WINDPARK-BETRIEBSDATENANALYSE

AUF DER SUCHE NACH DEN FEHLENDEN PROZENTEN

RAMBOLL

RAMBOLL - AUF EINEN BLICK

- Führendes Ingenieur-, Planungs- und Beratungsunternehmen
- 1945 in Dänemark gegründet
- 13.000 Expertinnen und Experten
- 300 Offices in 35 Ländern
- Umsatz 2016: 1,4 Mrd. Euro
- Im Besitz der Ramboll-Stiftung
- www.ramboll.com

PROJEKTENTWICKLUNG
- Layout & Micrositing
- Machbarkeitsstudien
- Projekt-Engineering
- Kostenoptimierung
- Auftragswesen und -vergabe
- Genehmigungsmanagement
- Owner's & Lender's Engineering
- Repowering

WIND & SITE
- Vorabschätzung
- Windpotentialkarten
- Windmesskampagnen (LiDAR/SoDAR/Mast)
- Windgutachten (WAsP/CFD)
- Windparkoptimierung
- Standortgüte nach EEG 2017
- Turbulenzgutachten
- Verlustgutachten

UMWELTGUTACHTEN
- Umweltverträglichkeitsstudien
- Landschaftsbildbewertung
- Schall- & Schattengutachten
- Visualisierung
- Eisfall (Risikoabschätzung)
- Denkmalschutzstudien
- Optische Bedrängung
- Sichtbarkeitsanalysen

ELEKTRISCHES DESIGN
- Systemstudien
- Netzanbindungsdesign
- NS-, MS- und HS-Netzkonzepte
- Auslegung von Umspannwerken
- Smart-Grid-Lösungen

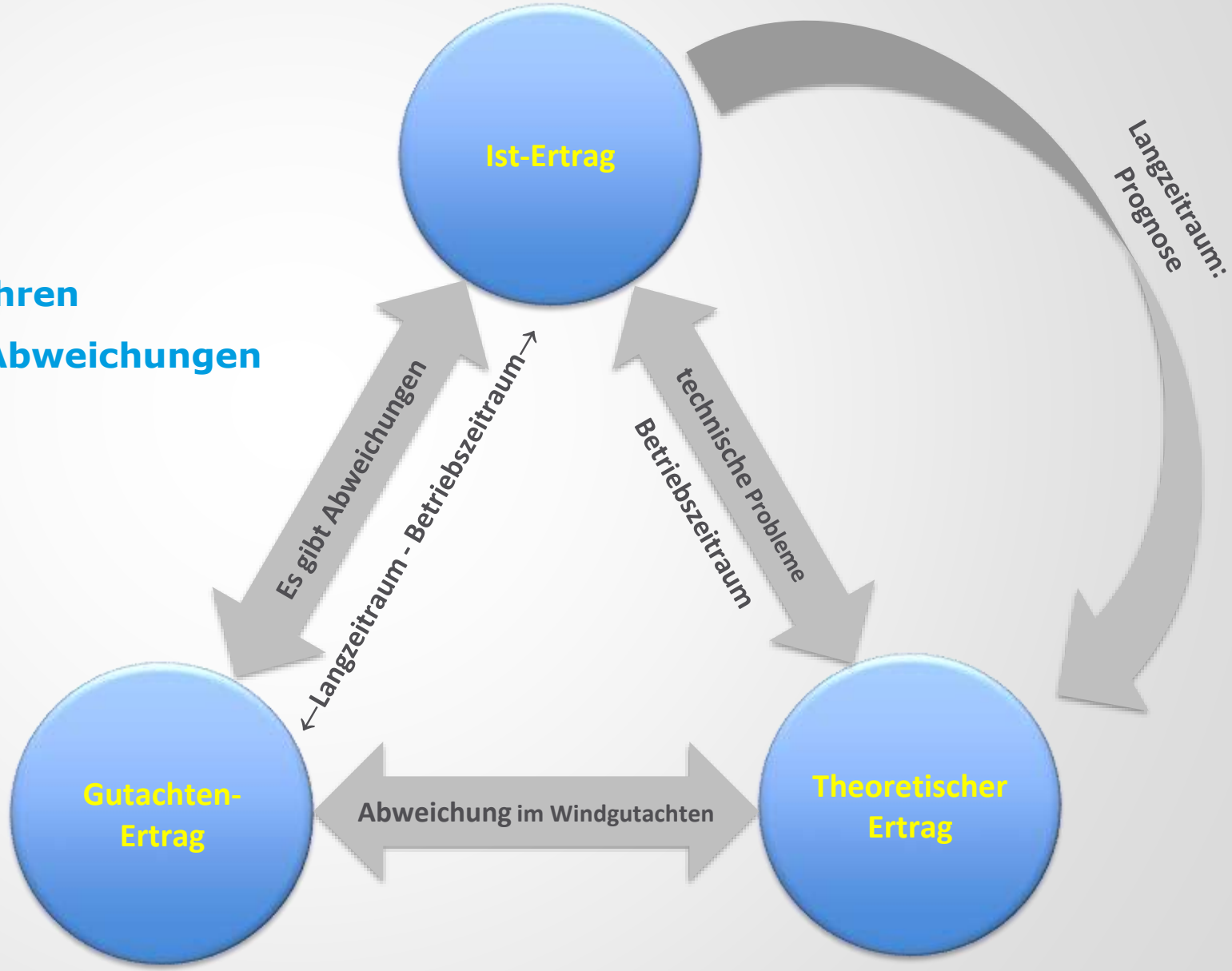
HOCH- & TIEFBAU
- Geotechnische Untersuchungen
- Design von WEA-Fundamenten
- Design von WEA-Türmen
- Zuwegung & Stellflächen

ASSET MANAGEMENT
- Planung & Überwachung der technischen Betriebsabläufe
- Monitoring & Instandhaltung
- Leistungsoptimierung Performance-Check (Betriebsdaten- & Verlustanalyse)
- Laufzeitverlängerung
- Gondel-LiDAR-Systeme
- Leistungskurvenvermessung

DUE DILIGENCE
- Technische Projektprüfung
- Umweltrechtliche Projektprüfung
- Vertragsprüfung

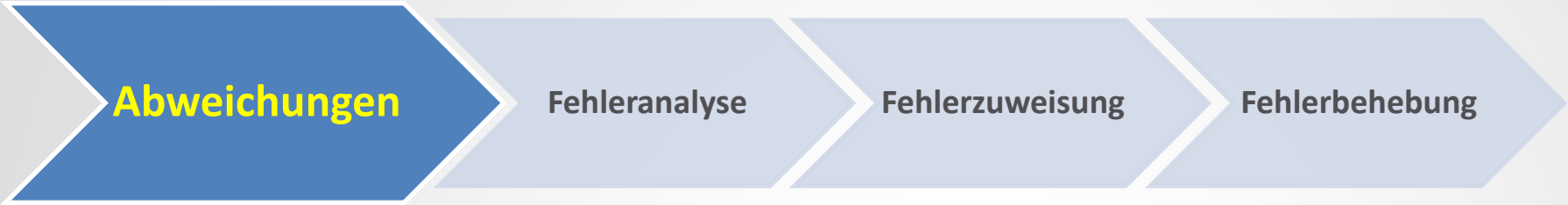
MEIN WINDPARK LÄUFT NICHT RICHTIG !
→ WAS IST ZU TUN?

1. Die richtigen Fragen stellen
2. Soll-Ist-Vergleiche durchführen
3. Analyse der Ursachen von Abweichungen
4. Fehlerbehebung



RAMBOLL

URSACHEN VON ABWEICHUNGEN



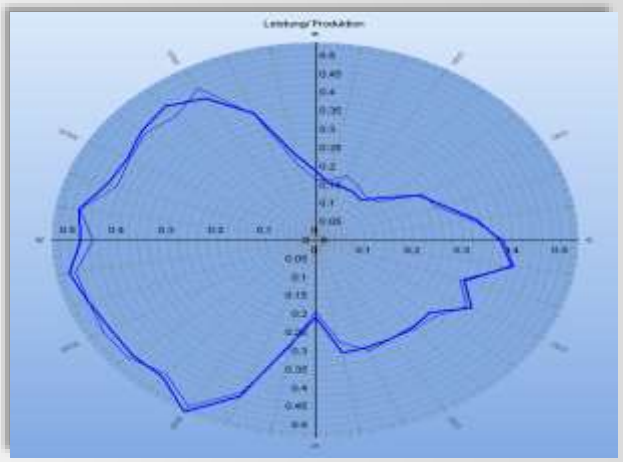
Mögliche Ursachen:

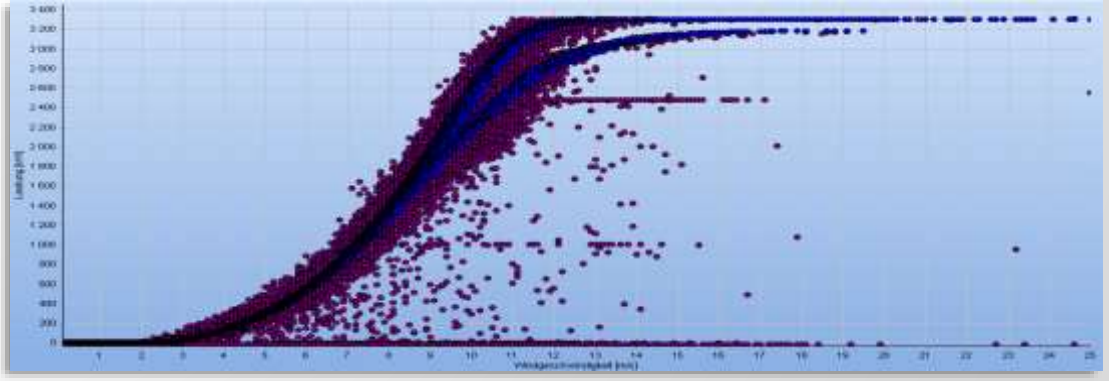
- fehlende Vergleichbarkeit (ist zu minimieren)
- Volatilität des Windangebots (z.B. Bezugszeitraum)
- Mängel im Windgutachten
- Verluste (Ausfälle, Abregelungen, Technik)
- Technische Probleme (Kennlinie, Yaw-misalignment, Steuerung, Alterung)
- Abgesicherte und nicht abgesicherte Verluste

RAMBOLL

WELCHE ANALYSE-TIEFE IST ERFORDERLICH?

- **Level I:** Analyse monatlicher Produktionsdaten (Windindex-Methode) und Betriebsführungsberichte
- **Level II:** Leistungs- und Verlustanalyse basierend auf 10min-SCADA-Daten und Inspektionsberichten
- **Level III:** Leistungsanalyse mit zusätzlichen Windmessungen (Messmast, LiDAR (bodengebunden oder auf der Gondel))

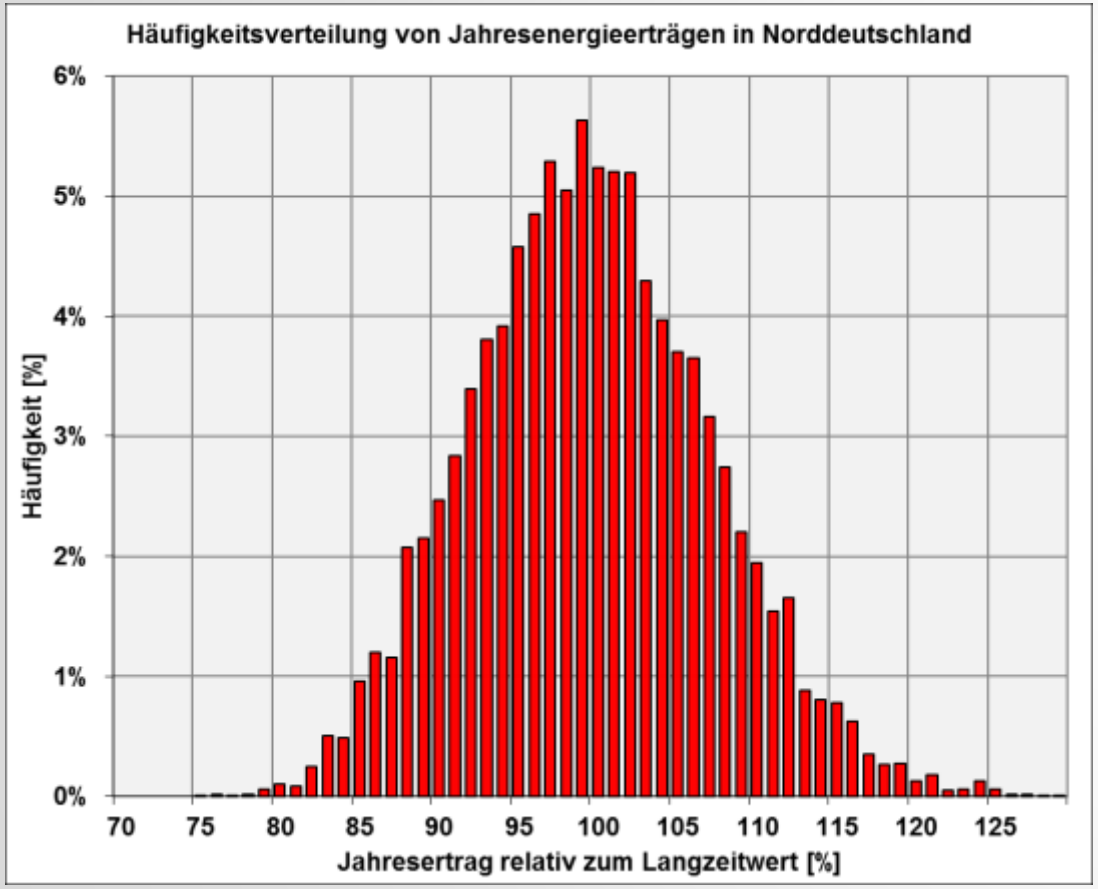


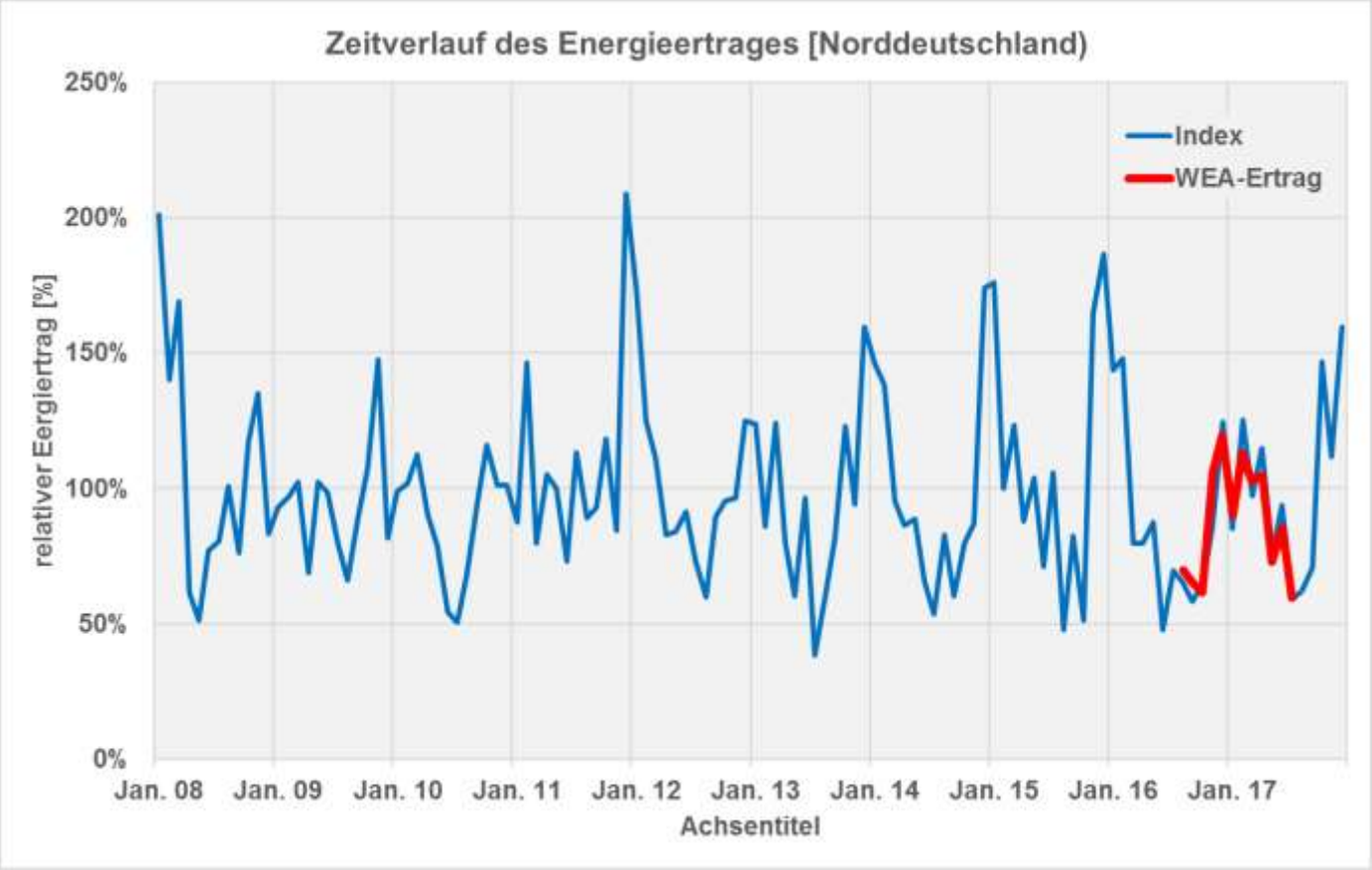


RAMBOLL

BETRIEBSDATENANALYSE: LEVEL I

LEVEL I: VOLATILITÄT VON PRODUKTIONSDATEN





RAMBOLL

LEVEL I: ANALYSE VON MONATLICHEN PRODUKTIONSDATEN

Level I Komponenten:

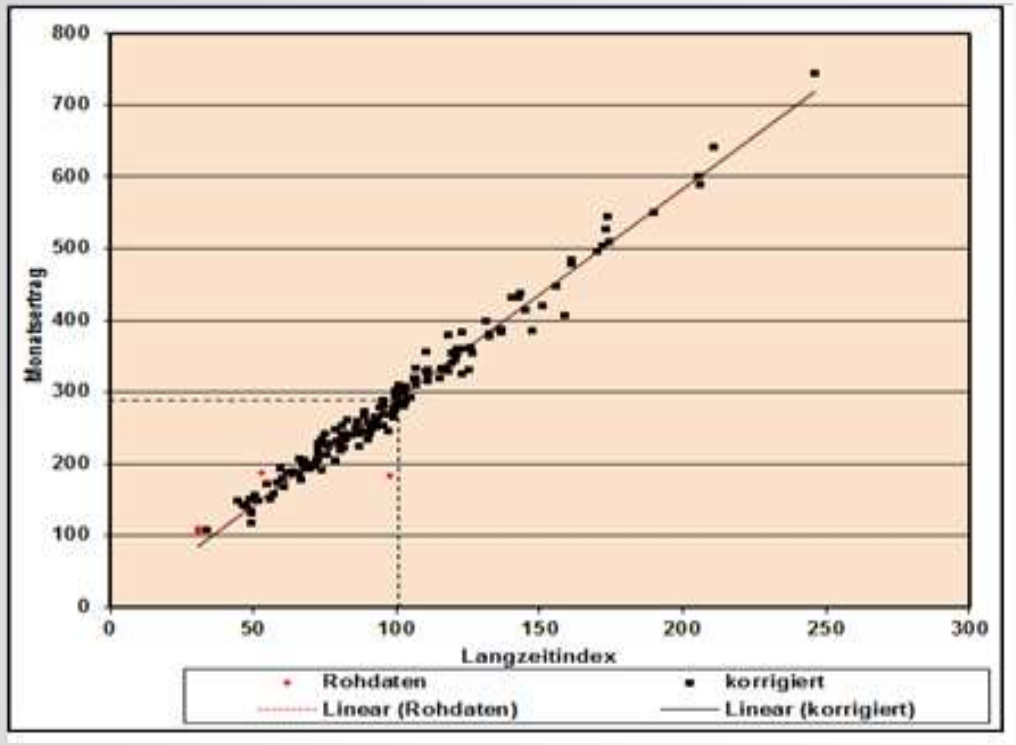
- **Analyse und Plausibilitäts-Check von monatlichen Produktionsdaten und Anlagenverfügbarkeiten**
- **Langzeiteinordnung der Realerträge**
- **Berechnung der langfristig repräsentativen Jahresenergieerträge**
- **Bewertung der Unsicherheiten**

<u>Erforderliche Daten:</u>

- Monatliche Produktionsdaten und Verfügbarkeiten aller Windenergieanlagen
- Standortkoordinaten der Windenergieanlage(n) und Zuordnung der individuellen Produktionsdatensätze
- Zur Überprüfung der elektrischen Verluste: Zählerdaten an Netzverknüpfungspunkt

RAMBOLL

LEVEL I: LANGZEIT-PRODUKTIONSDATEN



Ertragsindizes:

Deutschland: Index Ramboll_2018
(Mittel aus BDB-V2011, MERRA2, ERAinterim)

Ausland: Ertragsidizes aus Reanalysen
(MERRA2, EMD-ConWx, Vortex, ERA-Interim)

Referenz-Zeitraum: 1998-2017

Standort	Typ	NH [m]	Inbetriebnahme	Ramboll_2018		WKP/ tatsächl. Ertrag	V2017 98-17			relativ Indexmittel	MERRAII 98-17			relativ Indexmittel	ERAinterim 98-17			relativ Indexmittel
				WKP	UNC stat+Index		Region	WKP	UNC stat		Koordinate	WKP	UNC stat		Koordinate	WKP	UNC stat	
[redacted]	E-115/3.0MW-3.000	135,4	Mai. 16	**9330**	4,7%	113,9%	12	9630	3,4%	3,2%	10,00 53,50	9179	2,7%	-1,6%	9,75 53,25	8919	1,9%	-4,4%
[redacted]	E-115/3.0MW-3.000	135,4	Jun. 16	**9115**	6,5%	113,1%	12	9425	2,4%	3,4%	10,00 53,50	8840	2,3%	-3,0%	9,75 53,25	8438	3,3%	-7,4%
[redacted]	E-115/3.0MW-3.000	135,4	Jun. 16	**9272**	6,0%	113,9%	12	9913	3,4%	6,9%	10,00 53,50	9141	2,9%	-1,4%	9,75 53,25	9041	2,5%	-2,5%
[redacted]	E-115/3.0MW-3.000	135,4	Mai. 16	**9996**	4,0%	111,9%	12	10340	1,0%	3,4%	10,00 53,50	9697	2,4%	-3,0%	9,75 53,25	9808	3,1%	-1,9%
[redacted]	E-115/3.0MW-3.000	135,4	Jun. 16	**9329**	4,3%	110,4%	12	9632	2,1%	3,2%	10,00 53,50	9076	3,1%	-2,7%	9,75 53,25	9166	3,6%	-1,7%
[redacted]	E-115/3.0MW-3.000	135,4	Jun. 16	**10323**	4,4%	113,0%	12	10706	1,8%	3,7%	10,00 53,50	9984	3,0%	-3,3%	9,75 53,25	10119	3,5%	-2,0%

RAMBOLL

Langzeit Produktion: ∅ 9.500 MWh/a ± 5%

BETRIEBSDATENANALYSE: LEVEL II

LEVEL II: LEISTUNGSANALYSE BASIEREND AUF SCADA-DATEN

Level II Komponenten:

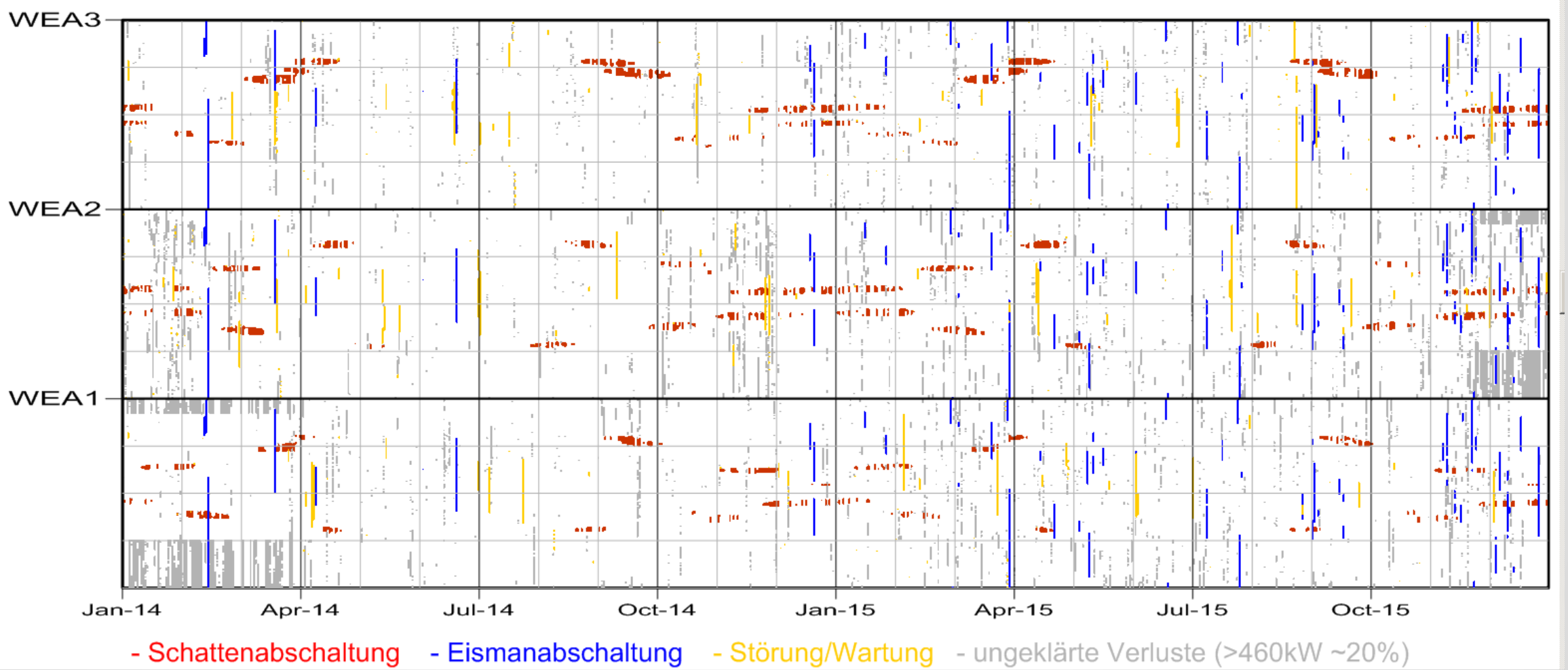
- **Plausibilitäts-Check** (Leistung, Status- und Fehlermeldungen, Windgeschwindigkeit und –richtung, Gondelsensorik)
- **Identifikation aller Stillstands- und Minderproduktionsperioden:** Netzfehler, Wartung, Störungen, Abregelungen, Betriebsbeschränkungen durch Umweltauflagen → zeitliche Verfügbarkeit
- **Modellbildung und Simulation:** Zeitverlauf der potentiellen Energieabgabe
- **Verlustanalyse:** Quantifizierung von Verlusten → energetische Verfügbarkeit, Detailanalysen relevanter Verluste
- **Empfehlungen für Optimierungen** zur Reduktion von Stillstandszeiten und Verlusten
- **Langzeit-Abgleich:** Langzeitrepräsentative Jahresenergieerträge (energetische Verfügbarkeit=100%)

Erforderliche Daten:

- 10-Minuten SCADA-Daten für jede WEA (Leistungsdaten, Windgeschwindigkeit, Gondelposition, Außentemperatur, Status- und Fehlermeldungen, Rotordrehzahl, Pitch-Anstellwinkel)
- Liste aller Status- und Fehlercodes der spezifischen WEA-Typen
- Standortkoordinaten jeder WEA
- Inspektionsberichte sofern erforderlich

RAMBOLL

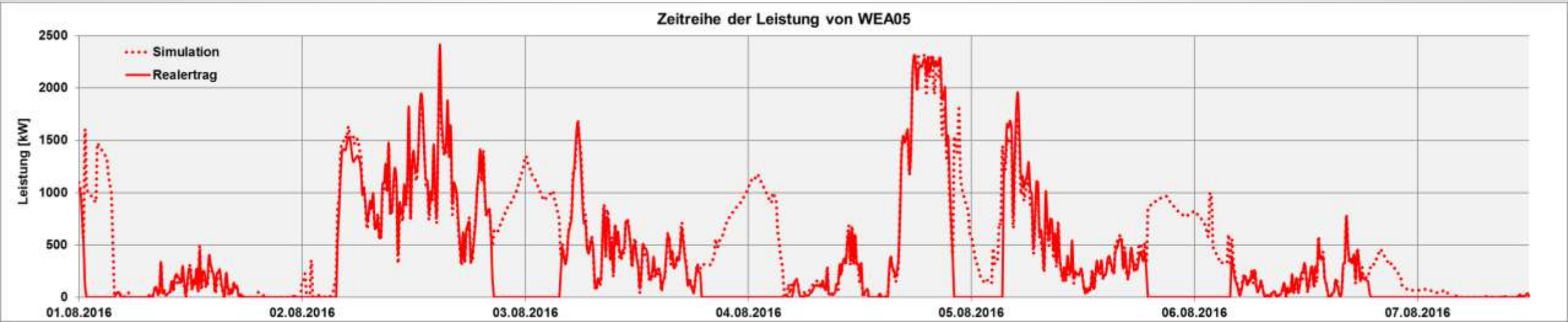
STILLSTANDS- UND MINDERPRODUKTIONSPERIODEN: OPERATIONAL FINGERPRINT



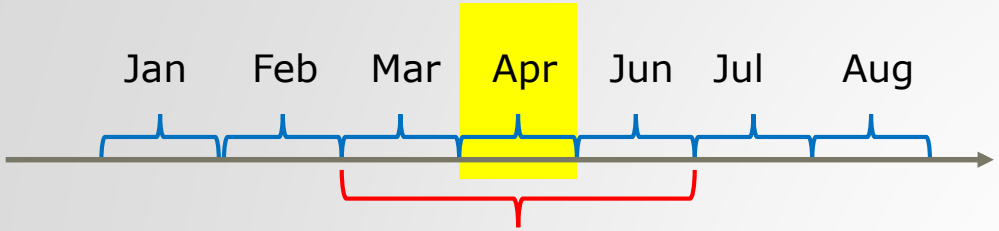
RAMBOLL

SIMULATION DES POTENTIELLER ENERGIEERTRÄGE

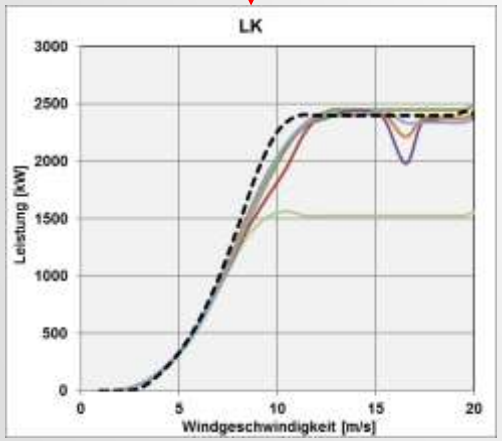
1. **Gondelwind:** Multikorrelation mit benachbarten WEA (Status=OK)und Reanalysedaten
2. **Gondelleistungskurve:** aus Gondelwind und WEA-Leistung (Status=OK)
3. **Simulation:** rekonstruierte Windzeitreihe +Gondelleistungskurve



GONDELLEISTUNGSKURVEN

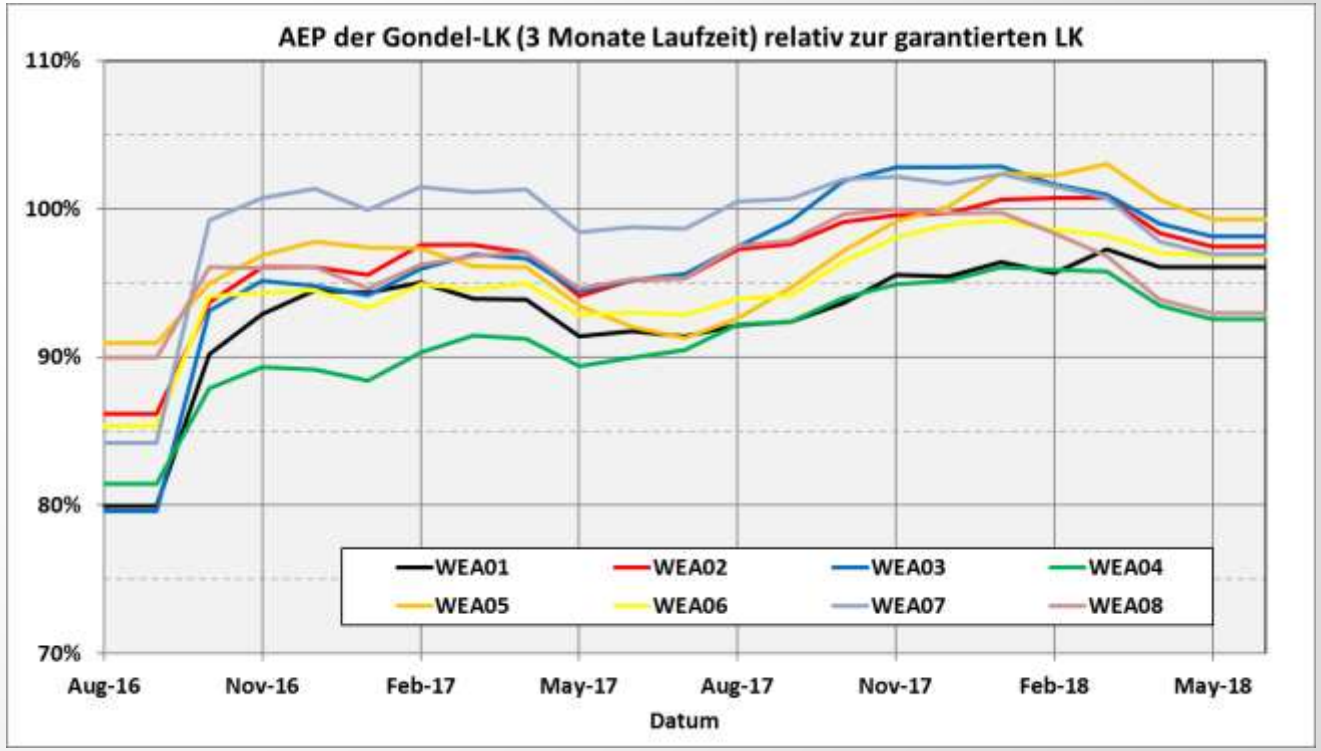


Datengrundlage: v, P
mindestens 60 Tage
Status=OK



Vermeidung von Inkonsistenzen:

1. Schätzung der LK aus den SCADA-Daten (Status=OK)
2. Zeitlich gleitende Analyse
3. Anwendung der geschätzten LK auf die Daten



Verfahren analog zur TR10 der FGW

VERLUSTANALYSE

3 Vestas V112:

potentieller WEA-Ertrag ~11.000 MWh/a

<u>Verluste:</u> 6,2%-24,5% pro WEA

Einsman: ~ 679 MWh/a = 51.000 €/a

Wartung: ~ 103 MWh/a = 7.700 €/a

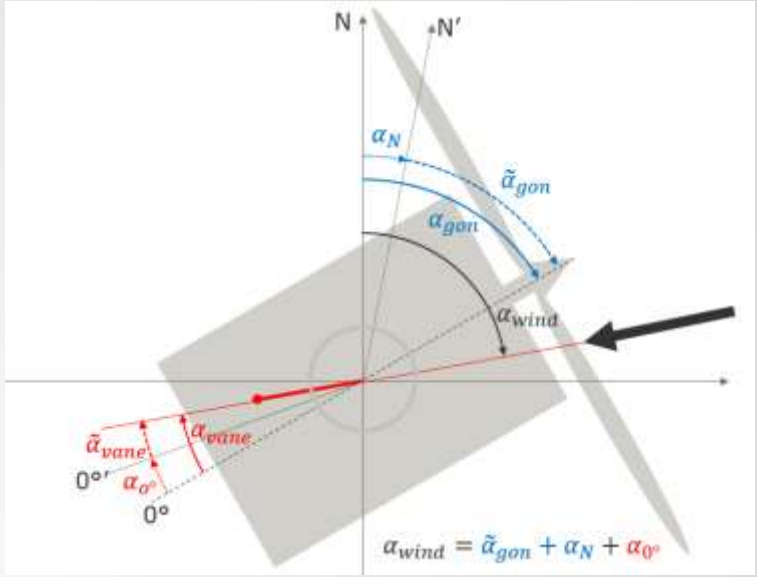
Turbulenz: ~ 2573 MWh/a = 193.000 €/a

Total Energy [MWh]	14513	14179	14834	
Total Energy [MWh/a]	11055	10801	11300	
Losses [%]	6,2%	24,5%	7,9%	
SysLog	WEA05	WEA06	WEA07	Description
-5				outside of data range
-4	-0,1%	-0,4%	-0,2%	self consumption
-3	0,0%	0,0%	0,0%	v>3 and P=<0 and T<2
-2	0,2%	0,2%	0,3%	v>3 and P=<0 and T>=2
-1	0,4%	0,1%		Missing data
0	93,8%	75,5%	92,1%	Turbine OK
30	0,0%			Internal subLogic Alarm
100	0,0%			Too many auto-restarts:_____
144		0,0%	0,0%	High windspeed: __._ m/s
Einsman	0,1%		0,1%	High gear temp:___°C/air:___°C
→	4,1%	4,9%	5,1%	Pause over RCS __
329	0,0%			DC Overvolt: ____V state __
356	0,2%	0,2%	0,0%	Extreme yawAlarm __._m/s___._°
444	0,0%	0,0%		EMF Acc _ Press Low, ___._ bar
604	0,0%	0,0%		Remote Reboot
Wartung	0,0%		0,0%	RT Dip exc.lim.:___%:_____e-2s
→	0,6%	0,5%	1,0%	Pause pressed on keyboard
2674			0,3%	UPS Battery Alarm
3130	0,3%			MSCHWErr, ConvModID __Par2___
3139			0,2%	LSCHWErr, ConvModule_,Par2____
3161	0,0%			ExtMSCInfo:ConvMod_, L___
3178	0,0%	0,0%	0,0%	ModeSelectorInStop:Tow__Nac__
3209	0,0%			YawSignals Invalid
3234			0,0%	PitchAccumulatorTestAccFailed
3272	0,0%		0,0%	YawUntwistCW: Code__,_____°
3273	0,0%	0,0%	0,0%	YawUntwistCCW: Code__,_____°
3296	0,0%			Yaw To Nacelle Position Reset
3298		0,0%	0,0%	Yaw To Cable Twist Reset
3331	0,2%			DCLink Contactor Feedback
[illegible]		0,4%	0,4%	LSCBreakerFbTimeout PSC__,act_
Turbulenz	0,0%		0,2%	Unexp LSCBreaker Fb.PSC__,act_
→		18,2%	0,2%	SWDS High Wind:__._m/s dir:___

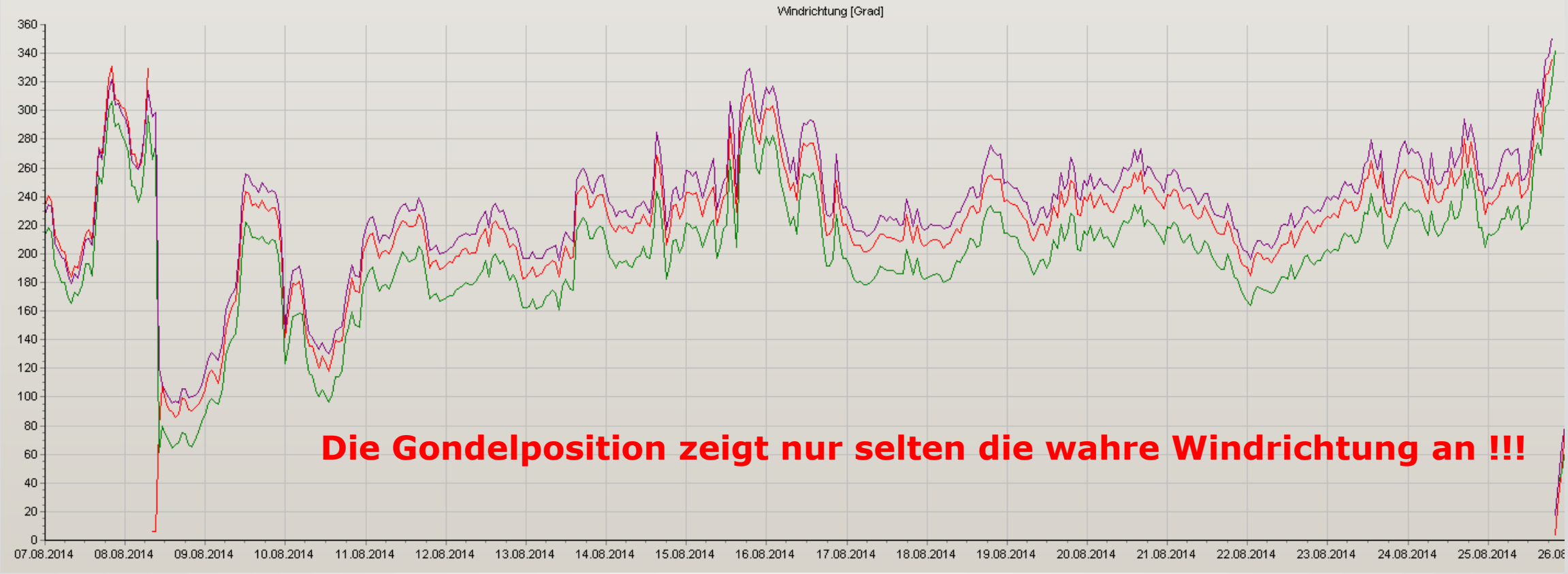
RAMBOLL

BEISPIEL: SEKTORMANAGEMENT

<u>Standort ABC WEA06:</u> Abschaltung von 120° bis 180° und 300° bis 360°



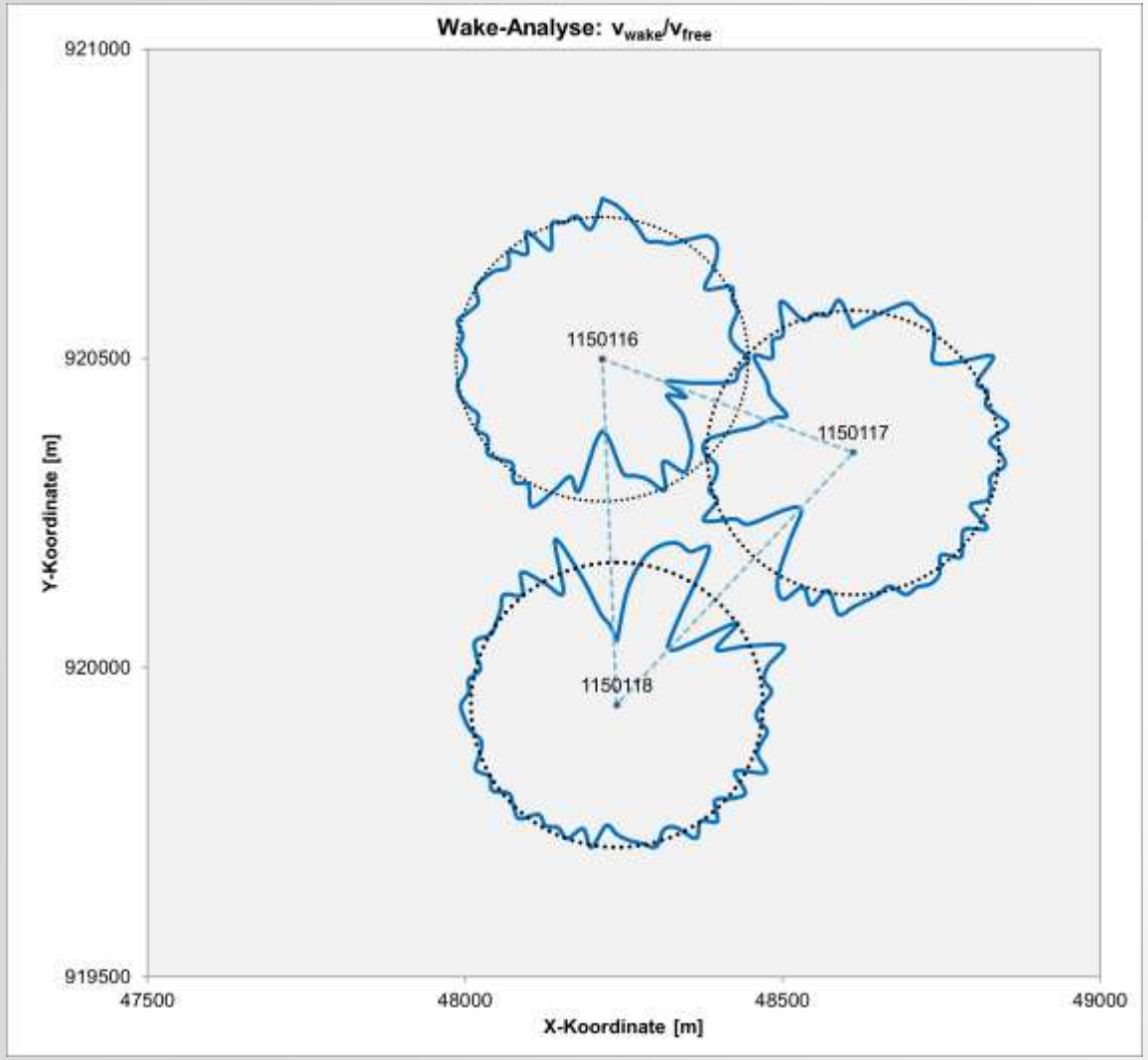
Windrichtung und Gondelposition

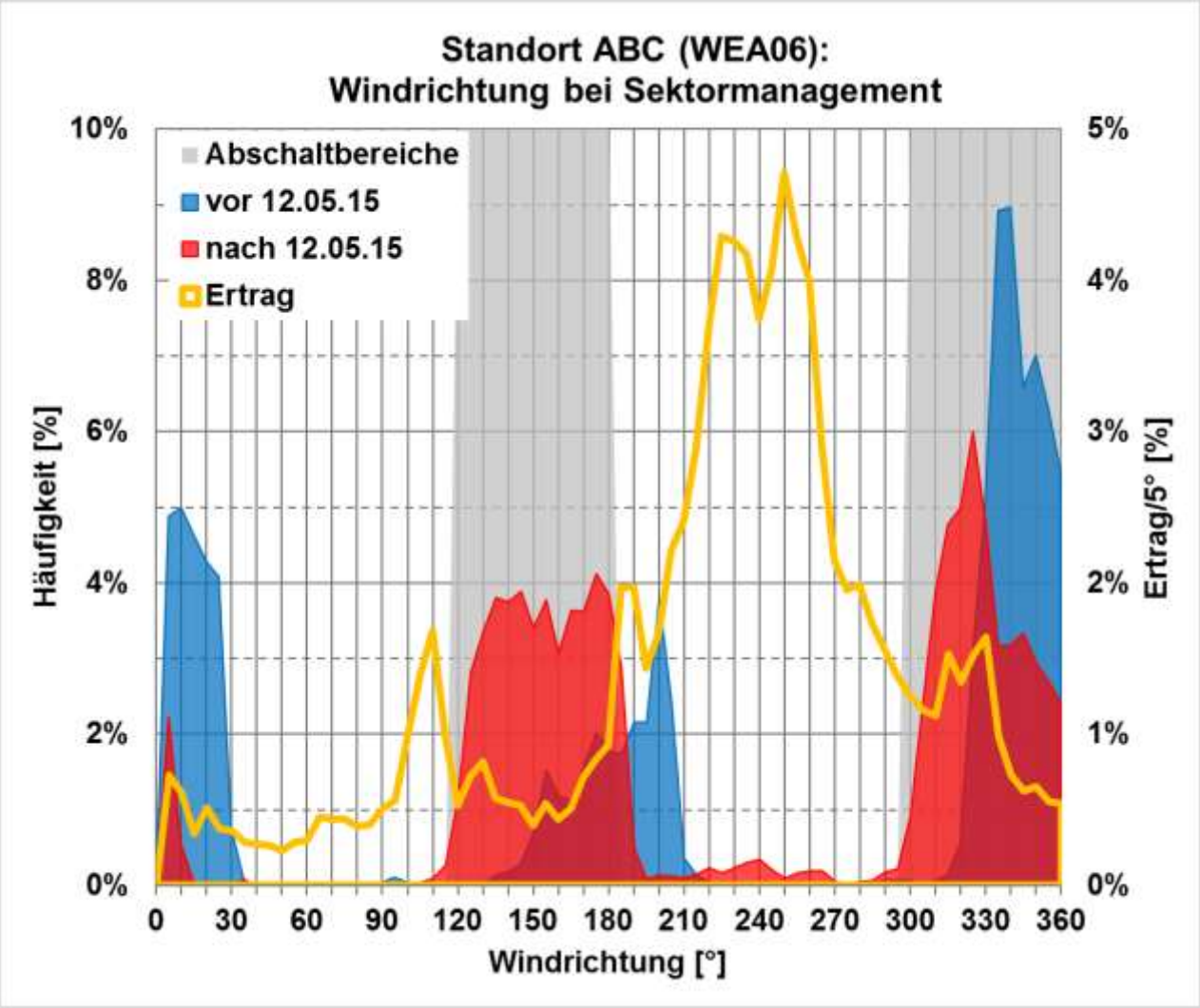


Die Gondelposition zeigt nur selten die wahre Windrichtung an !!!

BEISPIEL: SEKTORMANAGEMENT

Bestimmung des Richtungsoffsets
durch Wake-Analyse



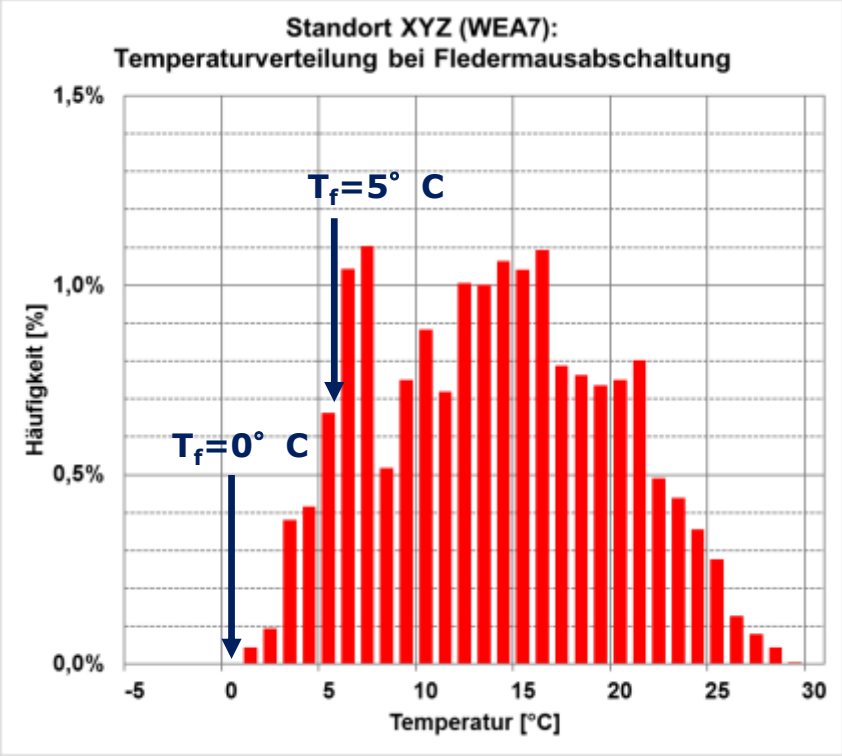


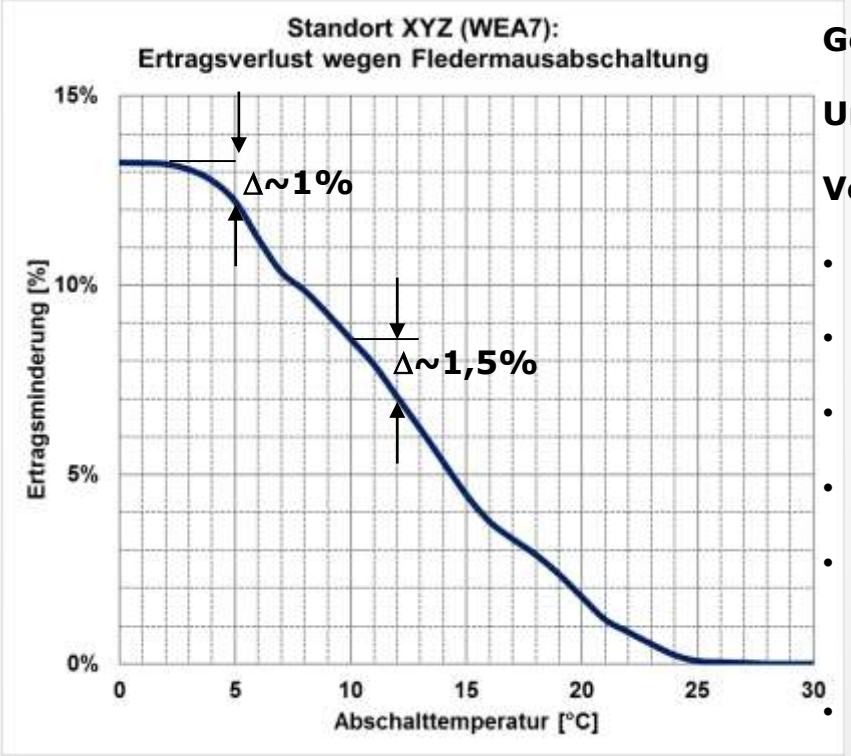
BEISPIEL: FLEDERMAUSABSCHALTUNG

EINFLUSS DES GONDELTHERMOMETERS

Standort XYZ: **01.04. – 31.10. von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang bei v<6 m/s sowie T>5° C in NH**

Tatsächlicher Verlust 13,2% (Gutachten 3-4%)





Gondeltemperaturen zu hoch: ~2° C

Ursache: Generatorabwärme

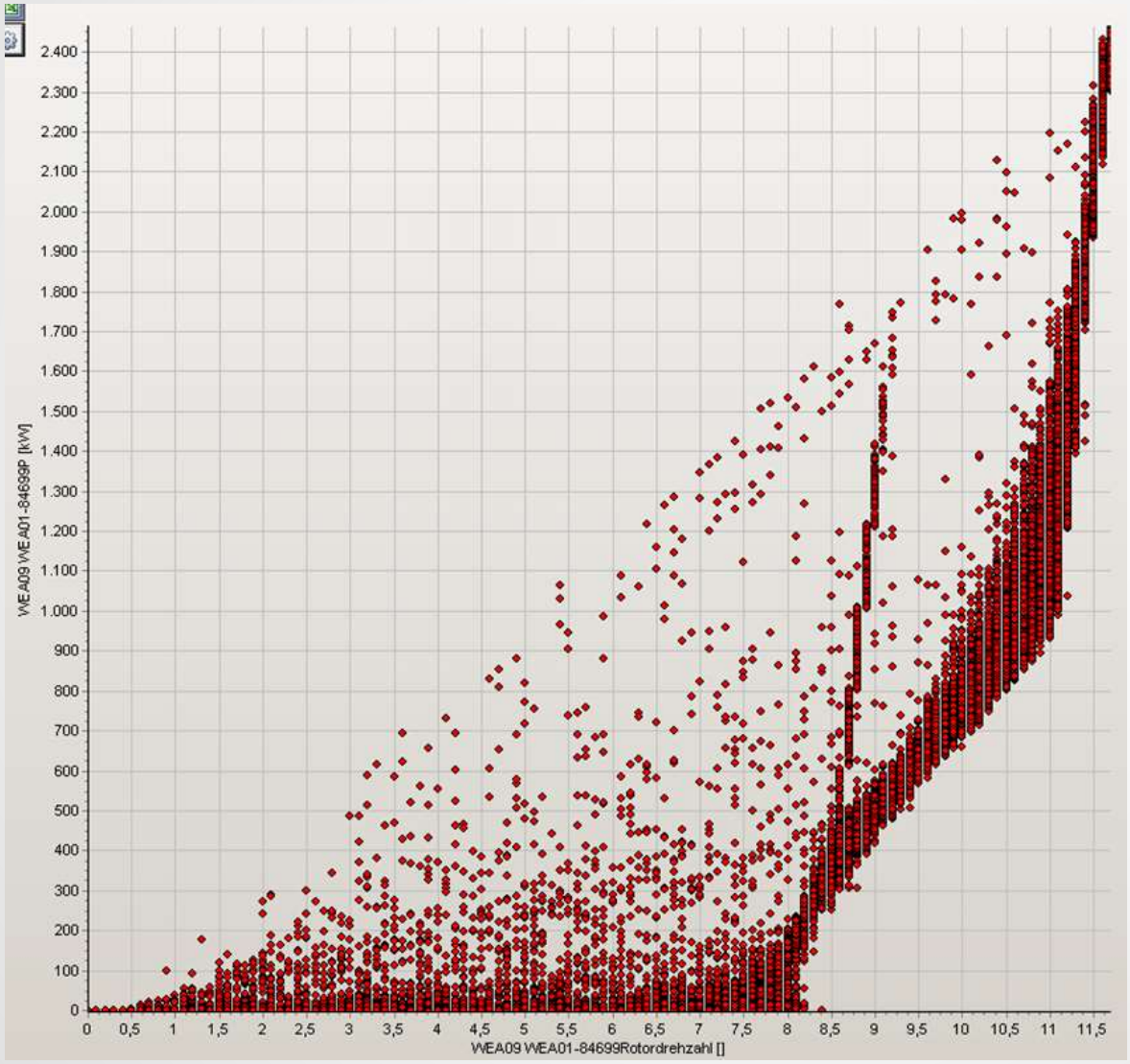
Vergleich mit

- **Messmasten**
- **Wetterstationen**
- **Reanalysedaten**
- **Stehende versus arbeitende WEA (0,5-1° C)**
- **Zusätzlicher Verlust von ~1,5%**

- **Windpark XYZ: 14x N117**
- **Jahresertrag: 66.600 MWh/a = 5.000.000€/a**
  1% Verlust ~ 50.000 €/a

RAMBOLL

LEVEL II: WEITERFÜHRENDE ANALYSEN



Beispiel:

Drehzahl versus Leistung

RAMBOLL

LEVEL II

- Präzise Bestimmung und Analyse von mit Stillstandzeiten und Abregelungen verbundenen Ertragsausfällen

→ Problematisch: Wird die Leistungskurve am Standort erfüllt ?

→ Ursache: Begrenzte Genauigkeit der WEA-Sensoren

1. Windgeschwindigkeit: Gondelanemometer durch Rotorblätter gestört, daher, der Sensor wird mittels NTF (nacelle transfer function) korrigiert. NTF ist häufig nicht korrekt bzw. schlecht dokumentiert. Falsche Kalibrierung verhindert genaue Leistungsüberwachung.
2. Windrichtung: Exakte Gondelausrichtung (Yaw-Misalignment) nicht bekannt
3. Temperatur: Generatorabwärme

→ Lösung: zusätzliche Messungen

BETRIEBSDATENANALYSE: LEVEL III

MESSVERFAHREN: GONDELBASIERT VS. BODENBASIERT

Mast:

- Baugenehmigung, aufwendig, teuer, Einschlag, langwierig, häufig nicht möglich

(Gondel-)LiDAR:

- Keine Genehmigung, sofort

Gondel-LiDAR:

- Messung in versch. Distanzen zur WEA
- Vermessung über 360 °
- Präzise Messung des YAW-Misalignments
- Standortspezifische Messung d. NTF
- Noch nicht IEC-konform

RAMBOLL

LEVEL III: LIDAR-GESTÜTZTE LEISTUNGSANALYSE

Level III Komponenten:

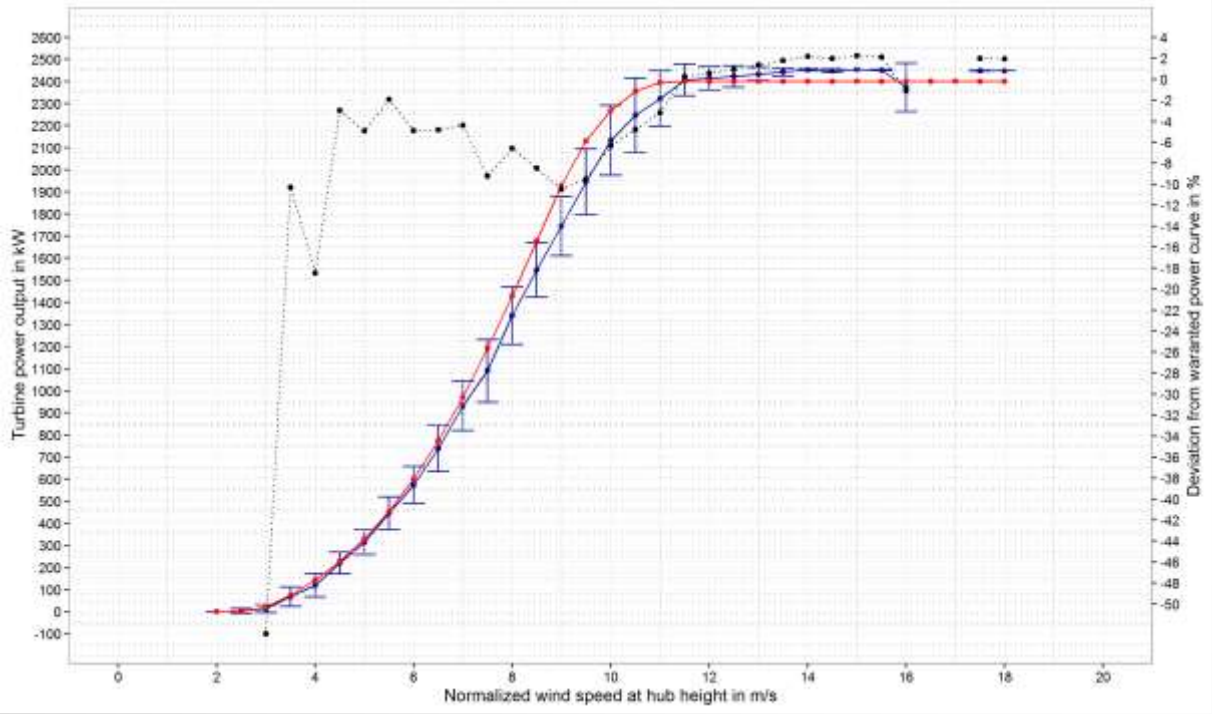
- **Bereitstellung** sämtlicher anwendungsspezifisch notwendiger Messgeräte inklusive **first class ZEPHiR DM**
- **Messung** des die Turbine anströmenden Windfelds **(windrichtungsunabhängig)**
- **Identifikation sämtlicher Statuscodes** zur Datenfiltrierung, Netzfehler, Wartung, WEA-Fehler, Betriebseinschränkungen (Umweltauflagen)
- Berechnung der gemessenen Leistungskurve in Anlehnung an IEC61400-12-1
- Berechnung des genormten Jahresenergieertrags (AEP)
- Bewertung statistischer Unsicherheiten und der Überschreitungswahrscheinlichkeit
- Analyse von Scherwinden, Schräganströmungen, Turbulenz und Windnachführungsverhalten
- Bestimmung der **Gondelausrichtung** (Yaw-Misalignment)
- Bestimmung der **Gondeltransferfunktion** (NTF)
- **Empfehlungen** für Maßnahmen zur Steigerung der Leistungsausbeute

Erforderliche Daten:

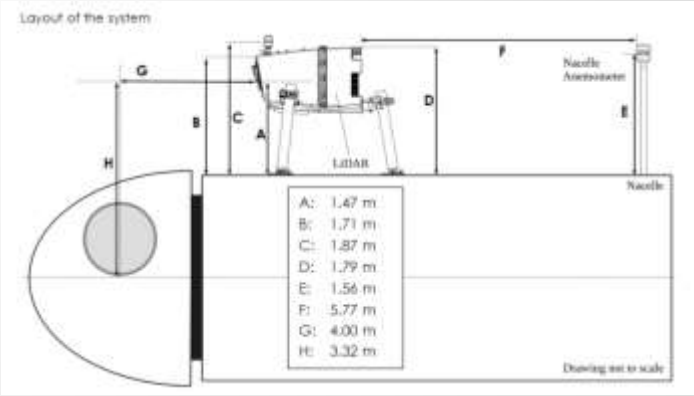
- Gondel-LiDAR-Messdaten
- 10-Minuten SCADA-Daten für jede WEA (Leistungsdaten, Windgeschwindigkeit, Gondelposition, Rotorgeschwindigkeit, Pitch-Anstellwinkel, Status- und Fehlercodes)
- Liste aller Status- und Fehlercodes der spezifischen WEA-Typen
- Standortkoordinaten jeder WEA

RAMBOLL

LEVEL III:
BEISPIEL LEISTUNGSKURVENVERMESSUNG



Berechneter Jahresenergieertrag (AEP)		Reference air density: 1.150 kg/m³, Cut-out wind speed: 20 m/s (Extrapolation with constant power from the last BIN)		
Windgeschwindigkeit Jahresmittel (Rayleigh-Verteilung)	Jahresenergieertrag gemessen (Leistungskurve gemessen)	Unsicherheit der gemessenen Leistungskurve, AEP-Standardunsicherheit		AEP, extrapoliert (extrapolierte Leistungskurve)
m/s	MWh	MWh	%	MWh
4	2530	207	8.2	2531
5	4565	294	6.4	4593
6	6576	346	5.3	6791
7	8125	363	4.5	8827
8	9052	357	3.9	10519
9	9423	338	3.6	11773
10	9386	313	3.3	12573
11	9086	286	3.1	12967

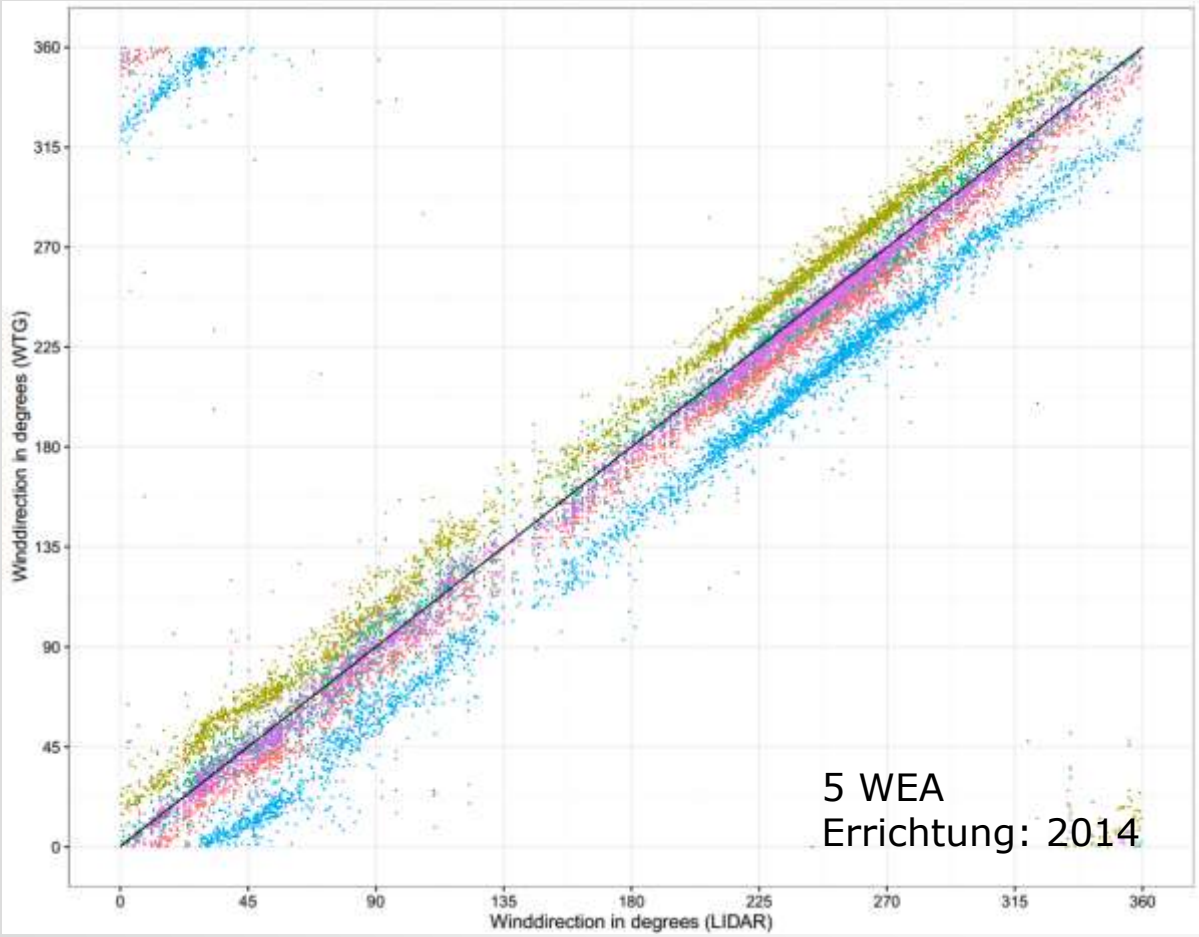


WEA	AEP gem. gemessener Leistungs-kurve	AEP extrapolierter (gemessener Leistungskurve)	AEP gem. garantierter Leistungs-kurve	Unsicherheit Messung	Abweichung von garan-tierter Leistungs-kurve
No. 12345	6502 MWh	6704 MWh	7054 MWh	4.7 %	-5.0 %

RAMBOLL

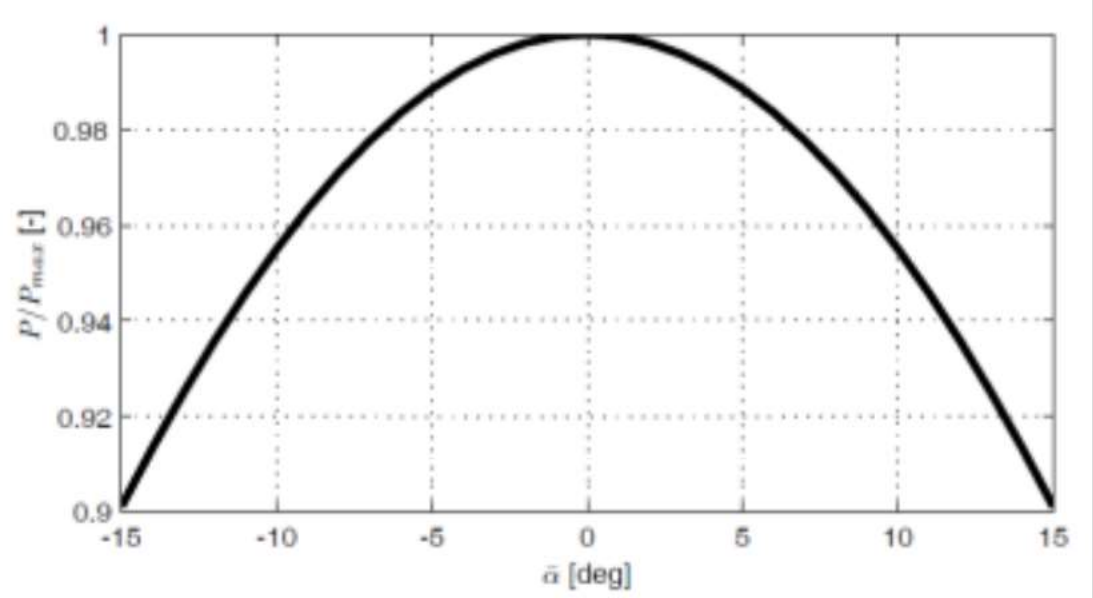
LEVEL III: WINDRICHTUNGSNACHFÜHRUNG UND LEISTUNG

Yaw misalignment



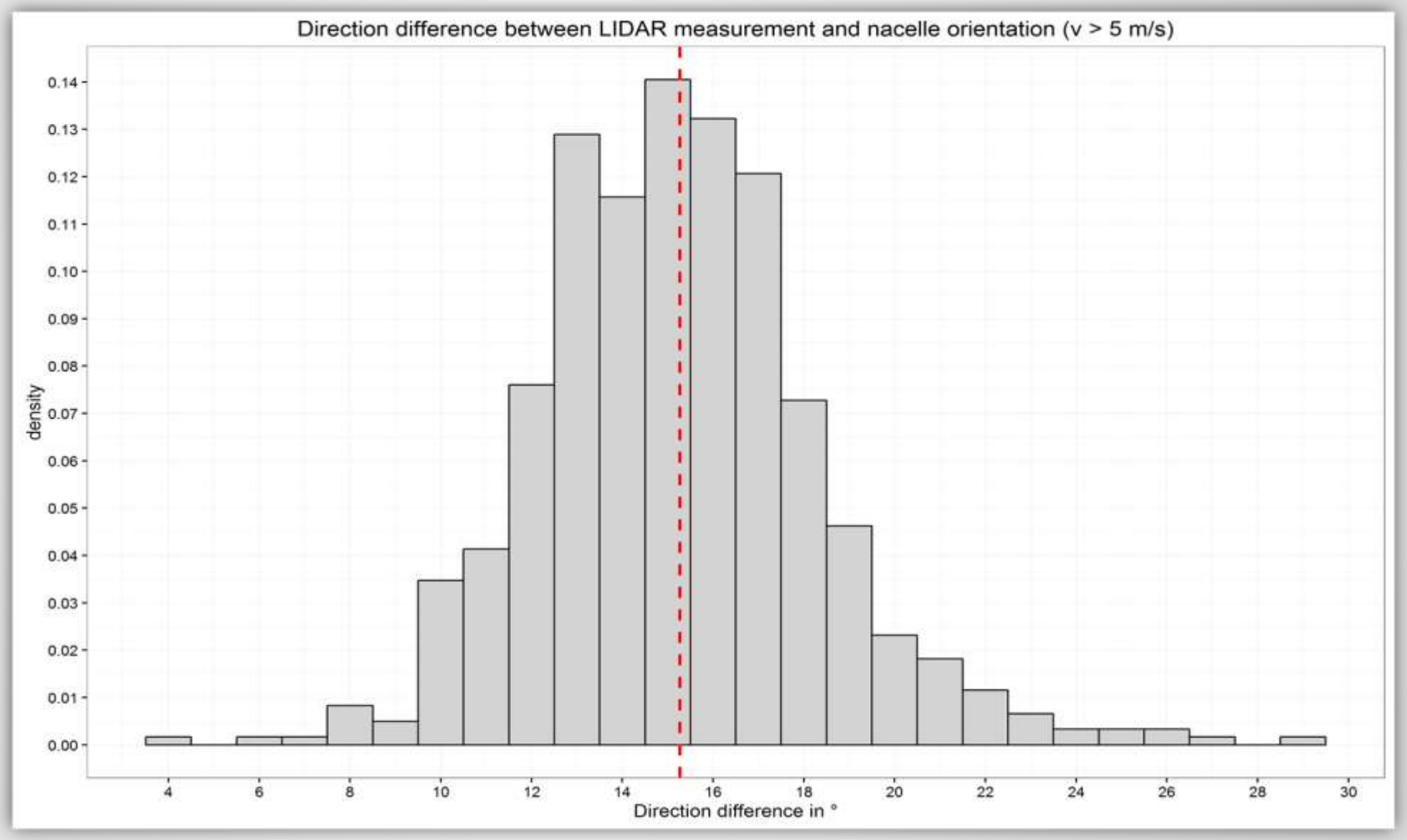
Leistungseinbuße in Abh. vom Richtungsoffset

$P = P_{max} * \cos(\alpha)^{\beta} \qquad 1 < \beta < 5$



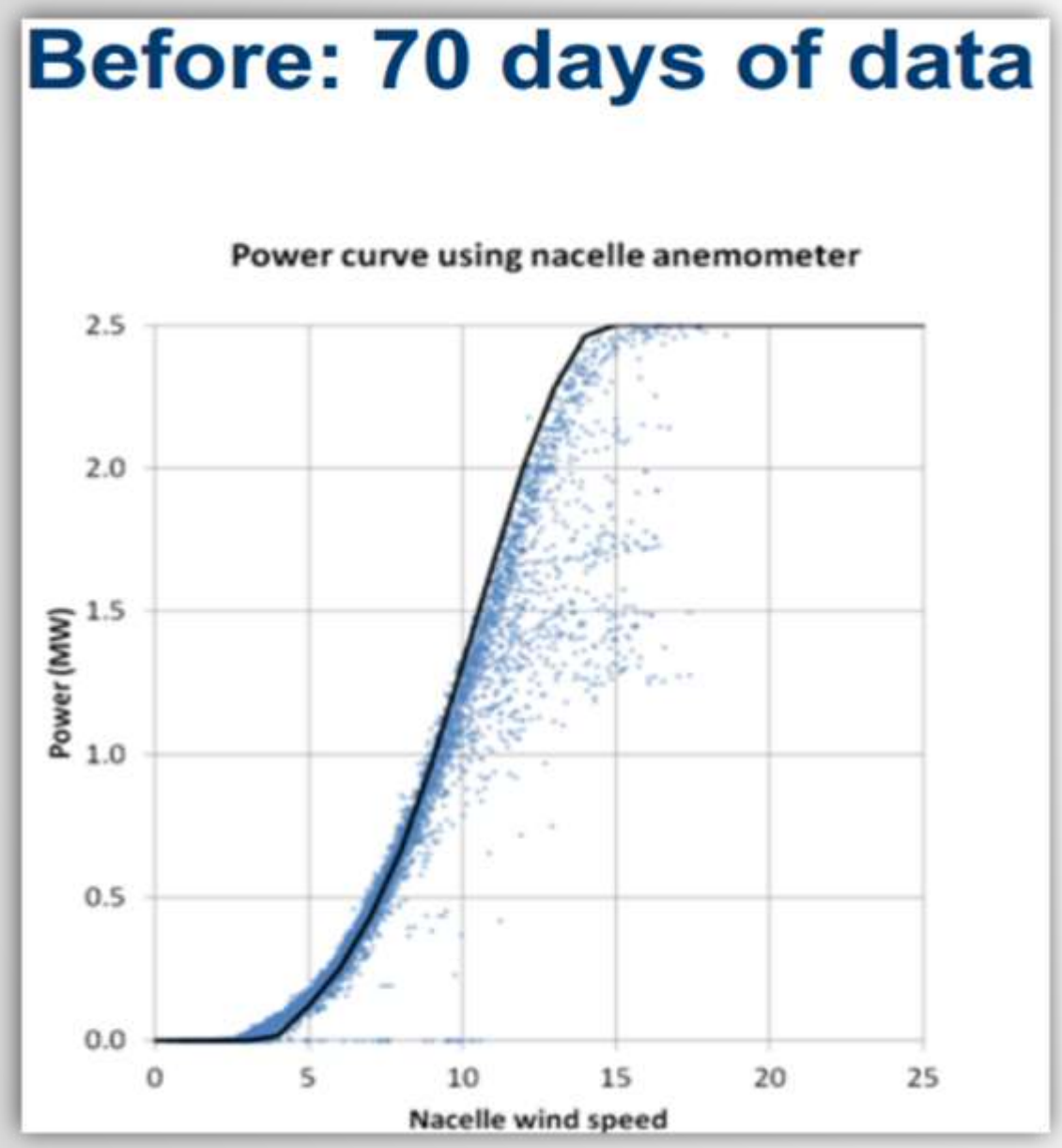
RAMBOLL

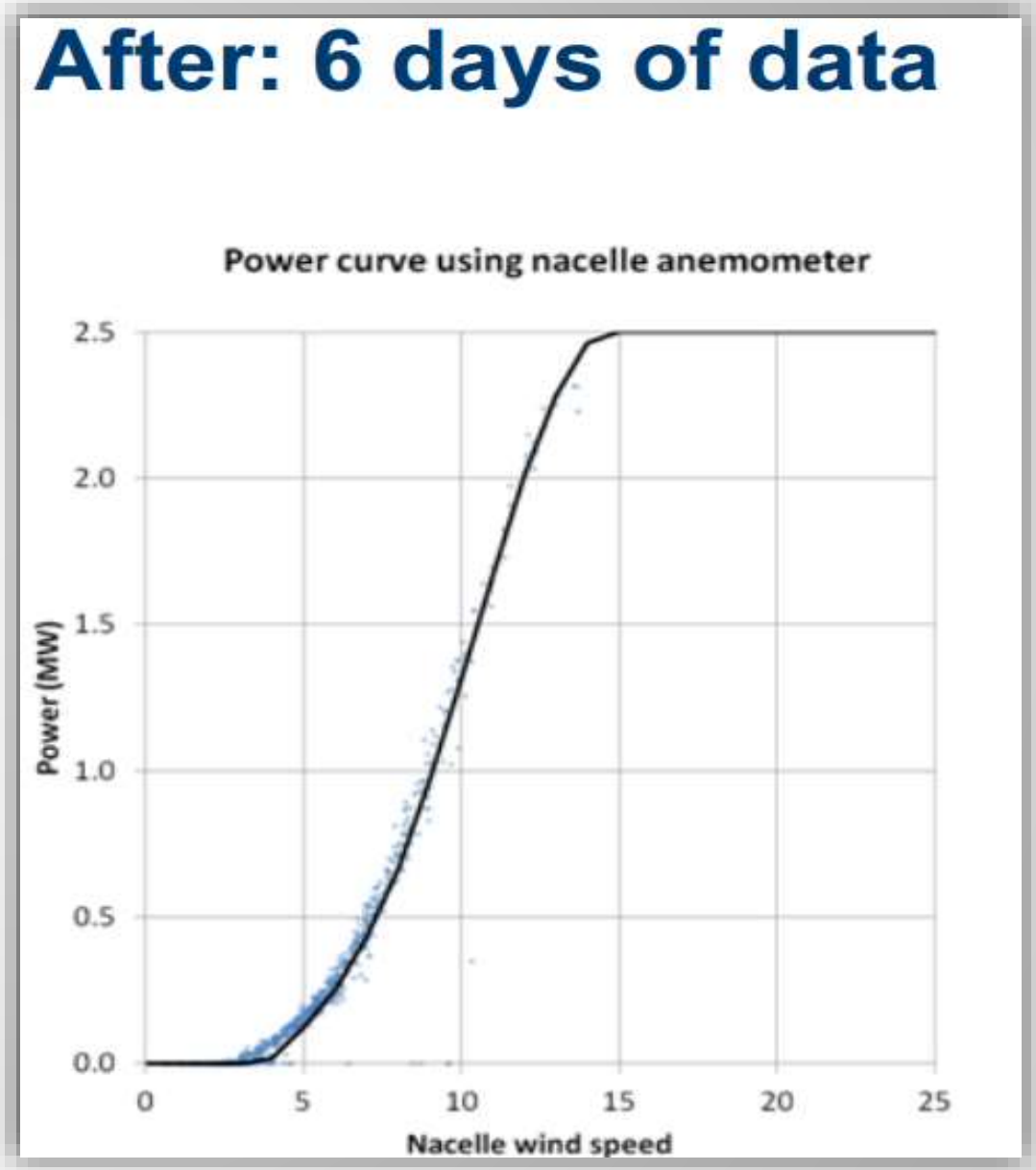
LEVEL III: VERMESSUNG DER GONDELAUSRICHTUNG



RAMBOLL

EINFLUSS DES GONDELAUSRICHTUNG AUF DIE LEISTUNGSKURVE





INVESTITION & NUTZEN.

HAUPTZIELE, DAUER & KOSTEN

	Level I	Level II	Level III
Hauptziel	Analyse von monatlichen Produktionsdaten Langzeiteinordnung	Leistungsanalyse basierend auf 10min SCADA-Daten Verlustanalyse	Leistungsanalyse basierend auf LiDAR-Windmessung Leistungskurvenvermessung
Dauer	3 Arbeitstage	4 Wochen	8 Wochen
Investition	~800 € (5WEA)	~4.500 € (5WEA)	~20.000 €/WEA

RAMBOLL

CONTACT

Dr. Anselm Grötzner

Senior Specialist Wind Assessment
Ramboll CUBE GmbH

Mobil: +49 561288573-23
Mail: anselm.groetzner@ramboll.com

Ramboll Energy

Ramboll Wind & Towers:
Stadtdeich 7, 20097 Hamburg

Tel: +49 40 30 20 20-10
E-Mail: info@ramboll.de
www.ramboll.de/energie

Ramboll BBB GmbH

Head office:
Munscheidstr. 14, 45886 Gelsenkirchen

Tel: +49 209.167 2550
E-Mail: onshore-wind@ramboll.com
www. ramboll.de/energie

Ramboll CUBE GmbH

Head office:
Breitscheidstr. 6, 34119 Kassel

Tel: +49 561.28 85 73 – 0
E-Mail: onshore-wind@ramboll.com
www.ramboll.de/energie

RAMBOLL