

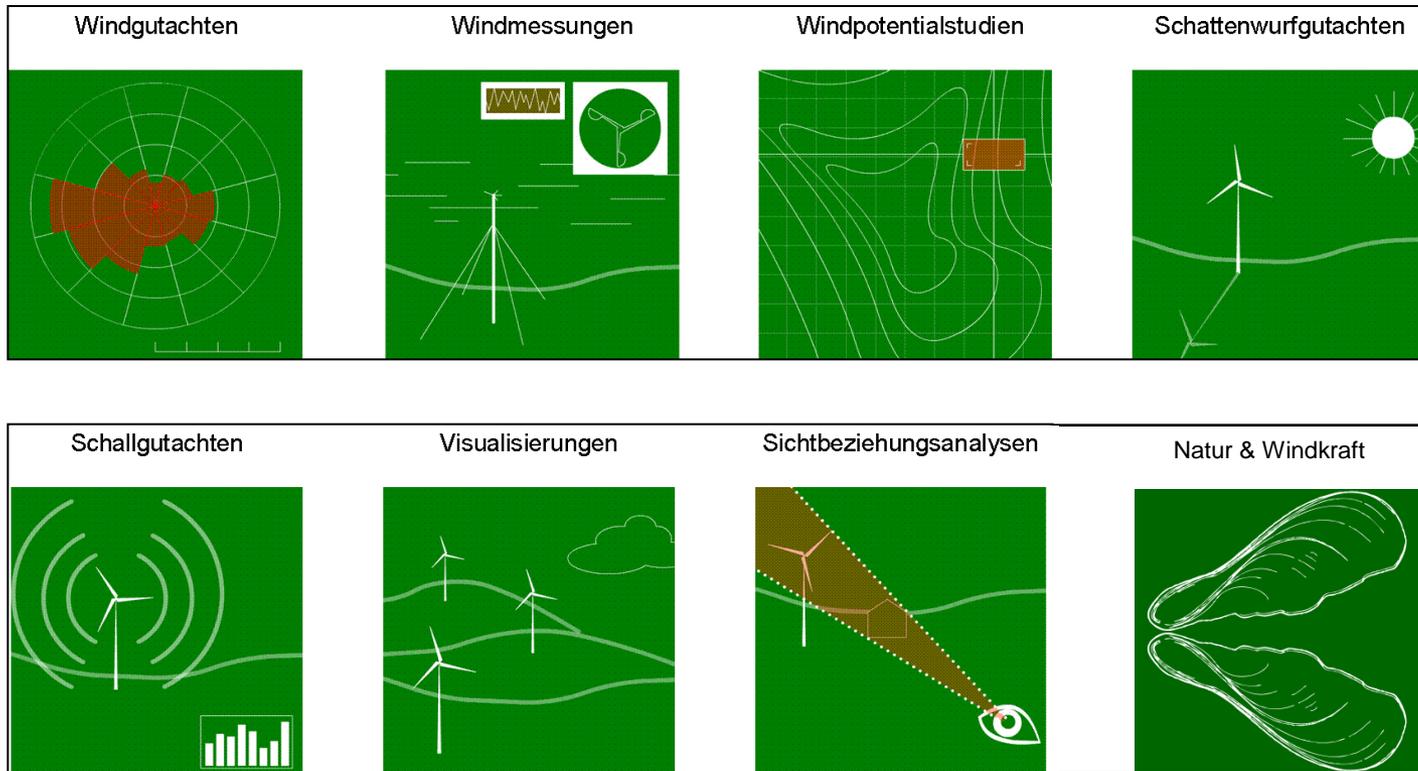
Windvorrangflächen als begrenzte Ressource

Dipl.-Ing. Henning Krebs
Dipl.-Geogr. Maximilian Berndt

15. Oktober 2014

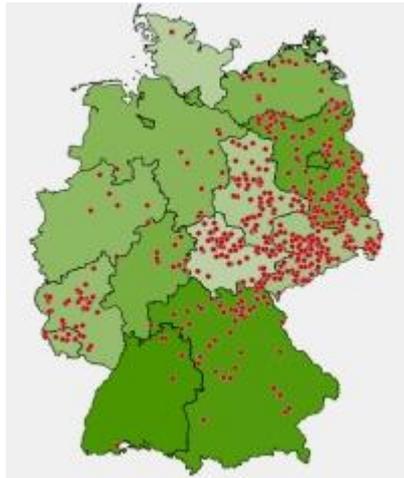


Ingenieurbüro Kuntzsch GmbH: Profil (I)



Ingenieurbüro Kuntzsch GmbH: Profil (II)

- Seit 1990 mehr als 1800 Begutachtungen / Beratungen für Windparks im In- und Ausland



- Unternehmenssitz in Dresden, seit 2010 Büro in Ballhausen/Thüringen
- Akkreditierung als Prüfinstitut nach DIN EN ISO 17025





Ressource Eignungsfläche

- 1) Wie viel Energie ist vorhanden ?
- 2) Wie viel Energie kann davon geerntet werden?

Optimierung im Rahmen der Restriktionen:

Geometrie / Windklima
Turbulenz / Standsicherheit
Bestandsanlagen älterer Bauart
Schallimmission

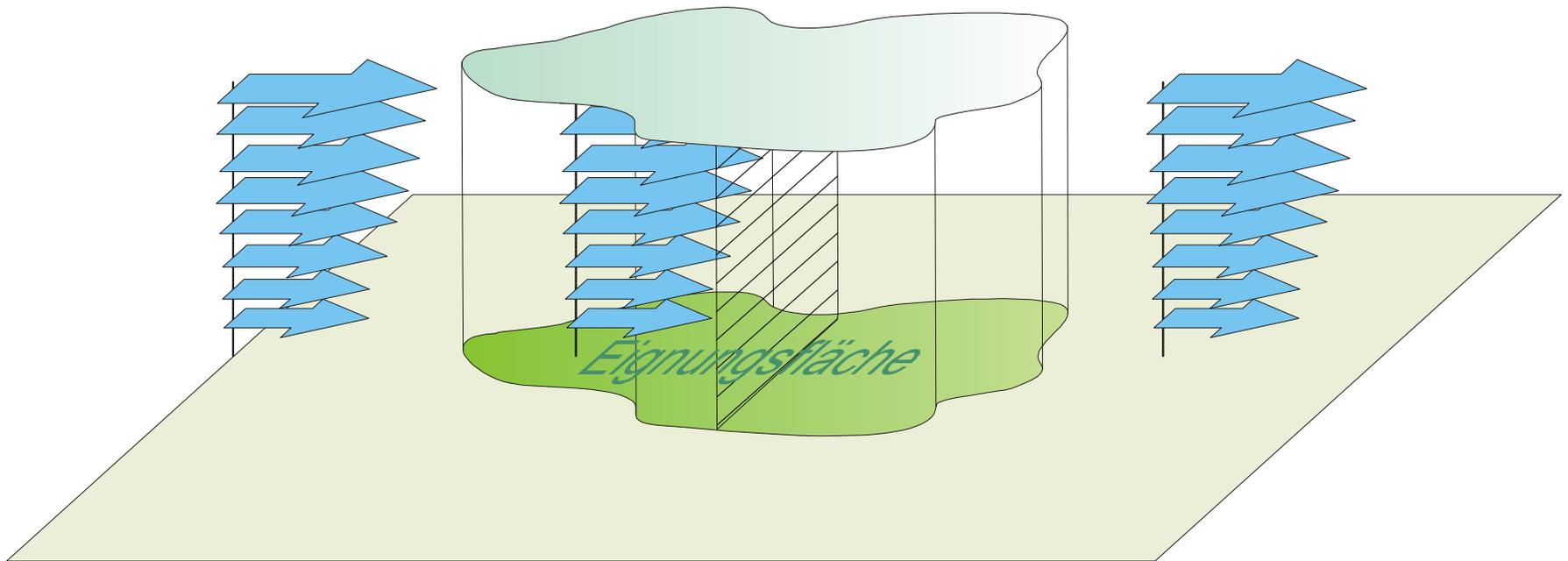
Weitere ertragsmindernde Einflüsse

- 3) Unsicherheit des Windklimas
- 4) Energiebilanz über einer Eignungsfläche
- 5) Fazit



1) Wie viel Energie ist vorhanden?

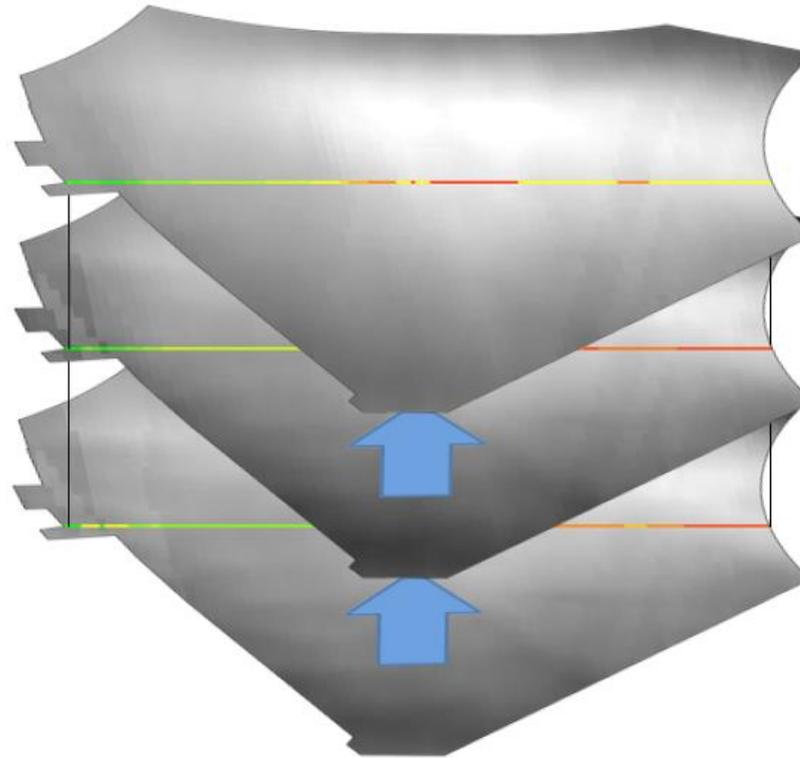
Modell: Windströmung über einer Eignungsfläche



Der Wind (blau) durchströmt das über der Eignungsfläche (dunkelgrün) liegende Volumen und passiert dabei eine fiktive Rezeptorfläche (schwarzes Gitter). Danach verlässt der Wind das Volumen.



Schätzung der Primärenergie



ID	Flächenausdehnung [ha]	Leistungsdichte @ 140 m ü. Grund [W/m²]	Primärenergie [GWh/a]	Höhenbereich [m ü. Grund]
1	264	360	760	60...200
		360	358	60...140





- 1) Wie viel Energie ist vorhanden ?
- 2) Wie viel Energie kann davon geerntet werden?

Optimierung im Rahmen der Restriktionen:

Geometrie / Windklima

Turbulenz / Standsicherheit

Bestandsanlagen älterer Bauart

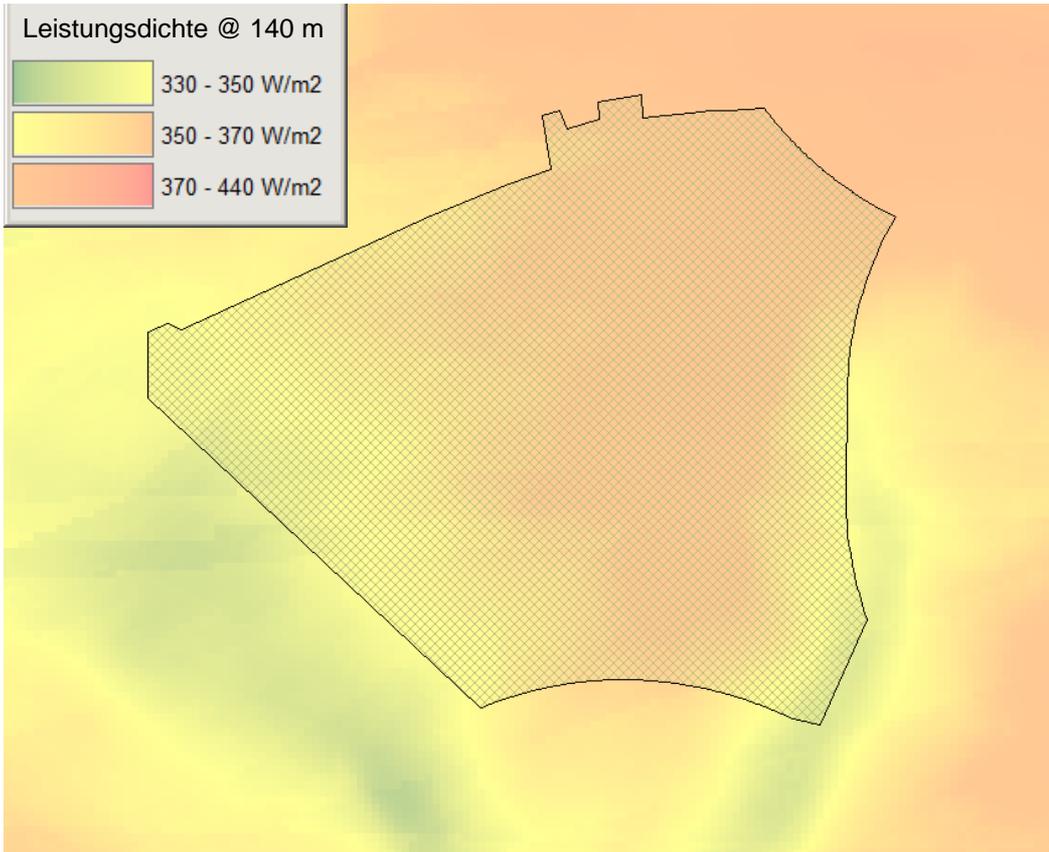
Schallimmission

Weitere ertragsmindernde Einflüsse

- 3) Unsicherheit des Windklimas
- 4) Energiebilanz über einer Eignungsfläche
- 5) Fazit



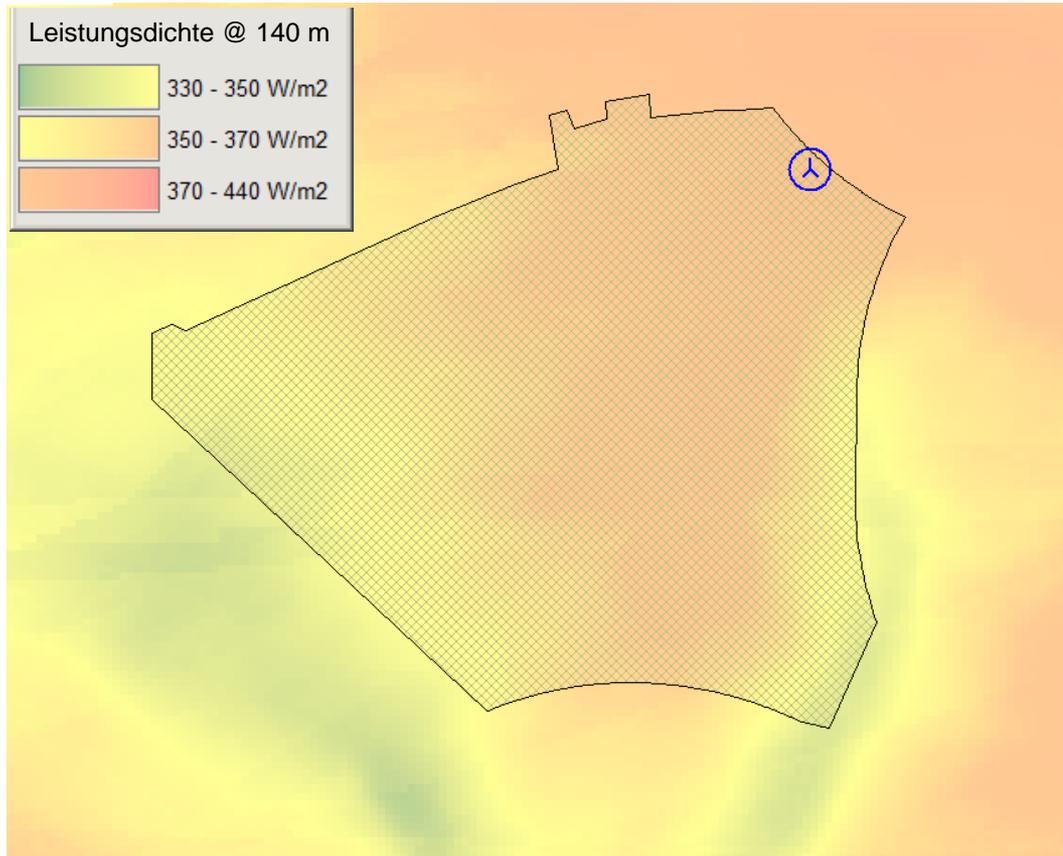
Optimierung von Parkkonfigurationen (I)



Anzahl WEA	0
Summe Nennleistung [MW]	0
Summe Energieertrag [GWh/a]	0
Energieertrag pro WEA [GWh/a]	0
mittlerer Parkwirkungsgrad [%]	-
flächenbezogener Energieertrag [GWh/a/ha]	0,000



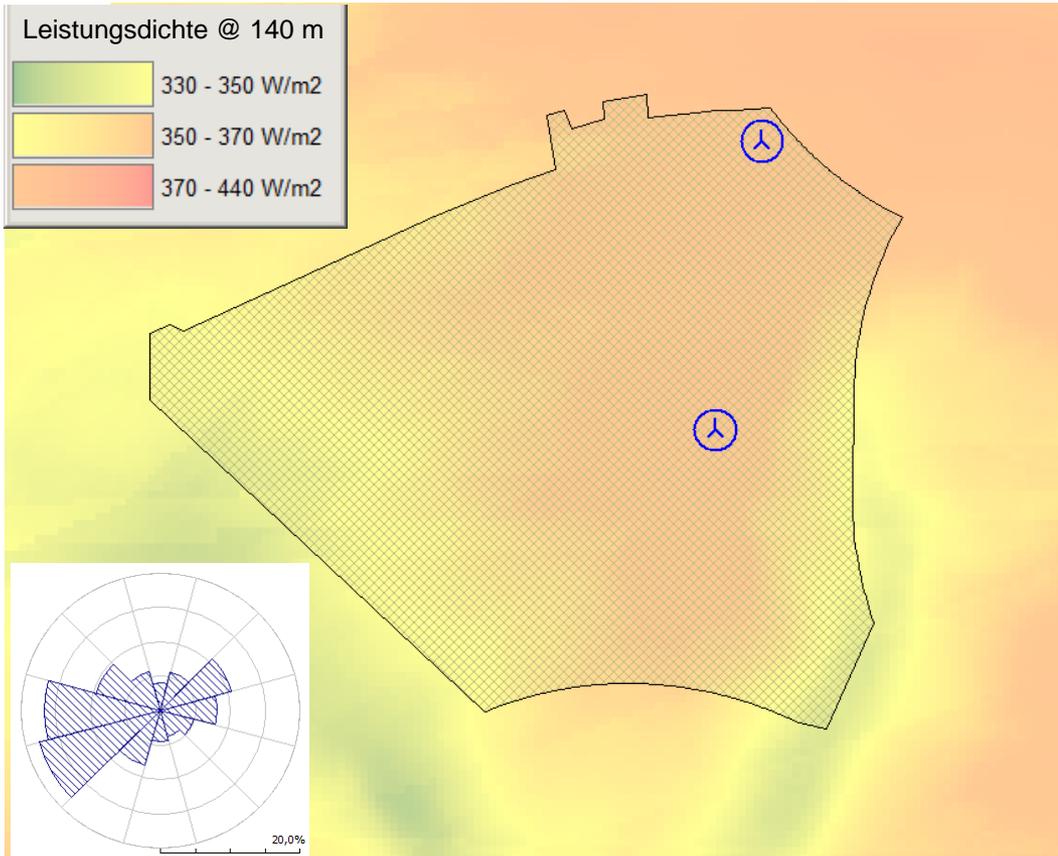
Optimierung von Parkkonfigurationen (II)



Anzahl WEA	1
Summe Nennleistung [MW]	3,3
Summe Energieertrag [GWh/a]	9,686
Energieertrag pro WEA [GWh/a]	9,686
mittlerer Parkwirkungsgrad [%]	100,0
flächenbezogener Energieertrag [GWh/a/ha]	0,037



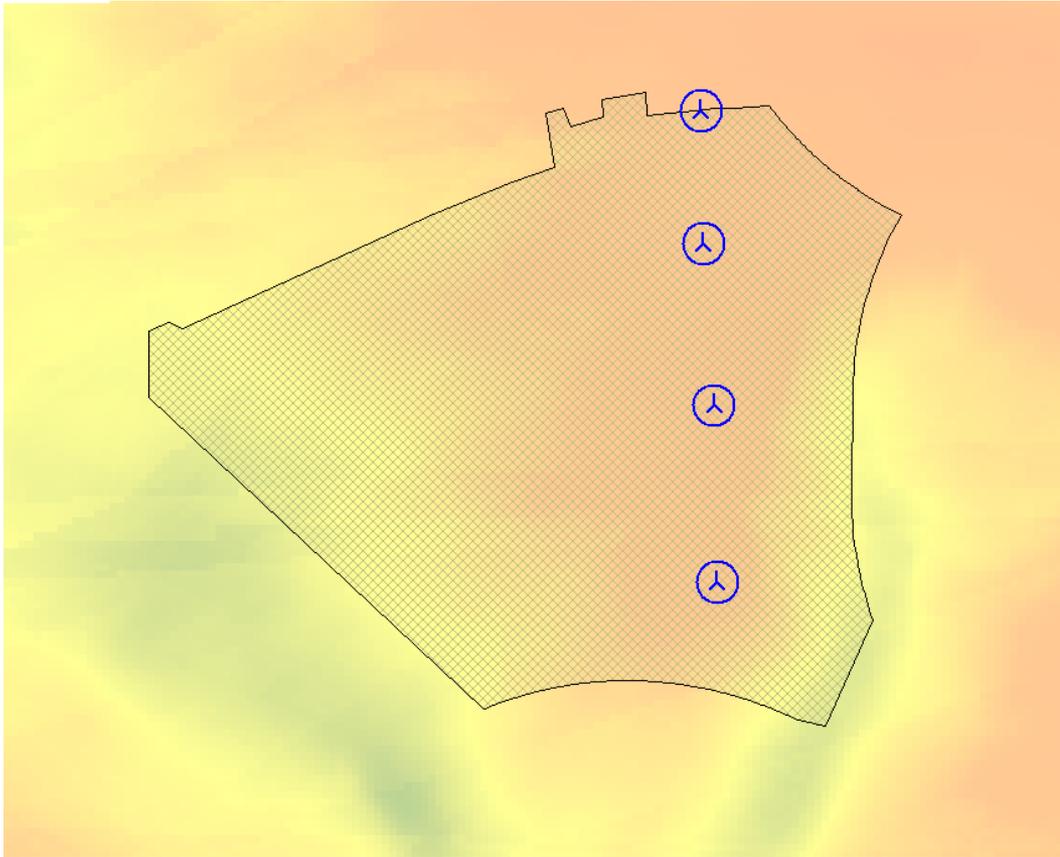
Optimierung von Parkkonfigurationen (III)



Anzahl WEA	2
Summe Nennleistung [MW]	6,6
Summe Energieertrag [GWh/a]	19,249
Energieertrag pro WEA [GWh/a]	9,625
mittlerer Parkwirkungsgrad [%]	99,6
flächenbezogener Energieertrag [GWh/a/ha]	0,073



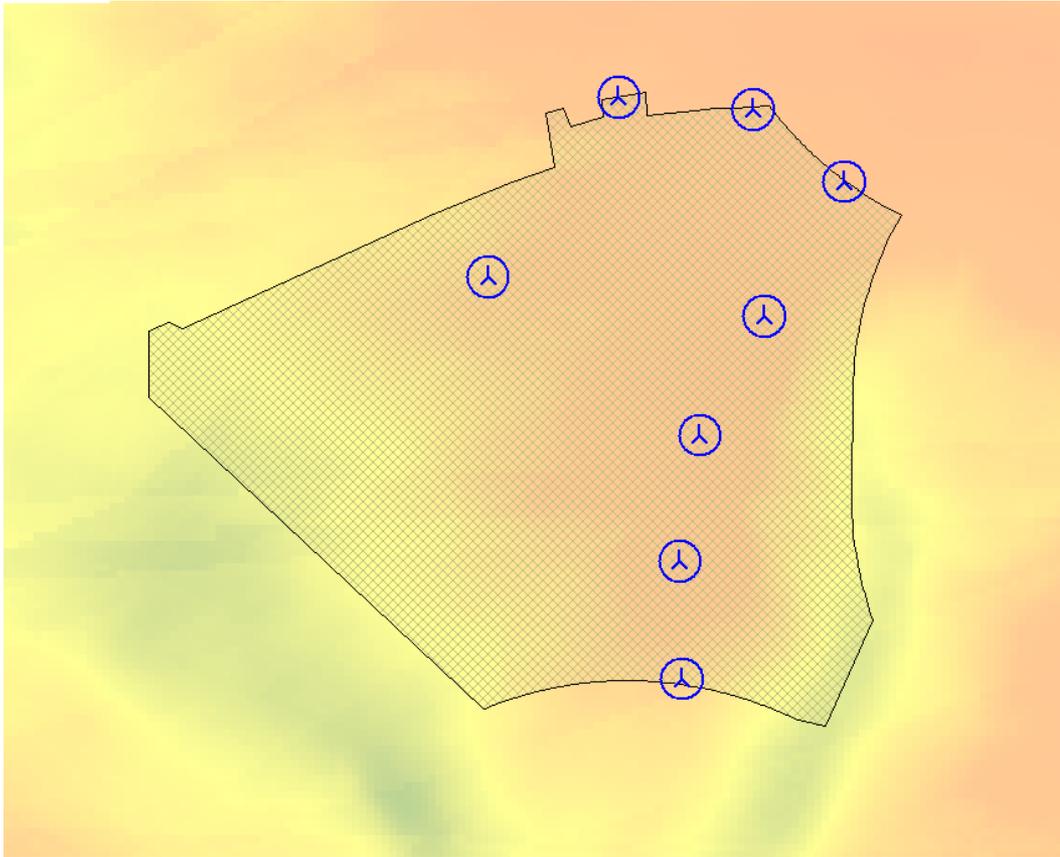
Optimierung von Parkkonfigurationen (V)



Anzahl WEA	4
Summe Nennleistung [MW]	13,2
Summe Energieertrag [GWh/a]	37,97
Energieertrag pro WEA [GWh/a]	9,493
mittlerer Parkwirkungsgrad [%]	98,6
flächenbezogener Energieertrag [GWh/a/ha]	0,144



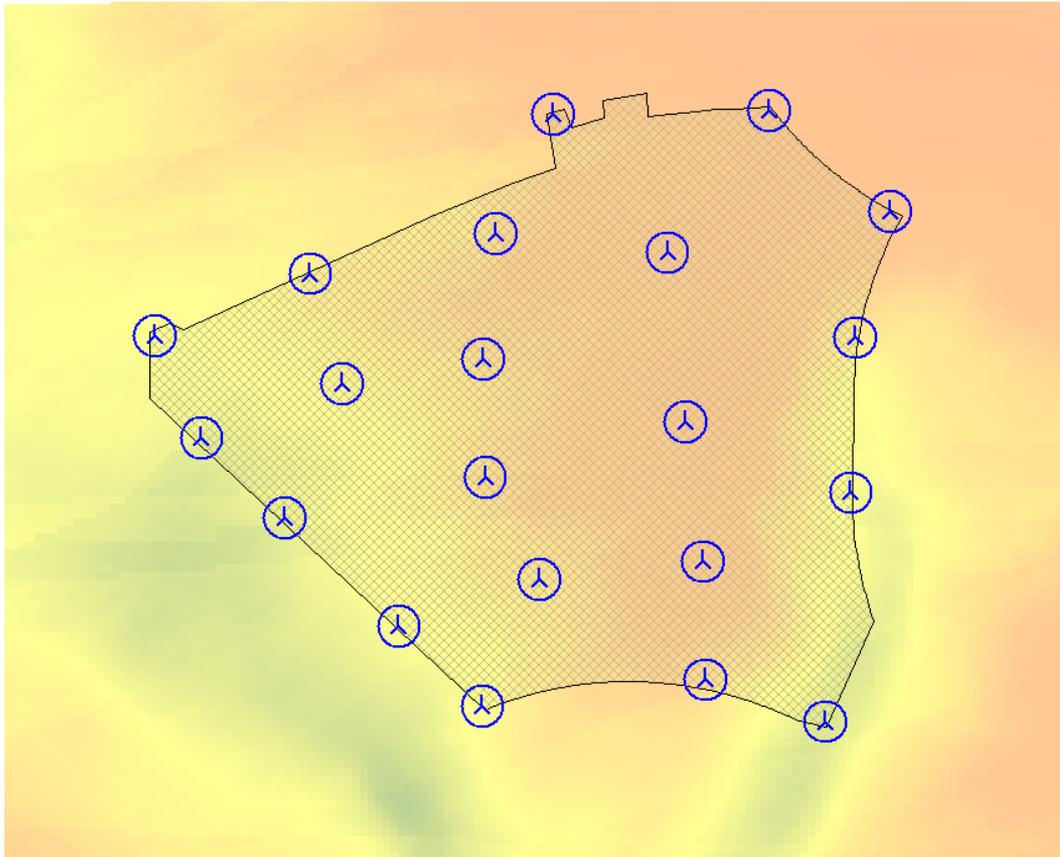
Optimierung von Parkkonfigurationen (VI)



Anzahl WEA	8
Summe Nennleistung [MW]	26,4
Summe Energieertrag [GWh/a]	72,196
Energieertrag pro WEA [GWh/a]	9,025
mittlerer Parkwirkungsgrad [%]	94,2
flächenbezogener Energieertrag [GWh/a/ha]	0,273



Optimierung von Parkkonfigurationen (VII)



Anzahl WEA	21
Summe Nennleistung [MW]	69,3
Summe Energieertrag [GWh/a]	167,182
Energieertrag pro WEA [GWh/a]	7,961
mittlerer Parkwirkungsgrad [%]	84,9
flächenbezogener Energieertrag [GWh/a/ha]	0,633





- 1) Wie viel Energie ist vorhanden ?
- 2) Wie viel Energie kann davon geerntet werden?

Optimierung im Rahmen der Restriktionen:

Geometrie / Windklima

Turbulenz / Standsicherheit

Bestandsanlagen älterer Bauart

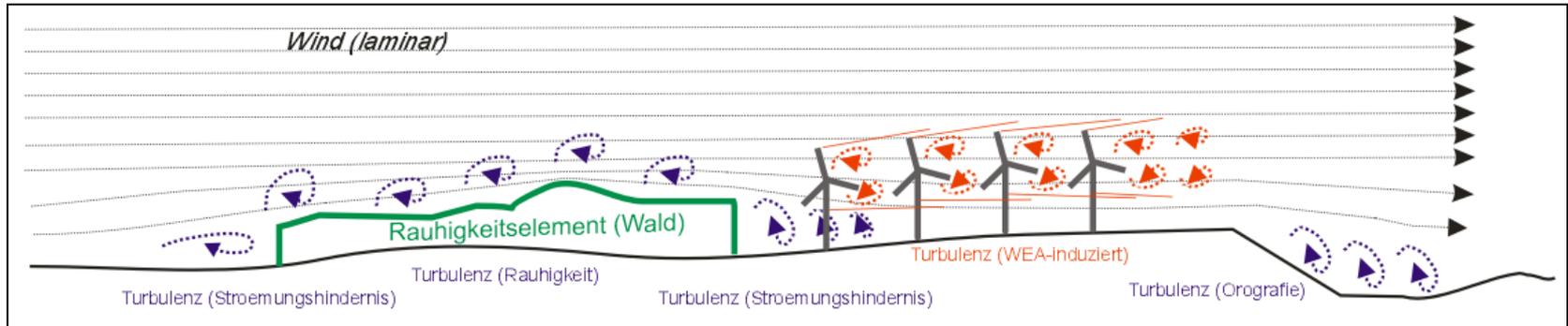
Schallimmission

Weitere ertragsmindernde Einflüsse

- 3) Unsicherheit des Windklimas
- 4) Energiebilanz über einer Eignungsfläche
- 5) Fazit

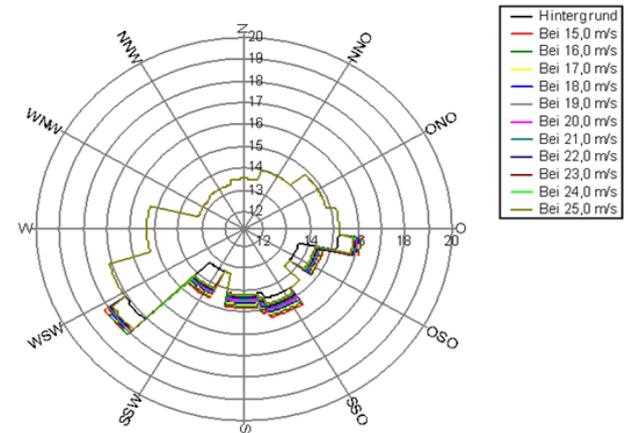


Einschub: Turbulenz im Windpark



- Die WEA-induzierte Turbulenz hängt u.a. ab von Windgeschwindigkeit, Auslegung der WEA, dem Abstand von den benachbarten WEA und ihrer gegenseitigen Position zueinander.
- Umgebungsturbulenz und WEA-induzierte Turbulenz überlagern sich zu einer effektiven Turbulenz.
- Der Standsicherheitsnachweis im Genehmigungsverfahren beinhaltet u.a. die Prüfung, ob die effektive Turbulenz in allen Windgeschwindigkeits- und -richtungsbereichen die WEA-Auslegungsparameter nicht überschreitet.

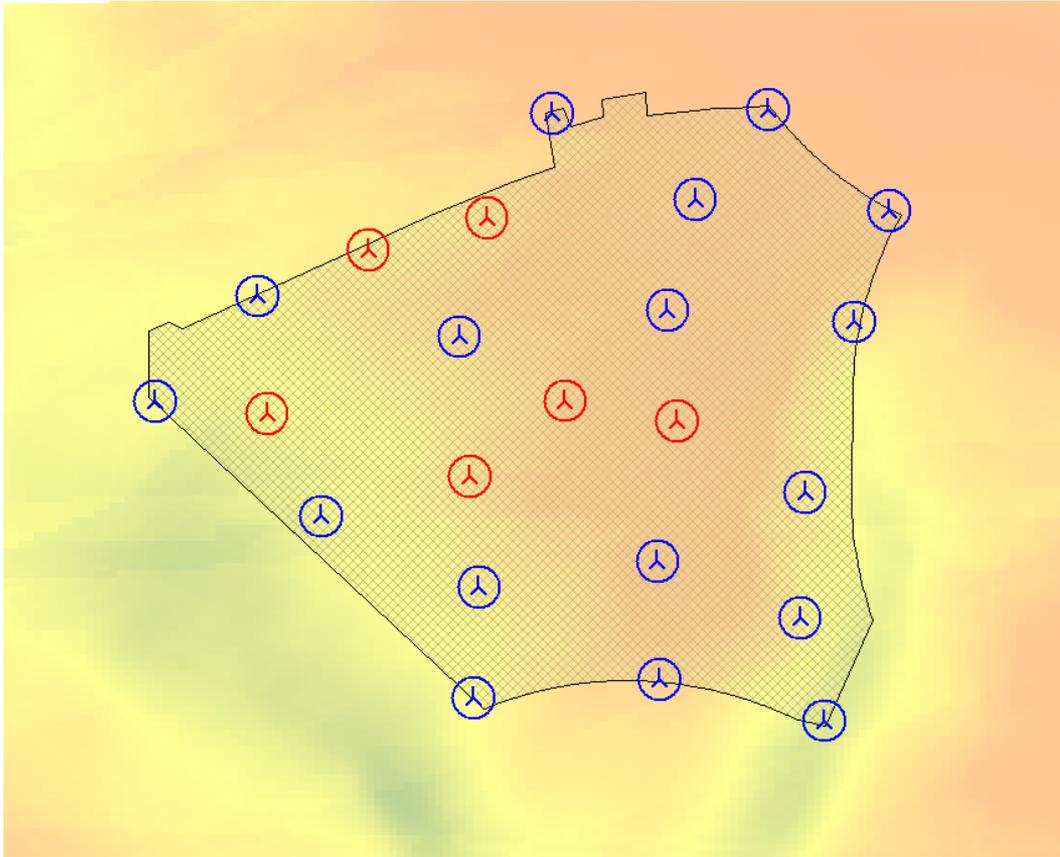
Turbulenz für Windgeschw. (NH, inkl. Parkeffekt)



Die Prüfung der Einhaltung der WEA-Auslegungsparameter bzgl. der Turbulenzintensität erfolgte mit der Software wake2e der Firma F2E.



Optimierung von Parkkonfigurationen (VIII)



Anzahl WEA	23
Summe Nennleistung [MW]	75,9
Summe Energieertrag [GWh/a]	178,398
Energieertrag pro WEA [GWh/a]	7,756
mittlerer Parkwirkungsgrad [%]	82,4
flächenbezogener Energieertrag [GWh/a/ha]	0,676

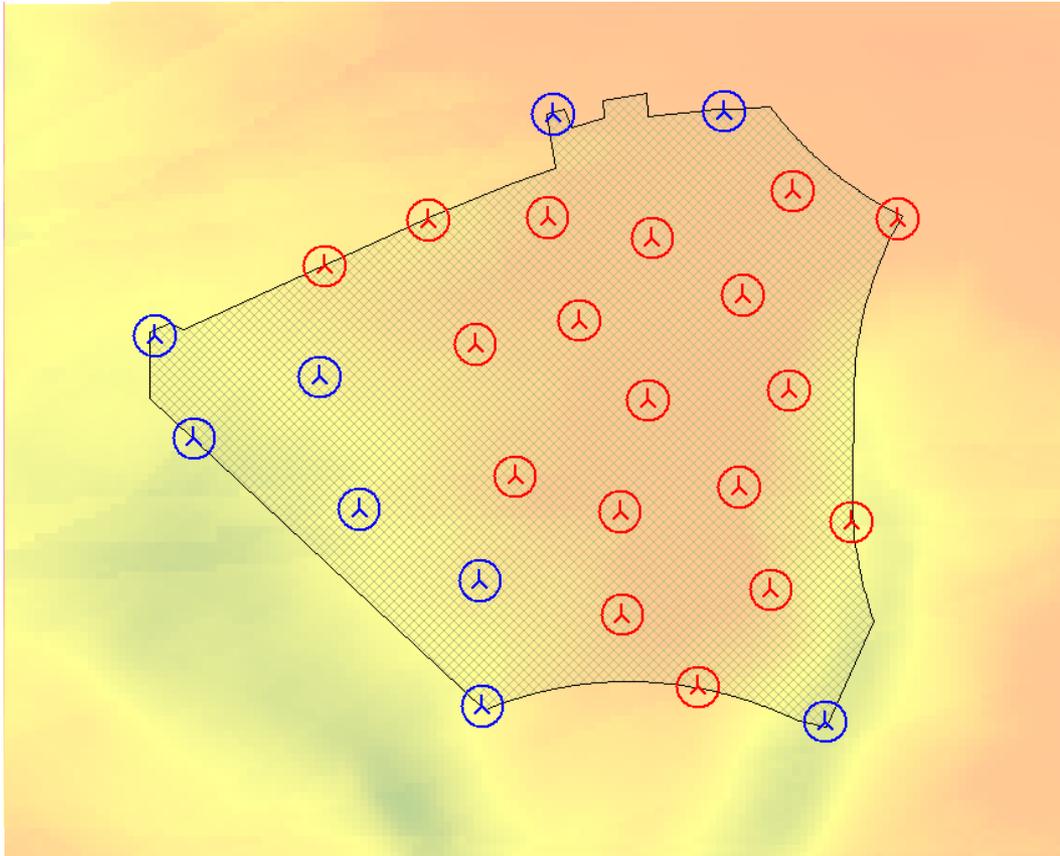
Der Energieertrags des Szenarios mit 23 Anlagen liegt um **7 %** über dem des Szenarios mit 21 Anlagen.

Das Szenario kann nicht realisiert werden: für 6 Anlagen (rot eingefärbt) sind nicht alle Bedingungen für den Standsicherheitsnachweis nach DIBt-Richtlinie erfüllt.

Die Prüfung der Einhaltung der WEA-Auslegungsparameter bzgl. der Turbulenzintensität erfolgte mit der Software wake2e der Firma F2E.



Optimierung von Parkkonfigurationen (IX)



Anzahl WEA	27
Summe Nennleistung [MW]	89,1
Summe Energieertrag [GWh/a]	200,267
Energieertrag pro WEA [GWh/a]	7,417
mittlerer Parkwirkungsgrad [%]	78,7
flächenbezogener Energieertrag [GWh/a/ha]	0,759

Der Energieertrags des Szenarios mit 27 Anlagen liegt um **20 %** über dem des Szenarios mit 21 Anlagen.

Das Szenario kann nicht realisiert werden: für 18 Anlagen (rot eingefärbt) sind nicht alle Bedingungen für den Standsicherheitsnachweis nach DIBt-Richtlinie erfüllt.

Die Prüfung der Einhaltung der WEA-Auslegungsparameter bzgl. der Turbulenzintensität erfolgte mit der Software wake2e der Firma F2E.





- 1) Wie viel Energie ist vorhanden ?
- 2) Wie viel Energie kann davon geerntet werden?

Optimierung im Rahmen der Restriktionen:

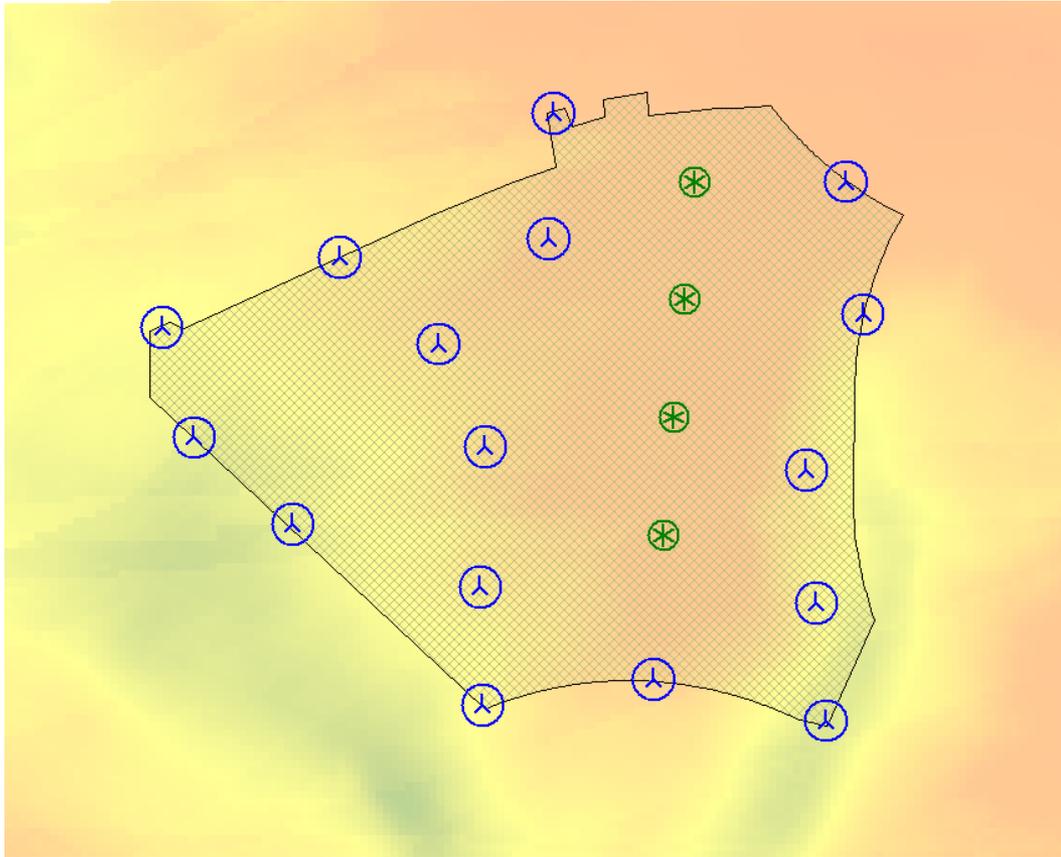
Geometrie / Windklima
Turbulenz / Standsicherheit
Bestandsanlagen älterer Bauart
Schallimmission

Weitere ertragsmindernde Einflüsse

- 3) Unsicherheit des Windklimas
- 4) Energiebilanz über einer Eignungsfläche
- 5) Fazit



Einfluss vorhandener Anlagen älterer Bauart



Anzahl WEA	4+16
Summe Nennleistung [MW]	8+52,8
Summe Energieertrag [GWh/a]	145,543
Energieertrag pro WEA [GWh/a]	7,277
mittlerer Parkwirkungsgrad [%]	87,4
flächenbezogener Energieertrag [GWh/a/ha]	0,551

Neben den vier vorhandenen Anlagen der 2-MW-Klasse (grün) können nur noch 16 Anlagen moderner Bauart (blau) realisiert werden.

Der Energieertrags des Szenarios mit 4+16 Anlagen liegt um **13 %** unter dem des Szenarios mit 21 Anlagen.





Ressource Eignungsfläche

- 1) Wie viel Energie ist vorhanden ?
- 2) Wie viel Energie kann davon geerntet werden?

Optimierung im Rahmen der Restriktionen:

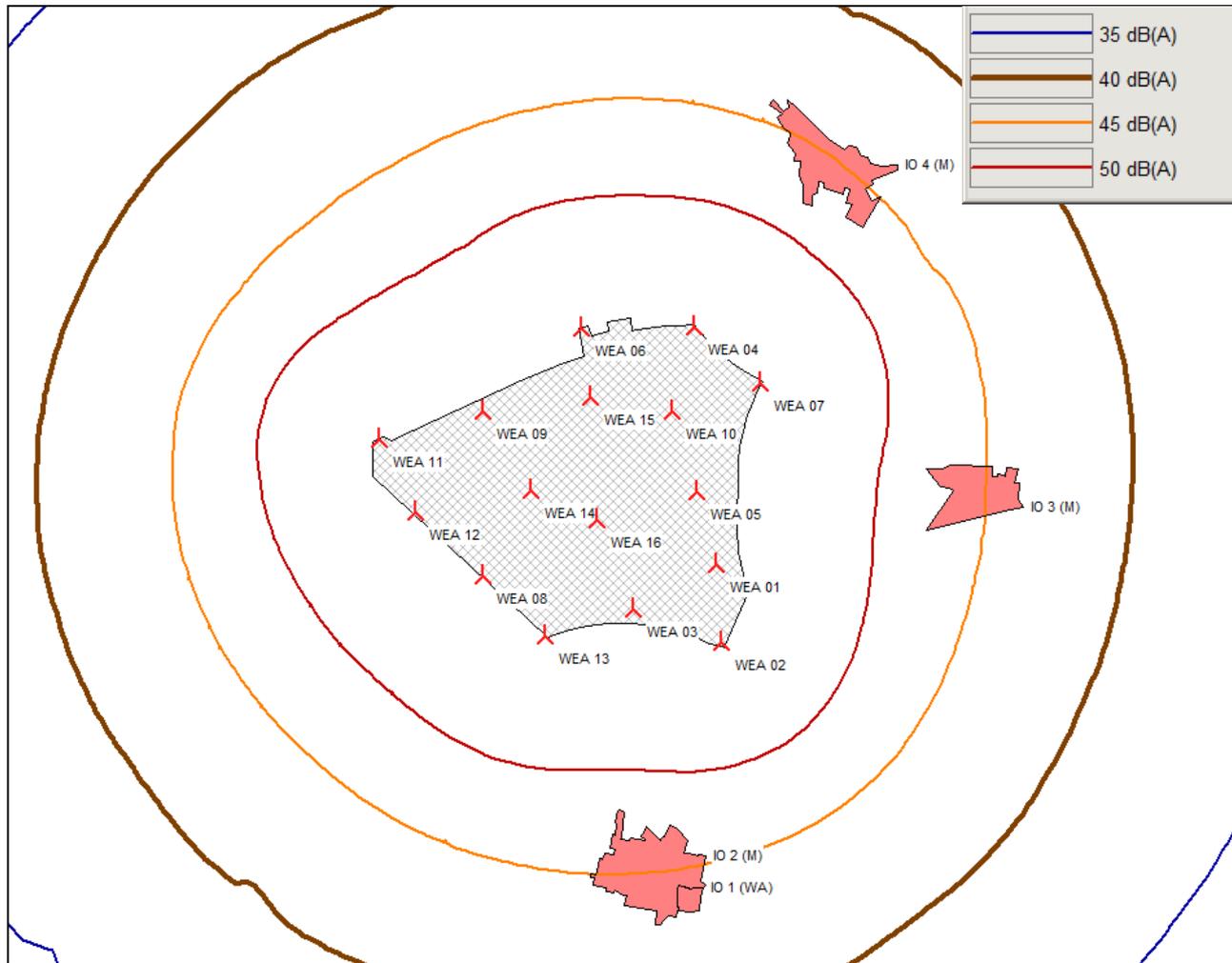
Geometrie / Windklima
Turbulenz / Standsicherheit
Bestandsanlagen älterer Bauart
Schallimmission

Weitere ertragsmindernde Einflüsse

- 3) Unsicherheit des Windklimas
- 4) Energiebilanz über einer Eignungsfläche
- 5) Fazit



Immissionsschutzbedingte Betriebseinschränkungen (I)



Szenario 1: 16 x leistungsoptimal

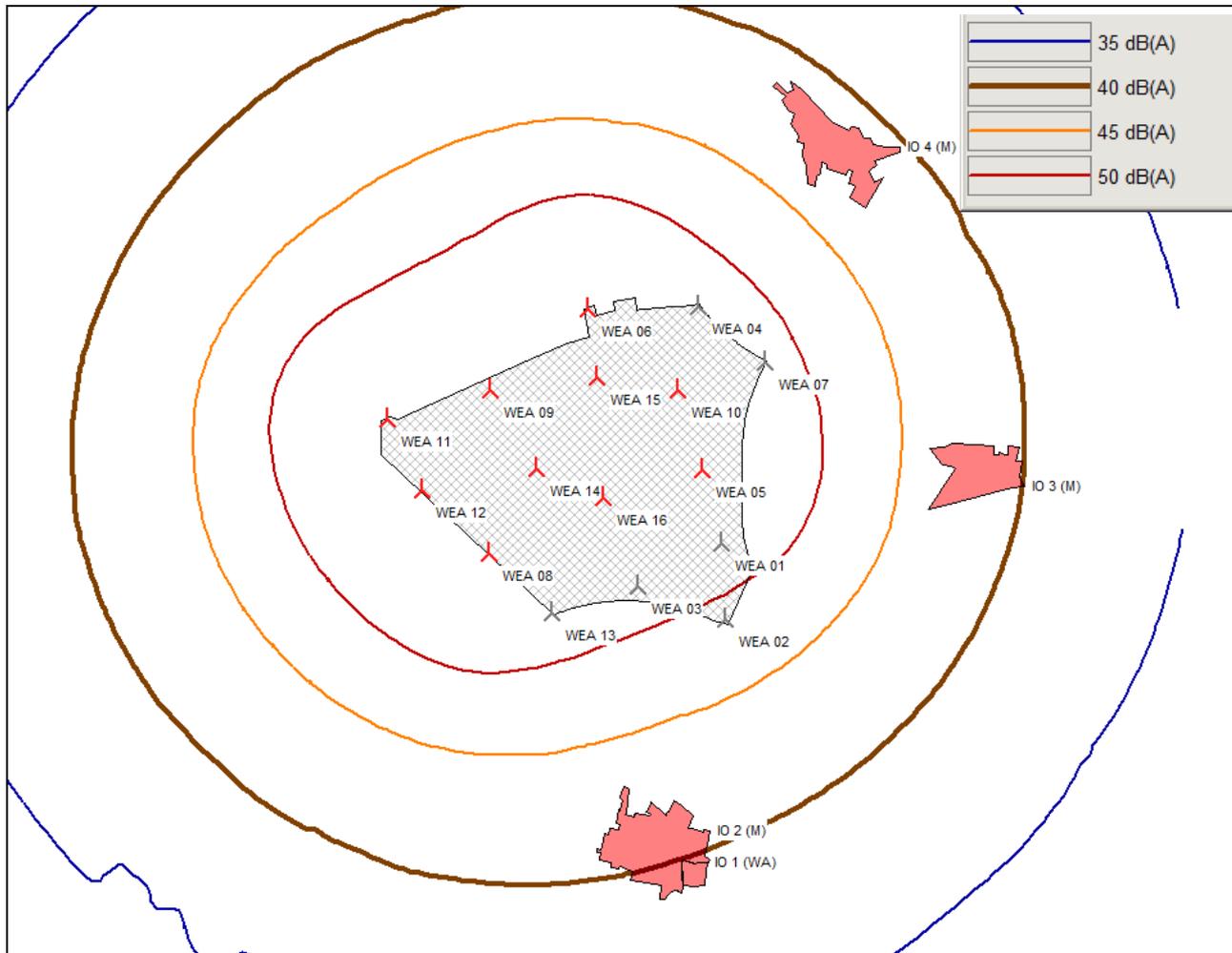
	IRW [dB(A)]	L _{r,90} [dB(A)]
IO 1	40	44,4
IO 2	45	47,9
IO 3	45	47,6
IO 4	45	47,7

AEP [GWh/a]	151
Einbuße [%]	0

Leistungsoptimaler Betrieb der hier 16 WEA führt zu Überschreitungen der Immissionsrichtwerte (IRW) an den Immissionsorten IO 1...4.



Immissionsschutzbedingte Betriebseinschränkungen (II)



Szenario 21: 10 x Mode 0

	IRW [dB(A)]	L _{r,90} [dB(A)]
IO 1	40	39,9
IO 2	45	43,0
IO 3	45	43,7
IO 4	45	43,7

AEP [GWh/a]	132
Einbuße [%]	12,6

Die nächtliche Abschaltung von 6 der 16 WEA (grau) gewährleistet die Unterschreitung der Immissionsrichtwerte und senkt den Energieertrag AEP um 12,6 %.

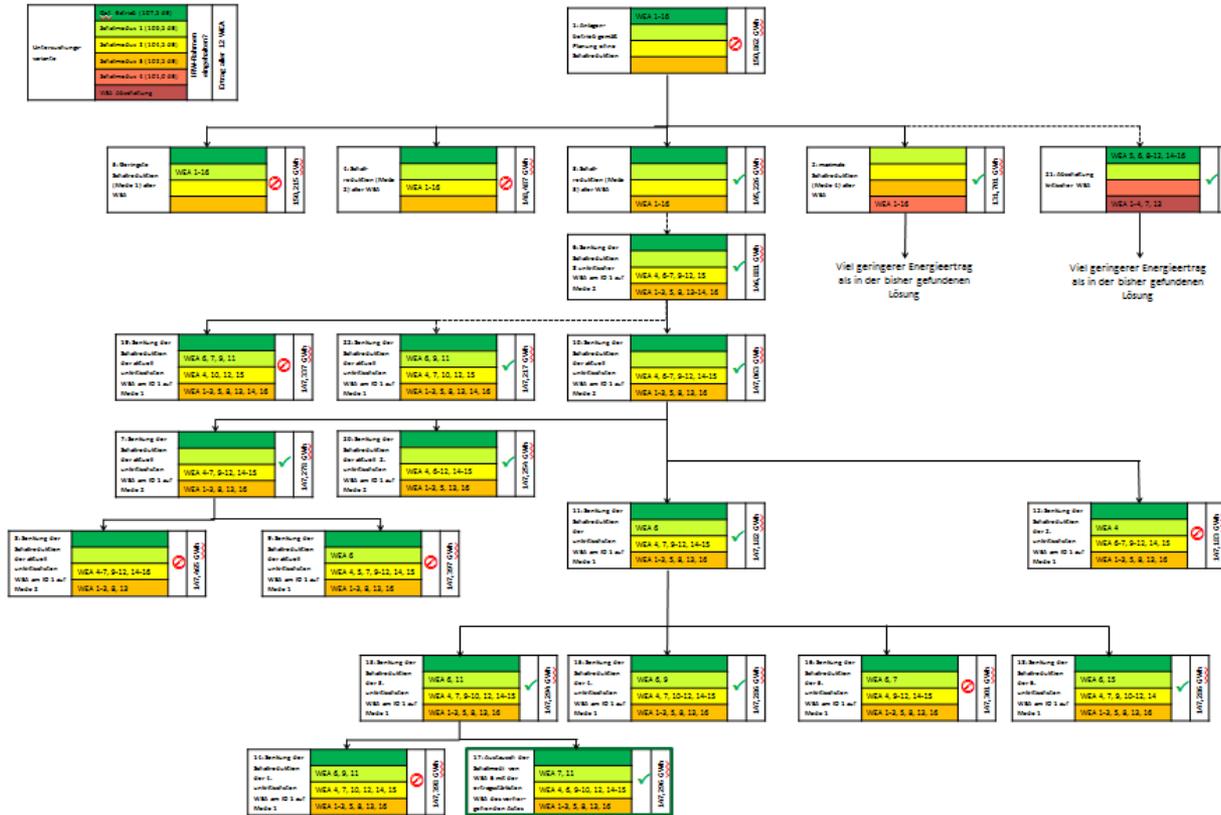


Immissionsschutzbedingte Betriebseinschränkungen (III)

Schalloptimierte Betriebsmodi ermöglichen eine flexible Anpassung des Windparkbetriebs an Restriktionen, die sich aus der nötigen Unterschreitung von Schall-Immissionsrichtwerten ergeben.

Bei n Windenergieanlagen, für die jeweils m Betriebsmodi in Frage kommen, ergeben sich m^n mögliche Szenarien. (Bei 16 Anlagen und 4 Betriebsmodi sind das 4.294.967.296 Szenarien.)

Lösung: Baumdarstellung - systematisches Durchrechnen und Ausschluss hoffnungsloser Teilbäume:



Immissionsschutzbedingte Betriebseinschränkungen (III)

1: Anlagenbetrieb gemäß Planung ohne Schallreduktion	WEA 1-16	❌	150,862 GWh

3: Schallreduktion (Mode 3) aller WEA		✅	145,226 GWh
	WEA 1-16		

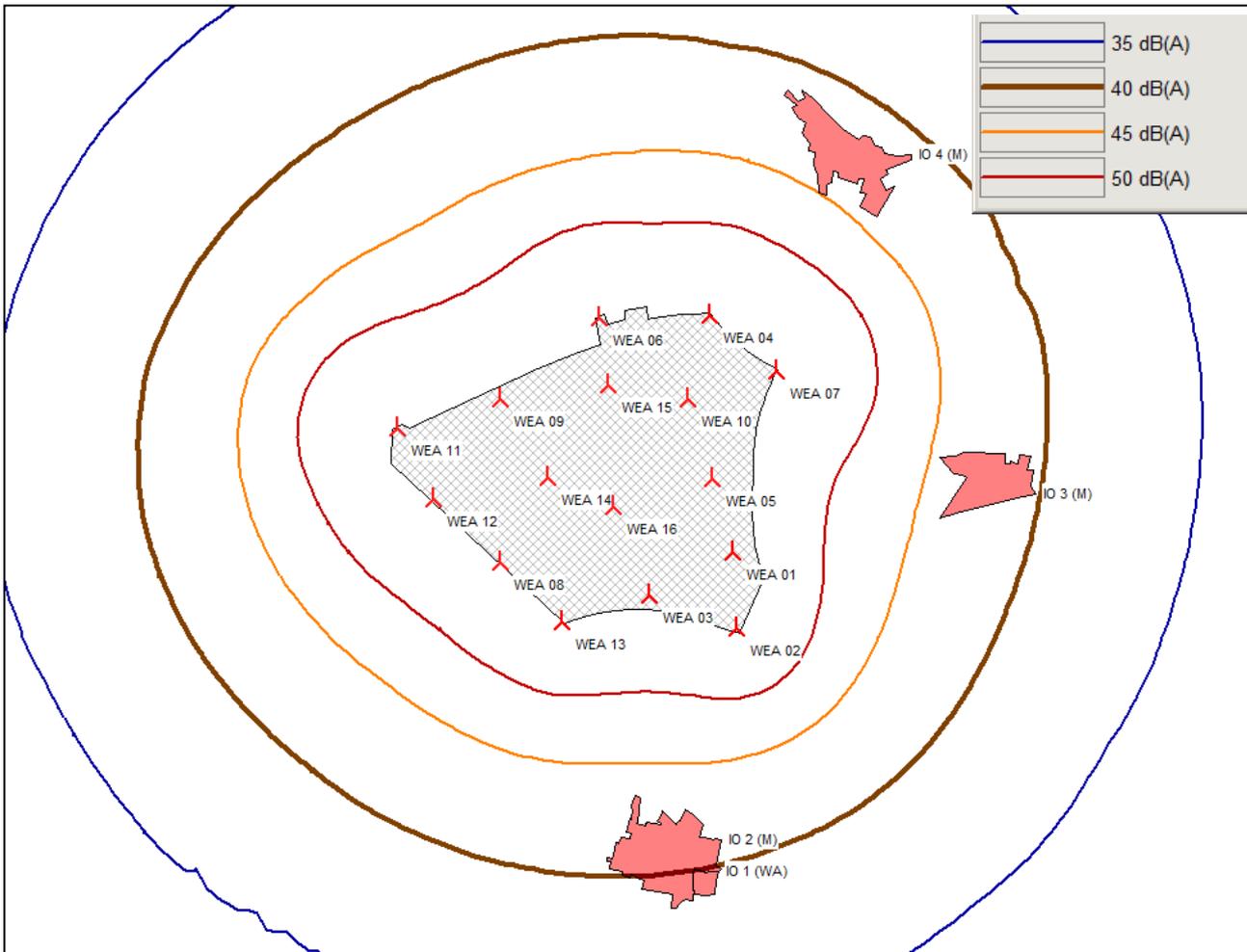
Legende:

Untersuchungsvariante	Opt. Betrieb (107,5 dB)	IRW-Rahmen eingehalten?	Ertrag aller 16 WEA
	Schallmodus 1 (106,5 dB)		
	Schallmodus 2 (104,5 dB)		
	Schallmodus 3 (102,5 dB)		
	Schallmodus 4 (101,0 dB)		
	WEA Abschaltung		

17: Austausch der Schallmodi von WEA 6 mit der ertragsstärksten WEA des vorhergehenden Astes		✅	147,296 GWh
	WEA 7, 11		
	WEA 4, 6, 9-10, 12, 14-15		
	WEA 1-3, 5, 8, 13, 16		



Immissionsschutzbedingte Betriebseinschränkungen (V)



Szenario 17: 2 x Mode 1, 7 x Mode 2, 7 x Mode 3

	IRW [dB(A)]	L _{r,90} [dB(A)]
IO 1	40	40,0
IO 2	45	43,4
IO 3	45	44,5
IO 4	45	45,0

AEP [GWh/a]	147
Einbuße [%]	2,4

Der nächtliche Betrieb aller WEA in verschiedenen optimierten schall-reduzierten Betriebsmodi gewährleistet ebenfalls die Unterschreitung der Immissionsrichtwerte und senkt den Energieertrag AEP nur noch um 2,4 %.





- 1) Wie viel Energie ist vorhanden ?
- 2) Wie viel Energie kann davon geerntet werden?

Optimierung im Rahmen der Restriktionen:

Geometrie / Windklima
Turbulenz / Standsicherheit
Bestandsanlagen älterer Bauart
Schallimmission

Weitere ertragsmindernde Einflüsse

- 3) Unsicherheit des Windklimas
- 4) Energiebilanz über einer Eignungsfläche
- 5) Fazit



Weitere ertragsmindernde Einflüsse

Bezeichnung	Beschreibung	typische Größenordnung der Ertragseinbuße
Schattenwurfabschaltung	Vorübergehende Anlagenabschaltung zur Vermeidung lästiger Schattenwurfimmissionen	oft < 1 % des Energieertrags
Naturschutzbedingte Betriebseinschränkungen	regelmäßige Anlagenabschaltung zum Schutz von Vogel- / Fledermauspopulationen	bis ca. 2 % des Energieertrags
Technisch bedingte Ertragseinbußen	Anlagenstillstand, Kabel-/ Trafoverluste	ca. 3...5 % des Energieertrags ca. 3 % des Energieertrags





- 1) Wie viel Energie ist vorhanden ?
- 2) Wie viel Energie kann davon geerntet werden?

Optimierung im Rahmen der Restriktionen:

Geometrie / Windklima
Turbulenz / Standsicherheit
Bestandsanlagen älterer Bauart
Schallimmission

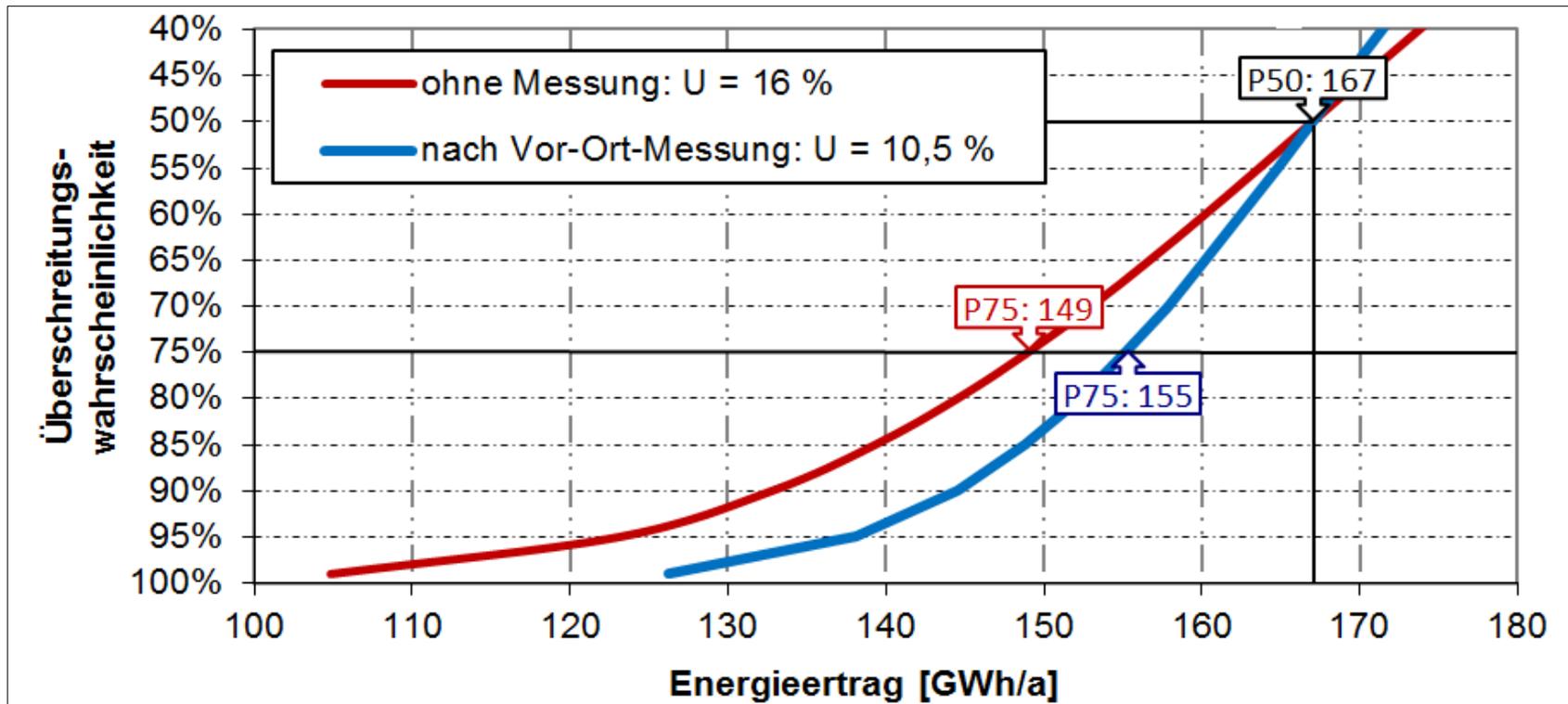
Weitere ertragsmindernde Faktoren

- 3) **Unsicherheit des Windklimas**
- 4) Energiebilanz über einer Eignungsfläche
- 5) Fazit



3) Unsicherheit des Windklimas: Risikobetrachtung

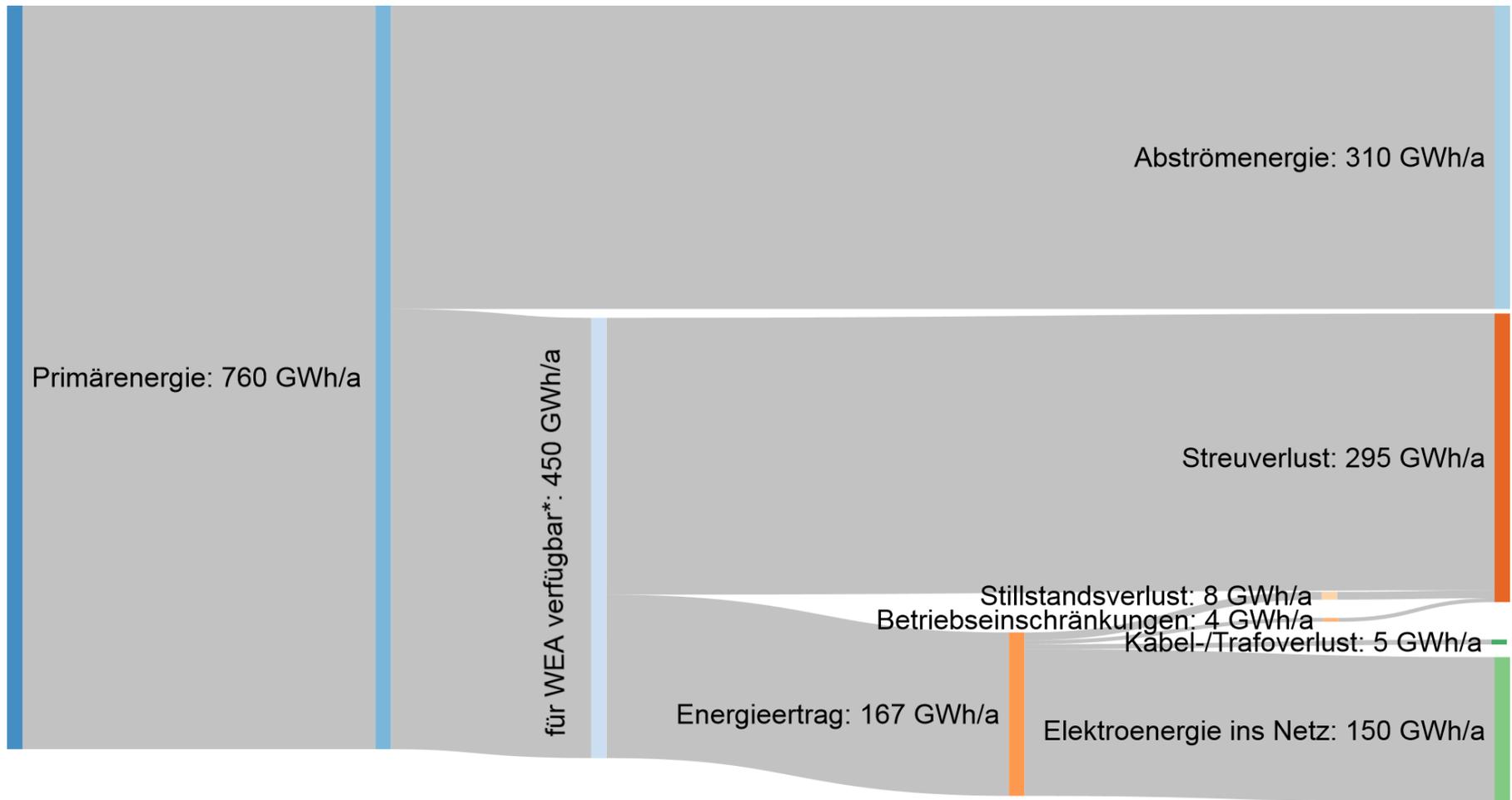
Die Prüfung von Investitionsentscheidungen unter Einbeziehung der Unsicherheit erfolgt häufig anhand von Ertragswerten mit zugeordneten Überschreitungswahrscheinlichkeiten (P50, P75, ..).



Das Beispiel zeigt Risikobetrachtungen für das Szenarien mit einem Energieertrag P50 von 167 GWh/a. Der Unterschied der P75-Werte des Szenarios ohne Windmessung (149 GWh/a) zu dem des Szenarios mit Windmessung (155 GWh/a) kann zu verschiedenen Entscheidungen führen. Für Eignungsflächen im komplexen Gelände ohne solide Quellen für Vergleichsdaten im Umkreis von höchstens 2 km sind eigene Vor-Ort-Windmessungen Stand der Technik (TR6, Rev. 9 vom 22.09.2014).



4) Energiebilanz über einer Eignungsfläche



* Nach der klassischen Theorie von A. Betz kann eine ideale scheibenförmige Windenergieanlage dem Wind höchstens 16/27 bzw. 59,3 % seiner Primärenergie entnehmen. Dieser Wert wird hier nur vorläufig als Richtschnur verwendet, da in einer Eignungsfläche auch mehrere ideale WEA hintereinander denkbar wären.



5) Fazit

Auf 2 untersuchten Eignungsflächen wurden für 5 Anlagentypen der 2,3...3,3-MW-Klasse mit einer Spitzenhöhe von höchstens 207 m ertragungsoptimale Parkdesigns unter Berücksichtigung der Standsicherheit berechnet.

Für die optimalen Parkdesigns ergeben sich u.a. folgende Kennzahlen:

- *Mittlere Volllaststundenzahl: 2222...2987 MWh/MW*
- *flächenbezogener Energieertrag: 0,44...0,67 GWh/a/ha*
- *Windnutzungsgrad (Nutzungsgrad der Primärenergie): 14,2...22,0 %.*

Das Konzept einer Bilanzierung des Verbleibs des für Windenergieanlagen verfügbaren Teils der Primärenergie hilft dabei, den Energieertrag des gesamten Windparks stärker im Blick zu haben als den Ertrag einzelner Windenergieanlagen.





Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontaktdaten: Ingenieurbüro Kuntzsch GmbH

Dipl.-Ing. Henning Krebs: h.krebs@ib-kuntzsch.de

Dipl.-Geogr. Maximilian Berndt: m.berndt@ib-kuntzsch.de

www.windgutachten.de

Messestand: 2-105

