



Hochschule für Technik  
und Wirtschaft Berlin

University of Applied Sciences

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Wilhelminenhofstraße 75A, 12459 Berlin

Fachbereich 1

Ingenieurwissenschaften - Energie und Information

Regenerative Energien (B)

## Windversuch vom 26.05.2023

*Betreuerin: Joachim Twele*

*Gruppe: 5*

Name	Matrikelnummer
Johannes Tadeus Ranisch	578182
Markus Jablonka	580234
Niels Feuerherdt	577669
Katharina Jacob	578522
Lukas Aust	574051

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Versuchsziele</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretischer Hintergrund</b>	<b>1</b>
2.1	Der Leistungsbeiwert $c_P$ . . . . .	1
2.2	Der Momentenbeiwert $c_M$ . . . . .	2
2.3	Der Schubbeiwert $c_S$ . . . . .	2
2.4	Verzögerung der Windgeschwindigkeit . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Versuchsbeschreibung</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Vorbereitungsfragen</b>	<b>4</b>
4.1	Wozu wird der Leistungsbeiwert $c_P$ in der Praxis benötigt? . . . . .	4
4.2	Leiten Sie den theoretisch maximalen Wert des Leistungsbeiwerts $c_P$ her. . . . .	4
4.3	Geben Sie Abschätzungen für den Schubbeiwert $c_S$ im Stillstand und bei Leer- laufdrehzahl an und begründen Sie diese. . . . .	5
4.4	Wozu wird der Momentenbeiwert $c_M$ in der Praxis benötigt? . . . . .	5
4.5	Wozu wird der Schubbeiwert $c_S$ in der Praxis benötigt? . . . . .	5
4.6	Leiten Sie den Wert des Schubbeiwerts $c_S$ für die Auslegungsschnelllaufzahl $\lambda$ her. . . . .	5
<b>5</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>5</b>
<b>6</b>	<b>Auswertung</b>	<b>6</b>
6.1	Anlaufverhalten . . . . .	6
6.2	Leerlauf und Maximale Schnelllaufzahl . . . . .	6
6.3	Dimensionslose Kennzahlen . . . . .	6
<b>7</b>	<b>Quellen</b>	<b>7</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Berechnete Leistungsbeiwerte $c_P$ des Rotors der Labor-Windkraftanlage in Abhängigkeit der Schnelllaufzahl $\lambda$ für unterschiedliche Blatt (Pitch-)Winkel.[1]	1
2	Berechnete Momentenbeiwert $c_M$ des Rotors der Labor-Windkraftanlage in Abhängigkeit der Schnelllaufzahl $\lambda$ für unterschiedliche Blatt (Pitch-)Winkel.[1]	2
3	Berechneter Schubbeiwert $c_s$ des Rotors der Labor-Windkraftanlage in Abhängigkeit der Schnelllaufzahl $\lambda$ für unterschiedliche Blatt (Pitch-)Winkel.[1]	3
4	Verzögerung in der geschlossenen Stromröhre nach Betz $v_1 \cdot \frac{1}{3} = v_3$ und $v_1 \cdot \frac{2}{3} = v_2$ [1]	3
5	Verzögerung in der geschlossenen Stromröhre nach Betz $v_1 \cdot \frac{1}{3} = v_3$ und $v_1 \cdot \frac{2}{3} = v_2$ [1]	3
6	Frontansicht der Rotorblätter des Versuchsaufbaus	4

## Tabellenverzeichnis

## 1 Versuchsziele

Im Rahmen des Versuchs werden Verschiedene Charakteristika der Windkraftanlage untersucht. Als erstes wird das Anlaufverhalten des Rotors in Abhängigkeit vom Blattwinkel (Pitch) untersucht. Anschließend werden weitere Messungen gemacht mit denen die Dimensionslosen Kennzahlen und die maximale Schnellaufzahl der Windkraftanlage bestimmt werden kann.

## 2 Theoretischer Hintergrund

Um den theoretischen Hintergrund dieses Versuchs verstehen zu können, wird im folgenden auf den Leistungsbeiwert  $c_p$ , den Momentenbeiwert  $c_m$  und den Schubbeiwert  $c_s$  eingegangen. Abschließend wird noch auf die Windgeschwindigkeiten und deren Verzögerung eingegangen.

### 2.1 Der Leistungsbeiwert $c_p$

Der Leistungsbeiwert  $c_p$  ist wie folgt definiert.

$$c_p = \frac{P_{WEA}}{P_{Wind}} \quad (1)$$

$$c_p = \frac{M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{Rotor}}{\frac{\rho_{Luft}}{2} \cdot \pi \cdot \frac{d_{Rotor}^2}{4} \cdot v_{Wind}^3} \quad (2)$$

Wie in Gleichung 1 zu sehen bildet sich  $c_p$  aus dem Quotienten der Mechanischen- und der Windleistung. In Gleichung 2 ist dabei zu sehen wie  $c_p$  von Anlagenspezifischen Eigenschaften beeinflusst wird. Typischerweise wird der Leistungsbeiwert  $c_p$  dabei über die Schnellaufzahl  $\lambda$  aufgetragen. Dabei bildet die Schnellaufzahl das Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit an der Blattspitze  $u_{tip}$  zur ungestörten Windgeschwindigkeit ab, wie in Formel 3 zu sehen.

$$\lambda = \frac{u_{tip}}{v_{Wind}} = \frac{\pi \cdot n_{Rotor} \cdot d_{Rotor}}{v_{Wind}} \quad (3)$$

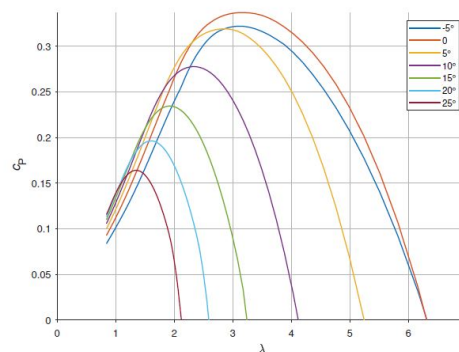


Abbildung 1: Berechnete Leistungsbeiwerte  $c_p$  des Rotors der Labor-Windkraftanlage in Abhängigkeit der Schnellaufzahl  $\lambda$  für unterschiedliche Blatt (Pitch-)Winkel.[1]

## 2.2 Der Momentenbeiwert $c_M$

Der Momentenbeiwert beschreibt das Betriebsverhalten des Rotors bezüglich der Drehmomentabgabe, mit dessen Hilfe sich eine Aussage über das Anlaufverhalten aus dem Stillstand machen lässt. Dabei ergibt er sich aus dem Verhältnis des abgegebenen Drehmoments zum Luftkraftmoment, dass auf die Rotorfläche wirkt.

$$c_M = \frac{M}{\frac{\rho_{Luft}}{2} \cdot \pi \cdot \frac{d_{Rotor}^3}{8} \cdot v_{Wind}^2} \quad (4)$$

Des Weiteren gilt der Zusammenhang:

$$c_M = c_p \cdot \lambda \quad (5)$$

Bei Schnellläufern ist der Momentenbeiwert beim Anlaufen sehr gering. Dies ist Bauartspezifisch bei Schnellläufern und in Abbildung 2 zu sehen.

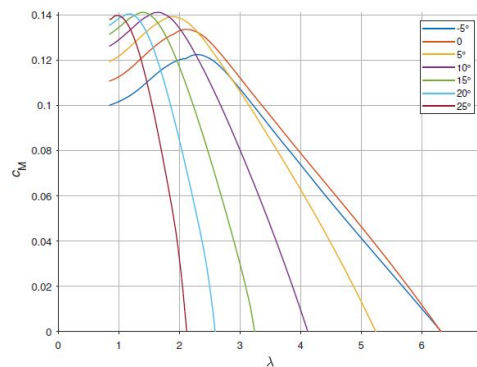


Abbildung 2: Berechnete Momentenbeiwert  $c_M$  des Rotors der Labor-Windkraftanlage in Abhängigkeit der Schnelllaufzahl  $\lambda$  für unterschiedliche Blatt (Pitch-)Winkel.[1]

## 2.3 Der Schubbeiwert $c_S$

Der Schubbeiwert  $c_s$  ist sehr wichtig um die Windkraftanlage strukturellmechanisch zu dimensionieren. Dabei ergibt der Schubbeiwert aus der dynamischen Staukraft auf die Rotorfläche.

$$c_s = \frac{F_S}{\frac{\rho_{Luft}}{2} \cdot \pi \cdot \frac{d_{Rotor}^2}{4} \cdot v_{Wind}^2} \quad (6)$$

Der Schubbeiwert hat sein Minimum im Stillstand und sein Maximum im Leerlauf. Hier entspricht der Widerstandsbeiwert etwa dem einer Scheibe. Höhere Schubbeiwerte bedeuten, dass sie die Windkraftanlage im Propellerbetrieb befindet.[1]

## 2.4 Verzögerung der Windgeschwindigkeit

Wie von Betz beschrieben liegt der optimale Arbeitspunkt einer Windkraftanlage bei einem Verhältnis von  $v_1 \cdot \frac{1}{3} = v_3$  (Abbildung 4). Dabei ist in Abbildung 5 noch die Erweiterung von Glauert zu sehen, der die maximale Verblockung der Stromröhre im Leerlauf als Grenzfall berücksichtigt.



Abbildung 3: Berechneter Schubbeiwert  $c_s$  des Rotors der Labor-Windkraftanlage in Abhängigkeit der Schnelllaufzahl  $\lambda$  für unterschiedliche Blatt (Pitch-)Winkel.[1]



Abbildung 4: Verzögerung in der geschlossenen Stromröhre nach Betz  $v_1 \cdot \frac{1}{3} = v_3$  und  $v_1 \cdot \frac{2}{3} = v_2$  [1]

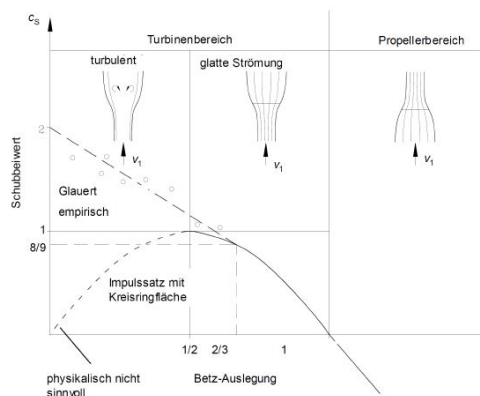


Abbildung 5: Verzögerung in der geschlossenen Stromröhre nach Betz  $v_1 \cdot \frac{1}{3} = v_3$  und  $v_1 \cdot \frac{2}{3} = v_2$ [1]

### 3 Versuchsbeschreibung



Abbildung 6: Frontansicht der Rotorblätter des Versuchsaufbaus

## 4 Vorbereitungsfragen

### 4.1 Wozu wird der Leistungsbeiwert $c_P$ in der Praxis benötigt?

Der Leistungsbeiwert  $c_P$  ist der tatsächliche Anteil der Energie des Windes, der in mechanische Energie umgesetzt werden kann und beschreibt den Wirkungsgrad einer Wind-Energie-Anlage. Er wird nach Gleichung 1 oder Gleichung 2 bestimmt und ist, wie in 2 erkennbar von den anlagenspezifischen Eigenschaften beeinflusst.

### 4.2 Leiten Sie den theoretisch maximalen Wert des Leistungsbeiwerts $c_P$ her.

Der maximale Leistungsbeiwert, auch Betz'scher Leistungsbeiwert, von knapp 60% wird wie folgt bestimmt.

$$P_{WKA} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_2 \cdot (v_1^2 - v_3^2) \quad (7)$$

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (8)$$

In 7 wird durch 8  $v_2$  eliminiert, wodurch diese dann klar als die **Leistung des Windes mit dem Leistungsbeiwert** erkennbar ist.

$$P_{WKA} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{v_3^2}{v_1^2} + \frac{v_3}{v_1} - \frac{v_3^3}{v_1^3} \right) \quad (9)$$

Unter der Annahme das  $x = \frac{v_3}{v_1}$  entspricht, entsteht eine einfache Quadratische (Gleichung 10). Diese Wird abgeleitet um Lokale Extrempunkte zu bestimmen (Gleichung 11).

$$c_{P,MAX} = \frac{1}{2} \cdot (1 - x^2 + x - x^3) \quad (10)$$

$$c_{P,MAX} = \frac{1}{2} \cdot (-3x^2 - 2x + 1) \quad (11)$$

Die Extrempunkte  $x_{1/2} = \frac{1}{3}, -1$   $c_{P,MAX}(\frac{1}{3}) = 0,59 = 59\%$

#### 4.3 Geben Sie Abschätzungen für den Schubbeiwert $c_S$ im Stillstand und bei Leerlaufdrehzahl an und begründen Sie diese.

Der Schubbeiwert steigt mit der Schnellaufzahl  $\lambda$  stetig an (3). Die schmalen Flügel der Windkraftanlage lassen im Stillstand den Wind fast ungehindert durch die Rotorebene strömen weshalb auch der Schubbeiwert sehr klein ist. Steigt die Schnellaufzahl steigt auch der Schubbeiwert und erreicht im Leerlauf sein Maximum was bei ungefähr 1,25 liegt und dem Widerstandsbeiwert einer geschlossenen Kreisscheibe entspricht.

#### 4.4 Wozu wird der Momentenbeiwert $c_M$ in der Praxis benötigt?

Der Momentenbeiwert beschreibt die aerodynamische Kräfte die auf den Rotor der Windkraftanlage wirken und ein Drehmoment erzeugen. Er wird zur Auslegung der Rotorblätter genutzt und beeinflusst Geometrie und Profilform. Genau wie der Schubbeiwert ist er wichtig für die Sicherheit und Stabilität der Anlage.

#### 4.5 Wozu wird der Schubbeiwert $c_S$ in der Praxis benötigt?

Der Schubbeiwert einer Windkraftanlage ist relevant für die Leistungsberechnung, Auslegung der Anlagen, Steuerung und Regelung als auch für die Lastberechnung und strukturelle Integrität einer Windkraftanlage.

#### 4.6 Leiten Sie den Wert des Schubbeiwerts $c_S$ für die Auslegungsschnellaufzahl $\lambda$ her.

## 5 Versuchsdurchführung



## **6 Auswertung**

### **6.1 Anlaufverhalten**

### **6.2 Leerlauf und Maximale Schnelllaufzahl**

### **6.3 Dimensionslose Kennzahlen**

## 7 Quellen

### Literatur

- [1] Versuchsanleitung: Windlabor. [https://moodle.htw-berlin.de/pluginfile.php/1791608/mod\\_resource/content/0/Windlab\\_2\\_Laboranleitung\\_230523.pdf](https://moodle.htw-berlin.de/pluginfile.php/1791608/mod_resource/content/0/Windlab_2_Laboranleitung_230523.pdf). Accessed 29.05.2023-11:32.