



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>6</b>
4.1	Wozu wird der Leistungsbeiwert $c_P$ in der Praxis benötigt? . . . . .	6
4.2	Leiten Sie den theoretisch maximalen Wert des Leistungsbeiwerts $c_P$ her. . . . .	6
4.3	Geben Sie Abschätzungen für den Schubbeiwert $c_S$ im Stillstand und bei Leer- laufdrehzahl an und begründen Sie diese. . . . .	6
4.4	Wozu wird der Momentenbeiwert $c_M$ in der Praxis benötigt? . . . . .	6
4.5	Wozu wird der Schubbeiwert $c_S$ in der Praxis benötigt? . . . . .	7
4.6	Leiten Sie den Wert des Schubbeiwerts $c_S$ für die Auslegungsschnelllaufzahl $\lambda$ her. . . . .	7
<b>5</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>Auswertung</b>	<b>9</b>
6.1	Anlaufverhalten . . . . .	9
6.2	Leerlauf und Maximale Schnelllaufzahl . . . . .	9
6.3	Dimensionslose Kennzahlen . . . . .	9
<b>7</b>	<b>Quellen</b>	<b>11</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
7	Draufsicht auf die Achse	5
8	Messaufbau Übersicht	5
9	Laststeuerung	5

## Tabellenverzeichnis

1	Kenndaten des Modellrotors	4
2	Messwerte	9
3	Messwerte Leerlaufverhalten und maximale Schnelllaufzahl	9

## 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.

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

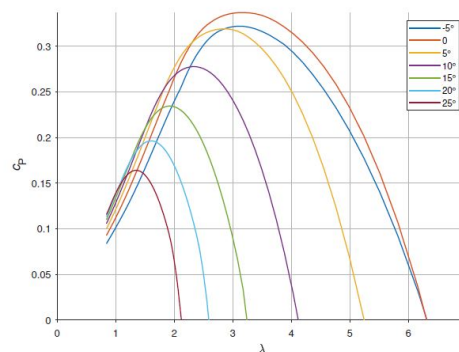


Abbildung 1: Berechnete Leistungsbeiwerte  $c_p$  des Rotors der Labor-Windkraftanlage in Abhängigkeit der Schnellaufzahl  $\lambda$  für unterschiedliche Blatt (Pitch-)Winkel.[1]

## 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.

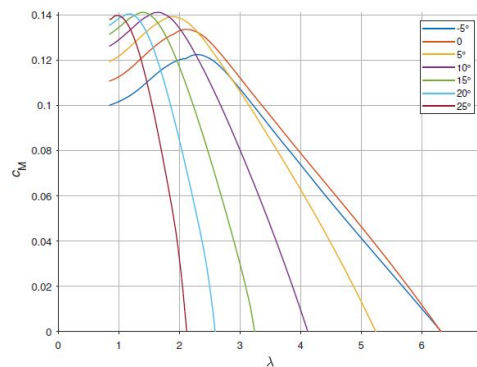


Abbildung 2: Berechnete Momentenbeiwert  $c_M$  des Rotors der Labor-Windkraftanlage in Abhängigkeit der Schnelllaufzahl  $\lambda$  für unterschiedliche Blatt (Pitch-)Winkel.[1]

## 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]

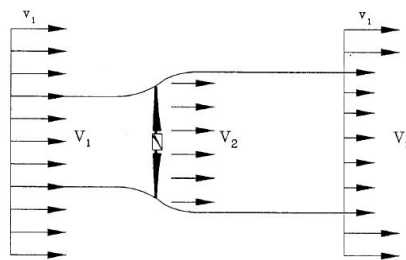


Abbildung 4: Verzögerung in der geschlossenen Stromröhre nach Betz  $v_1 \cdot \frac{1}{3} = v_3$  und  $v_1 \cdot \frac{2}{3} = v_2$  [1]

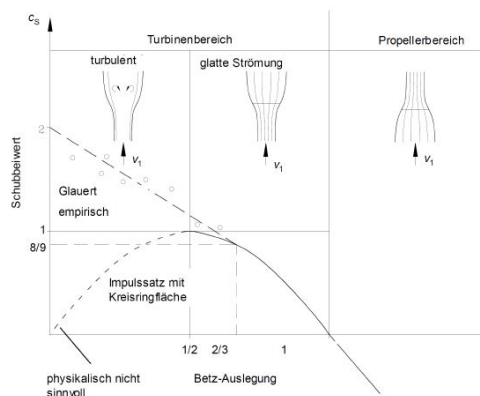


Abbildung 5: Verzögerung in der geschlossenen Stromröhre nach Betz  $v_1 \cdot \frac{1}{3} = v_3$  und  $v_1 \cdot \frac{2}{3} = v_2$ [1]

### 3 Versuchsbeschreibung

Der Versuch wird an dem im Folgenden beschriebenen Aufbau durchgeführt.

Mittelpunkt des Prüfstandes ist im Windkanal des Labors platzierte Modellrotor, welcher in Abbildung 6 zu sehen ist. Die Kenndaten des Rotors sind in Tabelle 1 zusammengefasst.



Abbildung 6: Frontansicht der Rotorblätter des Versuchsaufbaus

	Symbol	Wert	Einheit
Rotordurchmesser	$d_{Rotor}$	340	mm
Auslegungsschnelllaufzahl	$\lambda_A$	3	
Nabenhöhe	$h_N$	730	mm
Hebelarm Schubmessung	l	467	mm
Profil: Wortmann FX63			

Tabelle 1: Kenndaten des Modellrotors

Der Rotor ist über eine Achse mit einem Gleichstrom-Generator gekoppelt und betreibt diesen. Um alle zu betrachtenden Daten zu erhalten sind auf der Achse ein Reflektor für die Drehzahlmessung und an der Lagerung der Achse ein Drehmomentsensor verbaut. Der gesamte Achsaufbau kann aus der Vogelperspektive in Abbildung 7 zu sehen.

Die Einstellung des Pitchwinkels, welche für diesen Versuch entscheidend ist, erfolgt über den



Servomotor des Systems. Diese Einstellung erfolgt händisch über das in Abbildung 9 dargestellte Gerät. Weitere Messeinrichtungen umfassen Prandtlsonden zur Ermittlung der Windgeschwindigkeiten, einen Sensor für alle weiteren Umgebungsbedingungen, sowie den *Kraftsensor KD40S* der Firma *ME-Meßsysteme GmbH*, mit welchem sich die Schubkraft ermitteln lässt. Die in Abbildung 8 zu sehenden Multimeter nehmen dann die Generatorspannung und den Generatorstrom auf.

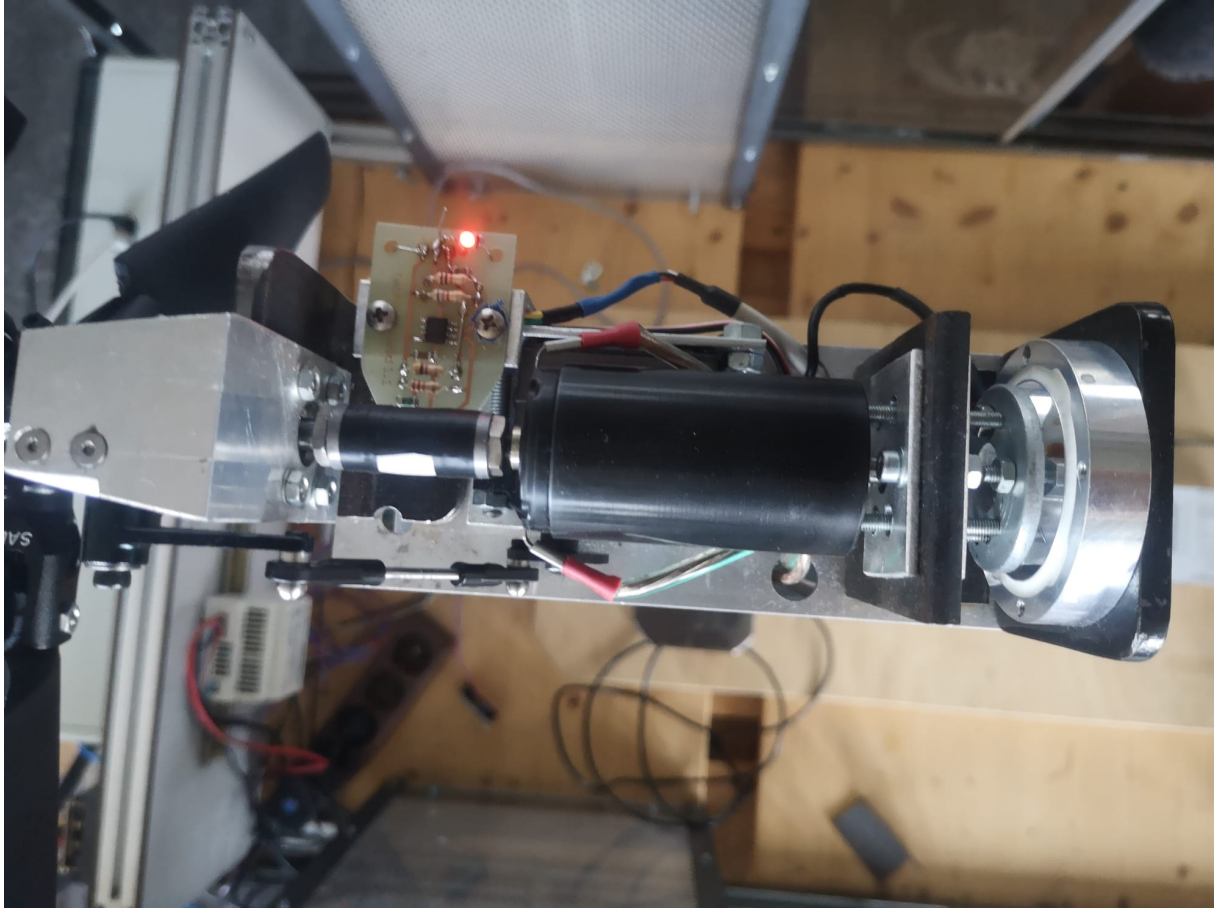


Abbildung 7: Draufsicht auf die Achse



Abbildung 8: Messaufbau Übersicht



Abbildung 9: Laststeuerung



## 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  $x_{1/2} = \frac{1}{3}, -1$   $c_{P,MAX}(\frac{1}{3}) = \frac{16}{27} = 0,59 = 59\%$

### 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 aerodynamischen 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.

Für den Schubbeiwert im Auslegungspunkt wird die Gleichung für die Leistung der WKA (Gleichung 12) mit der Gleichung für den Schubbeiwert (Gleichung 13) im Zusammenhang mit der Leistung in der Rotorebene (Gleichung 14) und der Geschwindigkeit in der Rotorebene nach Betz (Gleichung 15) gleichgesetzt.

$$P_{WKA} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot c_P \quad (12)$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^2 \cdot c_S \quad (13)$$

$$P_R = F \cdot v_2 \quad (14)$$

$$v_R = \frac{2}{3} \cdot v_1 \quad (15)$$

Gleichung 13 und Gleichung 15 werden in Gleichung 14 eingesetzt und mit Gleichung 12 gleichgesetzt.

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot c_P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^2 \cdot c_S \cdot \frac{2}{3} \cdot v_1 \quad (16)$$

Gekürzt und umgestellt ergibt sich für  $c_S$ :

$$c_S = \frac{2}{3} \cdot c_P = \frac{2}{3} \cdot \frac{16}{27} = \frac{8}{9} \quad (17)$$

Der Schubbeiwert  $c_S$  liegt sowohl für Schnell- als auch für Langsamläufer im Auslegungspunkt bei  $\frac{8}{9}$ .

## 5 Versuchsdurchführung

Der erste Teil des Versuchs untersucht das Anlaufverhalten der Windkraftanlage bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten. Es sind dementsprechend Windgeschwindigkeiten von  $1,5 \frac{m}{s}$ ,  $2,0 \frac{m}{s}$ ,  $2,5 \frac{m}{s}$  und  $3,0 \frac{m}{s}$  einzustellen. Bei jeder dieser Windgeschwindigkeiten ist der Pitchwinkel,

beginnend von  $-10^\circ$ , so weit in der positiven Bereich zu regeln, bis der Rotor zu drehen beginnt, der zu diesem Zeitpunkt angezeigte Pitchwinkel ist in der beigefügten Exceltabelle "Windversuch" im Tabellenblatt "Anlaufverhalten" notiert worden.

Im zweiten Versuchsabschnitt ist das Leerlaufverhalten und die maximale Schnelllaufzahl zu betrachten. Hierfür ist der Generator in den Leerlauf geschaltet und der Windkanal auf konstant  $6 \frac{m}{s}$  eingestellt. Der Pitchwinkel ist von  $-5^\circ$  bis auf  $50^\circ$  in  $5^\circ$ -Schritten zu erhöhen. Es sind für jeden Messpunkt die Generatorspannung und die Rotordrehzahl abzulesen. Die Ergebnisse wurden in der bereits erwähnten Tabellenkalkulation im Tabellenblatt "Leerlaufverhalten" zusammengetragen.

Die dritte und letzte Messung dient der Ermittlung der dimensionslosen Kennzahlen. Es sind ein fester Pitchwinkel von  $10^\circ$  und eine Windgeschwindigkeit von  $6,5 \frac{m}{s}$  einzustellen. An den entsprechenden Messpunkten werden mittels Multimetern die Generatorspannung und der Generatorstrom gemessen. Für die Messung der Windgeschwindigkeit, der Rotordrehzahl und des Drehmoments sind die in Abschnitt 3 beschreibenden Messgeräte zu verwenden. Die Messpunkte sind anhand der elektronischen Last gegeben, so ist die Last in 5%-Schritten, beginnend von 0%, soweit zu erhöhen, bis bei der Messung der Generatorspannung über mehrere Messpunkte keine relevante Änderung erkennbar ist. Die abzulesenden Werte sind abschließend im Tabellenblatt "Dimensionslose Kennzahlen" der beigefügten Tabellenkalkulation zusammengetragen.

## 6 Auswertung

### 6.1 Anlaufverhalten

Tabelle 2: Messwerte

v_Wind Soll	v_Wind Ist	Pitch abgelesen	Pitch erwartet	C_M,0	C_M,1
in m/s	in m/s	in °	in °	-	-
1	1	-	-	0,666	0,666
1,5	1,6	45	-	0,296	0,260
2	2,1	32	-	0,167	0,151
2,5	2,45	-5	5 bis 25	0,107	0,111

### 6.2 Leerlauf und Maximale Schnelllaufzahl

Tabelle 3: Messwerte Leerlaufverhalten und maximale Schnelllaufzahl

Pitch	Pitch2	Generator Spannung	Drehzahl	Blattspitzen geschw.	Schnelllaufzahl
soll	berechnet	abgelesen	abgelesen	berechnet	berechnet
in °	in °	in V	in min-1	in m/s	-
-5	-3,51	8,2	2068,7	36,82773876	5,665805963
0	-1,34	9	2272	40,44695822	6,222608957
5	5,45	9,48	2390,9	42,56365863	6,548255173
10	12,17	9,9	2512,5	44,72842541	6,881296216
15	18,01	9,78	2476,1	44,08041956	6,781603009
20	23,24	9,2	2344,8	41,74296991	6,42199537
25	28,22	8,6	2187,5	38,94265894	5,991178298
30	32,81	8	2022,2	35,9999291	5,53845063
35	37,095	7,3	1863,1	33,16757388	5,102703674
40	40,97	6,85	1739,5	30,96720239	4,764184982
45	44,98	6,6	1670,8	29,74418037	4,576027748
50	48,87	6,2	1573,1	28,00488995	4,308444608

$$u = 2\pi \cdot r_{Rotor} \cdot \frac{n}{60 \frac{s}{min}} \quad (18)$$

$$u = 2\pi \cdot 0,17m \cdot \frac{n}{60 \frac{s}{min}}$$

$$\lambda = \frac{u}{v_1} \quad (19)$$

$$\lambda = \frac{u}{6,5 \frac{m}{s}}$$

### 6.3 Dimensionslose Kennzahlen

$$P_{Wind} = \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot r_{Rotor}^2 \cdot v_1^3 \quad (20)$$

$$P_{Wind} = \frac{1,2 \frac{kg}{m^3}}{2} \cdot \pi \cdot (0,17m)^2 \cdot v_1^3$$

$$M_{Gen} = 33,931 \frac{mNm}{mV} \cdot U_{Rotor} + 3,1519mNm - M_{Reibung} \quad (21)$$

$$M_{Gen} = 33,931 \frac{mNm}{mV} \cdot U_{Rotor} + 3,1519mNm - 6,3mNm$$

$$P_{Mech} = M_{Gen} \cdot 2\pi \frac{n}{60 \frac{s}{min}} \quad (22)$$

$$P_{mech} = M_{Gen} \cdot 2\pi \frac{n}{60 \frac{s}{min}}$$

$$c_M = \frac{M_{Gen}}{\frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot r_{Rotor}^3 \cdot v_1^2} \quad (23)$$

$$c_M = \frac{M_{Gen}}{\frac{1,2 \frac{kg}{m^3}}{2} \cdot \pi \cdot (0,17m)^3 \cdot v_1^2}$$

$$P_{El} = U \cdot I \quad (24)$$

$$P_{El} = U \cdot I$$

$$\eta_{Gen} = \frac{P_{El}}{P_{Mech}} \quad (25)$$

$$\eta_{Gen} = \frac{P_{El}}{P_{Mech}}$$

$$\eta_{Gesamt} = \frac{P_{El}}{P_{Wind}} \quad (26)$$

$$\eta_{Gesamt} = \frac{P_{El}}{P_{Wind}}$$

$$F_S = F_{S,Mess} \cdot \frac{l}{h_N} \cdot f_{Korr} \quad (27)$$

$$F_S = F_{S,Mess} \cdot \frac{0,467m}{0,73m} \cdot 3,267$$

$$C_S = \frac{F_S}{\frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot r_{Rotor}^2 \cdot v_1^2} \quad (28)$$

$$C_S = \frac{F_S}{\frac{1,2 \frac{kg}{m^3}}{2} \cdot \pi \cdot (0,17m)^2 \cdot v_1^2}$$

## 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.