



Industrie Service

**Mehr Wert.  
Mehr Vertrauen.**

---

## B E R I C H T

---

# RISIKOBETRACHTUNG HINSICHTLICH HAVARIE (TURMVER- SAGEN, BLATT- UND GONDELABWURF) FÜR EINE WIND- ENERGIEANLAGEN IN DER NÄHE DER AUTOBAHN A 30.

Datum: 11.04.2022

Unsere Zeichen:  
IS-ESR4-MUC/wei

Das Dokument besteht aus  
20 Seiten.  
Seite 1 von 20

Die auszugsweise Wiedergabe  
des Dokumentes und die  
Verwendung zu Werbezwecken  
bedürfen der schriftlichen  
Genehmigung der  
TÜV SÜD Industrie Service  
GmbH.

Dieser Bericht wurde erstellt für:

---



**ENERGY FARMING**

Energie aus der Heimat.

**EFG Energy-Farming Holding GmbH**

Bornweg 28

D-49152 Bad Essen

Die Prüfergebnisse beziehen sich  
ausschließlich auf die  
untersuchten Prüfgegenstände.



Industrie Service

**Anlage / Objekt:** WEA Melle

**Auftraggeber:** EFG Energy-Farming Holding GmbH  
Bornweg 28  
D-49152 Bad Essen

**TÜV Berichtsnr.:** TÜVIS-ESR4-MUC 3612396

**Datum / Revision:** 11. April 2022  
Rev. 0

**Abteilung:** IS-ESR4-MUC  
Systemtechnik und Risikomanagement

**Verfasser:**

.....  
Thorsten Weidl

**Freigabe:**

.....  
Hans-Joachim Rauh



## Inhalt

Inhalt .....	3
1 Ausgangssituation .....	4
2 Risiko und Risikoakzeptanzkriterien .....	6
2.1 Risikobegriff .....	6
2.2 Risikobewertung.....	6
2.3 Prinzip der Minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM).....	7
2.4 Das ALARP-Prinzip .....	8
2.5 Im Rahmen der Untersuchung verwendete Risikokategorien .....	8
2.6 Vergleichsrisiken .....	10
3 Risikoanalyse für den Einfluss der Windenergieanlage auf die A30.....	11
3.1 Berechnung der Schadenswahrscheinlichkeit .....	11
3.1.1 Rotorblattabwurf.....	11
3.1.2 Gondelabwurf.....	15
3.1.3 Turmbruch.....	16
3.2 Ermittlung des Risikos .....	16
3.2.1 Wurf- bzw. Flugweiten.....	16
3.2.2 Exposition .....	16
3.3 Ermittlung des kollektiven Risikos für einen Personenschaden auf der A 30 .....	18
4 Resümee.....	19
5 Quellenverzeichnis .....	20

# 1 Ausgangssituation

In der Gemarkung Uedinghausen-Warringhof, Flur 4, Flurstück 106/10 sollen 2 ältere Windenergieanlagen durch eine neuere vom Typ Norden N163/6.8 ersetzt werden. Durch den geplanten Standort und die veränderten Abmessungen der neuen WEA ist die nahegelegene Autobahn A 30 möglicherweise im Gefährdungsbereich hinsichtlich Trümmerflug der neuen WEA. Die Lage der WEA zur A 30 kann aus folgender Abbildung 1 entnommen werden.

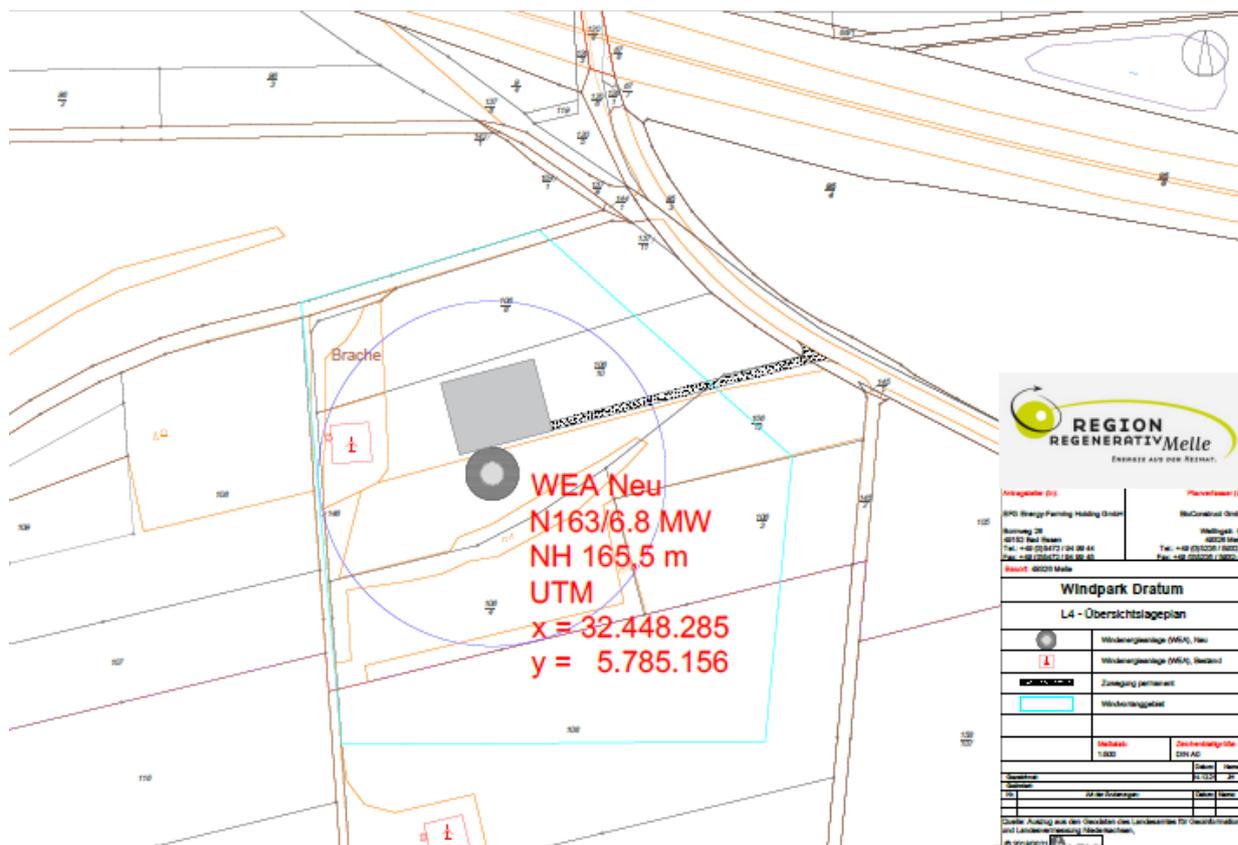


Abbildung 1: Lage der Windenergieanlagen WEA zur Autobahn A 30 im Norden

Im vorliegenden Bericht wird die das Risiko durch

- Rotorblattabwurf
- Turmbruch  
und
- Gondelabwurf

ermittelt und bewertet.



In folgender Tabelle 1 sind die für die Berechnung verwendeten Daten aufgelistet:

Parameter	Angaben zur WEA
Rotordurchmesser	163 m
Nabenhöhe	165,5 m
Betriebsdrehzahl bei Nennleistung	10 U/min
R <sub>z</sub>	23,4 m
H <sub>m</sub>	163 m
Masse Rotorblatt	26.900 kg
Min. Abstand zur A 30	382 m
Winkel zur A30 (von der x-Achse)	17°

*Tabelle 1: Wesentliche Eingangsdaten für die Berechnung, Daten aus [6]*

## 2 Risiko und Risikoakzeptanzkriterien

### 2.1 Risikobegriff

Risikoanalysen sind geeignete Methoden, um Unsicherheiten qualitativ oder quantitativ zu beschreiben und die Auswirkungen verschiedener Entscheidungsoptionen zu berechnen. Dazu verwenden Risikoanalysen die gängige "Formel"

$$\text{Risiko} = \text{Eintrittshäufigkeit} * \text{Ausmaß der Auswirkungen eines Ereignisses}$$

Mit einer gewissen Eintrittshäufigkeit / Wahrscheinlichkeit können im täglichen Leben Ereignisse eintreten (bspw. Unfälle), die unerwünschte Auswirkungen (Schäden, Verletzung, Tod...) nach sich ziehen können. Die *Wahrscheinlichkeit* ist ein statistischer Begriff und spiegelt die Anzahl der Vorfälle, die innerhalb eines Zeitraums auftreten, wider. Die *Auswirkungen* der Folgen des Eintretens eines Vorfalls können je nach Zweck der Risikoanalyse unterschiedlich definiert werden. Sicherheitsorientierte Analysen im ingenieurwissenschaftlichen und technologischen Kontext untersuchen in erster Linie Vorfälle, die potenzielle Folgen für Leib und Leben haben, während Umwelt- und/oder Sachschäden im Allgemeinen in finanziellen Einheiten ausgedrückt ("monetarisiert") werden.

### 2.2 Risikobewertung

Im allgemeinen werden Risiken bei jeglichen Aktivitäten (z.B. Haushalt, Autofahren, Sport, Beruf,...) akzeptiert oder vielmehr in Kauf genommen. Bei geringerem Schadensausmaß kann die Eintrittswahrscheinlichkeit höher sein, damit das Risiko üblicherweise **akzeptabel** ist und umgekehrt. Hohe Schäden, die dazu noch häufig auftreten, sind hingegen nicht annehmbar und das zugehörige Risiko **unakzeptabel**. Zwischen den akzeptablen und den unakzeptablen Risiken liegt ein Übergangsbereich, in dem die Risiken möglicherweise **tolerabel** sind und ggf. mit (technischen / organisatorischen) Verbesserungen reduziert werden können. Diese Akzeptanzbereiche können grafisch in einer Risikomatrix dargestellt werden (s. Abbildung 2).

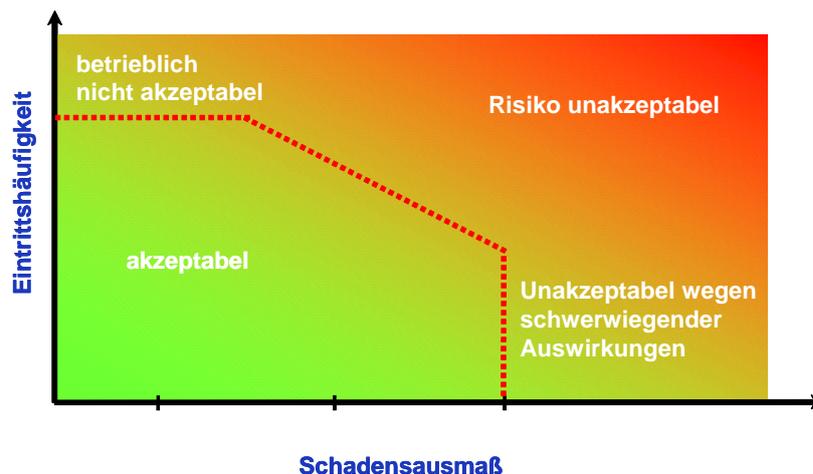


Abbildung 2: Risikomatrix

Risikoanalysen dienen dazu, eine erste Aussage über das absolute Risiko zu treffen. Um im Anschluss risikobasierte Entscheidungen zu treffen, muss dieser Risikowert klassifiziert und mit "allgemein akzeptierten" Risiken verglichen werden. Diese offensichtlich komplexe Aufgabe ist mit Unsicherheiten behaftet, da die Grenze zwischen akzeptablem und inakzeptablem Risiko nicht klar definiert ist.



### Beispiel:

Die Bewegung eines Fahrzeugs stellt eine (zulässige) Gefahr dar. Die Einhaltung von Geschwindigkeitsbegrenzungen basiert auf der Annahme, dass sowohl Häufigkeit von Zwischenfällen als auch deren Auswirkungen im Allgemeinen akzeptabel sind. Das deutsche Recht bietet keine explizite Quantifizierung dieses Grenzsrisikos.

Generell können dabei zwei Kriterien betrachtet werden:

1. Übersteigt das Schadensausmaß eine bestimmte Grenze, muss immer Abhilfe geschaffen werden. Ein derartiges Ereignis liegt unabhängig von der Eintrittswahrscheinlichkeit stets im nicht akzeptablen Abschnitt der Grafik.
2. Ebenso verhält es sich mit Ereignissen, die zu häufig eintreten. Unabhängig vom Schadensausmaß gibt es auch hier eine Grenze zum nicht akzeptablen Bereich, da allein schon aus betrieblichen Gründen das Risiko zu hoch wird.

Bei einer Technologie, die mit sehr großen Ängsten behaftet ist, kann der Übergangsbereich sehr ausgedehnt sein. Ein weiterer Aspekt bei der Beurteilung eines Risikos ist der Grad der Freiwilligkeit der Risikoexposition, da freiwillig eingegangene Risiken (z. B. Sport) eher akzeptiert werden als unfreiwillig eingegangene Risiken, wie sie etwa mit der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel oder von Gebäuden verbunden sind.

Dies macht deutlich, dass neben der „absoluten Risikobewertung“ einer Anlage auch die relative Risikobetrachtung von Bedeutung ist und die vergleichende Risikobetrachtung mit üblicherweise akzeptierten Risiken der Gesellschaft erforderlich ist.

### 2.3 Prinzip der Minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM)

Zur Bewertung der absoluten Risiken muss zunächst geklärt werden, welche Risiken auf eine Person einwirken. Dazu wird in [10] das Prinzip der minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM) beschrieben. Dies ist eine Methode, um absolute Akzeptanzgrenzen für eine beliebige Person ausgehend von der „Endogenen Sterblichkeit R“ zu bestimmen.

In wirtschaftlich gut entwickelten Ländern ist R für die Gruppe der 5- bis 15-jährigen am niedrigsten. Die unterste Stufe der endogenen Sterblichkeit, bekannt als „Minimale endogene Sterblichkeit  $R_m$ “, wurde bestimmt als  $R_m = 2 \cdot 10^{-4}$  Todesfälle / Person und Jahr.

Von technischen Anlagen geht ein gewisses Risiko  $R_t$  aus, dass aufgrund ihrer Einwirkungen unbeteiligte Dritte sterben können. Gleichzeitig dürfen neue technische Anlagen das bereits herrschende Risiko zu sterben ( $R_m$ ) nicht wesentlich erhöhen. Nachdem eine einzelne Person meist mehreren Anlagen gleichzeitig ausgesetzt ist, kann also eine Anlage nur einen gewissen Teil zur minimalen endogenen Sterblichkeit „beitragen“, sodass die Gesamtheit der Risiken ausgehend von technischen Anlagen die minimale endogene Sterblichkeit nicht überschreiten darf:

$$\sum_{i=1}^n R_{t,i} \leq R_m$$

Als Faustregel wird in [10]  $n \leq 20$  angegeben. Das bedeutet, dass eine neue technische Anlage maximal 5% von  $R_m$  ausmachen darf.

Zudem werden nicht nur Todesfälle, sondern auch schwere und leichte Verletzungen mitberücksichtigt. Daher wird folgender Zusammenhang aufgestellt:



$$1 \text{ Toter} = 10 \text{ Schwerverletzte} = 100 \text{ Leichtverletzte}$$

Aus dem MEM-Prinzip können somit folgende Grenzwerte zur Bestimmung der Risikoakzeptanzkriterien festgelegt:

- $R_1 \leq 10^{-5}$  Todesopfer / Person und Jahr
- $R_2 \leq 10^{-4}$  Schwerverletzte / Person und Jahr
- $R_3 \leq 10^{-3}$  Leichtverletzte / Person und Jahr

Risiken, die darüber liegen, sind für Privatpersonen absolut unakzeptabel. Für beruflich exponierte Personen wird diese Grenze im Allgemeinen um einen Faktor 10 höher definiert.

## 2.4 Das ALARP-Prinzip

ALARP steht für „as low as reasonably practicable“ und beschreibt die gesetzliche Pflicht Risiken zu minimieren. Grundsätzlich ist es sinnvoll Maßnahmen zu ergreifen, um bestehende Risiken zu reduzieren. Es ist jedoch nur bis zu einem gewissen Maße sinnvoll und wirtschaftlich, vertretbar Risiken zu reduzieren. Zum einen müssen Risiken demnach nicht um jeden Preis auf ein *Minimum* gesenkt werden und zum anderen müssen Risiken, die bereits klein sind, nicht weiter reduziert werden. Es sind also nur Maßnahmen zu ergreifen, die die Risiken so weit senken, wie es vernünftigerweise praktikabel ist.

Das bedeutet, dass eine Kosten-Nutzen-Abwägung vor der Umsetzung von Maßnahmen erforderlich ist. Folglich sollten die Risiken mit und ohne Berücksichtigung von reduzierenden Maßnahmen berechnet werden und so der Einfluss, der jeweiligen Maßnahmen quantifiziert und ins Verhältnis zu bei der Umsetzung entstehenden Kosten gesetzt werden.

Das ALARP-Prinzip gibt keine absoluten Grenzwerte vor, auf die die Risiken reduziert werden müssen. Gleichzeitig sollten auch tolerable Risiken, die durch vernünftigerweise praktikable und umsetzbare Maßnahmen in den akzeptablen Bereich reduziert werden können, entsprechend behandelt werden.

## 2.5 Im Rahmen der Untersuchung verwendete Risikokategorien

In der Risikomatrix (s. Abbildung 2 im Abschnitt 2.2) ist ein kontinuierlicher Verlauf des Risikobereichs von akzeptabel über tolerabel bis hin zu unakzeptabel angedeutet. Für eine Risikobewertung ist es aber notwendig die verschiedenen Kategorien zu diskretisieren und jeweilige Grenzen zu definieren, um so die berechneten Risiken einordnen, bewerten und entsprechend behandeln zu können. Den Kategorien werden dabei die Farbkodierungen aus Abbildung 2 zugeordnet.

Die Grenze, ab der Risiken, die von technischen Anlagen ausgehen, als unakzeptabel für (unbeteiligte) Privatpersonen gelten, liegt bei  $10^{-5}$  Todesfällen pro Person und Jahr (s. Abschnitt 2.3). Daran anschließend folgen die weiteren Risikokategorien und sind jeweils um eine Größenordnung niedriger als die vorherige. Damit ergibt sich folgende Zuordnung:



Risikowert (1/a) und Farbkodierung	Risikobewertung
Kleiner als $10^{-07}$ (individuell) Kleiner als $10^{-06}$ (beruflich) Kleiner als $10^{-05}$ (kollektiv)	Das Risiko liegt im <b>akzeptablen</b> Bereich, es besteht aus risikoorientierter Sicht kein Handlungsbedarf.
Zwischen $10^{-07}$ und $10^{-06}$ (individuell) Zwischen $10^{-06}$ und $10^{-05}$ (beruflich) Zwischen $10^{-05}$ und $10^{-04}$ (kollektiv)	Das Risiko ist <b>tolerabel</b> . Sofern weitergehende Maßnahmen zur Risikoreduzierung bekannt sind, sollte deren Umsetzung nach dem ALARP-Prinzip unter Kosten-Nutzen-Aspekten geprüft werden. Eine Empfehlung, solche Maßnahmen umzusetzen wird jedoch nicht ausgesprochen.
Zwischen $10^{-06}$ und $10^{-05}$ (individuell) Zwischen $10^{-05}$ und $10^{-04}$ (beruflich) Zwischen $10^{-04}$ und $10^{-03}$ (kollektiv)	Das Risiko ist <b>hoch</b> . Die Umsetzung von bekannten risikoreduzierenden Maßnahmen wird dringend empfohlen bzw. es wird empfohlen, nach weitergehenden risikoreduzierenden Maßnahmen auch über den Stand der Technik hinaus zu suchen.
Größer $10^{-05}$ (individuell) Größer $10^{-04}$ (beruflich) Größer $10^{-03}$ (kollektiv)	Das Risiko ist <b>unakzeptabel</b> . Maßnahmen zur Risikoreduktion müssen umgehend eingeleitet werden.

Tabelle 2: Verwendete Risikokategorien inklusive [11]

Wie in Abschnitt 2.3 erwähnt, verschieben sich die Grenzwerte der Risikokategorien im beruflichen Kontext um einen Faktor 10 nach oben. Daher gelten Risiken in Zusammenhang mit einer beruflichen Tätigkeit als unakzeptabel, wenn sie größer als  $10^{-4}$  Todesfällen pro Person und Jahr sind. Die weiteren Risikokategorien verhalten sich entsprechend.

## 2.6 Vergleichsrisiken

Um die später ermittelten Risiken korrekt einordnen zu können, ist es hilfreich bekannte Vergleichsrisiken heranzuziehen. Nachfolgende Tabelle 3 gibt die Größenordnung verschiedener Vergleichsrisiken an.

	Ursache / Tätigkeit	Todesfallrisiko / Jahr
Berufsrisiken	Arbeiter auf Baustellen	1.0E-04
	Arbeiter in der Metallherstellung	5.5E-05
	Elektroingenieur	8.0E-06
verschiedene Verkehrsrisiken	Eisenbahn	4.4E-06 ... 1.5E-05
	PKW-Fahrer	2.0E-04 ... 2.2E-04
	Flugzeug (Passagiere)	0.67E-04 ... 1.2E-04
Freizeitaktivitäten	Bergsteigen	1.0E-03 ... 2.7E-03
	Fallschirmspringen (USA)	2.0E-03
	Urlaub (UK 1990)	1.0E-04
Alltagsrisiken	Hausarbeit	1.0E-04
	Gebäudebrand	8.0E-06
	Blitzschlag (UK, USA)	1.0E-07 ... 5.0E-07

Tabelle 3: Vergleichsrisiken [12]

### 3 Risikoanalyse für den Einfluss der Windenergieanlage auf die A30

#### 3.1 Berechnung der Schadenswahrscheinlichkeit

In Abbildung 3 sind die geometrischen Verhältnisse dargestellt, die zur Berechnung der jeweiligen Schadenswahrscheinlichkeiten pro Jahr im Havariefall herangezogen werden.

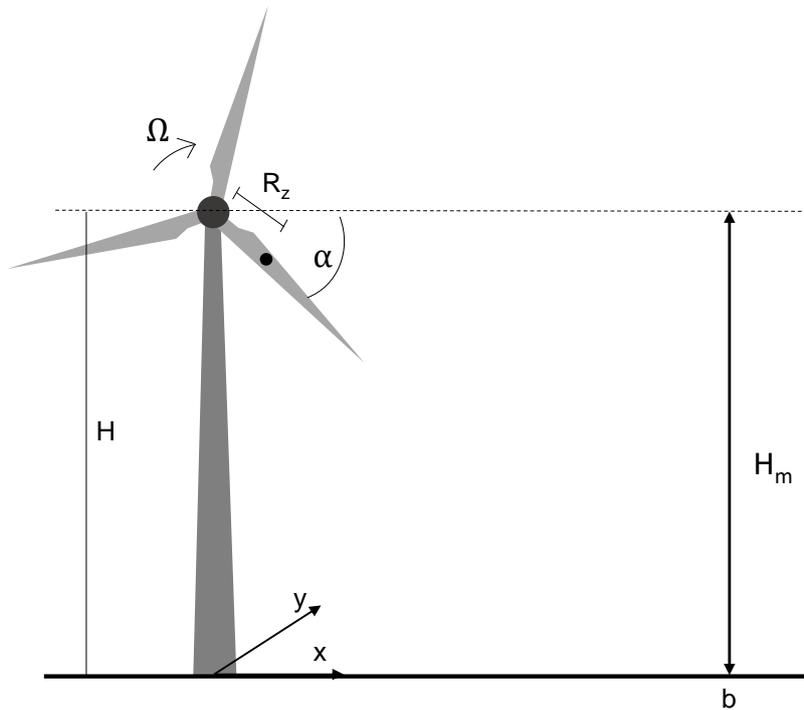


Abbildung 3: Abbildung aus [2] zur Darstellung der geometrischen Verhältnisse

##### 3.1.1 Rotorblattabwurf

Zunächst wird Szenario „Rotorblattabwurf“ betrachtet. Dieses Szenario beinhaltet sowohl den Fall, dass die Verbindung des Rotorblatts zur Nabe versagen sollte, sodass das Rotorblatt als Ganzes abgeworfen wird, als auch den Fall, dass nur ein Fragment des Rotorblatts abgeworfen wird. Auf zweiteres wird am Ende dieses Abschnitts eingegangen.

Um die daraus resultierende Schadenswahrscheinlichkeit nach [2] zu berechnen, wird in einem ersten Schritt die Wurfweite  $r$  des Schwerpunkts in Abhängigkeit der Rotorstellung  $\alpha$  und der Drehzahl  $\Omega$  berechnet:

$$r(\alpha, \Omega) = R_z \cdot \cos(\alpha) - \Omega \cdot R_z \cdot t \cdot \sin(\alpha) \quad \text{Gl. 1}$$

für die Dauer  $t$  bis zum Aufprall des Schwerpunkts gilt:

$$t(\alpha, \Omega) = -\frac{\Omega \cdot R_z \cdot \cos(\alpha)}{g} + \sqrt{\frac{2}{g} \cdot \left( H - R_z \cdot \sin(\alpha) + \frac{\Omega^2 \cdot R_z^2 \cdot (\cos(\alpha))^2}{2g} \right)} \quad \text{Gl. 2}$$



Damit berechnet sich die Wahrscheinlichkeit eines Aufpralls pro Meter in radialer Richtung zu

$$f_R(r, \Omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dr} r^{-1} \quad \text{Gl. 3}$$

Bezogen auf den Umfang eines Kreises mit Wurfweite  $r$ , erhält man die Wahrscheinlichkeit eines Aufpralls pro m<sup>2</sup>:

$$f_{zwpt}(r, \Omega) = \frac{1}{2\pi \cdot r} \cdot f_R(r, \Omega) \quad \text{Gl. 4}$$

Je nach Rotorstellung  $\alpha$  ergeben sich unterschiedliche Wurfweiten, sodass nur ein gewisser Bereich mit den Grenzen  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  an Rotorstellungen betrachtet werden, die zu *kritischen* Wurfweiten führen. D.h. Wurfweiten, die die A 30 erreichen könnten und damit größer oder gleich dem Abstand der A 30 zur jeweiligen WEA sind:

$$f_{zwpt,krit}(r, \Omega) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} f_{zwpt}(r, \Omega) d\alpha \quad \text{Gl. 5}$$

Die Wahrscheinlichkeit eines Aufpralls pro m<sup>2</sup> muss noch mit der Wahrscheinlichkeit multipliziert werden, dass es überhaupt zu einem Abwurf (Versagen der Rotorblattverbindung) kommt. Dazu werden wiederum zwei Fälle betrachtet:

- (1)  $\Omega_1$  = Nenndrehzahl
- (2)  $\Omega_2$  = Doppelte Nenndrehzahl = sog. Überdrehzahl

Für beide Fälle werden in [2] folgende Werte angegeben:

$$P_{b,1} = 6,2 \cdot 10^{-4}$$

$$P_{b,2} = 5,0 \cdot 10^{-6}$$

sodass die Wahrscheinlichkeit eines Aufpralls pro m<sup>2</sup> unter der Bedingung, dass es zu einem Versagen kommt, folgendermaßen berechnet werden kann:

$$P_{zwpt}(x, y) = \sum_{i=1}^2 f_{zwpt,krit} \cdot P_{b,i} \quad \text{Gl. 6}$$

Um die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, dass im Versagensfall die A 30 von einem Rotorblatt getroffen wird, muss noch die Windrichtung miteinbezogen werden. Die Nabe der WEA richtet sich immer nach der jeweiligen Windrichtung aus, sodass die Rotorfläche immer senkrecht zur aktuell herrschenden Windrichtung steht. Damit sind nur diese Windrichtungen von Relevanz, die dazu führen, dass die Rotorfläche senkrecht zur Richtung der A 30 steht (s. Abbildung 4).

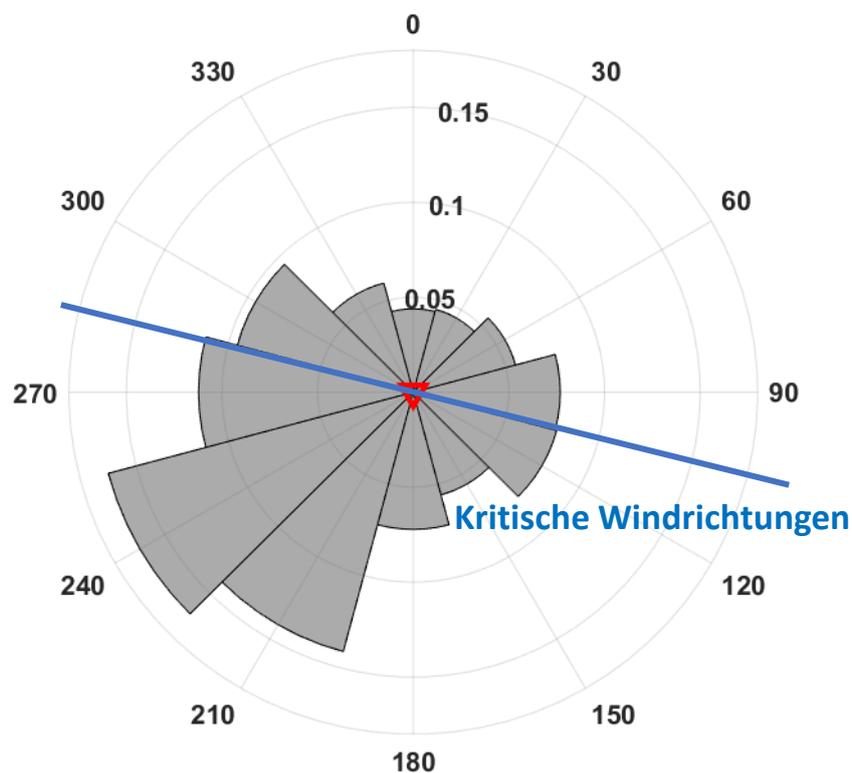


Abbildung 4: Visualisierung der Windrose nach [6] mit zugehöriger kritischer Windrichtung



Windrichtung	Gradsegment von - bis		Wahrscheinlichkeit (%)
N	345	15	4.2
NNO	15	45	4.3
ONO	45	75	5.2
O	75	105	7.2
OSO	105	135	7.4
SSO	135	165	5.5
S	165	195	6.6
SSW	195	225	14.5
WSW	225	255	15.7
W	255	285	11.4
WNW	285	315	9.1
NNW	315	345	5.8

Tabelle 4: Windrichtungsverteilung (aus [5])

Die Wahrscheinlichkeit pro m<sup>2</sup>, dass der Schwerpunkt eines Rotorblatts im Versagensfall im Bereich der A 30 auftrifft, ist demnach:

$$P_{\text{Objekt}} = P_{\text{zwppt}} \cdot f_{\text{Wind,krit}} \quad \text{Gl. 7}$$

Die Breite der A 30 und die Größe des Rotorblatts werden abschließend in die Berechnung der Schadenswahrscheinlichkeit miteinbezogen, unter Berücksichtigung eines *direkten* Treffers (d.h. Schwerpunkt landet auf der A30) sowie eines *indirekten* Treffers (d.h. Schwerpunkt landet zwar neben der A 30, jedoch wird es vom restlichen Rotorblatt getroffen):

$$P_{\text{Treffer,Rotorblatt}} = P_{\text{direkt}} + P_{\text{indirekt}} \quad \text{Gl. 8}$$

mit

$$P_{\text{direkt}} = P_{\text{Objekt}} \cdot (b + h) \cdot (d + h)$$

und

$$P_{\text{indirekt}} = P_{\text{Objekt}} \cdot \left( (b + d) \cdot (L - R_z) + \frac{\pi}{2} \cdot (L - R_z)^2 \right)$$

Zur Berechnung der Schadenswahrscheinlichkeit ausgehend von einem Fragment des Rotorblatts wird die Vorgehensweise von Gl. 1 bis Gl. 8 analog angewandt und  $R_z$  durch  $R_{z, \text{Fragment}}$  ersetzt. Es wird davon ausgegangen, dass im Falle eines abgeworfenen Rotorblattfragments das äußere Drittel des Rotorblatts abbricht. Der Schwerpunkt des Fragments liegt wiederum bei einem Drittel seiner Länge, sodass sich folgender Zusammenhang ergibt:

$$R_{z, \text{Fragment}} = \frac{7}{9} R_z \quad \text{Gl. 9}$$

Des Weiteren wird angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit eines Rotorblattbruchs (Fragmentierung) doppelt so hoch ist, wie die Wahrscheinlichkeit, dass das Rotorblatt im Ganzen abgeworfen wird. Damit ergibt sich:



$$P_{b,Fragment,1} = 2 \cdot P_{b,1} = 1,2 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{b,Fragment,2} = 2 \cdot P_{b,2} = 1,0 \cdot 10^{-5}$$

### **Ermittlung der Schadenshöhe**

Für die Schadenswahrscheinlichkeit kann konservativ davon ausgegangen werden, dass jeder Treffer eines Fahrzeugs auf der A 30 eine tödliche Verletzung des bzw. der Fahrzeuginsassen zur Folge hat. Allerdings ist dies noch von der Geschwindigkeit abhängig, so muss z. B. davon ausgegangen werden, dass bei höheren Geschwindigkeiten durch Sekundärurfälle auch noch weitere Personen geschädigt werden. Dies wird durch den geschwindigkeitsabhängigen Korrekturfaktor  $k$  für das Schadensausmaß

$$k = \left( \frac{v}{64 \text{ km/h}} \right)^2$$

abgebildet. Die Normierung auf 64 km/h ergibt sich aus dem Wert für die NCAP Crash Tests für einen Frontalcrash auf eine deformierbare Barriere [8].

### **3.1.2 Gondelabwurf**

#### **Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit**

Die Methode zur Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit bei einem Gondelabwurf ist in [2] beschrieben. Die Anwendung der dort geschilderten Vorgehensweise ergibt, dass im Falle eines Gondelabwurfs die Autobahn A 30 außerhalb des Gefahrenbereichs liegt und der Gondelabwurf somit keinen Beitrag zum Risiko liefert.



### 3.1.3 Turmbruch

#### Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit

Die Methode zur Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit bei einem Turmbruch ist in [2] beschrieben. Die Anwendung der dort geschilderten Vorgehensweise ergibt, dass im Falle eines Turmbruchs die Autobahn A 30 außerhalb des Gefahrenbereichs liegt und der Turmbruch somit keinen Beitrag zum Risiko liefert.

## 3.2 Ermittlung des Risikos

### 3.2.1 Wurf- bzw. Flugweiten

Grundsätzlich ergeben sich aus Kapitel 3.1 nur relevante Risiken für Havarien, die das Rotorblatt betreffen. Wesentlich zur Größe des Risikos tragen dabei die ermittelten Flug- bzw. Wurfweiten der Fragmente bei:

Fragmenttyp	Weite (m)
Gesamtes Rotorblatt bei Nenndrehzahl	156.7
Rotorblattfragment bei Nenndrehzahl	556
Gesamtes Rotorblatt bei Überdrehzahl	376.2
Rotorblattfragment bei Überdrehzahl	1804.6

*Tabelle 5: Maximale Wurfweiten bei Nenn- und Überdrehzahl*

Der erste Eintrag aus Tabelle 5 „Gesamtes Rotorblatt bei Nenndrehzahl“ hat aufgrund der relativ geringen Wurfweite keinen Beitrag zum Risiko, die drei anderen Einträge haben einen Beitrag zum Risiko.

### 3.2.2 Exposition

Aus den Distanzen aus Tabelle 5 lassen sich verschiedene Gefährdungsbereiche definieren:

- Gefährdungsbereich 1 (blau in Abbildung 5): nur Rotorblattfragmente (Spitzen) bei Überdrehzahl.
- Gefährdungsbereich 2 (grün in Abbildung 5): zusätzlich Rotorblattfragmente (Spitzen) bei Nenndrehzahl.
- Gefährdungsbereich 3 (gelb in Abbildung 5): zusätzlich komplette Rotorblätter bei Überdrehzahl

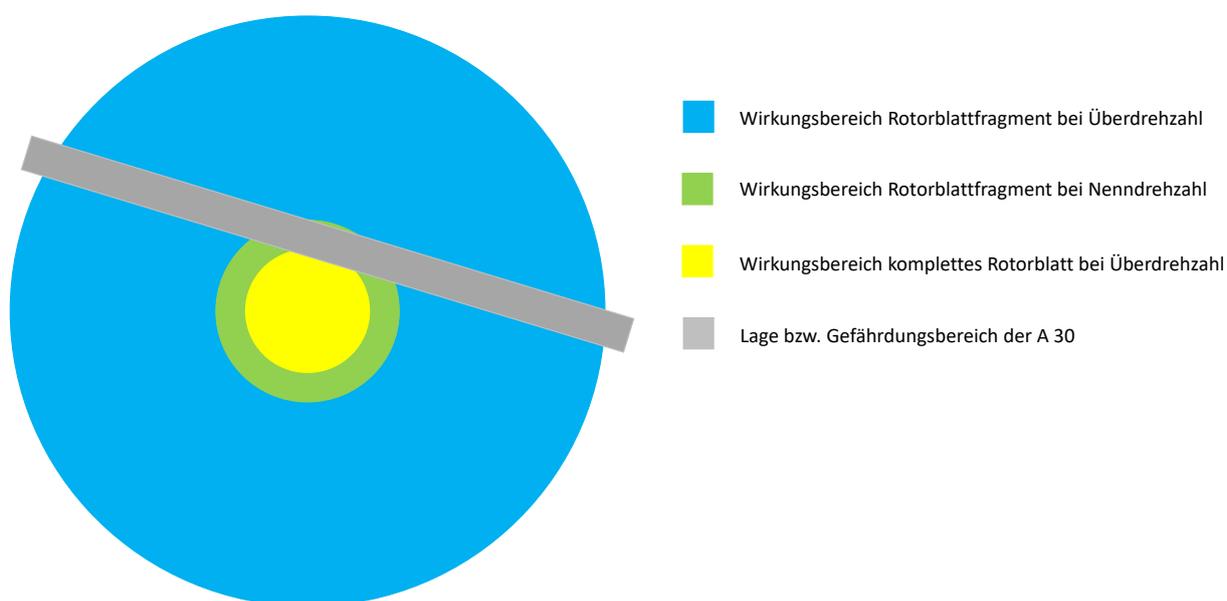


Abbildung 5: Lage der Gefährdungsbereiche (maßstabsgetreu)

Für die weitere Risikoanalyse wird davon ausgegangen, dass ein Fahrzeug auf der A 30 den Gefährdungsbereich von links nach rechts mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 100 km/h durchquert. Dabei werden die Gefahrenbereiche 1 und 2 zweimal, der Gefahrenbereich 3 einmal durchquert. Insgesamt ergeben sich die in Tabelle 6 dargestellten Gesamtstrecken.

Gefährdungsbereich	Strecke (m)	Zeit im Bereich pro Fahrt (s)	Exposition
Gefährdungsbereich 1	2719.5	97.9	1.1E-03
Gefährdungsbereich 2	185.5	6.7	7.73E-05
Gefährdungsbereich 3	622.5	22.4	2.59E-04

Tabelle 6: Exposition (Aufenthaltswahrscheinlichkeit) für die Gefahrenbereiche 1 bis 3 pro Fahrzeug

Zur Ermittlung der Exposition wurde zunächst die Zeit ermittelt, die benötigt wird, um die Gefahrenbereiche zu durchqueren und durch die Anzahl der Sekunden pro Tag dividiert, um die Exposition bei einmaliger Durchfahrt pro Tag zu ermitteln, dies ist in o. g. Tabelle dargestellt.

Um das kollektive Risiko<sup>1</sup> zu erhalten, muss noch mit der Anzahl der Fahrzeuge multipliziert werden. Nach der Bundesanstalt für Straßenwesen [9] muss an diesem Abschnitt der A 30 mit 81.872 Fahrzeugen pro Tag gerechnet werden. Für die Risikoanalyse wird davon ausgegangen, dass 25% der Fahrzeuge zufällig vor Ort sind und 75% der Fahrzeuge mit Berufspendlern besetzt sind, die die Strecke zweimal pro Tag (Hin- und Rückfahrt) benutzen.

<sup>1</sup> Siehe auch Kapitel 2, bei der großen Anzahl an Fahrzeugen kann das Risiko des einzelnen gegenüber dem Risiko der Summe aller Fahrzeuge vernachlässigt werden.

### 3.3 Ermittlung des kollektiven Risikos für einen Personenschaden auf der A 30

In folgender Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Risikoanalyse zusammengefasst. Dabei ergibt sich in Summe ein Risiko im akzeptablen Bereich.

	A30
Rotorblattbruch	$5.71 \cdot 10^{-9} \frac{1}{a}$
Rotorblattfragment	$4.06 \cdot 10^{-6} \frac{1}{a}$
Turmbruch	0
Gondelabwurf	0
Gesamt	$4.07 \cdot 10^{-6} \frac{1}{a}$

Tabelle 7: Ergebnisübersicht Risikoanalyse

Wie unter Abbildung 5 erläutert, ergibt sich das Risiko aus der Summe der Einzelrisiken beim Durchqueren der Gefahrenbereiche. Somit ist es klar, dass das Risiko kumuliert, je weiter ein Fahrzeug in den Gefahrenbereich eindringt. Dies ist in folgender Abbildung 6 dargestellt.

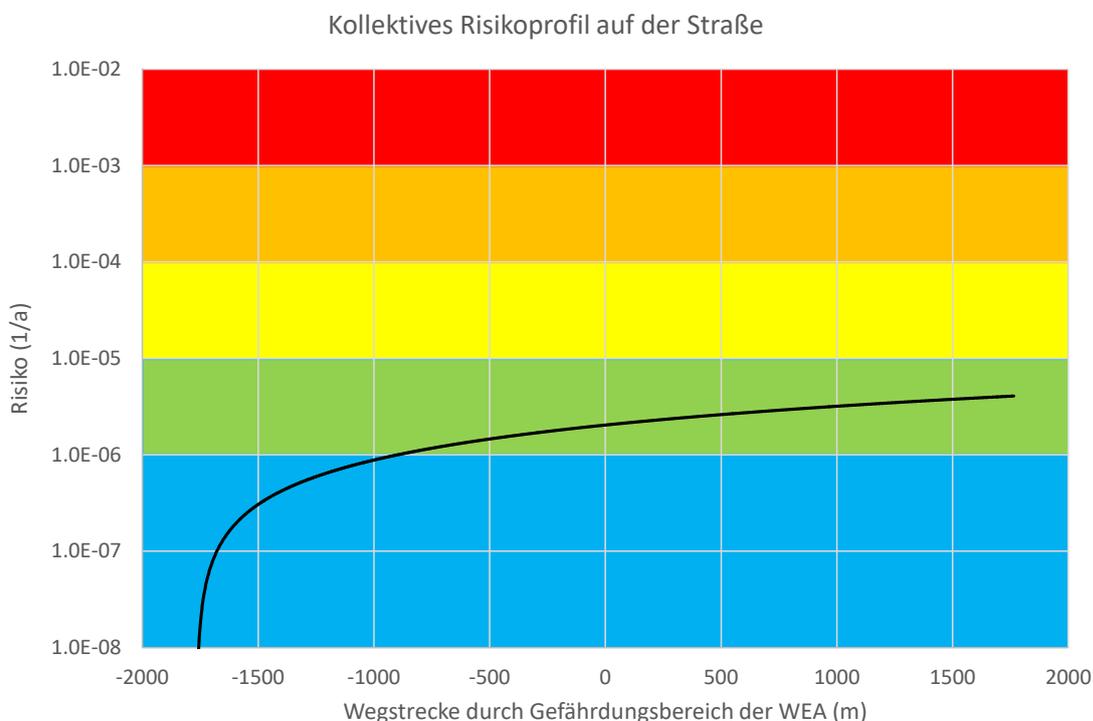


Abbildung 6: Kumuliertes Risiko beim Durchqueren der Gefahrenbereiche. Der Wert 0 auf der x-Achse ist durch den Ort des geringsten Abstands zwischen WEA und A 30 festgelegt.



Industrie Service

## 4 Resümee

Grundsätzlich kann das durch eine Havarie der Windenergieanlage verursachte kollektive Risiko von  $4.07E-06$  pro Jahr für alle die Gefahrenbereiche passierenden Fahrzeuge an der Autobahn A 30 akzeptiert werden. Für einen einzelnen Fahrer – hier wird als am stärksten exponierte Person ein Berufspendler, der die Strecke an 220 Tagen im Jahr zweimal pro Tag fährt, angenommen – ist das Risiko mit  $5.20E-11$  pro Jahr vernachlässigbar. Unter Maßgabe der Risikobewertungskriterien aus Tabelle 2 besteht aus risikoorientierter Sicht keine Notwendigkeit für weitere Maßnahmen.



## 5 Quellenverzeichnis

- [1] AutoCAD Datei „WP\_Floethe“; übermittelt per E-Mail 05.2021
- [2] Wind Turbine Manual; Guidelines for the risk calculations of wind turbines; Version 1.1 of 01/10/2019
- [3] Windenergieanlagen in Nähe von Schutzobjekten: Bestimmung von Mindestabständen; Hannover – Leipzig, Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH; 11.12.2014
- [4] Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe; American Lifelines Alliance; February 2005
- [5] Windstatistik\_WEA\_Flöthe.pdf; Analyse der Windverhältnisse am Standort Flöthe; Tractebel Engineering GmbH 26.10.2021
- [6] Datenblätter, Abmessungen und Gewichte für die WEA, übermittelt per E-Mail am 31.03.2022
- [7] Guidelines for quantitative risk assessment, „Purple Book“; Ministerie van VROM; 12.2005
- [8] euro-ncap-frontal-odb-test-protocol-v713.201811061520248726.pdf
- [9] [https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Aktuell/zaehl\\_aktuell\\_node.html](https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Aktuell/zaehl_aktuell_node.html)
- [10] CENELEC EN 50126-2:2017 – Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 2: Systems Approach to Safety
- [11] Risk Acceptance Criteria, Hoffmann A., Klein G., Weidl T., TÜV SÜD Industrie Service GmbH, 12th International Probabilistic Workshop, Weimar 2014
- [12] Proske, R., Katalog der Risiken – Risiken und ihre Darstellung, Dresden, 2004
- [13] WIND TURBINE MANUAL - Guidelines for the risk calculations of wind turbines, Version 1.1 vom 01.10.2019, Department Omgeving, Belgien