

Kalibration der Windfeldmodellierung: Verbindung von Modellen, Empirie und Erfahrung

Herbert Schwartz
anemos-jacob GmbH

Dieses Mal: nichts Neues
sondern Teil der Praxis, aber wenig bekannt

Motivation und Ziele

- Transparenz
- Vorgehensweisen bekannter machen
- weitere Verbreitung der Vorgehensweisen
- Erhöhung der Genauigkeit und Verringerung der Unsicherheit in der Breite des Marktes, nicht nur bei einzelnen Gutachtern

Begriff: Modell

Modell im engeren Sinn

(Modell = Programm)

Strömungsberechnungsprogramm:

- modellierte Physik
- Implementierung (Code)

(WAsP, WindSim, Meteodyn, Fluent,
Open Foam, ...)

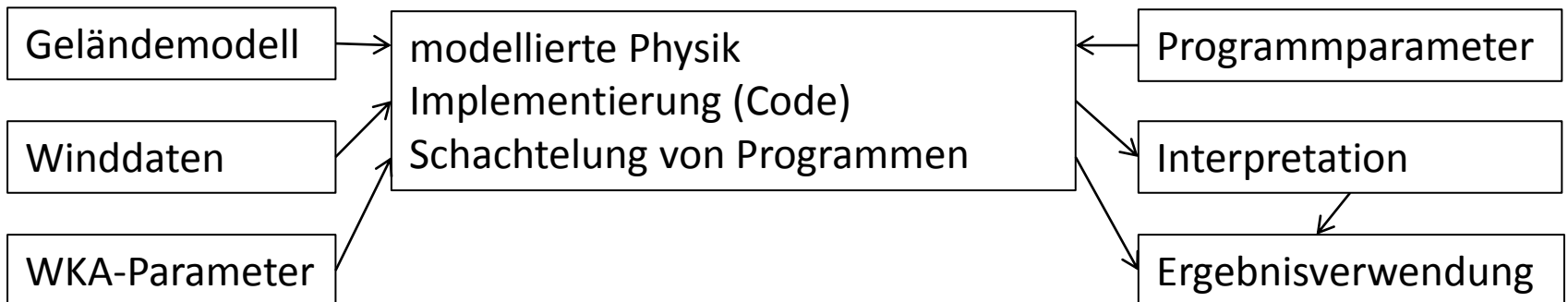
Begriff: Modell

Modell im weiteren Sinn (= projektbezogen)

Eingabedaten

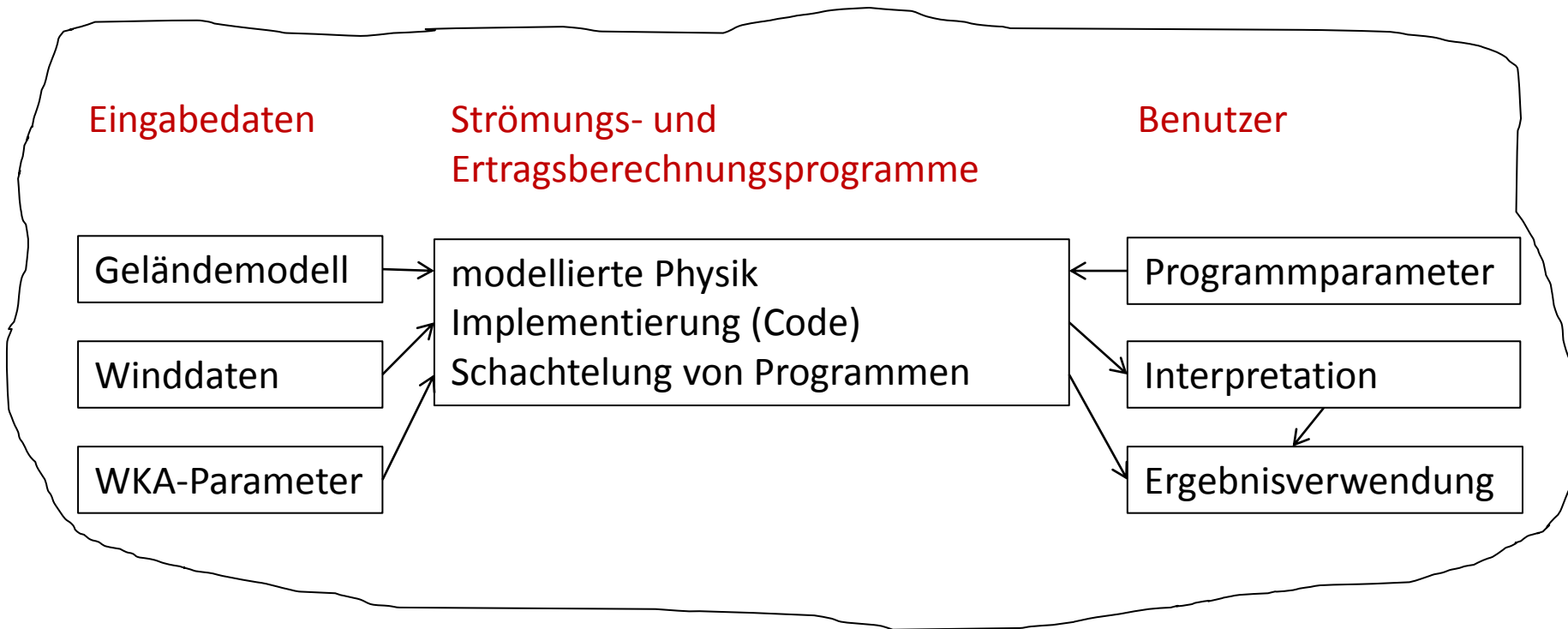
Strömungs- und
Ertragsberechnungsprogramme

Benutzer



Begriff: Modell

Modell im weiteren Sinn



auch in TR 6-Diskussionen!

Begriff: Kalibration

Ermittlung der Abweichungen von Modellergebnissen von
(interpretierten!) Realdaten

UND

Minimierung dieser Abweichungen mittels geeigneter
Maßnahmen

Anmerkungen:

- Begriff aus der Messtechnik in die Modellierung übernommen.
- Unterschiedliche Definitionen und Abgrenzungen sind gebräuchlich (insbesondere „Abgleich“ für den zweiten Schritt).
- „Kalibrierung“ ist äquivalent (und eigentlich korrekter)

Modellkalibrationen sind schon lange Stand der Technik.

- in der Meteorologie unabdingbar
- Neu ist hier nur die Verwendung des Begriffs „Kalibration“ für die Windenergie.
- gilt für WAsP und 3-dimensionale Modelle

Beispiele für Modellparameter

Geländemodell:

- Größe
- Auflösung
- Rauigkeitswerte
- Hindernismodelle
- Waldmodelle
- zeitliche Variabilität
- Albedo, Wärmekapazität
- ...

Beispiele für Modellparameter

Winddaten:

- Quelle (Wahl, Mischung, ...)
- räumliche Auflösung
- zeitliche Auflösung
- Zeitreihe oder Statistik
- Zeitraum
- Korrekturen für Messfehler etc.
- vorgegebenes Höhenprofil
- Turbulenzmodell
- Turbulenzeingabe
- ...

Beispiele für Modellparameter

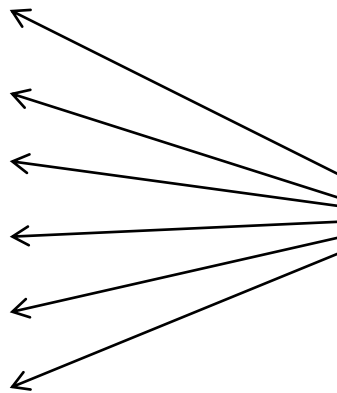
Windfeldberechnung:

- Wahl des Modells
- Programmparameter
- ...

Beispiele für Modellparameter

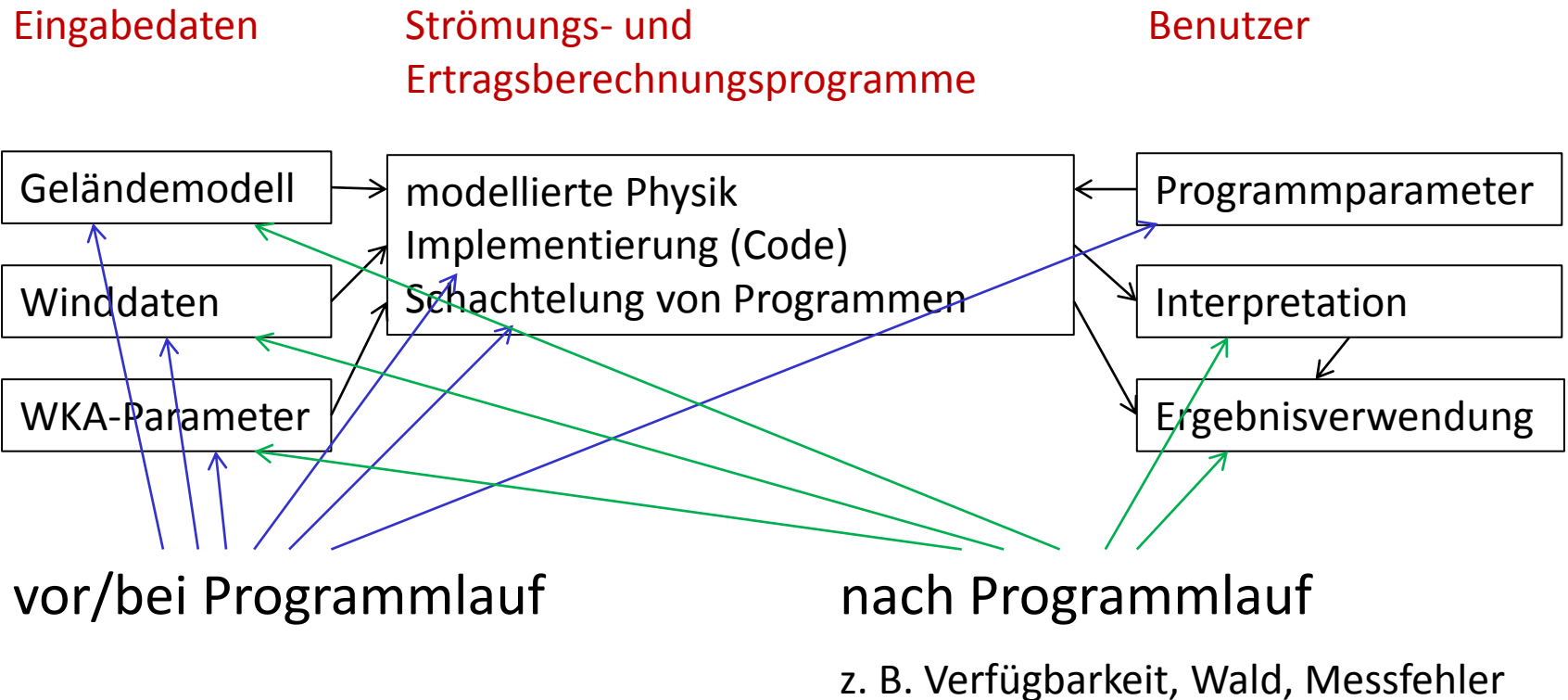
Ertragsberechnung:

- Wahl der Leistungskennlinie (LK)
- Luftdichteanpassung der LK
- Turbulenz- und Höhenprofilanpassung der LK
- Korrektur von Schubbeiwerten
- Wahl des Nachlaufmodells
- Turbulenz für Nachlaufberechnung bzw. Aufweitungswinkel des Nachlaufs
- Weibullnäherung
- Starkwindhysterese
- Vereisung
- Blockage
- Verfügbarkeit
- elektrische Verluste
- Blattalterung



tendenziell nach Programmlauf

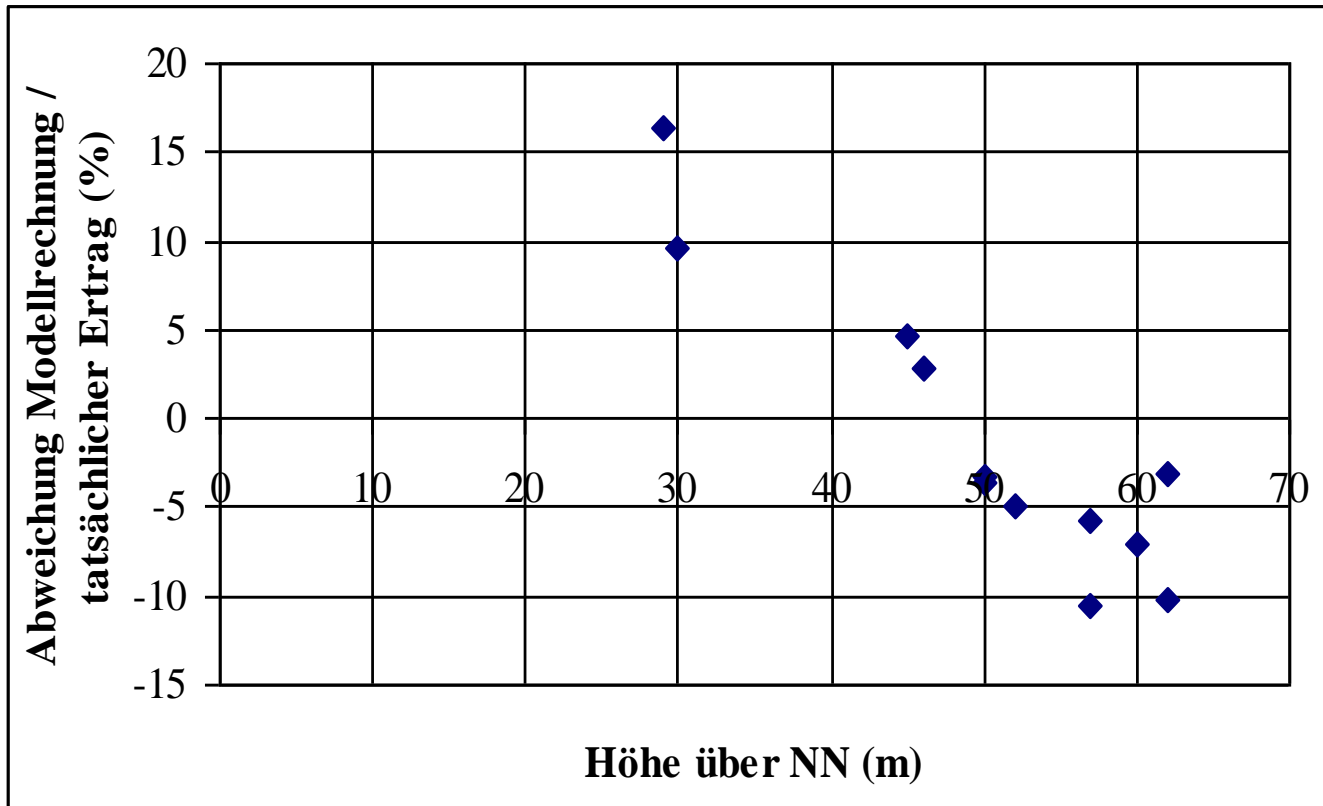
Zeitpunkt der Anpassung von Modellparametern



Kalibration der **Windfeldmodellierung**

- überwiegend vor Programmlauf, aber nicht zwingend
- bei 3-dimensionalen Modellen mehr Eingriffsmöglichkeiten als bei WAsP
- bei WAsP lange nur Niveauanpassung üblich, aber keine Anpassung innerhalb des Windfeldes
- in der letzten Zeit jedoch Verdrängungsdickenkorrektur bei Wald als weitere Anpassung, inzwischen als Stand der Technik angesehen
- aj: schon lange bei WAsP intensiv eingesetzt, auch nach Programmlauf

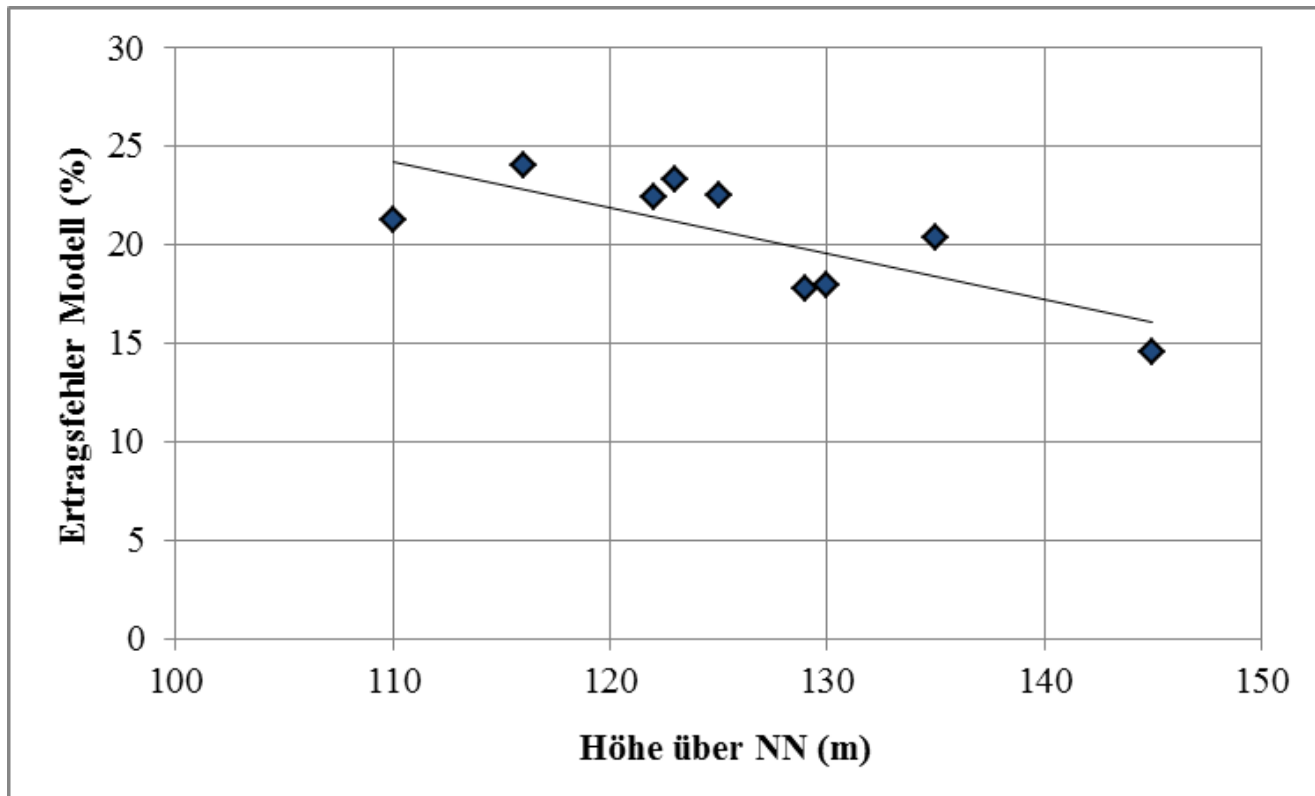
Orografieeinfluss, altes Beispiel



25 % Fehler bei 30 Höhenmetern

klare Zusammenhänge

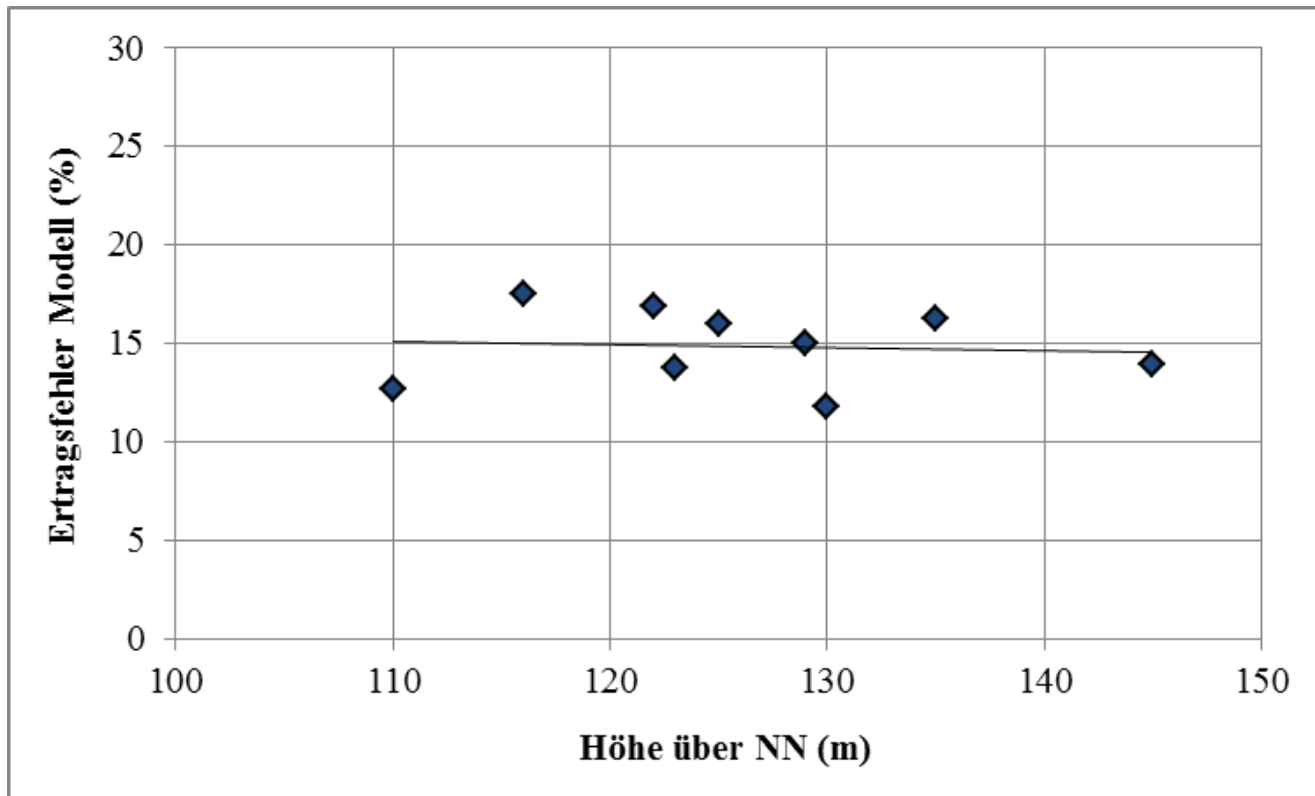
Orografieeinfluss, neues Beispiel



7 % Fehler bei 30 Höhenmetern

Fehlerbandbreite 9,5 %

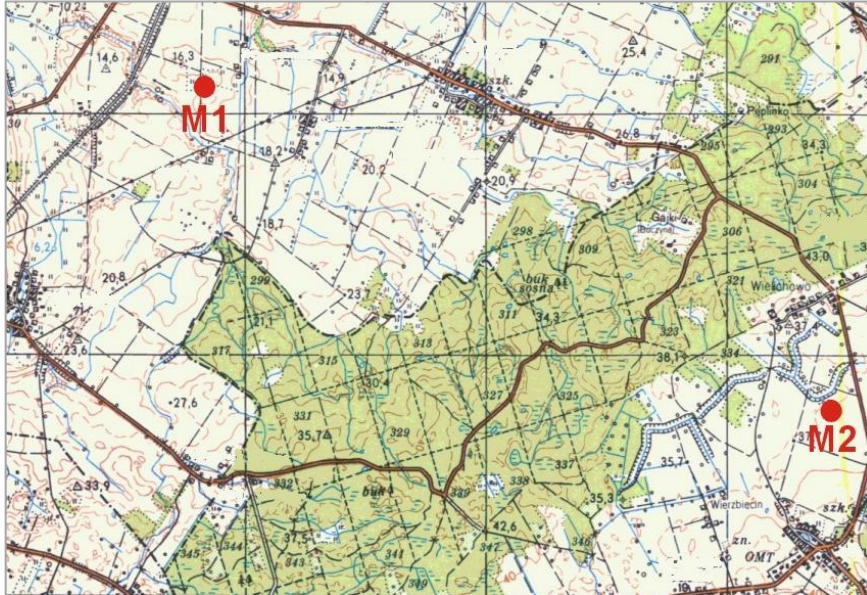
Orografieeinfluss, berechnete Unterschiede * 2,2



Fehlerbandbreite 5,7 %

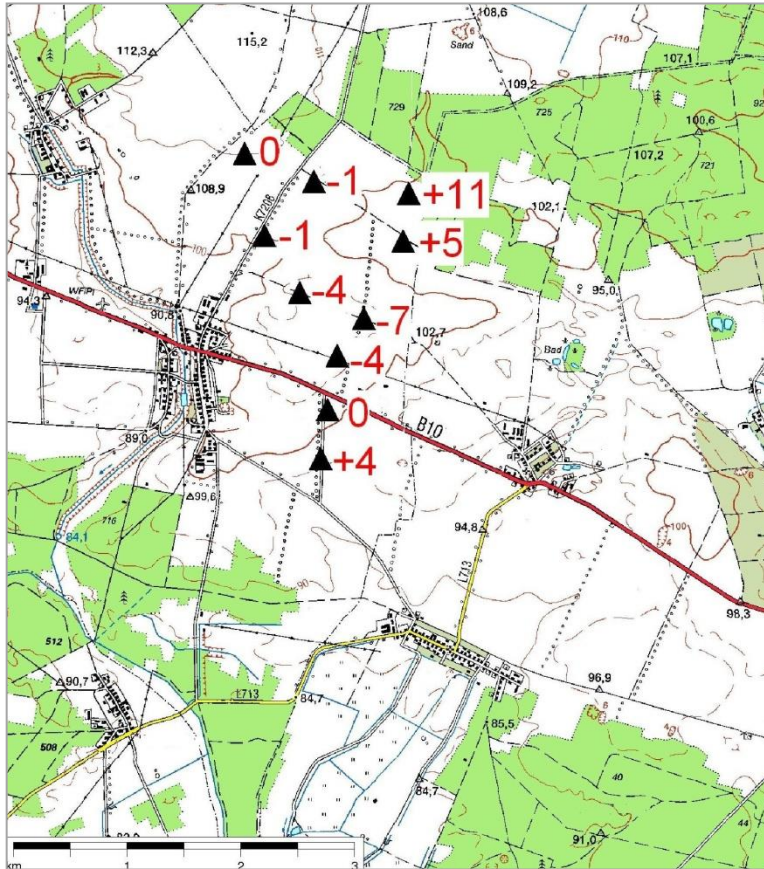
verbleibende Abweichungen überwiegend durch Luv-/
Leelagen erklärbar

Rauigkeitseinfluss (altes Beispiel)



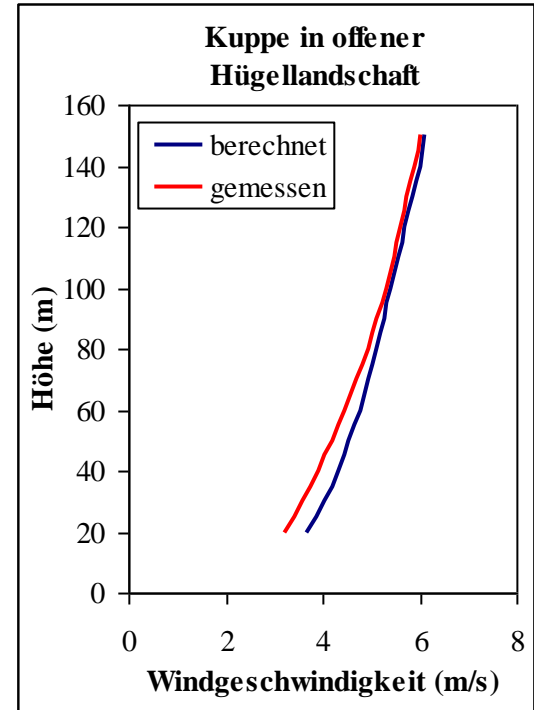
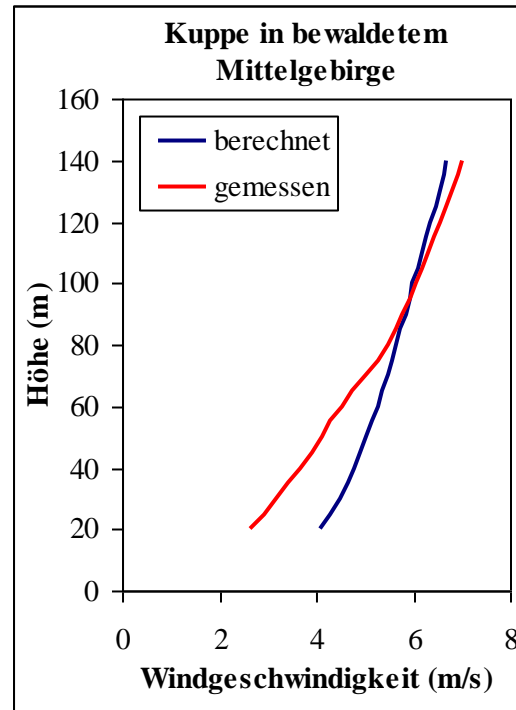
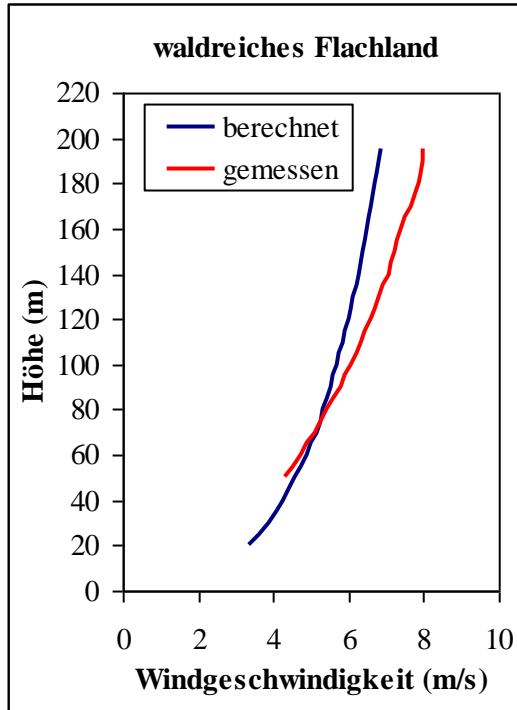
- 2 Messmaste
- Differenz in 50 m Höhe:
 - Realität: 0,6 m/s
 - WAsP: 0,3 m/s

Rauigkeitseinfluss (altes Beispiel)

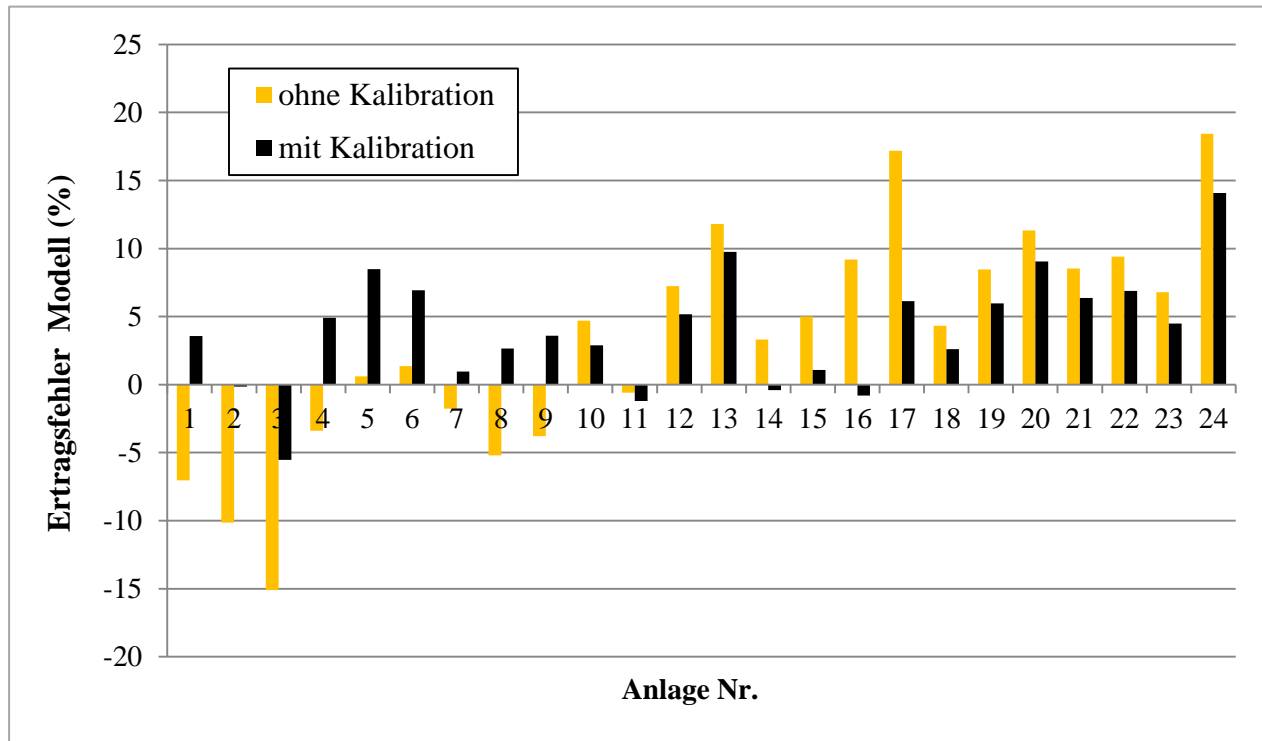


- 10 baugleiche Anlagen
- 90 m Nabenhöhe
- 76 m Rotordurchmesser
- Relativ niedrige Bäume (ca. 15 m)
- Kuppe in der Mitte des Parks
- Fehlerbandbreite: 18 %
- klarer Zusammenhang mit Wald und Orografie in Kombination

Höhenprofil



Beispiel für Kombination: Hügel, Nabenhöhen 65 m ... 125 m, 5 Typen



Fehlerbandbreite: 34 % → 20 % (ohne Ausreißer 33 % → 15 %)

Standardabweichung: 8,2 % → 4,2 %

**Bei 3-dimensionalen Modellen ist Kalibration Praxis.
Ohne diese ergeben sich häufig keine wesentlichen
Verbesserungen gegenüber WAsP.**

**Bei WAsP sollte die Kalibration auch über die
Waldmodellierung hinaus Praxis werden, d.h. Orografie und
Höhenprofil sollten ebenfalls einbezogen werden.**

Mit Erfahrung ergeben sich typische Anpassungen, die verwendet werden können, wenn vor Ort keine Kalibration möglich ist.

Typische Werte für WAsP-Anpassungen

Mitteleuropa:

Verdoppelung der von WAsP berechneten Unterschiede
oder 0,1 m/s pro 10 Höhenmeter und/oder 2/3 Baumhöhe (Waldnähe anpassen)

Südeuropa:

Halbierung der von WAsP berechneten Unterschiede
oder Berechnung auf 50 m - 80 m größerem Abstand vom Boden

Überall:

Das Höhenprofil muss standortspezifisch ermittelt und angepasst werden.

Basis: Windmessungen oder Erträge von Anlagen unterschiedlicher Nabenhöhe

Vorteile

- **mehr Anlagen im Abgleich**
- **größere Nabenhöhenbandbreite im Abgleich**
- **bessere Identifikation von Ausreißern**
- **keine Argumentation „fällt raus weil...“**
- **erhebliche Verringerung der Unsicherheit**