



Leistung der Nenndorfer Windmühle

Das Bauwerk handwerklicher Fertigungskunst ist im Besitz der Samtgemeinde Holtriem, Landkreis Wittmund. Der Mühlenverein „Mühlenfreunde Holtriem e. V.“ mit seinen Freiwilligen Müllern betreibt die Mühle für Schulen und Besucher in der Tradition des Müllerhandwerks.

Entscheidend für den sicheren Betrieb einer Windmühle sind die Kenntnisse der Freiwilligen Müller von der Windkraft und seinen Wirkungen auf das Gehende Werk. Deshalb hat sich der Verfasser, selbst Freiwilliger Müller, die nachstehende Aufgabe gestellt.

Berechnung der Flügelleistung einer Holländer Windmühle und die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen für die Praxis.

Unter Bezugnahme auf die angegebenen Quellen werden vereinfacht die Windverhältnisse an den Flügeln der **Nenndorfer Windmühle** behandelt und daraus resultierend die Flügelleistung der Windmühle am **Achskopf** der Flügelachse berechnet.

1. Kurzbeschreibung der Windmühle

Bei der Nenndorfer Windmühle aus dem Jahre 1850 und nach einem Brand 1872 wieder aufgebaut, handelt es sich um einen zweistöckigen Galerie-Holländer mit zwei Mahlgängen und einem Peldegang. Die Mühle hat eine Windrose.



Bild: 1

1.1. Bauhöhe

Die Höhe des Flügelkreuzes von der Erde aus beträgt 18 m (mittlere Höhe der Flügel).

Eine gleichmäßige (laminare) Anströmung der Flügel von vorn wird unterstellt.

Die besonderen Einflüsse des Windes in Flügelhöhe durch Turbulenzen oder Unstetigkeit durch Böen bleiben unberücksichtigt.

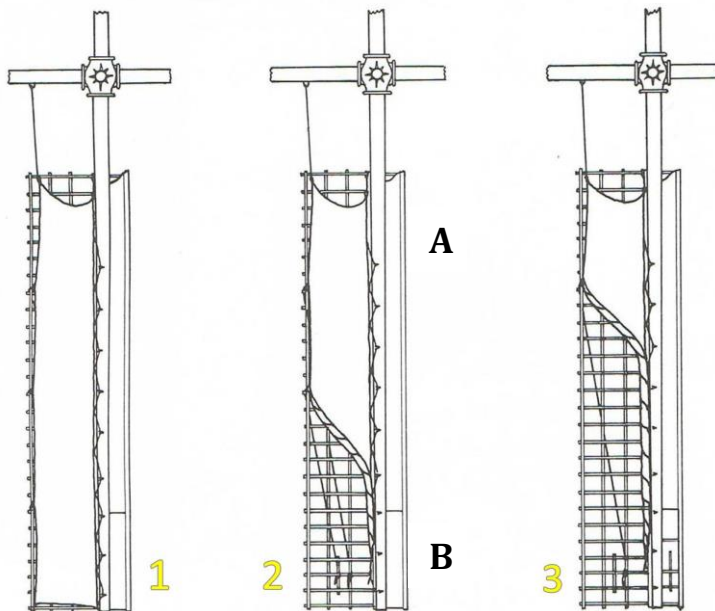
Die Annahme (laminare Anströmung) Sollte für das Ergebnis ausreichend sein. Tatsächlich verringert sich durch Turbulenzen an den Flügeln und Flügelenden die tatsächliche Flügelleistung etwas.

1.2 Flügel

Die Flügelruten (Hausrute, Feldrute) der Nenndorfer Mühle sind aus Stahl.

Die vier Flügel sind am Vorheck mit flachen Wind- und Sturmbrettern aus Holz ausgestattet und am Achterheck mit Segel (Segeltuch) bespannbar.

Bei der Berechnung werden der komplette **Einbau von Wind- und Sturmbrettern** sowie die **vollständige Segelbespannung** (Vull Lien) der vier Flügel unterstellt.



1.2.1. Flügelbelegung

Achterheck

- 1 Vull Seil
- 2 Half Seil
(Half Lien)
- 3 Hooch-Lien

Vorheck

- A. je 2 Windbretter
- B. je 1 Sturmbrett

Bild: 2

1.2.2. Maße eines Flügels

Der einzelne Flügel wird als vollständig geschlossene Fläche betrachtet.



Halbe Rutenlänge (Radius der Flügelkreisfläche):

$$r = 10,5 \text{ m}$$

Abstand des oberen Heckscheites vom Achskreuz:

$$l_1 = 2,3 \text{ m}$$

Breite des Vorhecks (bis Mitte Rute)

$$l_2 = 0,57 \text{ m}$$

Breite des Achterhecks (bis Mitte Rute)

$$l_3 = 1,55 \text{ m}$$

Aus den technischen Abmessungen der Flügel lassen sich berechnen:

a. Flügelkreisfläche A_{kreis} :

$$(1) \quad A_{\text{kreis}} = r^2 \cdot \pi \quad [\text{in m}^2]$$

$$A_{\text{kreis}} = 10,5 \text{ m} \cdot 10,5 \text{ m} \cdot 3,14$$

$$A_{\text{kreis}} = \underline{\underline{346,2 \text{ m}^2}}$$

b. Flügelfläche $A_{\text{flügel}}$ (1 Flügel):

$$(2) \quad A_{\text{flügel}} = (r - l_1) \cdot (l_2 + l_3) \quad [\text{in m}^2]$$

$$A_{\text{flügel}} = (10,5 \text{ m} - 2,3 \text{ m}) \cdot (0,57 \text{ m} + 1,55 \text{ m})$$

$$A_{\text{flügel}} = \underline{\underline{17,4 \text{ m}^2}}$$

2. Wind

Der Wind wird durch die Wahrnehmung der sich verändernden Umgebung beschrieben und seine Geschwindigkeit mit Windmessern gemessen.

Durch Böen und plötzliche Richtungsänderungen kann sich der Wind in seiner Wirkung auf Windmühlen zeitlich begrenzt verstärken oder auch abschwächen.

2.1. Windstärken und Windgeschwindigkeiten:

Tabelle 1 (Quelle: Wikipedia, Beaufort-Skala, verkürzt)

Windstärke Beaufort			Bezeichnung	Kennzeichen des Windes
	km/h	m/s		
0	<1	0-0,2	still	vollkommene Windstille
1	1-5	0,3-1,5	leiser Zug	Rauch steigt fast senkrecht empor
2	6-11	1,6-3,3	leichte Brise	für das Gefühl eben bemerkbar
3	12-19	3,4-5,4	schwache Brise	Blätter werden bewegt, desgleichen leichte Wimpel
4	20-28	5,5-7,9	mäßige Brise	Wimpel werden gestreckt, kleine Zweige werden bewegt
5	29-38	8,0-10,7	frische Brise	größere Zweige werden bewegt, für das Gefühl schon unangenehm
6	39-49	10,8-13,8	starker Wind	große Zweige werden bewegt, Wind an Häusern hörbar
7	50-61	13,9-17,1	steifer Wind	schwächere Baumstämme werden bewegt
8	62-74	17,2-20,7	stürmischer Wind	große Bäume werden bewegt, beim Gehen merkliche Behinderung
9	75-88	20,8-24,4	Sturm	leichtere Gegenstände werden aus ihrer Lage gebracht
10	89-102	25,5-28,4	schwerer Sturm	Bäume werden umgeworfen
11	103-117	28,5-32,6	orkanartiger Sturm	zerstörende Wirkung schwerer Art
12	118-133	32,7-36,9	Orkan	verwüstende Wirkung

Bei der weiteren Berechnung wird eine gleichbleibende Windstärke und -richtung, also eine sich homogen bewegende höhenunabhängige Lufthülle in Bodennähe, unterstellt.

Für Windmühlen gelten folgende maximale Windstärken, mit denen noch ein gut beherrschbarer Betrieb möglich ist:

Kornwindmühlen	Mahlgang	5 bis 6 Beaufort (maximal 7 Beaufort)
	Peldegang	6 bis 7 Beaufort
Wasserschöpfmühlen		bis 8 Beaufort (maximal 9 Beaufort)

Für den Betrieb von Kornwindmühlen durch *Freiwillige Müller* gelten folgende Richtwerte:

1. Holland: bis 7 Beaufort
2. Deutschland: bis 6 Beaufort

Für den Betrieb der **Nenndorfer Mühle** liegt die gut beherrschbare **Windgeschwindigkeit bei 8 bis 10m/s**, (Windstärke 5 Beaufort)

Für die Beurteilung, welche maximale Windstärke für die jeweils eigene Windmühle geeignet bzw. zulässig ist, ist die Bauart Kappe mit Windrose oder Steert mit entscheidend. Windmühlen mit Windrose stehen immer voll im Wind.

Windmühlen mit Steert können dosiert in die jeweilige Windrichtung gekröjt werden, so dass auch bei höheren Windstärken gearbeitet werden kann.

2.2. Windverhältnisse:

Aus langjährigen sorgfältigen Beobachtungen kennt man die **Dauer des Windes** mit nahezu gleichbleibender Windgeschwindigkeit und die vorherrschende **Windrichtung**. Das kann sich allerdings von Jahr zu Jahr ändern.

Dauer des Windes

Tabelle 2

Im Jahr	Geschwindigkeit
Tage	m/s
250 bis 290	3,0 bis 4,0
170 bis 180	5,0
110 bis 120	6,0
60 bis 70	7,0

(Quelle: Wikipedia)

2.3. Windrichtung

In der Tabelle sind die Hauptwindrichtungen wiedergegeben.

Windrichtungen

Tabelle 3

Windrichtung	Tage
Süd-West	67
West	72
Nord-West	48
Nord-Ost	35
Ost	43
Süd-Ost	32
Süd	35

(Quelle: Wikipedia)

Anmerkung:

Die Tabellenwerte sind Durchschnittswerte, die aus Beobachtungen an windigen Standorten in Deutschland gewonnen wurden und nicht für Nenndorf repräsentativ. Die Werte sind für die weitere Berechnung nicht von Bedeutung, sondern dienen lediglich der Orientierung.

3. Physikalische Eigenschaften der Luft

Die Luft ist ein Gemisch verschiedener Gase, deren Moleküle eine von Druck und Temperatur abhängigen Abstand zu einander haben.

Bei steigendem Luftdruck verringert sich der Molekülabstand, während er sich bei steigender Temperatur zu vergrößert.

Die wesentliche Abstandsveränderung wird allerdings durch die sich ändernde Lufttemperatur hervorgerufen, weniger durch den sich ändernden Luftdruck.

Aus dieser Erkenntnis folgt, dass das Volumen von 1 m³ Luft bei tiefen Temperaturen im Winter am schwersten und bei hohen Temperaturen im Sommer am leichtesten ist (siehe: Gesetz von Boyle-Mariotte und Gay Lussac).

3.1. Richtwerte für die Luftdichte in Abhängigkeit von der Lufttemperatur in Bodennähe

Die Tabelle 4 gibt Richtwerte für die Luftdichte ρ in kg/m³ in Abhängigkeit von der Lufttemperatur ϑ in °C unterstellt in geringer geodätischer Höhe, wie es für die Berechnung der Flügelleistung der Nenndorfer Mühle näherungsweise und mit ausreichender Genauigkeit angenommen werden kann.

Für die Berechnung wird näherungsweise eine **Luftdichte** von

$$\rho = 1,247 \text{ kg/m}^3$$

bei einer Lufttemperatur von $\vartheta = 10 \text{ °C}$ unterstellt.

Anmerkung:

Auf die Auswirkungen der sich verändernden Luftdichte durch die schwankenden Lufttemperaturen (z. B. Sommer und Winter) wird im Weiteren noch eingegangen. (siehe Diagramm 1)

Tabelle 4

Temperatur ϑ in °C	Luftdichte ρ in kg/m ³
35	1,146
30	1,164
25	1,184
20	1,204
15	1,225
10	1,247
5	1,269
±0	1,292
-5	1,316
-10	1,341
-15	1,367
-20	1,394
-25	1,422

(Quelle: Physikbuch)

3.2. Luftdruck

Der Luftdruck hat Einfluss auf die Dichte der Luft. Allerdings ist der Einfluss im Verhältnis zur Temperatur für diese Berechnung gering, er wird deshalb bei der Flügelkreuzhöhe von 18 m vernachlässigt und nicht besonders berücksichtigt.

Mit der Festlegung der Luftdichte $\rho = 1,247 \text{ kg/m}^3$ in Bodennähe ist der Luftdruck hinreichend berücksichtigt.

Wichtig für den Müller:

Der sich verändernde Luftdruck hat Einfluss auf die bevorstehenden Windverhältnisse, z.B. bei schnell fallendem Luftdruck sind starker Wind, Sturm oder Orkan und dadurch eine schnell zunehmende Windgeschwindigkeit die Folge.

4. Windverhältnisse an den Flügeln der Mühle

Wie jedermann beobachten kann und weiß, dass eine flache Holzplatte, die an einer drehbaren Achse dem Wind im rechten Winkel entgegengestellt wird, keine Drehbewegung ausführt, sondern eher umfällt. Erst wenn die Platte eine Verdrehung zum Wind erhält und der Wind schräg zur Platte einfällt, kommt eine Drehbewegung zustande.

Windmühlenflügel sind schräg gestellt und so geformt, dass der Wind vom unteren Flügelende zur Flügelachse und zusätzlich hinter den in der Drehbewegung kommenden Nachbarflügel, ohne auf Hindernisse zu stoßen, gelenkt wird. Somit ist gewährleistet, dass der Winddruck auf die gesamte Flügelfläche wirken und ungehindert abströmen kann bzw. die Flügel sich in den Wind drehen können. Die Schrägstellung der Flügelachse um 10 Grad aus der Horizontalen begünstigt ebenfalls die Ausnutzung des einfallenden Windes.

Bild: 4



Der Wind wird durch die Schrägstellung der Flügel hinter die sich drehenden Folgeflügel gelenkt, was das Abströmen des Windes begünstigt und den Folgeflügel nicht bremst.

Ist das ungestörte Abströmen des Windes über und hinter die Folgeflügel nicht gewährleistet, kommen z. B. Segel ins Flattern und damit Flügel in Schwingung. Das führt zu Leistungsverlusten und zusätzlich zu erhöhten, unzulässigen Materialbelastungen.

5. Einfluss der Flügelgröße

(siehe Werner Schnelle, Windmühlenbau, Seite 22 ff.)

„Wegen der besseren Windverhältnisse in den Küstenländern wurden um die Wende des vorletzten Jahrhunderts (um 1900) in Dänemark umfangreiche Untersuchungen über die Leistungsfähigkeit des Windes durchgeführt. Die dänische Regierung beauftragte den Professor la Cour mit diesen Arbeiten.

Die Untersuchungen wurden mit unterschiedlichen Versuchswindrädern durchgeführt. Bei diesen Windrädern bedeckte die Flügelfläche z. B. ein Drittel, ein Sechstel und ein Zwölftel der gesamten Kreisfläche, die die Flügel durchlaufen.

So brachte das Flügelkreuz

mit einer Flügelfläche von 11 m^2 eine Leistung von 1,8 PS,

mit einer Flügelfläche von 30 m^2 eine Leistung von 1,7 PS,

und mit einer Flügelfläche von 75 m^2 eine Leistung von 1,6 PS.

Dies bedeutet, je offener ein Flügelwerk ist, umso besser wird der Wind ausgenutzt. Die Schlussfolgerungen von Professor la Cour waren, dass die alte Windmühlenform mit den vier Flügeln die Leistungsfähigkeit des Windes am besten ausnutzt.“

Die Flügelform, Flügelgröße und Schrägstellung von Vor- und Achterheck an den Windmühlen ergab sich aus den Beobachtungen und Erfahrungen der Müller, die ihre Erkenntnis an den Mühlenbauer weitergaben. Der setzte sie dann beim Bau neuer Windmühlen um. So ergaben sich über die Jahrhunderte eine optimierte Flügelform und damit verbunden auch die Schrägstellung der Flügelachse um 10° gegenüber der Horizontalen. Traditionell wurden Windmühlen mit vier Flügeln gebaut (*je offener das Flügelwerk, desto besser* s.o.), Mühlen mit fünf Flügeln sind eine seltene Ausnahme.

Setzt man bei der Nenndorfer Mühle die **Flügelfläche ins Verhältnis zur Flügelkreisfläche**, s. Rechnungen (1) und (2) ergibt sich ein

Verhältnis von 1 : 20

Also ein strömungstechnisch günstiges Verhältnis.

Die Flügel der Nenndorfer Mühle sind in der Vergangenheit mehrfach umgebaut worden (Jalousien – Segel, Holzruten mit Bruststücken und Flügelrute, heute Stahlruten aus Corten-Stahl). Da die Mühle nicht mehr gewerbsmäßig betrieben wird, kann man davon ausgehen, dass die Flügelform und –konstruktion nicht unbedingt optimiert wurde. Trotzdem weist das Flügelverhältnis ein günstiges aus.

6. Berechnung der Leistung des Windes

6.1. Grundlagen

Die aus dem Windangebot umsetzbare Leistung lässt sich aus dem kinetischen Leistungsangebot des Massenstromes (Wind) errechnen.

Bei der anfänglichen Betrachtung bleibt der Wirkungsgrad der Flügel unberücksichtigt.

Kinetisches Leistungsangebot des Windes:

$$(3) \quad P = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 \quad [\text{in W}]$$

Es sind

- P Leistung in W (Watt)
- \dot{m} Massenstrom in kg/s (Kilogramm pro Sekunde)
- v Windgeschwindigkeit in m/s (Meter pro Sekunde)

Der Massenstrom beschreibt die Luftmasse des Windes, die pro Zeiteinheit auf die Flügelfläche trifft.

Für den Massenstrom gilt:

$$(4) \quad \dot{m} = \rho v A \quad [\text{in kg/s}]$$

Es sind:

- \dot{m} Massenstrom in kg/s (Kilogramm pro Sekunde)
- ρ Luftdichte in kg/m³ (Kilogramm pro Kubikmeter)
- v Windgeschwindigkeit in m/s (Meter pro Sekunde)
- A Flügelfläche, auf die der Wind trifft, in m² (Quadratmeter)

Aus (3) und (4) ergibt sich die **theoretische kinetische Leistung $P_{\text{theoretisch}}$ des Windes**, der auf die Flügelfläche **A** mit der Windgeschwindigkeit **v** trifft:

$$(5) \quad P_{\text{theoretisch}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad [\text{in W}]$$

Es sind:

- $P_{\text{theoretisch}}$ theoretische Flügelleistung in W (Watt)
- ρ Luftdichte in kg/m^3
- A Flügelfläche, auf die der Wind trifft, in m^2
- v Windgeschwindigkeit in m/s

6.2. Wirkungsgrad

Bei der weiteren Betrachtung der Windleistung muss der **Wirkungsgrad η** der Flügel berücksichtigt werden. Reibungsverluste des Windes an den Flügeln, die Umlenkverluste des Windstromes an den Flügeln und Strömungsverluste an den rauen Kanten verringern die Leistung, die tatsächlich an der Flügelwelle als nutzbare Flügelleistung zur Verfügung steht.

Der **Wirkungsgrad** ist das Verhältnis von nutzbarer Flügelleistung und theoretischer Flügelleistung.

$$(6) \quad \eta = \frac{P_{\text{nutz}}}{P_{\text{theoretisch}}} \quad [\text{dimensionslos}]$$

Es sind:

- η Wirkungsgrad
- P_{nutz} nutzbare Flügelleistung in W (Watt)
- $P_{\text{theoretisch}}$ theoretische Flügelleistung in W (Watt)

Der Wirkungsgrad η ist eine dimensionslose Zahl und kleiner als 1.

Die Untersuchungen des dänischen Wissenschaftlers Professor la Cour haben ergeben, das ein Wirkungsgrad von

$$\eta = 0,53$$

beim Versuchsobjekt gegeben war. (siehe Werner Schnelle, Windmühlenbau, Seite 23, ff.)

Im Versuchsfall war die nutzbare Flügelleistung nur 53% von der theoretischen Flügelleistung.

6.3. Nutzbare Flügelleistung

Aus (6) ergibt sich: $P_{\text{nutz}} = \eta P_{\text{theoretisch}} \quad [\text{in W}]$

Zur Bestimmung der **nutzbare Flügelleistung P_{nutz}** ist die Formel (5) um den Wirkungsgrad η zu erweitern. Somit ergibt sich aus (5) und (6):

$$(7) \quad P_{\text{nutz}} = \frac{1}{2} \eta \rho A v^3 \quad [\text{in W}]$$

Es sind:

- P_{nutz} nutzbare Flügelleistung in W (Watt)
- η Wirkungsgrad der Windflügel
- ρ Luftdichte in kg/m^3 (Kilogramm pro Kubikmeter)
- A Flügelfläche, auf die der Wind trifft, in m^2 (Quadratmeter)
- v Windgeschwindigkeit in m/s (Meter pro Sekunde)

6.4. Wirkungsgrad der Windmühlenflügel der Nenndorfer Mühle

Für die weitere Berechnung der nutzbaren Flügelleistung P_{nutz} wird für die Nenndorfer Mühle ein Wirkungsgrad von

$$\eta = 0,5$$

unterstellt.

Der genaue Wirkungsgrad der Nenndorfer Mühle lässt sich nur durch einen Versuchsaufbau und Messungen an der Flügelachse bestimmen.

6.5. Rechnung

Die physikalischen Werte des Windes, die in den vorstehenden Ausführungen angenommen wurden, sind für

η	Wirkungsgrad der Windflügel	: 0,5
ρ	Luftdichte in kg/m^3	: 1,247 kg/m^3
A	Flügelfläche, auf die der Wind trifft, in m^2	: 17,4 m^2 pro Flügel
v	Windgeschwindigkeit in m/s	: 8 m/s

werden diese Werte in die Formel (7) eingesetzt, ergibt sich:

$$P_{\text{nutz}} = \frac{1}{2} \times 0,5 \times 1.247 \text{ kg/m}^3 \times 4 \times 17,4 \text{ m}^2 \times (8 \text{ m/s})^3$$

als Ergebnis die nutzbare Flügelleistung in Watt (W)

$$P_{\text{nutz}} = 11.109,3\text{W}$$

oder

$$P_{\text{nutz}} = \underline{\underline{11,1 \text{ kW}}}$$

6.6. Ergebnis

Die **nutzbare kinetische Windleistung** an der Flügelachse beträgt unter den angenommenen physikalischen Windbedingungen

$$\underline{\underline{11,1 \text{ kW.}}}$$

(Die Leistungsangaben wurde früher in Pferdestärken (PS) angegeben. Die nutzbare kinetische Leistung an der Flügelachse beträgt **15,1 PS.**)

Die Rechnung ergibt nur einen Arbeitspunkt der Mühle wieder. Der Wind weht aber an den verschiedenen Tagen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (siehe Tabellen 2 und 3). Somit ist die nutzbare Flügelleistung bei höheren Windgeschwindigkeiten größer. Die Abhängigkeit der nutzbaren Flügelleistung von der Windgeschwindigkeit lässt sich am besten in einem Diagramm veranschaulichen.

7. Diagramm (in kW)

Das Diagramm 1 zeigt die Abhängigkeit der nutzbaren **Flügelleistung P_{nutz} in kW** von der **Windgeschwindigkeit v in m/s** bei unterschiedlichen Lufttemperaturen.

Erklärung:

Die Tabelle 4 zeigt die Abhängigkeit der Luftdichte von der Lufttemperatur.

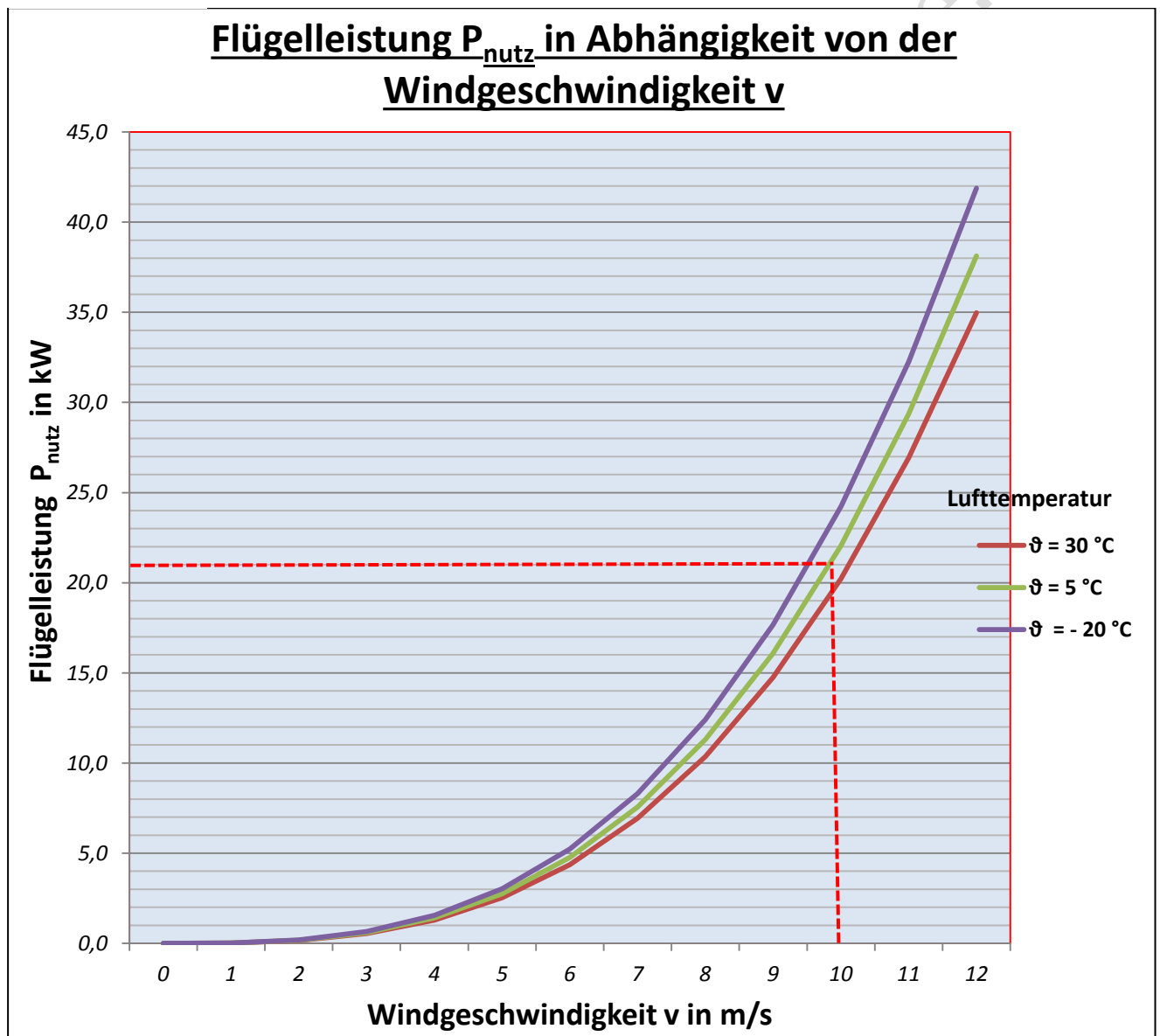
So liegt im Diagramm 1 für die

Kennlinie $\vartheta = 30\text{ °C}$ eine Lufttemperatur von $\vartheta = 30\text{ °C}$ mit einer Luftdichte ρ mit $1,164\text{ kg/m}^3$

Kennlinie $\vartheta = 5\text{ °C}$ eine Lufttemperatur von $\vartheta = 5\text{ °C}$ mit einer Luftdichte ρ mit $1,269\text{ kg/m}^3$

Kennlinie $\vartheta = -20\text{ °C}$ eine Lufttemperatur von $\vartheta = -20\text{ °C}$ mit einer Luftdichte ρ mit $1,394\text{ kg/m}^3$ zugrunde.

Diagramm 1



Bei einer Windgeschwindigkeit von **10m/s** (Windstärke 5-6) und einer Lufttemperatur von 5 °C beträgt die Leistung der Windmühlenflügel **22 kW**.

8. Diagramm (in PS)

Für die Vorstellung der Flügelleistung kann die Angabe in PS (alte gebräuchliche Maßeinheit) hilfreicher sein.

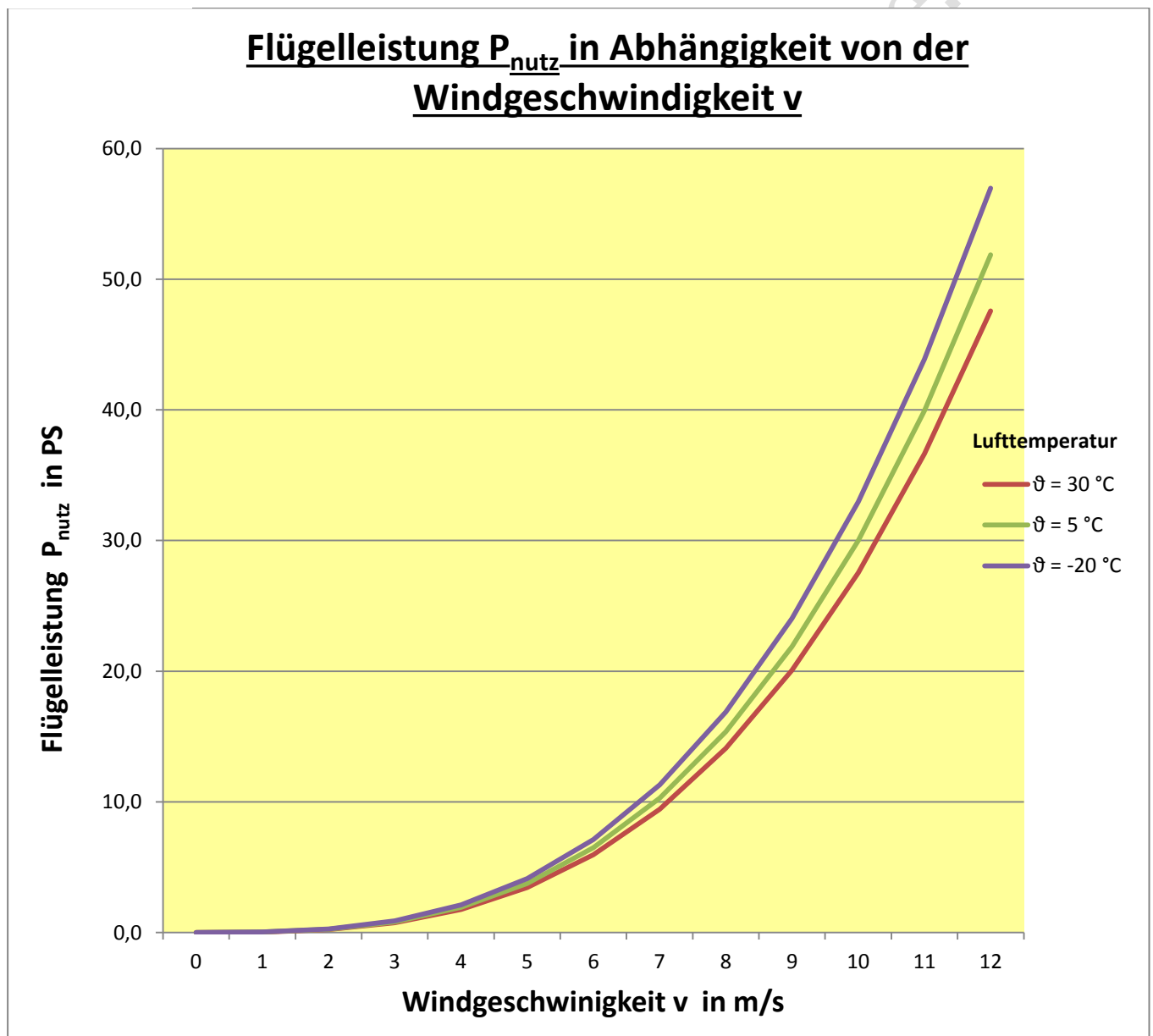
Das Diagramm 2 zeigt die Abhängigkeit der nutzbaren **Flügelleistung P_{nutz} in PS** von der **Windgeschwindigkeit v in m/s** bei unterschiedlichen Lufttemperaturen.

(PS ist eine alte, für die Müller verständlichere Leistungsangabe: 0,735 kW entsprechen einer Pferdstärke PS)

Erklärung:

Im Diagramm 2 liegen für die Luftdichte ρ die gleichen Parameter für die Kennlinien zugrunde, wie beim Diagramm 1.

Diagramm 2



Bei einer Windgeschwindigkeit von **10 m/s** (Windstärke 5-6) und einer Lufttemperatur von 5 °C beträgt die Leistung der Windmühlenflügel **30 PS**.

9. Diskussion

In der Folge soll der Versuch unternommen werden, die Ergebnisse der Rechnung mit den angenommenen physikalischen Windeigenschaften für den praktischen Gebrauch nutzbar zu machen. Dabei wird die **Nenndorfer Mühle** mit ihrer **anlagentechnischen Ausgestaltung** als **Grundlage** genommen.

Windrichtung

Die Nenndorfer Mühle hat eine Windrose, die die Kappe und damit die Flügel automatisch immer in die volle Windrichtung stellt und damit für den größtmöglichen Antrieb durch die Flügel sorgt.

Bei Mühlen mit Steert werden die Flügel von Hand in den Wind gedreht. Damit ist eine Dosierung des Winddruckes auf die Flügel, also auch eine Verminderung, möglich.

Der Betrieb einer Windmühle mit Windrose und Segel auf den Flügeln setzt Weitsicht bei der Wetterbeurteilung und unverzügliche Reaktion durch den Müller bei schnellen Windänderungen voraus.

Windgeschwindigkeit

Die optimale Windgeschwindigkeit liegt bei Windstärke 5 bis maximal 6, die gut beherrschbare Windgeschwindigkeit bei 10 Meter pro Sekunde. Darüber hinaus ist der Betrieb der Nenndorfer Windmühle mit Segelbespannung sehr kritisch.

Die Windgeschwindigkeit beeinflusst die Flügelleistung mit der dritten Potenz, das heißt eine Zunahme des Windes um 15 % von 7 auf 8 m/s hat eine Leistungssteigerung um 50 % zur Folge (siehe Formel (6)).

Umdrehungszahl der Flügelachse

Die Umdrehungszahl der Flügelachse ist abhängig von der Belastung der Mühle. Mit zunehmender Last verringert sich die Umdrehungszahl.

Bei zunehmenden Wind und gleich bleibender Last erhöht sich die Drehzahl der Flügel.

Die Umdrehungszahl der Flügelachse sollte 20 Umdrehungen pro Minute, das sind 20 Flügelschläge pro 15 Sekunden, nicht überschreiten.

Der Müller zählt die Flügelschläge, weil er den Flügelschatten beim Mahlen in der Mühle sehen kann.

Hohe Umdrehungszahlen können beim Bremsen der Flügel hohe Reibungskräfte und damit eine starke Erwärmung der Bremse bis zum Entstehen eines Schwelbrandes bewirken. Nach einem schwierigen Bremsvorgang ist der Fang (Bremse) zu kontrollieren.

Der Fang (Bremsfläche von Kammrad und Fangstücken) sollte mit Sand oder Grid bestreut werden, damit die Bremswirkung verstärkt und die Bremszeit verkürzt wird.

Beim Bremsen ist zu beachten, dass der eingelegte Mahlgang oder Peldegang die Schwungmasse des Gehenden Werkes beträchtlich gegenüber dem Leerlauf verstärkt.

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad der Flügel und des Flügelachsensystems ist ohne Messung nicht zu bestimmen. Als Näherung dienen Annahmen, die dem tatsächlichen Wirkungsgrad sehr nahe kommen. Bei der Nenndorfer Mühle wurde ein Wirkungsgrad von $\eta = 0,5$ unterstellt.

Allerdings ist der Wirkungsgrad über den gesamten Leistungsbereich keine konstante Größe, er nimmt mit steigender Drehzahl der Flügel und damit bei höheren Windgeschwindigkeiten ab,

da die Strömungsverluste des Windes über die Flügel und dem dahinterliegenden Achtkant größer werden. Damit ist auch die Leistung der Flügel bei starkem Wind begrenzt.

Leistung der Flügel

Entscheidend wird die Leistung von der Flügelfläche bestimmt, die sich dem Wind entgegenstellt.

Die Flügelfläche der Nenndorfer Mühle wird von der Art der Segelbespannung (z. B. Half Lien, Vull Lien) oder dem Einlegen der Sturmbretter bestimmt.

Während des Betriebes mit Segeltuch kann die Flügelfläche, wie es bei Jalousien der Fall ist, nicht verändert werden. Eine Veränderung der Segelbespannung ist nur im Stillstand möglich. Das hat zur Folge, dass der Müller bei aufkommenden Böen oder Gewitter unverzüglich und im Voraus handeln muss.

Da die Flügelfläche linear in die Berechnung der Flügelleistung eingeht, bedeutet die Verringerung der Flügelfläche um die Hälfte durch Einholen der Segel auch eine Reduzierung der Flügelleistung auf die Hälfte.

Dichte der Luft

Die Dichte der Luft wird durch die Lufttemperatur bestimmt (siehe Tabelle 4).

Die Dichte der Luft ist im Winter bei tiefen Temperaturen wesentlich höher als bei sommerlichen Temperaturen. Die höhere Luftdichte im Winter von 1,37 kg/m³ gegenüber dem Sommer von 1,20 kg/m³ (Zunahme um 15 %) hat auch eine Leistungssteigerung von 15 % zur Folge.

Kalte Ostwinde sind in der Regel gleichmäßig und weniger böig als die Winde im Sommer.

Der Winter mit kräftigen kalten Ostwinden war bei den Müllern zum Pellen von Getreide beliebt und das aus zwei Gründen.

Erstens: Die Flügelleistung war höher, was beim Pellen von Vorteil ist.

Zweitens: Der Pellvorgang erwärmte das gepellte Getreide, die Grütze. Die warmen Säcke mit der Grütze waren für den Müller in der kalten Mühle so gut wie heute eine Rheumadecke, auf die er seinen kalten und von Rheuma geplagten Körper während des Pellvorganges erwärmen konnte

10. Schlußbemerkung

Für Anregungen, Verbesserungen oder Korrekturen ist der Verfasser dankbar.

Email an: muehlenfreunde@muehle-nenndorf.de

Datum: 20. Oktober 2013
Verfasser: Erich Böhm, Nenndorf, Mühlenfreunde Holtriem e. V.
Quellen: Werner Schnelle; Windmühlenbau (1. Auflage 1991)
Böge: Das Techniker Handbuch (8. Auflage)
Wikipedia; Windenergie (Stand: 24.02.2013)
Fotos: Erich Böhm, Nenndorf