



Technische  
Universität  
Braunschweig

**IMAB** Institut für Elektrische Maschinen,  
Antriebe und Bahnen  
TU Braunschweig



# Grundlagen der elektrischen Energietechnik

## Teil 2: Elektromechanische Energieumformung

### 1. Übung: Energieumformung

SoSe 2024

Prof. Dr.-Ing. Markus Henke, Tim-H. Dietrich ([t-h.dietrich@tu-braunschweig.de](mailto:t-h.dietrich@tu-braunschweig.de))

# Aufgabe 1

Füllen Sie die Tabelle aus.

	Motorisch	Generatorisch
Verhältnis von $P_{mech}$ zu $P_{el}$	$P_{el} > P_{mech}$	$P_{mech} > P_{el}$
Definition des Wirkungsgrades $\eta$	$\eta_{Mot} = \frac{P_{mech}}{P_{el}}$	$\eta_{gen} = \frac{P_{el}}{P_{mech}}$
Anwendungsbeispiele	Elektromotoren Zugantriebe (ICE) E-Scooter	Windkraftanlagen Elektroauto Pumpspeicher- kraftwerke

Quizfrage: Können E-Bikes rekuperieren?

# Aufgabe 2

Sie wollen eine Offshore Windkraftanlage mit 10 MW Anschlussleistung bauen. Sie können sich zwischen einem Rotor mit Permanentmagneten und einem mit einer Feldwicklung entscheiden. Ihr Projektleiter gibt Ihnen die Daten der Tabelle.

2.1 Wie hoch sind ihre Investitionskosten?

$$I_{\text{min}} = 10 \text{ MW} \cdot 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{€}}{\text{MW}} = 25 \text{ Mio €}$$

$$I_{\text{max}} = 10 \text{ MW} \cdot 4 \cdot 10^6 \frac{\text{€}}{\text{MW}} = 40 \text{ Mio €}$$

2.2 Welchen Umsatz würden sie idealerweise mit der Anlage erwirtschaften?

jährlich:  $U_a = 10.000 \text{ kW} \cdot 4500 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 0,3 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 13,5 \text{ Mio €}$

Lebensdauer:  $U_{\text{ges}} = 13,5 \frac{\text{Mio €}}{\text{a}} \cdot 20 \text{ a} = 270 \text{ Mio €}$

2.3 Welche Wirkungsgrade haben die Motorvarianten?

$$\eta = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{mech}}} = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{el}} + P_{\text{v}}}$$

$$\eta_{\text{PM}} = \frac{10.000 \text{ kW}}{10.000 \text{ kW} + 400 \text{ kW}} = 96,2 \%$$

$$\eta_{\text{FW}} = \frac{10.000 \text{ kW}}{10.000 \text{ kW} + 700 \text{ kW}} = 93,5 \%$$

Investitionskosten	2,5 ... 4 Mio €/MW
Volllaststunden	4500 h/a
Lebensdauer	20 Jahre
Einspeisevergütung	30 ct/kWh
Verluste PM-Rotor	400 kW
Verluste FW-Rotor	700 kW



## Aufgabe 2

Sie wollen eine Offshore Windkraftanlage mit 10 MW Anschlussleistung bauen. Sie können sich zwischen einem Rotor mit Permanentmagneten und einem mit einer Feldwicklung entscheiden. Ihr Projektleiter gibt Ihnen die Daten der Tabelle.

2.4 Wie viel Umsatz würde Ihnen mit den Motorvarianten jeweils durch Verlustleistung entgehen?

$$U_{V_{PM}} = 400 \text{ kW} \cdot 4500 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 20 \text{ a} \cdot 0,3 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 10,8 \text{ Mio €}$$

$$U_{V_{FW}} = 700 \text{ kW} \cdot 4500 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 20 \text{ a} \cdot 0,3 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 18,9 \text{ Mio €}$$

Investitionskosten	2,5 ... 4 Mio €/MW
Volllaststunden	4500 h/a
Lebensdauer	20 Jahre
Einspeisevergütung	30 ct/kWh
Verluste PM-Rotor	400 kW
Verluste FW-Rotor	700 kW

## Aufgabe 2

Sie wollen eine Offshore Windkraftanlage mit 10 MW Anschlussleistung bauen. Sie können sich zwischen einem Rotor mit Permanentmagneten und einem mit einer Feldwicklung entscheiden. Ihr Projektleiter gibt Ihnen die Daten der Tabelle.

Investitionskosten	2,5 ... 4 Mio €/MW
Volllaststunden	4500 h/a
Lebensdauer	20 Jahre
Einspeisevergütung	30 ct/kWh
Verluste PM-Rotor	400 kW
Verluste FW-Rotor	700 kW

2.5 Was kostet Sie eine Wirkungsgradeinbuße von weiteren 0,5 Prozentpunkten bezogen auf  $\eta_{PM}$  aus Aufgabe 2.3 jährlich bzw. auf die Lebensdauer?

Wie viele Haushalte (Energiebedarf 3190 kWh/a) könnten Sie mit der dadurch entgangenen Energie versorgen?

$\eta_{PM} = 96,2\%$  (Aufgabe 2.3) Annahme  $P_{mech}$  gleich  $P_{mech}$  in Aufg. 2.3

$\eta_{PM_{neu}} = 95,7\% \rightarrow P_{el_{neu}} = \eta_{PM_{neu}} \cdot P_{mech} = 0,957 \cdot 10.400 \text{ kW}$

$= 9.952,8 \text{ kW}$

$\rightarrow$  zusätzliche Verluste:  $47,2 \text{ kW}$

Annaherückgabe  $\cdot U_{V0,5a} = 47,2 \text{ kW} \cdot 4500 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 0,3 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 63720 \frac{\text{€}}{\text{a}}$

$\rightarrow U_{V0,5ges} = 63720 \frac{\text{€}}{\text{a}} \cdot 20 \text{ a} = 1,27 \text{ Mio €}$

# Aufgabe 3

$$N_{\text{Hauptstrahl}} = \frac{47,2 \text{ MW} \cdot 4500 \frac{\text{h}}{\text{a}}}{3190 \text{ kWh/a}} = 66,6 \text{ Hauptstrahl}$$

Sie besitzen einen Airbus A320 (MTOW = 89 t) und wollen von 63 km/h auf 252 km/h in 40 s beschleunigen.

3.1 Welche Beschleunigung liegt vor?

$$a = \frac{V_2 - V_1}{t} = \frac{\frac{252}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}} - \frac{63}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}}}{40 \text{ s}} = 1,31 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



3.2 Sie wollen die Turbinen gegen Elektromotoren austauschen, welche Leistung müssen die Motoren allein für die Beschleunigung aufweisen?  $= 8,16 \text{ MW}$

$$F = m \cdot a = 89.000 \text{ kg} \cdot 1,31 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 116.590 \text{ N} \quad P = F \cdot v = 116.590 \text{ N} \cdot \frac{252}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

3.3 Sie haben die Wahl zwischen verschiedenen E-Maschinen. Was bedeutet die jeweilige Wahl für ihre Verluste und somit ihr Kühlsystem?

$$\eta = \frac{P}{P + P_V} \rightarrow (P + P_V) \eta = P \Rightarrow P_V = P \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right)$$

Motorgeneration	Wirkungsgrad
(1) Supraleitend (2045)	0,999
(2) Supraleitend (2035)	0,995
(3) Supraleitend (2030)	0,96
(4) Konventionell	0,9



## Aufgabe 4

4.1 Sie fahren in Ihrem Elektroauto mit 36 km/h auf den Beschleunigungsstreifen der A2 und wollen mit  $10 \text{ m/s}^2$  beschleunigen, wie viel Beschleunigungsleistung benötigen sie etwa?

( $m = 2.000 \text{ kg}$ ,  $\eta = 0,9$ )

$$F = m \cdot a = 2000 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 20.000 \text{ N} \quad v = 36 \text{ km/h} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_{\text{mech}} = F \cdot v = 20.000 \text{ N} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 200 \text{ kW}$$

$$P_{\text{el}} = \frac{P_{\text{mech}}}{\eta} = \frac{200 \text{ kW}}{0,9} = \underline{\underline{222,2 \text{ kW}}}$$

4.2 Welche Verlustleistung müssen Sie abführen können?

$$P_{\text{v}} = P_{\text{el}} (1 - \eta) = P_{\text{el}} - P_{\text{mech}} = 22,2 \text{ kW}$$

3.3

$$P_{V_1} = 8,16 \text{ MW} \left( \frac{1}{0,999} - 1 \right) = 8,16 \text{ MW}$$

$$P_{V_2} = 8,16 \text{ MW} \left( \frac{1}{0,995} - 1 \right) = 41 \text{ MW}$$

$$P_{V_3} = 8,16 \text{ MW} \left( \frac{1}{0,96} - 1 \right) = 340 \text{ MW}$$

$$P_{V_4} = 8,16 \text{ MW} \left( \frac{1}{0,9} - 1 \right) = 906,7 \text{ MW}$$