

4 Wechselstromkreis

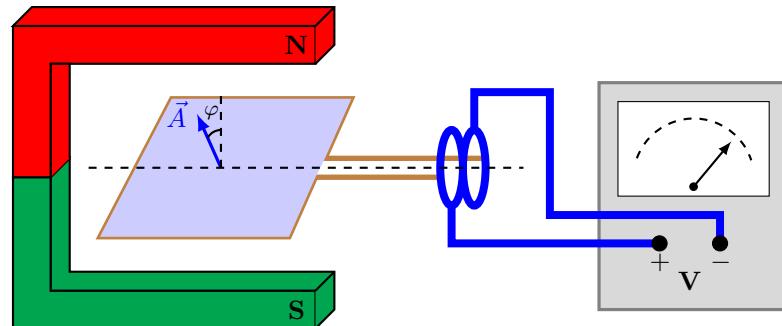
Lernziele

- Sie wissen, wie man Wechselspannung erzeugen kann und können diese formal ausdrücken.
- Sie verstehen, wie sich Wechselspannung an verschiedenen Blindwiderständen verhält und können dazu einfache Aufgaben lösen.
- Sie kennen die Abhängigkeiten von kapazitiven und induktiven Blindwiderständen.
- Sie verstehen den Transformator.

In diesem Abschnitt werden wir uns eingehend mit dem Wechselstromkreis und seinen vielfältigen Komponenten auseinandersetzen. Beginnend mit der Erzeugung von *Wechselspannung*, werden wir schrittweise verschiedene Typen von *Blindwiderständen* in den Wechselstromkreis integrieren. Dabei reicht die Bandbreite von ohmschen Widerständen über Kapazitäten bis hin zu Induktivitäten. Abschliessend werden wir uns kurz dem *Transformator* widmen.

4.1 Wechselspannungsgenerator

In diesem Abschnitt wiederholen wir kurz, wie man Wechselspannung generieren kann. Um Wechselspannung zu erzeugen, benötigen wir lediglich eine drehbar gelagerte Spule oder einen drehbar gelagerten Permanentmagneten. An der Spule wird die erzeugte Wechselspannung gemessen und weiterverwendet. Im Folgenden betrachten wir diesen vereinfachten Aufbau:



Ist A die Fläche innerhalb der Spule, so gilt für den magnetischen Fluss Φ :

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \varphi,$$

wobei B das Magnetfeld zwischen den Permanentmagneten ist. Drehen wir nun die Spule mit der Winkelgeschwindigkeit ω , dann ergibt sich für den momentanen Winkel $\varphi(t) = \omega t$. Daraus erhalten wir für den magnetischen Fluss:

$$\Phi(t) = BA \cos(\omega t).$$

Die induzierte Spannung ist damit:

$$U_{\text{int}}(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = BA\omega \sin(\omega t).$$

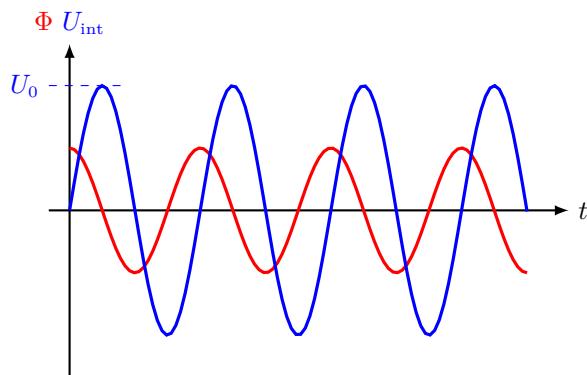
Wenn die Winkelgeschwindigkeit konstant ist, können wir die Scheitelspannung oder Maximalspannung festlegen als:

$$U_0 = BA\omega.$$

Dadurch erhalten wir die induzierte Wechselspannung oder kurz die Wechselspannung $U(t)$ als:

$$U(t) = U_0 \sin(\omega t)$$

Dies sieht graphisch wie folgt aus:



Beachten Sie, dass der Term $BA\omega$ in der Tat die Einheit einer Spannung hat. Es gilt nämlich:

$$[BA\omega] = \frac{\text{T m}^2}{\text{s}} = \frac{\text{kg}/(\text{A s}^2) \text{ m}^2}{\text{s}} = \frac{\text{J}}{\text{As}} = \text{V.}$$

Def. 1: (Wechselspannung) Für eine Wechselspannung $U(t)$ mit der Kreisfrequenz ω und der Phase φ gilt:

$$U(t) = U_0 \sin(\omega t + \varphi),$$

wobei U_0 die Amplitude ist.

Exp. 1: Wechselspannung eines Dynamos

In diesem Experiment schauen wir uns auf einem KO (Kathodenstrahl-Oszilloskop) den Wechselspannungsverlauf eines Dynamos an.



Es lässt sich erkennen, dass es sich annähernd um eine Sinusfunktion handelt. Die Unregelmäßigkeiten entstehen dadurch, dass im Inneren nicht nur eine einfache Leiterschleife vorhanden ist, sondern in der Regel mindestens eine gekreuzte Leiterschleife. Diese Mehrfach-Schleifen führen zu einer Überlagerung von Sinusfunktionen.

Betrachten wir gleich ein einfaches Beispiel aus dem Alltag.

Bsp. i.

Aus der Steckdose kommen hierzulande bekanntlich 230 V Wechselspannung, wobei diese mit einer Frequenz von 50 Hz schwingt. Wie gross müsste eine Spulenfläche sein, damit bei einem Magnetfeld von 0.5 T diese Spannung erreicht wird.

Lsg: $A \approx 1.5 \text{ m}^2$

Lösung:

Im Folgenden sollen verschiedene sogenannte Blindwiderstände in eine Wechselspannungsschaltung eingebunden werden. Der Begriff *Blindwiderstand* stammt aus der Elektrotechnik und bezieht sich auf den scheinbaren Widerstand in einem Wechselstromkreis, der durch kapazitive oder induktive Elemente erzeugt wird. Im Gegensatz zum rein ohmschen Widerstand, der eine Phasenverschiebung von Null Grad zwischen Spannung und Strom aufweist, erzeugen kapazitive und induktive Elemente eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom, wodurch der Eindruck eines zusätzlichen, *blind*en Widerstands entsteht.

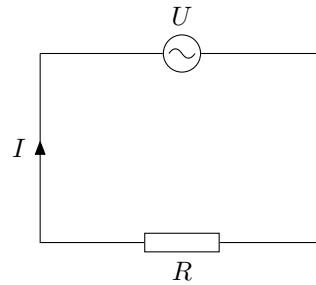
Der Begriff *blind* bezieht sich hier darauf, dass dieser scheinbare Widerstand (für den idealen Fall) nicht zu einem realen Verlust von Energie in Form von Wärme führt, sondern auf die Phasenverschiebung zurückzuführen ist. In gewisser Weise *versteckt* sich dieser Widerstand in der Phase des Stroms im Vergleich zur Spannung und wird daher als *Blindwiderstand* bezeichnet.

4.2 Wechselspannung an Blindwiderständen

Wir werden nun das Verhalten von Wechselspannung an einem Widerstand, einer Kapazität und einer Induktivität besprechen.

4.2.1 Wechselspannung an einem Widerstand

Nun betrachten wir eine Wechselspannungsquelle und einen ohmschen Widerstand, um die Stromstärke in einer einfachen Schaltung zu berechnen. Die folgende Schaltung wird dabei betrachtet:



Mit den Kirchhoff-Regeln lässt sich der Strom in einfachen Schritten berechnen. Die Spannung, die über dem Widerstand U_R abfällt, entspricht der angelegten Spannung U .

$$U - U_R = 0 \quad \Rightarrow \quad U = U_R = IR,$$

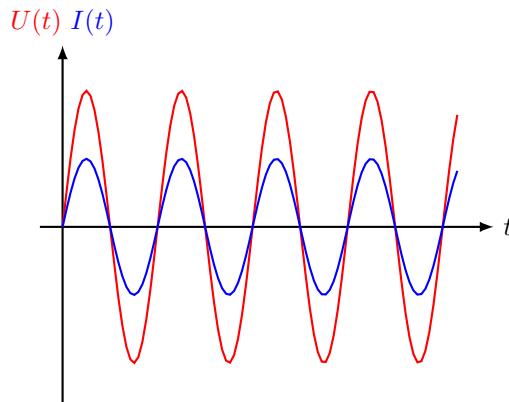
bzw. mit der vom Generator gelieferten zeitlich veränderlichen Spannung $U(t)$ erhalten wir:

$$U_0 \sin(\omega t) = IR \quad \Rightarrow \quad I(t) = \frac{U_0}{R} \sin(\omega t).$$

Setzen wir $I_0 = \frac{U_0}{R}$, dann können wir den Strom auch schreiben als:

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t).$$

Wir kommen zu dem Schluss, dass *die Phase von Spannung und Strom über einem ohmschen Widerstand gleich ist*. Es lässt sich wie folgt darstellen:



Da der Oszilloskop nur Spannungen messen kann, würde man in diesem Fall zweimal dieselbe Messung durchführen, wenn man die Spannung über dem Widerstand messen würde, um den Strom zu messen, da diese der angelegten Wechselspannung entspricht. Aus diesem Grund verzichten wir auf dieses Experiment. Bevor wir uns der nächsten Schaltung mit einer Kapazität widmen, betrachten wir zuerst ein Beispiel.

Bsp. ii.

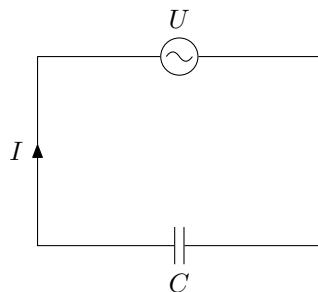
Bestimmen Sie für die Wechselspannung mit einem Ohmschen Widerstand a) die Leistung $P(t)$ und b) die mittlere Leistung $\langle P \rangle$. Lsg: —

Lsg: —

Lösung:

4.2.2 Wechselspannung an einer Kapazität

Nun möchten wir die Stromstärke in einer einfachen Schaltung berechnen, in der eine Wechselspannungsquelle und eine Kapazität enthalten sind. Dazu betrachten wir folgende Schaltung:



Mit Hilfe der Kirchhoff-Regeln lässt sich der Strom einfach berechnen. Die Spannung U_C , welche über der Kapazität abfällt, muss der angelegten Spannung U entsprechen, also gleich sein.

$$U - U_C = 0 \quad \Rightarrow \quad U = U_C = \frac{Q}{C},$$

bzw. mit der vom Generator gelieferten zeitlich veränderlichen Spannung $U(t)$ erhalten wir:

$$U_0 \sin(\omega t) = \frac{Q}{C} \quad \Rightarrow \quad Q(t) = CU_0 \sin(\omega t).$$

Mit $I = \dot{Q}$ folgt:

$$I(t) = CU_0 \frac{d}{dt} \sin(\omega t) = \omega CU_0 \cos(\omega t).$$

Def. 2: (Scheinwiderstand) Das Verhältnis von Spannungsamplitude $U_{\text{ges},0}$ zu Stromamplitude $I_{\text{ges},0}$ des gesamten Systems wird allgemein als Scheinwiderstand Z_0 bezeichnet.

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0}.$$

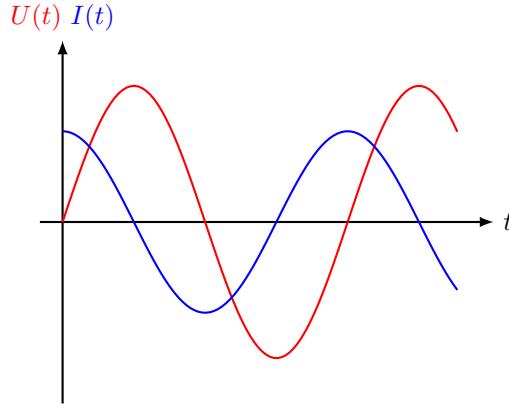
Beim elektrischen Widerstand wird zwischen Scheinwiderstand und Blindwiderstand unterschieden. Der Scheinwiderstand umfasst alle Widerstände des Systems, also den ohmschen Widerstand sowie die Widerstände der Kapazität und Induktivität. Im Gegensatz dazu werden die Widerstände der Kapazität und Induktivität als

Blindwiderstand bezeichnet, da sie bei jeder Widerstandsmessung unsichtbar bleiben.

Wenn wir $I_0 = U_0 \omega C$ ansetzen, können wir den Strom auch als folgende Formel darstellen:

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t).$$

Wir kommen also zu dem Schluss, dass *der Strom über einem idealen kapazitiven Widerstand der Spannung um exakt 90° vorausläuft*. Es zeigt sich somit folgendermassen:



Für eine ideale Kapazität definieren wir den sogenannten Blindwiderstand, wie folgt:

Def. 3: (*Kapazitiver Blindwiderstand*) Der kapazitive Blindwiderstand X_C einer idealen Kapazität C ist

$$X_C = \frac{U_0}{I_0} \equiv \frac{1}{\omega C}$$

wobei ω die Kreisfrequenz des Generators ist.

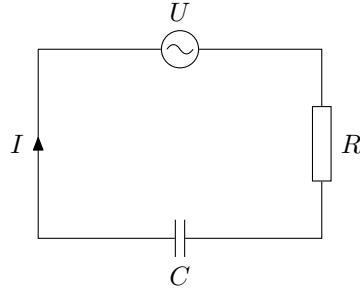
Man erkennt am kapazitiven Blindwiderstand, dass er für ω gross, sehr klein wird und für ω klein, sehr gross wird, d. h.

$$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow X_C \rightarrow 0 \quad \text{und} \quad \omega \rightarrow 0 \Rightarrow X_C \rightarrow \infty.$$

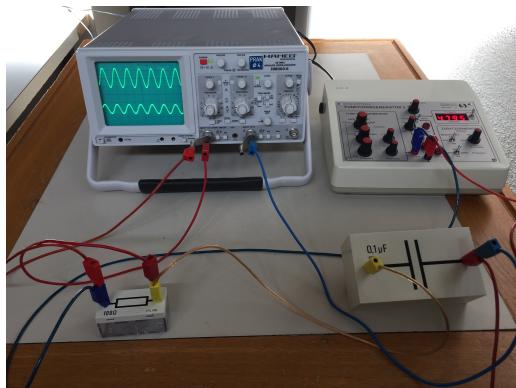
Im Gegensatz zu dem vorherigen Experiment zeigen wir hier deutlich, dass der Strom und die Spannung nicht synchron sind. Dafür haben wir das folgende Experiment leicht modifiziert:

Exp. 2: Wechselspannung an einer Kapazität

Um den Strom und die Spannung im Oszilloskop getrennt darstellen zu können, schalten wir einen kleinen Widerstand in die Schaltung seriell ein. Die Schaltung sieht dann wie folgt aus:



Die Messung der Spannung erfolgt über der Kapazität, während der Strom über dem Widerstand gemessen wird. Die resultierende Schaltung und der Oszilloskop können wie folgt miteinander verbunden werden:

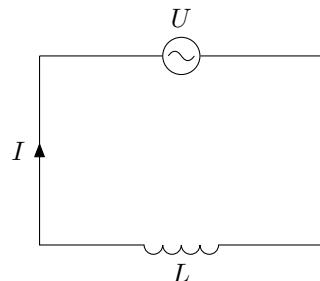


Wie auf dem Bild zu sehen ist, fliesst der Strom (unten) der Spannung (oben) voraus. Dies hängt mit der Kapazität zusammen, die erst durch die Spannung aufgeladen werden muss. Währenddessen fliesst jedoch bereits ein Strom, weshalb er der Spannung voraus ist.

Da wir einen Frequenzgenerator als Spannungsquelle verwendet haben, können wir die Durchlässigkeit der Kapazität sowie die Frequenzabhängigkeit der Stromamplitude zeigen. Durch die Erhöhung der Frequenz ändert sich bei der Spannung nur die Frequenz, beim Strom ändert sich sowohl die Frequenz als auch die Amplitude. Wenn wir die Frequenz stark verringern, messen wir praktisch keinen Strom mehr.

4.2.3 Wechselspannung an einer Induktivität

Zuletzt betrachten wir eine Wechselspannungsquelle und eine Spule beziehungsweise eine Induktivität. Unser Ziel ist es, die Stromstärke in einer einfachen Schaltung zu berechnen. Dazu betrachten wir die folgende Schaltung:



Durch Anwendung der Kirchhoff-Regeln lässt sich der Strom einfach ermitteln. Es muss gelten, dass die Spannung U_L , die über der Induktivität abfällt, der angelegten Spannung U entspricht.

$$U - U_L = 0 \quad \Rightarrow \quad U = U_L = L \frac{dI}{dt},$$

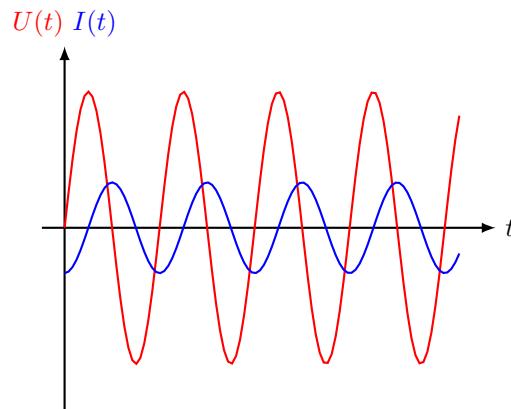
bzw. mit der vom Generator gelieferten zeitlich veränderlichen Spannung $U(t)$ erhalten wir:

$$U_0 \sin(\omega t) = L \frac{dI}{dt} \quad \Rightarrow \quad I(t) = -\frac{U_0}{L\omega} \cos(\omega t).$$

Setzen wir $I_0 = \frac{U_0}{L\omega}$, dann können wir den Strom auch schreiben als:

$$I(t) = -I_0 \cos(\omega t).$$

Wir halten also fest, dass *der Strom über einem idealen induktiven Widerstand der Spannung um genau 90° nachheilt*. Es sieht also wie folgt aus:



Für eine ideale Induktivität definieren wir den sogenannten Blindwiderstand, wie folgt:

Def. 4: (*Induktiver Blindwiderstand*) Der induktive Blindwiderstand X_L einer idealen Induktivität L ist

$$X_L = \frac{U_0}{I_0} \equiv \omega L$$

wobei ω die Kreisfrequenz des Generators ist.

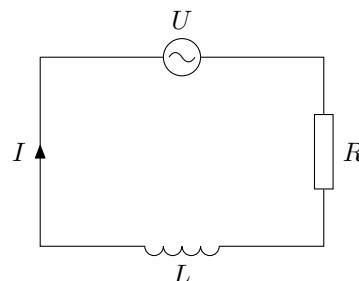
Man erkennt am induktiven Blindwiderstand, dass er für ω gross, gross wird und für ω klein, klein wird, d. h.

$$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow X_L \rightarrow \infty \quad \text{und} \quad \omega \rightarrow 0 \Rightarrow X_L \rightarrow 0.$$

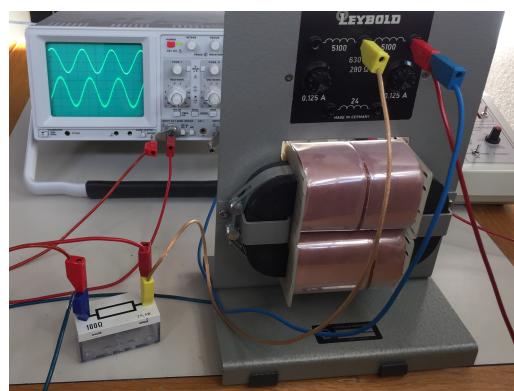
Auch hier kann gezeigt werden, dass Strom und Spannung bei Verwendung einer Induktivität nicht mehr in Phase sind.

Exp. 3: Wechselspannung an einer Induktivität

Um die Strom- und Spannungswerte im Oszilloskop darstellen zu können, fügen wir einen kleinen Widerstand seriell in die Schaltung ein. Die Schaltung sieht dann wie folgt aus:



Die Induktivität wird zur Messung der Spannung und der Widerstand zur Messung des Stroms verwendet. Wenn wir die Schaltung mit einem Oszilloskop betrachten, sieht sie folgendermassen aus:



Wie das Bild zeigt, folgt der Strom (unten) der Spannung (oben) nach. Dies ist auf die Induktivität zurückzuführen, die immer erst durch den Strom aufgeladen werden muss. Dabei muss jedoch bereits eine Spannung angelegt sein, wodurch die Spannung voraus ist.

Betrachten wir noch ein Beispiel, welches wir aus [18] entnommen haben und nur leicht angepasst haben.

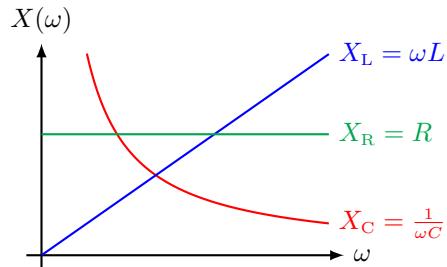
Bsp. iii.

Eine Spule der Induktivität 40 mH werde mit einem Wechselstromgenerator verbunden, der eine Spannungsamplitude von 120 V erzeugt. Wie gross sind a) induktiver Blindwiderstand und b) die Stromamplitude, wenn die Frequenzen 50 Hz bzw. 2000 Hz betragen? Lsg: a) $X_{L,1} \approx 12.5 \Omega$, $X_{L,2} \approx 503 \Omega$, b) $I_{0,1} \approx 9.55 \text{ A}$, $I_{0,2} \approx 0.239 \text{ A}$

Lsg: a) $X_{L,1} \approx 12.5 \Omega$, $X_{L,2} \approx 503 \Omega$, b) $I_{0,1} \approx 9.55 \text{ A}$, $I_{0,2} \approx 0.239 \text{ A}$

Lösung:

Die folgende Abbildung fasst diese drei Widerstände $X_{R,C,L}$ zusammen, wobei sie als Funktion der Kreisfrequenz dargestellt werden. Wir erhalten:

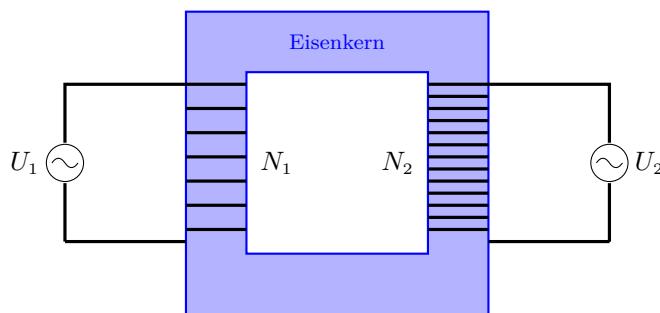


Dieses Verhalten kann in der Technik genutzt werden, zum Beispiel bei der Herstellung von frequenzabhängigen Filtern, die im Kapitel 5 behandelt werden. Wir möchten nun eine weitere technische Anwendung betrachten, nämlich den Transistor.

4.3 Transformer

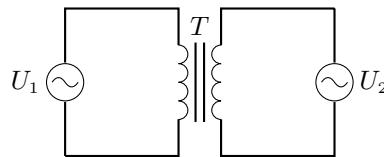
In der Praxis stellt sich oft das Problem, dass die Wechselspannungsquelle nicht die gewünschte Spannung liefert. Zum Beispiel liegt die Spannung bei der Übertragung über grosse Distanzen im Bereich von 10 kV bis 1 MV. Der Grund dafür ist, dass bei hoher Wechselspannung die Verluste am geringsten sind. Im Haushalt oder in der Nähe von bewohnten Gebieten sollte die Spannung jedoch erheblich reduziert werden. Sie sollte letztendlich den üblichen Wert von 230 V haben. In solchen Situationen ist ein Transformator erforderlich.

Ein Transformator kann Wechselspannung nahezu ohne Verluste von einer Eingangsspannung auf eine gewünschte Ausgangsspannung umwandeln oder, wie der Name schon sagt, transformieren. Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, dass in stromdurchflossenen Spulen, die eng beieinander liegen, eine Wechselspannung induziert wird. Die schematische Darstellung sieht wie folgt aus:



Die Wechselspannung U_1 wird als Primärspannung bezeichnet und soll auf die Spannung U_2 der Sekundärspannung transformiert werden. Dazu verbindet man zwei Spulen mit unterschiedlichen Windungszahlen N_1 und N_2 .

und N_2 über einen gemeinsamen Eisenkern. Der Eisenkern verstärkt das Magnetfeld und führt dieses von der Primärspule zur Sekundärspule. Die elektrische Schaltung mit dem Transformator T ist wie folgt aufgebaut:



Betrachten wir die linke Spule mit N_1 Windungen. Über dieser Spule wird, wenn wir den magnetischen Fluss durch eine Windung als ϕ_m bezeichnen, die Spannung U_{L_1} induziert. Das bedeutet:

$$U_{L_1} = -N_1 \frac{d\phi_m}{dt}.$$

Betrachten wir nun die linke Schleife, dann gilt mit der Maschenregel:

$$U_1 + U_{L_1} = 0 \quad \Rightarrow \quad U_1 = N_1 \frac{d\phi_m}{dt}.$$

Für einen idealen Eisenkern wird auch die zweite Spule mit dem gleichen magnetischen Fluss durchsetzt. Damit wird die Sekundärspannung U_2 induziert, es gilt:

$$U_2 = -N_2 \frac{d\phi_m}{dt}.$$

Setzen wir die Änderung des Flusses gleich, dann erhalten wir folgendes Gesetz für einen idealen Transformator.

Ges. 1: (Transformator) Ein Transformator mit dem Windungsverhältnis N_2/N_1 wandelt die Primärspannung U_1 und die Sekundärspannung U_2 wie folgt um:

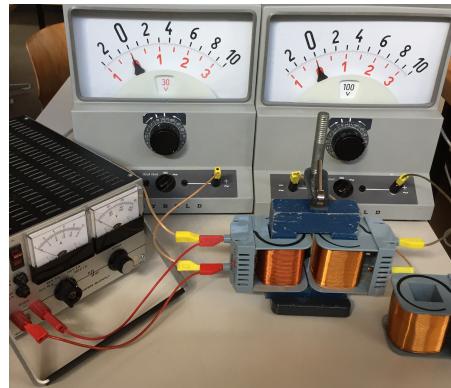
$$U_2 = -\frac{N_2}{N_1} U_1,$$

wobei dieses Windungsverhältnis Übersetzungsfaktor genannt wird.

Beachten Sie, dass U_1 und U_2 nicht das gleiche Vorzeichen haben. Dies spiegelt die Phasenverschiebung von 180° wider. Überprüfen wir dieses Gesetz im folgenden Experiment:

Exp. 4: Transformator

Ein Transformator soll mithilfe von zwei Spulen selbst zusammengestellt werden, wie dies in der Abbildung zu sehen ist.



Die Primärspule hat jeweils 300 Windungen und die Sekundärspule 600 beziehungsweise 1200 Windungen. Die Spannungsamplitude variiert zwischen 10 V und 30 V.

N_1	N_2	U_1 [V]	$U_{2,\text{theo}}$ [V]	$U_{2,\text{exp}}$ [V]
300	600	10	20	19
300	600	15	30	29
300	1200	10	40	38
300	1200	15	60	57

Je höher die Spannungen werden, desto grösser werden die Unterschiede zwischen Theorie und Experiment. Das liegt daran, dass die Stromstärke ebenfalls ansteigt und somit auch die Joulesche Wärme in den Spulen, was den Hauptgrund für den Verlust darstellt.

Abschliessen betrachten wir noch ein einfaches Beispiel.

Bsp. iv.

Türklingeln werden in der Regel an das gewöhnliche Stromnetz des Hauses angeschlossen und nicht durch Batterien betrieben. Das hat Vorteile, jedoch auch den Nachteil, dass die Spannung, die angelegt wird, viel zu hoch ist. Die Klingel benötigt lediglich eine Spannung von 6 V. Bestimmen Sie den Übersetzungsfaktor für den Transformator in der Türklingel.

$$\text{Lsg: } \left| \frac{U_2}{U_1} \right| \approx 0.026$$

Lösung:

Wie Sie bestimmt wissen, werden Spannung über grosse Distanzen als Hochspannung übermittelt, doch weshalb? Wir wissen nun, wie man von einer Spannung auf eine Hochspannung im kV oder sogar MV Bereich kommt. Doch noch nicht weshalb?

Nehmen wir für den Widerstand zwischen Kraftwerk und Verbrauchen R an, dann gilt für die Verlustleistung $P_L = I^2 R$. Diese Leistung wird in der Leitung in Wärme verwandelt und ist dadurch verloren. Das Verhältnis aus Verlustleistung zur Gesamtleistung $P = UI$ beträgt:

$$\frac{P_L}{P} = \frac{I^2 R}{U I} = \frac{IR}{U} = \frac{PR}{U^2}.$$

Damit sind die relativen Übertragungsverluste umgekehrt proportional zum Quadrat der Übertragungsspannung, d. h. je grösser die Spannung, desto kleiner sind die Verluste. Betrachten wir dazu ein Beispiel.

Bsp. v.

Ein Kraftwerk mit einer Leistung von 100 MW soll über eine Kupferleitung mit einem Querschnitt von 3 cm^2 und einer Länge von 150 km übertragen werden. Bestimmen Sie für die Spannungen a) 110 kV und b) 2 MV die relativen Verluste.

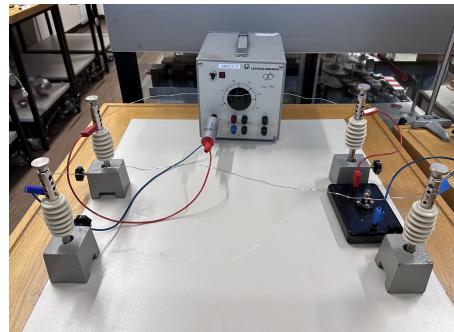
Lsg: a) 14%, b) 0.043%

Lösung:

Im Folgenden soll ein Experiment durchgeführt werden, um zu demonstrieren, dass bei niedriger Spannung die Verluste grösser sind als bei hoher Spannung.

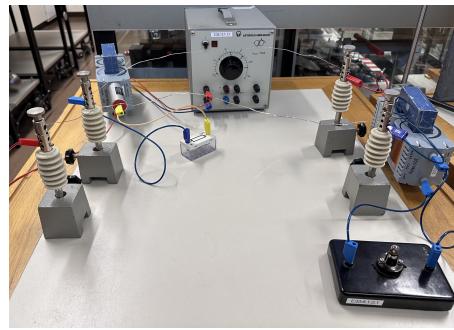
Exp. 5: Hochspannungsleitung

Wir simulieren die Hochspannungsleitung durch einen Konstantan-Draht der Dicke 0.7 mm und einer Länge von etwa 80 cm. Als Ausgangsspannung verwenden wir 6 V (AC). Als Verbraucher setzen wir eine Glühlampe mit 7 V und 0.3 A ein. Um die Leitung künstlich zu verlängern, werden zwei Widerstände mit jeweils 100Ω in Serie dazu geschaltet (vgl. Abbildung).



In diesem Fall ist die Spannung gering und der Widerstand über die Leitung hoch, was dazu führt, dass das Licht nicht brennt. Die Leistung, die bei der Glühlampe ankommt, ist unzureichend.

Die Spannung wird nun mit einem selbstgebauten Transformator hochtransformiert. Für die Hochspannung wird eine Spule mit 300 Windungen und eine mit 12'000 Windungen verwendet. Bei der Spannungsquelle wird die Seite mit 300 Windungen angeschlossen, während die Seite mit 12'000 Windungen mit der Hochspannungsleitung verbunden wird. Auf der Seite der Glühlampe erfolgt die Rücktransformation der Spannung. Auch hier wird die Leitung durch zwei Widerstände künstlich verlängert (vgl. Abbilung).



In diesem Fall wird die Spannung um den Faktor 40 erhöht und dann durch die Leitung geschickt. Die Verluste sind folglich um den Faktor 1600 geringer, sodass die Lampe leuchtet, da die Leistung ausreichend ist.

Wir beenden hiermit dieses Kapitel und wenden uns dem letzten Kapitel der Elektrodynamik zu, in dem wir das gesamte bisher angesammelte Wissen nutzen werden.

Zusammenfassung Kapitel G4

1. Für eine *Wechselspannung* $U(t)$ mit der Kreisfrequenz ω und der Phase φ gilt:

$$U(t) = U_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

wobei U_0 die Amplitude ist.

2. Wird ein ohm'scher Widerstand in eine Wechselspannungsschaltung eingefügt, so sind *Spannung und Strom stets in Phase*.
3. Die *Effektivwerte* von Spannung und Stromstärke einer Wechselspannung sind:

$$U_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_0 \quad \text{und} \quad I_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0.$$

4. Der *Scheinwiderstand* resp. Blindwiderstand ist das Verhältnis von Spannungsamplitude U_0 und Stromamplitude I_0 .
5. Wird ein kapazitiver Widerstand in eine Wechselspannungsschaltung eingefügt, so *eilt der Strom der Spannung um 90° voraus*.

6. Der *kapazitive Blindwiderstand* X_C einer idealen Kapazität C ist

$$X_C = \frac{1}{\omega C},$$

wobei ω die Kreisfrequenz der Wechselspannung ist.

7. Wird ein induktiver Widerstand in eine Wechselspannungsschaltung eingefügt, so *eilt der Strom der Spannung um 90° hinterher*.
8. Der *induktive Blindwiderstand* X_L einer idealen Induktivität L ist

$$X_L = \omega L,$$

wobei ω die Kreisfrequenz der Wechselspannung ist.

9. Ein *Transformator* mit dem Windungsverhältnis respektive Übersetzungsfaktor N_2/N_1 wandelt die Primärspannung U_1 und die Sekundärspannung U_2 wie folgt um:

$$U_2 = -\frac{N_2}{N_1} U_1.$$

10. Die *relativen Übertragungsverluste* einer Hochspannungsleitung sind bei einer Leistung P , einem Widerstand R und einer Spannung U gegeben durch:

$$\frac{P_L}{P} = \frac{PR}{U^2}.$$

Konzeptfragen Kapitel G4

Aufgaben Kapitel G4

Weitere einfache Aufgaben mit ausführlichen Lösungen findet man unter:

<https://www.dropbox.com/sh/m9vlo6gwqli3nds/AABWhKMXUJG70jsXx7ovB-fDa?dl=0> in den Kapiteln 33. und 35.



1. Eine Sicherung sei ausgelegt für einen effektiven Strom von 15 A bei einer Spannung von 230 V.

- a. Wie gross ist die maximale Stromstärke, bei der die Sicherung noch nicht durchbrennt?
- b. Wie gross ist die mittlere Leistung, die der Stromkreis liefern kann?

Lsg: a. $I_0 \approx 21.2 \text{ A}$ b. $\langle P \rangle \approx 3.45 \text{ kW}$

2. Wie gross ist der Blindwiderstand

- a. eines Kondensators der Kapazität 1 nF und
- b. einer Spule der Induktivität von 10 H

bei einer Frequenz von 60 Hz, 6 kHz und 6 MHz.

Lsg: a. $X_{C,1} \approx 2.65 \text{ M}\Omega$, $X_{C,2} \approx 26.5 \text{ k}\Omega$, $X_{C,3} \approx 26.5 \Omega$ b. $X_{L,1} \approx 3.77 \text{ k}\Omega$, $X_{L,2} \approx 377 \text{ k}\Omega$, $X_{L,3} \approx 377 \text{ M}\Omega$

3. Die effektive Stromstärke I_{eff} ist definiert als

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I(t)^2 dt}.$$

Zeigen Sie für $I(t) = I_0 \cos(\omega t)$ mit $\omega = \frac{2\pi}{T}$, dass

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

ist. Für einmal ohne Hilfsmittel.

Lsg: –

4. Eine Lampe 6 V/5 A soll mit der Netzspannung von 230V betrieben werden. Dafür betrachten wir zwei Möglichkeiten.

Möglichkeit 1: Verwendung eines Vorwiderstandes R_V , d. h. vor der Glühlampe wir ein ohm'scher Widerstand geschaltet.

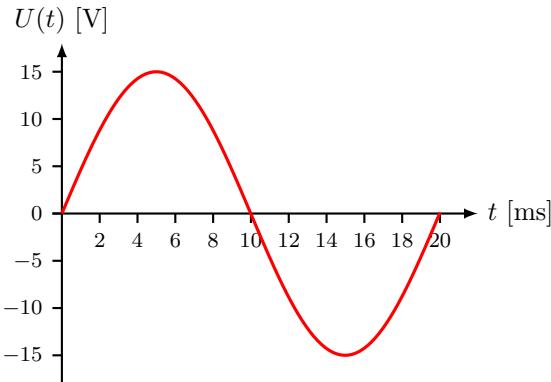
- a. Berechnen Sie den nötigen Vorwiderstand R_V .
- b. Berechnen Sie die Leistung, die beim Betrieb der Lampe mit Vorwiderstand insgesamt dem Netz entnommen wird.
- c. Berechnen Sie den Wirkungsgrad der Anordnung, das ist das Verhältnis der von der Lampe verbrauchten zu der dem Netz entnommenen Leistung.

Möglichkeit 2: Betreiben mit einem Transformator, d. h. vor der Glühlampe wir ein Transformator geschaltet.

- d. Berechnen Sie die Windungszahl der Sekundärspule, wenn die Primärspule $N_1 = 150$ Windungen hat.
- e. Der Kupferdraht in der Primärspule hat einen Widerstand von 1Ω , der in der Sekundärspule einen von 0.2Ω . Berechnen Sie zunächst den Strom in der Primärspule und dann die Verlustleistungen in Primär und Sekundärspule. (Tipp: Die Leistungen der Primärspule und Sekundärspulen sind gleich.)
- f. Berechnen Sie den Wirkungsgrad dieser Transformatoranordnung aufgrund der Verlustleistungen an den ohm'schen Widerständen.
- g. Beurteilen Sie, welche der beiden Anordnungen wirtschaftlicher und welche sicherer ist.

Lsg: a. $R_V \approx 45 \Omega$ b. $P_1 \approx 1150 \text{ W}$ c. $\eta_1 \approx 2.6\%$ d. $N_2 = 4$ e. $P_2 \approx 35.017 \text{ W}$ f. $\eta_2 \approx 86\%$ g. –

5. Eine Spule mit vernachlässigbarem ohm'schen Widerstand wird an eine sinusförmige Wechselspannung $U(t)$ angeschlossen. Der zeitliche Verlauf der Wechselspannung ist im folgenden Diagramm dargestellt. Die effektive Stromstärke in der Spule beträgt 4.8 mA.



- a. Berechnen Sie den induktiven Widerstand und die Induktivität der Spule.
- b. Geben Sie einen Funktionsterm $I(t)$ für die Stromstärke in der Spule an und zeichnen Sie ein $I-t$ -Diagramm für das Zeitintervall $[0 : 20 \text{ ms}]$.

Nun wird die Spule durch einen Kondensator ersetzt.

- c. Berechnen Sie, welche Kapazität dieser Kondensator besitzen muss, damit die effektive Stromstärke wie bei der Spule 4.8 mA beträgt.
 - d. Nehmen Sie begründet Stellung, ob die folgenden Aussagen richtig oder falsch sind.
- A1: Wenn die Kapazität des Kondensators $1.4 \mu\text{F}$ beträgt, ergibt sich für die Stromstärke dasselbe $I-t$ -Diagramm, wie es in Teilaufgabe b. zu zeichnen ist.
- A2: Bei oben skizzierter Wechselspannung sind die Kapazität des Kondensators und die effektive Stromstärke zueinander direkt proportional.
- A3: Verdoppelt man bei gleich bleibendem Scheitelwert die Frequenz der Wechselspannung, so vierfacht sich die effektive Stromstärke im Kondensator.

Lsg: a. $X_L \approx 2.2 \text{ k}\Omega$, $L \approx 7 \text{ H}$ b. $I(t) = -I_0 \cos(\omega t)$ c. $C \approx 1.4 \mu\text{F}$ d. –

Literaturverzeichnis

- [1] URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Mars_Climate_Orbiter, Juni 2012
- [2] URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Internationales_Einheitensystem, Juni 2012
- [3] Wikipetzi, IngenieroLoco - Eigenes Werk. Based on File: Relations between new SI units definitions.png, CC BY-SA 4.0,
URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=40278935>
- [4] CMS Collaboration, *Combination of results on the rare decays $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ from the CMS and LHCb experiments*, CMS-PAS-BPH-13-007
- [5] Aoyama, Tatsumi and Hayakawa, Masashi and Kinoshita, Toichiro and Nio, Makiko, *Tenth-Order QED Contribution to the Electron g-2 and an Improved Value of the Fine Structure Constant*, Phys. Rev. Lett. Vol. 109, 2012, 10.1103/PhysRevLett.109.111807
- [6] URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Steradian>, Juni 2012
- [7] Aristoteles,
- [8] Galileo Galilei, *De motu*, 1590
- [9] DMK/DPK, *Formeln und Tafeln*, Orell Füssli, 7. Auflage, 1997
- [10] F. A. Brockhaus, *Der grosse Brockhaus*, 16. Auflage, 1955
- [11] URL: <http://www.quartets.de/acad/firstlaw.html>, September 2013
- [12] URL: <http://www.educ.ethz.ch/unt/um/phy/me/kreis/index>
- [13] Lewis C. Epstein, *Denksport Physik*, dtv, 9. Auflage, 2011
- [14] Harry Nussbaumer, *Astronomie*, 7. Auflage, 1999, vdf Hochschulverlag AG
- [15] URL: <http://lexikon.astronomie.info/mars/beobachtung2012/>, April 2013
- [16] Matthias Bartelmann, *Das Standardmodell der Kosmologie, Teil 1 und Teil 2 in Sterne und Weltraum*, Ausgabe: August 2007
- [17] Roman Sexl et al. *Einführung in die Physik - Band 1 & 2*, 3. korrigierte Auflage 2009, Sauerländer Verlag AG
- [18] Paul A. Tipler, *Physik*, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, Oxford, 2. Auflage, 1994
- [19] URL: <https://www.etsy.com/ch/listing/1230366346/precision-made-scientific-mechanical>
- [20] Hans Kammer, Irma Mgelandze, *Physik für Mittelschulen*, 1. Auflage 2010, hep Verlag AG
- [21] URL: <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/aerodynamik-report-spritsparmodelle-aus-dem-windkanal>
- [22] Wikipedia, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Fluid>, August 2013
- [23] Basiswissen Schule Physik, Duden Paetec, Berlin 2010
- [24] URL: <http://www.schulserver.hessen.de/>, Oktober 2013
- [25] URL: <http://www.leifiphysik.de>, September 2013
- [26] URL: <http://photos.zoochat.com>, September 2013

- [27] URL: <http://www.lab-laborfachhandel.de>, Oktober 2013
- [28] Bissig Michael, *Schwimmwelt, Schwimmen lernen - Schwimmtechnik optimieren*, Schulverlag, Bern,
- [29] URL: https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm_data/lm_282/auto/kap09/cd259.htm, März 2014
- [30] URL: <https://www.vibos.de/veranstaltung/physik-teil-3-von-4-schwingungen-und-wellen>, März 2024
- [31] URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/707>
- [32] E.F.F. Chladni, *Die Akustik*, Taschenbuch Auflage 2012, Nabu Press
- [33] URL: <http://ephex.phys.ethz.ch>, Februar 2015
- [34] URL: <http://aufzurwahrheit.com/physik/quantenmechanik-5461.html>, März 2015
- [35] M. Cagnet, M. Françon, J.C. Thierr, *Atlas opitscher Erscheinungen*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1962
- [36] Bruno Cappeli et al. *Physik anwenden und verstehen*, Orell Füssli Verlag AG, 2004
- [37] Richard P. Feynman, *QED - Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*, Piper, 3. Auflage, 2018
- [38] Keith Johnson, *Physics for You: Revised National Curriculum Edition of GCSE*, Nelson Thornes, 2001
- [39] URL: <https://tu-dresden.de/mn/physik/ressourcen/dateien/studium/lehrveranstaltungen/praktika/pdf/TA.pdf?lang=en>, Juli 2018
- [40] Wolfgang Demtröder, *Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 1998
- [41] Unbekannt, *Engraving of Joule's apparatus for measuring the mechanical equivalent of heat*, Harper's New Monthly Magazine, No. 231, August, 1869
- [42] URL: <http://www.tf.uni-kiel.de>, März 2014
- [43] URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Entropie_\(Thermodynamik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Entropie_(Thermodynamik)), März 2014
- [44] URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:20070616_Dampfmaschine.jpg, März 2014
- [45] URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Bcoulomb.png>, März 2014
- [46] URL: <http://www.bader-frankfurt.de/widerstandscode.htm>, August 2014
- [47] Carl D. Anderson, *The Positive Electron*. Physical Review 43 (6): 491–494
- [48] URL: <http://pgd5.physik.hu-berlin.de/elektrostatik/ele12.htm>, Oktober 2014
- [49] URL: <http://www.aip.org/history/lawrence/radlab.htm>, Oktober 2014
- [50] URL: http://www.solstice.de/grundl_d_tph/exp_besch/exp_besch_04.html, Oktober 2014
- [51] URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6639>, Oktober 2017
- [52] URL: <https://de.serlo.org/52586/elektromagnetische-wellen>, Oktober 2017
- [53] URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum, August 2022
- [54] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Zahnradmethode>, September 2022
- [55] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Double-Rainbow.jpg>, November 2023
- [56] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Regenbogen>, April 2024
- [57] Proton-Proton Kollision, CERN, Lucas Taylor
- [58] Ze'ev Rosenkranz, *Albert Einstein – Derrière l'image*, Verlag Neue Zürcher Zeitung, 2005.
- [59] Albert Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik 17 (10): 891–921.
- [60] Albert Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Springer-Verlag, 23. Auflage, 1988

- [61] Wikipedia, https://de.wikipedia.org/wiki/Relativitat_der_Gleichzeitigkeit, August 2018
- [62] URL: <http://static.a-z.ch>, Mrz 2015
- [63] Max Planck, *Vom Relativen zum Absoluten*, Naturwissenschaften Band 13, 1925
- [64] A. H. Compton, *The Spectrum of Scattered X-Rays*, Physical Review 22 (5 1923), S. 409–413
- [65] URL: <http://www.peter-glowatzki.de>, Mai 2015
- [66] James Franck, *Transformation of Kinetic Energy of Free Electrons into Excitation Energy of Atoms by Impacts*, Nobel Lectures, Physics 1922-1941
- [67] URL: <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/versuche>, Mai 2015
- [68] David Prutchi, Shanni Prutchi, *Exploring Quantum Physics through Hands-on Projects*, Wiley, 1 edition (February 7, 2012)
- [69] URL: <http://w3.ppp1.gov/>, September 2015
- [70] O. Hofling, Physik. Band II Teil 1, Mechanik, Warme. 15. Auflage. Ferd. Dummfers Verlag, Bonn 1994
- [71] Kovalente Atomradien auf Basis der Cambridge Structural Database
URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Cambridge_Structural_Database, April 2018
- [72] G. Audi und A.H. Wapstra, Nuclear Physics A595, 409 (1995)
- [73] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gammastrahlung>, April 2018
- [74] URL: <http://www.wn.de/Muenster/2012/07/Das-Wunder-von...>, Juni 2012
- [75] L. Susskind und G. Hrabovsky, *The Theoretical Minimum - What you need to know to start doing physics*, Basic Books, 2014