



## **Der „Kraftstoff Wind“: Die Rolle von Meteorologie und Prognosesystemen im Energiesystem**

**Bernhard Lange,**

**Kurt Rohrig, Florian Schlögl, Reinhard Mackensen, Ümit Cali**

**ISET – Institut für Solare Energieversorgungstechnik, Kassel**



## Übersicht

---

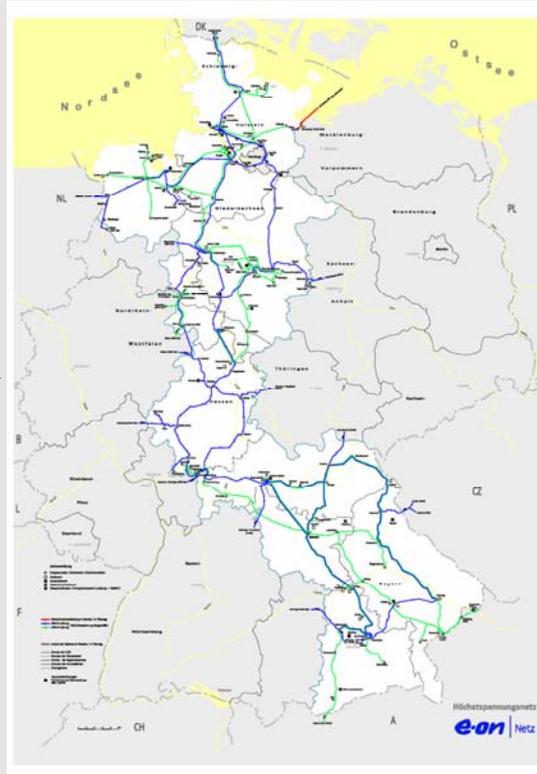
### Energiemeteorologie

- Herausforderungen bei der Netzintegration von Windenergie
- Aufgaben der Energiemeteorologie

### Windleistungsprognose

- Einführung
- Folgetagsprognose
- Kurzfristprognose
- Vorhersagegenauigkeit
- Anwendung

# Herausforderungen bei der Netzintegration von Windenergie



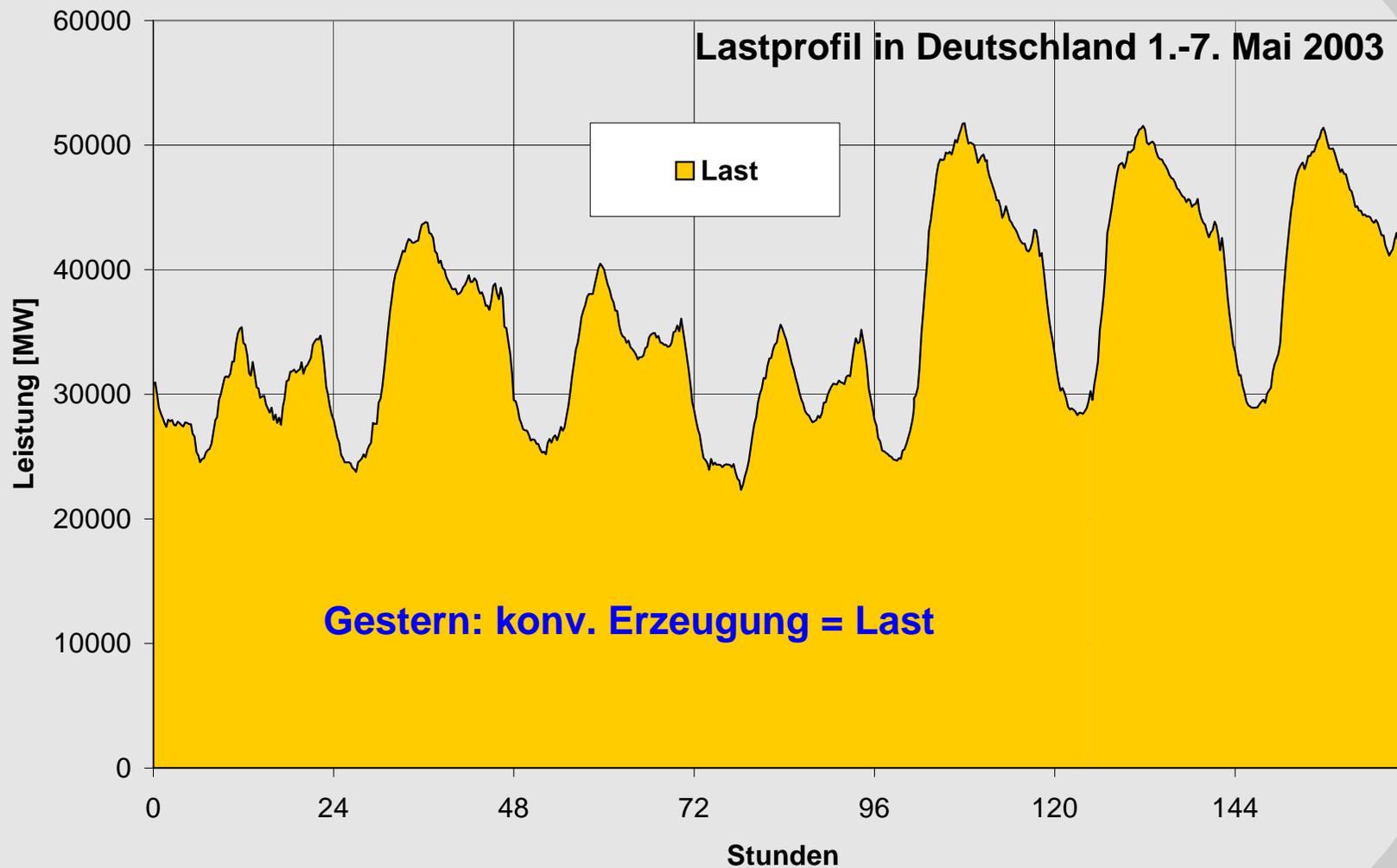
**Steuerbar**

**Flexible Standortwahl**

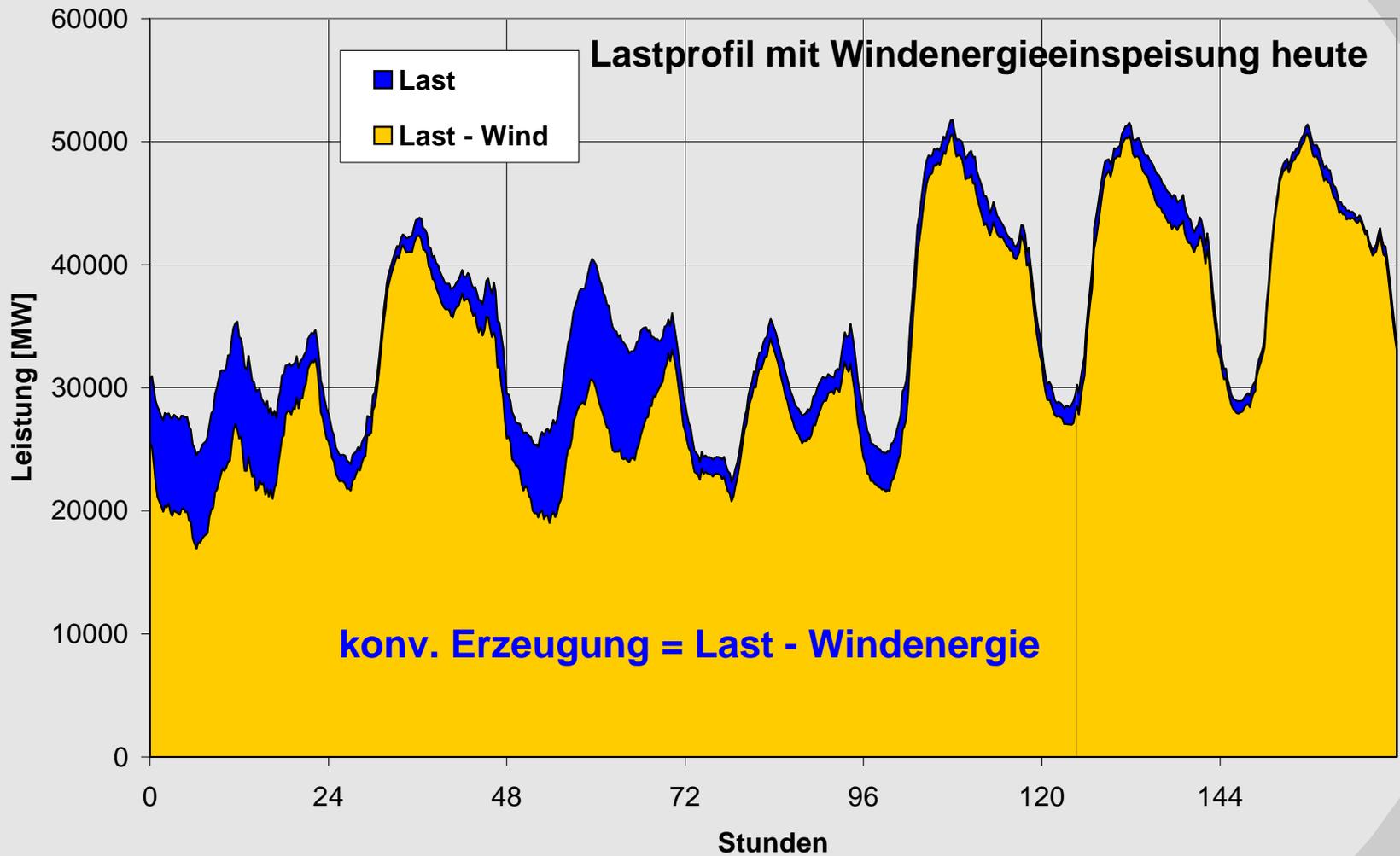
**Wetterabhängig**

**Ressourcenabhängige Standortwahl**

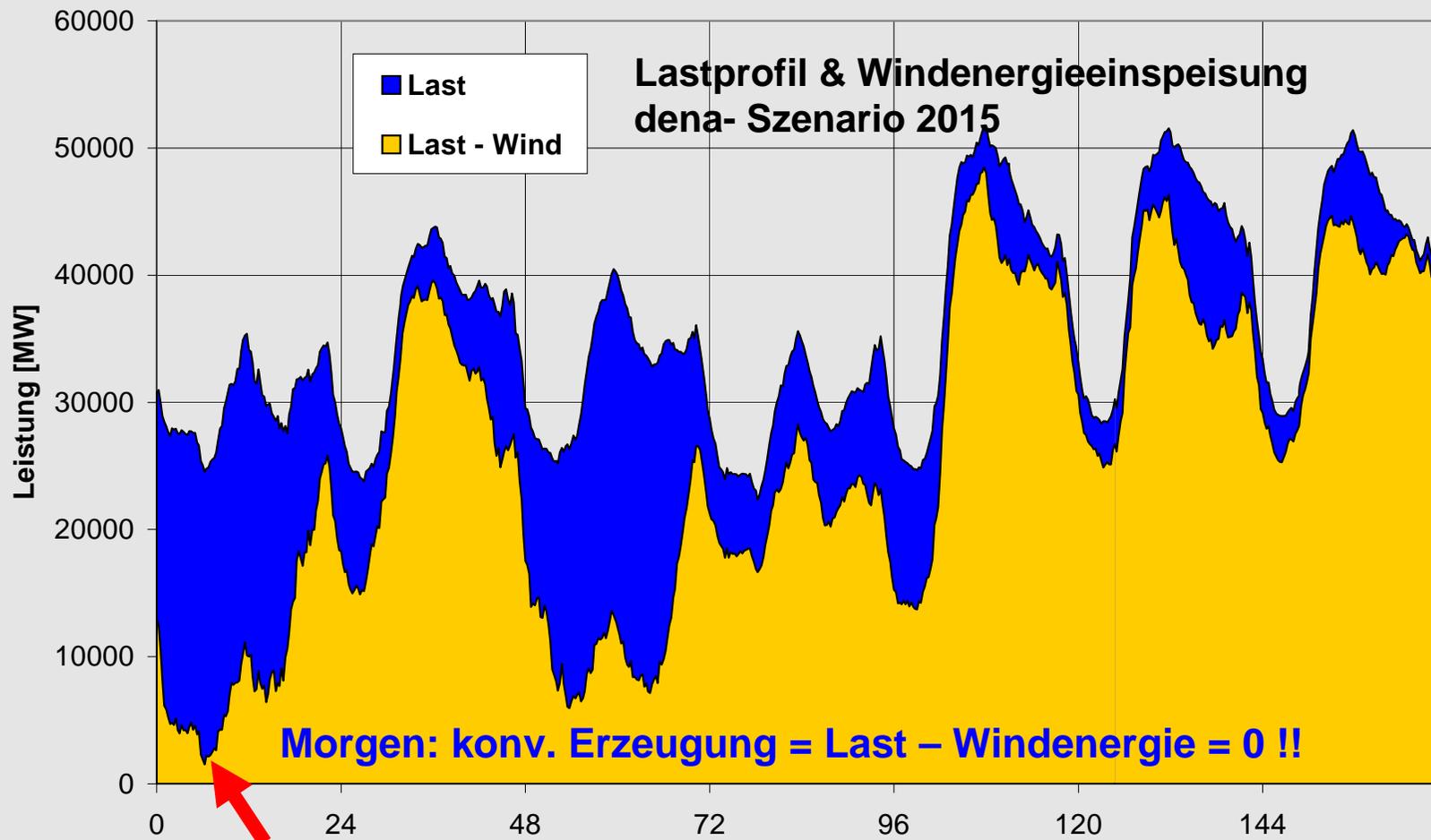
## Herausforderungen bei der Netzintegration von Windenergie



# Herausforderungen bei der Netzintegration von Windenergie

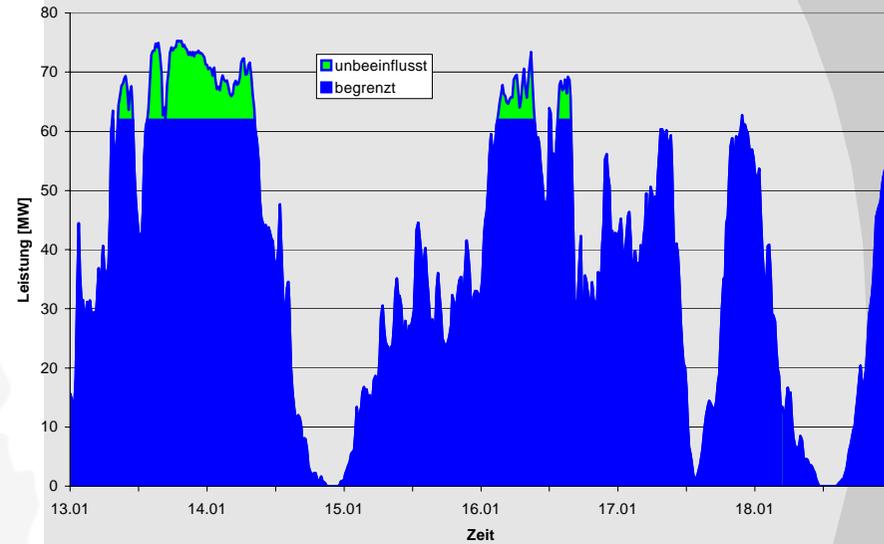
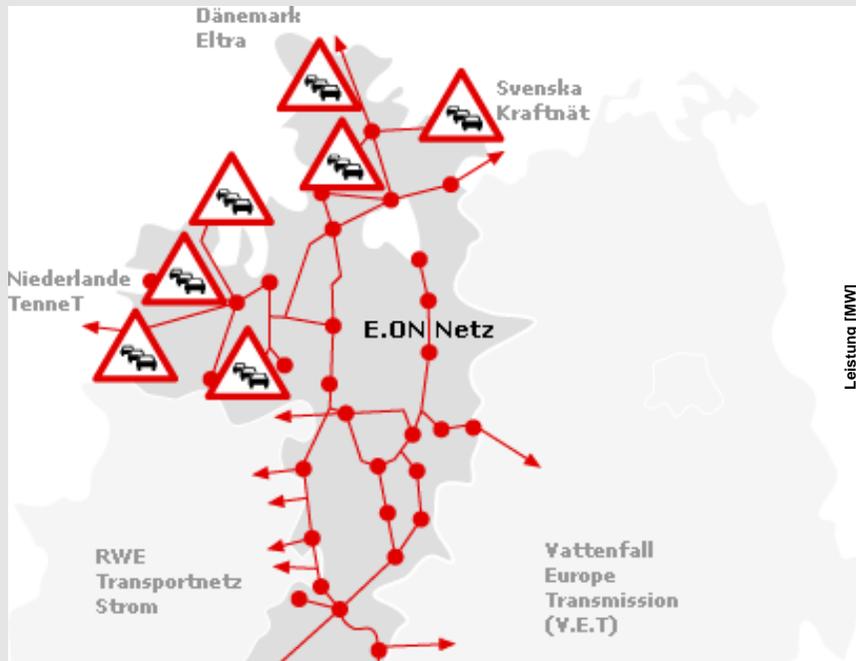


## Herausforderungen bei der Netzintegration von Windenergie



**Keine konventionellen Kraftwerke am Netz**

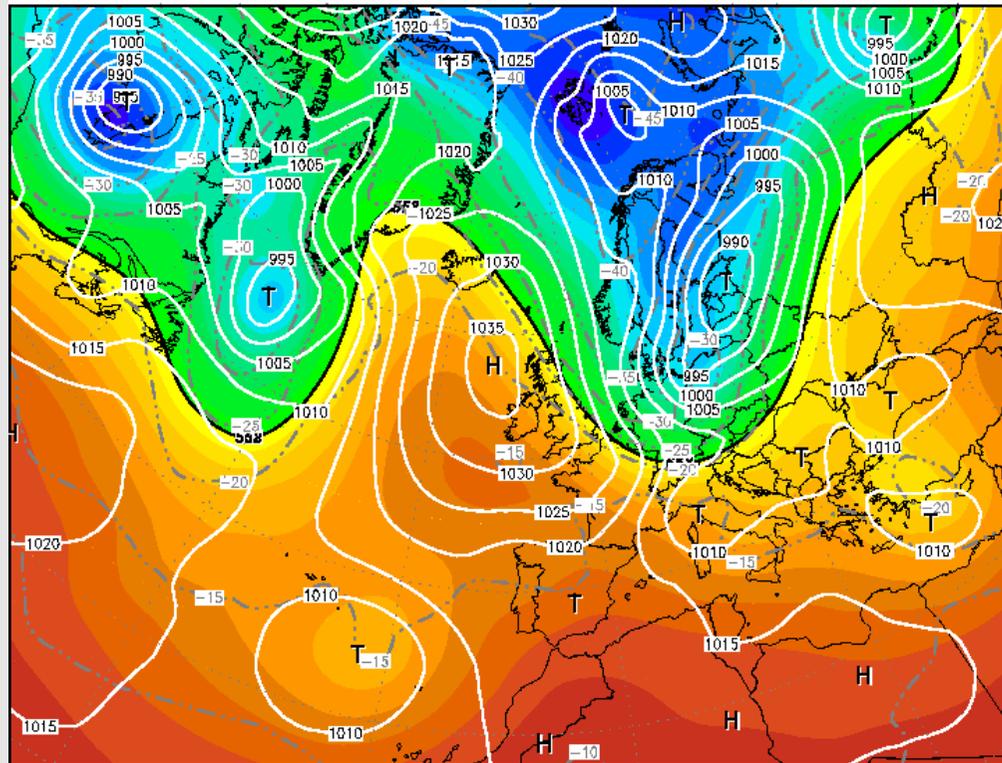
**=> Netzführung (Frequenz, Spannungshaltung, ...) wird benötigt**



**Zu hohe Windleistung in Schwachlastzeiten...  
Nur für wenige Stunden im Jahr**

## Herausforderungen bei der Netzintegration von Windenergie

Für Windleistung gibt es eine Nichtanpassung zwischen Erzeugung und Verbrauch in Raum und Zeit



## Herausforderungen bei der Netzintegration von Windenergie

---

### Konventionelle Kraftwerke

#### Flexible Erzeugungsplanung

- ⇒ Verbrauchsgesteuert
- ⇒ Angepasst an Transportkapazität

#### Flexible Standortwahl

- ⇒ Standorte bei Verbrauchszentren

Zusatzleistungen für Netzführung  
(z.B. Frequenzregelung,  
Spannungshaltung, ...)

### Windenergie

#### Dargebotsabhängige Erzeugung

- ⇒ Wetterabhängig  
fluktuierende Erzeugung
- ⇒ Hohe Transportkapazitäten erforderlich

#### Ressourcenabhängige Standortwahl

- ⇒ Oft abgelegene Standorte

Keine Beteiligung an der  
Netzführung

## Aufgaben der Energiemeteorologie

---

**These: Einbeziehung von Windenergie erfordert ein grundsätzliches Umdenken in der Energiesystemtechnik**

### **Planung**

- Standortplanung für Kraftwerke
- Netzplanung

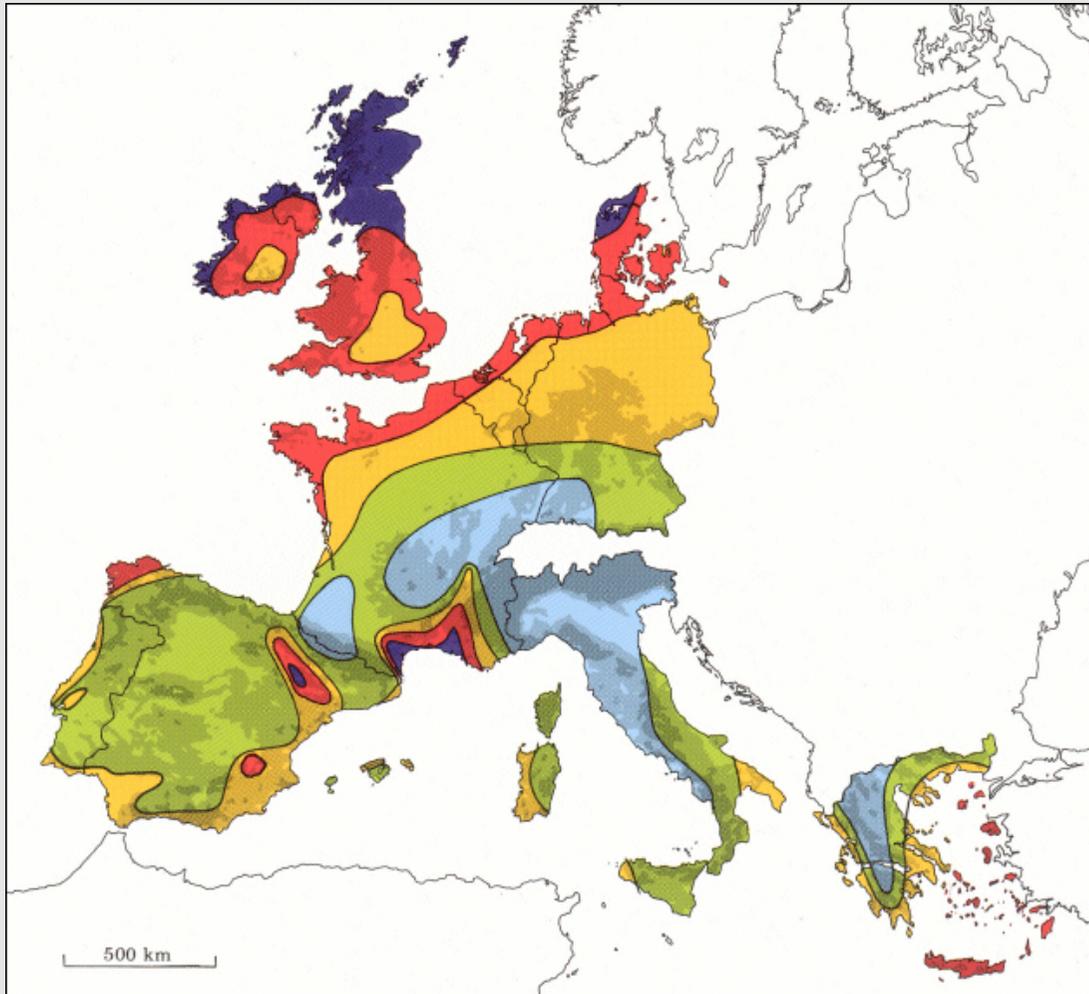
### **Betrieb**

- Zustandserfassung
- Leistungsausgleich
- Netzführung

⇒ **Energiemeteorologische Erkenntnisse und Verfahren müssen in Planung und Betrieb einbezogen werden**

## Aufgaben der Energiemeteorologie

### Standortplanung für Kraftwerke

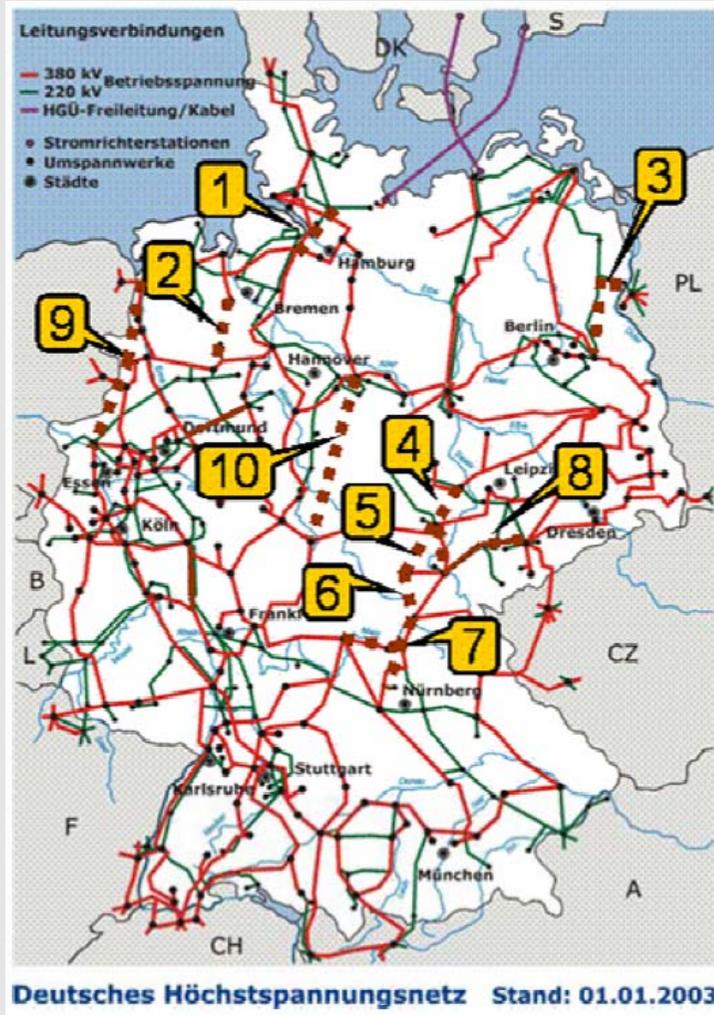


Windpotentialkarte für  
Europa mit der WAsP  
Methode

[[www.windatlas.dk](http://www.windatlas.dk)]

# Aufgaben der Energiemeteorologie

## Netzplanung

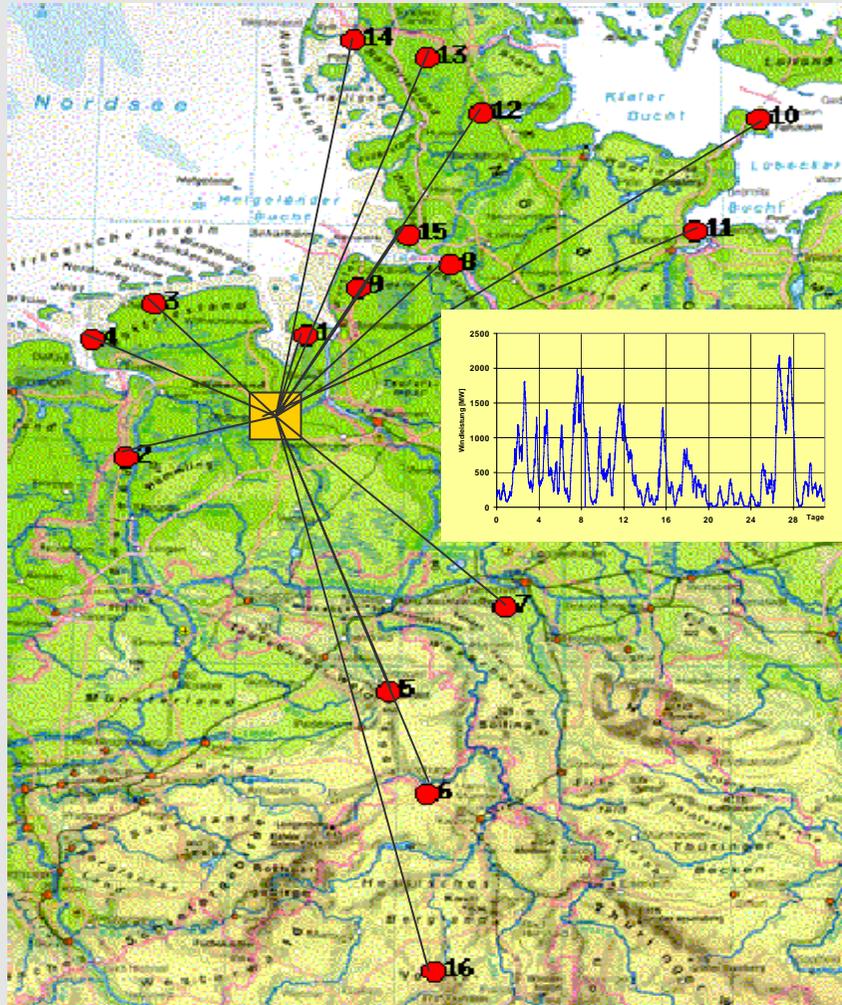


Erforderliche Netzverstärkung für Windenergie in Deutschland bis 2010

Quelle: dena-Studie

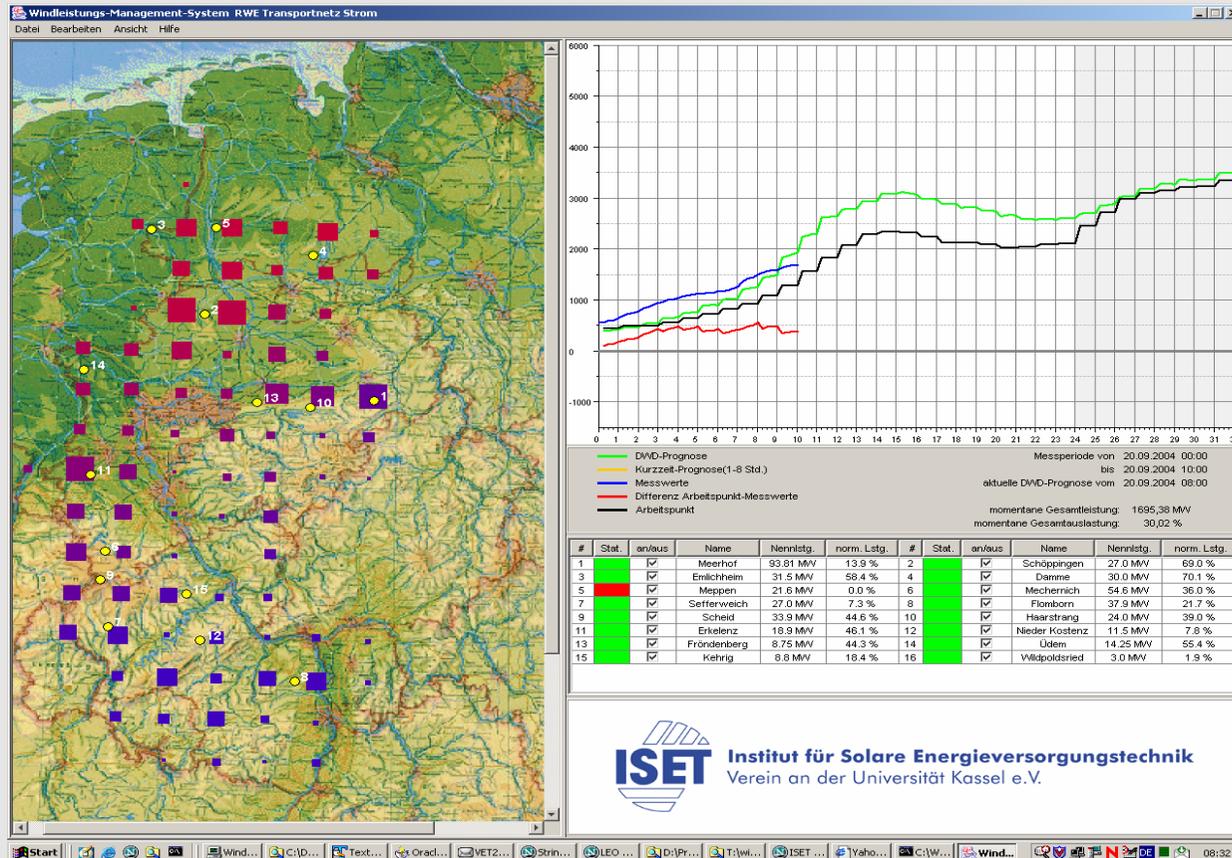
# Aufgaben der Energiemeteorologie

## Zustandserfassung



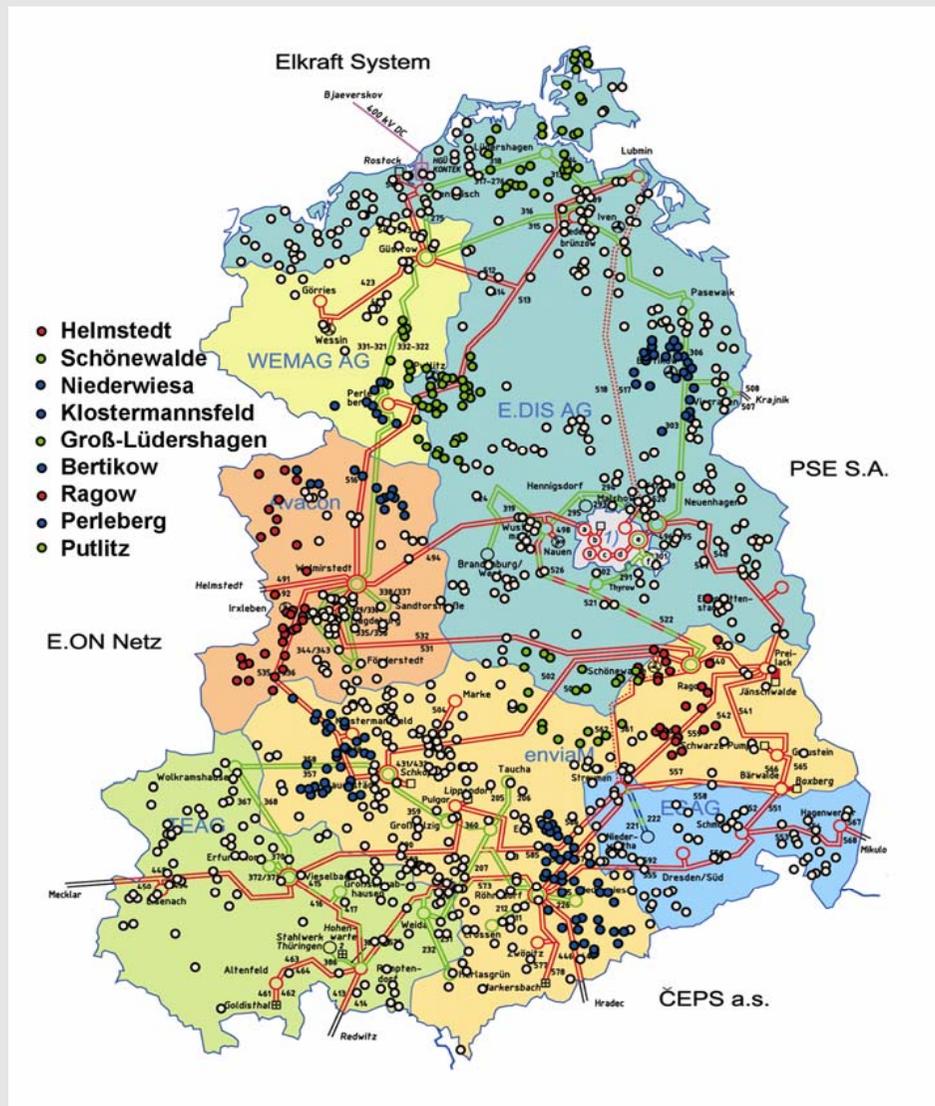
Erfassung der aktuell eingespeisten Windleistung in jeder ‚Planfläche‘ durch Hochrechnung aus wenigen Messungen

## Leistungsausgleich (zeitliche Integration)



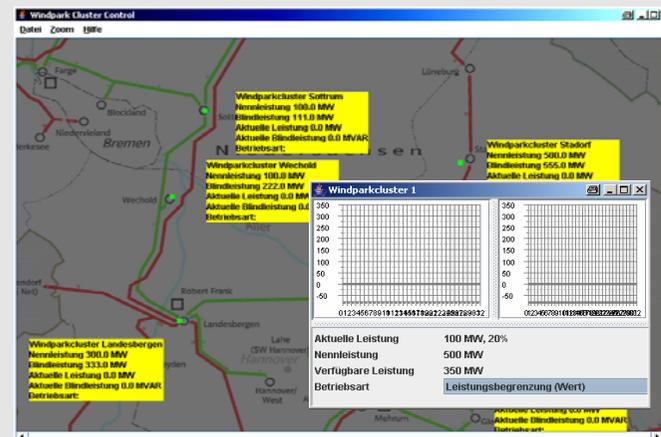
## Wind Power Management System (WPMS) des ISET

# Aufgaben der Energiemeteorologie



## Netzknotenscharfe Erfassung und Vorhersage

ermöglicht Cluster-Management, Abruf/Bereitstellung von Blindleistung und Reserveleistung



## Zusammenfassung Energiemeteorologie

---

### **Herausforderung der Netzintegration von Windenergie:**

- Für Windleistung gibt es eine Fehlanpassung zwischen Erzeugung und Verbrauch in Raum und Zeit
- Einbeziehung eines großen Anteils von Windenergie erfordert ein grundsätzliches Umdenken in der Energiesystemtechnik

### **Aufgabe der Energiemeteorologie:**

- Beschreibung und Vorhersage der Erzeugung in Raum und Zeit
- Bereitstellung von Werkzeugen für die Planung und den Betrieb des Stromversorgungssystems

## Übersicht

---

### Energiemeteorologie

- Herausforderungen bei der Netzintegration von Windenergie
- Aufgaben der Energiemeteorologie

### Windleistungsprognose

- Einführung
- Folgetagsprognose
- Kurzfristprognose
- Vorhersagegenauigkeit
- Anwendung

## Einführung

---

### Windleistungsprognose

- **Beispiel für ein energiemeteorologisches Werkzeug**
- **Seit mehreren Jahren im operationellen Einsatz bei Netzbetreibern**
- **Essentiell für den Betrieb des Stromversorgungssystems**



## Einführung

---

### Ziele der Windleistungsprognose

- Vorhersage der eingespeisten Windleistung für Windparks, Netzregionen, Regelzonen
- Vorhersagehorizont typischerweise bis 72 Stunden



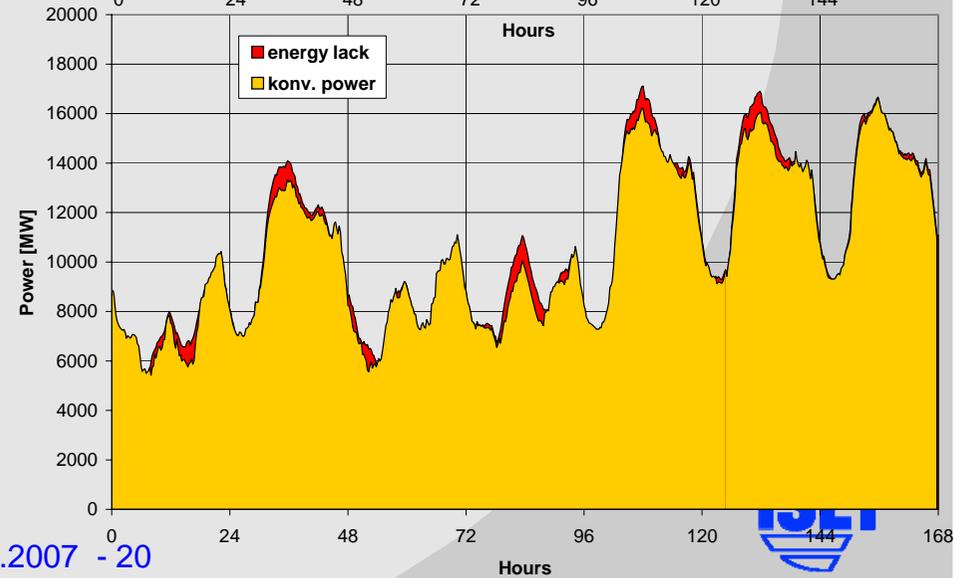
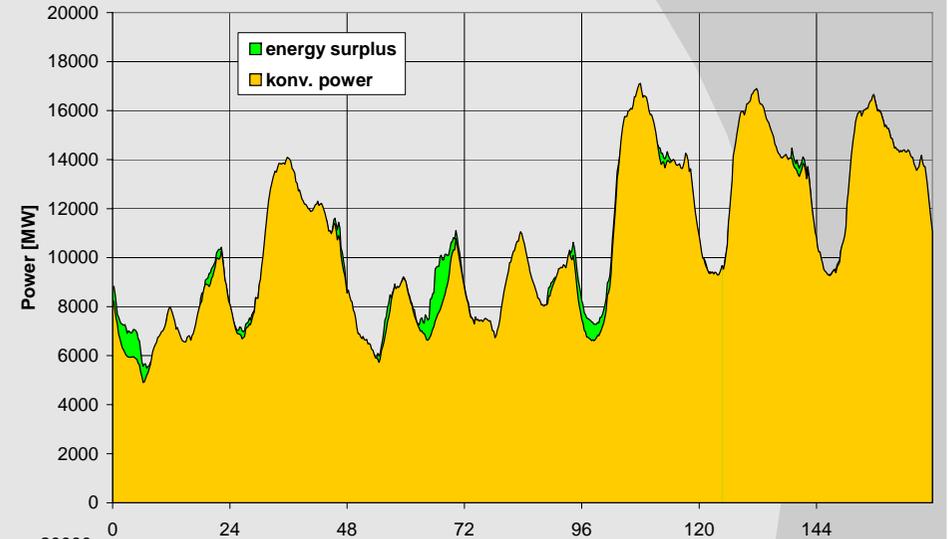
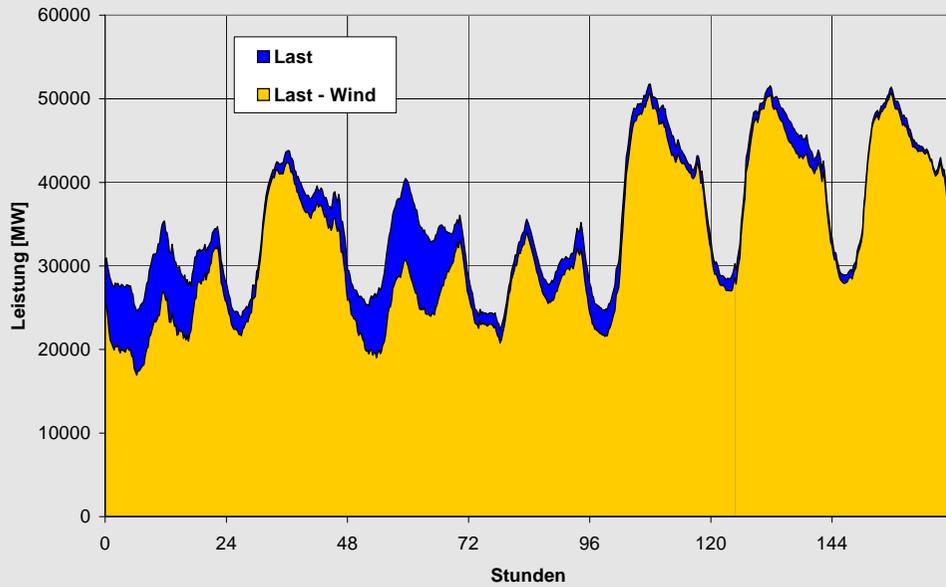
- Stromhandel bzw. Kraftwerkseinsatzplanung
- Netzführung



- Geringerer Bedarf an Regelenergie
- Erhöhung des Wertes der Windenergie

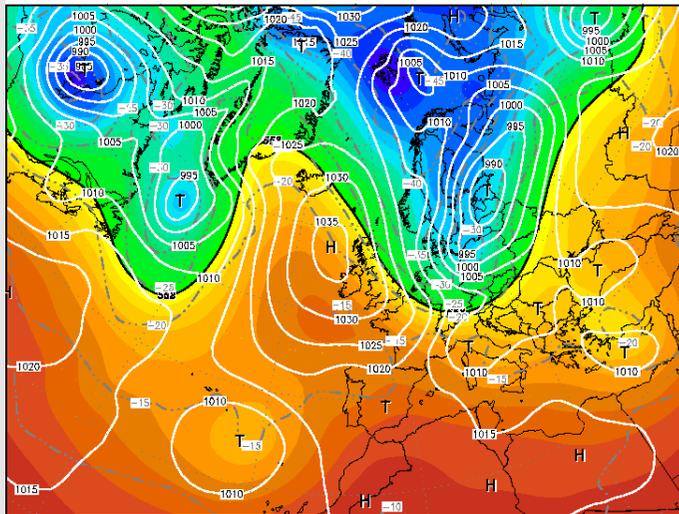
# Einführung

## Minimierung der Regelenergie

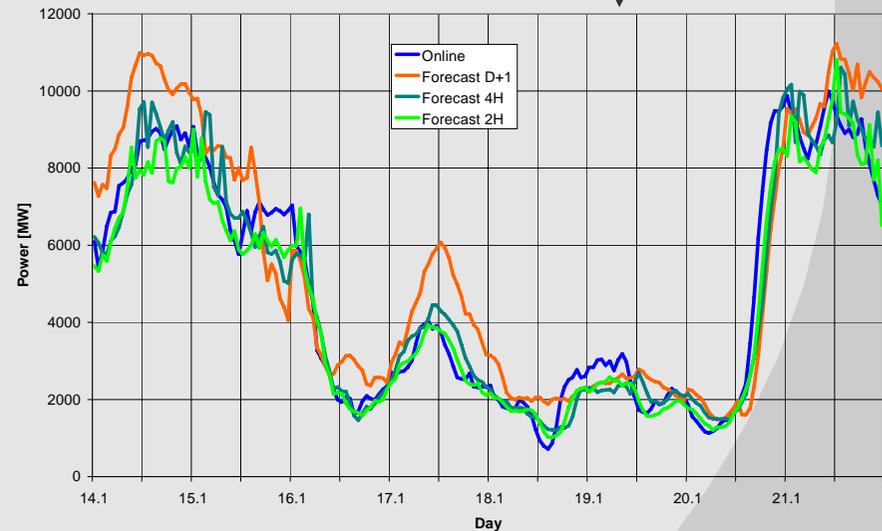


# Folgetagsprognose

## Aufbau eines Prognosesystems



Numerisches Wettermodell

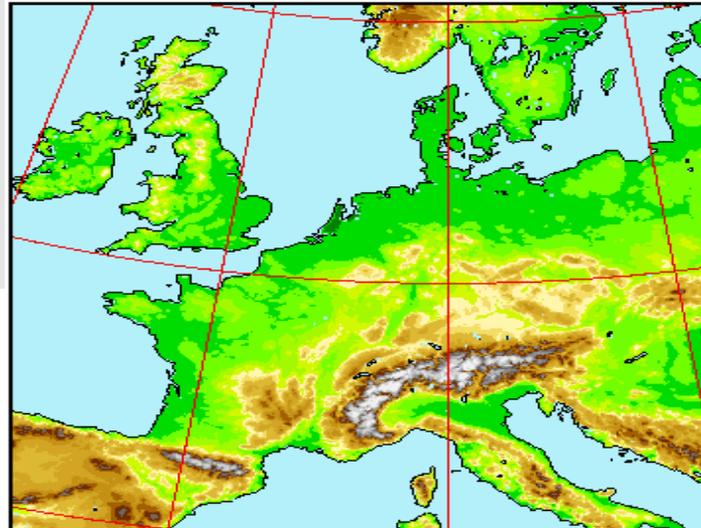
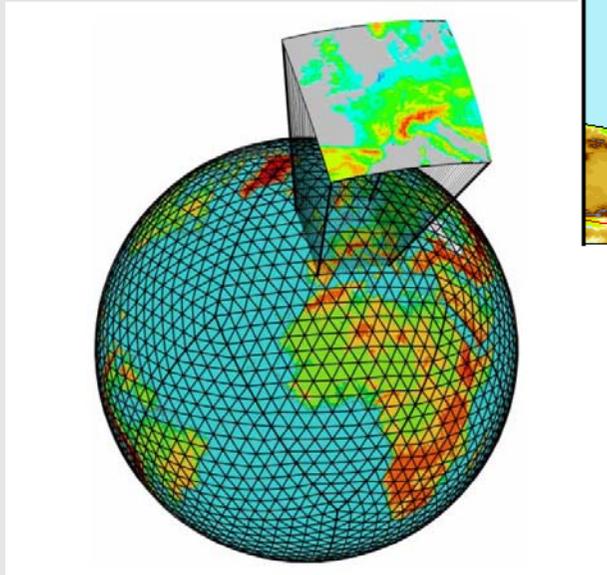


Windleistungsprognose für eine Regelzone

# Folgetagsprognose

## Numerisches Wettermodell

Globale Modelle  
mit Input aus globalem  
Beobachtungsnetz



Regionale Modelle  
mit Input aus  
Globalmodellen

Beispiel: Europamodell des DWD (LM-E)

- 325 x 325 Gitterpunkte
- Gitterweite ca. 7 km
- Vorhersagezeitraum 48 Stunden
- 3 Modellläufe am Tag

## Folgetagsprognose

---

### Methoden für die Windleistungsprognose

#### Physikalische Modelle

- Berechnung des Windes auf Nabenhöhe
- Verwendung der Leistungskurven der Anlagen
- Modellierung der Windparkabschattungen
- Korrekturverfahren für systematische Fehler (MOS)

#### Statistische Modelle

- Berechnung von Zusammenhängen zwischen Wetterprognosen und Windleistung mit statistischen Modellen

#### Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI)

- ‚Lernen‘ von Zusammenhängen zwischen Wetterprognosen und Windleistung mit Methoden der künstlichen Intelligenz (künstliche neuronale Netze, Support Vektor Maschinen, ...)

## Folgetagsprognose

---

### Vor- und Nachteile

#### Statistische und KI Methoden

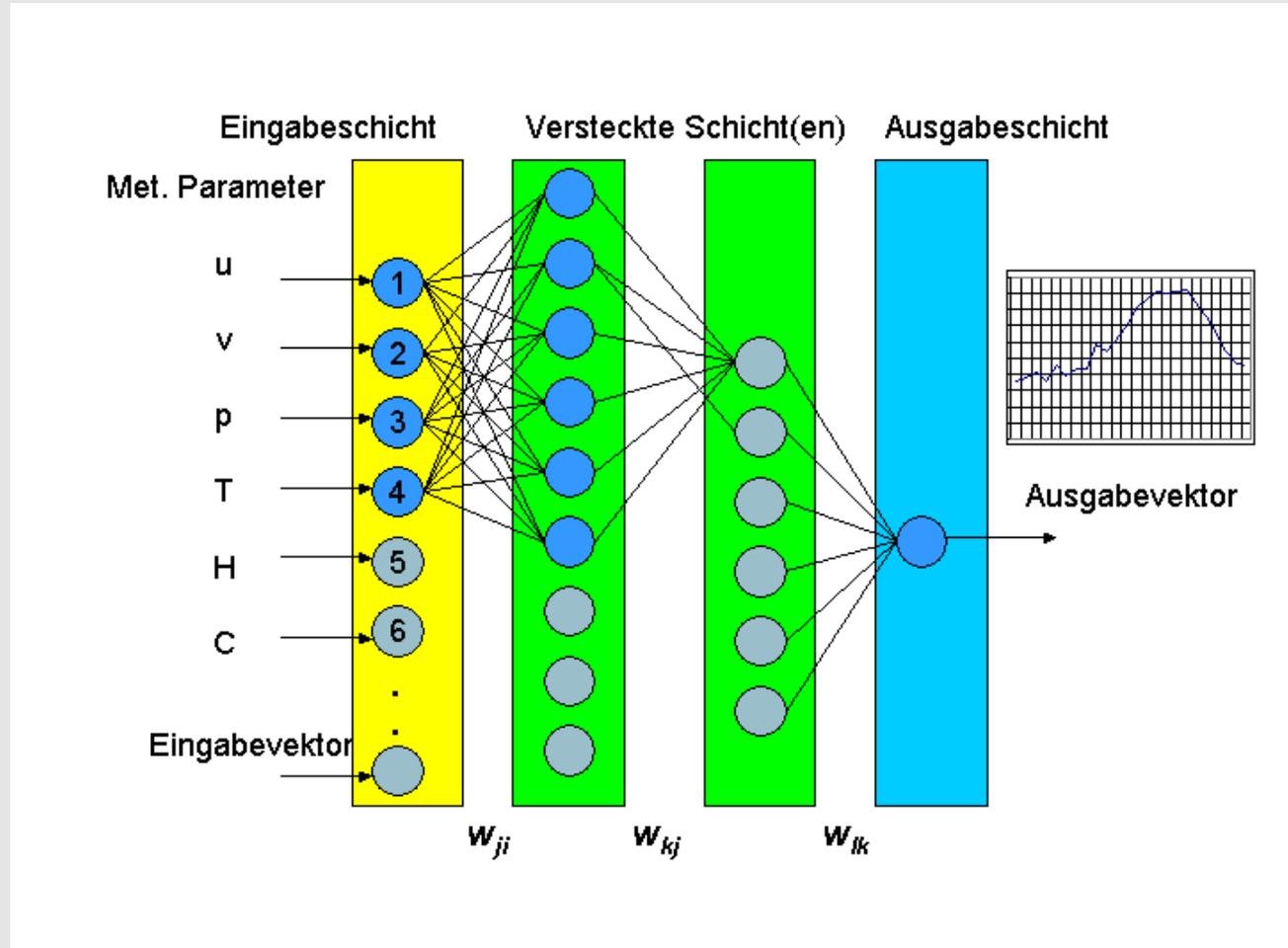
- + Detailliertes physikalisches Verständnis nicht nötig
- + Schnelle Berechnung
- Abhängig von hochwertigen Messdaten
- Unsicherheit bei neuen oder sehr seltenen Situationen

#### Physikalische Methoden

- + Qualität und Umfang der Messdaten weniger wichtig
- Benötigt umfangreiche Informationen über die Windparks
- Hoher Aufwand

# Folgetagsprognose

## Prognose der Windparkleistung mit künstlichem neuronalem Netz (KNN)



### Eingangsdaten

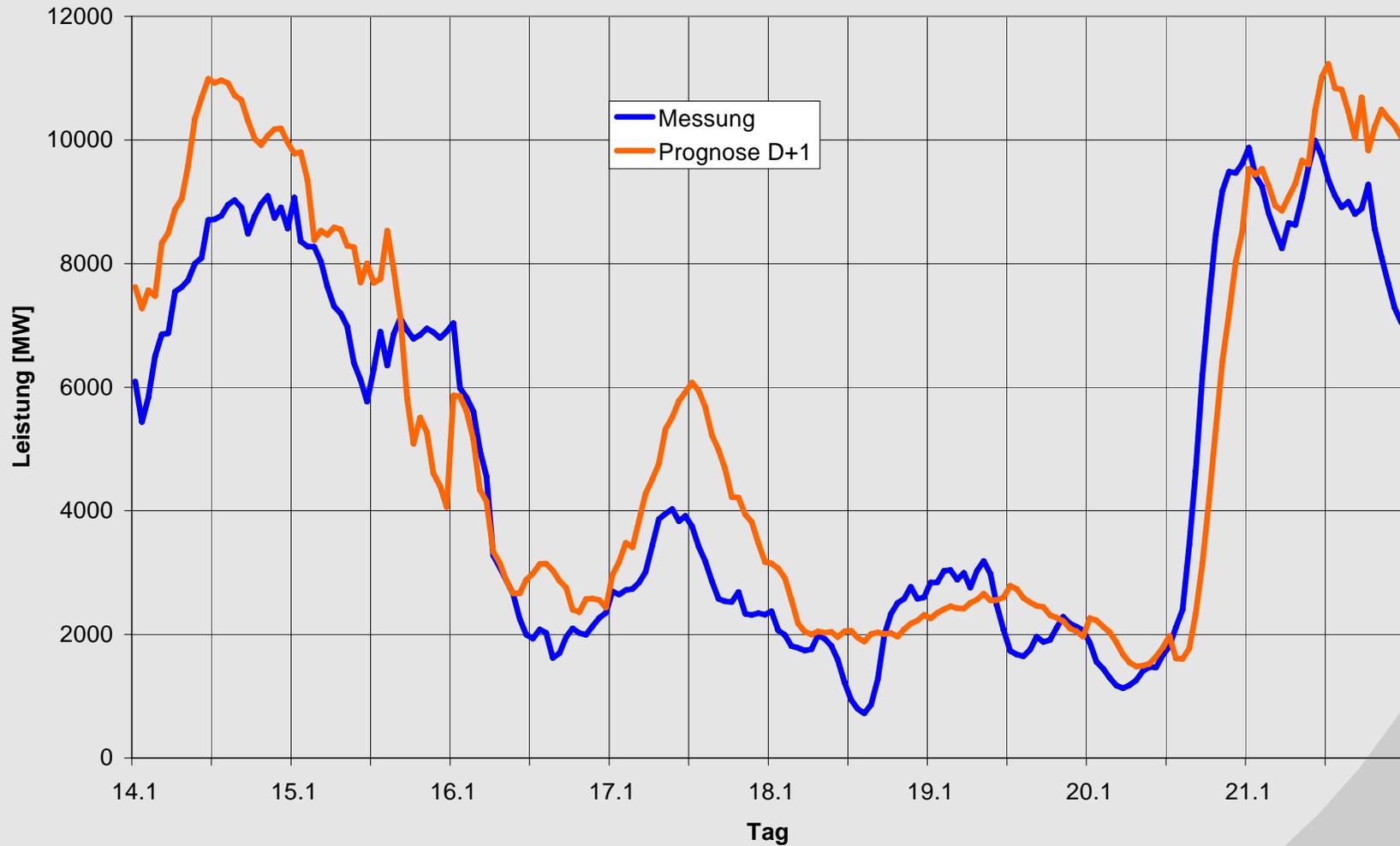
- Wind 10, 100m
- Luftdruck
- Temperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Bedeckungsgrad
- ...

### Ausgangsdaten

- normierte Leistung

# Folgetagsprognose

## Windenergieeinspeisung Deutschland – Istwert und Folgetagsprognose

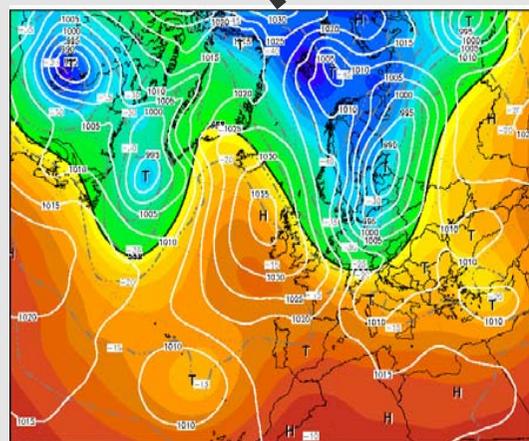


# Kurzfristprognose

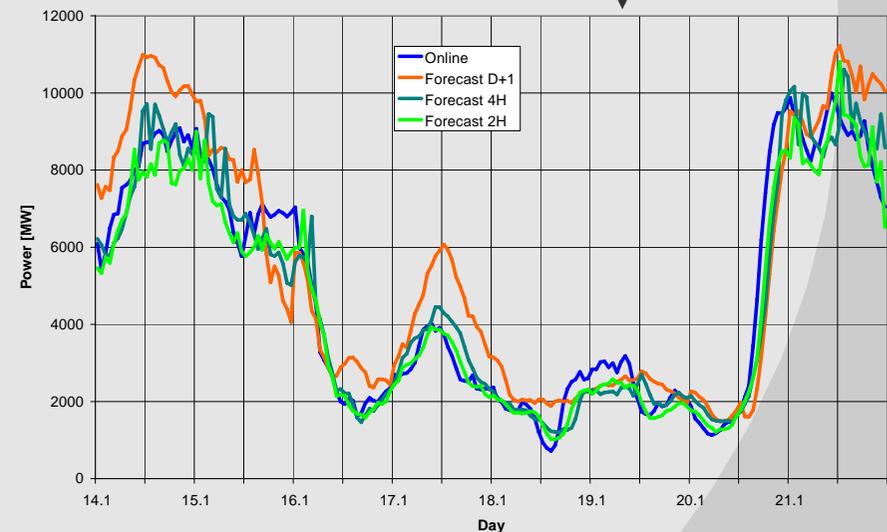
## Aufbau eines Prognosesystems für die Kurzfristprognose



Repräsentative Windparks

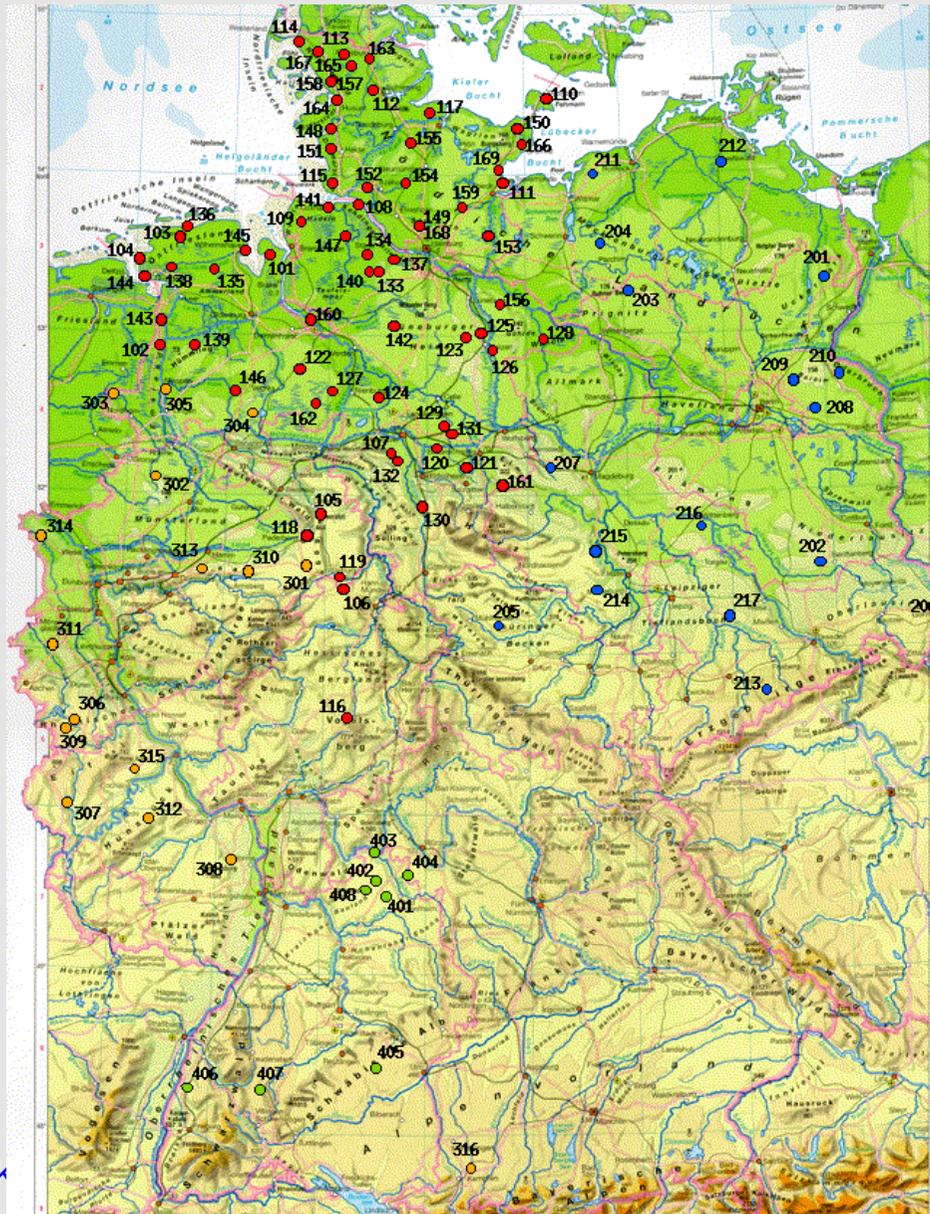


Numerisches Wettermodell



Windleistungsprognose für eine Regelzone

# Kurzfristprognose



## Referenzmessnetz

Leistungsmessung an repräsentativen Windparks (Umspannwerken)

E.ON:	69 Stationen	2356 MW	(33,2 %)
VE-T:	17 Stationen	725 MW	(11,4 %)
RWE:	16 Stationen	461 MW	(15,2 %)
EnBW:	7 Stationen	108 MW	(41,3 %)

Summe: 111 Stationen 3650 MW (21,8 %)

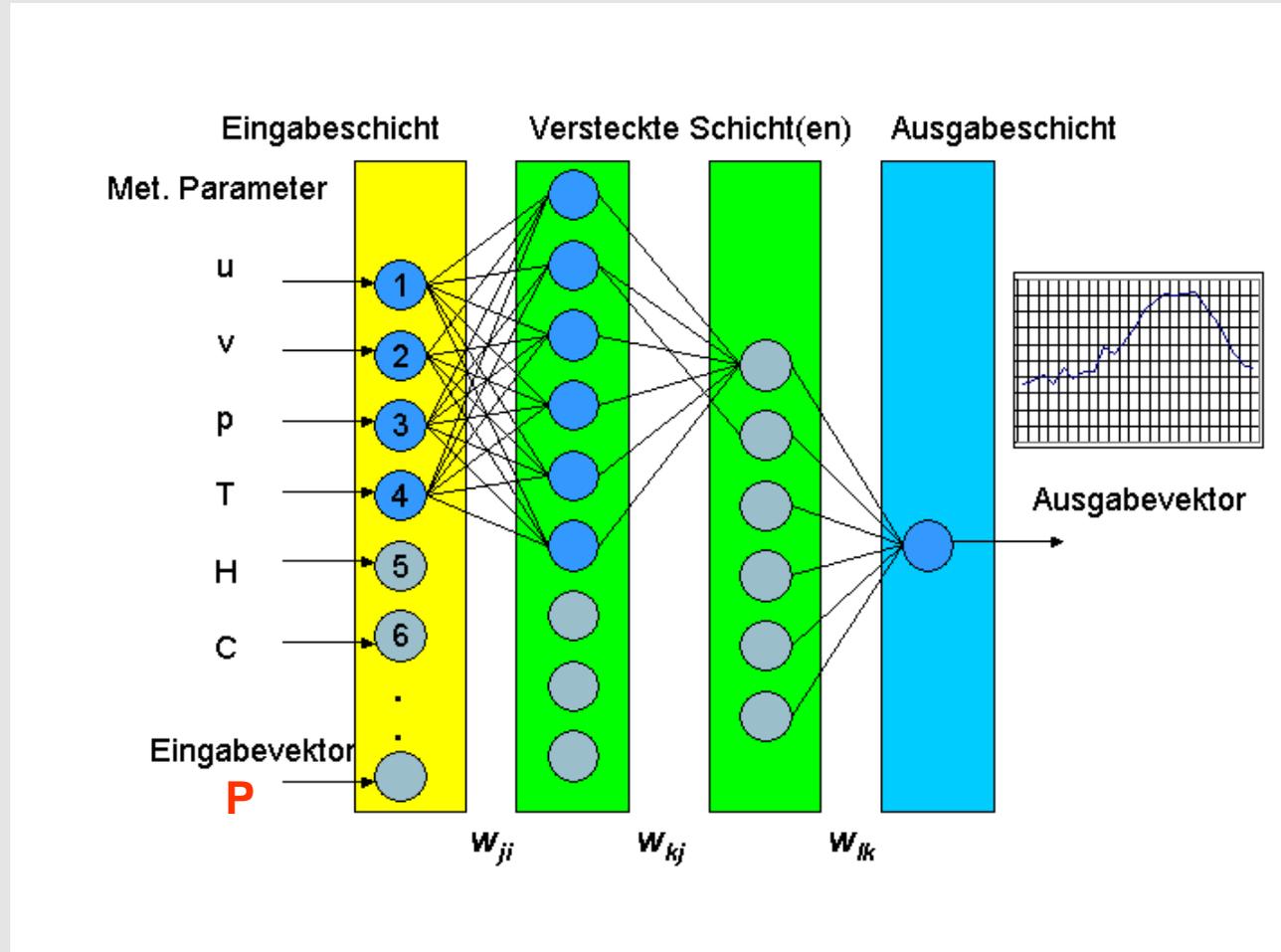
Verwendung:

- Online-Hochrechnung
- Kurzfristprognose (bis 8h)



# Kurzfristprognose

## Kurzfristprognose der Windparkleistung mit KNN



### Eingangsdaten

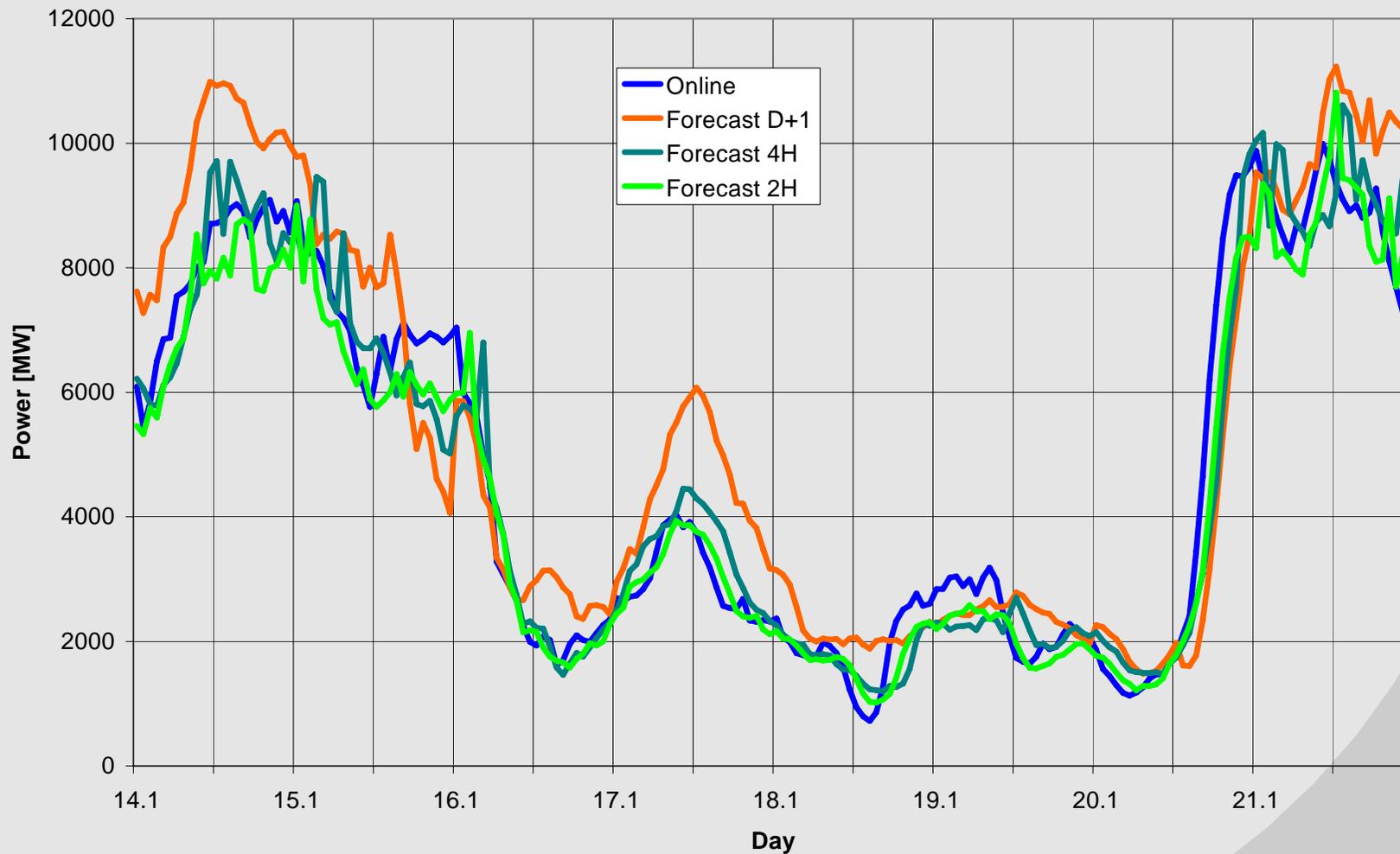
- Wind 10, 100m
- Luftdruck
- Temperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Bedeckungsgrad
- ...
- **online gemessene Leistung des WP**

### Ausgangsdaten

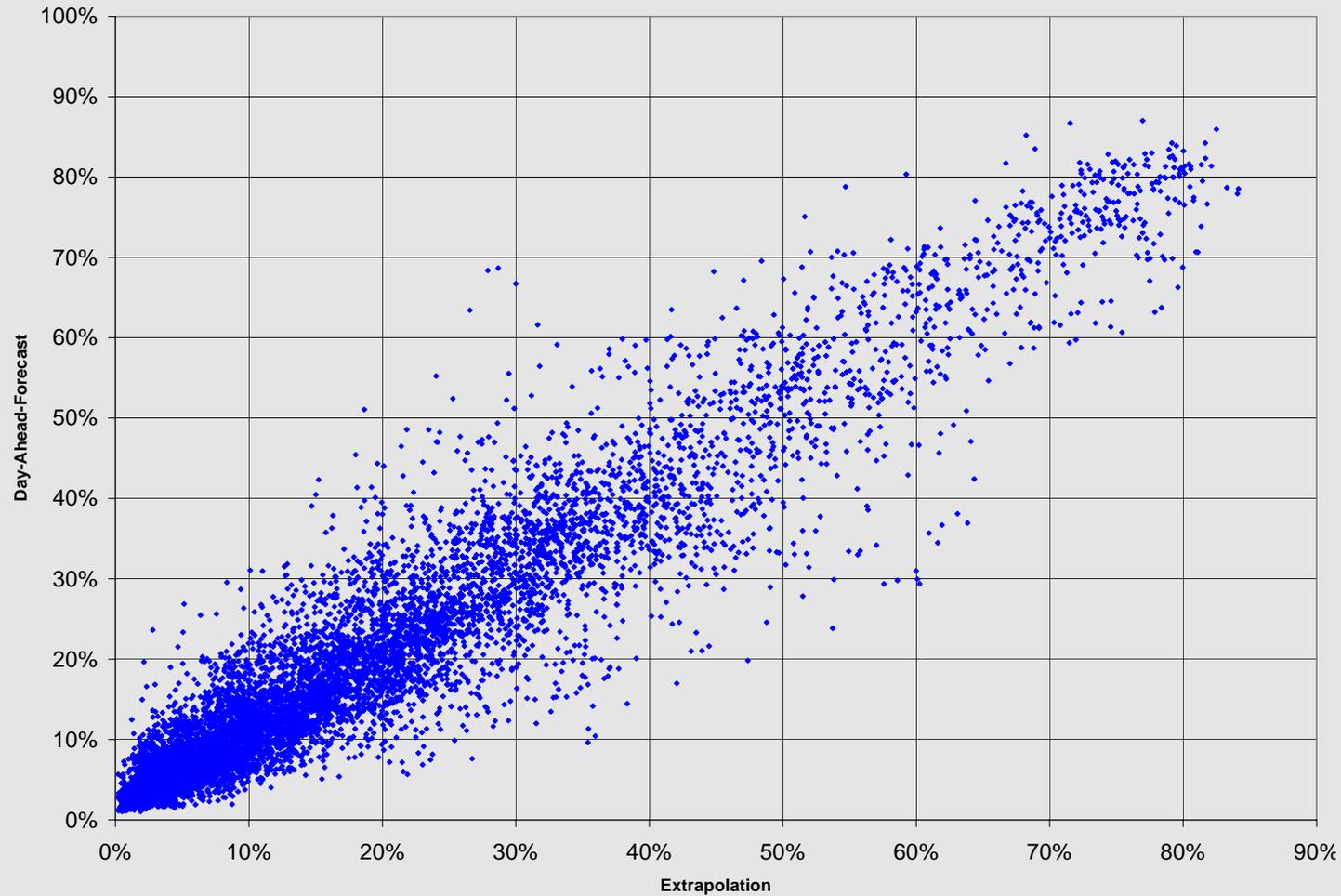
- **normierte Leistung**

# Kurzfristprognose

## Windenergieeinspeisung D – Istwert, Folgetags- und Kurzfristprognosen



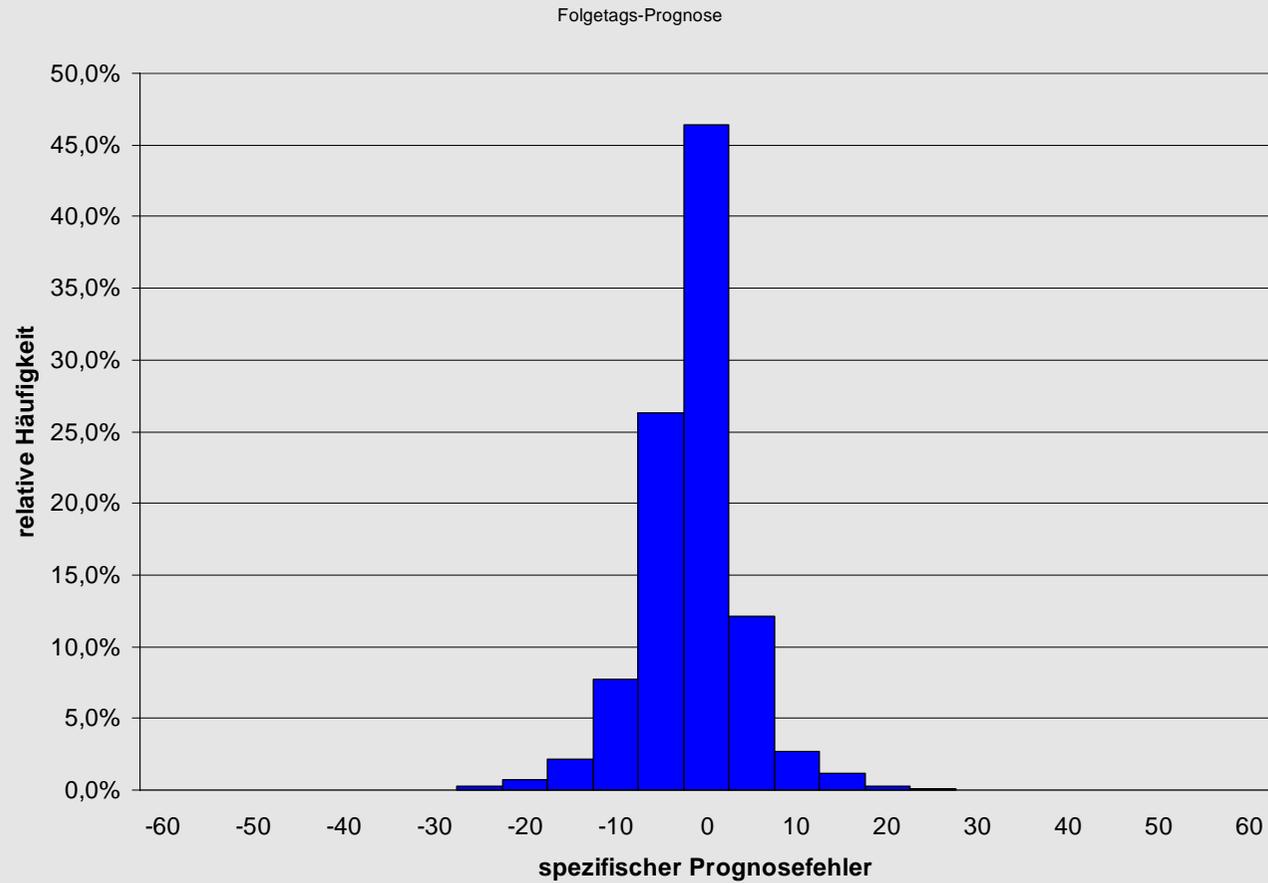
## Vorhergesagte versus hochgerechneter Leistung



**Folgetagsprognose Deutschland 1.4.2004 – 31.3.2005**

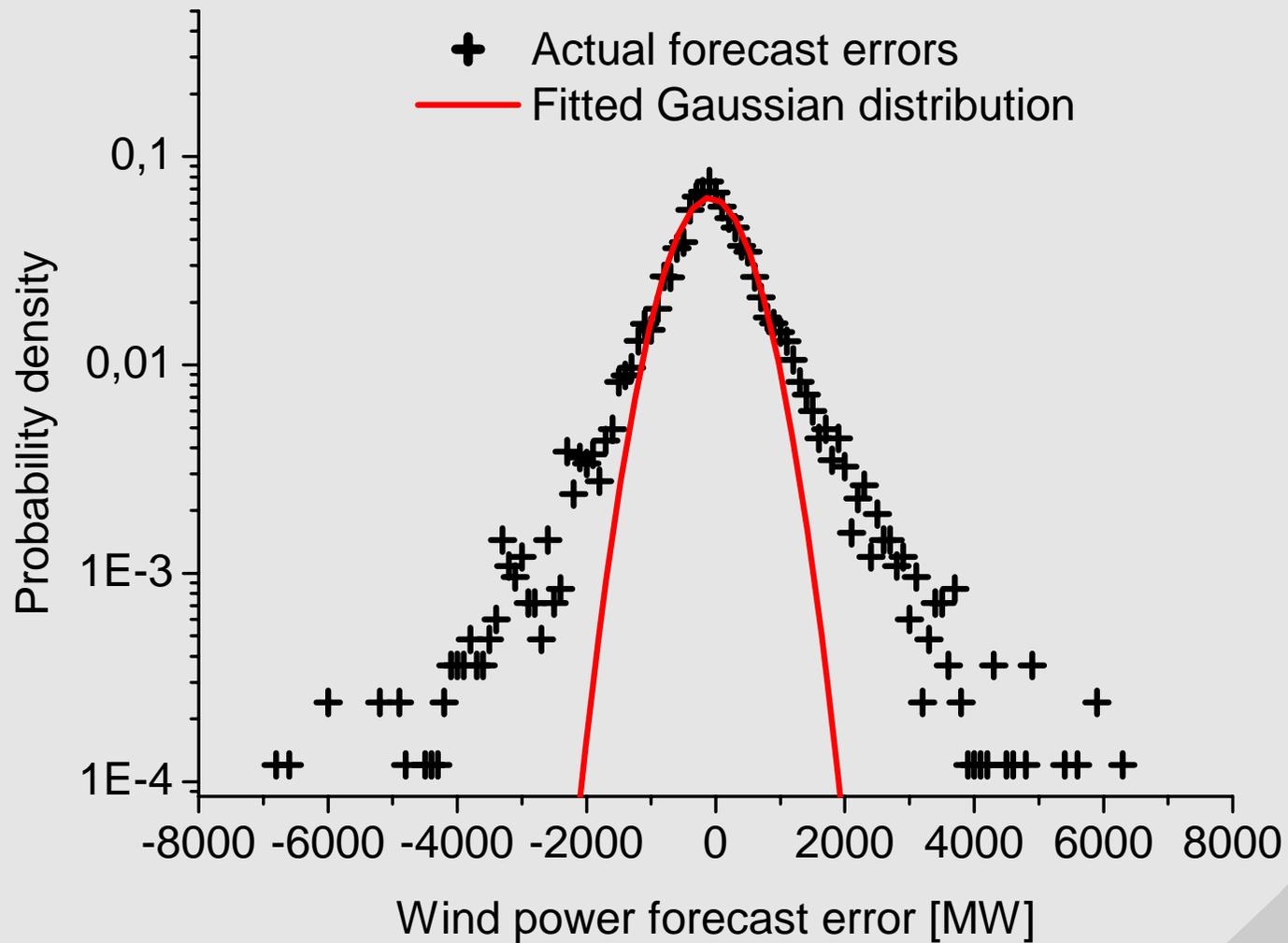
# Vorhersagegenauigkeit

## Häufigkeitsverteilung des Prognosefehlers



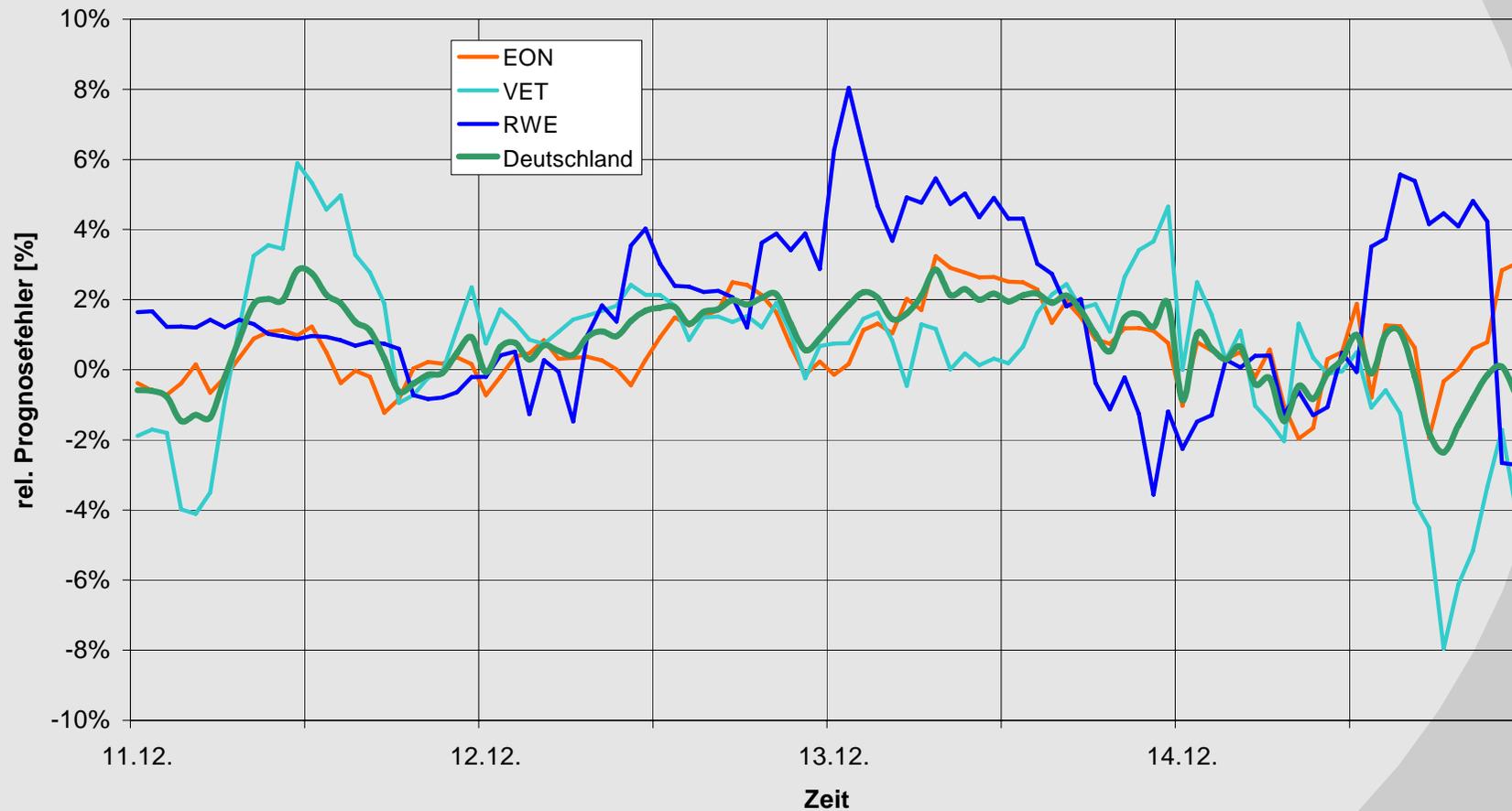
## Vorhersagegenauigkeit

### Prognosefehler hat keine Normalverteilung !



# Vorhersagegenauigkeit

## Verringerung des Prognosefehlers durch Vergleichmäßigung



Folgetagsprognose		Deutschland	RWE
RMSE/installierte Leistung	[%]	5.72%	6.83%
Korrelationskoeffizient	[-]	0.955	0.933
RMSE/mittlere Leistung	[%]	29.66%	37.67%
Installierte Leistung	[MW]	15357	2760
Mittlere Leistung	[MW]	2973	503

## Anwendung

---

**In Deutschland sind die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) für den Ausgleich der Windenergie zuständig**

**Die Windleistung wird als konstantes Band an die Energiehändler abgegeben**

**Die Differenz zur tatsächlichen Leistung wird durch Kauf und Verkauf ausgeglichen**

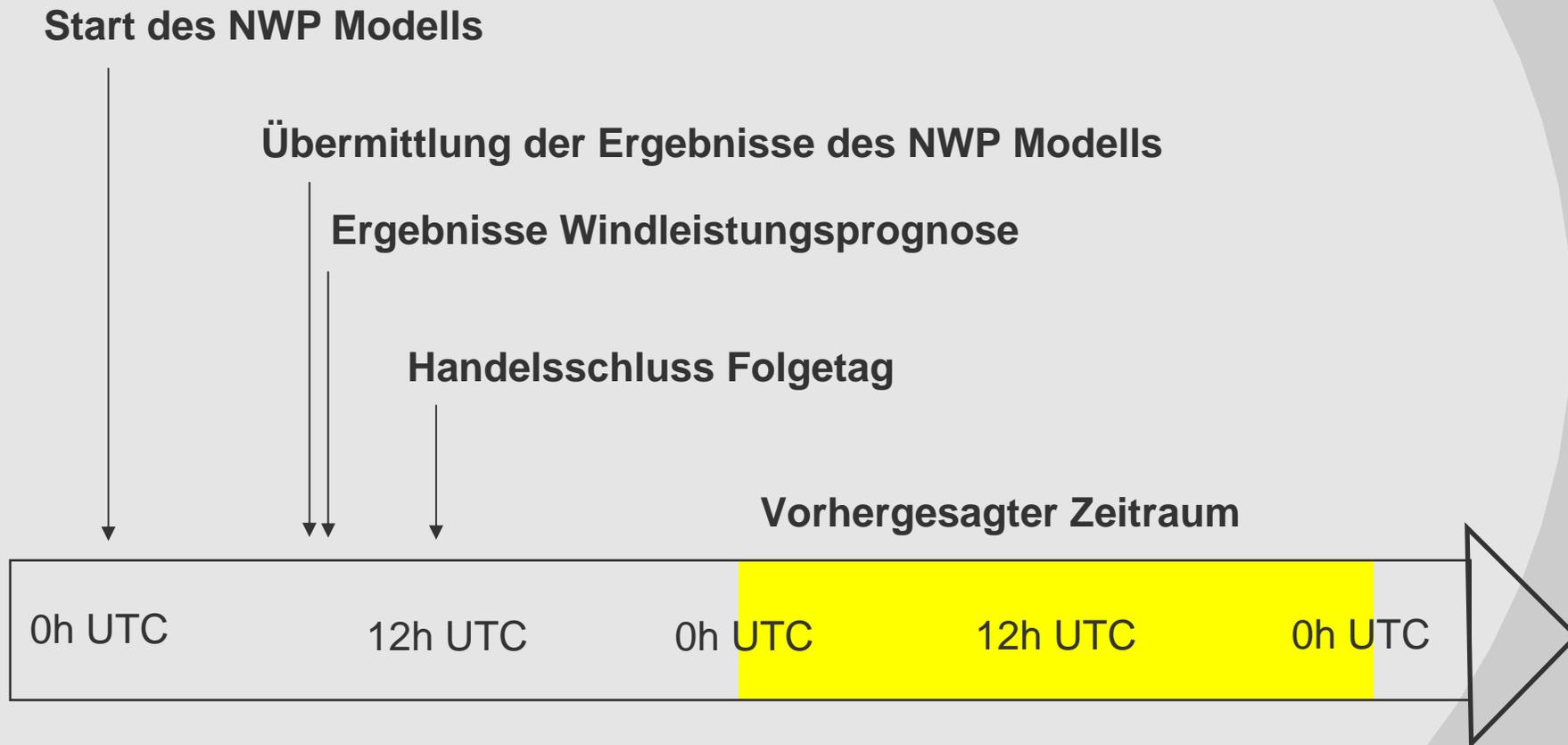
- Am Vortag: Energie-Spotmarkt
- Bis zu einer Stunde im Voraus: Untertägiger Handel
- Aktuelle Erzeugung: Regelenergie

**Benötigte Regelenergie = Vorhersagefehler**

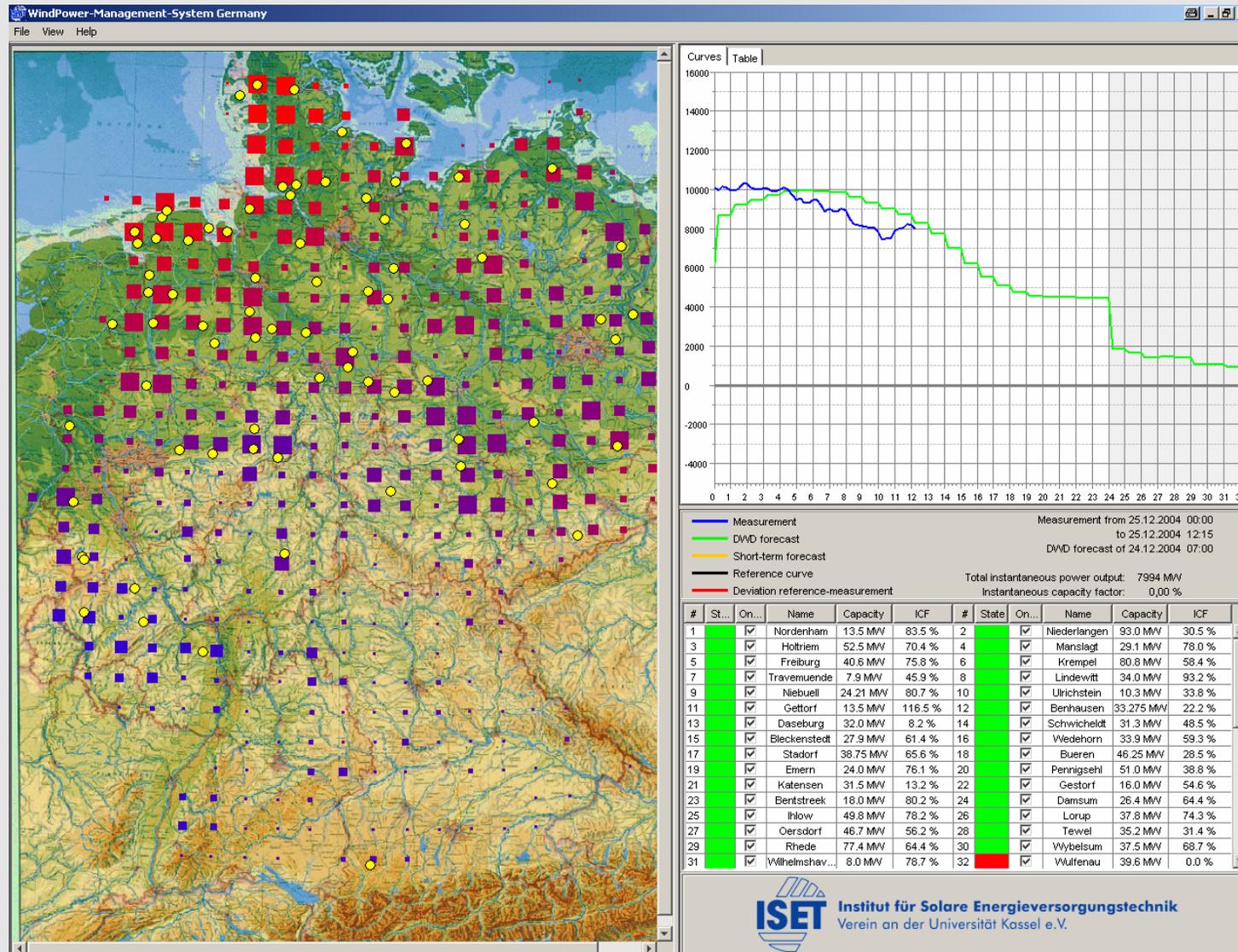
**Benötigte Reserveleistung = Maximaler Vorhersagefehler**

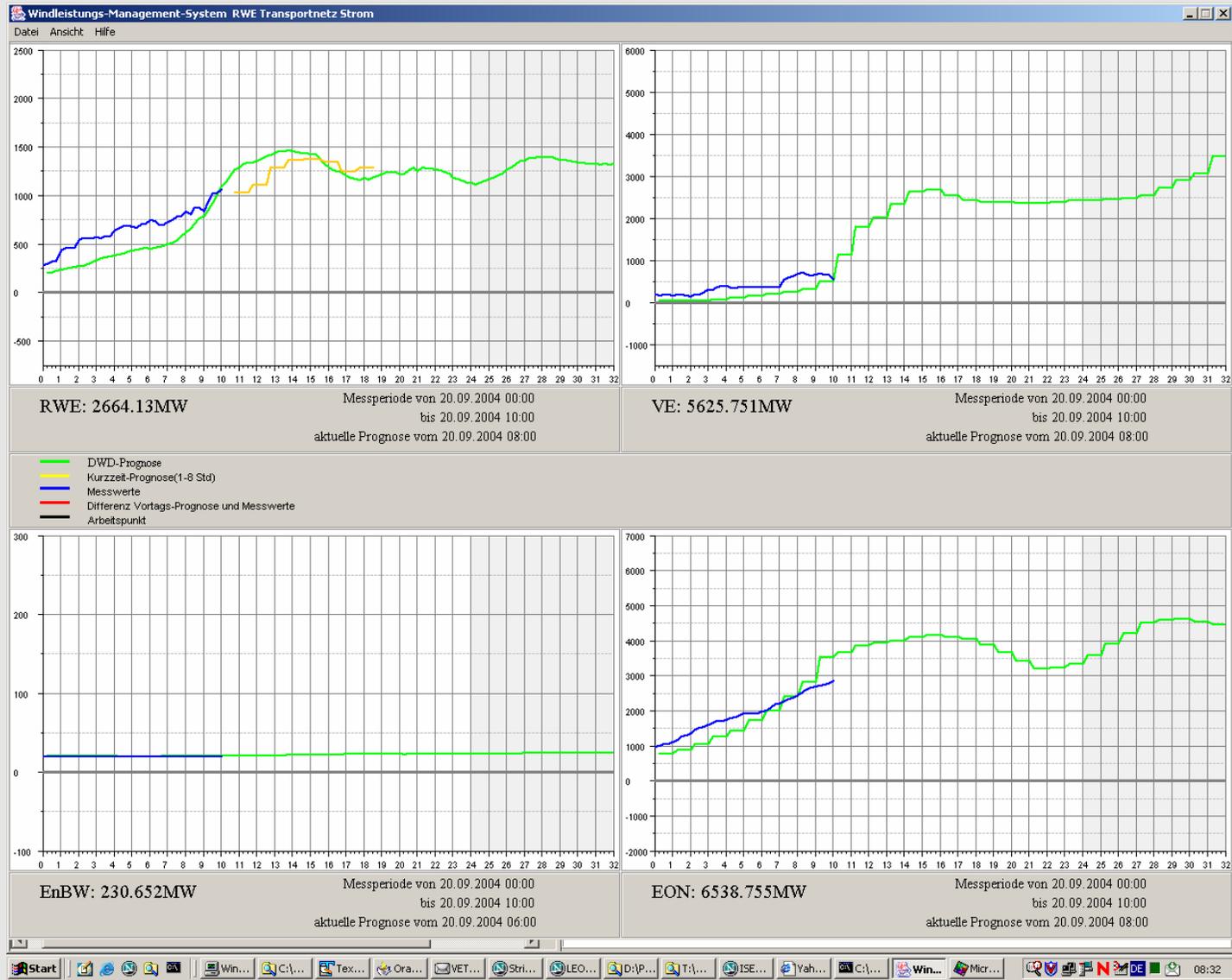
# Anwendung

## Zeitlicher Ablauf



# Anwendung





## Anwendung

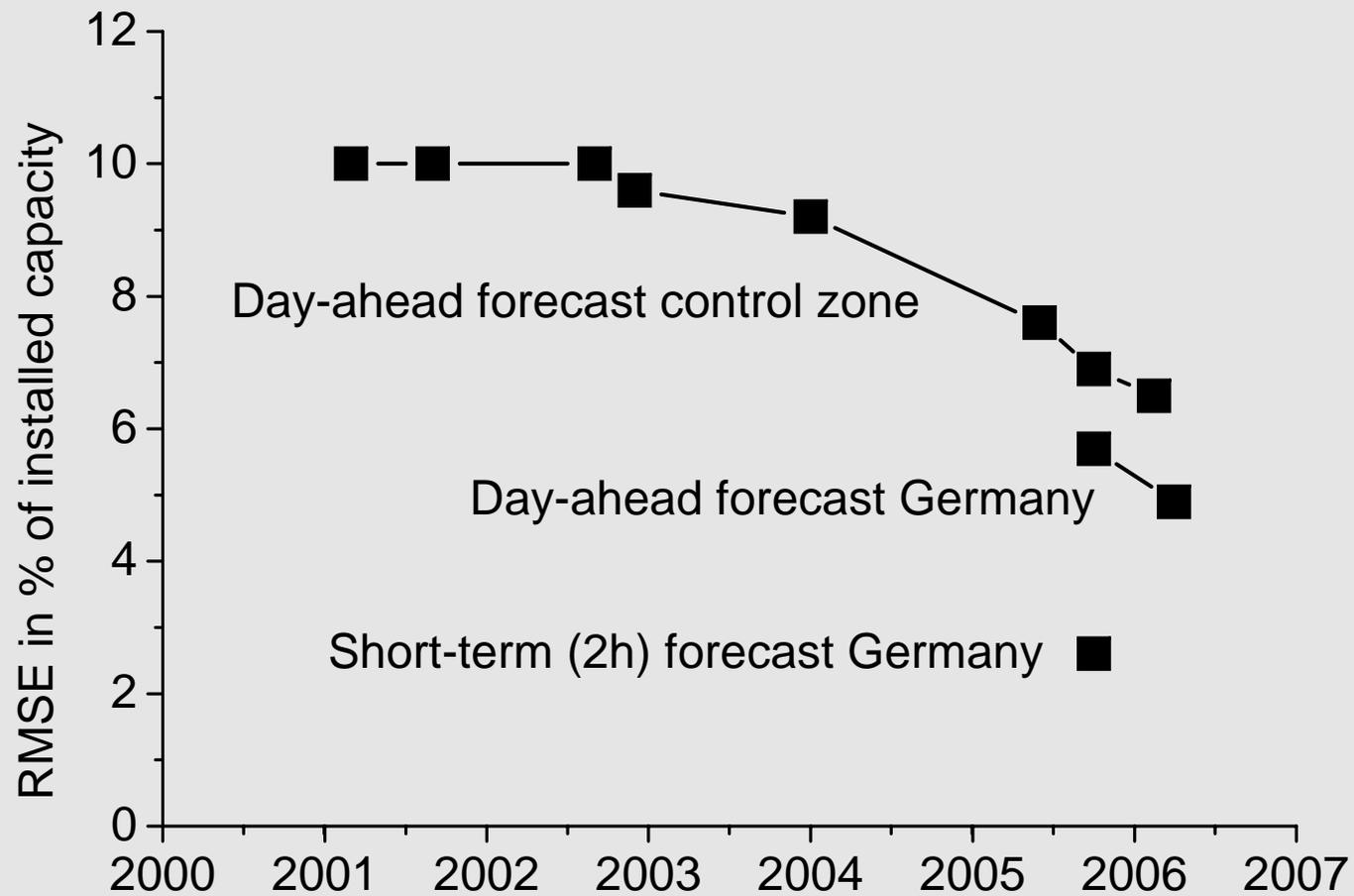
### Operationeller Betrieb des WPMS (Wind Power Management System)

- E.ON Netz GmbH: seit Juli 2001
- RWE Transportnetz Strom GmbH: seit Mai 2003
- Vattenfall Europe Transmission GmbH: seit Dezember 2003
- EnBW Transportnetz: im Aufbau
- TERNA (Italien): im Probebetrieb
- Verbund (Österreich): im Probebetrieb



## Anwendung

### Entwicklung der Vorhersagegenauigkeit



## Ausblick

---

### Ausblick

- Weitere Verbesserung der Prognosegenauigkeit
- Netzknotenscharfe Prognosen
- Kurzfristprognose mit Online-Windmessungen
- Spezielle Offshore-Windleistungsprognose

## **Zusammenfassung Windleistungsprognose**

---

**Ziel: Reduzierung Regelenergie- und Reserveleistungsbedarf**

**Input: Wetterprognose aus NWP Modell,  
für Kurzfristprognose zusätzlich Leistungsmessungen**

**Verschiedene Methoden zur Leistungsvorhersage**

**Folgetags- und Kurzfristprognose mit unterschiedlichem Input und  
Anwendungsgebiet**

**Genauigkeit hängt von Vorhersagehorizont und Gebietsgröße ab**

**Windleistungsprognose ist bei Übertragungsnetzbetreibern  
operationell im Einsatz und für Netzführung unverzichtbar**



**Vielen Dank für Ihr Interesse!**

**[www.iset.uni-kassel.de](http://www.iset.uni-kassel.de)**