

Anmerkungen zu statistischen Effekten bei der Auswertung von Verifikationen von Fernmessgeräten und Exkurs zur Messung von Leistungskennlinien von Windkraftanlagen

**Vortrag gehalten bei der Sitzung des FGW-Fachausschusses Windpotenzial
Hamburg, 8. Oktober 2015**

Herbert Schwartz

Grundannahme

Alle derzeit gebräuchlichen Empfehlungen zur Verifikation von Fernmessgeräten basieren auf der Grundannahme, **dass der an einem Messmast gemessene Wind der „wahre“ Wind ist, der folglich auch so von dem Fernmessgerät angezeigt werden sollte**. Deshalb wird die Anzeige des Fernmessgerätes abhängig von den Messdaten des Mastes aufgetragen und ausgewertet, insbesondere mit linearen Regressionen und binning.

Hier wird die Frage aufgeworfen, ob diese Grundannahme auch falsch sein könnte. Als Indiz hierfür wurden die Daten eines Messmastes, die für die Verifikation eines Fernmessgerätes verwendet wurden, betrachtet. Für verschiedene Höhenintervalle von jeweils 20 m wurden mittels eines Exponentialansatzes Höhenexponenten aus den 10-minütlichen Mittelwerten berechnet. In den folgenden Abbildungen werden diese Höhenexponenten für benachbarte Intervalle gegeneinander verglichen. Hierbei wurden nur Zeitintervalle berücksichtigt, in denen die mittlere Windgeschwindigkeit mehr als 4 m/s betrug. Vom Messmast beeinflusste Windrichtungen wurden ausgenommen.

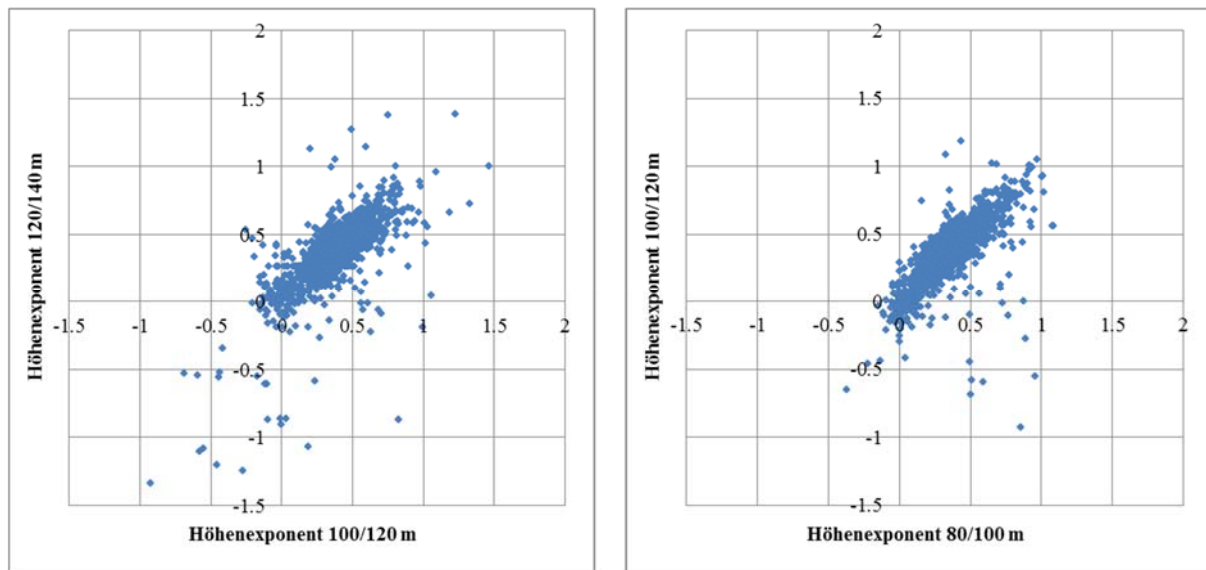


Abbildung 1: Vergleich zeitgleicher Höhenexponenten für benachbarte Höhenintervalle von einem IEC-konformen Messmast an einem IEC-konformen Standort

Einzelne größere Ausreißer sind erkennbar. Diese rühren von Situationen mit starken Änderungen des Windfeldes, z. B. Windrichtungsänderungen her. Wesentlich häufiger unterscheiden sich die Höhenexponenten benachbarter Höhenintervalle aber noch immer um etwa 0,2, selbst in größeren Höhen über Grund. Wenn jedoch schon am Mast selbst das Windfeld häufig so stark inhomogen ist, dass es nicht über einen Höhenbereich von 40 m eindeutig beschrieben werden kann, kann schwerlich angenommen werden, dass es noch für einen 100 m oder gar mehrere hundert Meter entfernten Ort zu jedem Zeitpunkt repräsentativ ist.

Hier wird demnach die **Behauptung** aufgestellt, **dass bei einem Abstand zwischen Messmast und Fernmessgerät die oben genannte Grundannahme nicht korrekt ist**. Im Folgenden wird gezeigt, **dass dies bei Verifikationen zu verzerrten Ergebnissen führt**.

Theoretisches Experiment

Um auf neutrale Weise zu untersuchen, welche Folgen die falsche Grundannahme hat, wird ein theoretisches Experiment unternommen. Es werden zwei gleichwertige Messpunkte mit einigem Abstand zu einander angenommen, an denen die Windgeschwindigkeit gemessen wird. Der „wahre“ Wind für ein Areal, das die Messpunkte umfasst, wird in Form einer mehrfach aufsteigenden Zeitreihe angenommen. Um die Auswirkungen des Abstandes zwischen den Messpunkten auf die gemessenen Zeitreihen wiederzugeben, werden für die Hälfte der Zeitintervalle gleiche Werte beider Messungen angenommen, für ein Viertel der Intervalle

eine Abweichung von +0,4 m/s beim Messpunkt 1 und -0,4 m/s beim Messpunkt 2, und für das verbleibende Viertel eine umgekehrte Abweichung. Die Mittelwerte und Häufigkeitsverteilungen der hypothetischen Zeitreihen sind identisch. Die folgenden Abbildungen zeigen einen Ausschnitt aus den Zeitreihen und die Häufigkeitsverteilungen.

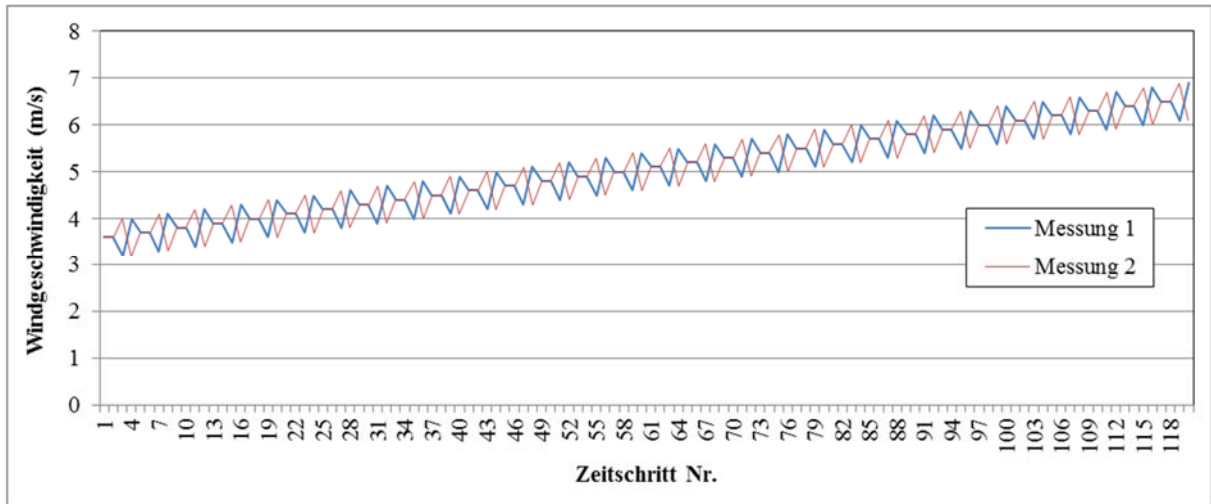


Abbildung 2: Ausschnitt aus den hypothetischen Zeitreihen

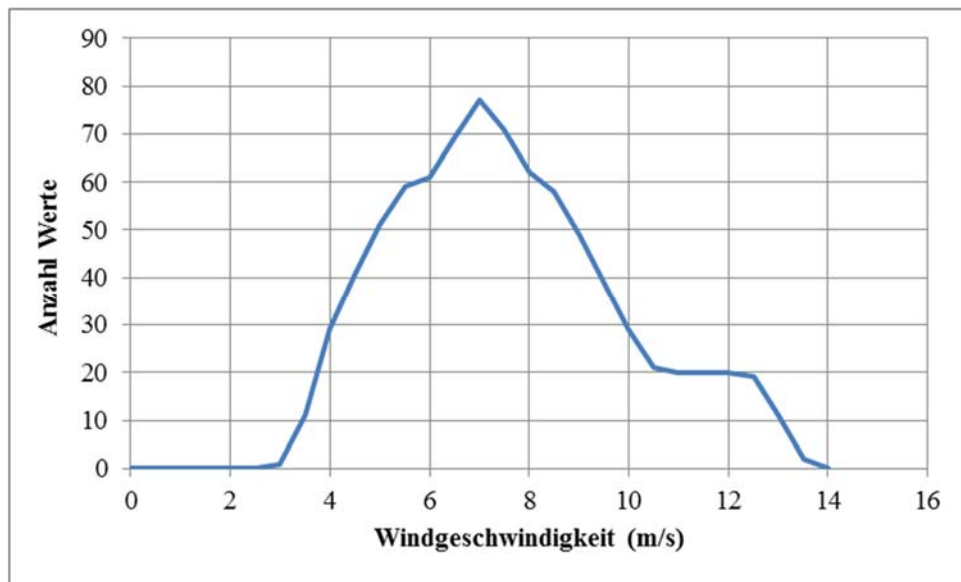


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilungen beider Zeitreihen

Nun wurden lineare Regressionen der Werte der hypothetischen Messung 2 über die der Messung 1 durchgeführt und umgekehrt der Werte der Messung 1 über die der Messung 2. Jeweils eine Regression wurde in der Form $y = ax + b$ angesetzt und eine in der Form $y = ax$, d.h. die Regression wurde durch den Ursprung gezwungen.

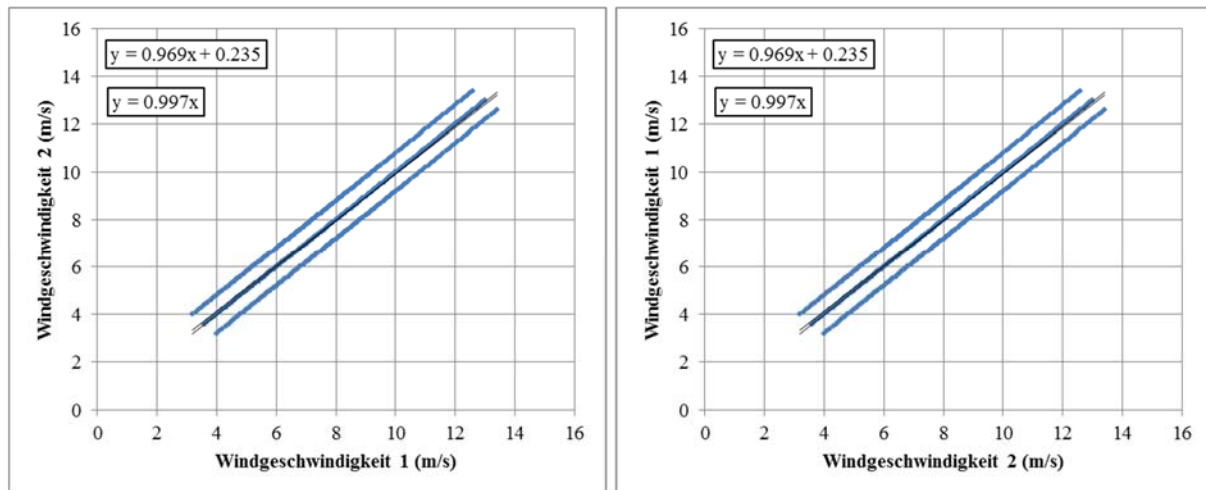


Abbildung 4: Auftragung der Einzelwerte übereinander (blaue Punkte, ergeben zusammen drei Linien) und je zwei Regressionsgeraden (schwarze Linien), Geradengleichungen

Selbstverständlich sind die Geradengleichung in beiden Fällen dieselben. Aber dies ist ein Widerspruch. Setzt man in die ersten Regressionsgleichungen beispielsweise für x eine Windgeschwindigkeit von 6 m/s ein, ergibt sich bei der Auftragung der Windgeschwindigkeit 2 über die Windgeschwindigkeit 1 (linker Teil der Abbildung 4), dass die Windmessung 2 um +0,8 % von der Windmessung 1 abweicht. Im umgekehrten Fall ist das Ergebnis der Analyse jedoch, dass die Windmessung 1 um +0,8 % höher liegt als die Windmessung 2. Beides kann natürlich nicht gleichzeitig stimmen. Bei den Regressionen, die durch den Ursprung gezwungen werden, ergibt sich jeweils eine scheinbare Abweichung von -0,3 %. Auch dies ist natürlich falsch, aber „weniger falsch“ als die erste statistische Analyse.

Nun wurden die Zeitreihen entsprechend den üblichen Empfehlungen gebinnt. Wiederum wurde einmal die Windgeschwindigkeit 1 als unabhängige, also „wahre“ Variable betrachtet, und einmal die Windgeschwindigkeit 2. Selbstverständlich sind die Ergebnisse wieder gleich. Dargestellt wird im Folgenden nur der erste Fall.

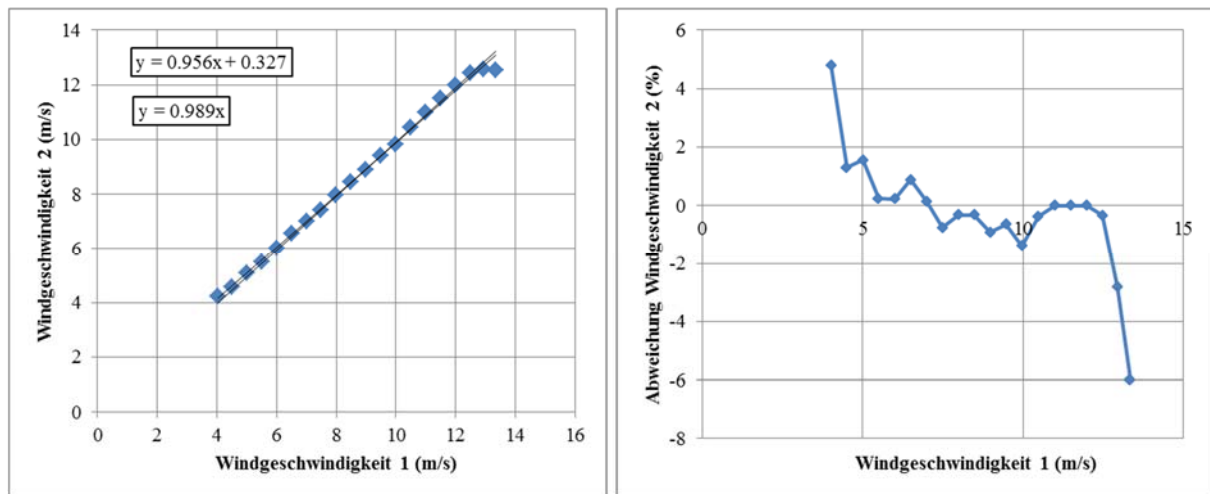


Abbildung 5: Ergebnisse des Binnings der Windgeschwindigkeit 2 über die Windgeschwindigkeit 1, links: Windgeschwindigkeit über Windgeschwindigkeit aufgetragen, rechts: Fehler über der Windgeschwindigkeit aufgetragen

Setzt man wieder in die erste Regressionsgleichung links für x 6 m/s ein, wird ein Fehler der Windmessung 2 von +1,1 % berechnet. Die zweite Regressionsgleichung weist dagegen einen Fehler von -1,1 % aus. Aus dem rechten Teil der Abbildung kann man für 6 m/s einen Einzelwert von +0,2 % ablesen. **Somit können mit üblichen statistischen Methoden, die den Vorgaben der Empfehlungen für die Analyse von Verifikationstests folgen, unterschiedliche Ergebnisse ermittelt werden, von denen jedes eine Messabweichung ausweist. Keines der obigen Ergebnisse ist korrekt, denn die beiden Zeitreihen bestehen ja aus den identischen Werten. Die einzige statistische Auswertung, die ein korrektes Ergebnis liefert, ist die einfache Mittelwertbildung über die gesamte Zeitreihe.**

Es lässt sich zeigen, dass aufgrund des gewählten statistischen Ansatzes bei der linearen Regression, die nicht durch den Ursprung gezwungen wird, stets ein positiver y-Achsenabschnitt und eine Steigung von unter 1,0 berechnet werden.

Interessant ist zudem, dass der rechte Teil der Abbildung 5 grob gesehen eine S-Form und zudem einen sehr ungleichförmigen Verlauf ausweist. Dies wird häufig bei der Verifikation von Sodargeräten beobachtet. Sodargeräte müssen, um Verzerrungen der Messwerte durch Festechos zu vermeiden, mit einigem Abstand zu Messmasten (in der Regel deutlich über 100 m Entfernung) aufgestellt werden, wodurch die oben beschriebene Problematik entsteht. Häufig wurden in Vorträgen diese S-Form und der ungleichförmige Verlauf als Nachweis unzureichender Genauigkeit und Qualität von Sodargeräten bewertet. **Das obige theoretische Experiment zeigt dagegen, dass die übliche statistische Vorgehensweise bei der Auswertung ein verfälschtes Bild zeigt und die Geräte schlechter aussehen lässt, als sie wirklich**

sind. Gleiches würde auch mit anderen Fernmessgeräten, z. B. Lidargeräten, auftreten, wenn sie mit gleichem Abstand zum Mast aufgebaut würden. Es lässt sich zeigen, dass aufgrund des gewählten statistischen Ansatzes beim Binning im Bereich der niedrigsten Windgeschwindigkeiten stets überwiegend positive Abweichungen und bei den höchsten Windgeschwindigkeiten überwiegend negative Abweichungen ermittelt werden.

Praxisbeispiele

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen so zwei typische Ergebnisse des Binnings von Verifikationstests zweier Sodargeräte, die die oben beschriebenen Charakteristika aufweisen, insbesondere scheinbare positive Abweichungen bei den niedrigsten Windgeschwindigkeiten und negative bei den höchsten.

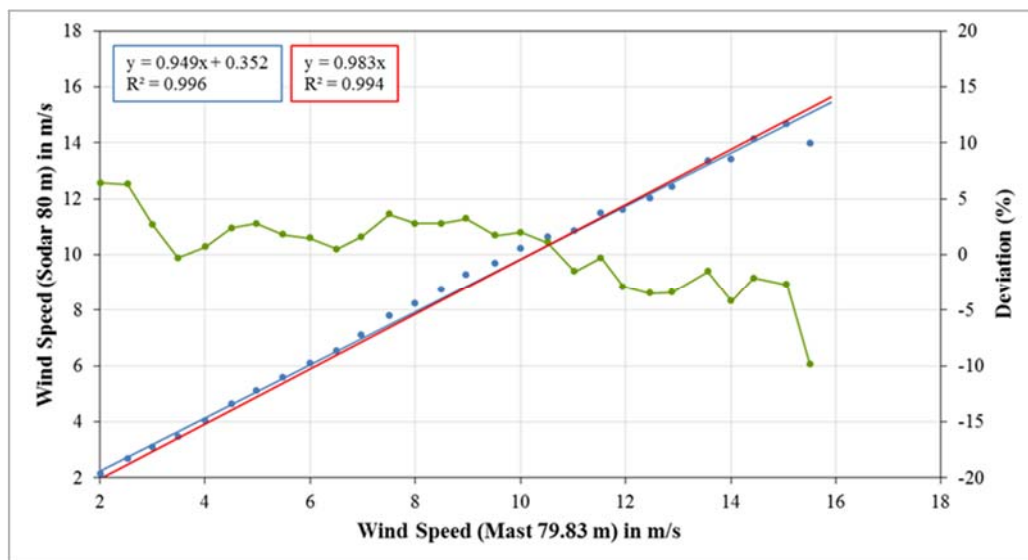


Abbildung 6a: Ergebnisse des Binnings der von einem Sodargerät gemessenen Windgeschwindigkeit über die Windgeschwindigkeit des Messmastes, blaue Punkte: Windgeschwindigkeit über Windgeschwindigkeit aufgetragen, grüne Punkte: Fehler über der Windgeschwindigkeit aufgetragen

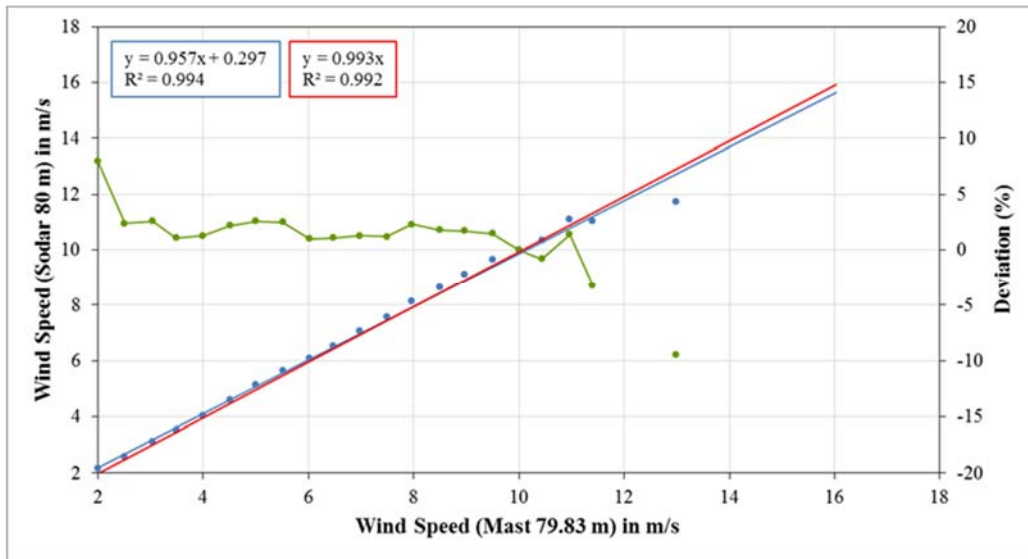


Abbildung 6b: Wie Abbildung 6a, jedoch für einen anderen Verifikationstest

Als extremes Beispiel wird im Folgenden die ermittelte Abweichung der Windmessung zwischen Sodargeräten gezeigt. Hier waren drei Geräte gleichzeitig mit Abständen von mindestens 500 m zueinander in offenem, vollkommen flachem Gelände über etwa einen Monat in Betrieb. Die Geräte wurden paarweise verglichen. Da nicht bekannt ist, welches Gerät den „wahren“ Wind anzeigt, wurden einmal die Messwerte des einen Gerätes und einmal die des anderen als unabhängige Variablen betrachtet.

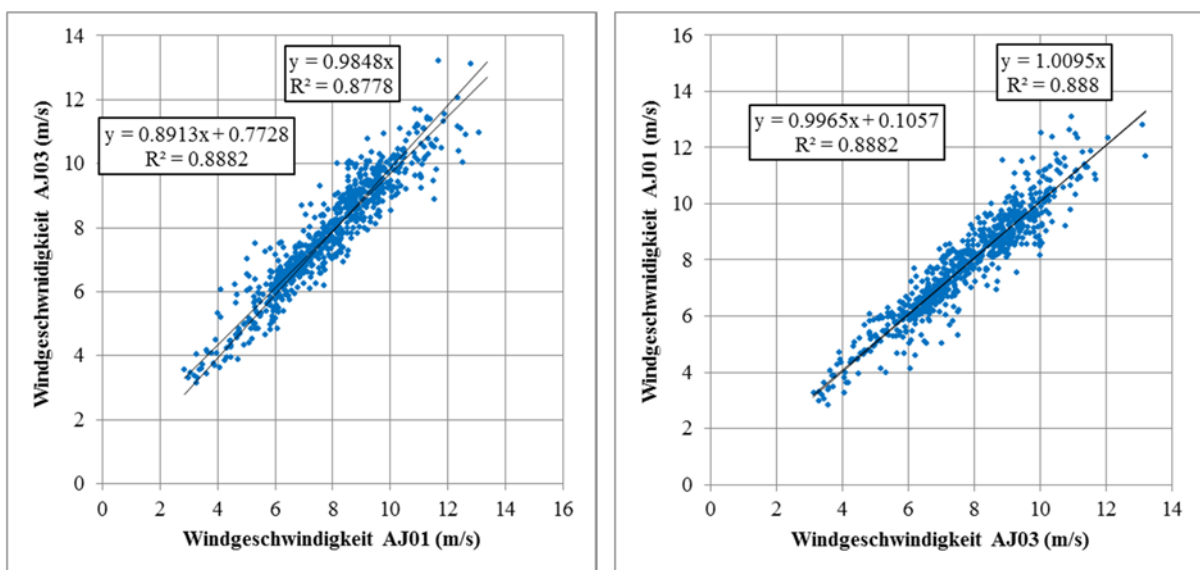


Abbildung 7: Vergleich der Messwerte zweier gleichzeitig betriebener Sodargeräte

Aus den Regressionsgleichungen des linken Diagramms kann ermittelt werden, dass das Gerät AJ03 bei 6 m/s etwa 2,1 % höhere Windgeschwindigkeiten anzeigt als das Gerät AJ01, bzw. dass es (Regression durch den Ursprung) um 1,5 % niedrigere anzeigt. Das rechte Diagramm, bei dem einfach x und y vertauscht wurden, weist dagegen aus, dass das Gerät AJ01 bei 6 m/s etwa 1,5 % höhere Windgeschwindigkeiten anzeigt als das Gerät AJ03, bzw. dass es (Regression durch den Ursprung) um 1,0 % höhere Werte anzeigt.

Wie in den davor gezeigten hypothetischen Betrachtungen stehen wieder die Ergebnisse im Widerspruch zueinander, und wieder ergibt sich das konsistenteste Ergebnis bei den linearen Regressionen, die durch den Ursprung geführt werden.

Das Binning dieser Daten (sowie eines weiteren paarweisen Vergleiches derselben Messkampagne) liefert folgende Ergebnisse:

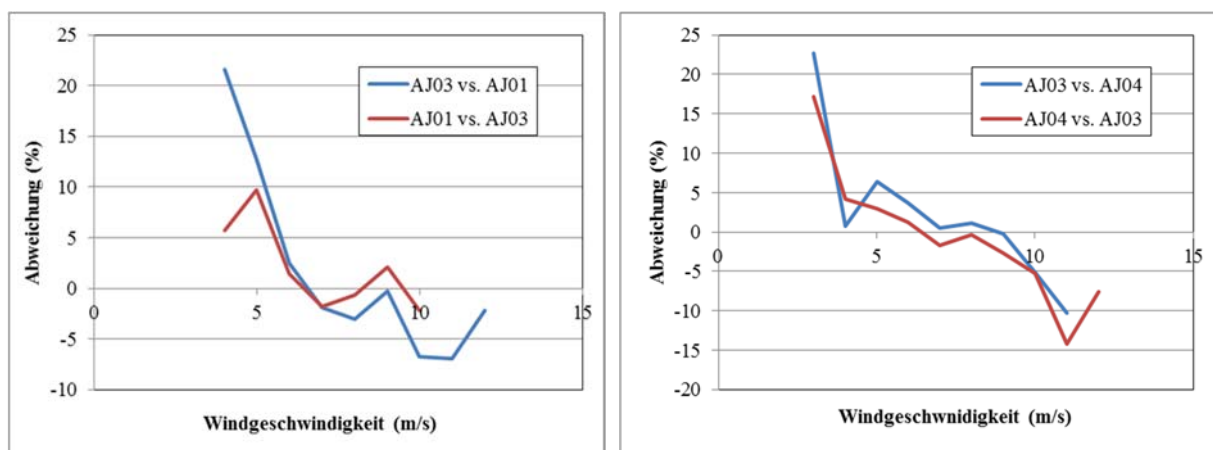


Abbildung 8: Ergebnisse des Binnings beim Vergleich der Messwerte jeweils zweier gleichzeitig betriebener Sodargeräte

Abbildung 8 zeigt in allen Vergleichen tendenziell die oben schon erwähnte S-Form des Binning-Ergebnisses. Im linken Diagramm wurde einmal das Gerät AJ03 abhängig vom Gerät AJ01 analysiert und einmal umgekehrt. Das rechte Diagramm zeigt gleiches für den Vergleich der Geräte AJ03 und AJ04. Stets suggeriert die Auswertung, dass das „zu prüfende“ Gerät bei niedrigen Windgeschwindigkeiten höhere Werte anzeigt als das Gerät, das „den wahren Wind“ anzeigt und bei hohen Windgeschwindigkeiten umgekehrt. Das Ausmaß der Verzerrung, die durch die offensichtlich unangemessene statistische Behandlung der Testdaten entsteht, ist um eine Größenordnung größer als der tatsächliche Unterschied zwischen den Geräten. Dieser kann aufgrund der Verzerrung bei der vorliegenden Auswertung nicht belastbar ermittelt werden.

Schlussfolgerungen

- Bei Abständen zwischen Mast und Fernmessgeräten führen Analysen von Verifikationstests nach den derzeit gängigen Empfehlungen zu verzerrten Analysen.
- Angesichts dessen führt möglicherweise eine einfache Mittelwertbildung über alle gültigen Messwerte zum korrektesten Ergebnis.
- Zur Kontrolle schlägt *anemos-jacob GmbH* vor, lineare Regressionen über die gültigen Messwerte, die durch den Ursprung führen, heranzuziehen. Hierbei sollten aber sowohl die Daten des Fernmessgerätes abhängig von den Mastdaten aufgetragen werden als auch umgekehrt. Als Ergebnis wird der Mittelwert beider Steigungen verwendet.
- Es sollte beachtet werden, dass lineare Regressionen dazu tendieren, die üblicherweise selteneren Ereignisse in den äußeren Bereichen der Bandbreite der Werte stärker zu gewichten als die im mittleren Bereich. Das Verhältnis (bzw. vermeintliche Verhältnis) der Anzeige des Fernmessgerätes zu dem des Mastes in diesen Situationen ist jedoch für die üblichen Anwendungsfälle weniger bedeutend als das Verhältnis im mittleren Bereich.
- Dieser Effekt wird noch erheblich verstärkt, wenn lineare Regressionen über gebinnte Werte berechnet werden, da hier der Einfluss der vielen Werte im (wichtigen) mittleren Wertebereich noch weiter verringert wird.
- Es sollte überlegt werden, ob, wie bisher üblich, alle im Testzeitraum aufgetretenen Wetersituationen einbezogen werden, oder ob nicht Situationen mit sehr inhomogenen Windfeldern aus dem Datensatz entfernt werden sollten. Dies würde die Ergebnisse besser vergleichbar und verwendbar machen und wäre insofern analog zur Vorgehensweise bei der Ermittlung von Leistungskennlinien nach der TR 2 der FGW.
- Angesichts der geschilderten Problematik dürfte die Verifikation von Sodargeräten anhand eines direkt benachbarten Fernmessgerätes eines anderen Typs am jeweiligen Einsatzort (onsite-verification) hinsichtlich der Aussagegenauigkeit Vorteile gegenüber Vergleichen mit Messmasten haben.

Exkurs: Messung von Leistungskennlinien von Windkraftanlagen

Die oben beschriebenen Effekte sind auch bei der Messung der Leistungskennlinien von Windkraftanlagen relevant, da auch hier angenommen wird, dass die am Mast gemessene Windgeschwindigkeit den „wahren Wind“ für die Rotornabe der Windkraftanlage beschreibt. Mit zunehmender Anlagengröße wird dies immer relevanter, da der Abstand des Mastes zur Anlage zwangsläufig wächst. Bei den heute gängigen Rotordurchmessern müssen die Maste etwa 300 m oder mehr von den Anlagen entfernt sein, also weiter entfernt als Sodargeräte von Messmasten bei der Verifikation.

Um zu untersuchen, welche Auswirkungen auf das Ergebnis einer Kennlinienmessung hierdurch hervorgerufen werden, wurde wiederum ein theoretisches Experiment unternommen. Eine Leistungskennlinie wurde zweimal in ihrer Originalform wie eine gemessene Zeitreihe betrachtet. Für eine Fortsetzung der fiktiven Zeitreihe wurde angenommen, dass die Leistungsdaten gegenüber den Winddaten einmal um +0,5 m/s verschoben sind und einmal um -0,5 m/s. Dies soll den Effekt der nicht perfekten Gleichzeitigkeit und Gleichförmigkeit der Datenreihen aufgrund des räumlichen Unterschiedes exemplarisch wiedergeben. Die gesamte fiktive Zeitreihe wurde dann gebinnt, mit folgenden Ergebnissen:

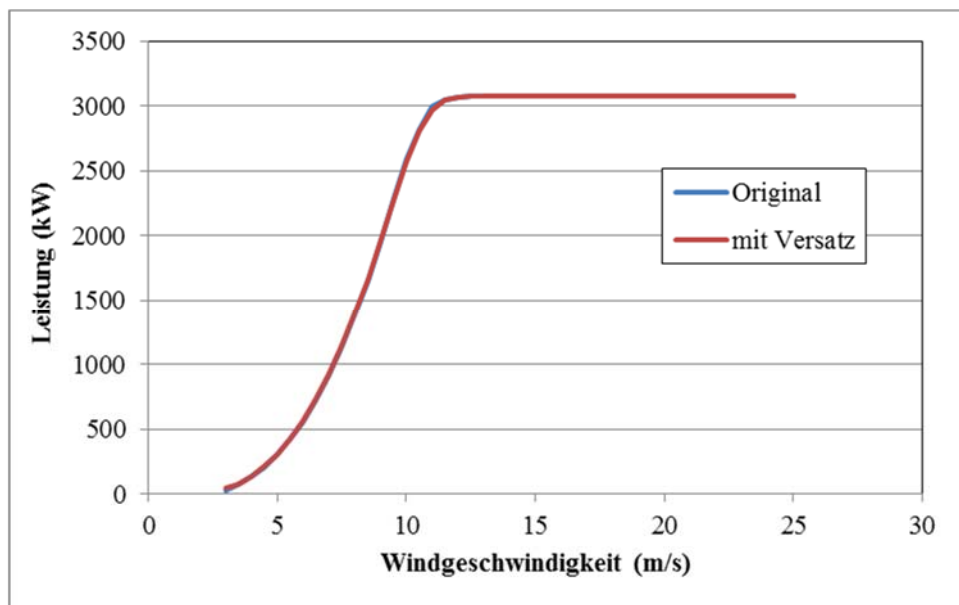


Abbildung 9: Ergebnisse des Binnings der fiktiven Zeitreihe einer Leistungskennlinienmessung

In Abbildung 9 sind keine Auffälligkeiten erkennbar. Wird jedoch die Abweichung der roten Linie (fiktive Zeitreihe) von der blauen Linie (korrekte Leistungskennlinie) über die Windgeschwindigkeit aufgetragen, zeigt sich ein grundsätzlich ähnliches Bild wie bei der Auswirkung von Turbulenz auf die Ergebnisse einer Kennlinienmessung:

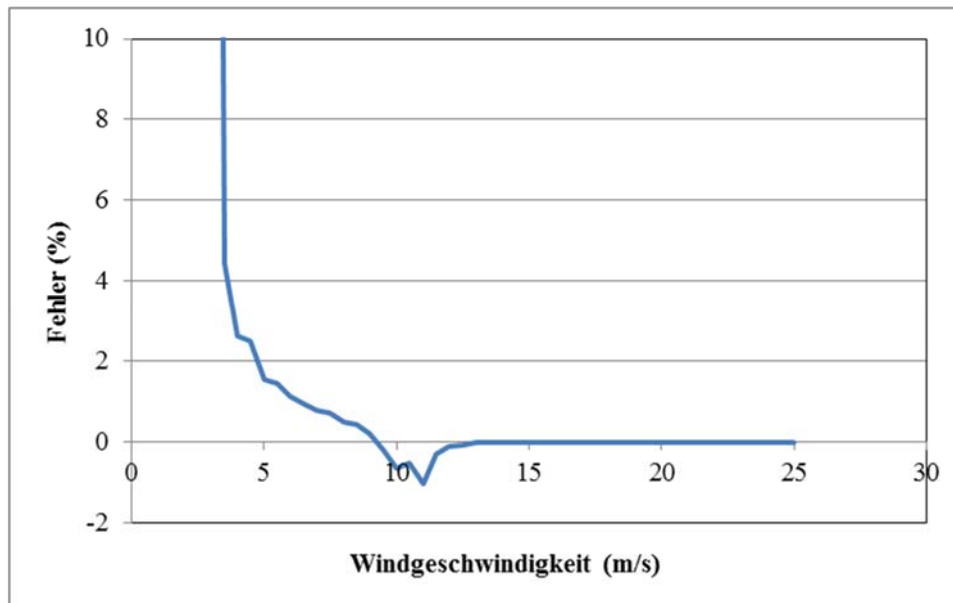


Abbildung 10: relativer Fehler der gebintten fiktiven Zeitreihe gegenüber der korrekten Leistungskennlinie

Durch den Abstand des Messmastes von der Windkraftanlage wird also im Bereich der niedrigen und mittleren Windgeschwindigkeiten eine zu optimistische Leistungskennlinie gemessen, im Bereich der Nennwindgeschwindigkeit eine zu pessimistische. Dieser Effekt wird zwar durch Turbulenz hervorgerufen, verantwortlich dafür ist aber die Annahme bei der statistischen Auswertung, dass der am Mast gemessene Wind der „wahre Wind“ für die Position der Windkraftanlage ist. Er ist nicht identisch mit den Auswirkungen der Turbulenz auf die Leistungskennlinie, sondern addiert sich dazu. Es handelt sich hier um einen systematischen Fehler, der in jeder Leistungskennlinienmessung enthalten ist und derzeit durch keine Maßnahme, auch nicht die derzeit diskutierten Umrechnungen auf andere Turbulenzen, kompensiert wird.

Es ist festzuhalten, dass die obige Untersuchung das untersuchte Phänomen nur qualitativ beschreiben kann. Welche Größenordnung die Fehler in der Praxis haben, ist noch zu untersuchen. Genauso sind Möglichkeiten der Korrektur noch zu ermitteln.