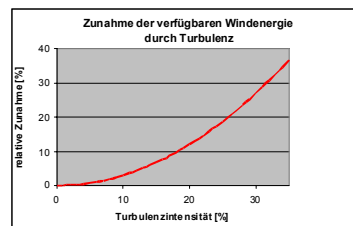


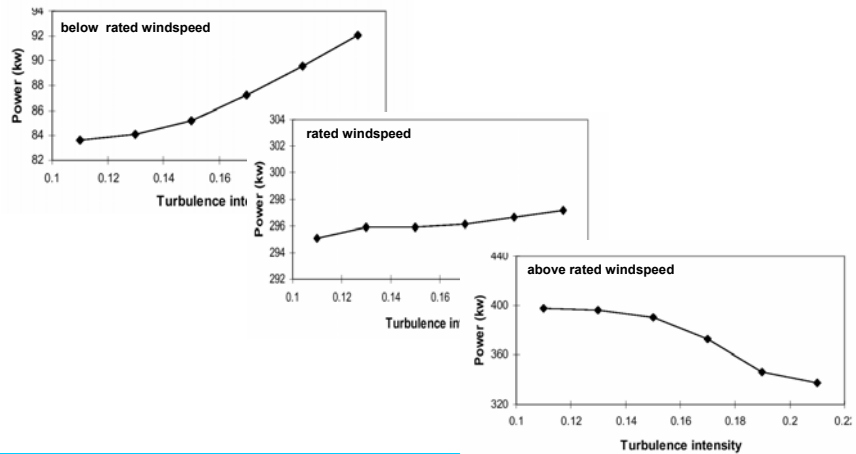
1. Mechanische Belastungen >> Standfestigkeit; Lebensdauer
2. Einfluß auf den Energieertrag >> Energieinhalt des Windes, Parkverluste

Verfügbare Leistungsdichte:

$$\bar{E} \approx \frac{1}{2} \rho \cdot \bar{v}^3 (1 + 3i^2)$$



### Leistung einer WEA (stall) in Abh. von der Turbulenzintensität



### Standesicherheit und Lebensdauer

- IEC 61400-1 (Edition 2, Edition 3) >> Zertifizierung
- DIBt-Richtlinie (2004) >> Genehmigung
- EWTS, DR
- BImSchG >> Lebensdauer

### AK Turbulenz des StUA Schleswig

- Vorliegende Turbulenzgutachten weisen nicht tolerable Abweichungen auf
- Bestätigt durch Ringversuch der Teilnehmer
  - >> Turbulenzintensität zu 12 – 24 % berechnet
- Turbulenz im Nachlauf der WEA
- Natürliche Umgebungsturbulenz

### AK Umgebungsturbulenz beim Windgutachterbeirat des BWE

- Definition von Mindeststandards
- Methoden zur Berechnung der Umgebungsturbulenz

momentane Wind:  $\vec{v}(t) = (u, v, w)$

Horizontalwind:  $u_h(t) = (u, v)$

Mittelbildung:  $u_h(t) = \bar{u}_{\text{10min}} + u'(t)$

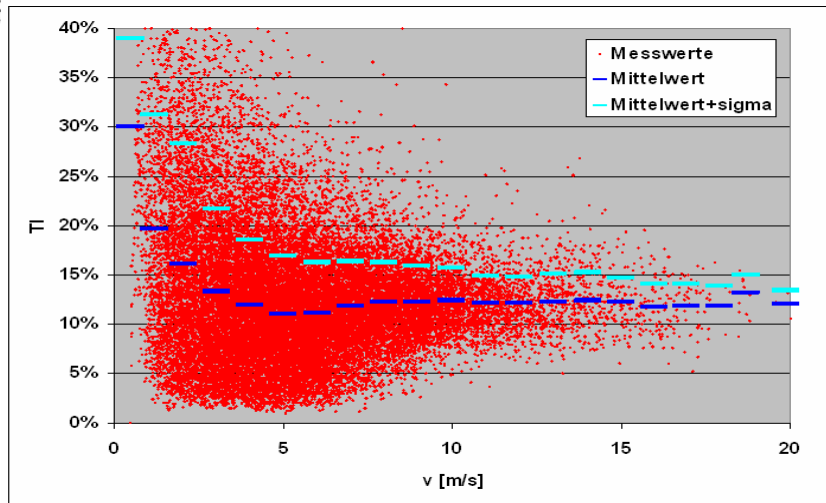
Maßzahlen zur Beschreibung der Turbulenz:

- Standardabweichung:  $\sigma_u^2 = \overline{u'^2}$  etc.
- Turbulenzenergie:  $\bar{e} = \frac{1}{2} \rho \cdot (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})^{\frac{1}{2}}$
- Turbulenzintensität:  $I_m = \frac{\sigma_h}{u_h}$
- Charakteristische Turbulenz:  $I_{\text{char}} = I_m + \sigma(I_m)$

weitere Begriffe: Bögigkeit, maximale Böe, Jahrhundertböe, Häufigkeitsverteilung, Richtungsverteilung, Spektrum, höhere Momente, Extremwertstatistik, Kohärenz, Längenskala etc.

- **Mittlere Turbulenz, repräsentative Turbulenz, effektive Turbulenz, Auslegungsturbulenz**

## Turbulenzintensität



## Einflussfaktoren

- Höhe über Grund
- Oberflächenrauigkeit
- Räumliche Inhomogenität
- Transport
- Hindernisse, Wald
- Orographische Effekte
- Zeitabhängigkeit
- Thermische Schichtung >> Klima
- Meteorologische Bedingungen >> Klima

- **Messtechnik**
- **Auswertung**
- **Vertikale Extrapolation**
- **Räumliche und zeitliche Repräsentativität**

- **Empirische Modelle (Ähnlichkeitsansätze, Analogien)**
- **Lineare Modelle (WasP-Engineering)**
- **CFD-Modelle (Navier-Stokes-Gl.)**
  - **Explizite Simulation**
  - **Grobstruktursimulation**
  - **Reynoldsmodele (TKE,  $k$ - $\epsilon$  Modelle)**
  - **(z.B. FITNAH, WindSim)**

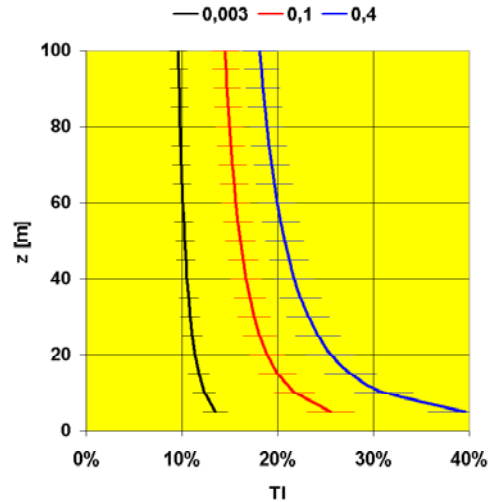
## Berechnung der Turbulenzintensität in horizontal homogenem Gelände

### Logarithmusformel !!!!

- bodennahe Schicht
- Ebenes Gelände
- Keine Rauigkeitswechsel
- Keine Schichtungseinflüsse
- Keine Hindernisse

$$TI = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

TI: mittl. Turbulenzintensität  
z: Höhe über Grund  
Z0: Rauigkeitslänge



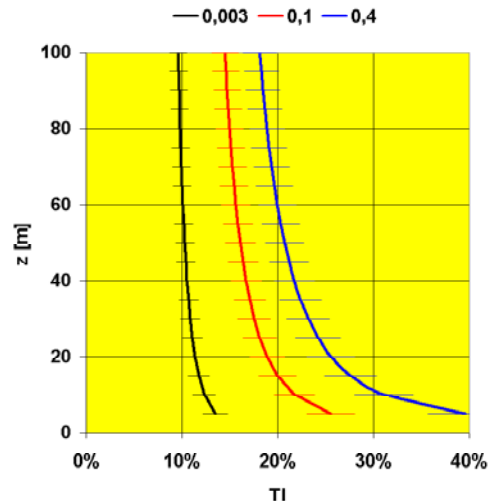
## Berechnung der Turbulenzintensität in horizontal homogenem Gelände

### Logarithmusformel !!!!

- bodennahe Schicht
- Ebenes Gelände
- Keine Rauigkeitswechsel
- Keine Schichtungseinflüsse
- Keine Hindernisse

$$TI = c \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

TI: mittl. Turbulenzintensität  
z: Höhe über Grund  
Z0: Rauigkeitslänge  
c: empirische Konstante  
c = (0,72) 0,9 – 1,1

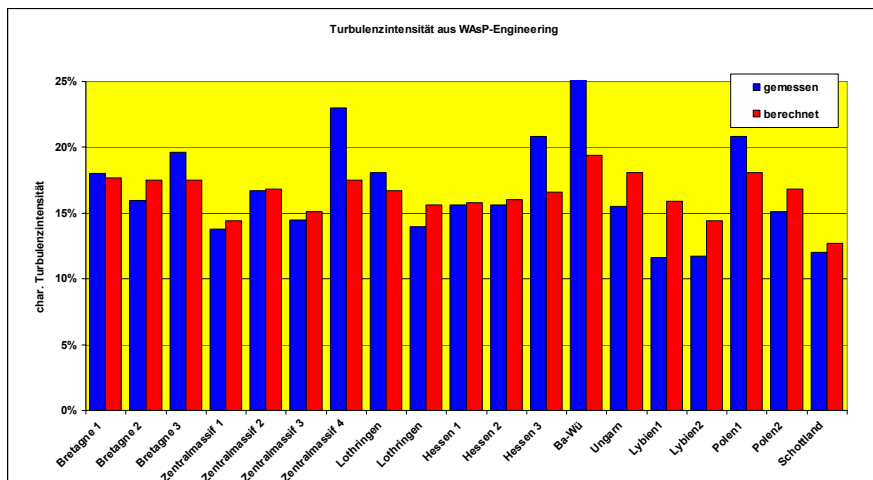


### Berücksichtigung von:

- Räumlich inhomogener Rauigkeit
- Orographischen Effekten

### Eigenschaften

- Lineares Strömungsmodell
- Spektrales Turbulenzmodell
- Moderate (lineare) Störungen des Geschwindigkeitstensors
- Rapid distortion Theory (Orographie)
- Højstrup (1981) > interne (log.) Grenzschichten nach Rauigkeitswechseln
- Keine Thermodynamik
- Keine Hindernisse



- umfangreiche Physik
- Genauigkeit, Validierung
- Aufwand, Handhabung
- Verfügbarkeit
- Know how

- Begriffsdefinitionen
- „Logarithmus-Formel“ ist ungenügend
- Welches Modell anwendbar ist bleibt unbeantwortet  
(Genauigkeit vs. Aufwand)
- Berechnungsmodelle nicht ungeprüft anwenden
- Validierung mit unabhängigen Daten erforderlich
- Know-how Transfer von Meteorologie zur Windenergie



- **Große Nabenhöhen**
- **Wald**
- **Hindernisse**
- **Steile Kanten**
- **Thermische Schichtung**

- **das perfekte Modell ist nicht erforderlich**
- **Standicherheit präferiert konservative Ansätze**
- **Weiterer Ausbau der Windenergie erfordert aber  
möglichst wenig konservative Ansätze**