe ohne Bedeutung sind. So wurde ein CAD-Modell der bestimmenden Bauteile Turm und Rotorblatt erarbeitet. Im zweiten Schritt wurden diese Bauteile entsprechend den Maßen der am häufigsten gebauten Anlagen dimensioniert und in einer Datenbank abgelegt (Tab. 3). Für eine spezielle Visualisierungsaufgabe kann nun Turm und Rotorblatt in den entsprechenden Abmessungen der Datenbank entnommen und zusammengefügt werden (Abb. 4).

Da der Betrachterabstand zu den WKA relativ groß ist, werden keine hohen Anforderungen an die Visualisierungsqualität der Anlagen selbst gestellt, so dass mit einfachen DXF-Modellen (Polygonzahl < 400) gearbeitet werden kann.

| Nennleistung [MW] | Nabenhöhe [m] | Rotorradius [m] | Gesamthöhe [m] |
|-------------------|---------------|-----------------|----------------|
| 0,5 | 50 | 20 | 70 |
| 0,6 | 60 | 24 | 84 |
| 0,5 | 65 | 20 | 85 |
| 0,8 | 60 | 26 | 86 |
| 1,5 | 67 | 33 | 100 |
| 1,5 | 74 | 30 | 104 |
| 1,8 | 80 | 35 | 115 |
| 2,5 | 80 | 40 | 120 |

Tab. 3: Dimensionierung häufig gebauter Windkraftanlagen



Abb. 4: 3D-Visualisierung einer Windkraftanlage (DXF-Modell)

Da die Rotorbewegung die visuelle Wahrnehmung der Anlagen in der Landschaft verstärkt, sollte diese auch in der 3D-Ansicht angedeutet werden. Von verschiedenen getesteten Visualisierungsvarianten (Abb. 5) wurde von Planungspraktikern die Visualisierung der Drehbewegung durch eine Kreislinie um das Rotorblatt bevorzugt (Variante 2).

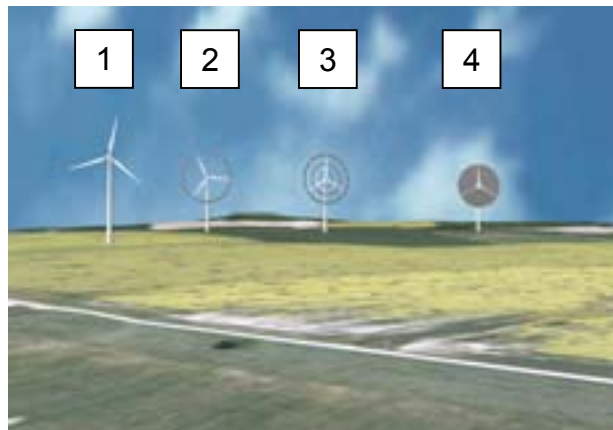


Abb. 5:
WKA mit unterschiedlicher Visualisierung
der Rotorbewegung

3.4 Verwendete Visualisierungssoftware

Die Untersuchungen wurden mit dem Fernerkundungsprogramm ERDAS Imagine 8.4 sowie dem Desktop GIS ArcView 3.2 ausgeführt. Für 3D-Visualisierungen sind das Zusatzmodul Virtual GIS (8.4.1) für ERDAS und die folgenden Zusatzmodule für ArcView erforderlich:

- 3D-Analyst (3D-Visualisierung)
- CAD-Reader (Einlesen von DXF-Modellen)
- Spatial Analyst (2D-Sichtbarkeitsberechnung)
- 3D Point of View (genaue Betrachterpositionierung)

4 Sichtbarkeitsberechnungen

Die Sichtbarkeitsberechnung von WKA-Anlagen ist eine wichtige Teilaufgabe bei der Beurteilung der Genehmigungsfähigkeit geplanter Anlagen. Eingangsdaten einer Sichtbarkeitsberechnung ist die Höhe der WKA-Anlage, ihr räumlicher Standort sowie ein digitales Geländemodell. Ergebnis ist eine Ausweisung der Flächen, von denen die Anlage aus sichtbar sein wird. Eine Überlagerung mit einer topographischen Karte weist dann die Straßen- und Wegeabschnitte aus, die für eine 3D-Landschaftsvisualisierung relevant sind. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis einer Sichtbarkeitsberechnung. Die hellgrauen Flächen symbolisieren diejenigen Gebiete, von denen die WKA (dunkelgraue Punktssignatur) sichtbar ist.

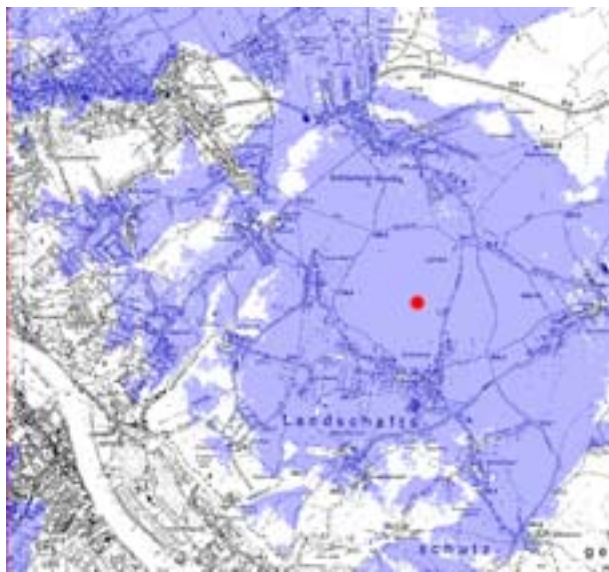


Abb. 6:
Sichtbarkeitsberechnung mit überlagerter
TK25-Karte (Turmhöhe 100 m)

Die Genauigkeit der Ergebnisse einer Sichtbarkeitsberechnung ist direkt von der Genauigkeit des zugrunde liegenden DHM abhängig. Bei der Sichtbarkeitsanalyse auf Basis eines DGM muss berücksichtigt werden, dass die Berechnung ohne Einbeziehung von Objekten wie z. B. Gebäuden oder Bäumen und Wäldern erfolgt. Damit wird in der Realität die Sichtbarkeit der Anlage eher eingeschränkter sein und richtigerweise in der Beurteilung ein Worst-Case-Szenario angesetzt.

5 Visualisierungsgesichtspunkte

5.1 Betrachterstandorte und Betrachterentfernungen

In der Beurteilung des Landschaftsbildes mit Windkraftanlagen wird seitens der Planer zwischen dem Nah- (bis 500 m), Mittel- (bis 2 000 m) und Fernwirkungsbereich (bis 10 000 m) unterschieden. Ab einer Entfernung von 5 km ist die Wirkung einer WKA im Landschaftsbild nur noch sehr gering ausgeprägt. Darum kann für 3D-Visualisierungsaufgaben die Untersuchungsfläche generell auf ein Gebiet der Größe 10 x 10 km um den geplanten Standort der Windkraftanlage begrenzt werden (Speicherplatzreduktion!). Das 3D-Visualisierungsergebnis von WKA in unterschiedlichen Betrachterabständen zeigt Abbildung 7.

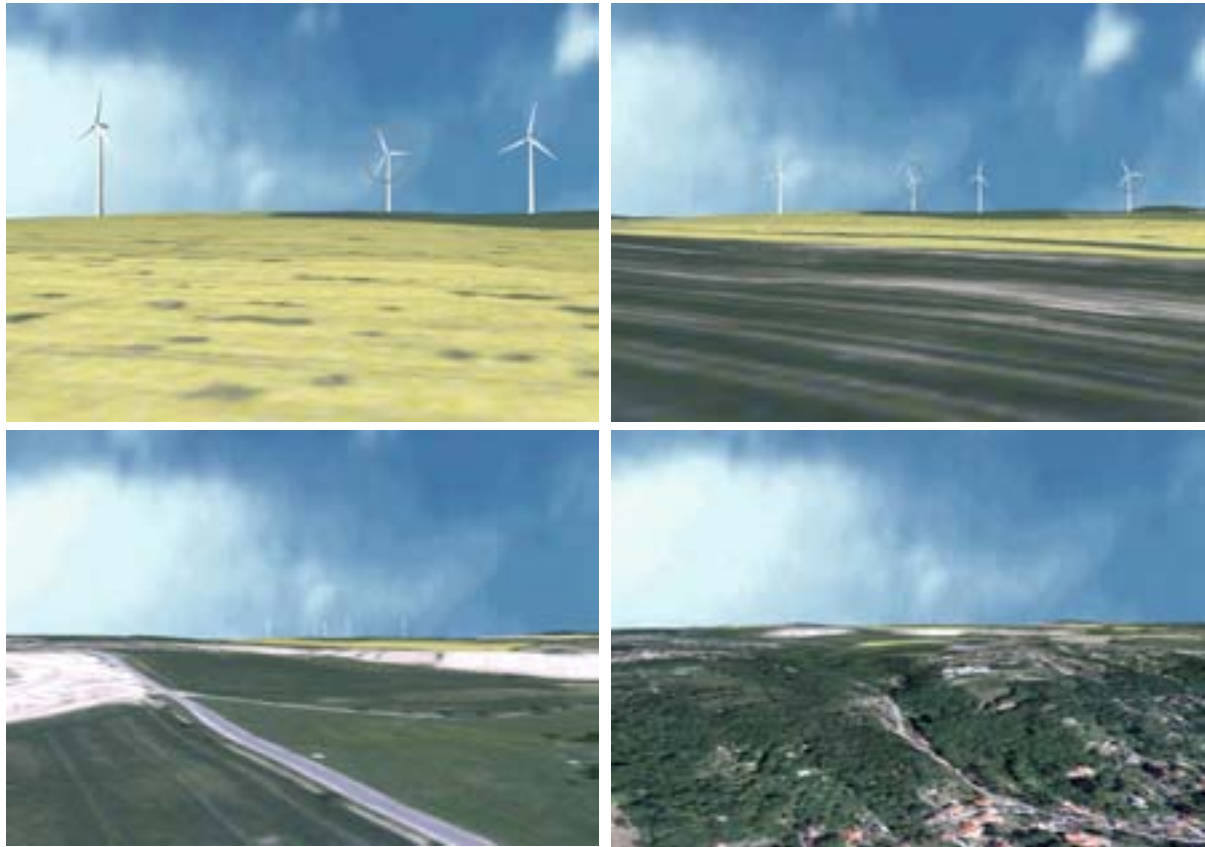


Abb. 7: 3D-Landschaftsbildvisualisierung mit WKA aus unterschiedlichen Betrachterabständen (li. o. 500, re. o. 1 500, li. u. 2 500, re. u. 5 000 m)

Welche Betrachterstandorte sind nun zu realisieren in der Visualisierung? Sie ergeben sich durch Auswertung der Sichtbarkeitsberechnung. Insbesondere die Schnittpunkte der verlängerten Strecke von schützenswerten Ansichten (historische Bauten, Stadt- und Dorfbilder) und dem geplanten WKA-Standort mit Straßen und Wegen sind als Betrachterstandort zu visualisieren, da hier kritische Sichtbeziehungen vermutet werden müssen.

5.2 Auflösung des Bildvordergrunds

Die Objekterkennbarkeit nimmt mit wachsender Entfernung ab. Darum erwartet man auch von einer virtuellen Landschaftsansicht eine entfernungsabhängige Auflösung des Objektinventars der betrachteten Szene. Für Mittel- und Hintergrundbereiche ist also nicht dieselbe hohe Auflösung erforderlich wie im Vordergrund. Die konstante Bildauflösung der für die 3D-Visualisierung verwendeten Bilddaten bedingt nun in der Regel eine ausreichend hohe Informationsdichte für den Bildhintergrund, nicht aber für den Bildvordergrund. Bei realistischen Betrachterhöhen (1-2 m über Grund) ist darum der Bildvordergrund virtueller Landschaften auch bei Verwendung sehr hoher Bildauflösungen enttäuschend unscharf. Hier bedingt selbst eine Bildauflösung von 1 m keine wesentliche Verbesserung gegenüber einem 5-m-Rasterbild in der 3D-Visualisierung. Die Wirkung des unscharfen Vordergrunds wird aber dadurch relativiert, dass die Betrachterentfernung zu den WKA-Anlagen ohnehin mindestens 500 m beträgt und in der Regel im Vordergrund keine weiteren wichtigen Bauwerke stehen (Ausschlusskriterium 500 m zwischen WKA und Siedlung!).

5.3 Weitere Ausgestaltung von 3D-Szene

Die Realitätsnähe einer 3D-Visualisierung kann über geeignete Beleuchtung der Szene, die Horizontgestaltung oder die Einbeziehung zusätzlicher 3D-Gebäude und Bäume gesteigert werden (Abb. 8). Dieses ist besonders dann sinnvoll, wenn kritische Sichtbeziehungen z. B. zu Baudenkmälern (Kirchen, Schlössern, Burgen) vorhanden sind und darum vereinfachte Modelle derartige Bauobjekte zu visualisieren sind. Die verwendeten DXF-Modelle können wiederum, bedingt durch die relativ großen Betrachterabstände, einfach gehalten werden. Gerade einfache DXF-Modelle sind oft kostenfrei im Internet verfügbar.



Abb. 8:
3D-Landschaftsansicht mit Gebäude und Bäumen

5.4 VRML- und Filmerstellung

Viele Visualisierungsprogramme gestatten die Berechnung von VRML-Files (Virtual Reality Modeling Language). Durch den Export einer 3D-Szene in ein VRML-File wird anderen Nutzern die Möglichkeit gegeben, sich interaktiv mittels eines VRML-Viewers in der 3D-Szene zu bewegen. VRML-Visualisierungen sind auch über das Internet durch javabasierte Plugins möglich (RAU, 1999). Die Visualisierungsqualität ist jedoch gering, da eine erhebliche Reduktion der Komplexität der Szene vorgenommen werden muss (Speicherplatzoptimierung). Auch die Navigation in der Szene mittels VRML-Viewern ist schwerfällig und gewöhnungsbedürftig. Für die praktische Raumplanungsarbeit sind darum derzeit VRML-Visualisierungen noch von geringer Bedeutung.

Weiterhin ist häufig in Visualisierungsprogrammen eine Vorberechnung von Filmabläufen auf Basis von 3D-Ansichten möglich. Filmberechnungen können in Planungsfragen z. B. sinnvoll sein entlang von Straßen und Wegen mit Sichtbeziehung zu geplanten Windkraftanlagen. Im Filmerstellungsprozess wird die volle Auflösung der virtuellen Szene vorberechnet und in einer Bildsequenz abgelegt. Allerdings sollte hier die Szene mit zusätzlichen Gebäudemodellen vorbereitet werden, um die Realitätsnähe zu steigern.

6 3D-Visualisierungsergebnisse und Fotomontage

Die 3D-Visualisierungsergebnisse geplanter Windkraftanlagen für verschiedene reale Plansituationen auf Basis von IRS-1C-Naturfarbfusionsbildern und einem ATKIS-DGM 25 wurden Planern zur Beurteilung vorgelegt. Die Auswertung erbrachte die folgenden Ergebnisse: Wenn der WKA-Standort in einer unkritischen Lage bezüglich gefährdeter Blickbeziehungen lag, war die Qualität der 3D-Visualisierung ausreichend und hilfreich für die Beurteilung der Einordnung

der geplanten Anlage in das Landschaftsbild. Handelt es sich um einen Standort mit kritischer Sichtbeziehung zu historischen Ortslagen oder Kultur- bzw. Naturdenkmälern, war die Visualisierungsgüte ungenügend. Hier ist auch mit noch höherauflösenden Bilddaten (z. B. IKONOS- oder Luftbilddaten) keine wesentliche Verbesserung zu erreichen. Die geringe Vordergrundauflösung und die fehlende Höhe des Objektinventars begrenzen die Güte der 3D-Visualisierung. In diesen Fällen sollte eine Fotomontage der geplanten Anlage in der Landschaft realisiert werden. Die Fotomontage bedingt natürlich nur dann richtige Ergebnisse, wenn eine exakte Dimensionierung der WKA gelingt. Tabelle 4 stellt Vor- und Nachteile von Fotomontage und 3D-Visualisierung gegenüber.

| | Fotomontage | 3D-Visualisierung |
|---------------------------------------|---|--------------------------------------|
| Visualisierungsqualität | sehr hoch | gering-mittel |
| Dimensionierbarkeit geplanter Objekte | nur näherungsweise möglich | exakt möglich |
| Betrachterstandortflexibilität | nicht gegeben | jede Position berechenbar |
| Arbeitsaufwand | hoch durch notwendige Vorortaufnahme | relativ gering, wenn Daten vorliegen |
| Hard- und Softwareaufwand | gering, da nur Standard-Bildverarbeitungsprogramm notwendig | sehr hoch |

Tab. 4: Vergleich von Fotomontage und 3D-Visualisierung

In der bisher praktizierten Fotomontagetechnik ist die dimensionsgerechte Visualisierung geplanter WKA praktisch nicht möglich, da weder der Fußpunkt der Anlage noch deren Höhe exakt festgelegt werden können. Gerade aber die richtige Wiedergabe der Dimensionen der Anlagen ist von höchster Bedeutung für die Einschätzung des Landschaftsbildes und damit die Genehmigungsfähigkeit der Anlagen. Auch wenn im Rahmen der Fotomontage die Höhe der Anlage aus der Entfernung zwischen Foto- und WKA-Standort berechnet werden kann, so ist die Festlegung des Fußpunktes der Anlage unmöglich. Durch die 3D-Visualisierung ergibt sich nun die Möglichkeit der genauen Größendimensionierung der Anlagen in der Fotomontage durch das folgende Vorgehen:

- Bestimmung kritischer Sichtbeziehungen über eine 2D-Sichtbarkeitsanalyse
- Festlegung notwendiger Fotostandorte
- 3D-Visualisierung aus Sicht der festgelegten Fotostandorte
- Speicherung der 3D-Ansicht in einem 2D-Bildformat (TIF, BMP)
- Aufnahme der Fotos in der Landschaft vom GPS-vermessenen Fotostandort
- Laden von Fotoaufnahme und 3D-Visualisierungsergebnis in einem Bildverarbeitungsprogramm (z. B. PhotoShop)
- 3D-Visualisierungsergebnis halbtransparent schalten
- Formatierung der beiden Bilder auf die gleiche Größe (Orientierung an Horizontlinie)
- Bilddatei des WKA-Modells einfügen in Fotoaufnahme
- WKA-Modell entsprechend des 3D-Visualisierungsergebnisses dimensionieren und positionieren
- Ausdruck der Fotomontage

Im Ergebnis erhält man realistisch wirkende Darstellungen der geplanten Windkraftanlagen mit der vollständigen Information einer Fotoaufnahme. Das gesamte vorgeschlagene Bearbeitungsschema zeigt Abbildung 9.

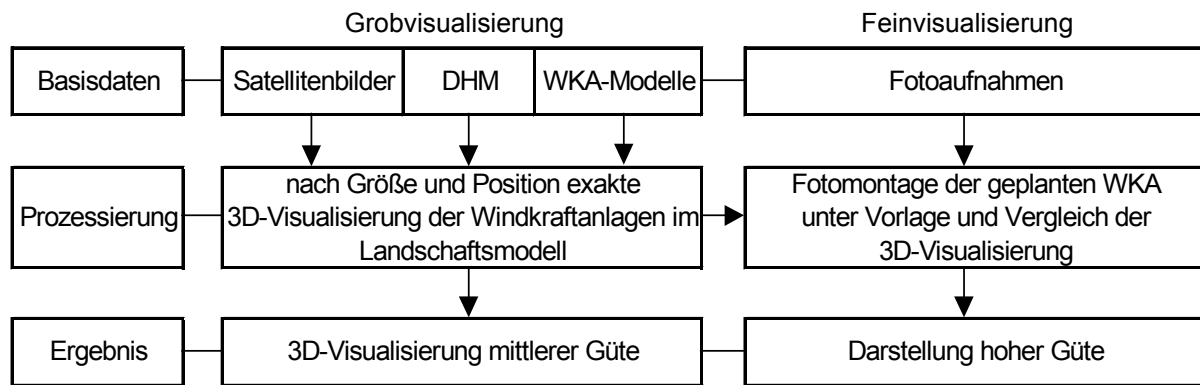


Abb. 9: Bearbeitungsschema

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der unterschiedlichen Visualisierungsansätze im Vergleich zur Fotoaufnahme. Links das Ergebnis der 3D-Visualisierung auf Basis von IRS-1C-Daten mit der begrenzten Auflösung des Bildvordergrunds. In der Mitte die Fotomontage mit standort- und dimensionsgerecht eingefügten WKA-Anlagen. Das rechte Bild zeigt die reale Situation als Foto.



Abb. 10: Visualisierungsergebnisse eines Windparks im Vergleich (links: virtuelles Bild, Mitte: Fotomontage mit virtuellen WKA, rechts: Fotoansicht)

7 Zusammenfassung

Eine möglichst realitätsnahe Visualisierung geplanter Windenergieanlagen in ihrem späteren Erscheinungsbild in der Landschaft gewinnt an Bedeutung. Mittels hochauflösender Satellitenbilddaten wie IRS-1C-Naturfarbfusionsbildern, digitalen Geländemodellen (ATKIS-DGM 25) und einfachen Konstruktionsmodellen von Windkraftanlagen gelingt eine 3D-Visualisierung mittlerer Qualität. Derartige Visualisierungen sind für relativ einfache Bewertungsaufgaben im Rahmen des Genehmigungsverfahrens hinsichtlich der Einordnung der geplanten WKA in das Landschaftsbild ausreichend. Ihr Vorteil liegt in der virtuellen „Begehbarkeit“ der Landschaft, in dem von jedem beliebigen Betrachterpunkt ein Bild der Landschaft berechnet werden kann. Selbst höchstauflösende Satelliten- oder Luftbilddaten mit geometrischen Auflösungen von 1-0,1 m bedingen allerdings einen unscharfen Bildvordergrund in der 3D-Visualisierung bei realistischen Betrachterhöhen und können die Visualisierungsergebnisse nicht wesentlich verbessern. In schwierigen Entscheidungssituationen ist darum eine Fotomontage der geplanten Anlage in die fotografierte Landschaft aufgenommen aus kritischen Sichtpositionen notwendig. Hier kann eine vorherige 3D-Visualisierung die Fotomontage wesentlich unterstützen, ist doch nur so eine standort- und dimensionsgerechte Darstellung der WKA möglich.

8 Literaturverzeichnis

- ALLNOCH, N. (2000): Zur weltweiten Entwicklung der regenerativen Energien, Energiewirtschaftliche Tagesfragen Heft 5/2000, S. 344-348.
- BERRY, J. K., BUCKLEY, D. J. & ULBRICHT, C. (1998): Visualize Realistic Landscapes, GIS World 8/1998, S. 42-47.
- Gesetz über den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz-EEG), Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 13, 29.02.2000, S. 305-309.
- HIRTZ, PH., HOFFMAN, H. & NÜESCH, D. (1999): Interactive 3D Landscape. Visualization: Improved Realism Through Use of Remote Sensing Data and Geoinformation, Proceedings of Computer Graphics International 1999, Canmore, Alberta, Canada, pp. 101-108.
- Internetmagazin www.windenergie.de und www.windkraft.de
- Leitfaden zur Genehmigung und Errichtung von Windkraftanlagen (1/1998), Freistaat Sachsen, Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung.
- MEINEL, G., HENNERSDORF, J. & LIPPOLD, R. (2000): Erstellung landesweiter IRS-1C-Satellitenbildmosaiken und ihre Anwendung in der Raumplanung, Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation 2/2000, S. 95-107.
- PLEUS, M. (1999): Visualisierung und Qualitätsprüfung von 3D-Stadtmodellen, IfGI Prints 6/1999, S. 109-120.
- RAU, A. & RENNER, F. (1999): Durch die VR-Brille – Viewer und Autorenwerkzeuge für VRML-Szenen, iX 10/1999, S. 64-69.
- Regionalplan Oberes Elbtal Osterzgebirge 1997.
- SUTER, M., HOFFMANN, H. & NÜESCH, D. (1996): Visuelle Simulation realer Landschaften als Basis für ein Virtuelles GIS, Salzburger Geographische Materialien, Heft 24, S. 218-223, Salzburg.