

# LABORANLEITUNG: Permanenterregter Synchrongenerator

- Labor 2.2, HTW-Berlin, UTRE, Prof. Dr.-Ing. Jochen Twele -

## Einführung

Test und Auswertung eines selbstgebauten, permanenterregten Synchrongenerators (Prüfling) einer Kleinwindanlage (P=700W, d=2,4m), der ein Inselfsystem mit Speicherbatterien betreibt.

Das zu testende System wurde von Student\_innen im SoSe2012 nach dem Handbuch von Hugh Pigott<sup>1</sup> gefertigt und besteht im Wesentlichen aus:

- Scheibengenerator:

- 2 mit jeweils 12 Neodym- Permanentmagneten bestückte, rotierende Stahlscheiben.
- Ein fest angebrachter Stator, der pro Phase aus 3 in Reihe geschalteten, eingegossenen Kupferdrahtspulen besteht, die in Sternschaltung miteinander verkettet sind.
- 3 Kabel aus denen 3-phasiger Drehstrom/-spannung heraus kommt.

- Inselfsystem:

- 1.) Kurzschlussbremse: drehstromseitiger Kurzschluss → max. Moment auf Generator → Abbremsen der KWA-Rotors (stall) zur Wartung oder bei Gefahr.
- 2.) Je 1 Brückengleichrichter (B2U) für jede Phase, die als Sechspulsleichrichter (B6U) benutzt werden: Gleichrichtung von Drehstrom/spannung (AC) in Gleichstrom/spannung (DC) zur Batterieladung.
- 3.) Laderegler und dump load (Heizdrähte): schützt die Batterien vor Überladung.
- 4.) Wechselrichter: 23V-29V DC → 230 V AC zum Anschluss zusätzlicher Verbraucher.
- 5.) Blei-/Säure- Batterien: 2 x 12 V → 24V (20 - 29V)

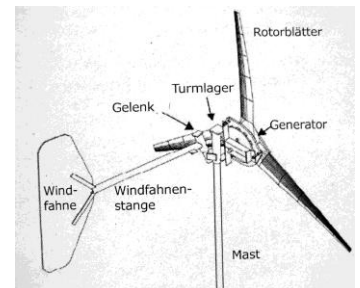
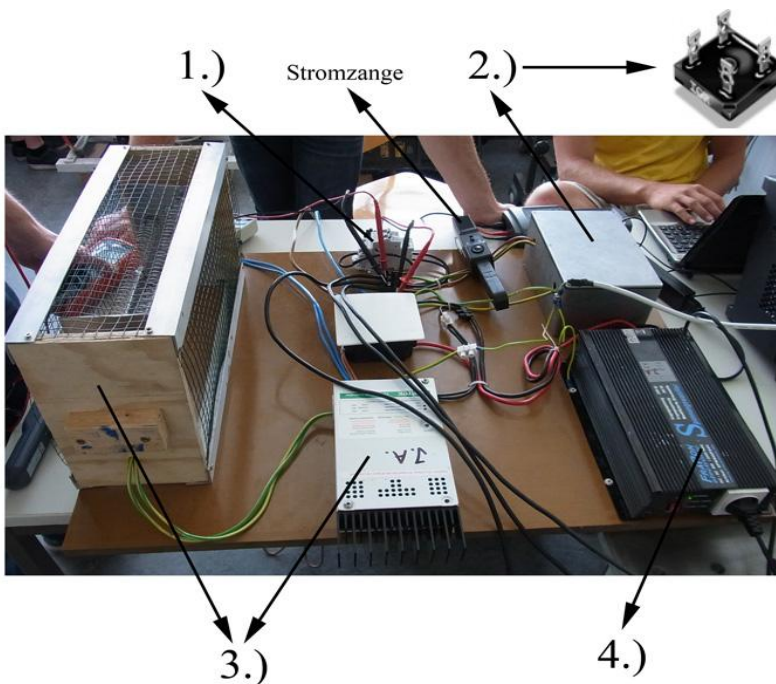
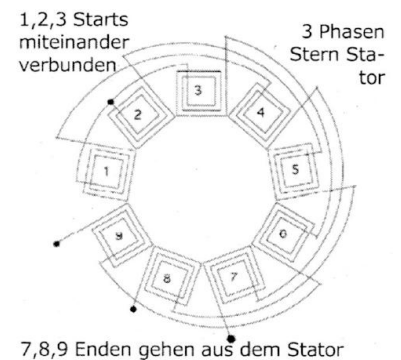
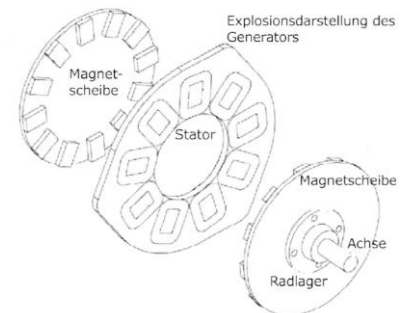


Abb.1 oben: Handbuch „Drei Flügel im Wind“, Hugh Pigott, 2009

<sup>1</sup> <http://scoraigwind.co.uk/>

Abb.2: Inselsystem, privat



Abb.3: Der Generator, privat

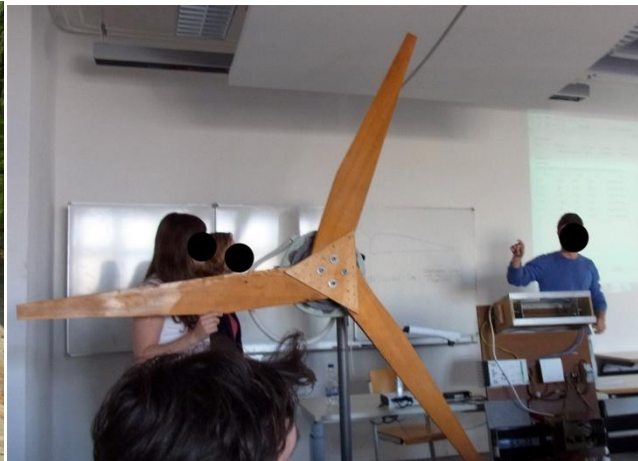


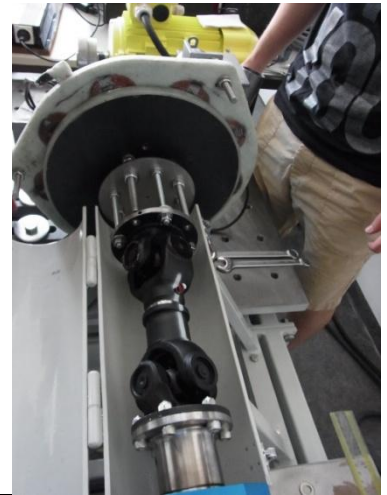
Abb.4: die komplette Kleinwindanlage, privat

## Versuchsvorbereitung

- Handbuch „Drei Flügel im Wind, Hugh Pigott“ (siehe Dozentenserver oder HTW-Bibliothek)  
Hinweis: Wegen copyright ist der Gebrauch des pdf- Handbuchs ausschließlich im Rahmen dieser Veranstaltung gestattet.
- Lesen und verstehen der Unterlagen zu Drehstrom und Inselsystemen auf dem Dozentenserver.
- Versuchsaufbau: Vertraut machen mit der Funktionsweise und Bedienung der Messgeräte, insb. Fluke (siehe Dozentenserver)
- Abkürzungen kennen, die einzelnen Versuche durchgehen und Rechnungen vorbereiten, Problemstellungen verstehen und ggf. beantworten!
- Gruppeneinteilung vornehmen: wer macht was während des Versuchs. Excel-Tabelle für jeden Versuch vorbereiten!  
Hinweis: Die Maschine wird durch Fachpersonal bedient.

## Abkürzungen

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
$A_{\text{Kabel}}$	$\text{mm}^2$	Kabelquerschnitt
$f$	Hz oder 1/s	Frequenz
$I_{\text{AC}}$	A	Wechselstrom bzw. Drehstrom
$I_{\text{DC}}$	A	Gleichstrom
$I_{\text{dumpload}}$	A	Gleichstrom dump-load (Batterieschutz)
$K$	-	Umrechnungskonstante Frequenz $\rightarrow$ Drehzahl
$L$	mH	Induktivität
$M$	Nm	Moment
$n$	1/min oder rpm	Drehzahl
$n_{\text{cut-in}}$	1/min oder rpm	Drehzahl ab welcher Strom fließt und Batterieladung stattfindet
$n_{\text{N}}$	1/min oder rpm	Nenn- Drehzahl
$p$	-	Polpaarzahl
$P_{\text{AC}}$	W	Wirkleistung, drehstromseitig
$P_{\text{DC}}$	W	Wirkleistung, gleichstromseitig
$P_{\text{Mech}}$	W	mechanische Leistung
$Q$	W	Blindleistung
$R_{\text{i}}$	$\Omega$	Innenwiderstand Generatorspulen
$R_{\text{Kabel}}$	$\Omega$	Kabelwiderstand
$R_{\text{Last}}$	$\Omega$	Ohmsche Last
$R_{\text{Vor}}$	$\Omega$	Vorwiderstand Generator Ausgang – Batterie Eingang
$S$	W	Scheinleistung
$T$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
$U_{\text{LL}}$	V	Wechselspannung (Leiter-Leiter!)
$U_{\text{Batt}}$	V	aktuelle Leerlaufspannung der Batterien
$U_{\text{Batt,max}}$	V	Maximal zulässige Batteriespannung
$U_{\text{DC}}$	V	Gleichspannung
$U_{\text{dumpload}}$	V	Gleichspannung über dump-load bzw. sonstigen Verbrauchern
$U_{\text{LL0}}$	V	Leerlaufspannung (Leiter-Leiter!)
$v_{\text{cut-in}}$	m/s	Windgeschwindigkeit ab der elektrische Leistungsumsetzung stattfindet.
$v_{\text{A}}$	m/s	Auslegungswindgeschwindigkeit
$Z$	$\Omega$	Impedanz oder Scheinwiderstand
$X$	$\Omega$	Blindwiderstand
$\eta_{\text{P,AC}}$	-	Effektiv-Wirkungsgrad, AC: $(P_{\text{AC}}/P_{\text{Mech}})$
$\eta_{\text{P,DC}}$	-	Effektiv-Wirkungsgrad, DC: $(P_{\text{DC}}/P_{\text{Mech}})$
$\eta_{\text{S,AC}}$	-	Schein-Wirkungsgrad: $(S/P_{\text{M}})$
$\lambda_{\text{A}}$	-	Auslegungsschnelllaufzahl Rotor
$\varphi_{\text{LL}}$	$^{\circ}$	Phasenverschiebung Leiter-Leiter
$\varphi_{\text{Ui}}$	$^{\circ}$	Phasenverschiebung Spannung-Strom



$\cos \varphi$		Leistungsfaktor: $\cos \varphi = \cos (P_{AC}/S)$
----------------	--	---

## Messgeräte

Der Prüfling befindet sich auf dem Prüfstand und wird durch eine elektrische Maschine mit einstellbarer Drehzahl angetrieben.

Für die Versuche stehen zur Verfügung:

- Digitale Anzeige der Maschine die den Generator antreibt: Drehzahl, Moment, elektrische Leistung.  
*Abb.5: Prüfling auf dem Maschinenprüfstand, privat*
- 1x Fluke-Messgerät: Messung AC-seitig → Wechselspannung (Leiter-Leiter), Wechselstrom, Frequenz, Phasenverschiebungen, Schein- und Wirkleistung.
- 2x Multimeter: Messung von DC und ohmschen Widerständen.
- 3-phasige ohmsche Last: Simulation von Verbrauchern.
- Verschiedene Kabellängen zur Veränderung des ohmschen Vorwiderstands zwischen Generator und Batterien (bei sehr hohem Stromfluss).
- Laserpointer zur Temperaturmessung.

## Versuchsdurchführung

**Vor Versuchsbeginn (5 min):**

- Teilnehmer\_innen machen sich gemäß Gruppeneinteilung mit Aufgaben vertraut.
- Überprüfen ob Versuchsaufbau vollständig ist.
- Anbringen der Messgeräte.
- Anzeige des Fluke abspeichern, zur Not Bildschirm Abfotographieren und Werte direkt in das vorbereitete Excel oder OOC aufnehmen.

## Versuch 1: Leerlaufspannung über Drehzahl (15 min):

Situation: Der Generator wird im Leerlauf vermessen, es besteht keine elektrische Verbindung der Generatorkabel zu Lasten oder Inselsystem, die Schalter sind geöffnet.

Hinweis: da der Nullleiter im Stator eingegossen ist, wird die Wechselspannung zwischen zwei willkürlich gewählten Leitern und der Wechselstrom am übrig bleibenden Leiter, gemessen. Fluke muss auf Leiter-Leiter-Messung eingestellt sein.

### Versuchsaufbau:

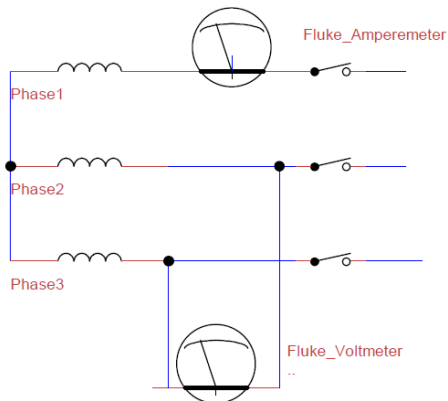


Abb.6: Versuchsaufbau 1 (ohne Erdung), eigene Darstellung mit TinyCad

Stellgröße: In 50rpm- Schritten an der Maschine einstellen und jeweils notieren:

Gruppe3: (50 - 450) rpm

Gruppe4: (60 - 460) rpm

Gruppe5: (70 - 470) rpm

Gruppe2: (80 - 480) rpm

Gruppe1: (90 - 490) rpm

Gruppe6: (100 - 500) rpm

Messung:  $U_{LL0}$ ,  $f$ ,  $\varphi_{LL}$ ,  $M$ , Wellenform und Fourier-Analyse.

Hinweis:  $f$  ist proportional zu  $n$ . Die Fluke Anzeige ist genauer als die  $n$ - Anzeige der Maschine.  $K$  kann über  $p$  errechnet werden (Variablen siehe Abkürzungsverzeichnis).

Berechnung:  $P_{Mech}$ ,  $p$ ,  $K$

Graphische Darstellung und Interpretation:  $U_{LL0}$  über  $n$

## Versuch 2: Moment über Strom (30 min)

Situation: Die 3 Generatorkabel, werden an die 3-phasige ohmsche Last angeschlossen, deren Lastwiderstände intern in Sternschaltung miteinander verkettet sind. Bei konstanter Drehzahl wird der Widerstandswert variiert, so dass unterschiedliche Ströme fließen, die das Moment am Generator beeinflussen.

Hinweis: da der Nullleiter im Stator eingegossen ist, wird die Wechselspannung zwischen zwei willkürlich gewählten Leitern und der Wechselstrom am übrig bleibenden Leiter, gemessen. Fluke muss auf Leiter-Leiter-Messung eingestellt sein.

### Versuchsaufbau:

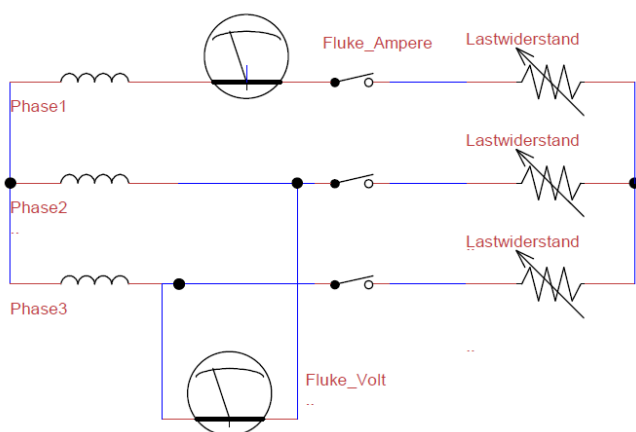


Abb.7: Versuchsaufbau 2 (ohne Erdung), eigene Darstellung mit TinyCad

Stellgröße: Für folgenden Betriebspunkte der KWA soll die Rotordrehzahl berechnet werden:

$$d_{\text{Rotor}}=2,4 \text{ m}, \lambda_A = 7$$

Gruppe 3:  $v_A=4,5 \text{ m/s}$

Gruppe 4:  $v_A=5 \text{ m/s}$

Gruppe 5:  $v_A=5,5 \text{ m/s}$

Gruppe 2:  $v_A=6 \text{ m/s}$

Gruppe 1:  $v_A=6,5 \text{ m/s}$

Gruppe 6:  $v_A=7 \text{ m/s}$

gesucht:  $n$  in 1/min, auf volle 10er- Zahlen auf- oder abgerundet.

Bei der jeweiligen konstanten Drehzahl sollen am 3-phasigen Lastwiderstand bei der höchsten Einstellung Nr. 10 ( $R = 3,75\Omega$ ) beginnend, die Widerstände schrittweise verringert werden, bis maximal  $I_{AC} = 16\text{A}$  auf dem Fluke angezeigt werden.

ACHTUNG: Die Statoroberfläche darf 80°C nicht überschreiten, sonst abbrechen!

Messung 1:  $M, U_{LL}, I_{AC}, f, S, \cos \varphi, P_{AC}, T, \varphi_{LL}, \varphi_{UI}$ , Wellenform und Fourier-Analyse.

Messung 2:  $R_i$

Hinweis: Messung des ohmschen Innenwiderstands  $R_i$  des Generators bei erhitztem Stator (Betriebstemperatur) mit geeignetem Messgeräte (Mikroohmmeter, zur Not Multimeter) zwischen jeder Phasenkombination. Die 3 Widerstandswerte der 3 möglichen Kabelkombinationen sollten ähnlich hoch sein, so dass ein Mittelwert gebildet werden kann.

Berechnung:  $P_{Mech}, \eta_s, \eta_{P,AC}$

Graphische Darstellung und Interpretation:  $M$  über  $I_{AC}$ ,  $P_{Mech}$  über  $I_{AC}$ ,  $U_{LL}$  über  $I_{AC}$  und  $\eta_s$  &  $\eta_{P,AC}$  über  $I_{AC}$

Auswertung (zusätzlich beantworten):

- Durch welche mechanischen Größen werden Spannung und Strom am Generator jeweils hauptsächlich beeinflusst?
- Wird würde sich  $M$  bei einer Drehzahlerhöhung verhalten? Und  $P_{Mech}$ ?
- Beispielhaft die Induktivität  $L$  des Generators mittels  $R_i, Z$  und  $\varphi_{UI}$  bei einem der verschiedenen Betriebspunkte  $f(I_{AC})$  oben und ohne Fluke berechnet werden? Wodurch wird die Induktivität konkret beeinflusst?

### **Versuch 3: Batterieladung (60 min)**

Situation: Das Verhalten des Prüflings im Inselbetrieb wird analysiert.

Hierbei sollen folgende Aspekte beleuchtet werden:

- 1.) Beim Herstellen einer Verbindung zwischen Generator und Inselsystem wird die Ausgangsgleichspannung durch die Batterien in einem engen Intervall von  $U_{Batt} = 24V \dots 25V \rightarrow U_{Batt,max} = 29V$  gehalten. Erhöht sich die Batteriespannung bei hoher Drehzahl dennoch auf über 29V, fangen die Batterien an zu kochen, was vermieden werden muss. Der Laderegler beaufschlagt die Batterien deshalb mit der dump-load, die einen zusätzlichen, parallelen Verbraucher darstellt. Dieser erhitzt sich durch geregelte Stromaufnahme, die Energie des



Generators wird dann direkt in Hitze umgewandelt. Damit wird sicher gestellt, dass:  $U_{\text{Batt}} < U_{\text{Batt,max}}$ .

ACHTUNG: Heizdrähten der dumpload (Abb.3) erhitzen sich stark!

Hinweis: Die Batteriespannung hat bei gegebener Drehzahl einen wichtigen Einfluss auf das Moment am Generator: bei abfallender Batteriespannung, was entweder einer fast leeren Batterie oder einer hohen Last entspricht, fließt mehr Strom → es entsteht mehr Moment.

- 2.) Der Vorwiderstand zwischen Generator und Batterien, d.h. die Kabellängen sowie der Gleichrichterwiderstand haben in Abhängigkeit der Temperatur einen wichtigen Einfluss auf die Leistungsumsetzung der Rotorblätter. Ein hoher Leistungs-Output des Generators auf dem Prüfstand bringt wenig, wenn der reale Rotor das nötige Moment nicht aufbringen kann und bei hohem Stromfluss wegen Schwerläufigkeit in den stall- Betrieb fährt ( $\lambda \ll \lambda_A$ ). Durch eine Veränderung des Vorwiderstands kann  $I_{\text{AC/DC}}$  und damit das Moment am Generator beeinflusst werden, quasi im Sinne einer elektrischen Gangschaltung.

### Versuchsaufbau:

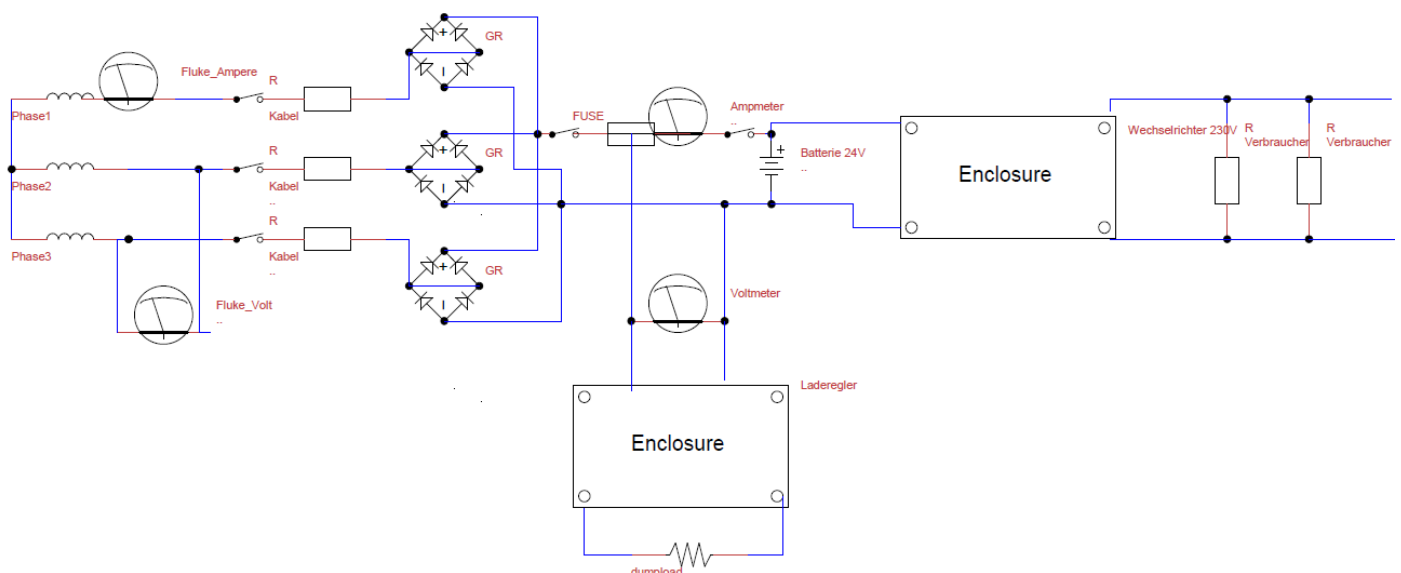


Abb.8: Versuchsaufbau 3 (ohne Erdung), eigene Darstellung mit TinyCad

### **Versuch 3.1:**

Stellgröße: Die 3-phasige ohmsche Last vom vorhergehenden Versuch wird abgekoppelt. Statt dessen werden unterschiedliche Kabellängen bei  $A_{\text{Kabel}}=1,5\text{mm}^2$  zwischen Generator und Gleichrichter aufgespannt, um den Vorwiderstand zu variieren.

Gruppe3: Kabellänge von 0m (kein Zusatzkabel)

Gruppe4: Kabellänge von 100m

Gruppe5: Kabellänge von 200m

Gruppe2: Kabellänge von 0m (kein Zusatzkabel)

Gruppe1: Kabellänge von 100m

Gruppe6: Kabellänge von 200m

Messung 1:  $R_{\text{Kabel}}$  messen.

Nach der Messung des  $R_{\text{Kabel}}$  wird durch Fachpersonal die Verbindung zum Inselsystem durch Umklappen der Kontaktschalter hergestellt.

Messung 2:  $n_{\text{cut-in}}$  ermitteln, bei der der Ladevorgang der Batterien einsetzt, d.h. Strom zu fließen beginnt:

$$U_{\text{DC}} > U_{\text{Batt}} \rightarrow I_{\text{DC}} > 0$$

### Versuch 3.2

Stellgröße: Zwischen  $n_{\text{cut-in}}$  und  $n_{\text{max}}$  bei  $I_{\text{AC,max}} = 16\text{A}$  in 50 rpm- Schritten messen.

Hinweis:  $I_{\text{AC,max}} = 16\text{A}$  für  $A_{\text{Kabel}} = 1,5\text{mm}^2$  (DIN VDE 0298), also bei Überschreitung von 16A wechselstromseitig die Drehzahl nicht weiter erhöhen.

Messungen:  $M$ ,  $U_{\text{LL}}$ ,  $I_{\text{AC}}$ ,  $U_{\text{DC}}$ ,  $I_{\text{DC}}$ ,  $U_{\text{dumpload}}$ ,  $I_{\text{dumpload}}$ ,  $S$ ,  $\cos \varphi$ ,  $P_{\text{AC}}$ ,  $f$ ,  $T$ ,  $\varphi_{\text{LL}}$ ,  $\varphi_{\text{UI}}$ , Wellenform und Fourier-Analyse

Berechnung:  $P_{\text{Mech}}$ ,  $P_{\text{DC}}$ ,  $P_{\text{dumpload}}$ ,  $\eta_{\text{s}}$ ,  $\eta_{\text{P,AC}}$ ,  $\eta_{\text{P,DC}}$

Graphische Darstellungen:  $I_{\text{DC}}$  über  $n$ ,  $U_{\text{DC}}$  über  $n$ ,  $P_{\text{Mech}}$  &  $P_{\text{DC}}$  &  $P_{\text{dumpload}}$  über  $n$ ,  $\eta_{\text{s}}$  &  $\eta_{\text{P,AC}}$  &  $\eta_{\text{P,DC}}$  über  $n$  („&“ bedeutet in einem Schaubild).

Auswertung (zusätzlich beantworten):

- 1.) Wieso verändert/verzerrt sich die Form der AC- Kurven bei Batterieanschluss? Ist diese Veränderung vorteilhaft bzw. kann sie verhindert werden?
- 2.) In welcher Betriebssituation befindet sich der Generator bei  $n < n_{\text{cut-in}}$ ? Ist das bezogen auf das Rotorverhalten vorteilhaft?
- 3.) Das Einsetzen der dump-load bei hohen Drehzahlen kann als zusätzlicher, starker Verbraucher (Last) angesehen werden, der einen Rückgang von  $U_{\text{Batt}}$  erzwingt. Wieso kann der Laderegler einer KWA bei zu hoher  $U_{\text{Batt}}$  nicht einfach die Verbindung zwischen Generator und Batterien unterbrechen (wie zB bei einem PV-Regler). Wie wirkt sich der Spannungsrückgang der Batterien durch zusätzliche Last auf das Generatormoment und damit die Schnellaufzahl  $\lambda$  des Rotors aus?

<[joerg.alber@gmx.net](mailto:joerg.alber@gmx.net)>

Ist das im Sinne der Schutzfunktion von Vorteil?

4.) Die Leistungskennlinie ( $P_{\text{Mech}}$  (!) über  $n$ ) und die Momentenkennlinie ( $M$  über  $n$ ) des Generators bei Inselbetrieb, die aus den Berechnungen oben hervorgeht, soll ab  $n_{\text{cut-in}}$  zeichnerisch oder digital in die simulierten Rotorkennfelder<sup>2</sup> der WKA gelegt werden

→ zeichnerisch: hinten, oder

→ digital: Excelgraph auf Dozentenserver.

Hinweis: für  $n < n_{\text{cut-in}}$  gilt  $P_M = 0$  und  $M = 0$ .

a) Bei welchen Windgeschwindigkeiten sollte die Kleinwindanlage möglichst effizient arbeiten?

Hinweis: auszugehen ist von einer mäßigen mittleren Windgeschwindigkeit von  $v_{\text{ave}} = 4$  m/s auf einer Gondelhöhe von 10 Metern.

b) Wie ist das simulierte Anlaufverhalten bei  $n_{\text{cut-in}}$  und  $v_{\text{cut-in}} \approx 3$  m/s der WKA laut

Rotorkennfeld+Generatorkennlinie zu beurteilen?

Hinweis: für  $n < n_{\text{cut-in}}$  gilt  $P_M = 0$  und  $M = 0$ .

c) Welcher konstante Kabelwiderstand wäre bei vorliegendem Rotorkennfeld empfehlenswert?

Hinweis 1: Generatorkennlinien bei unterschiedlichen  $R_{\text{Vor}}$  mit den anderen Gruppen austauschen und vergleichen.

Hinweis 2: Da kein MPP-Tracker zur Verfügung steht, also gilt  $R_{\text{Vor}} \approx \text{const.}$ , sollte überlegt werden in welchen Situationen eine effiziente Leistungsumsetzung für das Gesamtsystem am wichtigsten ist.

## Versuchsauswertung

- Siehe Angaben zu Form und Inhalt der Auswertungen die bei der Einführungsveranstaltung vom 19.10.2012 bekannt gegeben wurden.

Bezogen auf diesen Versuch:

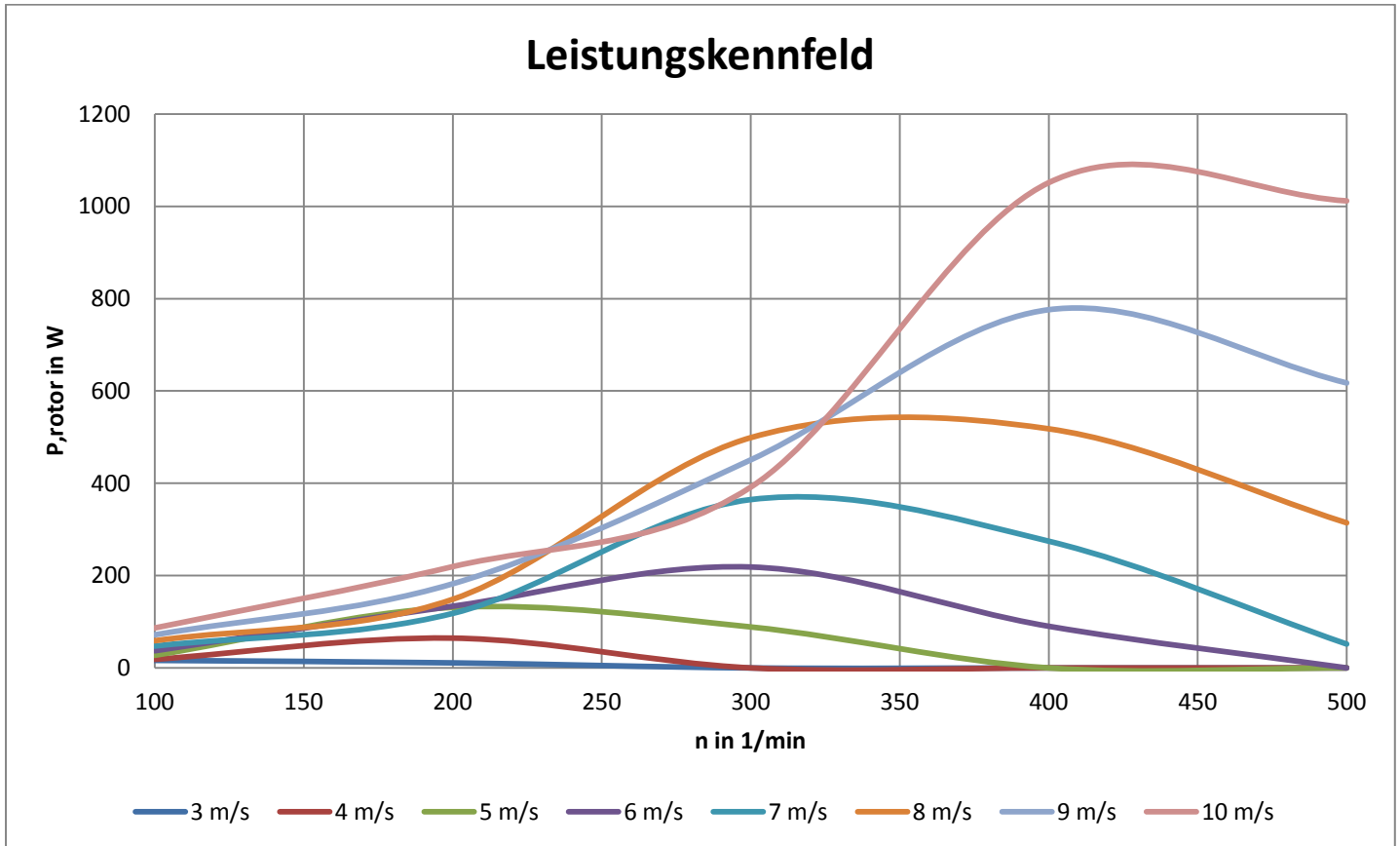
- Eine Kopie der digitalen Rohdaten direkt nach dem Versuch abgeben.
- Jeden Versuch separat anhand von Excel- und Fluke- Graphen auswerten. Spreadsheets (Datentabellen) als digitalen Anhang mit abgeben!

---

<sup>2</sup> Die Rotorkennfelder wurden mit dem freien Simulationsprogramm Qblade (Open Source) erstellt und mit Excel aufbereitet. Das reale Profil eines der hölzernen Rotorblätter der Anlage wurde hierfür abgenommen und simuliert.  
<[joerg.alber@gmx.net](mailto:joerg.alber@gmx.net)>

- Alle Ergebnisse und Angaben erklären und begründen.
- Als letztes Kapitel bitte eine Evaluation des Versuchs abgeben (was war gut/schlecht?). Diese kann wahlweise auch erst nach Notenvergabe nachgereicht werden.

## Anhang



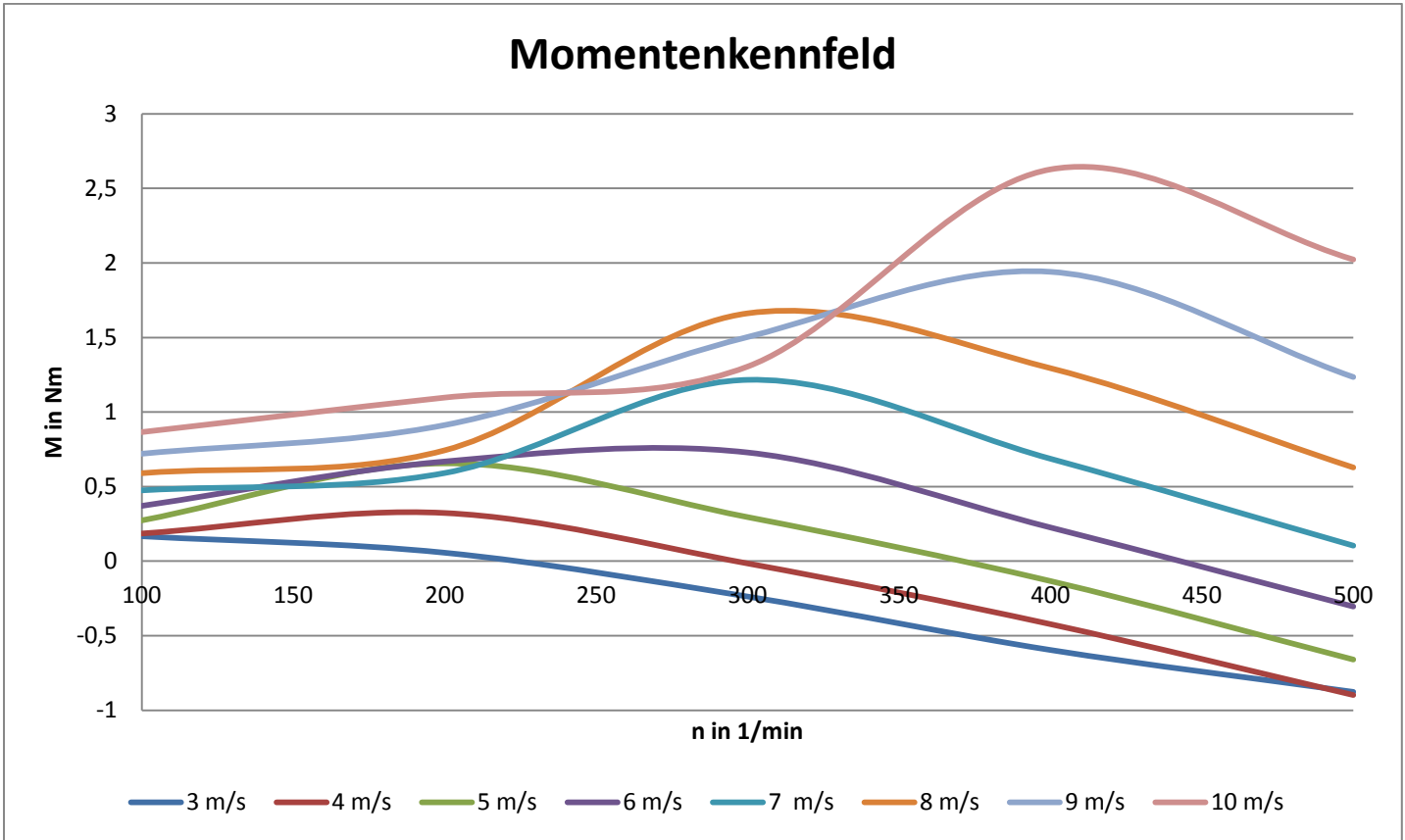


Abb.9 und 10: Kennfelder des Rotors, Qblade- Simulation, eigene Darstellung