



Labor ESP Energiespeicher



Versuchsanleitung **Schwungmassenspeicher**

Version von 11.04.2018

Hinweis:

Nur für den internen Gebrauch im Rahmen von Lehrveranstaltungen an der HTW.

Weiterverbreitung an Dritte ist aus urheberrechtlichen Gründen nicht gestattet

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsziele	2
2	Hintergrund	2
3	Versuchsbeschreibung	6
4	Vorbereitungsfragen.....	8
5	Versuchsdurchführung.....	10
6	Versuchsauswertung	11
	Literaturverzeichnis	12
	Anhang.....	13

1 Versuchsziele

- Kennenlernen einer Methode zur mechanischen Energiespeicherung
- Bedienung und Handhabung von elektrischen Antriebsmaschinen, Einsatz von Schwungrädern
- Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Massenträgheitsmomenten, Drehmomenten, Drehzahlen, Hochlauf- und Auslaufzeiten
- Bestimmung von speicherbaren Energien und Leistungen

2 Hintergrund

Schwungräder sind eine seit vielen Jahren bewährte Technologie zur Energiespeicherung. Sie kamen in frühen Anwendungen in Dampfmaschinen zum Einsatz und werden in heutiger Zeit bspw. zur Nutzung der Bremsenergie in elektrischen Fahrzeugen des Nahverkehrs als auch in der Formel 1 eingesetzt. Aber auch das Stromnetz so wie es heute betrieben wird würde ohne die Schwungmasse der angeschlossenen Generatoren nicht funktionieren. Nur deren Schwungmasse begrenzt derzeit Änderungen der Generator Drehzahl und damit der Netzfrequenz.

Das Prinzip besteht darin, überschüssige elektrische oder kinetische Energie in Form von Rotationsenergie zu speichern und diese Rotationsenergie bei Bedarf nach dem Dynamo-Prinzip zurück über einen Generator umzuwandeln.

Da Schwungmassenspeicher über sehr kurze Zugriffszeiten sowie eine hohe Zyklenzahl verfügen, sind sie als Kurzzeitspeicher gut geeignet und dienen außerdem zur Glättung von Leistungs- bzw. Lastspitzen oder zur Überbrückung von Leistungsunterbrechungen.

Im hier durchzuführenden Versuch werden verschiedene Schwungmassen durch einen Elektromotor in Bewegung versetzt und damit je nach Massenträgheitsmoment unterschiedlich viel Energie gespeichert.

2.1 Verfahren zur Bestimmung der Eisenverluste P_{Fe} und Reibungsverluste P_R

Als Antriebsmaschine wird im Versuch ein Asynchronmotor genutzt. Die Leistungsflüsse einer Asynchronmaschine sind in Abbildung 1 dargestellt.

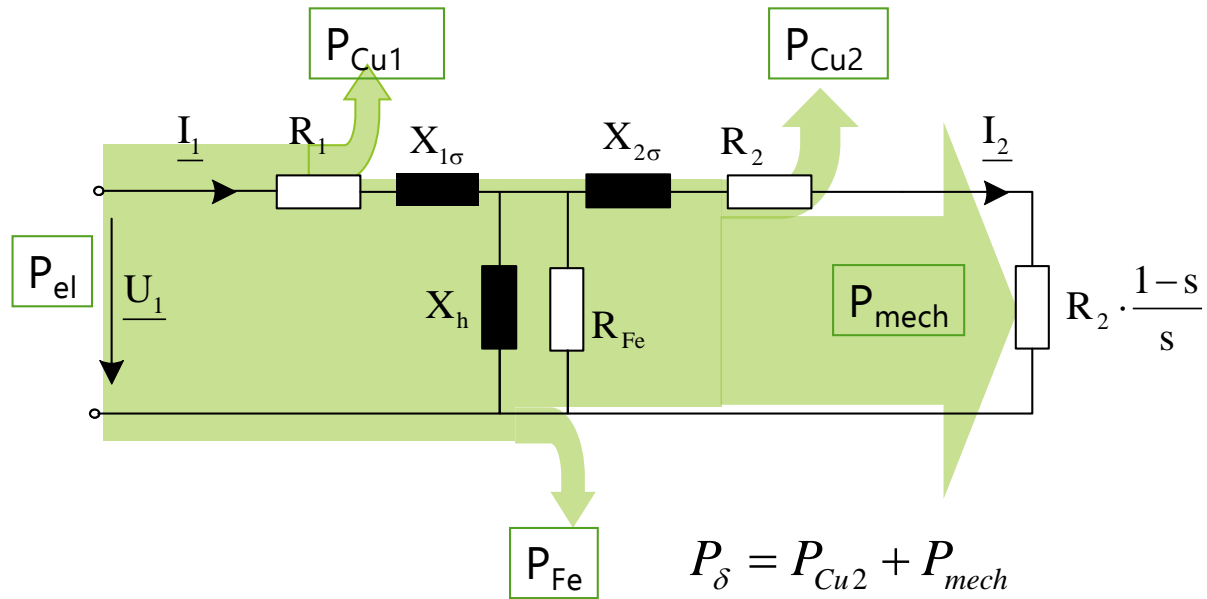


Abbildung 1: Leistungsflüsse einer Asynchronmaschine [MEW17]

Die im Leerlauf aufgenommene elektrische Leistung

$$P_{el} = \sqrt{3} \cdot U_{LL} \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi) \quad (1)$$

ist größer als die abgegebene mechanische Leistung. Die Verluste setzen sich neben den Stromwärmeverlusten

$$P_{Cu} \approx 3 \cdot I_1^2 \cdot (R_1 + R_2) \quad (2)$$

aus den Eisenverlusten P_{Fe} und den mechanischen (Reibungs-)Verlusten

$$R_R = M_{Reibung} \cdot \omega \quad (3)$$

zusammen. Um die Eisenverluste bestimmen zu können wird der Leerlaufversuch bei veränderlicher Spannung durchgeführt. Trägt man die gemessene Gesamtleistung – abzüglich der Kupferverluste – über dem Quadrat der Spannung auf, ergibt sich näherungsweise eine Gerade, da die Verluste bei ohmschen Widerständen mit dem Quadrat der Spannung steigen (1).

$$P_V = \frac{U^2}{R_V} \quad (4)$$

Die Verlängerung dieser Geraden schneidet dann die Ordinate bei den mechanischen Verlusten P_R (Abbildung 2).

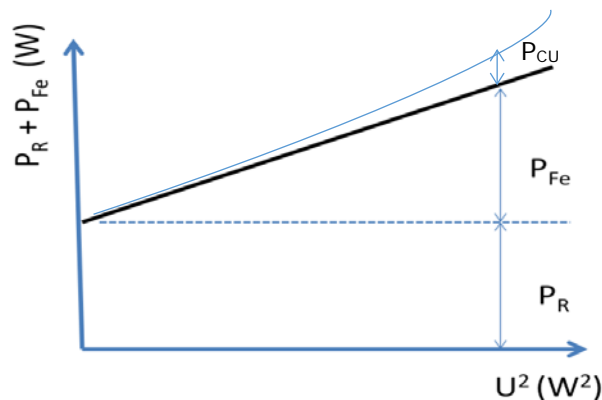


Abbildung 2: Grafische Bestimmung der Reibungsverluste [Nür01]

2.2 Bestimmung des Trägheitsmoments

Zur Bestimmung der jeweiligen Trägheitsmomente werden Auslaufversuche durchgeführt. Die Reibungsverluste bremsen den Motor beim Auslauf ab und führen zu einer Auslaufzeit. Die gedachte (oder korrigierte) Auslaufzeitkonstante T_{aus} erhält man durch den Schnittpunkt der an die Kurve $n(t)$ zum Zeitpunkt des Abschaltens angelegten Tangente mit der Abszisse (Abbildung 3).

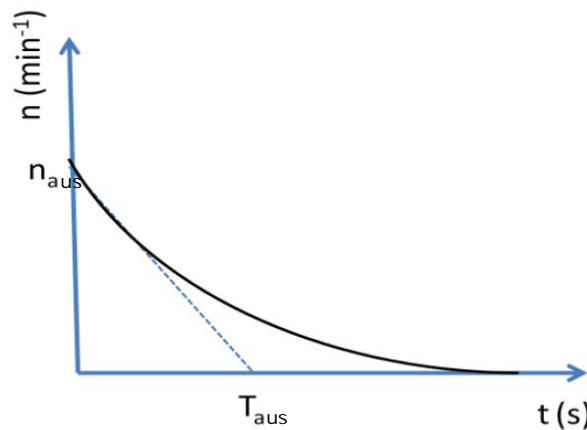


Abbildung 3: Grafische Bestimmung der Auslaufzeitkonstante T_{aus}

Die Massenträgheit lässt sich dann mit Hilfe (2) von bestimmen als:

$$J = \frac{P_R \cdot T_{aus}}{\omega_{aus}^2} \quad (5)$$

Die Auslaufzeiten können durch ‚hartes‘ Ausschalten des Motors bei vorgegebener Spannung bestimmt werden. Analog können auch die Hochlaufzeiten durch ‚hartes‘ Einschalten des Motors bei vorgegebener Spannung bestimmt werden. Bei voller Last sollte jedoch nur Spannungen bis max. 200 V gewählt werden, um den maximalen Strom zu begrenzen.

2.3 Bestimmung der linearen und quadratischen Anteile der Reibungsverluste

Der Auslaufversuch kann auch dazu genutzt werden, unterschiedliche Anteile an den Reibungsverlusten zu bestimmen. Während Reibung in den Lagern z.B. proportional zur Drehzahl wirkt, steigen Lüfterverluste quadratisch mit der Drehzahl.

Die Reibungsverluste lassen sich aus Massenträgheit und Drehzahländerung bestimmen. Werden die Reibungsverluste über dem Quadrat der Drehzahl aufgetragen lassen sich drehzahlproportionale und quadratisch mit der Drehzahl ansteigende Anteile der Verluste bestimmen.

2.4 Nutzung der Massenträgheit von WEA in elektrischen Netzen

Bei Windkraftanlagen kann die Massenträgheit aus Rotor und Generator dazu genutzt werden, plötzliche Einbrüche der Frequenz nach Netzfehlern zu überbrücken. Der Ausfall eines Kraftwerks (oder einer Energie führenden Leitung) kann dazu führen, dass im Netz mehr Energie verbraucht als erzeugt wird – dies führt zu einem Frequenzrückgang. Wenn die WEA kurzzeitig mehr Energie einspeist als der Wind eigentlich zulässt kann dieser Frequenzrückgang begrenzt werden (grüne Kurve in Abbildung 4). Angewandt wird das z.B. in Kanada, WEA helfen die Zeit zu überbrücken bis zusätzliche Energie durch Wasserkraft bereit gestellt werden kann um die nun fehlende Energie auszugleichen.

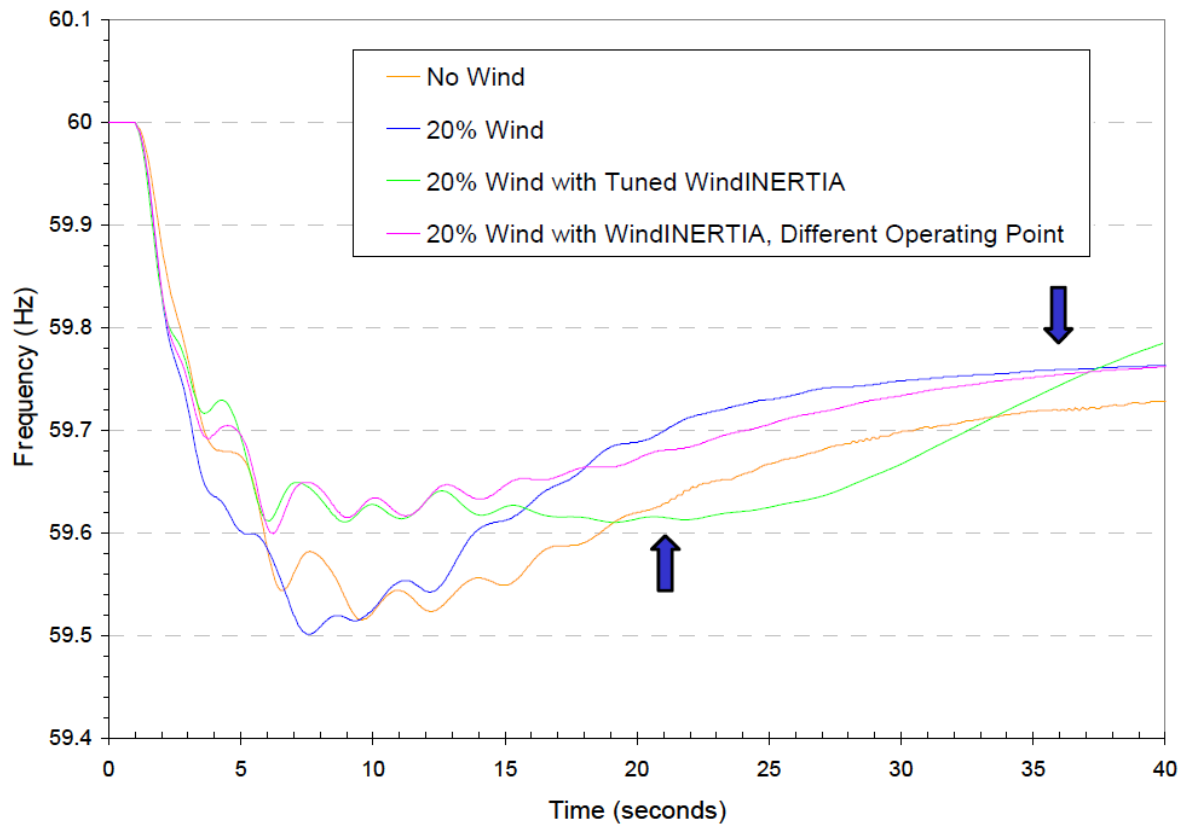


Abbildung 4: Einfluss kinetischer Regelenergie - Erhöhung der minimalen Frequenz nach Netzfehlern durch erhöhte Einspeisung von Wirkleistung von WEA durch Absenkung der Drehzahl [Mil11].

Die Anlaufzeitkonstante T_A von Kraftwerken und Windkraftanlagen beschreibt einen Zusammenhang zwischen Massenträgheit und Nennleistung, sie kann aus der Trägheitskonstanten H (in s) berechnet werden, eine Umrechnung erfolgt mit (2)

$$T_A = 2H = \frac{J \cdot \omega_N^2}{S_N} \quad (6)$$

mit S_N als der Nennscheinleistung eines Kraftwerks bzw. bei Windkraftanlagen üblicherweise der Nennwirkleistung, jeweils bei Nenndrehzahl ω_N .

3 Versuchsbeschreibung

3.1 Antriebsmaschine und Schwungmassen

Es stehen zur Verfügung (siehe Abbildung 5):

- Antriebsmaschine: Drehstrommotor
- Schwungmasse 1: Masse eines Gleichstrommotors (mit Wirbelstrombremse)
- Schwungmasse 2: Schwungräder

An die Antriebsmaschine kann die Schwungmasse 1 oder die Schwungmassen 1 und 2 gekoppelt werden (siehe Abbildung 5). Die jeweiligen Massenträgheitsmomente sind nicht bekannt.



Abbildung 5: Ansicht des Versuchsstandes

Der Drehstrommotor hat eine Nennleistung von 4 kW, eine Bemessungsspannung von maximal 400 V, eine Nenndrehzahl von 1440 min^{-1} , einen Nennstrom von 8,5A bei einem $\cos\phi = 0,84$. Die Leerlaufdrehzahl beträgt etwa 1499 min^{-1} , der Motor hat im Leerlauf ungefähr einen $\cos\phi = 0,1$ (Dieser Wert sollte in der Auswertung jedoch kritisch hinterfragt werden.).

Die Betriebsspannung kann über einen Stelltransformator stufenlos von 0 bis 400 V variiert werden.

3.2 Schaltpult und Messgeräte

Der Strom, die Wirkleistung sowie die Drehzahl können am Schaltpult abgelesen werden (Abbildung 6).

Da Drehzahl und Wirkleistung an den analogen Anzeigen des Schaltpults nur mit begrenzter Genauigkeit abgelesen werden können, erfolgt eine zusätzliche Messung Strom, Leistung (*Achtung: nur 1 Phase des Stroms wird gemessen! Was bedeutet das für die Leistung?*) und Drehzahl mit digitalen Messgeräten (Abbildung 7).

Das Datenblatt des Fluke-Leistungsmessgeräts [FLK95, S. 58] macht folgende Angaben zur Genauigkeit:

Messgerät: Wirkleistung (VA): $\pm (1\% + 4 \text{ Ziffern}) + \text{Zangengenauigkeit}$
 Stromzange: $\pm (0,3\% \text{ des Ablesewerts} + 0,1\text{A})$.

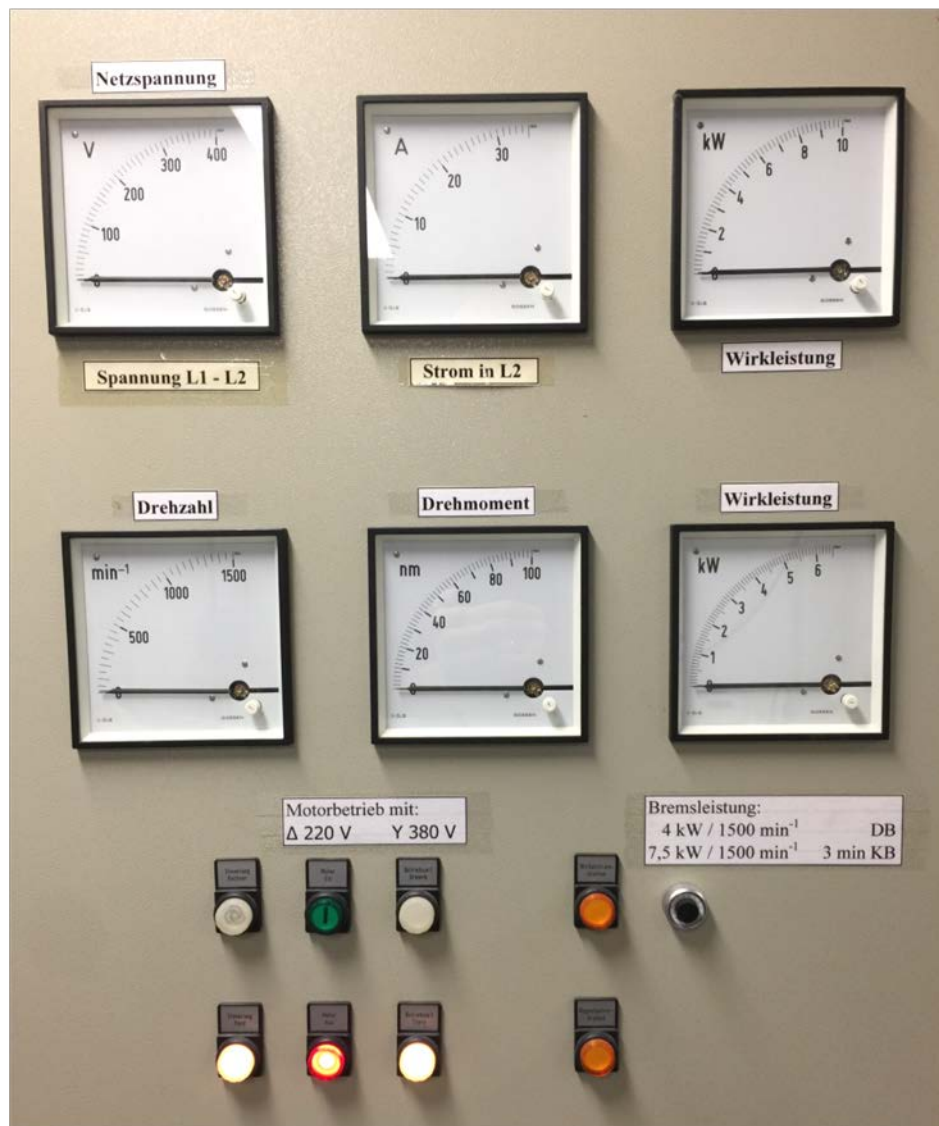


Abbildung 6: Ansicht des Schaltpults



Abbildung 7: Ansicht der zusätzlichen Strommessung und der Geräte zur Leistungsmessung und zur Drehzahlmessung

4 Vorbereitungsfragen

1. Erläutern Sie kurz das Prinzip der Schwungradspeicherung.
2. Wo kommen Schwungradspeicher zum Einsatz (min.3 Beispiele)?
3. Geben Sie Vor- und Nachteile von Schwungradspeichern im Vergleich zu anderen Methoden der Elektrizitätsspeicherung an (min. je 3 Beispiele).
4. Geben Sie die Formeln für folgende physikalische Zusammenhänge an:
 - a. Zusammenhang zwischen Bahngeschwindigkeit v und Winkelgeschwindigkeit ω
 - b. Zusammenhang zwischen Winkelgeschwindigkeit ω und Drehzahl n
 - c. Zusammenhang zwischen Drehmoment M , Drehzahl n und Leistung P_{mech}
 - d. Scheinleistung S , Wirkleistung P_{el} , Kupferverluste $P_{V,CU}$ und Reibungsverluste $P_{V,R}$ eines Schwungradspeichers
 - e. Massenträgheitsmoment (allg.): J
 - f. Massenträgheitsmoment für eine homogene Kreisscheibe: J_S
 - g. Zusammenhang zwischen Drehmoment, Massenträgheitsmoment Winkelgeschwindigkeit
 - h. Rotationsenergie E_{rot} als Funktion der Winkelgeschwindigkeit / der Drehzahl
5. Die Zugfestigkeit σ des Schwungradmaterials hängt von der Dichte des Materials ρ sowie der maximalen Bahngeschwindigkeit v während der Rotation ab. Es gilt: $\sigma = \rho \cdot v^2$.
 - a. Welche Bedeutung ergibt sich damit für die Zugfestigkeit des Schwungradmaterials?
 - b. Warum wird die zulässige Umlaufgeschwindigkeit durch die Zugfestigkeit des Materials bestimmt (Formel)?
6. Wie hängt die Spezifische Speicherfähigkeit (bzw. Energiedichte) E/m einer homogenen Kreisscheibe von diesen beiden Materialparametern (σ, ρ) sowie von der Winkelgeschwindigkeit und dem Massenträgheitsmoment ab (Formel) ?
7. Würden Sie bei vorgegebener Masse ($m = 200 \text{ kg}$) das Schwungrad aus Stahl, Blei oder Plastik (GFK - Glasfaserverstärkter Kunststoff bzw. CFK - Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff) herstellen?

Hinweis: Berechnen Sie dazu die jeweilige spezifische Speicherfähigkeit und die speicherbare Energie und geben Sie diese mit an.

Gegeben sind dazu die folgenden in Tabelle 1 dargestellten Materialparameter:

Tabelle 1: Materialparameter

	Stahl	Blei	GFK	CFK
Zugfestigkeit σ [MPa]	1.300	12	1.200	6.300
Dichte ρ [kg/m ³]	7.830	11.342	1.900	1.550

8. Für eine WEA mit 82m Rotordurchmesser sind folgende Kenndaten gegeben: el. Leistung $P_N = 2050 \text{ kW}$, Generator Drehzahl $n_{\text{Nenn,Gen}} = 1800 \text{ min}^{-1}$, Massenträgheit des Generators $J_{\text{Gen}} = 90 \text{ kgm}^2$. Die Massenträgheit des Generators speichert 15% der Energie der WEA, 85% der Energie werden in Rotor (Blätter + Nabe) gespeichert. Im Fall eines Netzfehlers soll die WEA 10s lang eine erhöhte Leistung einspeisen, dazu wird die Generator Drehzahl um 10% von 1800 min^{-1} auf 1620 min^{-1} abgebremst. Berechnen Sie die
- Rotordrehzahl $n_{\text{Nenn,Rot}}$ bei einer Getriebeübersetzung $\ddot{u} = 105:1$,
 - die Energie von Generator und Rotor vor ($E_{1\text{Gen}} E_{1\text{rot}}$) und nach ($E_{2\text{Gen}} E_{2\text{rot}}$) dem Abbremsen
 - die Energiedifferenz $\Delta E_{\text{Gesamt}} = E_{1,\text{Gesamt}} - E_{2,\text{Gesamt}}$, die dabei zur Verfügung gestellt wird
 - die Trägheitskonstante H der WEA in s
 - die Leistung P_{zus} , die 10s lang zusätzlich ins Netz eingespeist werden kann.

Hinweis: Bestimmen Sie zuerst die gespeicherte Energie des Generators bei Nenndrehzahl und bestimmen Sie daraus, wie viel Energie im Rotor gespeichert sein muss (Aufteilung Generator - Rotor: 15% 85%). Daraus können Sie nun die Massenträgheit des Rotors bestimmen.

	Ge- ne- rator	Rotor ($\ddot{u} =$ 105:1)	Gesamt- WEA
Massenträgheit in kgm^2	90		
Drehzahl1 in 1/min	1800		
Omega1 in 1/s			
Energie1 in Ws			
Drehzahl 2 in 1/min	1620		
Omega2 in 1/s			
Energie2 in Ws			
Energiedifferenz (E1-E2)			
Trägheitskonstante H der WEA in s			
Zusätzliche Leistung P_{zus} in kW für 10s			

5 Versuchsdurchführung

Bei der Versuchsdurchführung sind jeweils die folgenden Schritte notwendig

- Nehmen sie die Messwerte auf
Hinweis. Schreiben sie zu jedem Messwert, den sie aufnehmen die exakten Anzeigewerte des Digitalmultimeters und den Messbereich auf! Für die Fehlerbetrachtung ist es bei Digitalmessgeräten entscheidend, die letzte Ziffer der Anzeige zu notieren, da diese den Fehler bestimmt.
- Überwachen und notieren sie, wenn die zulässigen Strom- oder Spannungsgrenzen erreicht werden.

5.1 Plausibilitätsprüfung.

Machen Sie sich mit dem Versuchs- und Messaufbau vertraut und lassen Sie die Antriebsmaschine einige Minuten bei reduzierter Spannung einlaufen. Prüfen Sie die Plausibilität der Messungen indem Sie Strom und Spannung am Schaltpult ablesen und die Leistung berechnen. Vergleichen Sie diese mit der Leistung die sie vom Digital-Multimeter ablesen. Stimmen die Ergebnisse überein? Welche Genauigkeit haben die jeweiligen Messgeräte?

5.2 Vermessung der Antriebsmaschine

- a) Fahren Sie die Antriebsmaschine aus dem Stillstand schrittweise (50 V-Schritte) durch Erhöhen der Spannung des Stelltransformators auf Ihre Nennspannung (400 V) hoch. Erfassen die zugehörigen stabilisierten Werte von Spannung, Strom, Drehzahl, Wirkleistung und Scheinleistung.
- b) Messen Sie die Zeiten für das vollständige Auslaufen des Rotors (hartes Ausschalten des Antriebsmotors am Schaltpult). Versuchen Sie möglichst viele Wertepaare für die Drehzahl als Funktion der Auslaufzeit $n(t)$ aufzunehmen
Hinweis: Mit der Kamera eines Mobiltelefons lässt sich der Verlauf der Messungen gut aufzeichnen und nachher in eine Tabelle übertagen.
- c) Versuchen Sie, die Zeiten für das Hochlaufen durch hartes Einschalten bei 200V Spannung abzuschätzen.
Hinweis: Mit der Kamera eines Mobiltelefons lässt sich der Verlauf der Messungen gut aufzeichnen und nachher in eine Tabelle übertagen.

5.3 Vermessung von Antriebsmaschine und einer Schwungmasse

Koppeln Sie Schwungmasse 1 an und wiederholen Sie Aufgabe 5.2.

5.4 Vermessung von Antriebsmaschine und beiden Schwungmassen

Koppeln Sie zusätzlich Schwungmasse 2 und wiederholen Sie Aufgabe 5.2.

Hinweis: Wenn die Endgültige Drehzahl nach ca. 30 s noch nicht erreicht ist, sollten Sie zur nächsthöheren Spannung übergehen, um eine Überhitzung des Motors (keine Drehzahl => keine Kühlung) zu vermeiden. Vermerken Sie das Vorgehen in den Aufzeichnungen.

6 Versuchsauswertung

Hinweis: Fertigen Sie ein ordnungsgemäßes und vollständiges Protokoll an. Dazu gehören:

- kurze Beantwortung der Vorbereitungsfragen (mit eigenen Worten),
- das Messprotokoll (als Anhang), soweit notwendig mit Anmerkungen, wenn eine Messung z.B. nicht verfügbar oder möglicherweise fehlerbehaftet war,
- Auswertung gemäß Versuchsanleitung (bitte vorgegebene Nummerierung beachten) bzw. Absprache im Labor mit jeweils
 - einer Darstellung der Messwerte sowie des für jeden Messpunkt möglichen maximalen positiven und negativen Fehlers als Diagramm. Beachten Sie dazu die Angaben zur Genauigkeit in Abschnitt 3.2. Bestimmen Sie dafür zunächst für jeden Messwert den möglichen positiven und negativen Fehler.
 - einer tabellarischen Darstellung der Ergebnisse. (*Hinweis: Bitte wählen sie eine Darstellung bei der die einzelnen Messpunkte erkennbar bleiben.*)
- kritische Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

6.1 Bestimmung der Reibungsverluste

1. Ermitteln und bewerten Sie die Reibungsverluste (Verlustleistungen) P_R für die drei untersuchten Massenträgheitsmomente mit Hilfe des Ansatzes aus Kapitel 2.1. und stellen sie diese graphisch dar.

Für die Bestimmung der Kupferverluste P_{Cu} können Sie von einem Statorwiderstand von $R_1 = 1 \text{ Ohm}$ je Wicklung ausgehen, der Einfluss des Widerstands R_2 kann beim Leerlaufversuch vernachlässigt werden.

2. Sind - unter Berücksichtigung des Messfehlers – alle Messwerte für eine Auswertung geeignet? Treffen Sie eine sinnvolle Auswahl der Messwerte, die für die Berechnung der Verlustleistung betrachtet werden und begründen Sie diese Auswahl.

Tragen ergänzen sie im Diagramm der Reibungsverluste die Kurven für maximale und minimale Werte, die sich aufgrund der Fehlerbetrachtung der Wirkleistung ergeben

6.2 Bestimmung der Hochlaufzeiten

Stellen sie die Hochlaufzeiten in einem Diagramm und Tabelle dar. Vergleichen und kommentieren Sie die Hochlaufzeiten für die drei Fälle.

6.3 Bestimmung der Auslaufzeiten

1. Stellen Sie die (ggfs. sinnvoll gemittelten) Auslaufkurven $n(t)$ graphisch dar und bestimmen Sie den Zeitpunkt des Stillstands und die gedachten (korrigierten) Auslaufzeitkonstanten T_{aus} für die drei Fälle.
2. Bestimmen Sie für die drei Fälle die jeweiligen Massenträgheitsmomente aus den ermittelten Reibungsverlusten $P_{V,R}$, den Auslaufzeitkonstanten T_{aus} sowie die Drehzahlen n_{aus} zum Zeitpunkt des Ausschaltens mit Hilfe von (2)
3. Wie lässt sich diese Gleichung (2) aus den in der Vorbereitung (Punkt 4) dargestellten Zusammenhängen herleiten?
4. Berechnen Sie für die drei Fälle jeweils die speicherbare mechanische Energie und die Speicherleistung.

6.4 Bestimmung des konstanten und quadratischen Anteils der Reibmoments

Bestimmen Sie mit dem Verfahren nach Abschnitt 2.3 zur Berechnung der mechanischen Verluste den konstanten und den quadratischen Anteil des Reibmoments bei Nenndrehzahl für den Fall 3 (2 Schwungmassen). Stellen sie dazu graphisch das Reibmoment über dem Quadrat der Drehzahl dar.

6.5 Rückmeldung

Schätzen Sie aus Ihrer Sicht den Zusammenhang zwischen Versuchsinhalten und Lerneffekten zur Thematik Schwungmassenspeicher ein. Haben Sie Anregungen?

Literaturverzeichnis

- [FLK95] Fluke 39/41b Power Harmonics Tester. Bedienungs-Handbuch, July 1995, Rev 3 11/00, Fluke Cooperation, 1995
- [MEW17] Vorlesungsunterlagen R61 - Mechanische Energiewandlung, Kapitel Asynchronmaschine, HTW Berlin, 2017
- [Mil11] Miller, N. W., Kara Clark, and Miaolei Shao. "*Frequency responsive wind plant controls: Impacts on grid performance.*" Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE. IEEE, 2011
- [Nür01] Nürnberg, W., Hanitsch, R. „*Die Prüfung elektrischer Maschinen.*“ Springer, Berlin, 2001

- Vorlesungsunterlagen M2RE-SPT, B4UT-EW3
- ZDF - Planet E – Schwungradspeicher: www.youtube.com/watch?v=mRhvpaXszTc

Anhang

Hinweis: Vor dem Versuchstermin eine Tabelle auf einem Laptop vorzubereiten und die Messwerte während des Versuchs dort direkt einzutragen ist effektiver.

Tabelle 2 Versuch 1 – keine Schwungmasse

	Span- nung	Strom	Leis- tungs- faktor	Drehzahl	Wirk- leistung	Anmerkungen
Nr.	L1-L2 V	L2 A	-	min-1	kW	
1	50					
2	100					
3	150					
4	200					
5	250					
6	300					
7	350					
8	400					

Tabelle 3 Versuch 2 – mit einer Schwungmasse

	Span- nung	Strom	Leis- tungs- faktor	Drehzahl	Wirk- leistung	Anmerkungen
Nr.	L1-L2 V	L2 A	-	min-1	kW	
1	50					
2	100					
3	150					
4	200					
5	250					
6	300					
7	350					
8	400					

Tabelle 4 Versuch 3 – mit zwei Schwungmassen

	Span- nung	Strom	Leis- tungs- faktor	Drehzahl	Wirk- leistung	Anmerkungen
Nr.	L1-L2 V	L2 A	-	min-1	kW	
1	50					
2	100					
3	150					
4	200					
5	250					
6	300					
7	350					
8	400					