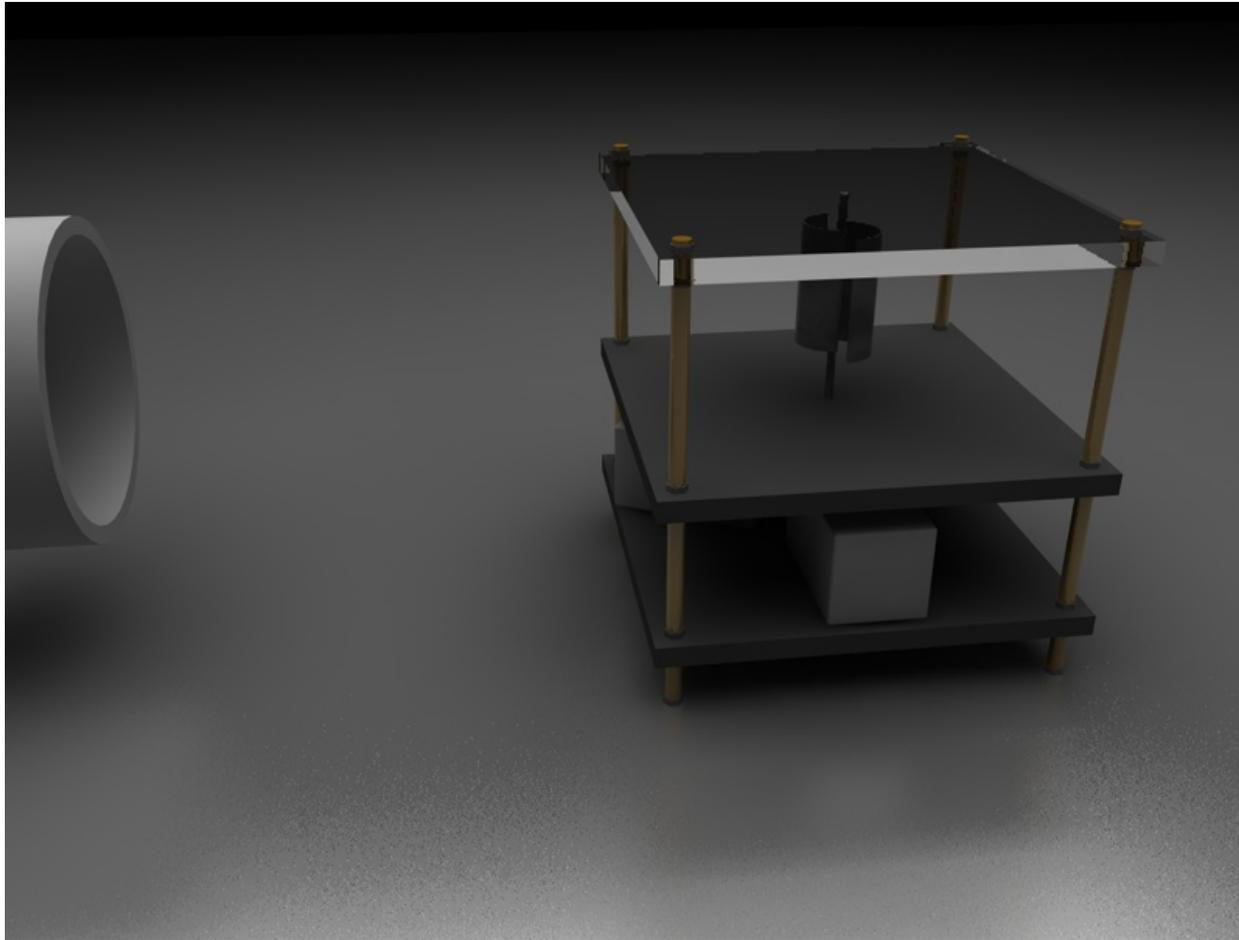


SOWAS-Praktikum



Fragestellung

Untersuchung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit einer vertikalen Windkraftanlage bei verschiedenen Profilen aber gleichem Materialverbrauch



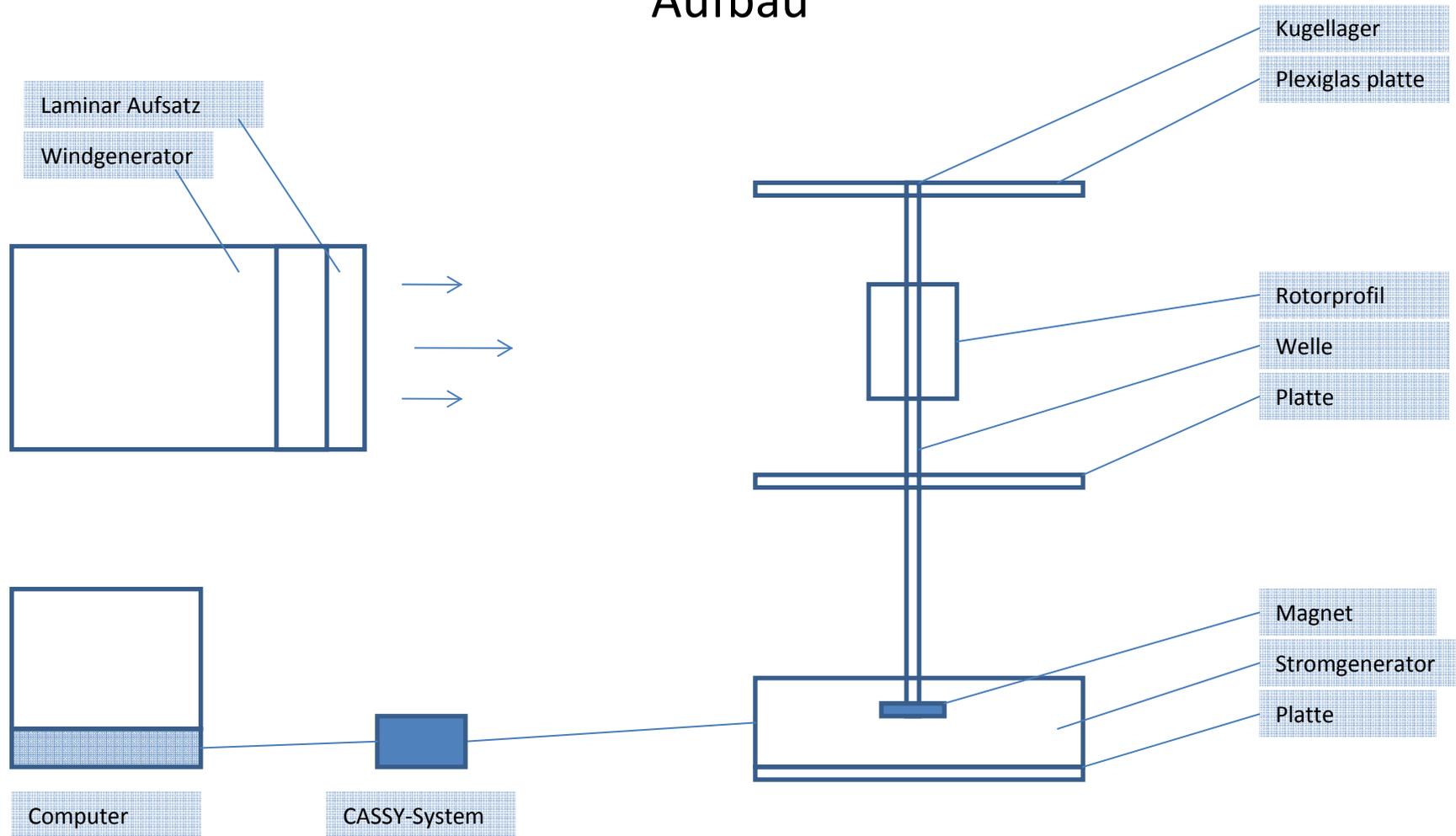
Inhaltsverzeichnis

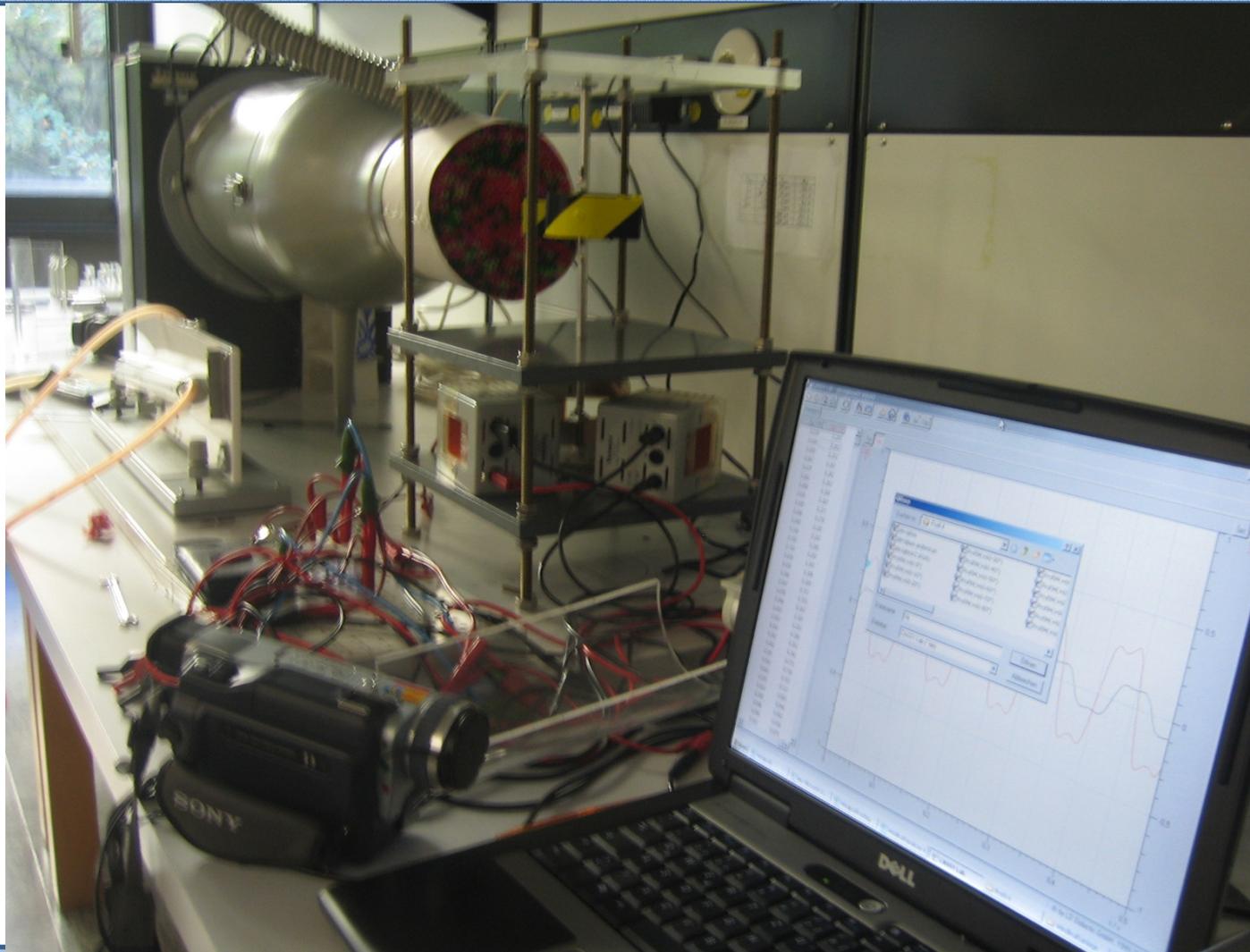
1. Einleitung
2. Messaufbau
3. Durchführung
4. Physikalische Grundlagen
5. Profil 1: Savonius-Rotor (Zylinderhalbschalen)
6. Profil 2: V-Form
7. Profil 3: Darrieus-Rotor (Tragflächenprofil)
8. Theoretische Überlegungen
9. Ergebnisse
10. Ausbau- und Verbesserungsfähigkeit
11. Quellen und Danksagungen

Versuchsziele

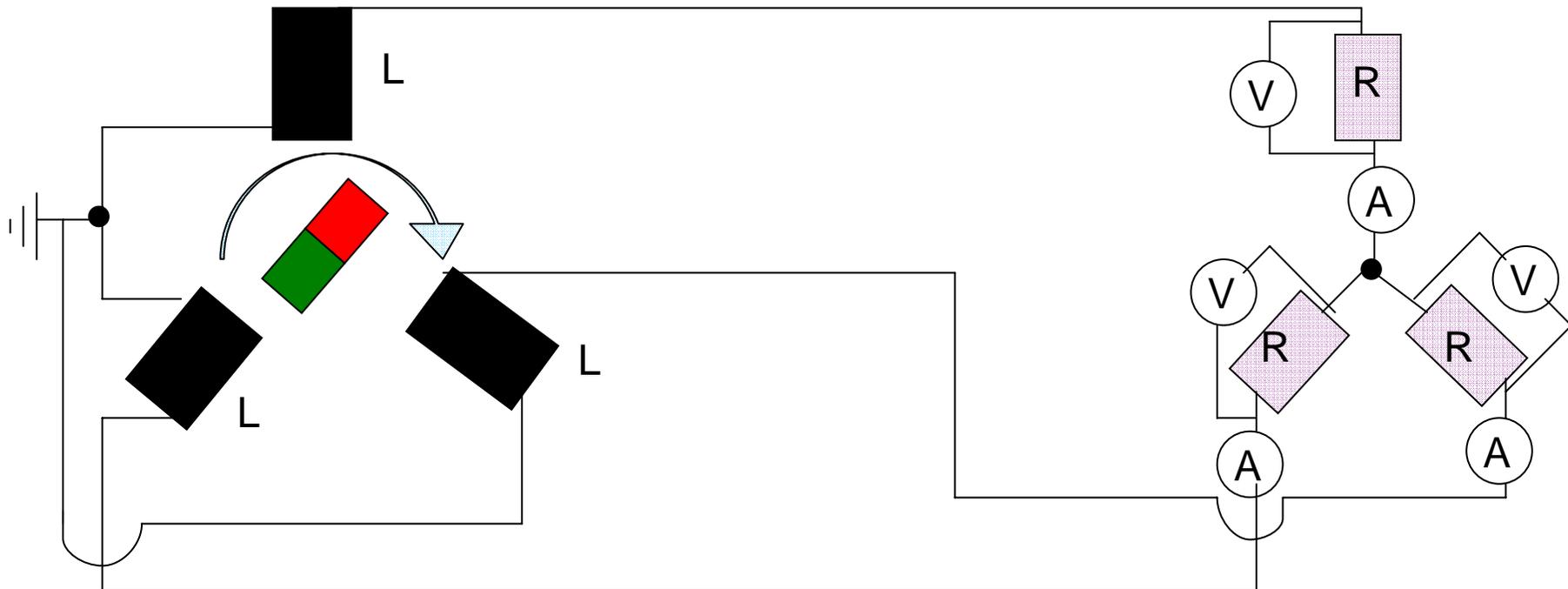
- Gleicher Materialaufwand für jedes Profil
- Finden der optimalen Form und deren Anbringung und Ausrichtung
- Weitere Leistungssteigerung durch Veränderung des Strömungsprofils
- Versuchsgestaltung so das Modellierung auf große Skalen sinnvoll ist

Aufbau





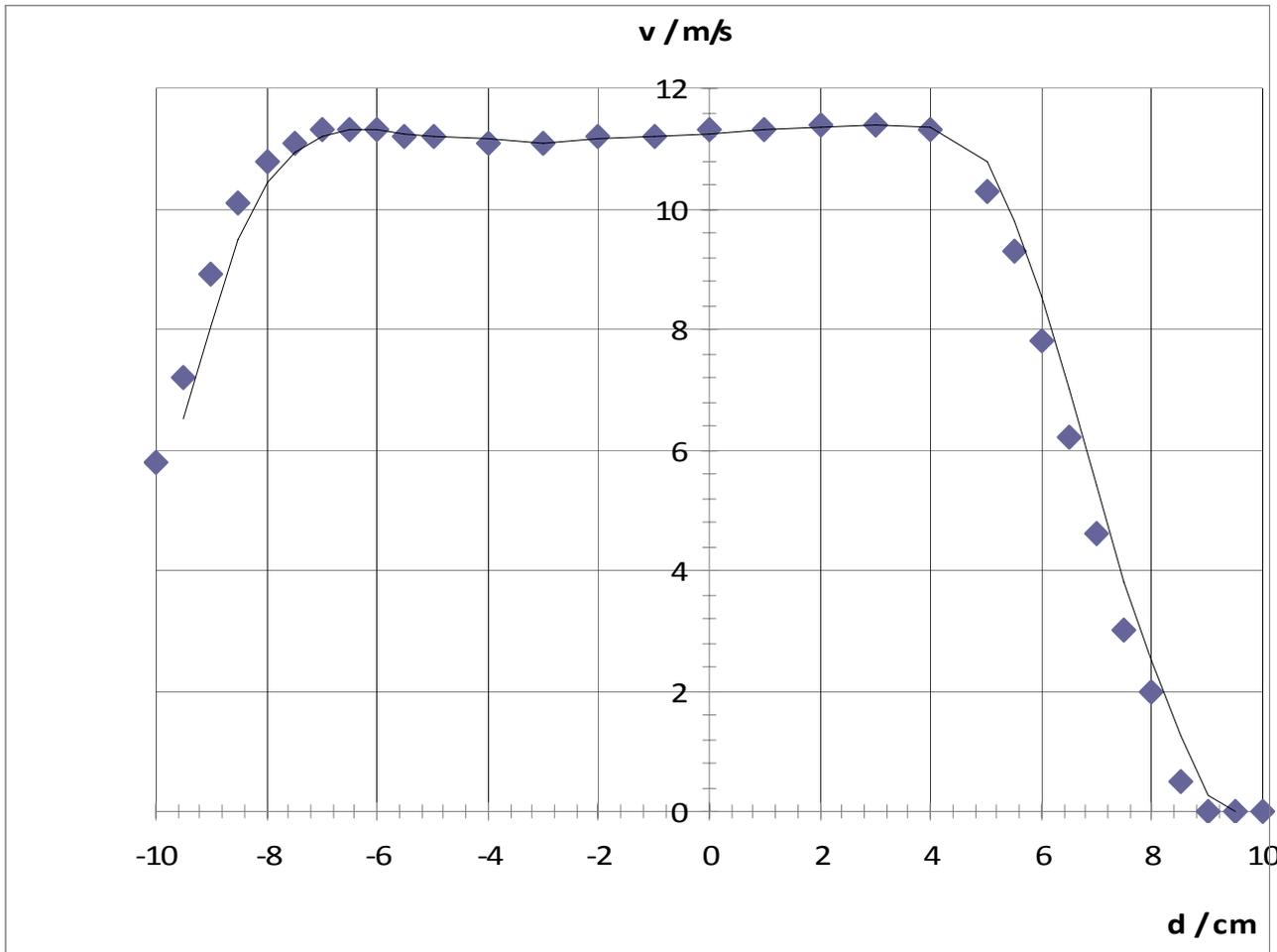
Elektrische Schaltung



Versuchsdurchführung

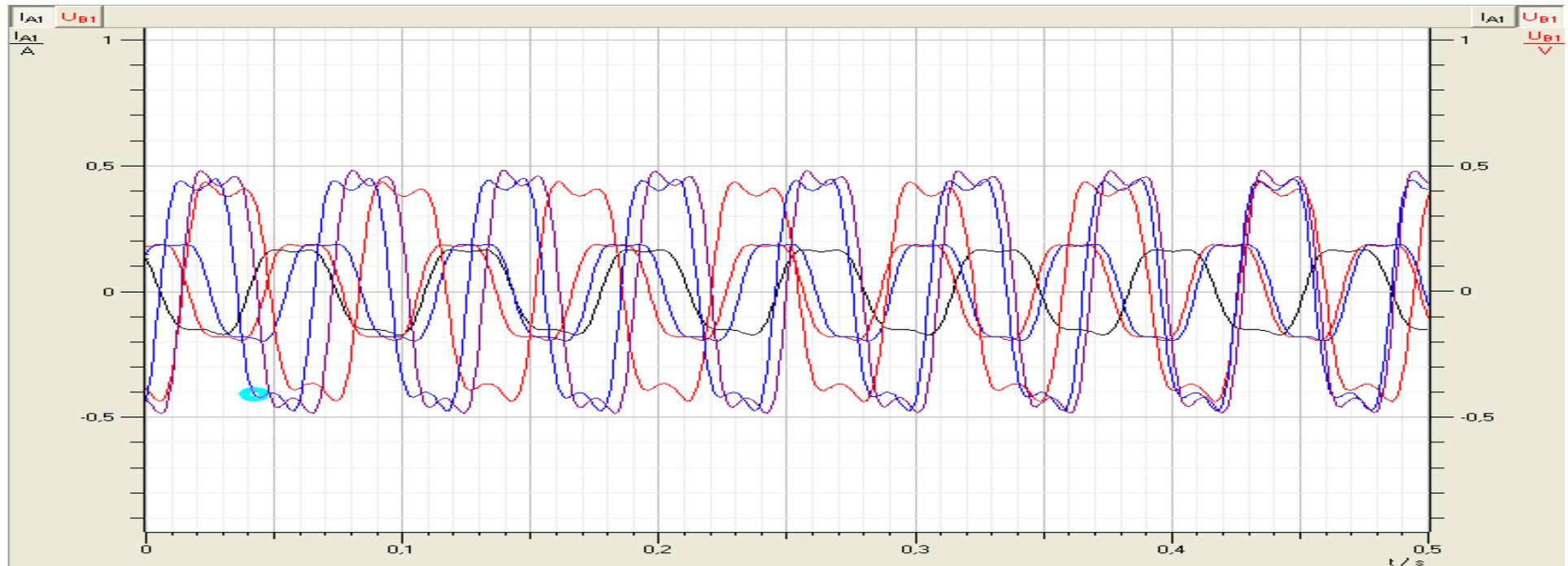
- Spannung U , Strom I an drei Phasen
- Phasenverschiebung zwischen U und I
- Die Windgeschwindigkeit ohne Aufbau
- Windgeschwindigkeit vor und hinter den rotierenden Blättern
- Die zur Stromerzeugung benötigte Anlaufgeschwindigkeit

Windprofil



Annähernd
konstante
Geschwindigkeit von
 $v = 11,1$ m/s

Bestimmung des original Signals



- Justierung der Spulen relativ zu einander
- Ziel ist es Phasenverschiebung von 120° zu erreichen

Physikalische Grundlagen



Betz'sches Gesetz

Wie bestimmt man die Leistung des Windes?

Allgemein gilt für die kinetische Energie E einer bewegten Masse m mit der Geschwindigkeit v :

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Die Leistung P ergibt sich aus der Ableitung der Energie nach der Zeit:

$$P = \dot{E} = \frac{dE}{dt}$$

Die Ableitung der Energie nach der Zeit ergibt :

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2$$

Dabei ist \dot{m} der so genannte Massenfluss:

$$\dot{m} = \rho v A$$

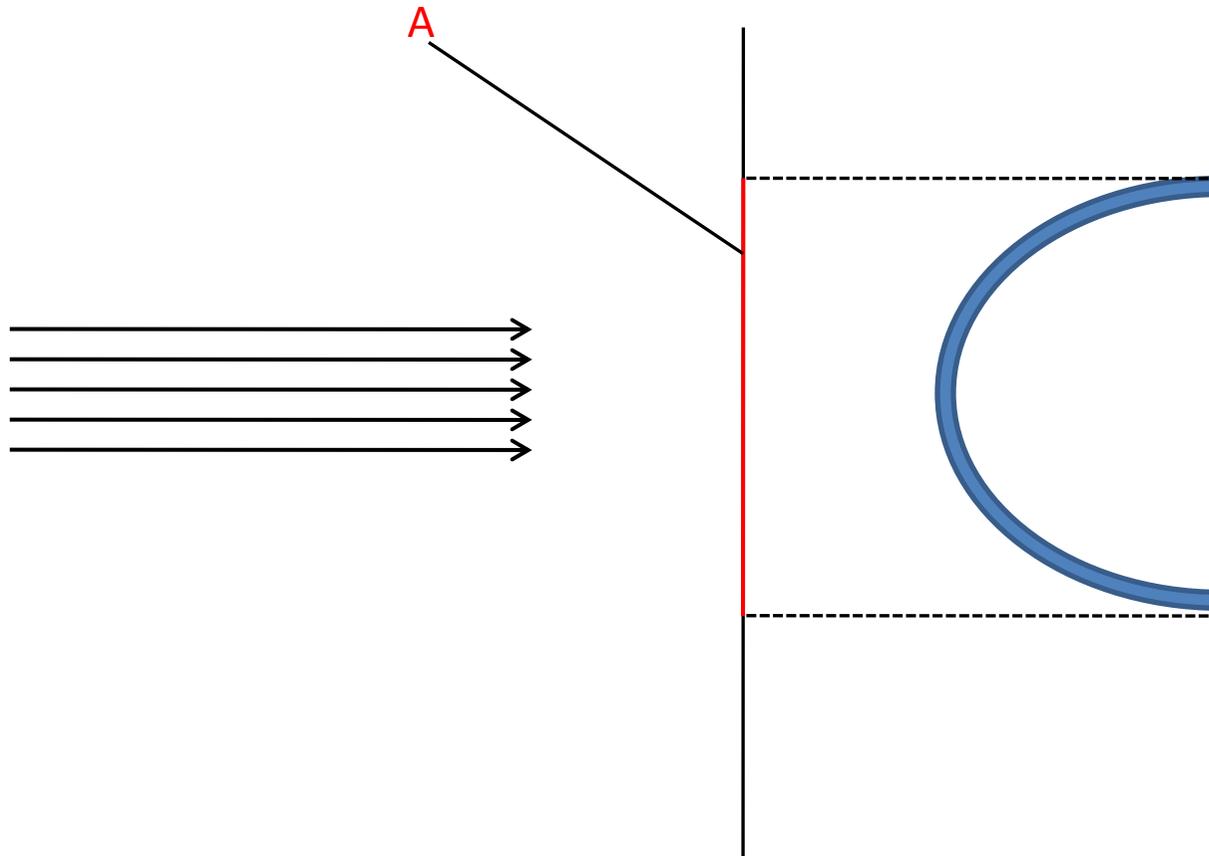
Damit berechnet sich die Leistung des Windes zu:

$$P = \dot{E} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

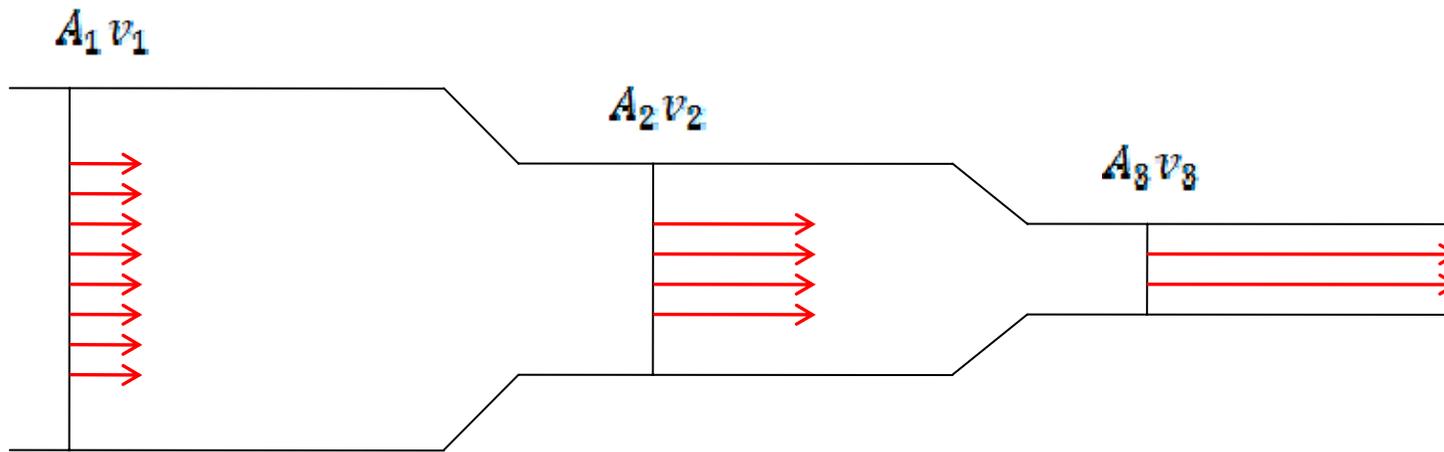
$\rho = \text{Dichte der Luft}$

$A = \text{orthogonale Projektion}$

Orthogonale Projektion



Kontinuitätsbedingung



$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = A_3 v_3 = A v$$

Leistungsbilanz vor und nach dem Rotor:

$$P = \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2)$$

Aus der Impulserhaltung erhält man (keine Herleitung) :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad v = \text{Strömungsgeschwindigkeit in der Rotorebene}$$

Eingesetzt in die obige Formel ergibt die **Rotorleistung**:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2)$$

Der Leistungsbeiwert

Der definitionslose Leistungsbeiwert ist definiert als

$$c = \frac{\text{Rotorleistung}}{\text{Windleistung}} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2)}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} =$$

Nach ein paar Umformungen erhält man schließlich:

$$c = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right]$$

Der Leistungsbeiwert

$$c = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right]$$

Definiert man zusätzlich:

$$\zeta = \frac{v_2}{v_1}$$

So erhält man als Leistungsbeiwert:

$$c = \frac{1}{2} [1 - \zeta^2] [1 + \zeta]$$

Der Leistungsbeiwert

$$c = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right]$$

$$c = \frac{1}{2} [1 - \zeta^2] [1 + \zeta]$$

Der Leistungsbeiwert hängt nur noch von den Geschwindigkeiten ab

Was sagt uns der Leistungsbeiwert über eine WKA aus??

Der Leistungsbeiwert *c* *kennzeichnet das Verhältnis* der entziehbaren mechanischen Leistung zu der im Luftstrom enthaltenen Leistung

Das Betzsche Optimum----Maximaler Leistungsentzug

$$c = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right]$$

$$c = \frac{1}{2} [1 - \zeta^2] [1 + \zeta]$$

Zwei Grenzfälle

Wie viel Leistung kann man dem Wind maximal entnehmen? -----> Maximum von c bestimmen

$$\frac{dc_{max}}{d\zeta} = 0$$

Das Betzsche Optimum----Maximaler Leistungsentzug

$$c = \frac{1}{2} [1 - \zeta^2] [1 + \zeta]$$

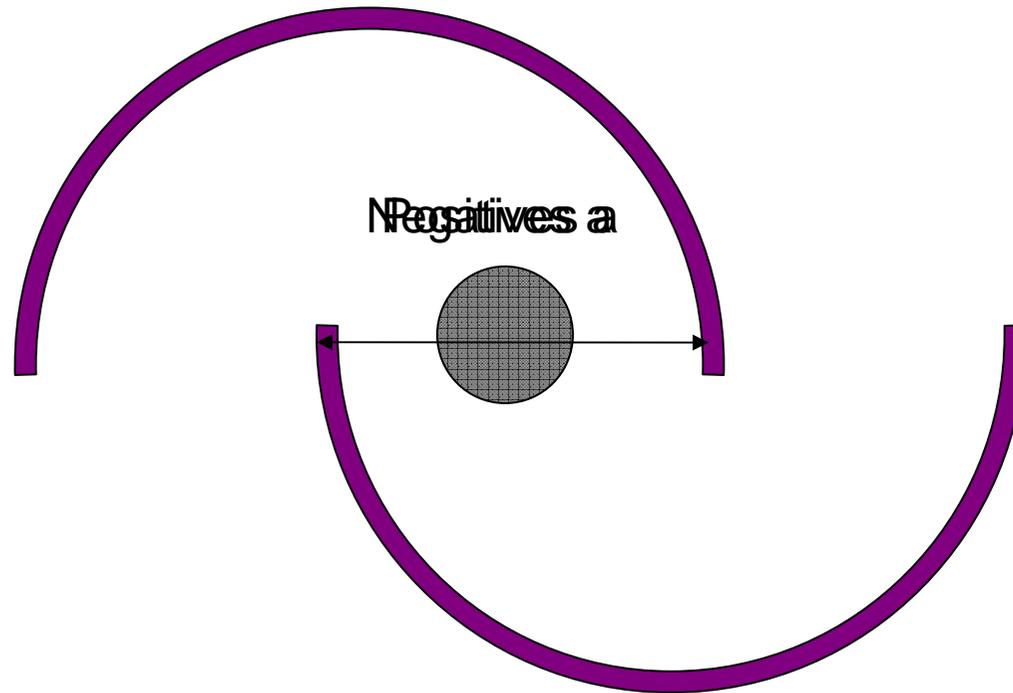
$$\frac{dc_{max}}{d\zeta} = 0 \quad \longrightarrow \quad \zeta = \frac{1}{3} \quad \longrightarrow \quad c_{max} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{9}\right) \left(1 + \frac{1}{3}\right) = \frac{16}{27} = 0,593$$

 Messungen

Savonius Rotorblätter

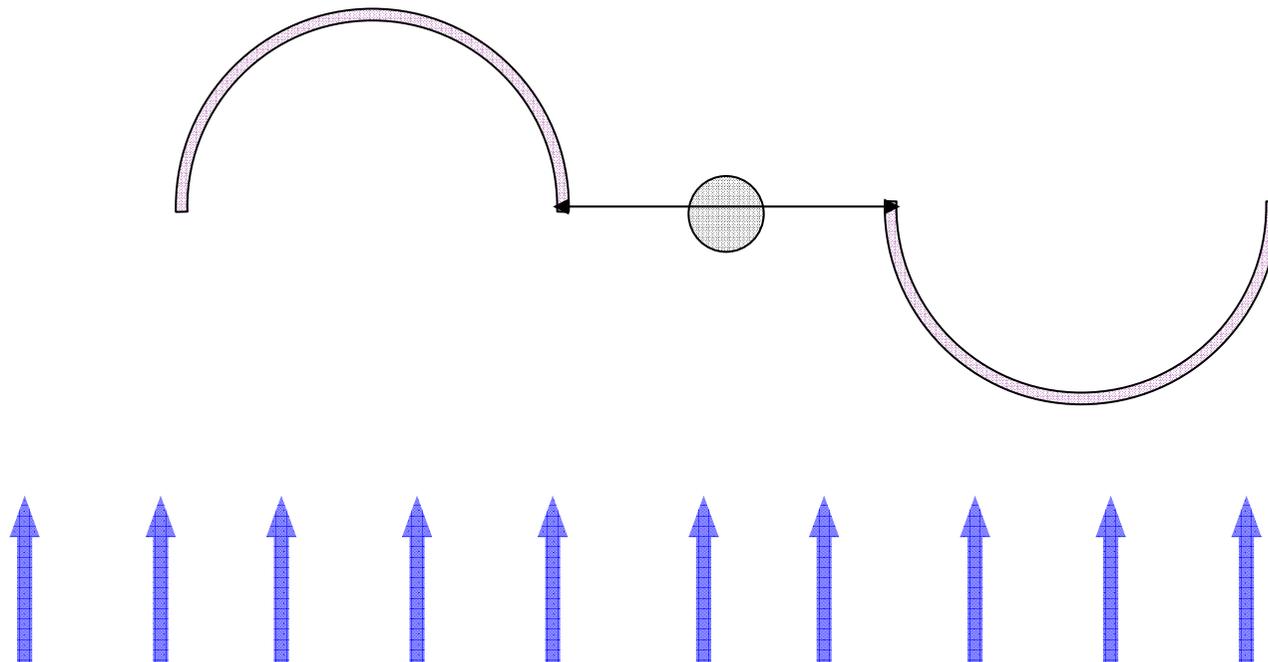


Abstandsdefinition



Erwartungen vor dem Experiment

- Einstellung des möglichst großen positiven Abstandes
- Großes Hebelarm bei konstanter Luftströmung



Erwartungen vor dem Experiment

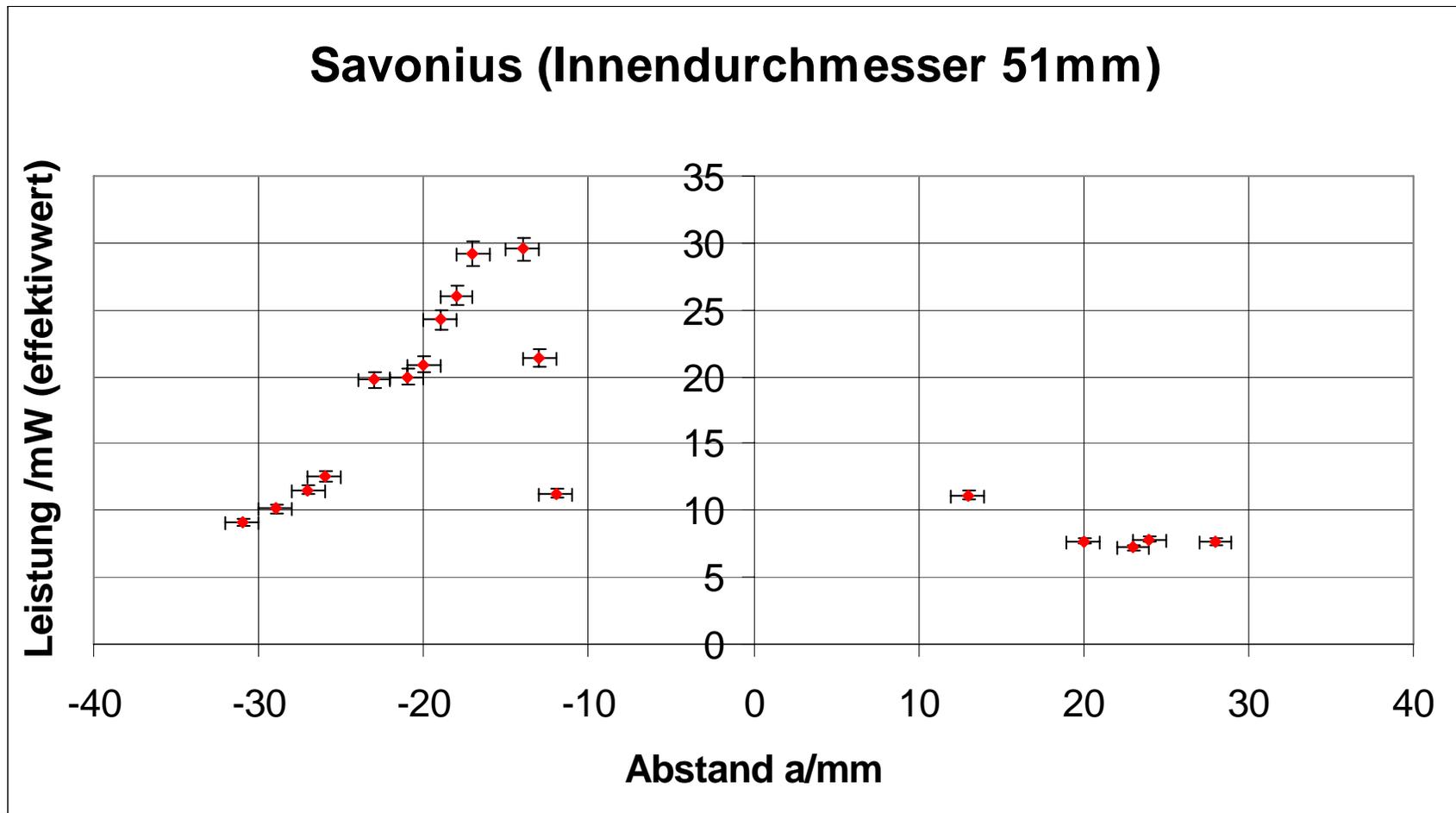
Vergrößerung des Drehmomentes führt zu größeren Winkelgeschwindigkeit und somit zu Vergrößerung der Frequenz

$$U_{\text{ind}} = \frac{d(\Phi)}{dt} = \frac{d(B \cdot A(t))}{dt} = \frac{d(B \cdot \hat{A} \cdot \sin(\omega t))}{dt} = B \cdot \hat{A} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)$$



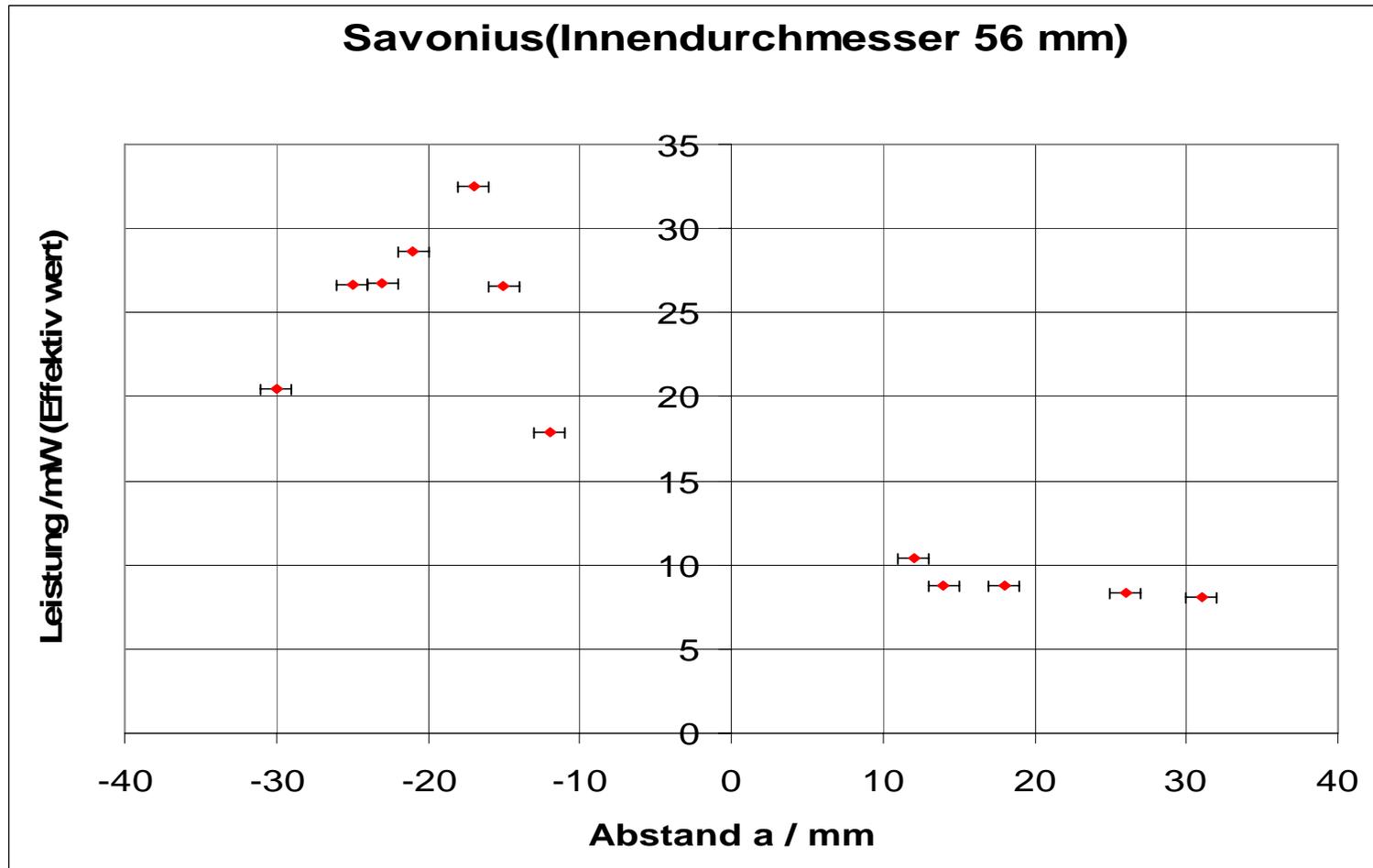
Maximale Leistung

Experimentelle Ergebnisse

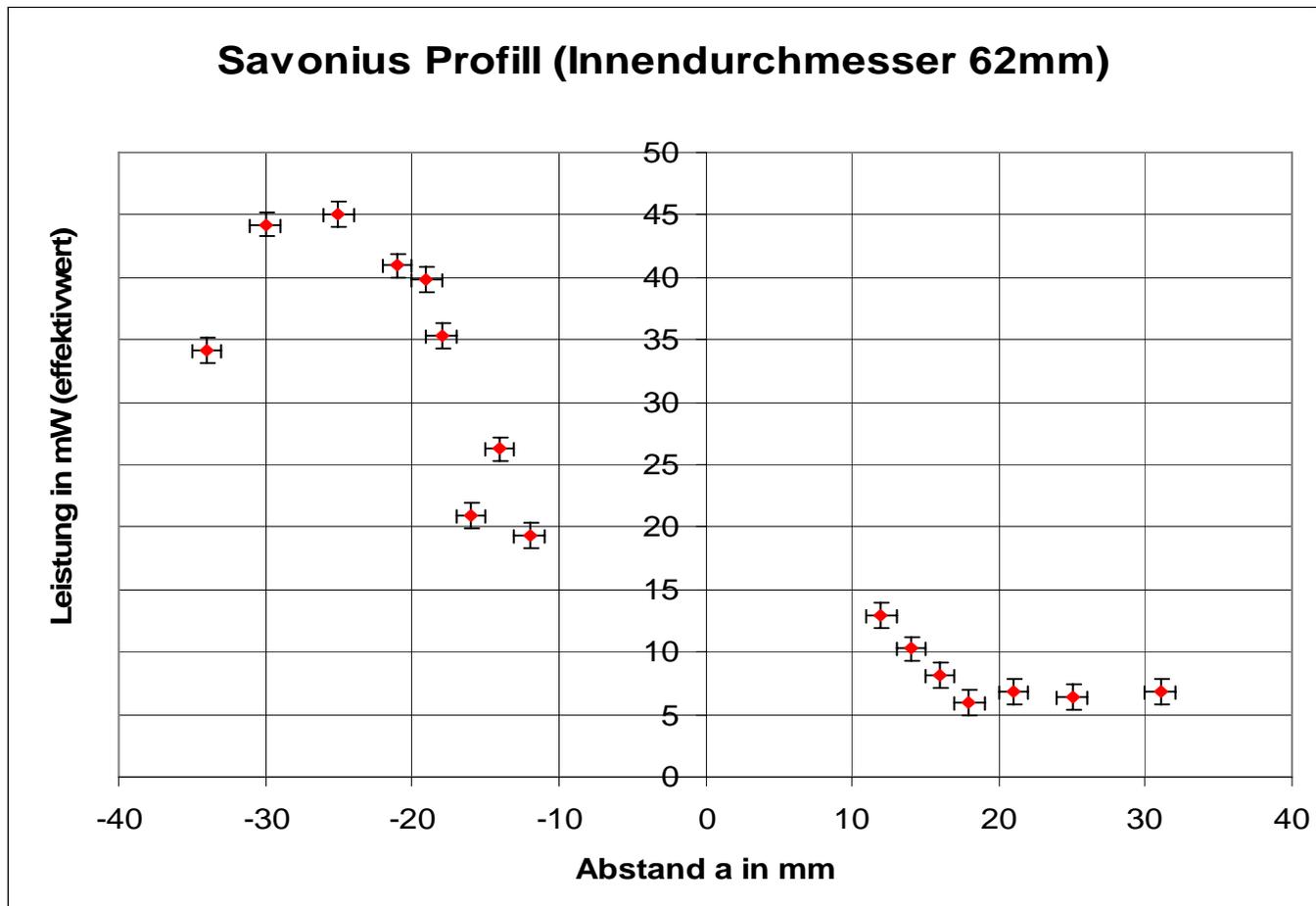


Experimentelle Ergebnisse

Savonius(Innendurchmesser 56 mm)



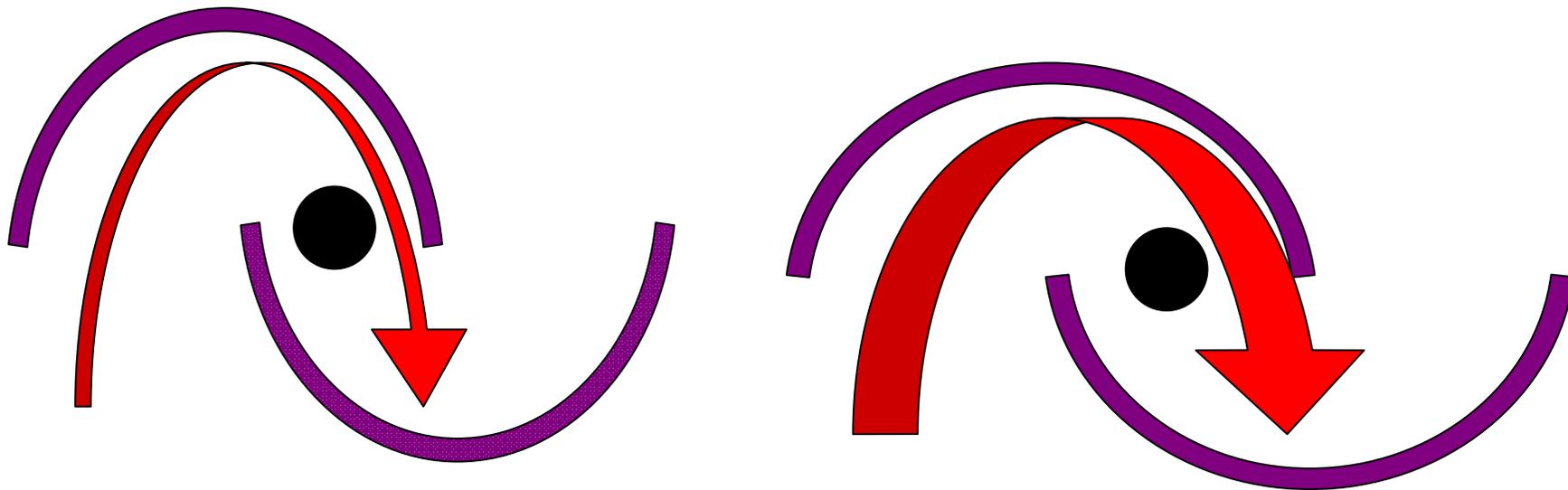
Experimentelle Ergebnisse



Anschauliche Erklärung : Simulation

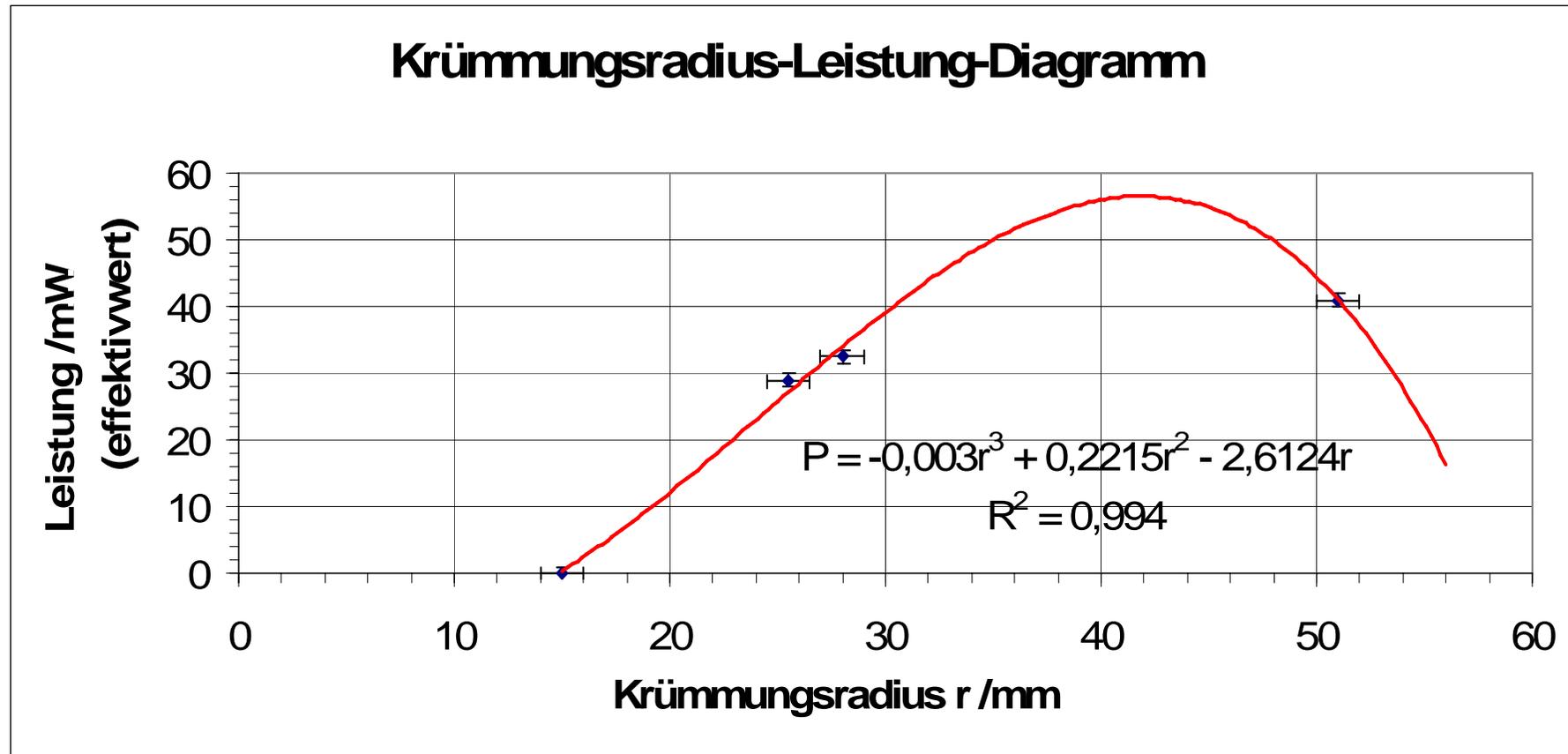
Anschauliche Erklärung : Realität

Warum verschiebt sich das Maximum weiter ins Negative wenn der Krümmungsradius vergrößert wird?

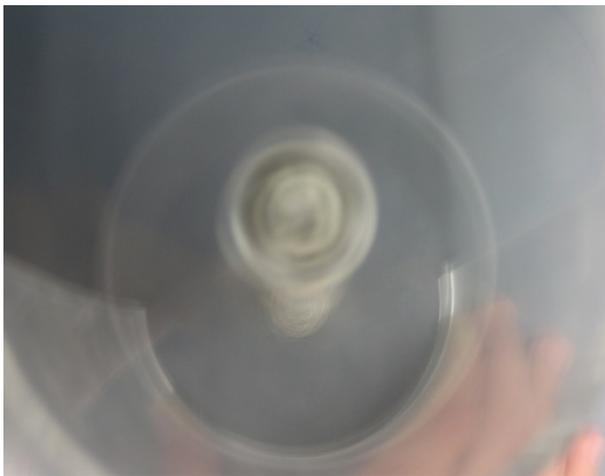
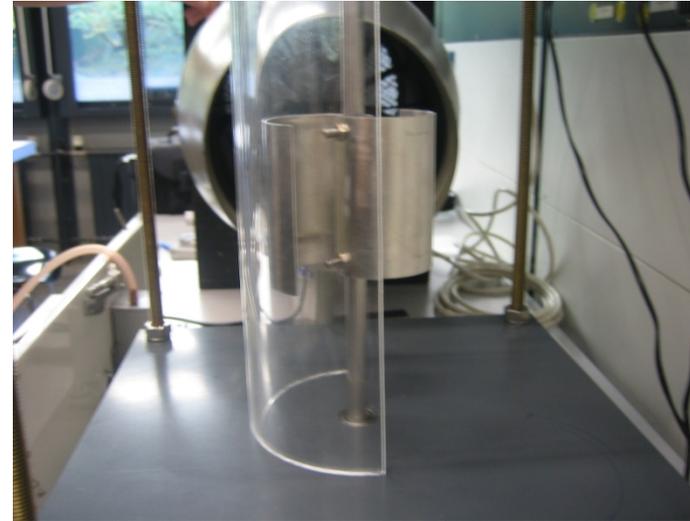
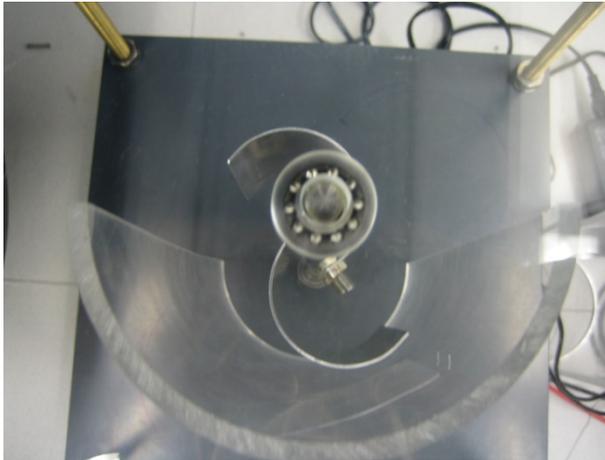


Größerer Massenfluss beim größeren Krümmungsradius

Anschauliche Erklärung



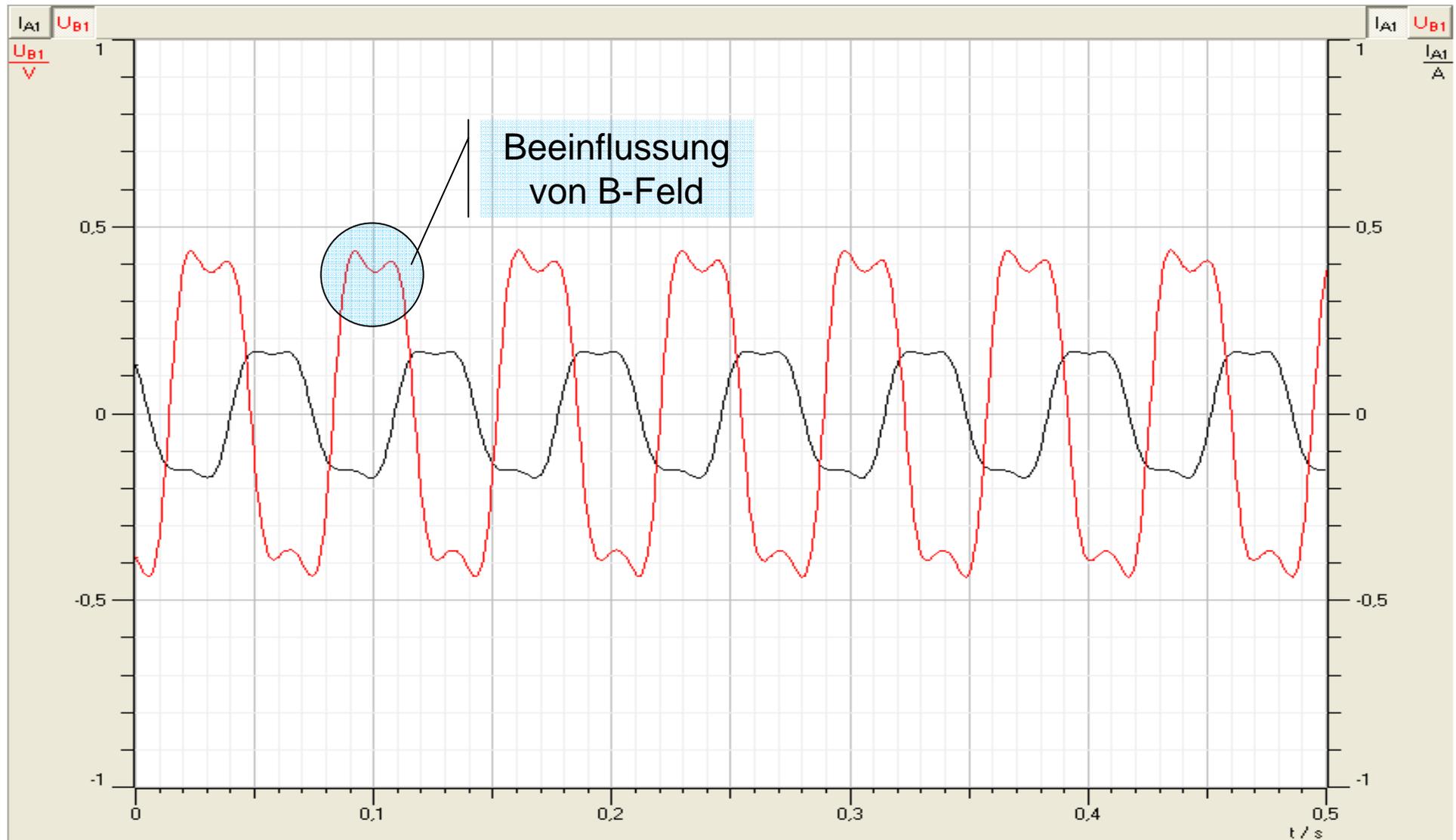
Veränderung des Windprofils



Technische Kenngrößen

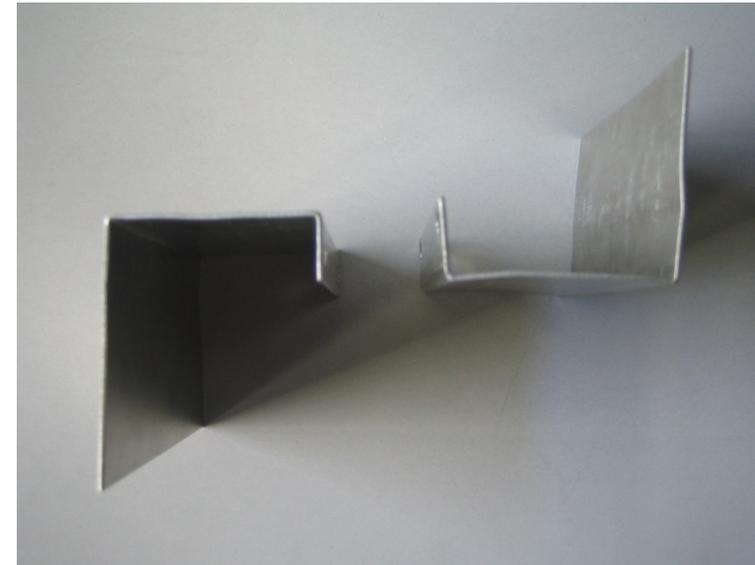
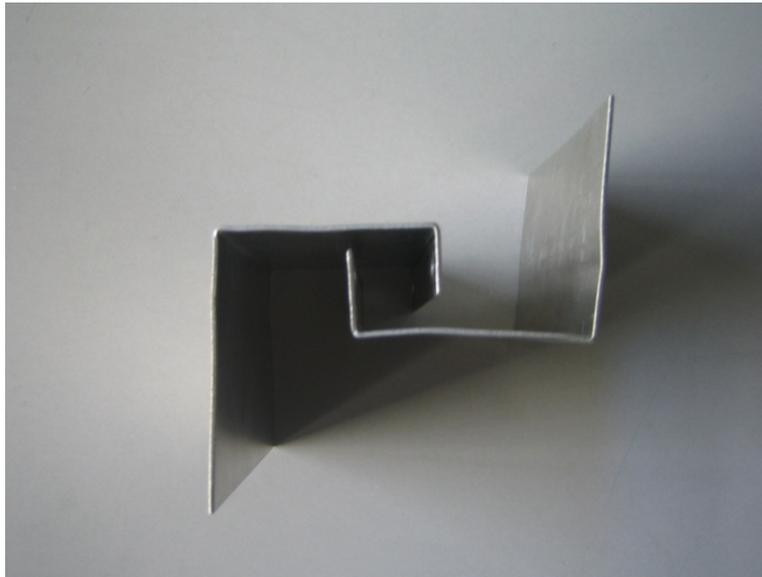
Ankommende Leistung	6,10 W
Leistungsbeiwert	0,37
Mechanische Leistung	2,23 W
Elektrische Leistung	45 mW
Wirkungsgrad	0,74%
Wirkungsgrad (mit Plexiglas)	0,89%
Anlaufgeschwindigkeit	3,5 m/s

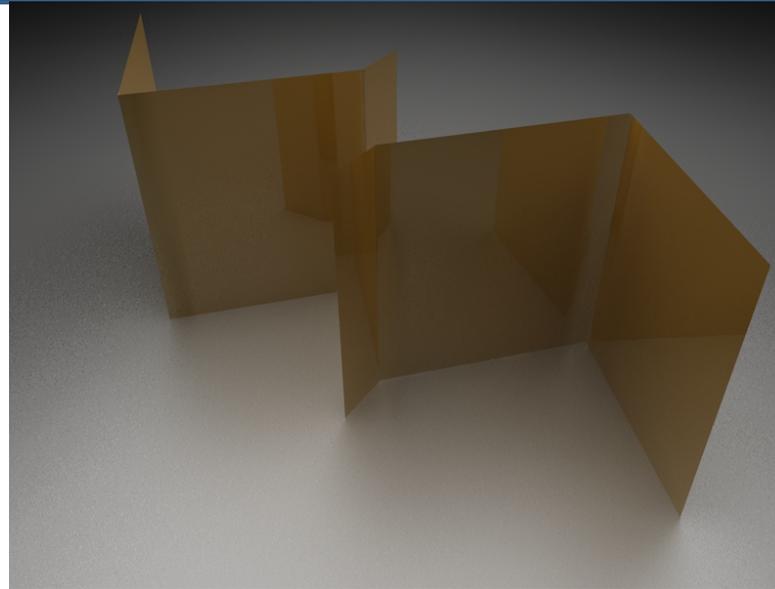
Fehlerquellen



Strom und Spannungsverlauf an einer Phase

Profil 2: V-Rotor





Eckdaten

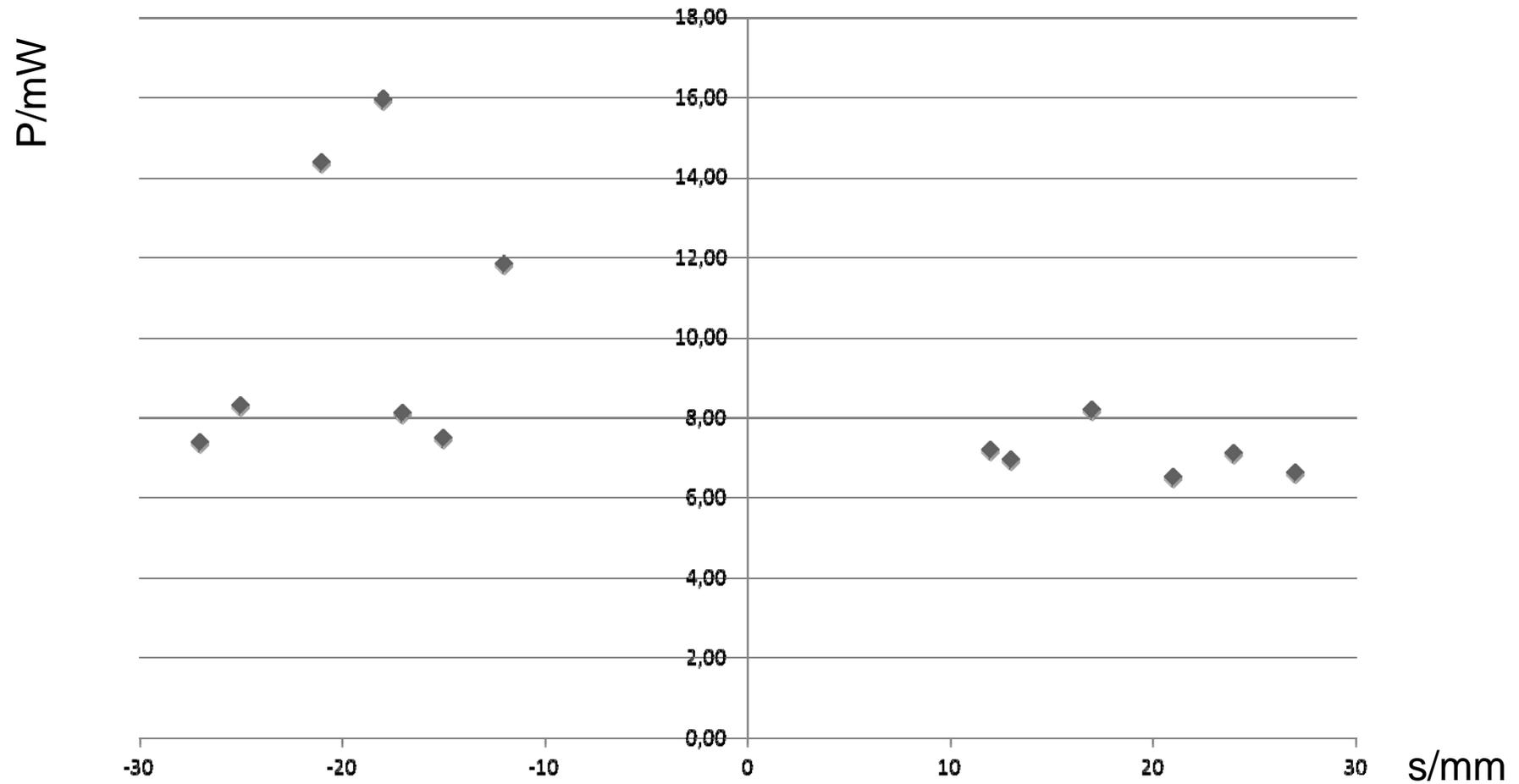
Öffnungswinkel:

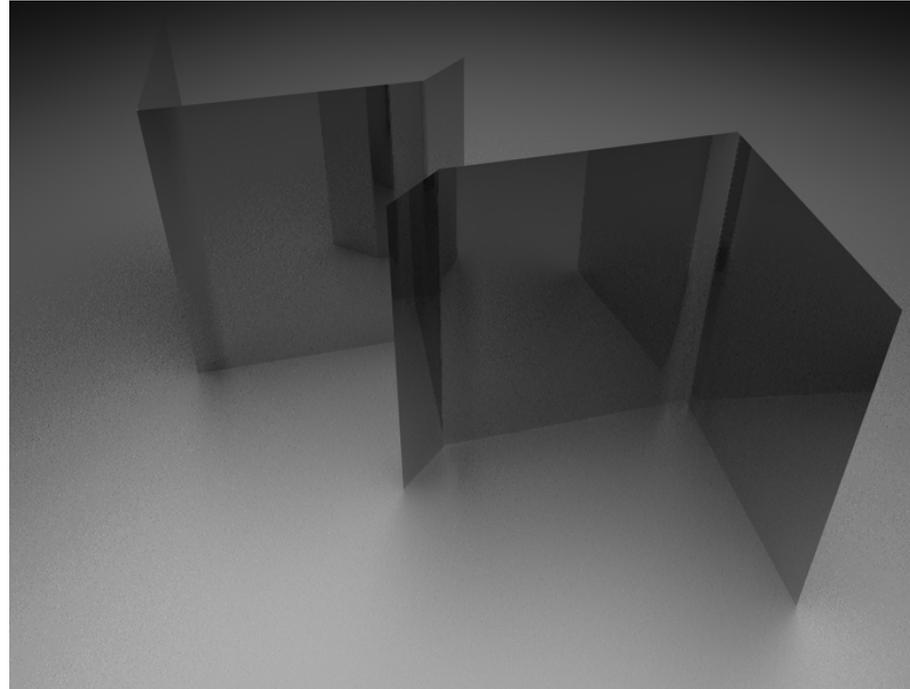
90°

Anlaufgeschwindigkeit:

6,8 m/s

V-Rotor mit 90°





Eckdaten

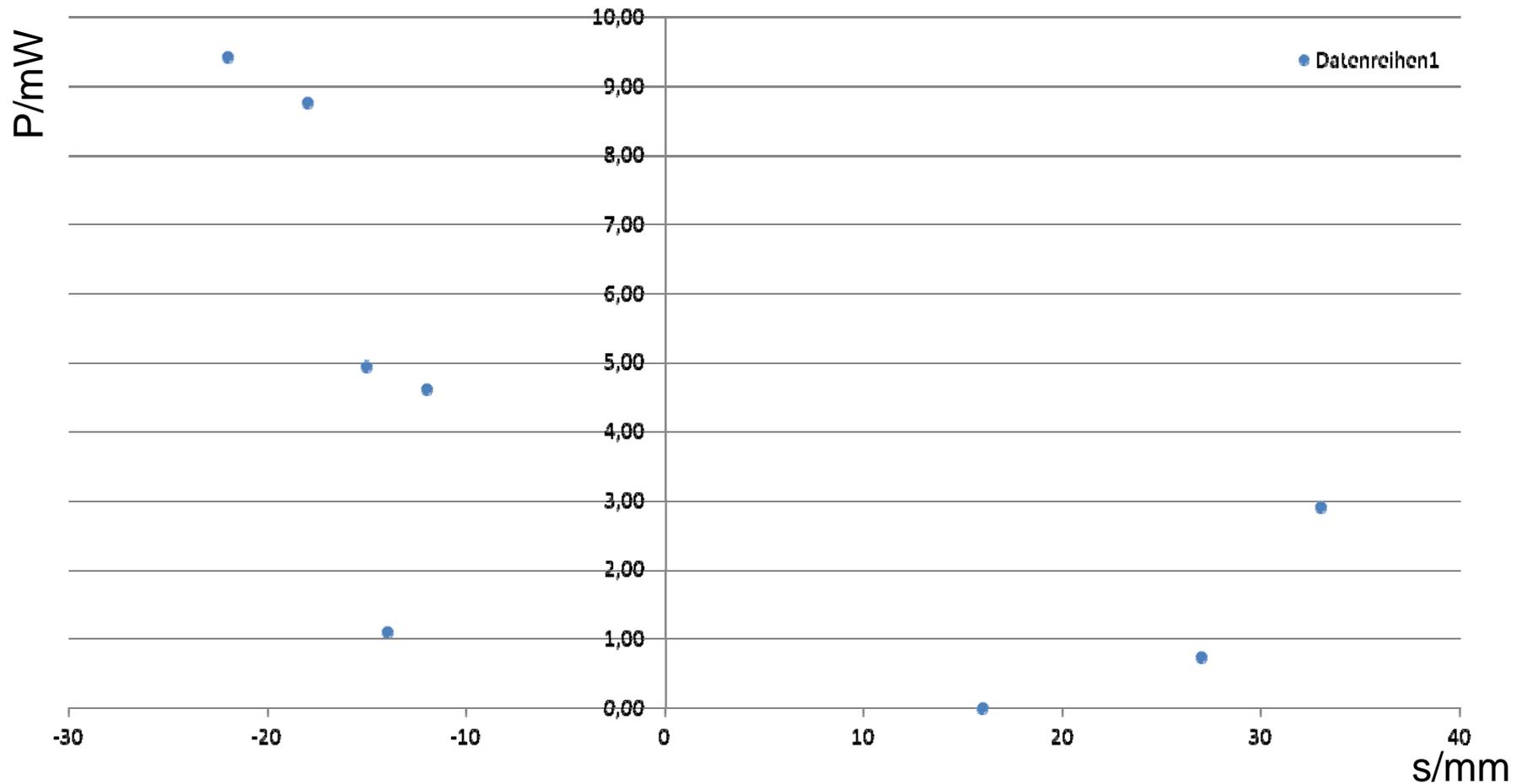
Öffnungswinkel:

45°

Anlaufgeschwindigkeit:

4,1 m/s

V-Rotor mit 45°

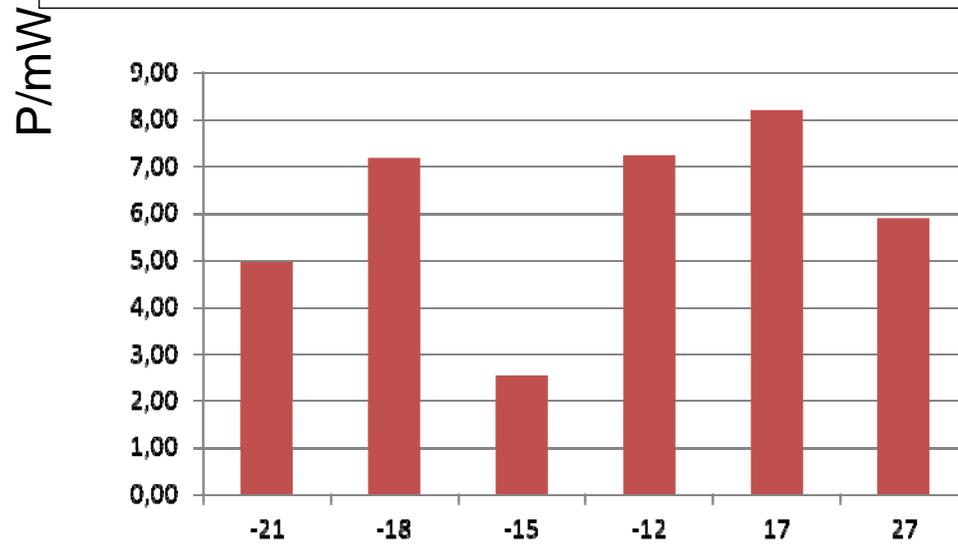


Vergleich



Differenz der beiden Leistungen

Abstand a/mm	berechnete elektrische Differenzleistung $P(\text{Rotor } 90^\circ) - P(\text{Rotor } 45^\circ)/\text{mW}$
-21	4,94
-18	7,16
-15	2,52
-12	7,21
17	8,19
27	5,86



Fazit:
Leistungsdifferenz 6,67 mW !!

Leistungsabfall bei Winkelveränderung

1. Möglichkeit: Maximaler Vergleich

Max. Leistung bei $\alpha = 90^\circ$ 15,92 mW

Max. Leistung bei $\alpha = 45^\circ$ 9,42 mW

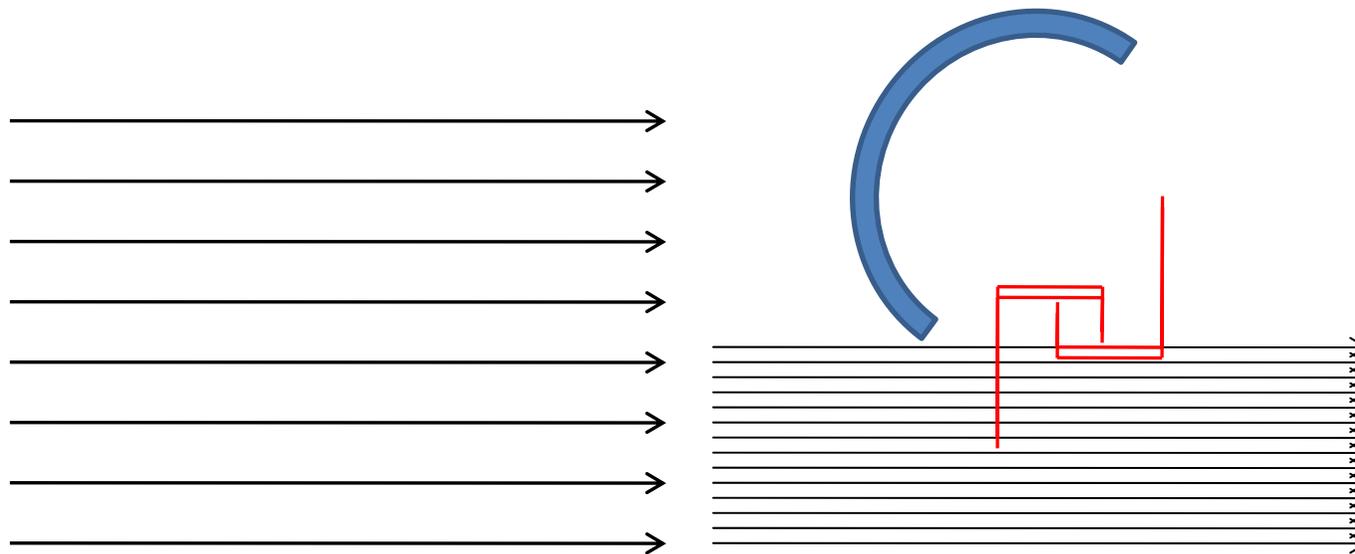
Also Leistungsabfall von $100\% - \frac{9,42 \text{ mW}}{15,92 \text{ mW}} \cdot 100\% = \mathbf{40,83\%}$

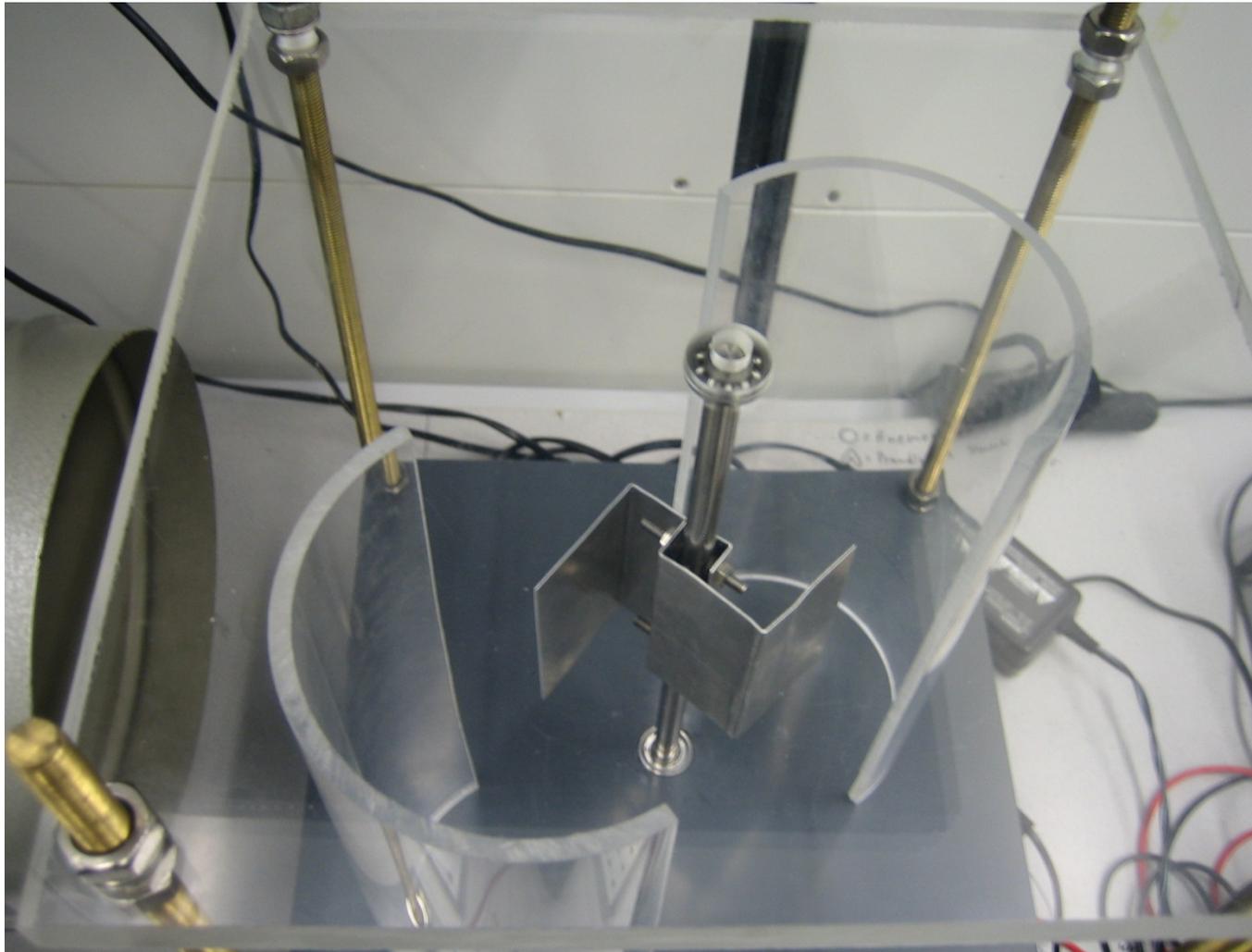
2. Möglichkeit: Leistungsdifferenz

mittlere Leistungsdifferenz: 6,67 mW

Also Leistungsabfall von $100\% - \frac{6,47 \text{ mW}}{15,92 \text{ mW}} \cdot 100\% = \mathbf{41,89\%}$

Windprofilveränderung





Leistungszunahme bei Windprofilveränderung

Plexiglas vorne: 24,77 mW

Leistungszunahme: $\frac{24,77 \text{ mW}}{15,92 \text{ mW}} \cdot 100 \% - 100 \% = 55,59 \%$

Plexiglas vorne und hinten: 19,47 mW

Leistungszunahme: $\frac{19,47 \text{ mW}}{15,92 \text{ mW}} \cdot 100 \% - 100 \% = 22,30 \%$

Eine Leistungszunahme von über 50 % !!!

Fazit



Leistungsbeiwert

V-Form mit 45° Öffnungswinkel

$v_1 = 10,8 \text{ m/s}$

$v_2 = 9,4 \text{ m/s}$

Leistungsbeiwert: 0,22

V-Form mit 90° Öffnungswinkel

$v_1 = 10,9 \text{ m/s}$

$v_2 = 9,0 \text{ m/s}$

Leistungsbeiwert: 0,29

Wirkungsgrad

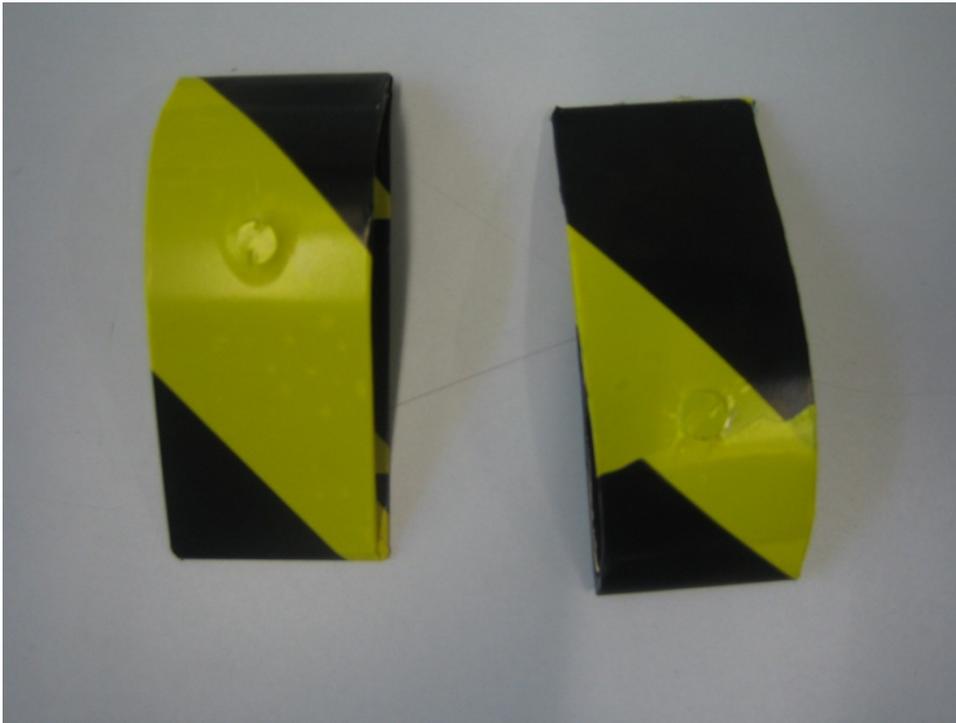
Leistung der Luft	5,1 W
Leistungsbeiwert	0,29
Mechanische Leistung	1,48 W
Elektrische Leistung	15,92 mW
Wirkungsgrad:	0,31 %

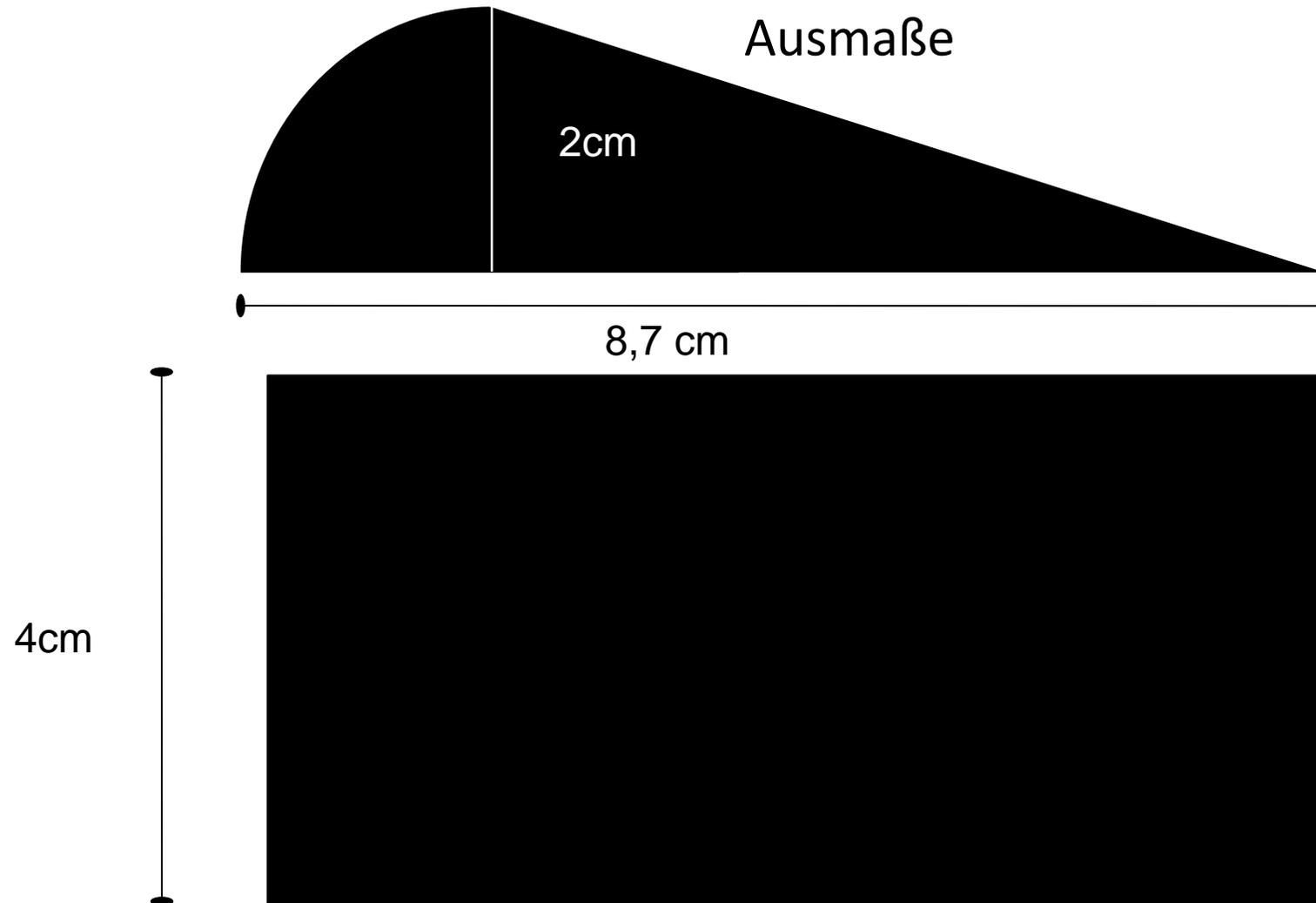
Fazit

- V-Rotor mit 90° Öffnungswinkel besser
- Beste Leistung bei $s = -18\text{mm}$
- Windprofilveränderung bringt $>50\%$ mehr Leistung
- Leistungsbeiwert von 0,29 ist ziemlich gut
- Wirkungsgrad: 0,31 %

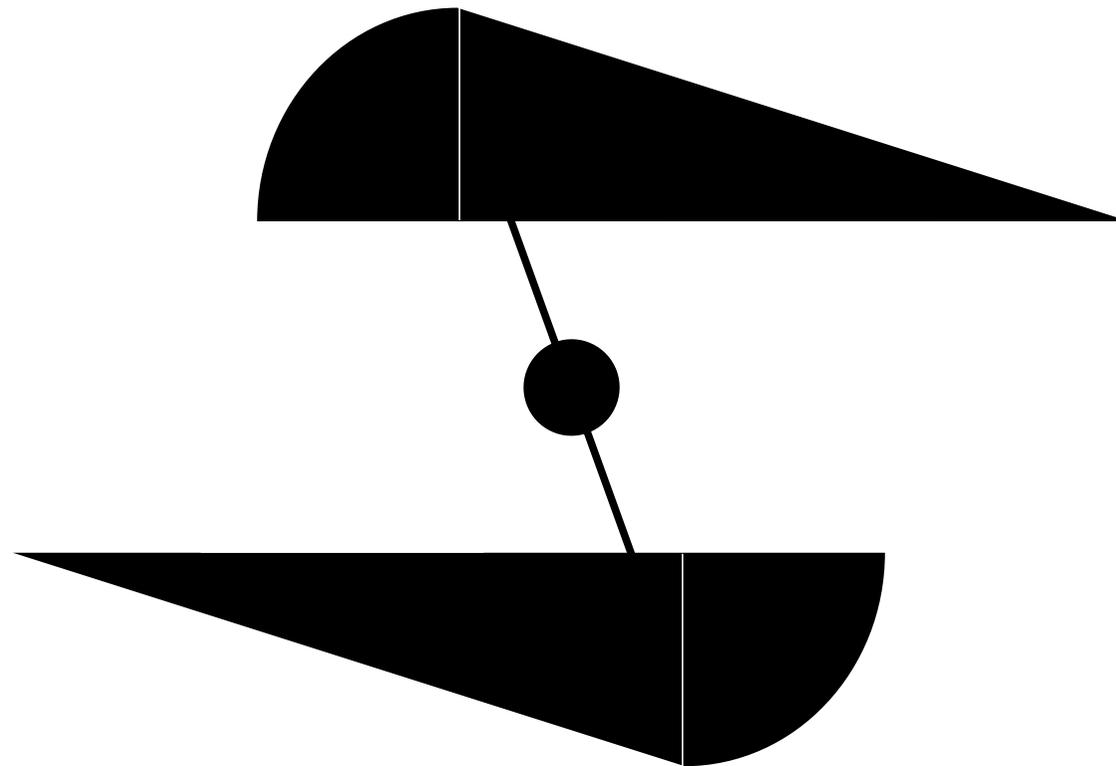
Profil 3: Tragflächenprofil



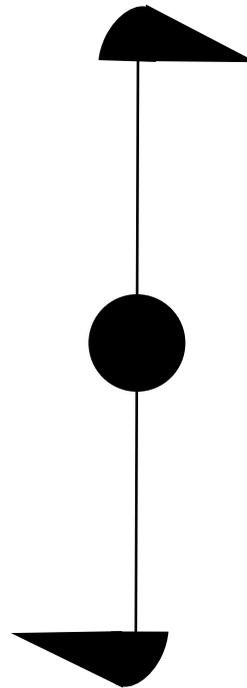




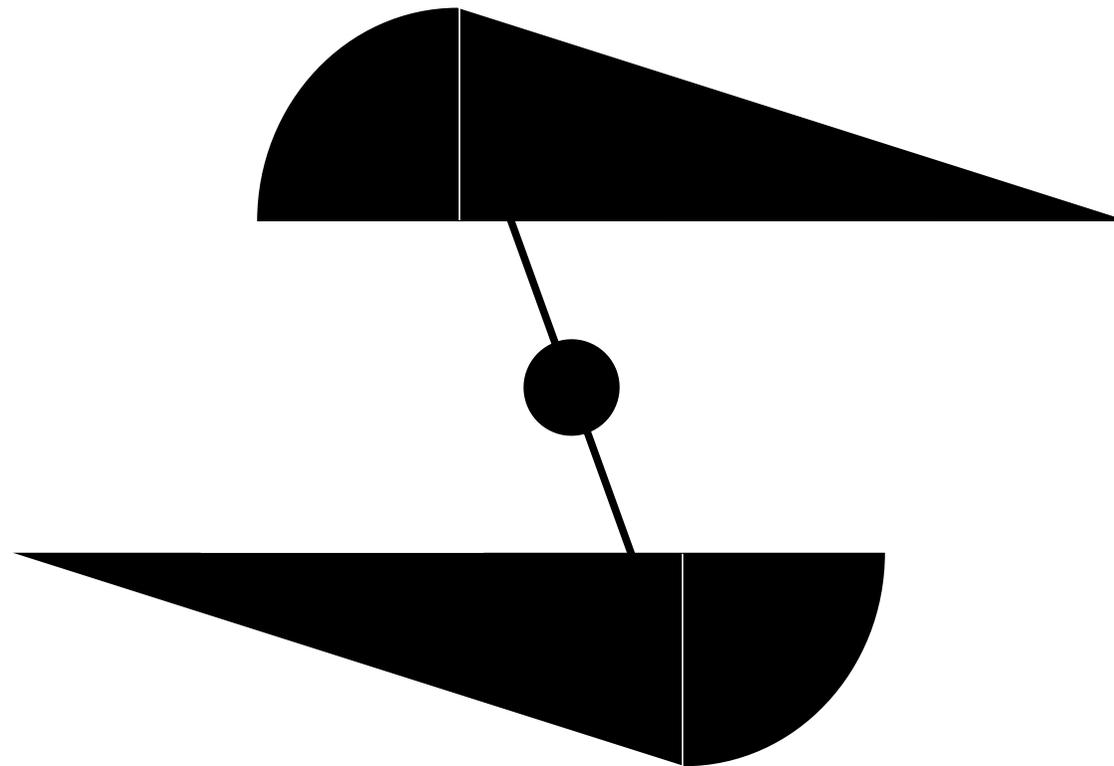
Maßstäblicher Aufbau



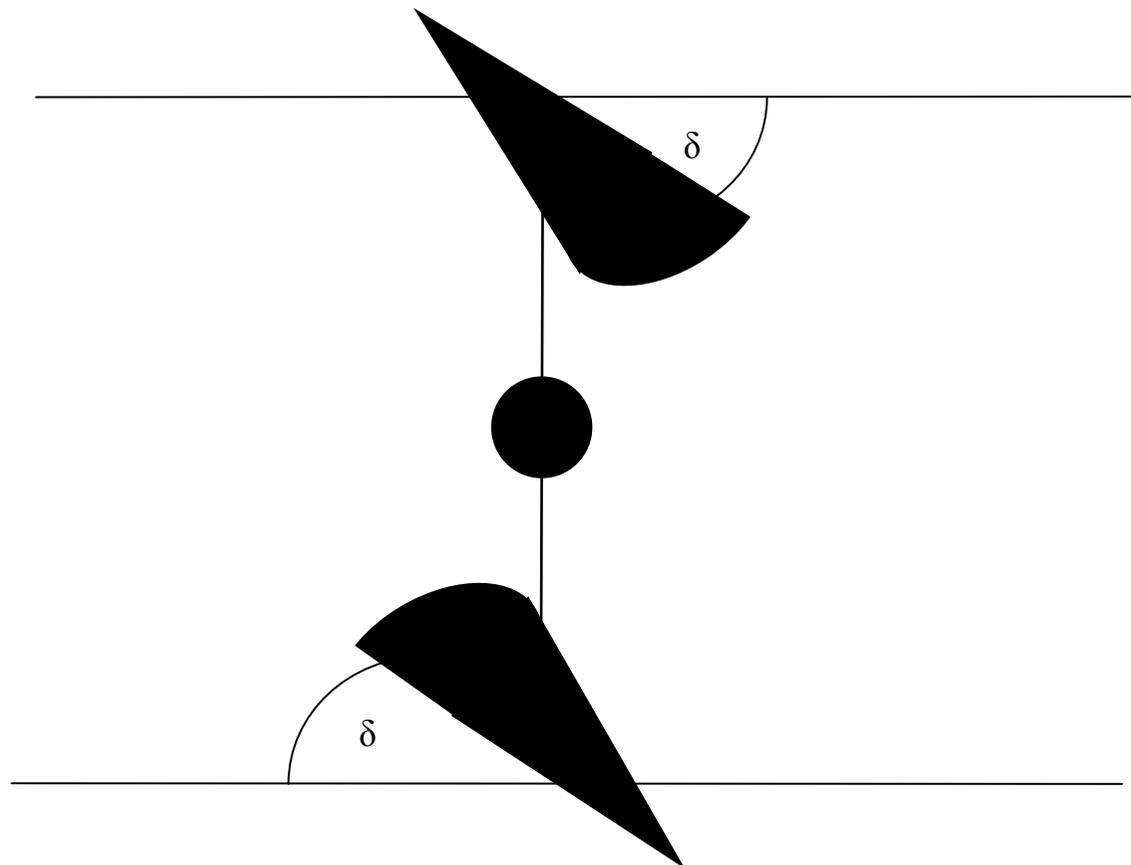
Anwendung



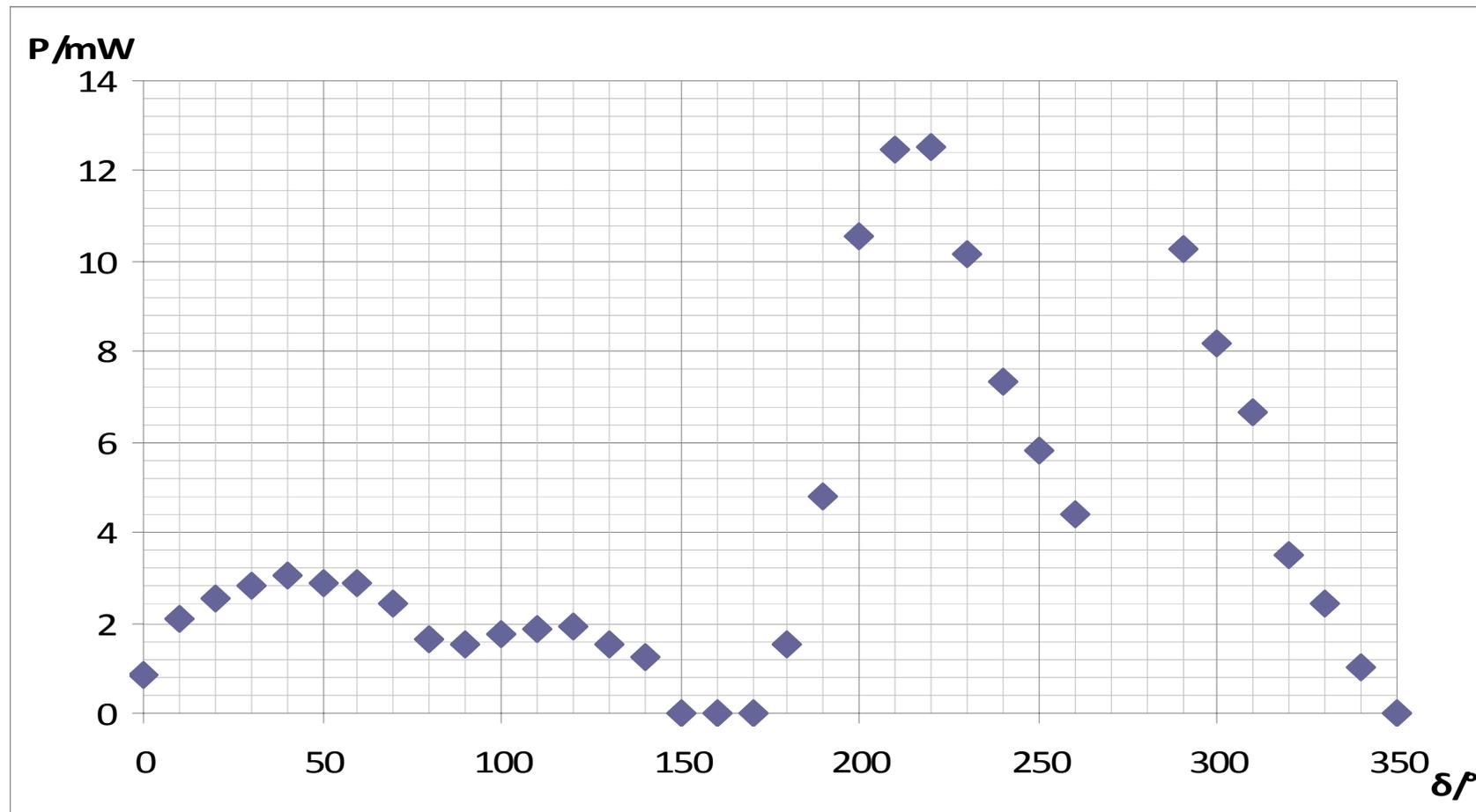
Maßstäblicher Aufbau



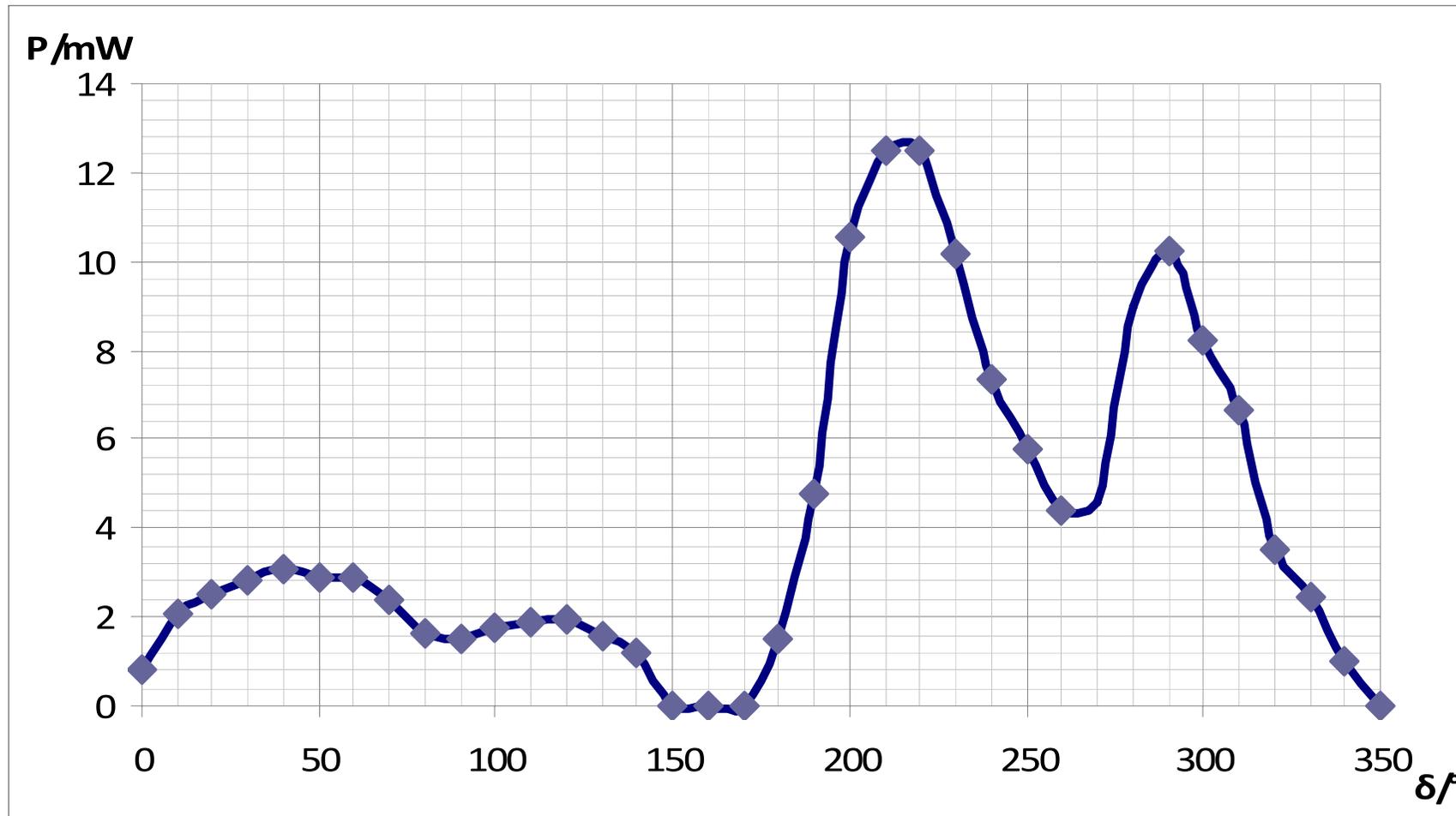
Winkeldefinition



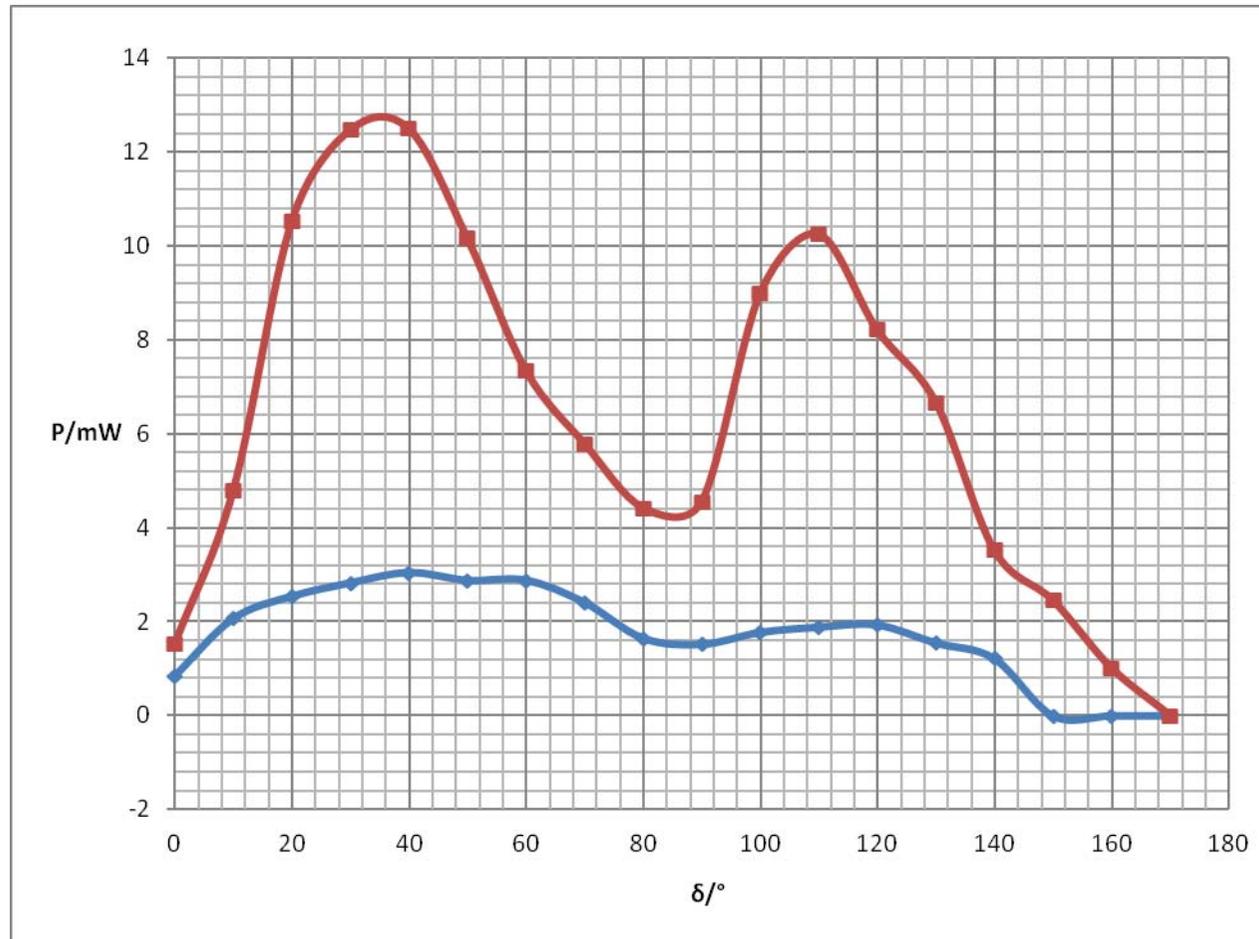
Messergebnisse

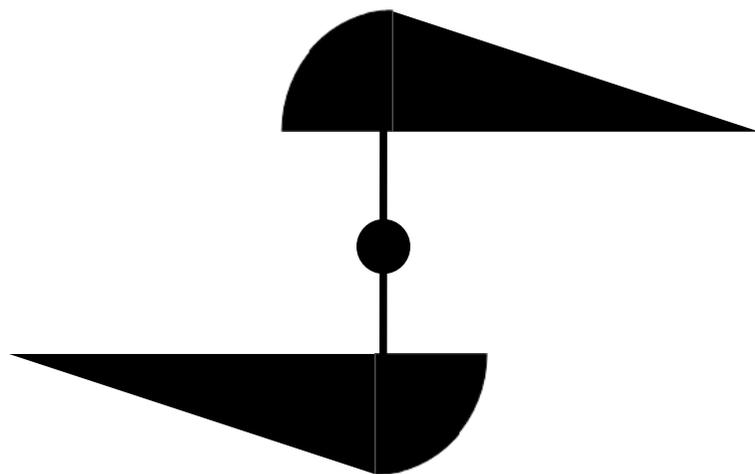
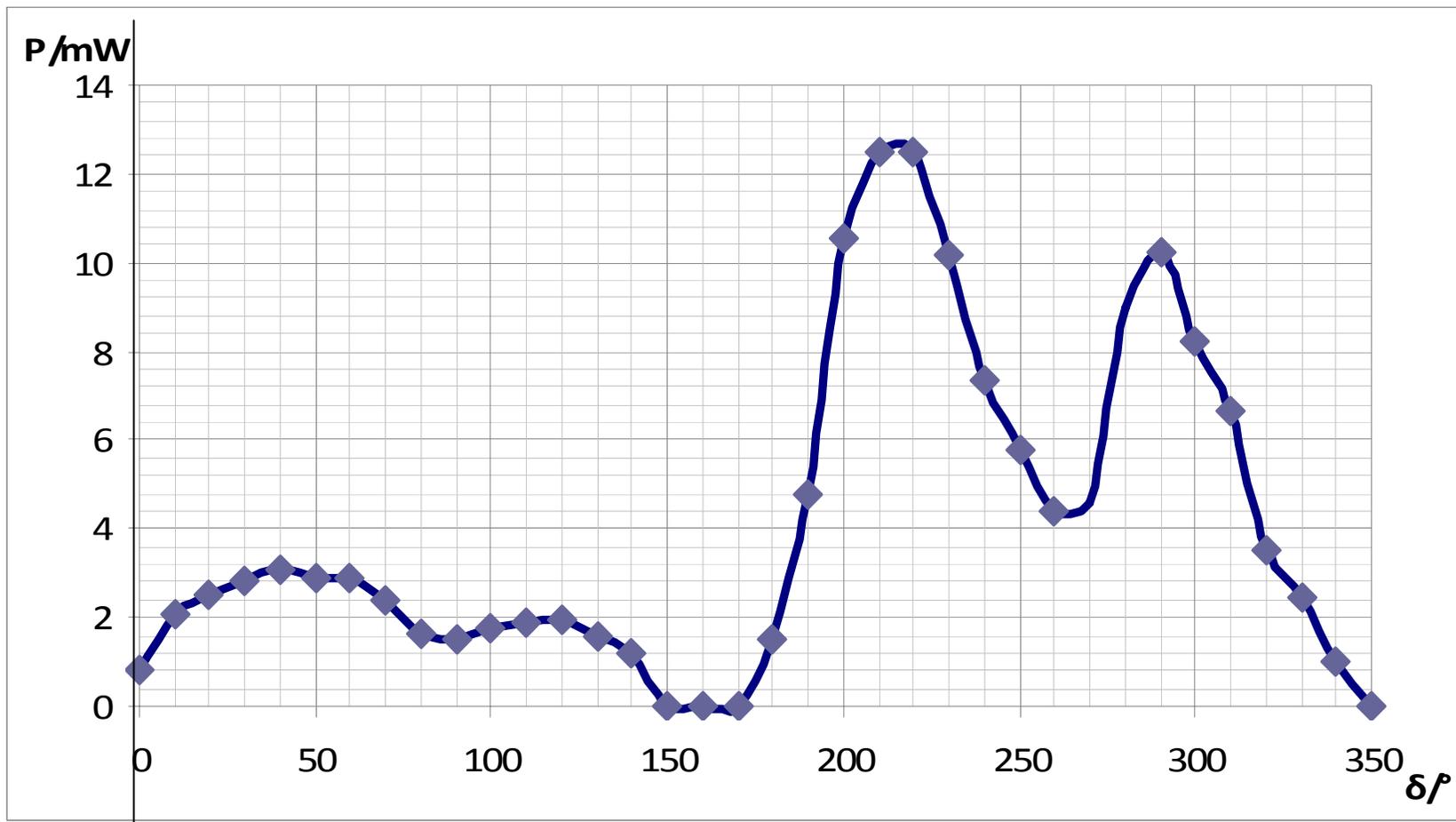


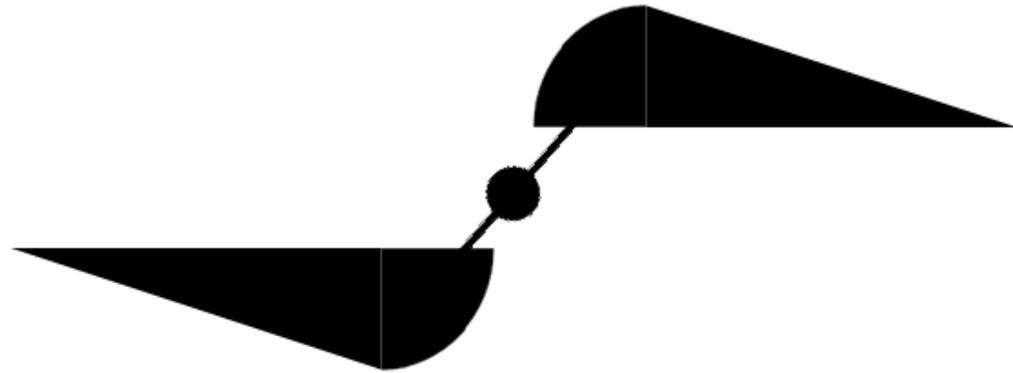
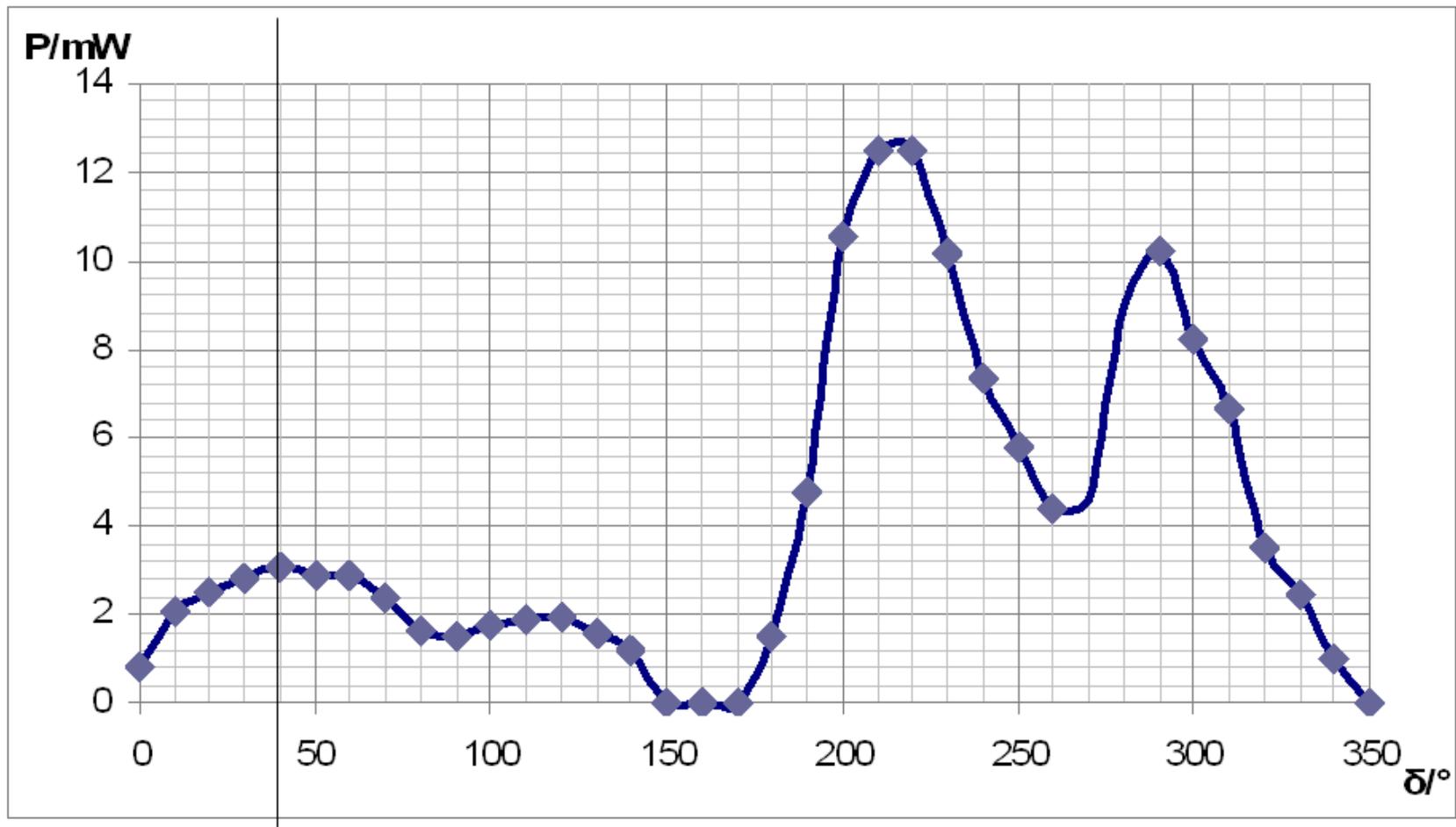
Messergebnisse

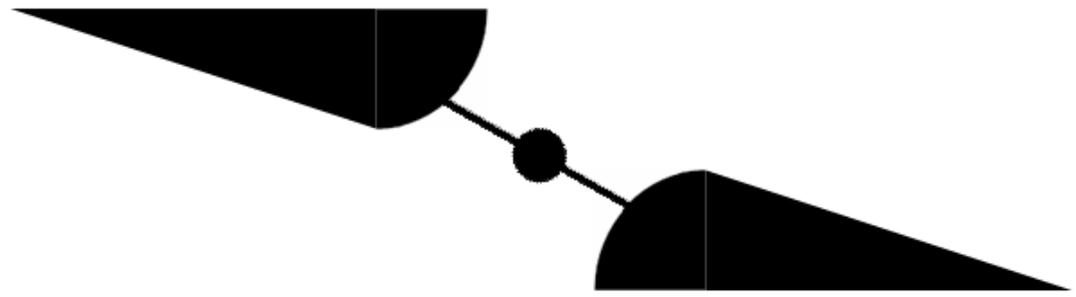
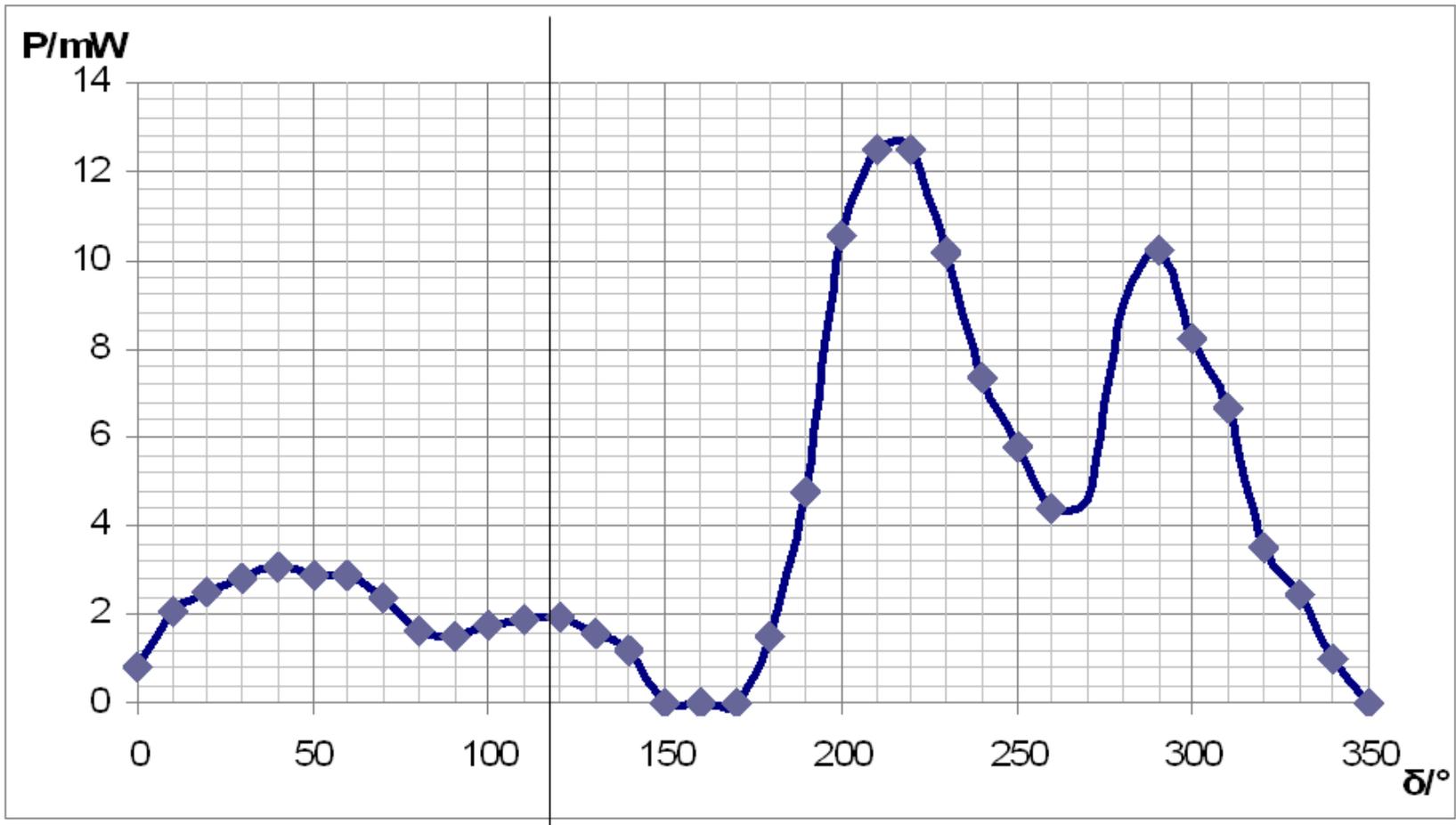


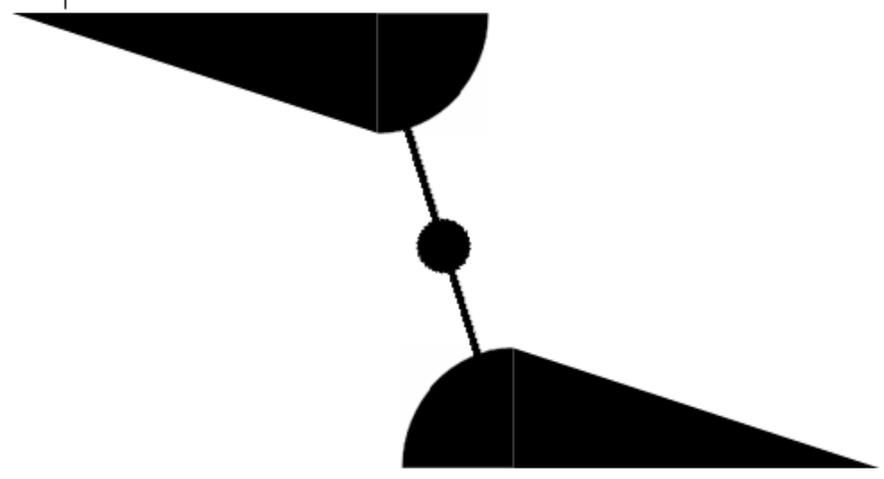
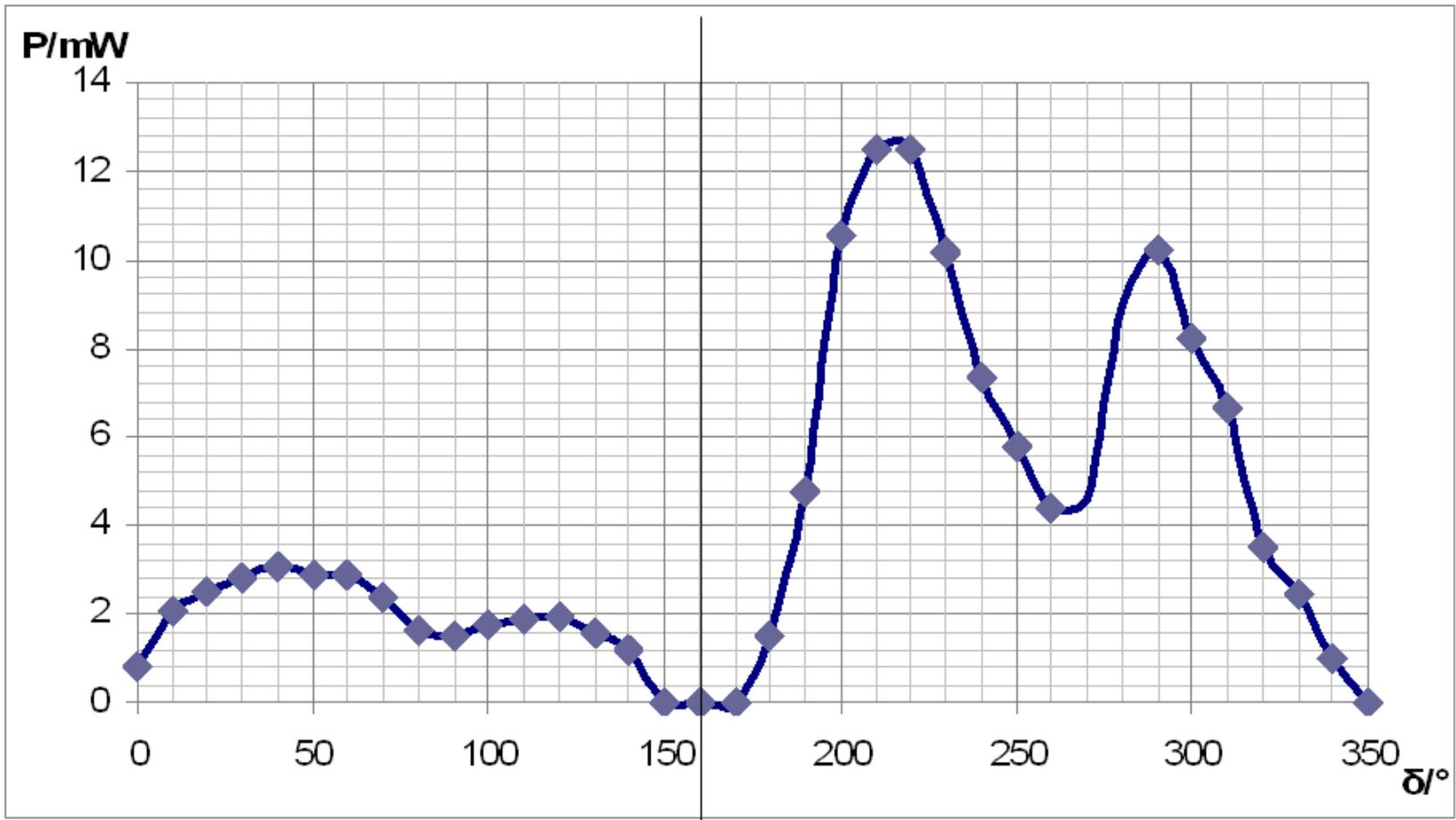
Messergebnisse

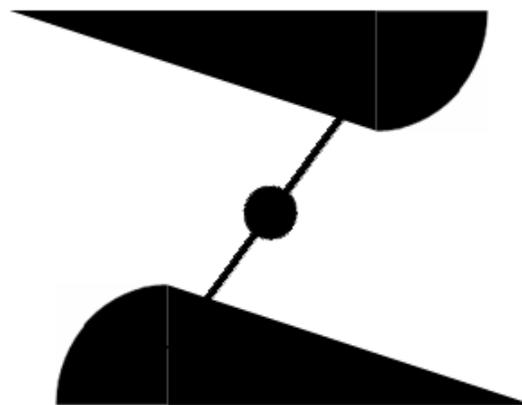
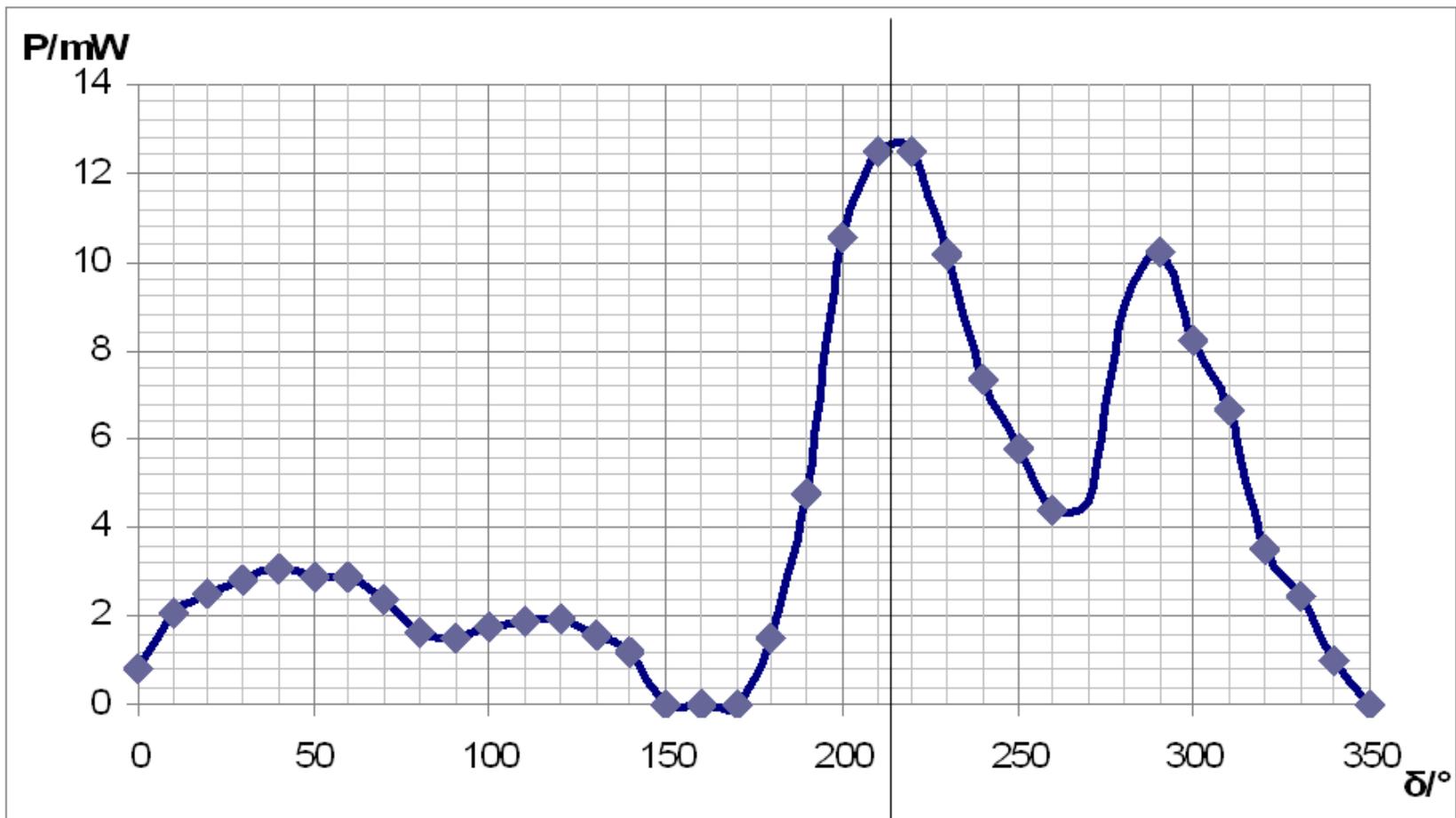


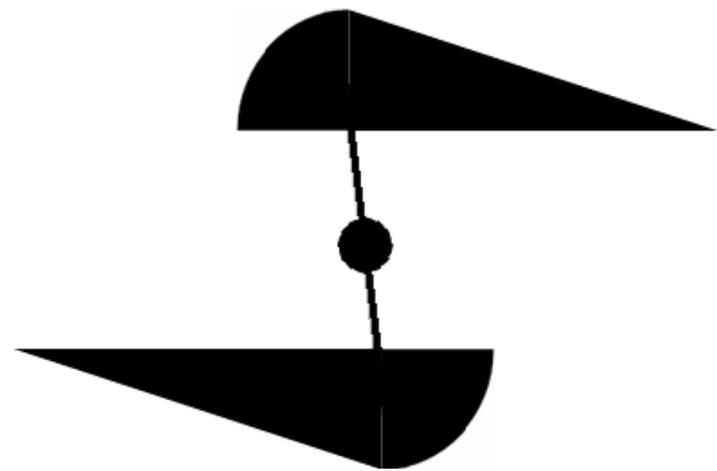
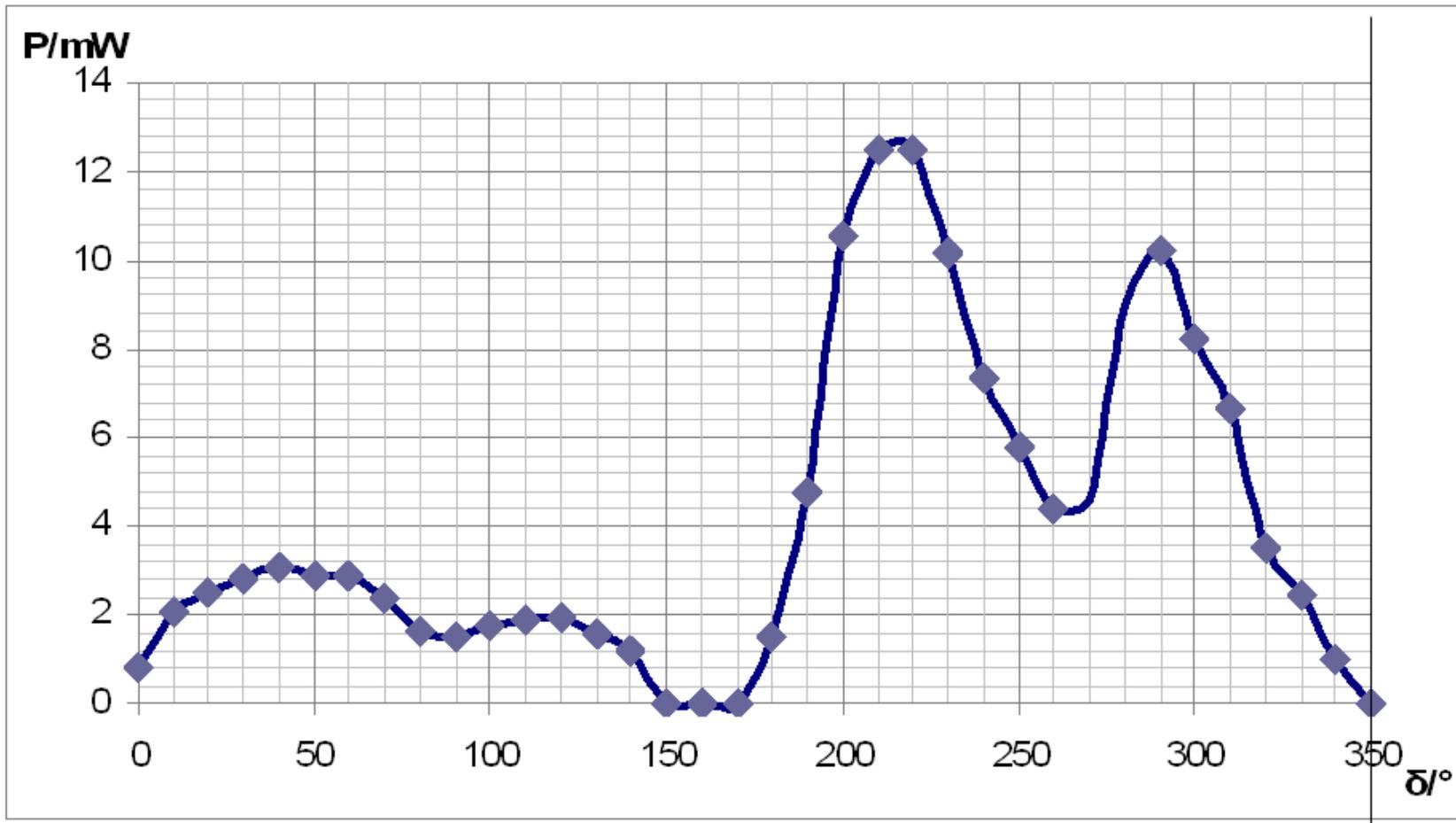












Windgeschwindigkeiten und beste Leistung

- Anlaufgeschwindigkeit $v=7,8$ m/s
- Windgeschwindigkeit vor der Anlage $v=10,9$ m/s
- Windgeschwindigkeit hinter der Anlage $v=9,4$ m/s

Beste Leistung bei

220°

Optimierung

Optimierung des Strömungsprofils:

$P=21,67\text{mW}$ bei 220°

Ohne Optimierung

$P=12,51\text{mW}$ bei 220°

Leistungszuwachs von 73%

Wirkungsgrad

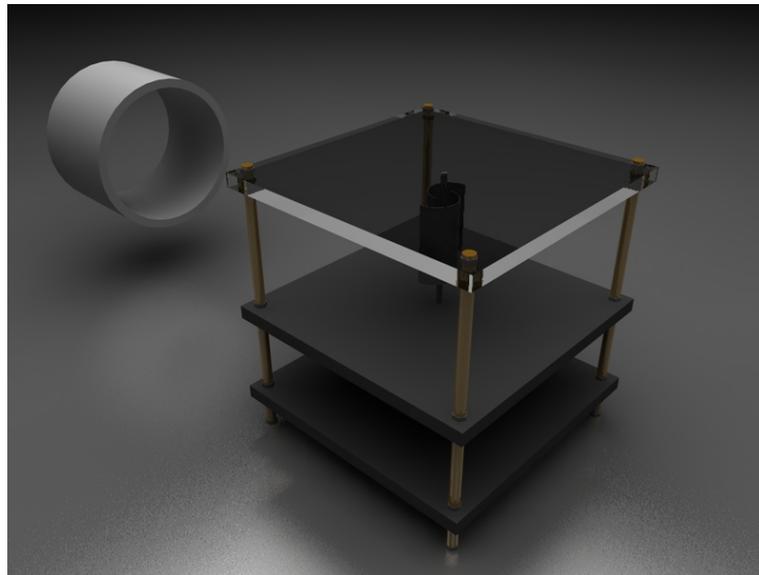
- Maximal erzielte Leistung 21,67mW
- Windnutzungsfläche von 4cm x 12cm
- → Windleistung von $P=3,28W$
- Wirkungsgrad der Anlage 0,38%
- Leistungsbeiwert $c=0,24$

Fehler

- Veränderung des Winkels minimiert durch Winkelmessung vor und nach Windlauf
- Keine exakt waagerechte Ausrichtung
- Welle beeinflusst Strömungsprofil
- Hängt vom Aufhängepunkt ab
- Skalierung

Theoretische Überlegungen

Modell



Original





Verhältnis zwischen Modell und Original

In wie weit kann ein Modell aussagen über das Original machen

Gelten für beide die gleichen physikalischen Gesetze?

Ähnlichkeitstheorie

Mit solchen Fragen setzt sich die Ähnlichkeitstheorie auseinander

Durch so genannte dimensionslose Kennzahlen wird ein physikalischer Vorgang (Original) auf einen Modellvorgang (Modell) zurückgeführt

Uns interessiert zum Beispiel die dimensionslose Reynolds zahl und ein nach Reynolds benannte Gesetz

Ähnlichkeitstheorie

Strömungsmechanik

Reynoldssche Ähnlichkeitstheorie

Aussage:

Strömungen verlaufen am Original und am Modell mechanisch ähnlich, wenn die Reynoldszahlen übereinstimmen

Reynolds-Ähnlichkeit

Wozu wird die Reynolds-Ähnlichkeit verwendet?

Wenn Trägheitskräfte und Zähigkeitskräfte gegenüber der Schwerkraft überwiegen !

$$Re = \frac{v d}{n} = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Zähigkeitskräfte}}$$

v=Strömungsgeschwindigkeit

d=Strömungsdurchmesser

n=Kinematische Viskosität

Reynolds-Ähnlichkeit

Savonius-Profil

Strömungsdurchmesser

$d=0,1 \text{ m}$

Kinematische Viskosität

$\nu=2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$

Strömungsgeschwindigkeit

$v=11 \text{ m/s}$

$Re=60500$

Reynolds-Ähnlichkeit

Annahme: der Savonius steht in der Nähe des Erdbodens

Annahme: die Windgeschwindigkeiten sind ca. 3 m/s

Dann ergibt sich eine Reynoldszahl von $Re(\text{Original})=60000$

$$\frac{Re(\text{Modell})}{Re(\text{Original})} = 1,0083$$

Reynolds-Ähnlichkeit

Was sagt uns die **Erfahrung**?

Savonius-Profil gibt es heutzutage nur für den Hausgebrauch, im durchschnitt sind die Konstruktionen ca. 0,5 m vom Durchmesser

Mit unserem Modell können wir solche Profile analysieren aber darüberhinaus würde unser Modell für größere Konstruktionen nichts über die Strömungsverhältnisse aussagen

Ergebnisse



Ergebnisse

Technische Kenngrößen	Savonius	V-Form	Tragflächen
Ankommende Leistung	6,10 W	5,1 W	3,28 W
Leistungsbeiwert	0,37	0,29	0,24
Mechanische Leistung	2,23 W	1,48 W	0,79 W
Elektrische Leistung	45 mW	15,92 mW	12,67 mW
Wirkungsgrad	0,74%	0,31%	0,38%
Anlaufgeschwindigkeit	3,5 m/s	6,8 m/s	7,8 m/s

Ausbau- und Verbesserungsfähigkeit

- Einsatz der WKA bei turbulenten Verhältnissen
- Vergleich der vertikalen WKA mit der horizontalen WKA
- Verbesserung der Umwandlung von Mechanischer in Elektrische Energie und anschließender Transport (Vergrößerung des Wirkungsgrades)
- Verknüpfung mit dem SOWAS – Projekt (Brennstoffzellen). Energie Gewinnung und Speicherung

Vorteile einer vertikalen WKA

- Unabhängig von Windrichtung (kaum Verlust durch turbulente Strömung, so auch zB auf den Gebäuden einsetzbar)
- Generator kann am Boden platziert werden
- Geringe Wartungskosten und Personalfreundlich

Nachteile einer vertikalen WKA

- Schwingungen und Belastungen der Flügelkonstruktion und deren Halterung durch zyklisch auftretenden Lastwechsel (Unwucht)
- Bestenfalls $\frac{3}{4}$ des Drehkreises kann zur Energieerzeugung genutzt werden

Fragestellung

Untersuchung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit einer vertikalen Windkraftanlage bei verschiedenen Profilen aber gleichem Materialverbrauch

Nach SOWAS Praktikum

Vergleich: Profil 1 und 2 kann man miteinander vergleichen, Profil 3 aber nicht, weil dieser einen völlig anderen physikalischen Effekt ausnutzt

Effizienz: Von den ersten zwei Profilen ist der Savonius der Bessere

Wirtschaftlichkeit: Bei vorhandenem Material für die Rotoren ----> Darrieus-Rotor am besten, da man weniger Oberfläche braucht

SOWAS-Praktikum

Was haben wir daraus gelernt?

Häufig zeigt sich erst bei der Erklärung des Experiments, dass die theoretischen Grundannahmen nicht ausreichend sind (z.B. Darrieus-Rotor)

Die Konstruktionsüberlegungen waren sehr Zeitaufwändig

Nicht exakte Justierung eines Konstrukts führen zu schnellem Verschleiß (Kugellager)

Man ist hinterher viel schlauer 😊

Quellen

Ohne Panik Strömungsmechanik !

Jann Strybny

2. Auflage

Vieweg-Verlag

Technische Strömungslehre

Leopold Böswirth

7. Auflage

Vieweg-Verlag

Wikipedia

Danksagung

Wir bedanken uns bei

Herrn Meyer

Herrn Fischer

Herrn Flötgen

Den Azubis

Frau Paschke

Herrn Viktorin