



## **Gutachten zum Einfluss einer Wohnbebauung auf eine Windmühle am Standort Sulingen**

**Referenz-Nummer:**

F2E-2020-TGJ-019, Rev. 0 - ungekürzte Fassung

**Auftraggeber:**

Stadtverwaltung Sulingen  
Galtener Straße 12, 27232 Sulingen

**Die Ausarbeitung des Gutachtens erfolgte durch:**

Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG  
Borsteler Chaussee 178, 22453 Hamburg, [www.f2e.de](http://www.f2e.de)

**Verfasser:**

Dr.-Ing. Thomas Hahm, Sachverständiger,

Hamburg, 06.11.2020

**Geprüft:**

Dipl.-Ing. (FH) Silva Mäusling, Sachverständige,

Hamburg, 06.11.2020

**Für weitere Auskünfte:**

Tel.: 040 53303680-0

Fax: 040 53303680-79

Silva Mäusling: [maeusling@f2e.de](mailto:maeusling@f2e.de) oder Dr. Thomas Hahm: [hahm@f2e.de](mailto:hahm@f2e.de)

**Urheber- und Nutzungsrecht:**

Urheber des Gutachtens ist die Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG. Der Auftraggeber erwirbt ein einfaches Nutzungsrecht entsprechend dem Gesetz über Urheberrecht und verwandte Schutzrechte (UrhG). Das Nutzungsrecht kann nur mit Zustimmung des Urhebers übertragen werden. Eine Veröffentlichung und Bereitstellung der ungekürzten Fassung des Gutachtens zum uneingeschränkten Download in elektronischen Medien sind verboten. Eine Einsichtnahme der gekürzten Fassung des Gutachtens gemäß UVPG §23 (2) über die zentralen Internetportale von Bund und Ländern gemäß UVPG §20 Absatz (1) wird gestattet.



## Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung.....	3
2 Grundlagen.....	4
2.1 Bewertung der Standorteignung moderner WEA.....	4
2.2 Erläuterungen zu den verwendeten Methoden.....	6
2.2.1 Bestimmung der Umgebungsturbulenzintensität.....	6
2.2.2 Bestimmung der effektiven Turbulenzintensitäten.....	7
2.2.3 Bewertung von Einzelstrukturen.....	7
3 Eingangsdaten.....	9
3.1 Standort und Bebauungsplan.....	9
3.2 Windgeschwindigkeitsverteilung am Standort.....	10
4 Bestimmung der Standortbedingungen.....	11
4.1 Standortbesichtigung.....	11
4.2 Ergebnisse Standortbedingungen.....	11
4.2.1 Umgebungsturbulenzintensität.....	11
4.2.2 Weitere Windbedingungen.....	16
5 Bewertung.....	16
6 Zusammenfassung.....	17
7 Formelzeichen und Abkürzungen.....	18
8 Literaturangaben.....	18



## 1 Aufgabenstellung

Die Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG ist beauftragt worden, den Einfluss einer geplanten Wohnbebauung auf eine historische Windmühle am Standort Sulingen zu betrachten und zu bewerten.

Konkret ist zu bewerten, inwieweit es durch die geplante Bebauung zu schädlichen Einflüssen auf die Windmühle kommen kann. Mit schädlichen Einflüssen sind hier Windbedingungen gemeint, die den sicheren Betrieb der Windmühle gefährden, da sie zu unzulässigen Ermüdungs- oder Extremlasten führen.

Da für historische Windmühlen keine Auslegungswerte für einzelne Windparameter vorliegen, wie es sie für moderne Windenergieanlagen (WEA) entsprechend der DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen /2.4, 2.5, 2.6/ gibt, kann keine direkte Bewertung von Ermüdungs- und Extremlasten erfolgen. Vielmehr können die durch die Wohnbebauung entstehenden Windbedingungen nur mit den sonstigen, schon vorliegenden Windbedingungen am Standort verglichen werden, um zu einer Bewertung zu kommen.

Hierzu werden die Gebäude und der Bewuchs in der Umgebung der Windmühle vor Ort aufgenommen. Auf Basis dieses Vergleichs wird anschließend die Möglichkeit einer Wohnbebauung bewertet, wobei auch lokale direkte Einflüsse der am dichtesten geplanten Gebäude berücksichtigt werden.



## 2 Grundlagen

Von modernen WEA ist bekannt, dass für die Integrität der Konstruktion die Windbedingungen die primär zu berücksichtigenden Einflussfaktoren sind. Im folgenden soll daher kurz das Verfahren zur Bewertung der Standorteignung moderner WEA skizziert werden, da es als Vorlage für die Bewertung des Einflusses der Wohnbebauung auf die Windmühle dient.

### 2.1 Bewertung der Standorteignung moderner WEA

Gemäß DIBt-Richtlinie /2.4, 2.5, 2.6/ kann die Standorteignung einer WEA durch einen Vergleich der standortspezifischen Windbedingungen mit den Windbedingungen der Typenprüfung erfolgen. Dabei sind für moderne WEA folgende Windbedingungen auf Nabenhöhe nachzuweisen:

- 10-min-Mittelwert der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe mit einem Wiederkehrzeitraum von 50 Jahren  $v_{50}$ ,
- Windgeschwindigkeitsverteilung im Bereich von  $0.2v_{ref} - 0.4v_{ref}$
- Turbulenzintensität für Windgeschwindigkeiten von  $0.2v_{ref} - 0.4v_{ref}$
- Extremwerte der Turbulenzintensität,
- Höhenexponent  $\alpha$  des vertikalen Windgeschwindigkeitsprofils,
- mittlere Neigung der Anströmung,
- mittlere Luftdichte  $\rho$ .

Überschreitungen der Extremwerte der Turbulenzintensität treten typischerweise stets mit Überschreitungen der Auslegungswerte der Turbulenzintensität auf. Für einen Nachweis durch einen Vergleich der Windbedingungen werden die Extremwerte der Turbulenzintensität daher in Deutschland üblicherweise nicht explizit nachgewiesen.

Den Ermittlungen der Standortbedingungen ist nach /2.6/ dabei eine Standortbesichtigung zugrunde zu legen.

Alternativ zum oben genannten Nachweis nach /2.1, 2.2/ kann nach /2.6/ ein vereinfachtes Verfahren angewendet werden, wenn der jeweilige Standort der geplanten WEA nicht orografisch komplex gemäß der Definition in /2.1, 2.2/ ist. Nach dem vereinfachten Verfahren sind folgende Windbedingungen auf Nabenhöhe nachzuweisen:

- mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe,
- Turbulenzintensität,
- 10-min-Mittelwert der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe mit einem



Wiederkehrzeitraum von 50 Jahren  $v_{50}$ .

Der nachzuweisenden Turbulenzintensität kommt insofern eine besondere Bedeutung zu, da die Turbulenzintensität die einzige Windbedingung ist, über die eine Bewertung des Einflusses der WEA untereinander erfolgt.

Auch für die Wohnbebauung gilt, dass sie in Bezug auf die Belastung der Windmühle weder die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit noch den Extremwind negativ beeinflusst. Auch hier kommt der Turbulenzintensität daher eine zentrale Bedeutung zu.

Wird die Wohnbebauung sehr dicht an die Windmühle geplant, kann es aufgrund von Rezirkulationen zu starken Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen kommen (siehe Abbildung 2.1.1).

Diese Effekte beeinflussen zusätzlich die Schräganströmung, das Höhenprofil der Windgeschwindigkeit sowie die Turbulenzintensität. Diese Effekte sind daher durch einen ausreichenden Abstand entweder auszuschließen oder gesondert zu berücksichtigen.

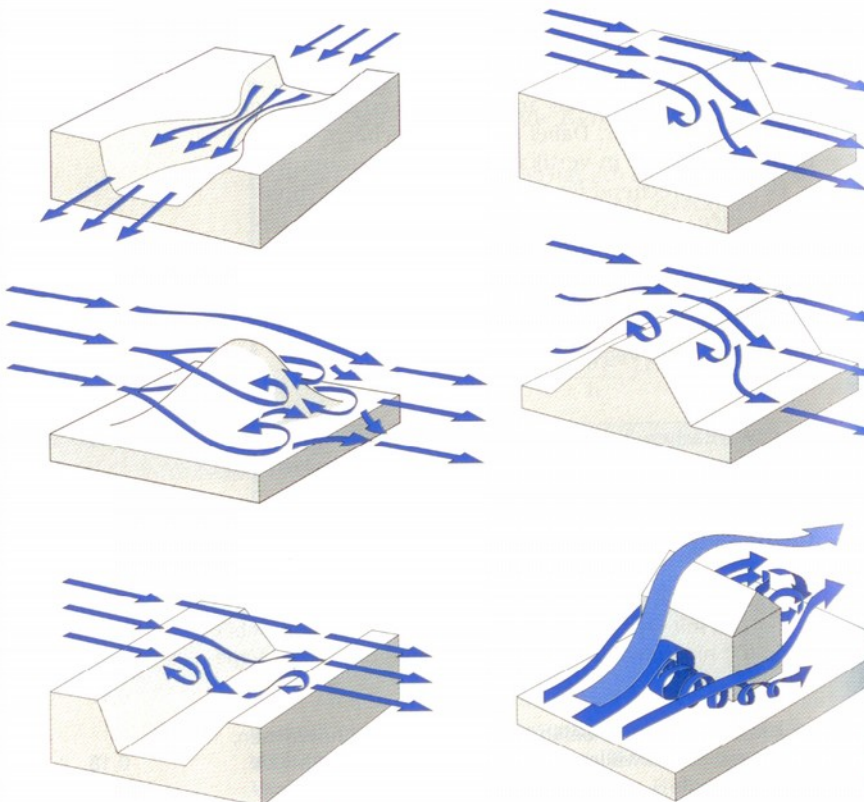


Abbildung 2.1.1: Einfluss orografisch komplexer Standorte bzw. baulicher Strukturen auf das Windfeld /1.9/.



## **2.2 Erläuterungen zu den verwendeten Methoden**

Wie in Kapitel 2.1 erläutert erfolgt die Bewertung des Einflusses der Wohnbebauung auf die Windmühle in erster Linie über den Windparameter Turbulenzintensität. Weitere Windparameter wie Schräganströmung und das Höhenprofil der Windgeschwindigkeit kommen hinzu, wenn ein ausreichender Abstand der einzelnen Gebäude zur Windmühle nicht gewährleistet werden kann.

### **2.2.1 Bestimmung der Umgebungsturbulenzintensität**

Die Turbulenzintensität ist definiert als das Verhältnis der Standardabweichung der zeitlichen Windgeschwindigkeitsverteilung zu ihrem Mittelwert bezogen auf ein Intervall von 600s.

Dabei wird nicht die mittlere Umgebungsturbulenzintensität sondern eine repräsentative Turbulenzintensität zugrunde zu legen. Die repräsentative Turbulenzintensität ergibt sich aus der Addition der mittleren Umgebungsturbulenzintensität und der 1.28fachen Standardabweichung der Umgebungsturbulenzintensität und deckt damit einen Großteil der am Standort auftretenden Turbulenzen ab.

Wenn keine ausreichenden Messdaten zur Turbulenzintensität am Standort vorliegen, wird die mittlere langfristig zu erwartende Umgebungsturbulenzintensität rechnerisch ermittelt.

Im Bereich der atmosphärischen Bodengrenzschicht ergibt sich die zu berücksichtigende Umgebungsturbulenzintensität im Wesentlichen aus dem Einfluss der Rauigkeitselemente des Bodens wie Bäumen, Büschen, Bauwerken etc.. Hierzu erfolgt eine Typisierung von Geländeoberflächen hinsichtlich ihres Bewuchses, ihrer Bebauung und Nutzung auf Basis detaillierter Satellitendaten zur Bodenbedeckung /1.5/, wobei Geländeabschnitte bis 25km Entfernung um die jeweilige Koordinate einbezogen werden. Den einzelnen Geländeabschnitten werden anschließend Rauigkeitsklassen gemäß der Empfehlungen des für die Kommission der Europäischen Gemeinschaften veröffentlichten Europäischen Windatlanten /1.2/ zugeordnet. Der Einfluss der verschiedenen Geländeabschnitte wird abhängig vom Abstand zur Koordinate in zwölf Richtungssektoren à 30° bewertet, wodurch sich gewichtete Mittel für die Rauigkeiten in den jeweiligen Sektoren ergeben.

Auf Grundlage dieser Rauigkeitsklassifizierung werden die notwendigen Werte von uns auf Basis der Empfehlungen der VDI-Richtlinie VDI 3783 Blatt 12 /1.1/ sowie der DIN EN 1991-1-4 /2.7/ bestimmt.

Die zu berücksichtigenden Umgebungsturbulenzintensitäten sind im Gegensatz zu den Rauigkeiten nicht nur richtungsabhängig, sondern auch abhängig von der



Windgeschwindigkeit und Höhe über Grund und werden entsprechend für die verschiedenen Richtungen und Windgeschwindigkeiten ermittelt. Der Windgeschwindigkeitsverlauf orientiert sich dabei am Normalen Turbulenzmodell (NTM) der IEC 61400-1 /2.2/.

Einzelstrukturen und orografische Hindernisse, die auf Grund ihrer Entfernung und Höhe so groß sind, dass der direkte Einfluss der Nachlaufströmung dieser Einzelstrukturen und orografischen Hindernisse auf den Rotor einer WEA nicht ausgeschlossen werden kann, können nicht als Rauigkeitselemente aufgelöst werden. Ihr Einfluss ist gegebenenfalls gesondert zu bewerten (siehe hierzu Kapitel 2.2.3).

### **2.2.2 Bestimmung der effektiven Turbulenzintensitäten**

In /1.3/ ist ein Verfahren beschrieben, um den Einfluss mehrerer, verschieden weit entfernter WEA unter Berücksichtigung der Häufigkeit der Nachlaufsituationen zu bewerten. Die Bewertung erfolgt mit Hilfe einer effektiven Turbulenzintensität.

Die effektive Turbulenzintensität mittelt dabei alle Einflüsse aus den verschiedenen Windrichtungen. Sie wird daher hier ebenfalls verwendet, um die Umgebungsturbulenzintensitäten aus den verschiedenen Windrichtungen zusammenzuführen.

### **2.2.3 Bewertung von Einzelstrukturen**

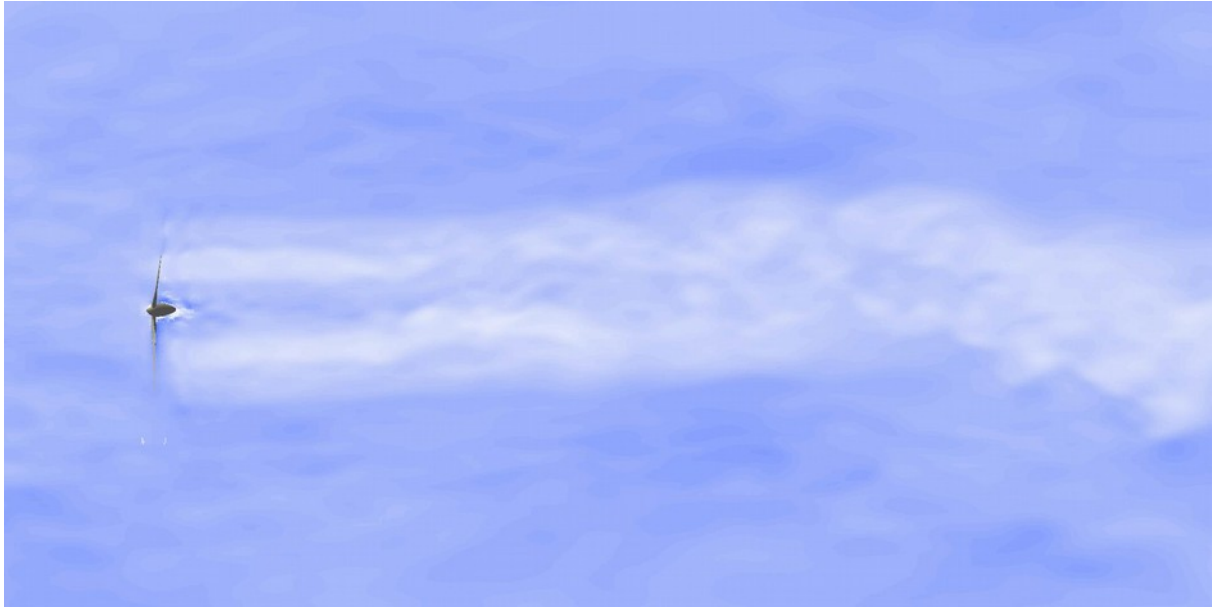
Einzelstrukturen, deren direkte Nachlaufzone nicht bis zum Rotor der WEA bzw. in diesem Fall der Windmühle reicht, können über eine Erhöhung der Umgebungsturbulenzintensität berücksichtigt werden. Hierzu wird ein erhöhter Turbulenzstrukturparameter in den Berechnungen berücksichtigt wie er in /2.1 - 2.3/ definiert ist.

Für dichter stehende Einzelstrukturen haben sich in den letzten Jahren dreidimensionale Strömungsberechnungen (CFD) zunehmend etabliert. Eingesetzt werden Berechnungsmodelle, die eine Lösung für die Mittelwerte der Strömung berechnen, sogenannte RANS-Modelle (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Diese Modelle liefern gute Vorhersagen zur Windgeschwindigkeitsverteilung, können die Turbulenz der atmosphärischen Bodengrenzschicht jedoch nicht direkt aus den Strömungsgleichungen berechnen. Um die Turbulenz der atmosphärischen Bodengrenzschicht auch in komplexem Gelände bzw. hinter baulichen Strukturen zu erfassen sind an Stelle der RANS-Modelle sogenannte transiente Large-Eddy-Simulationen (LES) erforderlich, die gegenüber den RANS-Modellen jedoch einen um etwa den Faktor 1000 erhöhten Rechenbedarf erfordern.

Die Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG setzt die LES-Technologie für die



Simulation von Windfeldern in komplexem Gelände und für die Berechnung der Nachlaufströmung von WEA und baulichen Strukturen ein. Eine Validierung der berechneten Turbulenzintensitäten anhand von Messdaten liegt z.B. für den Nachlauf einer WEA vor /1.7, 1.8/. Abbildung 2.2.3.1 zeigt als Ergebnis einer solchen LES-Simulation das instationäre Windfeld hinter WEA.



**Abbildung 2.2.3.1:** LES-Simulation der Nachlaufströmung einer WEA (Momentaufnahme).



## 3 Eingangsdaten

### 3.1 Standort und Bebauungsplan

Am Standort Sulingen (Niedersachsen) plant der Auftraggeber die Errichtung einer Wohnbebauung in der direkten Nähe einer historischen Windmühle. Die Abbildungen 3.1.1 und 3.1.2 zeigen die Lage der Windmühle und die für die Wohnbebauung vorgesehene Fläche.

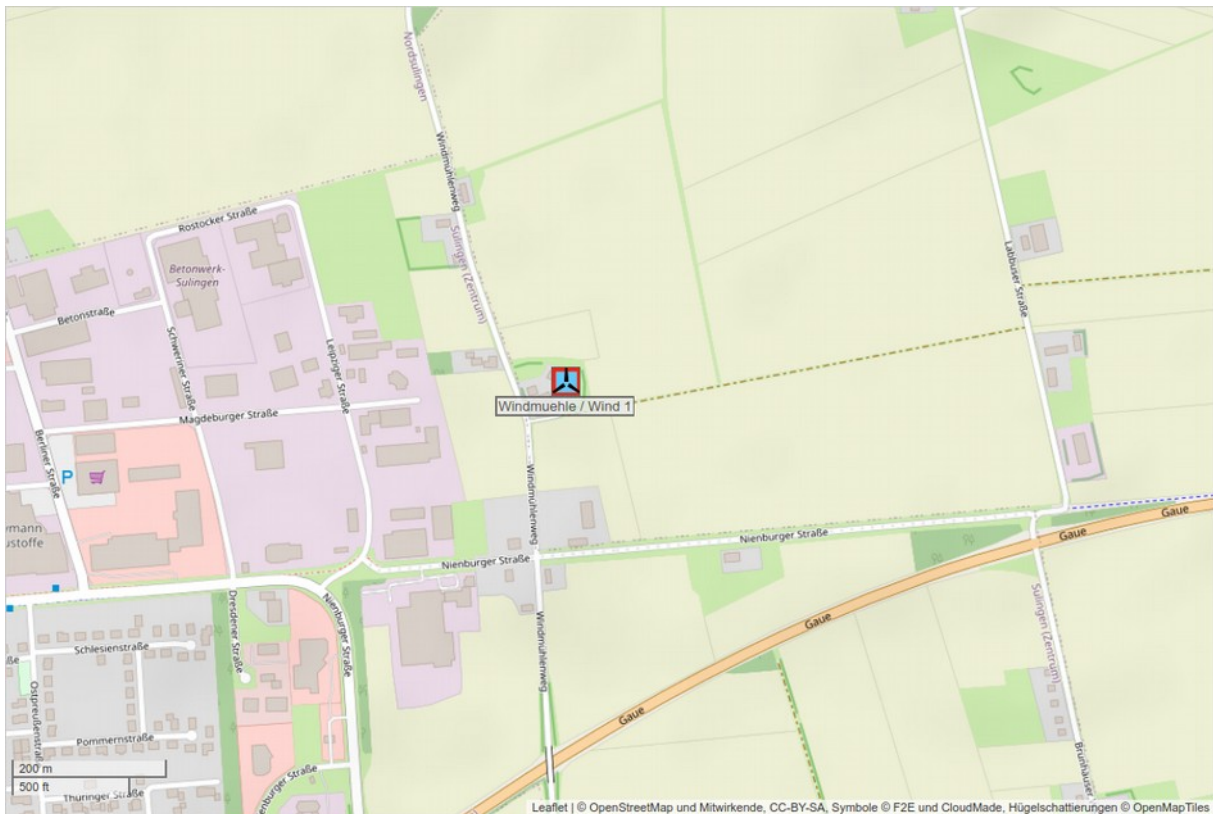


Abbildung 3.1.1: Lage der Windmühle (Karte /1.4/).

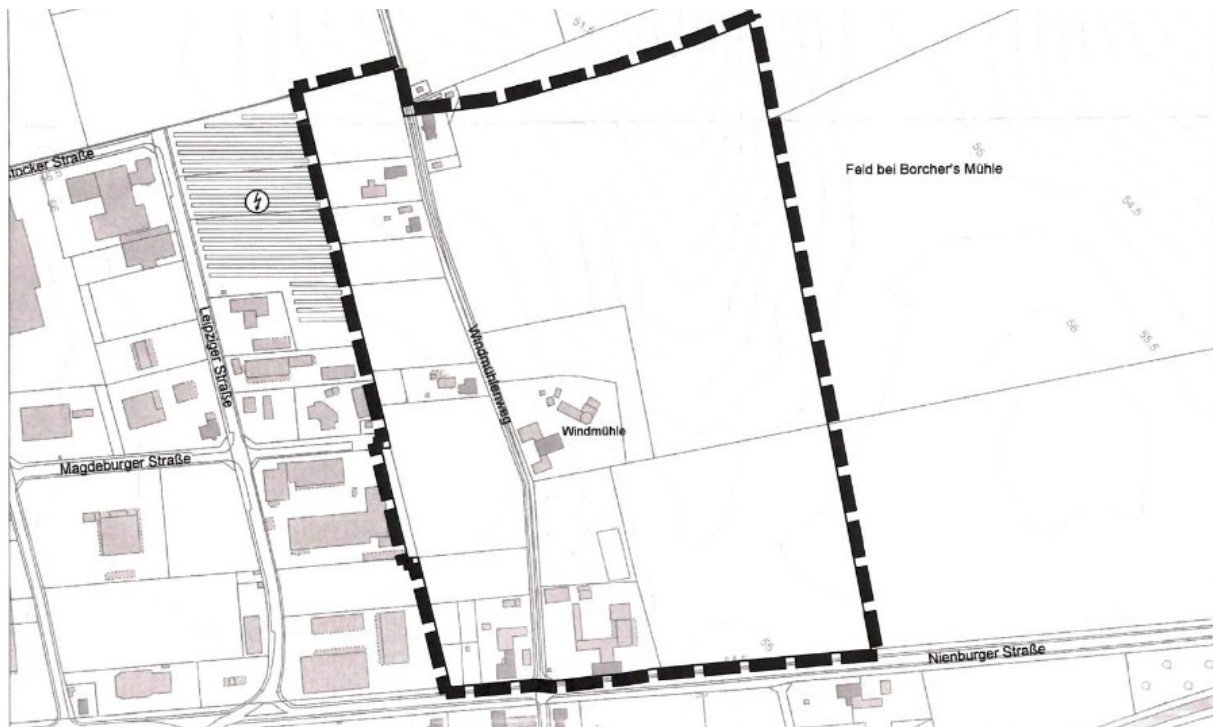


Abbildung 3.1.2: Bebauungsplan (Quelle /3.3/).

### 3.2 Windgeschwindigkeitsverteilung am Standort

Die relativen Häufigkeiten der Windrichtung und Windgeschwindigkeiten am Standort wurden /3.1/ entnommen. Datengrundlage zur Abschätzung des Windpotentials am Standort Sulingen bilden die Daten des anemos Windatlas für Deutschland mit einer räumlichen Auflösung von 3km und einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten. Der Referenzzeitraum deckt 20 Jahre von 1999 - 2019 ab / 3.1/.

Tabelle 3.2.1: Winddaten am Standort (f: Häufigkeit der Windrichtung; A und k: Skalen- und Formparameter der Weibull-Verteilung).

Ref.-Pkt.		N	NNO	ONO	O	OSO	SSO	S	SSW	WSW	W	WNW	NNW	Ges.
Wind 1	A	4.54	4.61	4.91	5.55	5.43	4.87	5.31	6.24	6.67	6.28	5.58	4.84	5.75
	k	3.09	3.06	3.21	3.79	3.90	3.70	3.43	2.92	2.67	2.61	2.79	2.95	2.75
	f	0.041	0.047	0.058	0.082	0.074	0.053	0.074	0.133	0.174	0.129	0.085	0.051	1.000
Bezugswerte														
Koordinaten des Referenzpunktes (UTM WGS84 Zone 32)								East				North		
Wind 1 (der Windmühle zugeordnet)								489368				5837398		
Höhe über Grund h								40m						



Die Parameter der Weibull-Verteilung werden genutzt, um die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen auf die jeweiligen Windgeschwindigkeiten umzurechnen. Die Weibull-Parameter werden dabei auf die Nabenhöhe der WEA umgerechnet.

## **4 Bestimmung der Standortbedingungen**

### **4.1 Standortbesichtigung**

Gemäß DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen von 2012 /2.6/ ist im Rahmen der Bewertung der Standorteignung moderner WEA eine Standortbesichtigung durchzuführen und erfolgte hier entsprechend. Im Rahmen des Nachweises der Standorteignung dient die Standortbesichtigung der Dokumentation der aktuellen Situation vor Ort und der Bestimmung der Geländekategorie nach /2.7/.

Weiterhin sollen Einzelstrukturen und orografische Hindernisse identifiziert werden, die auf Grund ihrer Entfernung und Höhe so groß sind, dass der direkte Einfluss der Nachlaufströmung dieser Einzelstrukturen und orografischen Hindernisse auf den Rotor einer WEA bzw. hier der Windmühle nicht ausgeschlossen werden kann. Diese Einzelstrukturen können dann nicht als Rauigkeitselement aufgelöst werden und ihr Einfluss ist gesondert zu bewerten.

Der Standort Sulingen wurde am 26.09.2020 besichtigt /3.2/.

Der Standort lässt sich in die Geländekategorie II - III nach /2.7/ einordnen.

In der direkten Umgebung der Windmühle befinden sich mehrere Gebäude, die als potentiell relevante Einzelstrukturen zu betrachten sind. Dazu gehört auch das Mühlengebäude mit seinem Anbau in nordwestlicher Richtung. Weiterhin ist die Mühle von teils größeren Bäumen umgeben, die hier ebenfalls als potentiell relevante Strukturen einzuschätzen sind.

Der Einfluss dieser Strukturen lässt sich aufgrund ihres Abstandes durch eine Erhöhung der Umgebungsturbulenzintensität berücksichtigen. Hierzu wird ein erhöhter Turbulenzstrukturparameter (siehe auch Kapitel 2.2.3) in den Berechnungen berücksichtigt.

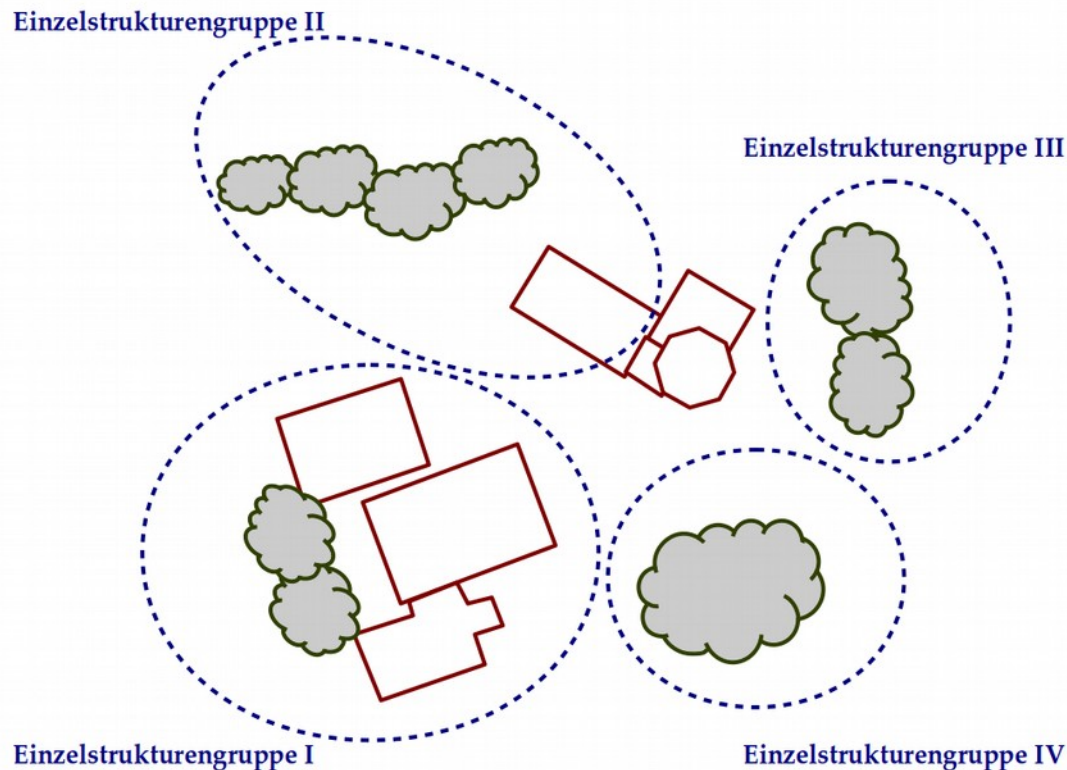
### **4.2 Ergebnisse Standortbedingungen**

#### **4.2.1 Umgebungsturbulenzintensität**

Die Umgebungsturbulenzintensität wird entsprechend dem in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Vorgehen bestimmt. Die Bewertung des Orografieinflusses erfolgt im vorliegenden Fall auf Basis von Höhendaten nach /1.6/.



Die Berücksichtigung der Einzelstrukturen erfolgt über Turbulenzstrukturparameter. Die in der direkten Umgebung befindlichen Einzelstrukturen werden hierzu in vier Gruppen I - IV entsprechend Abbildung 4.2.1.1 zusammengefasst.

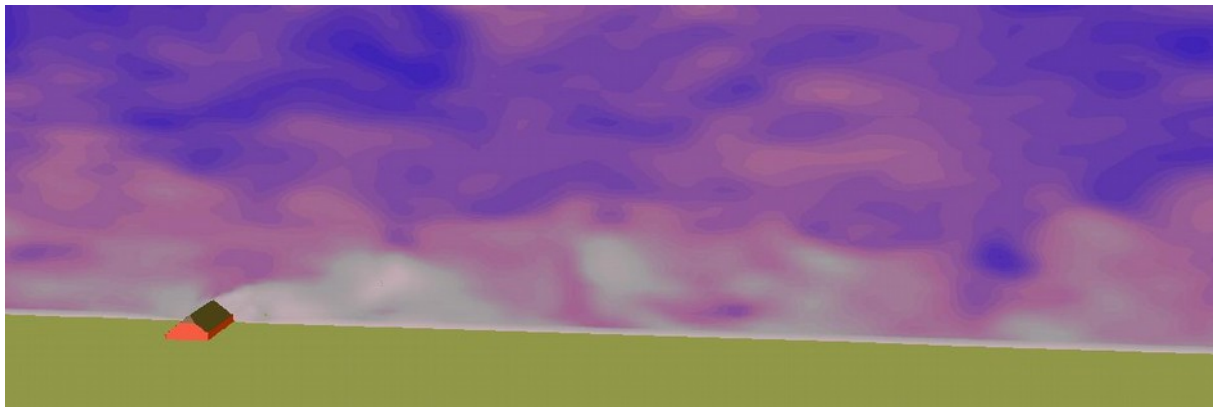


*Abbildung 4.2.1.1: Gruppierung der Einzelstrukturen am Standort Sulingen.*

Die Einzelstrukturengruppe I wurde hierbei als die Einzelstrukturengruppe mit dem höchsten Einfluss identifiziert. Die größten Turbulenzerhöhungen resultieren dabei aus dem Nachlauf des in dieser Gruppe höchsten Gebäudes.

Zur Festlegung des Turbulenzstrukturparameters wurde auf eine LES-Simulation (siehe hierzu Kapitel 2.2.3) eines ähnlichen Gebäudes zurückgegriffen. Eingesetzt wurde hierfür das Programmsystem Fluent der Firma Ansys Inc.. Die Programmentwicklung und -auslieferung von Fluent ist nach BSI (British Standard Institution America Inc.; Certificate No. FM 55686; Reston VA, 2000) qualitätsgesichert.

Abbildung 4.2.1.2 zeigt eine Momentaufnahme der Strömung um das Gebäude. Dargestellt sind Flächen gleicher Windgeschwindigkeit auf einer senkrechten Schnittebene. Deutlich zu erkennen ist die turbulente Nachlaufschlepe des Gebäudes.



**Abbildung 4.2.1.2:** Momentaufnahme der Strömung (blau: hohe Windgeschwindigkeit, weiß: niedrige Windgeschwindigkeit).

Die Ergebnisse der LES-Simulation haben gezeigt, dass der Bereich der Nachlaufschlepe bis zu einer Höhe vom gut zweifachen der Firsthöhe des Gebäudes deutlich ausgeprägt ist. Dies deckt sich auch mit Untersuchungen in /1.10/. In diesem Bereich ist die Turbulenzintensität bei einer Windgeschwindigkeit von 10m/s um etwa 18 - 34 Prozentpunkte erhöht. Der Turbulenzstrukturparameter für die Einzelstrukturengruppe I wurde im Folgenden so gewählt, dass er den unteren Bereich der im Rahmen der CFD-Simulation ermittelten Erhöhung der Turbulenzintensität abbildet. Dies ist im Hinblick auf den Einfluss der geplanten Wohnbebauung konservativ, da der Einfluss der Einzelstrukturen in der Umgebung der Windmühle im Verhältnis zum Einfluss der Wohnbebauung dadurch eher unterschätzt wird.

Die Festlegung der Turbulenzstrukturparameter der anderen Einzelstrukturgruppen in der Umgebung der Windmühle erfolgte in ähnlicher Weise. Insbesondere der Einfluss der Bäume ist jedoch mit größeren Unsicherheiten behaftet, da er zum einen nicht durch entsprechende CFD-Simulationen validiert ist und mit der Belaubung entsprechend stark schwankt. Es wurde daher auch der Fall betrachtet, dass nur die Einzelstrukturengruppe I mit dem dominierenden Gebäude südwestlich der Windmühle berücksichtigt wird.

Insgesamt wurde die Umgebungsturbulenzintensität für folgende Varianten bestimmt:

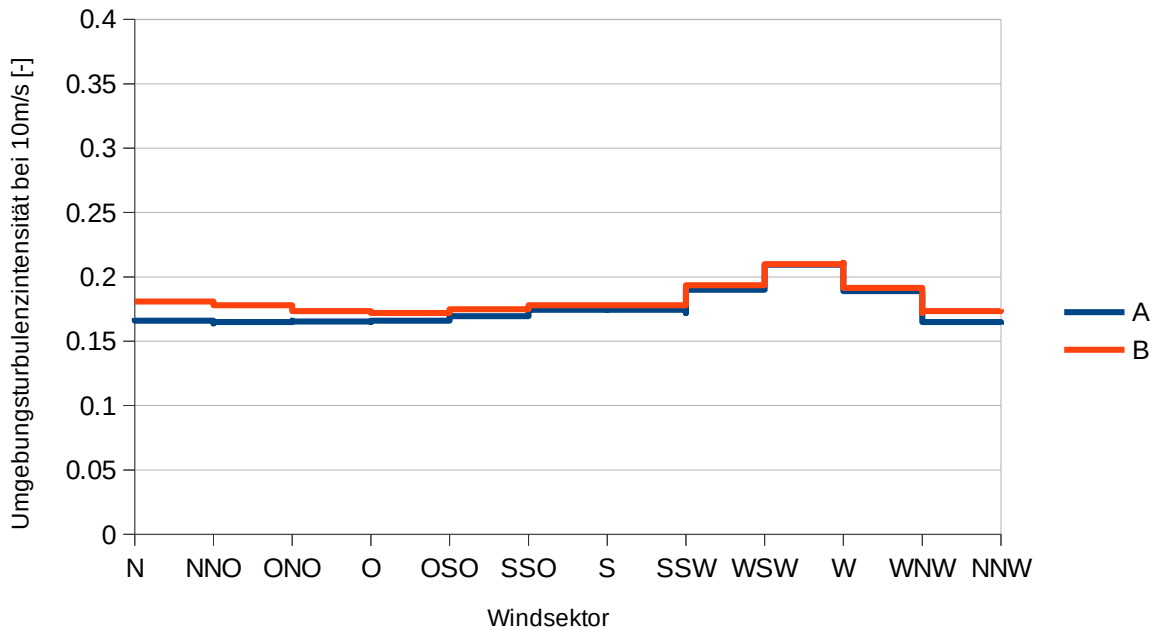
- Variante A:
  - keine Berücksichtigung der Wohnbebauung im Bereich des Bebauungsplanes
  - keine Berücksichtigung der Einzelstrukturen in der Umgebung der Windmühle.



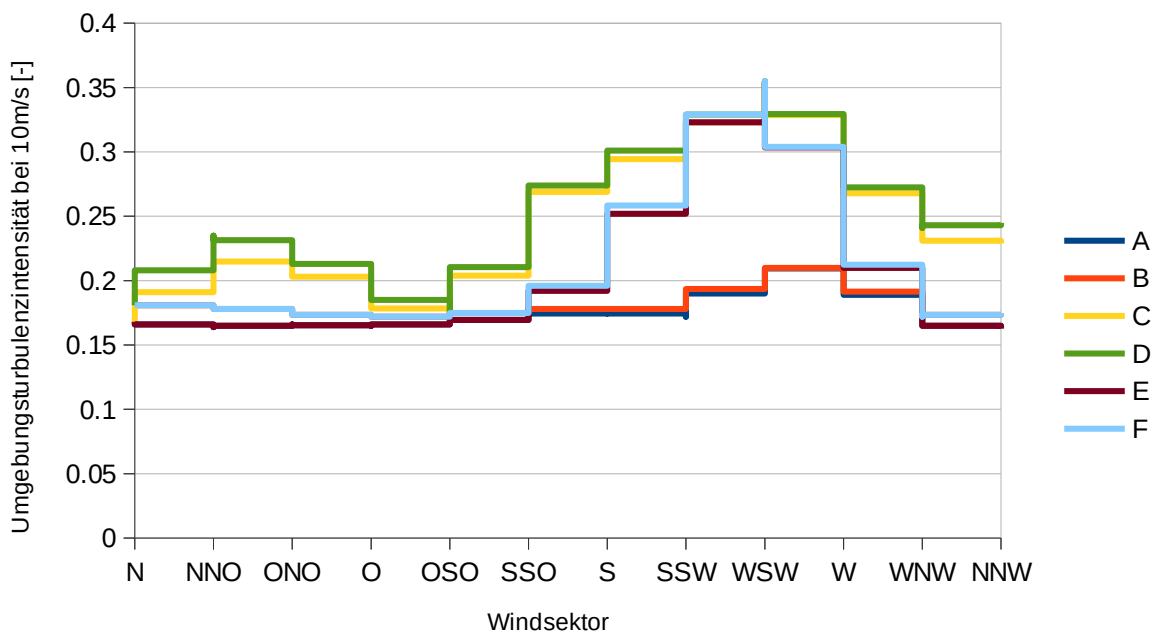
- Variante B:
  - Berücksichtigung der Wohnbebauung im Bereich des Bebauungsplanes
  - keine Berücksichtigung der Einzelstrukturen in der Umgebung der Windmühle.
- Variante C:
  - keine Berücksichtigung der Wohnbebauung im Bereich des Bebauungsplanes
  - Berücksichtigung aller Einzelstrukturen in der Umgebung der Windmühle.
- Variante D:
  - Berücksichtigung der Wohnbebauung im Bereich des Bebauungsplanes
  - Berücksichtigung aller Einzelstrukturen in der Umgebung der Windmühle.
- Variante E:
  - keine Berücksichtigung der Wohnbebauung im Bereich des Bebauungsplanes
  - Berücksichtigung nur der Einzelstrukturengruppe I in der Umgebung der Windmühle.
- Variante F:
  - Berücksichtigung der Wohnbebauung im Bereich des Bebauungsplanes
  - Berücksichtigung nur der Einzelstrukturengruppe I in der Umgebung der Windmühle.

Abbildung 4.2.1.3 zeigt die ermittelten Umgebungsturbulenzintensitäten für die beiden Varianten A und B. Die Einzelstrukturen (Gebäude und Bäume) in der direkten Umgebung der Windmühle sind in diesen Varianten nicht berücksichtigt. Man erkennt, dass die Wohnbebauung die Umgebungsturbulenzintensität vor allem in den nördlichen Sektoren erhöht.

Abbildung 4.2.1.4 zeigt die ermittelten Umgebungsturbulenzintensitäten für alle Varianten A - F. In den Varianten C und D ist der Einfluss aller benachbarten Einzelstrukturen und in den Varianten E und F ist nur der Einfluss der Einzelstrukturengruppe I berücksichtigt. Man erkennt sehr gut den dominierenden Einfluss der Einzelstrukturen auf die Umgebungsturbulenzintensität, der die Windmühle am Standort ausgesetzt ist.



**Abbildung 4.2.1.3:** Umgebungsturbulenzintensität für die Varianten A und B bei einer Windgeschwindigkeit von 10m/s.



**Abbildung 4.2.1.4:** Umgebungsturbulenzintensität für die Varianten A - F bei einer Windgeschwindigkeit von 10m/s.



## 4.2.2 Weitere Windbedingungen

Gemäß Kapitel 2.1 sind weitere Windbedingungen zu betrachten, wenn die einzelnen Gebäude der geplanten Wohnbebauung so dicht an der Windmühle stehen, dass es aufgrund von Rezirkulationen zu starken Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen kommt. Das sollte im vorliegenden Fall ausgeschlossen werden.

Bei einer maximalen Firsthöhe von 7m für die Wohnbebauung lässt sich die Länge des kritischen Bereichs hinter den einzelnen Gebäuden mit etwa 15 - 18m abschätzen.

Außerhalb dieses kritischen Bereichs kommt es noch zu einem deutlichen Einfluss auf die Umgebungsturbulenzintensität, der über das in Kapitel 4.2.1 in der Variante B dargestellte Maß hinausgeht. Um diesen Einfluss ebenfalls auszuschließen, ist das Dreifache der genannten Länge zu berücksichtigen, was im vorliegenden Fall einem Mindestabstand der einzelnen Gebäude der Wohnbebauung zur Windmühle von 50m entspricht.

## 5 Bewertung

Für die Bewertung werden die sektoriellen Umgebungsturbulenzintensitäten für die in Kapitel 4.2.1 definierten Varianten A - F in Form der effektiven Turbulenzintensität zusammengefasst. Die effektiven Turbulenzintensitäten können als Maß für die Ermüdungsbelastung der Windmühle anschließend miteinander verglichen werden.

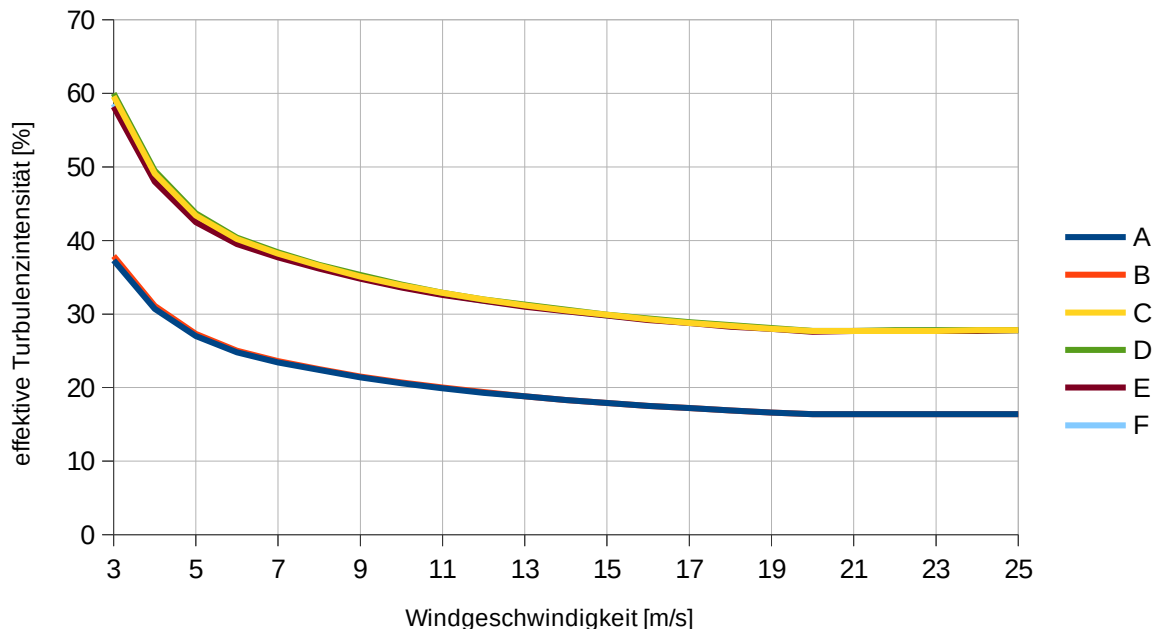
Abbildung 5.1 zeigt die Verläufe der effektiven Turbulenzintensität für die Varianten A - F. Die Verläufe wurden unter der Voraussetzung erstellt, dass die einzelnen Gebäude der Wohnbebauung eine Firsthöhe von 7m nicht überschreiten und einen Mindestabstand zur Windmühle von 50m einhalten.

Der Verlauf der Kurven A und B ist nahezu deckungsgleich. Selbst wenn die Windmühle frei auf dem Feld steht und die Einzelstrukturen in der direkten Umgebung der Windmühle nicht vorhanden wären, ist der Einfluss der Wohnbebauung also gering.

Die Kurven für die Varianten C - F liegen im Vergleich zu den Kurven für die Varianten A und B deutlich höher. Dabei repräsentiert der Verlauf für Variante C die aktuelle Belastung der WEA. In den Varianten E und F sind alle Einzelstrukturen vernachlässigt, für die sich die Turbulenzstrukturparameter nur mit einer großen Unsicherheit abschätzen lassen. Daraus lässt sich ableiten, dass das Belastungsniveau maßgeblich durch die zurzeit in der direkten Umgebung der Windmühle vorhandenen Einzelstrukturen und hier vor allem der Einzelstrukturgruppe I südwestlich der Windmühle dominiert wird. Der Einfluss der geplanten



Wohnbebauung ist demgegenüber unter den oben genannte Voraussetzungen vernachlässigbar.



**Abbildung 5.1:** Effektive Turbulenzintensitäten auf Nabenhöhe der Windmühle für die Varianten A - F.

## 6 Zusammenfassung

Die Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG ist beauftragt worden, den Einfluss einer geplanten Wohnbebauung auf eine historische Windmühle am Standort Sulingen zu betrachten und zu bewerten.

Konkret ist zu bewerten, inwieweit es durch die geplante Bebauung zu schädlichen Einflüssen auf die Windmühle kommen kann. Mit schädlichen Einflüssen sind hier Windbedingungen gemeint, die den sicheren Betrieb der Windmühle gefährden, da sie zu unzulässigen Ermüdungs- oder Extremlasten führen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das Belastungsniveau der Windmühle durch die Einzelstrukturen (Gebäude und Bewuchs) in der direkten Umgebung der Windmühle dominiert wird. Demgegenüber ist der zu erwartende Einfluss der Wohnbebauung auf die Windmühle vernachlässigbar.

Diese Aussage gilt unter der Voraussetzung, dass die einzelnen Gebäude der Wohnbebauung eine Firsthöhe von 7m nicht überschreiten und einen Mindestabstand zur Windmühle von 50m einhalten.



## 7 Formelzeichen und Abkürzungen

WEA	Windenergieanlage	
NTM	Normales Windturbulenzmodell	
UTM	Universale Transversale Mercator Projektion	
WGS	World Geodetic System 1984	
CFD	Computational Fluid Dynamics	
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes	
LES	Large Eddy Simulation	
A	Skalierungsparameter der Weibull-Verteilung	[m/s]
k	Formparameter der Weibull-Verteilung	[-]
f	Häufigkeit	[-]
$v_{50}$	10-min-Mittel der extremen Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe mit einem Wiederkehrzeitraum von 50 Jahren	[m/s]
$v_{ref}$	Auslegungswert des 10-min-Mittels der extremen Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe mit einem Wiederkehrzeitraum von 50 Jahren	[m/s]
$\rho$	Mittlere Luftdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\alpha$	Höhenexponent des vertikalen Windgeschwindigkeitsprofils	[-]

## 8 Literaturangaben

### Allgemein

- /1.1/ Verein Deutscher Ingenieure; VDI 3783 Blatt 12; Umweltmeteorologie - Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht; Dezember 2000; Düsseldorf, Deutschland.
- /1.2/ Risø National Laboratory; European Wind Atlas; 1989; Risø, Denmark.
- /1.3/ Risø National Laboratory; Frandsen, St. T.; Turbulence and turbulence-generated structural loading in windturbine clusters; Wind Energy Department; Januar 2007; Roskilde, Risø-R-1188(EN), Denmark.
- /1.4/ OpenStreetMap und Mitwirkende; siehe Internet: <http://www.openstreetmap.org>, <http://opendatacommons.org>, <http://creativecommons.org>.
- /1.5/ European Environment Agency; CORINE Land Cover (CLC) 2018, Version 20.0; Juni 2019; Copenhagen, Denmark.
- /1.6/ Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara; Hole-filled seamless SRTM data V3; International Centre for Tropical Agriculture (CIAT); 2006; Washington, USA.
- /1.7/ Steffen Wussow, Lars Sitzki, Thomas Hahm; 3D-simulation of the turbulent wake behind a wind turbine; The Science of Making Torque from Wind, Journal of Physics: Conference Series 75 (2007) 012033.



- /1.8/ Steffen Wussow; Thomas Hahm; LES-simulation of a turbulent and meandering wake; EWEC2010 Warsaw, 20.23 April 2010.
- /1.9/ Hans Häckel; Meteorologie; UTB, Stuttgart 6. Auflage 2008.
- /1.10/ Thomas Foken; Angewandte Meteorologie - Mikrometeorologische Methoden; 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2016.

## Normen

- /2.1/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1, Wind turbines - Part 1: Design requirements; Edition 3, 2005-08; Geneva, Switzerland (Deutsche Fassung: Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 61400-1 (VDE 0127-1); Windenergieanlagen – Teil 1: Auslegungsanforderungen (IEC 61400-1:2005); Juli 2006; Berlin, Deutschland).
- /2.2/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1, Amendment 1, Wind turbines - Part 1: Design requirements; Edition 3, 2010-10; Geneva, Switzerland (Deutsche Fassung: Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 61400-1 (VDE 0127-1):2011-08; Windenergieanlagen – Teil 1: Auslegungsanforderungen (IEC 61400-1:2005 + A1:2010); August 2011; Berlin, Deutschland).
- /2.3/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1, Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements; Edition 4, 2019-12; Geneva, Switzerland (Deutsche Fassung: Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN IEC 61400-1 (VDE 0127-1); Windenergieanlagen – Teil 1: Auslegungsanforderungen (IEC 61400-1:2019); Dezember 2019; Berlin, Deutschland).
- /2.4/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt); Richtlinie für Windkraftanlagen - Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Fassung Juni 1993; 2. Aufl., 1995; Berlin, Deutschland.
- /2.5/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt); Richtlinie für Windkraftanlagen - Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Fassung März 2004; Berlin, Deutschland.
- /2.6/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt); Richtlinie für Windkraftanlagen - Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Fassung Oktober 2012 sowie korrigierte Fassung März 2015; Berlin, Deutschland.
- /2.7/ Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 1991-1-4 und DIN EN 1991-1-4/NA (Nationaler Anhang); Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten; Dezember 2010; Berlin, Deutschland.

## Projektspezifisch

- /3.1/ anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH; anemos Windatlas für Deutschland, <https://awis.anemos.de/>, Winddaten zum Standort Sulingen heruntergeladen am 09.10.2020.
- /3.2/ Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG; Dokumentation der Standortbesichtigung im Rahmen der Bewertung der Standorteignung von WEA am Standort Sulingen; Referenz-Nr.: F2E-2020-TGJ-019; September 2020; Hamburg, Deutschland.
- /3.3/ Bebauungsplan Nr. 121 „Windmühlenweg“; 2020 Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN), Grundlage: Amtliche Karte AK 5, Maßstab 1:5000.