

Universität Stuttgart

Fakultät Informatik, Elektrotechnik
und Informationstechnik

Umdruck zum Versuch

Basis 5 Erzeugung und Übertragung elektrischer Energie



Stand: 21. März 2019

Bringen Sie bitte Taschenrechner, Lineal, Stift usw. und Ihren Testatzettel mit.

Hinweis

In diesem Versuch lernen Sie anhand einfacher Beispiele einige grundlegende Begriffe und Verfahren der elektrischen Energieerzeugung und –übertragung kennen.

Damit Sie der Durchführung des Versuchs inhaltlich folgen und einen Nutzen daraus ziehen können, müssen Sie die Vorbereitungsaufgaben vorab bearbeiten und die Antworten im Umdruck festhalten. Die meisten Fragen sollten Sie mit Ihrem Physik-Schulwissen beantworten können. Weitere Hilfe finden Sie in Vorlesungsskripten, in Lehrbüchern oder im Internet.

Unvorbereitete Studierende können den Versuch grundsätzlich nicht durchführen und werden weggeschickt.

Autoren:

Dr. Renate Zapf-Gottwick / M. Sc. Simon Huber
Institut für Photovoltaik (*ipv*)

M. Sc. Manuel Fischer
Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe (ILEA)

Dr.-Ing. Ulrich Schärli
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH)

1) Einleitung

Dieser Versuch vermittelt die Grundlagen der Wandlung von mechanischer Energie bzw. Lichtenergie in elektrische Energie und geht auf dabei entstehende Verluste ein.

Photovoltaik (PV) ist die Wandlung von Lichtenergie in elektrische Energie. Photovoltaikgeneratoren bestehen aus einzelnen Solarmodulen. Ein Solarmodul besteht in der Regel aus vielen in Serie verschalteten Solarzellen. In der Photovoltaik beziehen sich alle Angaben zu PV-Generatoren immer auf eine Einstrahlung von 1000 Wm^{-2} und werden dann als Spitzenleistungswert P_P mit der Einheit Watt-Peak [Wp] angegeben. Eine Solarzelle aus kristallinem Silizium hat typischerweise einen Wirkungsgrad von $\eta \approx 17\%$, d.h. sie wandelt 17 % der eingestrahlten Leistung in elektrische Leistung um. Nachmittags beträgt die durchschnittlich eingestrahlte Leistung in Mitteleuropa $E_e = 1000 \text{ Wm}^{-2}$, wovon also $P_{PV} \approx 170 \text{ Wp}$ an elektrischer Leistung gewandelt werden können.

Die Photovoltaik (PV) gewinnt weltweit an Bedeutung. In Deutschland stieg die installierte PV-Leistung von $P_{PV} = 2,9 \text{ GWp}$ (Giga-Watt peak) im Jahr 2006 auf $P_{PV} = 43 \text{ GWp}$ bis Ende 2017, weltweit auf über 400 GW (Quelle: <http://www.volker-quaschning.de>). In Deutschland betrug der Anteil regenerativer Energien im Jahr 2016 etwa 31,7 % (2011: 20,4%; 2010: 17 %) des Bruttostromverbrauchs (Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, abgefragt am 21.3.2019: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/strommarkt-der-zukunft.html>)

Im Jahr 2018 deckte die PV-Erzeugung ca. 7,7% des Bruttostromverbrauchs in Deutschland ab (Quelle: Fraunhofer ISE, <http://www.pv-fakten.de/> , abgefragt am 21.3.2019).

An einem sehr sonnigen Tag kann die PV-Stromerzeugung hoch sein, wie im Rekordsommer 2015. 14,1 Milliarden Kilowattstunden Solarstrom haben die in Deutschland installierten PV-Anlagen von Juni bis August 2015 produziert. Dies reichte aus, um vier Millionen Haushalte ein ganzes Jahr mit sauberer Energie zu versorgen (Quelle: <http://www.pv-magazine.de>). An sonnigen Werktagen kann PV-Strom zeitweise bis zu 45 % und an Sonn- und Feiertagen sogar bis zu 60 % des momentanen Stromverbrauchs abdecken (Quelle: Fraunhofer ISE, <http://www.pv-fakten.de/> , abgefragt am 21.3.2019).

Ein großer Teil der elektrischen Energie wird bisher jedoch noch durch die Umwandlung von mechanischer Energie nach dem dynamoelektrischen Prinzip (Werner von Siemens, 1866) gewonnen, basierend auf der elektromagnetischen Induktion (Michael Faraday, 1831). Beispiele für seine Anwendung sind alle Arten von Generatoren, ob in Windkraftanlagen, Kohle-/Kern- und Gaskraftwerken oder auch in Wasserkraftwerken.

Dabei entstehen sinusförmige Wechselspannungen (im öffentlichen Netz mit einer Frequenz von 50 Hz). Wechselspannung wird auch für die Übertragung der elektrischen Energie zum Verbraucher verwendet.

Gründe:

- Wechselspannung ist leicht transformierbar und daher gut anpassbar.
- Wechselspannung ist vorteilhaft beim Einsatz von Motoren.
- Wechselstrom lässt sich wegen der Nulldurchgänge wesentlich leichter abschalten als Gleichstrom.

Die Erzeugung und Übertragung im Energieversorgungsnetz geschieht allerdings nicht einphasig, sondern dreiphasig mit einem sogenannten Drehstromsystem. Dieses besteht aus drei identischen, geeignet verschalteten einphasigen Wechselspannungssystemen. Wenn die abgenommenen Verbraucherleistungen an allen drei Phasen gleich sind, spricht man von einem "symmetrischen" Betrieb. Dieser Zustand wird angestrebt; er ist der Normalfall.

Für die Übertragung über größere Entfernungen werden in Deutschland Spannungen von 400 kV verwendet, für die Verteilung häufig 10 kV oder 20 kV.

2) Lernziele

Der Versuch behandelt drei Schwerpunktthemen.

Der erste Teil Photovoltaik erklärt die Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie. Er vermittelt die Funktionsweise und die elektrischen Eigenschaften von PV-Generatoren.

Der zweite Teil erklärt die Wandlung mechanischer in elektrische Energie am Beispiel einer Drehstromlichtmaschine und bestimmt den Wirkungsgrad. Die Studierenden bekommen ein Gefühl für die mechanische Leistung, die notwendig ist, um z. B. 30 Watt elektrische Leistung zu erzielen.

Der dritte Teil untersucht, wie die vom Generator erzeugte elektrische Energie zum Verbraucher übertragen werden kann. Dabei ist es wichtig, die Verluste so gering wie möglich zu halten. Der Versuch zeigt, dass höhere Spannungen hier vorteilhaft sind.

3) Versuchsaufbau

3.1) Photovoltaik

Bild 1 zeigt den Versuchsaufbau zur photovoltaischen Stromversorgung. Der Aufbau umfasst ein Photovoltaikmodul, einen Sonnensimulator und einen variablen Verbraucher. Das Photovoltaikmodul besteht aus 30 Solarzellen, die in Serie geschaltet sind. Jede Einzelzelle liefert eine maximale Ausgangsspannung von $V_{oc} \approx 600 \text{ mV}$ im Leerlauf und einen maximalen Ausgangsstrom im Kurzschluss von $I_{sc} = 4,1 \text{ A}$ im Kurzschlussbetrieb bei einer Sonneneinstrahlung von $E_e = 1000 \text{ Wm}^{-2}$.

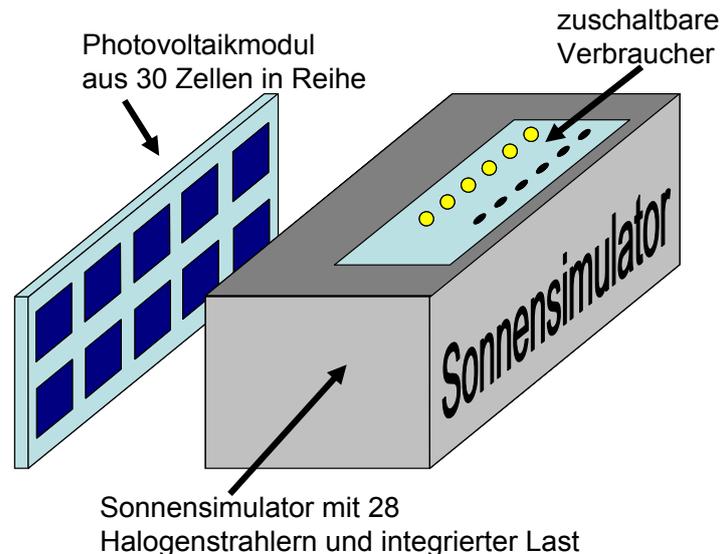


Bild 1: Versuchsaufbau zur photovoltaischen Stromversorgung.

Der Aufbau besteht aus Solarmodul, regelbarem Sonnensimulator und einstellbarem Verbraucher. Der Sonnensimulator beleuchtet ein PV-Modul, das Modul wandelt die Lichtleistung in elektrische Leistung um und gibt sie an die einstellbare Last ab.

Der Sonnensimulator besteht aus 28 Halogenstrahlern mit einer Nennspannung $V_H = 12 \text{ V}$ und einer Leistung von je $P_H = 50 \text{ W}$. Die Halogenstrahler beleuchten das PV-Modul mit einer über die Betriebsspannung der Strahler einstellbaren Lichtintensität E_e . Der einstellbare Verbraucher umfasst Anschlussbuchsen für den PV-Generator, sowie für ein Strom- und ein Spannungsmessgerät. Der Verbraucher besteht aus acht über Schalter zuschaltbare Lampen mit einer Nennbetriebsspannung $V_L = 24 \text{ V}$ und einer Nennleistung von $P_L = 20 \text{ W}$. Die Schalter schalten die Lampen jeweils parallel zum Solarmodul und erhöhen so den Laststrom I_{PV} des Moduls.

3.1.1) Die Solarzelle

Bild 2 zeigt den Aufbau einer Solarzelle. Die wichtigsten Bestandteile der Solarzelle sind die p-Typ Basis und der stark phosphordotierte n^{++} -Emitter an der Vorderseite der Zelle. Die Basis ist der Hauptbestandteil einer mit Bor dotierten Siliziumscheibe mit ca. $200 \mu\text{m}$ Dicke. Der Emitter besteht aus einer n^{++} -Schicht, die durch eine Oberflächendotierung in einem Diffusionsprozess entsteht. Bei der Dotierung ersetzen

Dotieratome die Originalatome im Kristallgitter. Besitzt das Fremdatom weniger Valenzelektronen als das Halbleiterelement, bleibt eine Elektronenpaarbindung im Halbleitergitter unbesetzt. Diese wird als Loch bezeichnet. Der Halbleiter ist dann p-Typ dotiert. Besitzt das Fremdatom mehr Valenzelektronen als das Halbleiterelement, bleibt ein Elektron im Gitter frei und steht zum Stromtransport zur Verfügung. Der Halbleiter mit Elektronenüberschuss ist dann n-Typ dotiert. Am Übergang zwischen den beiden Schichten bildet sich durch Ladungsträgerdiffusion die Raumladungszone aus. Dazu besetzen im Grenzbereich die Elektronen des n-Typ Halbleiters die Löcher des p-Typ Halbleiters, wodurch Elektronen am Rand des n-Typ Materials fehlen und im p-Typ Gebiet zu einer negativen Überschussladung führen. Das in der Zelle absorbierte Licht erzeugt Elektron- Loch-Paare, wobei das elektrische Feld der Raumladungszone ein Konzentrationsgefälle (ähnlich einem Wasserfall) für die Ladungsträger schafft. Wenn die Elektronen und die Löcher die Solarzelle über die Front- und Rückkontakte verlassen, können sie in einem äußeren Stromkreis Arbeit verrichten.

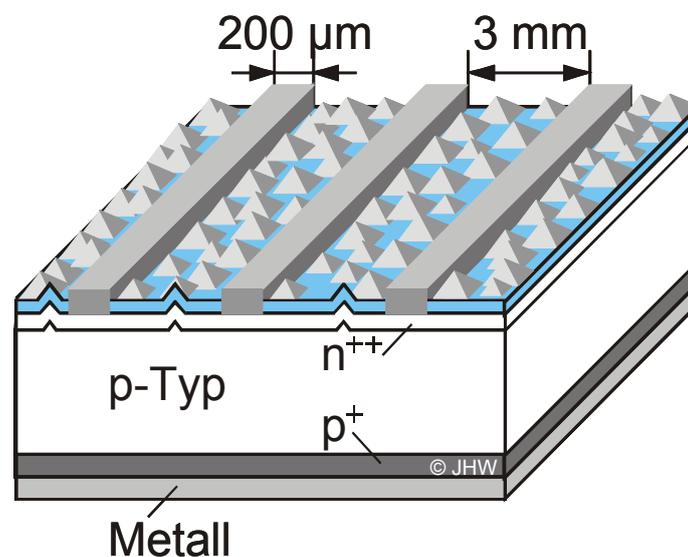


Bild 2: Aufbau einer Solarzelle.

Schmale Frontkontakte und eine pyramidenförmige Oberfläche begünstigen den Lichteinfall. Die Zelle absorbiert Licht, und der pn-Übergang schafft ein Konzentrationsgefälle, das die photogenerierten Ladungsträger zu den Kontakten diffundieren lässt. Am Rückkontakt sammeln sich Löcher, an der Vorderseite Elektronen.

Die Metallfinger an der Vorderseite und die Metallfläche an der Rückseite (meist aus Aluminium) bilden die elektrischen Kontakte der Solarzelle. Industrielle Fertigungsprozesse nutzen das Siebdruckverfahren, um die Kontakte auf die Vorder- und Rückseite der Solarzellen aufzubringen. Ein guter elektrischer Kontakt bildet sich jedoch erst während eines Feuerprozesses, der die Solarzelle kurz auf eine Temperatur $T_F > 800^\circ\text{C}$ erhitzt.

Um den Wirkungsgrad der Solarzellen zu erhöhen, wird ihre Vorderseite geätzt. Der Ätzprozess erzeugt mikroskopisch kleine Pyramiden, die den Lichteinfall verbessern. Mehr Licht erzeugt mehr Ladungsträgerpaare, daher liefern solche Solarzellen mit "texturierter" Vorderseite einen höheren Ausgangsstrom I_{sc} als Zellen ohne Textur.

3.1.2) Funktion der Solarzelle

Nur wenig Licht, das auf die Vorderseite der Solarzelle trifft, wird in der sehr dünnen n^{++} -Schicht absorbiert, der größte Teil gelangt in die p-Typ Basis und wird dort absorbiert. Die in der Basis absorbierten Photonen geben ihre Energie an Elektronen im Halbleitergitter ab. Die Elektronen mit der zusätzlichen Energie des absorbierten Photons lösen sich aus der Elektronenpaarbindung der Gitteratome. Die dadurch "frei" gewordenen Elektronen können sich im Halbleiter in jede Richtung bewegen und hinterlassen im Gitter eine unbesetzte Stelle, ein Loch. Ein solches Loch besitzt eine positive elektrische Ladung, da dem unbesetzten Zustand ein negativ geladenes Elektron fehlt. Die Elektronen und die Löcher bewegen sich unabhängig voneinander in der p-Typ Basis, bis sie entweder aufeinander treffen und zu einer vollständigen Elektronenpaarbindung im Gitter rekombinieren, oder in die Raumladungszone gelangen. Das elektrische Feld der Raumladungszone schafft ein Konzentrationsgefälle für die Ladungsträger. Auf Grund der unterschiedlichen Ladung von Elektronen und Löchern diffundieren sie in unterschiedliche Richtungen und werden so getrennt (kristalline Siliziumsolarzelle als Diffusionszelle). Die Trennung der Ladungsträger führt zu einem Potentialunterschied zwischen Vorder- und Rückseite, wodurch eine elektrische Spannung entsteht, die über die Metallkontakte zugänglich ist.

3.2) Drehstromgenerator

In diesem Versuchsteil wird eine Drehstrom-Lichtmaschine aus dem Automobil als Generator eingesetzt (Fachbegriff: *fremderregte Synchronmaschine*).

Dieser Generator benötigt einen sogenannten Erregerstrom I_e (= einstellbarer Gleichstrom bis max. ca. 3 A), der über Graphit-Schleifkontakte auf den rotierenden Läufer (Rotor) gebracht wird und durch dessen Wicklung fließt. Dadurch entsteht ein rotierendes Magnetfeld (Erregerfeld), das in den drei feststehenden Ständerwicklungen drei sinusförmige Wechselspannungen induziert. Diese Wechselspannungen können zwischen drei Buchsen (U, V, W) abgegriffen werden. Bild 3 zeigt die prinzipielle Anordnung von Statorwicklungen und Rotor.

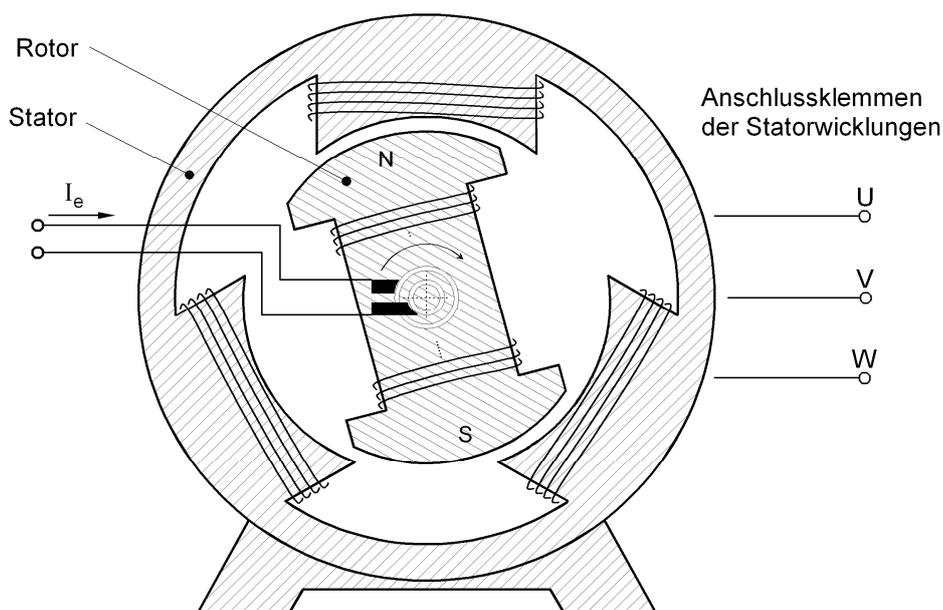


Bild 3: Prinzipskizze eines Drehstromgenerators, wie im Auto eingesetzt.

Mit einer Kurbel treiben Sie den Generator an. Je nach Ihrem körperlichen Leistungsvermögen erreichen Sie eine Kurbeldrehzahl von etwa 120 Umdrehungen pro Minute. Über ein Getriebe wird diese Drehzahl auf 1200 Umdrehungen/Minute umgesetzt, da Drehstrom-Lichtmaschinen im Kraftfahrzeug nicht für niedrige Drehzahlen ausgelegt sind.

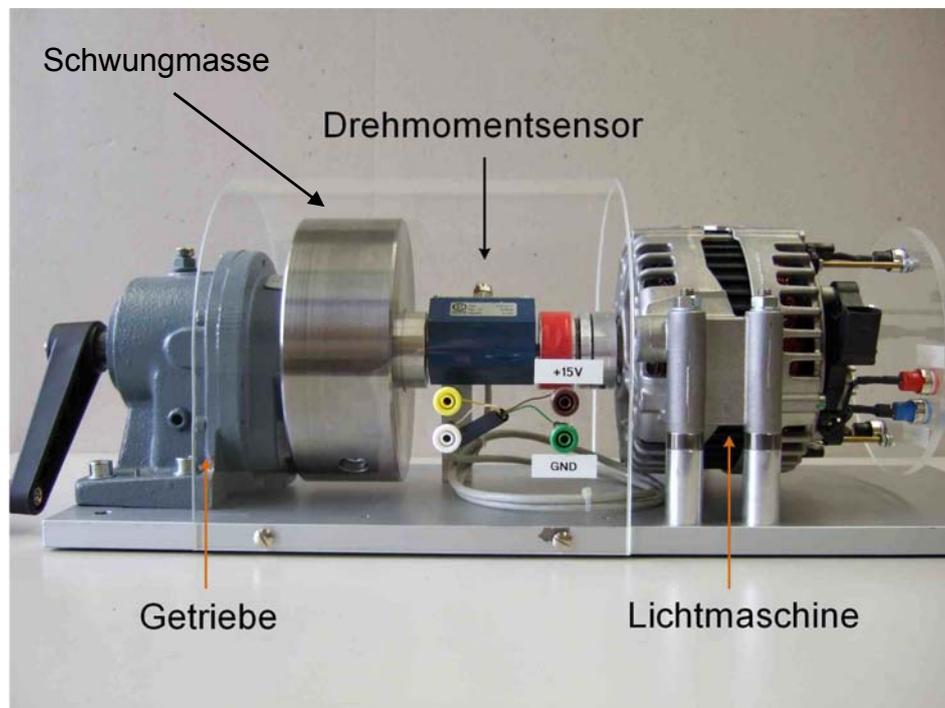


Bild 4: Aufbau des Generators im Versuch, bestehend aus Lichtmaschine, Drehmomentsensor, Schwungmasse und Getriebe.

Die Drehzahl können Sie mit einem mobilen Drehzahlmessgerät messen. Dazu richten Sie seinen Lichtstrahl auf einen reflektierenden Streifen, der auf der Welle oder Schwungmasse aufgeklebt ist. Die Schwungmasse wurde übrigens notwendig, damit beim Kurbeln sowohl Drehmoment als auch Drehzahl gleichmäßiger sind.

Auf der Welle ist ein Sensor eingebaut, der das Drehmoment in eine Gleichspannung umsetzt (5 Nm entsprechen 5 V). Diese wird am besten mit einem (trägen) Drehspulinstrument angezeigt.

3.3) Drehstromübertragung

Hier soll die erzeugte elektrische Energie zu einem weiter entfernten Verbraucher übertragen werden. Dafür steht eine 100 m lange, 5-adrige Kabelleitung zur Verfügung. Als Verbraucher sind 3 x 2 Stück Glühlampen (Nennaten je 12 V/21 W) vorgesehen.

Außerdem können Transformatorstationen eingesetzt werden, die aus einphasigen 30-VA-Ringkerntransformatoren bestehen.

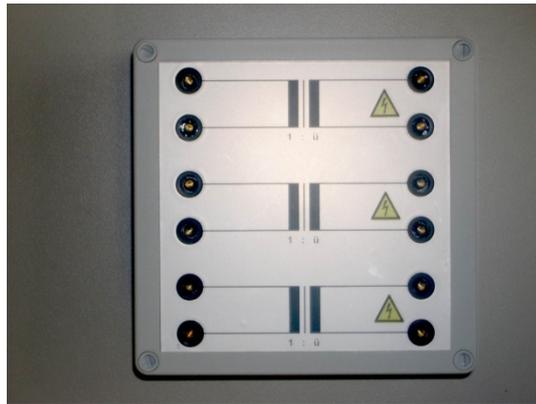


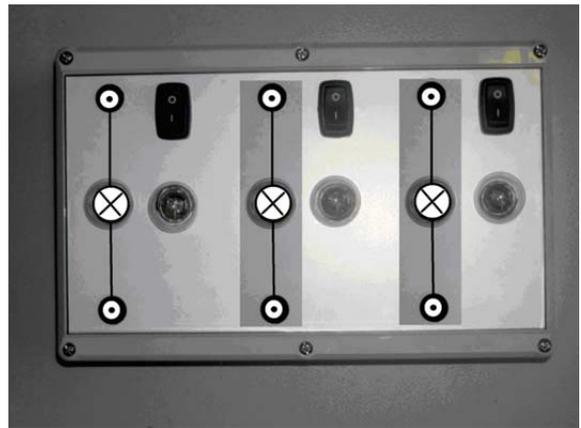
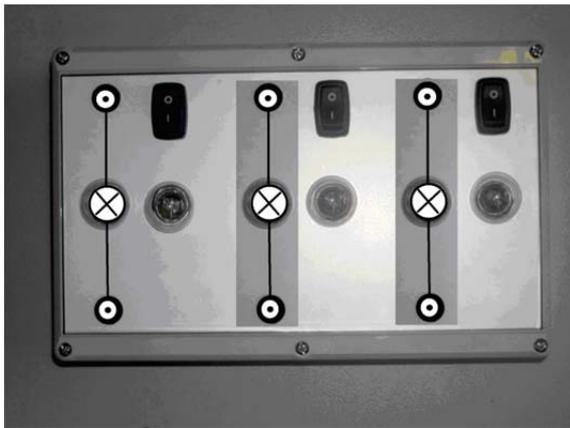
Bild 5: *Kabelleitung, Verbraucher und Transformatorstation.*

4) Vorbereitungsaufgaben

1. Welche Leerlaufspannung $V_{oc,PV}$ hat das PV-Modul des Versuchs?
2. Wie wirkt sich die Abschattung einer Zelle auf die Leerlaufspannung V_{oc} und den Kurzschlussstrom I_{sc} des Moduls bei einer Beleuchtung von $E_e = 1000 \text{ W/m}^2$ aus?
3. Wo sind der Pluspol und der Minuspol der Solarzelle? Bezeichnen Sie die Kontakte in Bild 2.
4. Welche Richtung hat die Coulombkraft in der Raumladungszone auf Elektronen und auf Löcher? Zeichnen Sie die Richtungen mit einem Pfeil F_e für Elektronen und mit F_h für Löcher ein.
5. Das Ersatzschaltbild einer idealen Solarzelle besteht aus einer Stromquelle und einer parallel liegenden Diode. Skizzieren Sie das Ersatzschaltbild und ergänzen Sie es in einer zweiten Zeichnung um zwei Verlustwiderstände zum Eindiодenersatzschaltbild einer realen Solarzelle.
6. Welchen Ausgangsstrom I_{PV} in Abhängigkeit von der Ausgangsspannung V_{PV} erwarten Sie für die ideale Solarzelle?
Skizzieren sie die Strom-Spannungskennlinie (I/V -Kennlinie).
Hinweis: Skizzieren Sie zuerst die exponentielle I/V -Kennlinie einer normalen Diode.
Wie ändert sich diese, wenn Licht auf die Solarzelle fällt?

7. Welche Ausgangsleistung P_{PV} in Abhängigkeit von der Spannung V_{PV} ergibt sich aus der I/V -Kennlinie? Skizzieren Sie den Verlauf.
8. Geben Sie den Zusammenhang zwischen mechanischer Antriebsleistung P_{mech} , der Kraft F und der Geschwindigkeit v eines Körpers an.
9. Geben Sie den Zusammenhang zwischen mechanischer Antriebsleistung $P_{\text{mech, rot}}$ einer rotierenden Maschine und dem Drehmoment M bei konstanter Drehzahl n an.
10. Wie lautet die Formel für die elektrische Leistung P bei Gleichstrom?
11. Wie lautet die Formel für die elektrische (Wirk-)Leistung P bei Einphasen-Wechselstrom für einen ohmschen Verbraucher?
12. Informieren Sie sich über den prinzipiellen Aufbau eines Drehstromsystems, bestehend aus den drei Grundelementen "Drehstromerzeuger" (Quelle), "Übertragungsleitung", "Drehstromverbraucher" (Last).
Skizzieren Sie nachfolgend „Quelle“, „Leitung“ und „Last“ und deren mögliche Verschaltungen, d.h. in Stern- und in Dreieckschaltung.
13. Wie lautet die Formel für die elektrische Scheinleistung S bei Drehstrom?
(siehe z.B. Skript zur Vorlesung Energietechnik 1)
Zeichnen Sie die nötigen Größen in Ihrer obigen Skizze ein.

14. Zeichnen Sie **in Farbe** bei den beiden unten abgebildeten Drehstromverbrauchern (je drei Glühlampen) die Kabelverbindungen ein, die für eine Verschaltung im Stern (linkes Bild) und im Dreieck (rechtes Bild) benötigt werden.



15. Leitungen sind - wie alle realen Elemente - verlustbehaftet. Welche Größen benötigt man, um die ohmsche Verlustleistung P_V einer Drehstrom-Übertragungsstrecke zu bestimmen? Geben Sie die Formel für P_V an.

16. Kleine ohmsche Widerstandswerte können nur aufwändig mit guter Genauigkeit gemessen werden. Bei dem im Versuch verwendeten Multimeter findet man im Datenblatt für den (kleinsten einstellbaren) Widerstands-Messbereich „200 Ohm“:
- Genauigkeit: $\pm(1\% + 3 \text{ Digits})$
 - Auflösung: $0,1 \text{ Ohm}$
- Schätzen Sie (ohne Rechnung), in welchem Bereich der tatsächliche Widerstandswert liegen kann, wenn das Multimeter $1,3 \text{ Ohm}$ anzeigt.

Antwort: Zwischen und Ohm

Welche Methode kennen Sie, mit der ohmsche Widerstandswerte genau bestimmt werden können?

17. Was ist ein Transformator? Kann man ihn mit Gleichspannung, wie sie z.B. von PV-Modulen geliefert wird, betreiben?

18. Was bedeutet das Übersetzungsverhältnis eines Transformators? Wie können Sie es durch eine Messung bestimmen und welche Geräte benötigen Sie dazu?

19. Wie ist der Wirkungsgrad η eines Geräts oder einer Anlage definiert?

5) Versuchsdurchführung

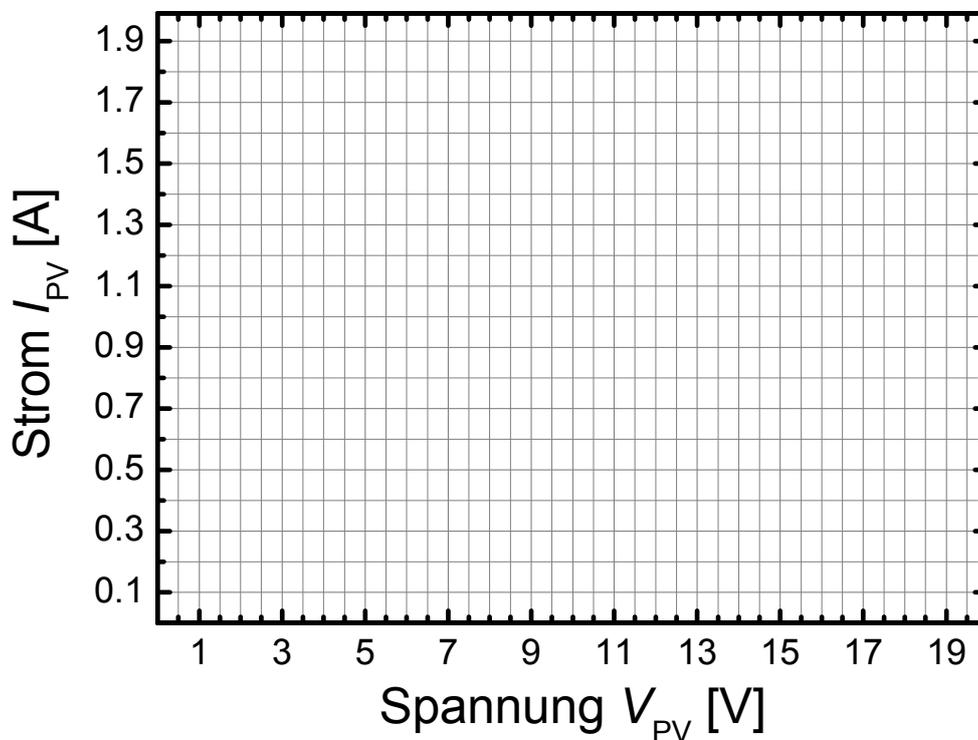
5.1) Photovoltaische Energiegewinnung

1. Der Kurzschlussstrom einer Solarzelle ist proportional zur Anzahl absorbiertes Photonen. Kalibrieren Sie zunächst die Beleuchtungsstärke E_e des Sonnensimulators mit einer Kalibrierzelle auf $E_e = 160 \text{ W/m}^2$.
2. Schließen Sie das Solarmodul an den integrierten Verbraucher an und messen Sie die Leerlaufspannung V_{oc} und den Kurzschlussstrom I_{sc} des Moduls.

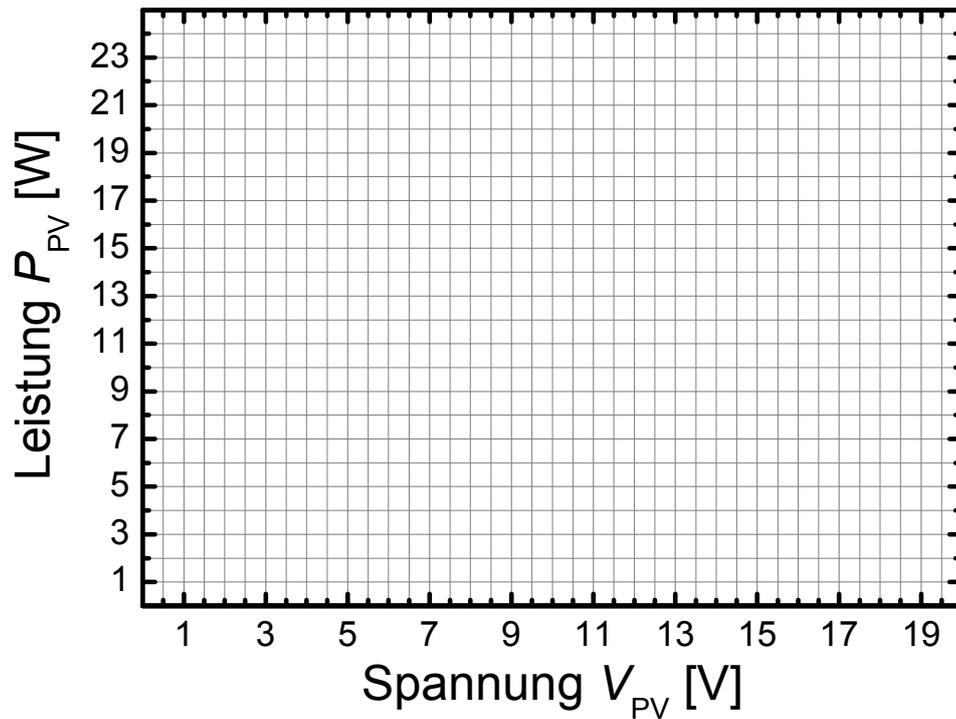
$V_{oc} =$

$I_{sc} =$

3. Schalten Sie nacheinander die Verbraucherlampen an und messen Sie jeweils den Strom I_{PV} und die Spannung V_{PV} des PV-Moduls. Zeichnen sie die Werte in ein Diagramm.



4. Wie verhalten sich die Lampen? Berechnen Sie die Werte der Ausgangsleistung für alle 8 Messpunkte und tragen Sie diese in ein Diagramm ein.

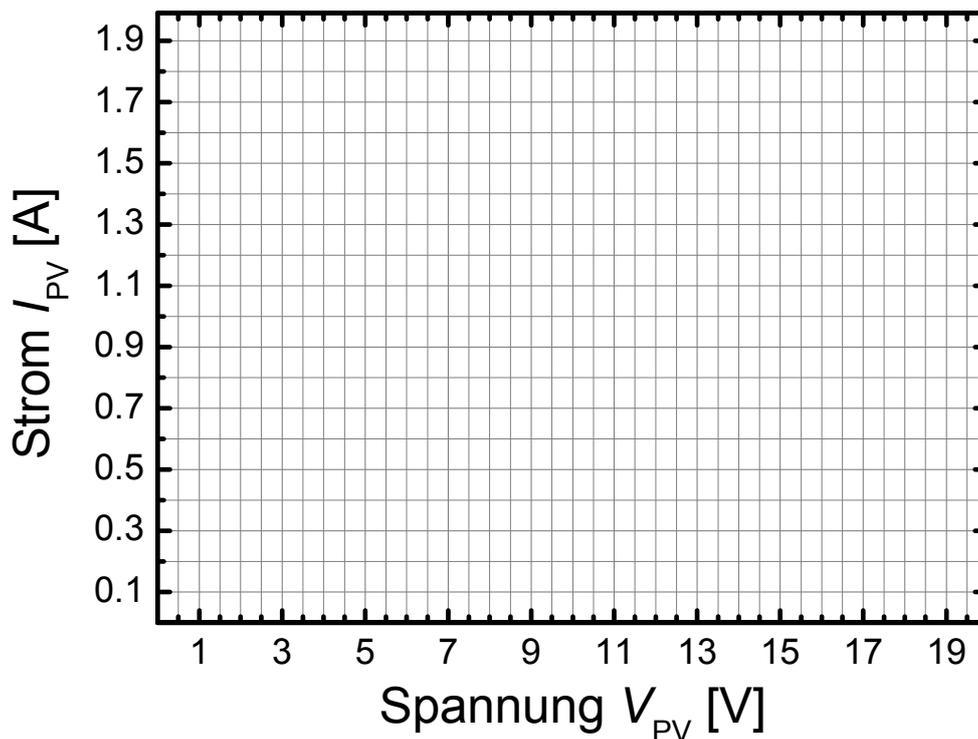


5. Kalibrieren Sie nun den Sonnensimulator auf 1/3 der durchschnittlichen europäischen Strahlungsdichte und wiederholen Sie die Aufgaben 1-4.

$V_{oc} =$

$I_{sc} =$

6. Diskutieren Sie die Ergebnisse der verschiedenen Messungen. Was bedeuten die berechneten Leistungskurven für den Betrieb von Solarzellen?
7. Schatten Sie eine Solarzelle auf der rechten Seite des Moduls ab und nehmen sie eine IV-Kurve auf. Welche maximale Leistung gibt das Modul ab?



8. Schatten Sie zusätzlich eine Solarzelle auf der linken Seite des Moduls ab und wiederholen Sie die Messung. Wie lässt sich das Verhalten des Moduls erklären?

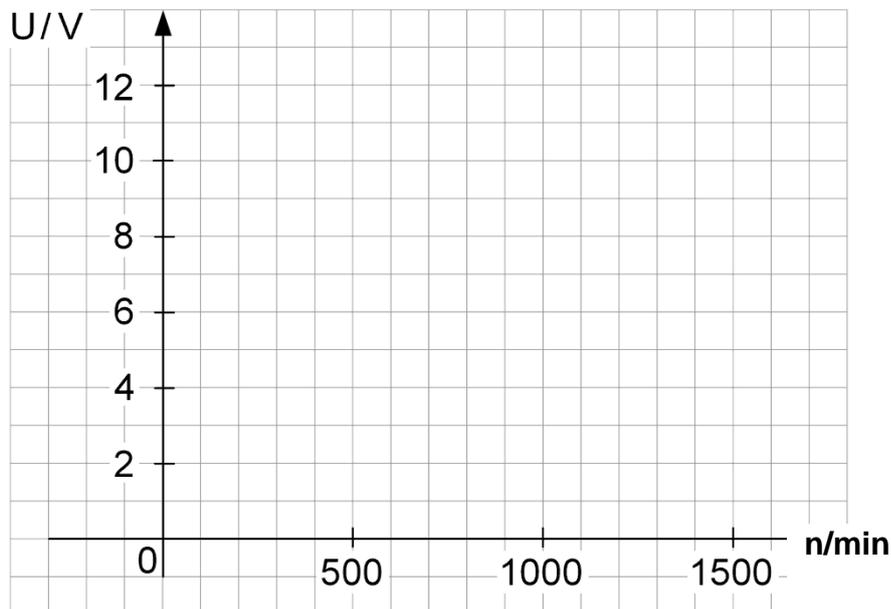
5.2) Drehstromerzeugung

1. Messen Sie mit den zur Verfügung stehenden Digital-Multimetern die Leerlauf-Ausgangsspannung(en) des hier verwendeten Drehstrom-Generators in Abhängigkeit von der Drehzahl bei verschiedenen Erregerströmen (z. B. zwischen 1 und 3 Ampere).

Erregerstrom/A	Drehzahl/min							
	500	600	700	800	900	1000	1200	
1								
2								
3								

Tabelle: Gemessene Leerlaufspannungen (Leiter-Leiter)

Tragen Sie die Messwerte im Diagramm ein.



Diskutieren Sie das Ergebnis, z.B.:

- Verdoppelung des Erregerstroms: Ist die Spannungsänderung proportional?
-

2. Schließen Sie an den Generator als Drehstromverbraucher die Box mit den Glühlampen 12 Volt/21 Watt an.

Probieren Sie Stern- und Dreieckschaltung aus.

Hinweis: Die Verkabelung wird deutlich übersichtlicher, wenn Sie z.B. rote Kabel für die Phasenleiter und schwarze Kabel für den Nullleiter verwenden.

Diskutieren Sie das Verbraucherverhalten:

3. Bestimmen Sie die von Ihnen erbrachte mechanische Antriebsleistung des Generators bei angeschlossenem Verbraucher (Dreieckschaltung empfohlen) für eine Drehzahl von 1000/min und bei einem geeigneten Erregerstrom (empfohlen sind 2 A). Dazu benötigen Sie die Drehzahl (Drehzahlmessgerät) und das Drehmoment (Drehmomentsensor).

Der Drehmomentsensor liefert bei einem Antriebs-Drehmoment von 5 Nm an den Ausgangsbuchsen eine Gleichspannung von 5 V.

Wie lautet der Umrechnungsfaktor?

Erregerstrom/A	Drehzahl/min	$U_{\text{Drehmoment}}/V$	Drehmoment/Nm	$P_{\text{mech, rot}}/W$

Tabelle: Gemessene Drehzahlen und Drehmomente

$$P_{\text{mech, rot}} =$$

4. Bestimmen Sie bei der Drehzahl und beim gleichen Erregerstrom wie in Teilaufgabe 3 die im Drehstromverbraucher umgesetzte elektrische Leistung.

Welche Spannungen und Ströme sollte man dazu messen?

	Dreieckschaltung	Sternschaltung
U in Volt (je Strang)		
I in Ampere (je Strang)		
P in Watt (je Strang)		
ΣP in Watt		

5. Welchen Wirkungsgrad η des Drehstromgenerators erhalten Sie bei Dreieckschaltung?

Formel für den Wirkungsgrad: $\eta =$

6. Ändern Sie nun den Verbraucher durch Zuschalten der zweiten Glühlampe je Zweig, während Sie kurbeln.

Was fällt Ihnen dabei auf?

	Dreieckschaltung	
U in Volt (je Strang)		
I in Ampere (je Strang)		
P in Watt (je Strang)		
ΣP in Watt		

Welchen Wirkungsgrad des Drehstromgenerators erzielen Sie für diesen Belastungsfall?

5.3) Drehstromübertragung

1. Welchen ohmschen Widerstand hat ein einzelner Leiter der 100 m langen Kabelstrecke? Schätzen Sie!

Messen Sie ihn nun mit einem Multimeter.

$$R_{\text{Leiter}} =$$

Niedrige Widerstandswerte sind mit einfachen Multimetern nur ungenau zu messen. Wie könnten Sie die Genauigkeit der Messung bei diesem Aufbau erhöhen?

2. Verbinden Sie Generator und Drehstromverbraucher (in Dreieckschaltung) über die Kabelstrecke (Leiter L_1 , L_2 , L_3).

Messen Sie die im Drehstromverbraucher umgesetzte elektrische Leistung bei Drehzahl und Erregerstrom nach Kapitel 5.2, Teilaufgabe 4.

Welche Leistung bzw. welchen Wirkungsgrad würden Sie hier erwarten?

	Dreieckschaltung	
U in Volt (je Strang)		
I in Ampere (je Strang)		
P in Watt (je Strang)		
ΣP in Watt		

Bestimmen Sie den Wirkungsgrad mit und ohne Kabelstrecke (siehe 5.2, Teilaufgabe 4).

Ist diese Kabelstrecke Ihrer Meinung nach für eine Übertragung geeignet?

Wie könnten Sie die im Kabel in Wärme umgesetzte Verlustleistung bestimmen?

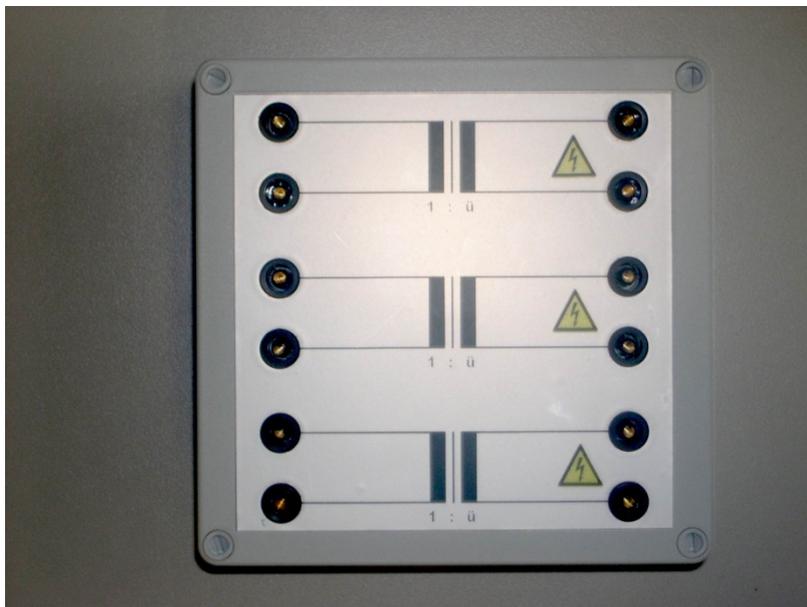
In der Praxis wird elektrische Energie über größere Entfernungen mit höheren Spannungen übertragen. Dies soll mit dem Einsatz von Transformatorstationen nachgebildet und untersucht werden.

3. Die hier verwendeten einphasigen Transformatoren haben identische technische Daten. Bestimmen Sie zunächst ihr Übersetzungsverhältnis.

$$\dot{U} =$$

4. Schließen Sie nun eine der Transformatorstationen an den Generator an, indem Sie die drei Eingänge auf der Unterspannungsseite der Transformatoren im Dreieck und die drei Ausgänge überspannungsseitig im Stern verschalten. Dabei entsteht ein sogenannter Sternpunkt, der mit dem Buchstaben N bezeichnet wird.

Zeichnen Sie die notwendigen Verbindungen im Bild ein!



Messen Sie die Spannungen am Ausgang gegen den Sternpunkt N und zwischen den Außenleitern (Strangspannung). Prüfen Sie, ob es einen Zusammenhang gibt.

	Leiter gegen N	Strangspannung	Verhältnis
U in Volt			
U in Volt			

5. Verbinden Sie den Ausgang (Oberspannungsseite) der ersten Transformatorstation über die Kabelstrecke mit dem Eingang (Oberspannungsseite!) der zweiten Transformatorstation. Station 1 ist in Dreieck/Stern geschaltet, Station 2 in Stern/Dreieck.

Verbinden Sie auch die Sternpunkte N der beiden Transformatorstationen über den Leiter N.

Welche Leistung nimmt der Drehstromverbraucher jetzt auf (Drehzahl und Erregerstrom wie bei Kapitel 5.2, Teilaufgabe 4)?

	Dreieckschaltung	
U in Volt (je Strang)		
I in Ampere (je Strang)		
P in Watt (je Strang)		
ΣP in Watt		

Welchen Wirkungsgrad erhalten Sie nun?

Vergleichen Sie mit der Übertragung ohne Transformatorstationen.

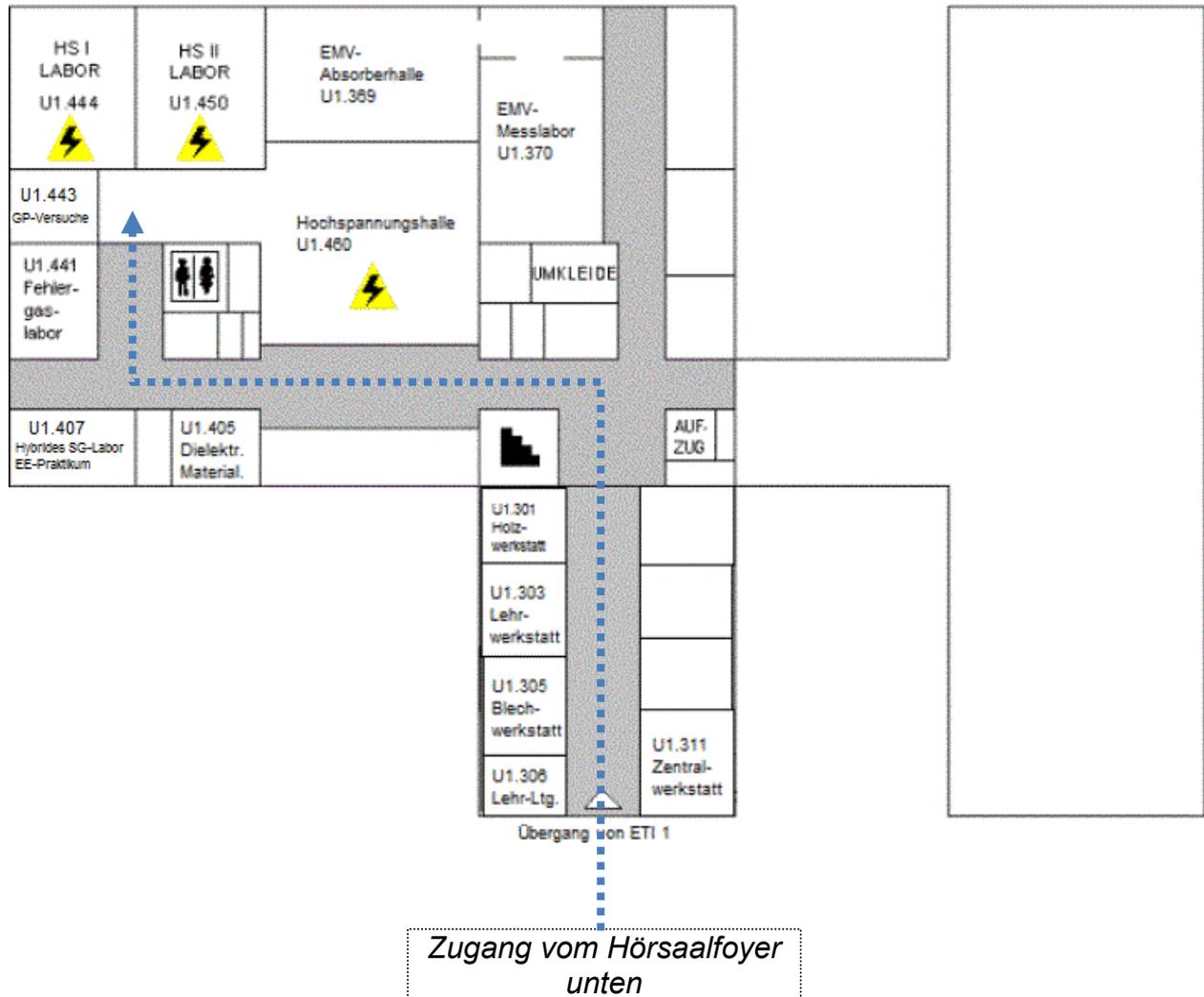
6. Messen Sie den Strom im Leiter N der Übertragungsstrecke (sogenannter Neutralleiter oder Nullleiter) sowie den Strom in einem der Leiter L_1 bis L_3 . Vergleichen Sie!

Was passiert beim Drehstromverbraucher, wenn Sie den Nullleiter unterbrechen?

7. Was passiert, wenn Sie die drei Zweige des Verbrauchers ungleich belasten (z. B. durch Zuschalten von nur einer weiteren Lampe)? Messen Sie erneut den Strom im Nullleiter.

Lageplan des Versuchsraums nur für die Versuche Basis5-IEH

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik
Pfaffenwaldring 47, Gebäudeteil ETI 2



Die Versuche Basis5-ILEA und Basis5-IPV finden Sie im Gebäudeteil ETI 1.