

V303: Der Lock-In-Verstärker

Felix Geyer

felix.geyer@tu-dortmund.de

Rune Dominik

rune.dominik@tu-dortmund.de

06. Dezember 2016

1 Zielsetzung

Gegenstand des Versuches ist der Lock-In-Verstärker, dessen Funktionsweise nachvollzogen werden soll.

2 Theorie

Der Lock-In-Verstärker wird überwiegend bei Messungen von stark verrauschten Signalen verwendet, um die gesuchte Frequenz herauszufiltern, ähnlich wie mit einem Bandpass. Die Güte des Lock-In-Verstärkers liegt allerdings etwa um den Faktor 100 höher als der eines Bandpasses.

Die Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers besteht darin, die Messsignal mit einer Referenzfrequenz ω_0 zu modulieren. In diesem Zuge werden das Nutzsignal U_{sig} und das Referenzsignal U_{ref} in einem Mischer miteinander multipliziert¹ und anschließend als Mischsignal $U_{\text{sig}} \times U_{\text{ref}}$ über mehrere Perioden der Modulationsfrequenz integriert, sodass sich die unerwünschten Rauschbeiträge weitgehend herausmitteln und am Ausgang eine Gleichspannung $U_{\text{out}} \propto U_{\text{sig}} \cos(\phi)$ zu messen ist, die sich proportional zu U_{sig} verhält. Dabei ist ϕ die veränderliche Phasenlage des Referenzsignals, die mit dem Nutzsignal synchronisiert wird.

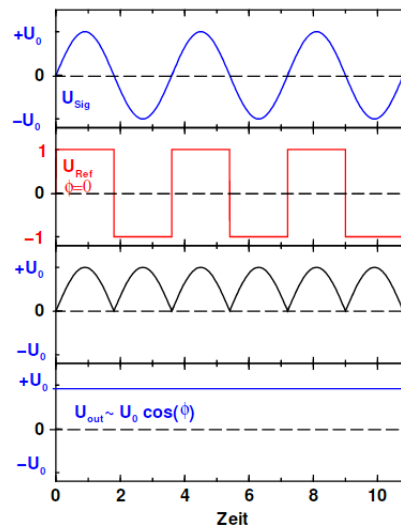


Abbildung 1: Spannungsverläufe für eine sinusförmige Nutzspannung [[Dor16]].

In Abbildung 1 wird der Signalverlauf für eine sinusförmige Nutzspannung

$$U_{\text{sig}} = U_0 \sin(\omega t)$$

dargestellt. U_{ref} ist hierbei durch eine Rechteckspannung mit gleicher Frequenz moduliert. Wenn man Diese nun durch eine Fourierreihe nähert, enthält das Produkt aus Nutz-

¹Näheres zum Aufbau in Kapitel 3.1

und Referenzsignal $U_{\text{sig}} \times U_{\text{ref}}$ also nur die geraden Oberwellen der Grundfrequenz ω . Der nachgeschaltete Tiefpassfilter unterdrückt nun diese Oberwellen. Damit erhält man eine Gleichspannung der Form

$$U_{\text{out}} = \frac{2}{\pi} U_0 \quad (1)$$

Mit einer Phasendifferenz ϕ zwischen Nutz- und Referenzspannung wird (1) zu

$$U_{\text{out}} = \frac{2}{\pi} U_0 \cos(\phi) . \quad (2)$$

Die Ausgangsspannung wird also maximal für $\phi = 0$, also wenn es keinen Phasenunterschied zwischen Nutz- und Referenzspannung gibt.

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

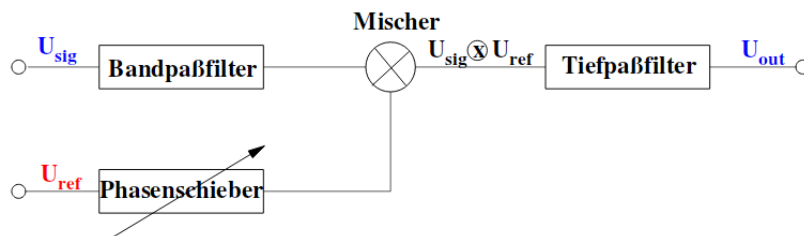


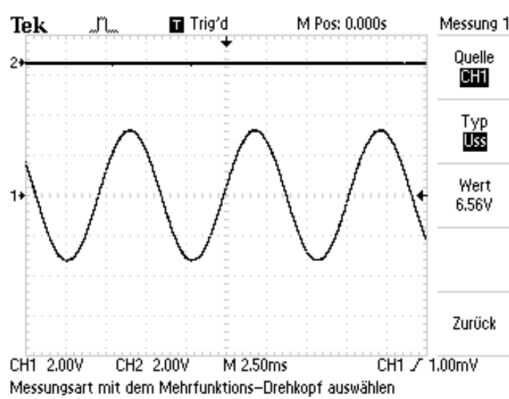
Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Lock-In-Verstärkers [[Dor16]].

Wie in Abbildung 2 zu sehen, wird U_{sig} mithilfe eines Bandpasses von Rauschteilen höherer und niedriger Frequenzen gereinigt. Als nächstes folgt der bereits erwähnte Mischer², der Nutz- und Referenzsignal miteinander multipliziert, wobei sich die Phase des Referenzsignals mit dem Phasenschieber einstellen lässt. Nachgeschaltet dazu gibt es noch einen Tiefpass, dessen Funktion bereits in Kapitel 2 erläutert wurde. Zum Schluss erhält man das Ausgangssignal U_{out} . Grafik 3 zeigt den Verlauf des Signales nach den jeweiligen Schaltelementen.

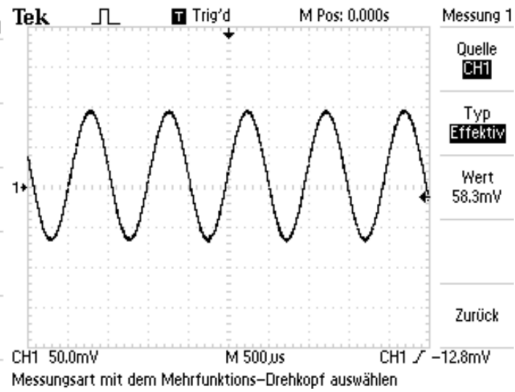
3.2 Versuchsdurchführung

Als erstes wurde festgestellt, welcher Ausgang der Funktionsgenerators in Abbildung 4 eine variable und welcher eine konstante Spannung liefert, und welchen Wert Diese hat. Danach wurde der Schaltplan Schritt für Schritt aufgebaut und dabei auf einem Speicher-Oszilloskop die Signalformen überprüft und Bilder des Signals nach jedem Schritt gemacht. Dabei wird der Noise-Generator zwar eingebunden, aber noch nicht eingeschaltet, um zuerst Messungen ohne Rauschsignal aufzunehmen. Als nächstes wird ein sinusförmiges Signal U_{sig} von 1 kHz und 0,06 V erzeugt und mit einem Referenzsignal

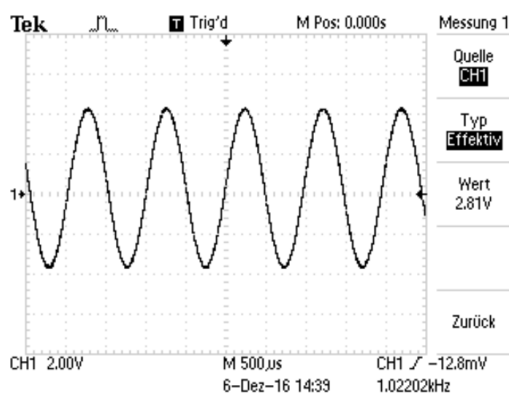
²siehe Kapitel 2



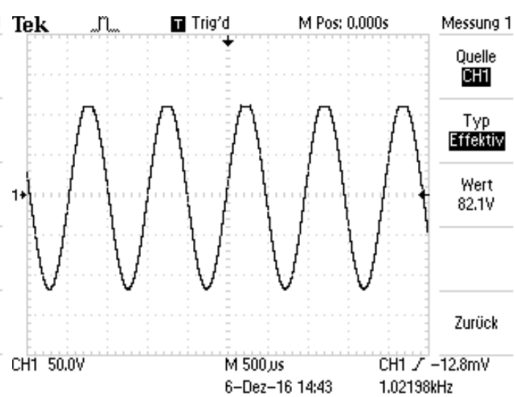
(a) Referenzspannung U_{ref} .



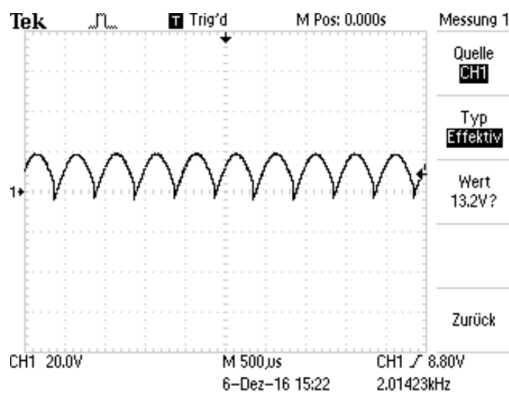
(b) Signalspannung U_{sig} am Oszillator-Ausgang.



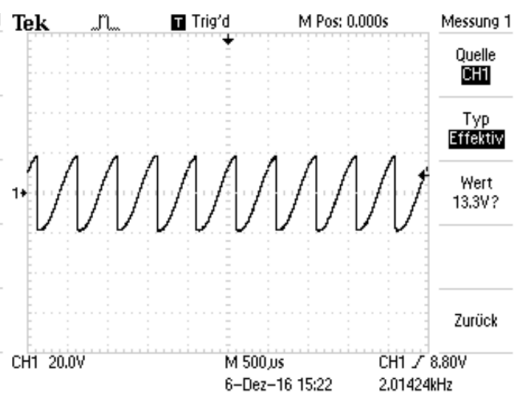
(c) Signalspannung U_{sig} am Ausgang des Vorverstärkers.



(d) Signalspannung U_{sig} am Ausgang des Bandpassfilters.



(e) Ausgang nach Lock-In bei einer Phase von 0.



(f) Ausgang nach Lock-In bei einer Phase von $\frac{\pi}{2}$.

Abbildung 3: Signalverlauf nach den Schaltelementen. 3a zeigt den Verlauf der Referenzspannung und 3b bis 3d den Verlauf der Signalspannung durch die verschiedenen Schaltelemente. 3e und 3f zeigen die Ausgabe nach dem Lock-In des Referenzsignals auf das Messsignal bei verschiedenen Phasen.

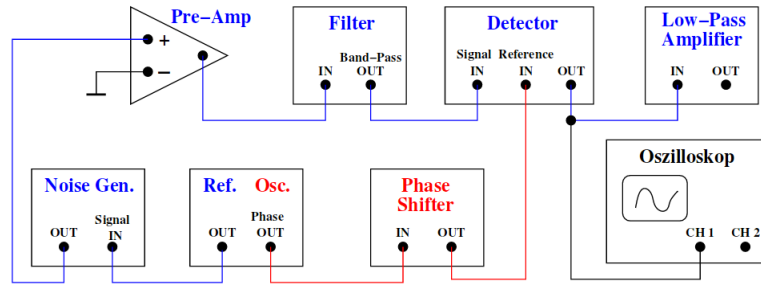


Abbildung 4: Schaltplan eines Lock-In-Verstärkers [[Dor16]].

U_{ref} , welches auch sinusförmig ist und die gleiche Frequenz hat, gemischt. Nach der Integration über den Tiefpass wird die Ausgangsspannung U_{out} zwölfmal in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung bestimmt. Die Skizzen des Signales sind in Kapitel 3.1 zu finden.

Anschließend wird der Noise-Generator eingeschaltet und alle Messungen wiederholt. Dabei liegt die Größenordnung des Rauschsignals ungefähr in der Größenordnung von U_{sig} .

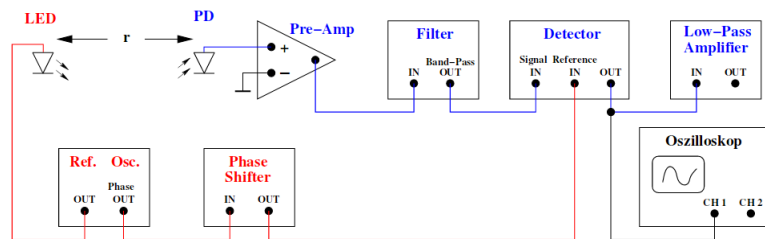


Abbildung 5: Schaltplan eines Lock-In-Verstärkers mit Photo-Detektor [[Dor16]].

Als letztes wird ein Photo-Detektor in den Schaltplan eingefügt³, dessen LED mit 300 Hz blinkt und mit einer Rechteckspannung moduliert wird. Dann wird die Lichtintensität als Funktion des Abstandes zwischen LED und Photodiode gemessen und der maximale Abstand r_{max} bestimmt, bei dem das Licht der LED die Photodiode nachweislich noch erreicht.

4 Auswertung

4.1 Verwendung des Lock-In Verstärkers mit und ohne künstlichem Rauschen

Die am Tiefpassfilter mit und ohne Rauschen gemessenen Spannungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Es zeigt sich kein messbarer Unterschied zwischen unverrauschter und verrauschter Messung, woraus auf die Ordnungsgemäße Funktionsweise des Aufbaus geschlossen werden kann. Die Messwerte wurden bei einem Verstärkungsfaktor von 5 ge-

³siehe Abbildung 5

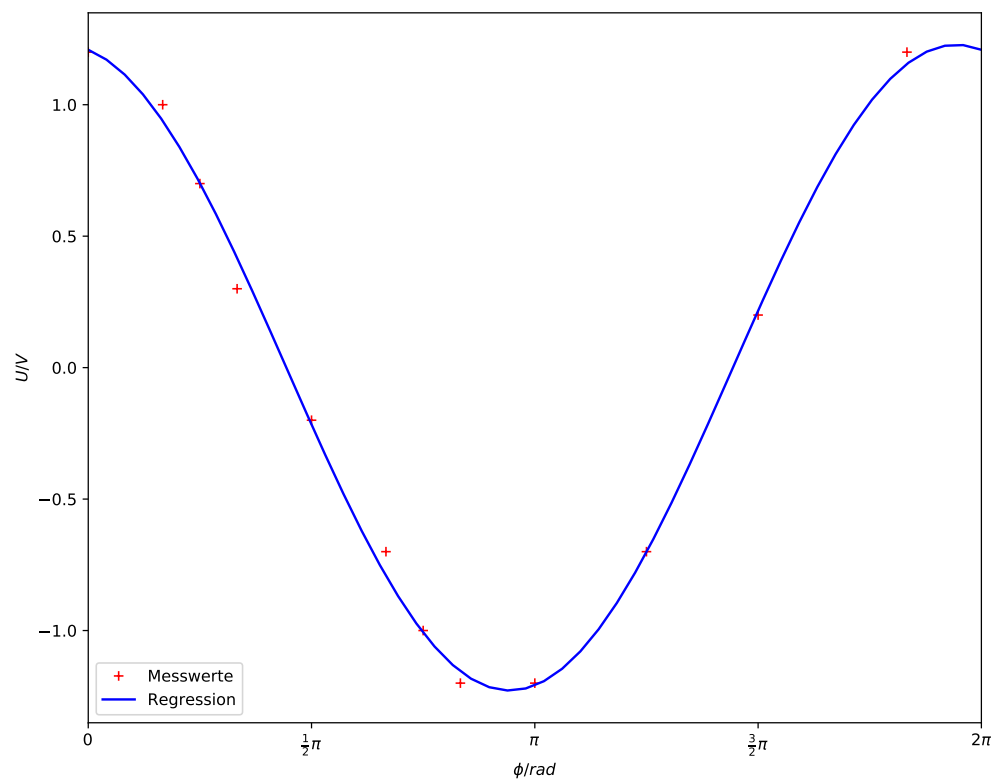


Abbildung 6: Dargestellt sind die vom Verstärkungsfaktor bereinigten, am Ausgang des Lock-In-Verstärkers gemessenen Spannungen in Abhängigkeit von der Phase.

Tabelle 1: Mit einem linearen Verstärkungsfaktor von 5 gemessene Werte

Phase/	$U_{\text{unverauscht}}/\text{V}$	$U_{\text{verauscht}}/\text{V}$
0.00	6.0	6.0
0.17	5.0	5.0
0.25	3.5	3.5
0.33	1.5	1.5
0.50	-1.0	-1.0
0.67	-3.5	-3.5
0.75	-5.0	-5.0
0.83	-6.0	-6.0
1.00	-6.0	-6.0
1.25	-3.5	-3.5
1.50	1.0	1.0
1.83	6.0	6.0

messen, sind also um den Faktor 5 größer, als sie es in Wirklichkeit sind. Wird die Phase gegen die Spannung aufgetragen, ergibt sich der in Grafik 6 dargestellte Verlauf. Werden die Messwerte mit einer Funktion:

$$U_{\text{out}}(\phi) = A_0 \cdot \cos(\phi + \delta\phi)$$

in "Curve Fit" aus "scipy optimize" gefittet, wobei A_0 die Amplitude und $\delta\phi$ die interne Phase des Aufbaus darstellt, ergeben sich folgende Werte für Amplitude und Phase:

$$A_0 = (1,228 \pm 0,022) \text{ V}$$

$$\delta\phi = (0,177 \pm 0,019)$$

Die gemessenen Werte folgen also dem nach (2) zu erwartenden Verlauf.

4.2 Abstandsmessung

Wird der Abstand zwischen LED und Photodiode vergrößert, so ist ein Abfall der gemessenen Spannung $\propto 1/r^a$ zu erwarten. Das Signal wurde dabei mit einer Frequenz von 300 Hz eingestellt, um die von den im Raum befindlichen, mit einer Netzfrequenz von 50 Hz betriebenen, künstlichen Lichtquellen erzeugten Störsignale nicht zusätzlich zu verstärken. Die bei einem Gain von 200 gemessenen Daten (siehe Tabelle 2) werden daher mit einer Funktion:

$$U(r) = \frac{b}{r^a} \quad (3)$$

gefittet. Die wiederholt auftretenden Messwerte von 0,5 V werden, wie auch der Nullpunkt der Messung bei ca. 60 cm weggelassen. Dies ist vertretbar, da davon auszugehen ist, dass die zur Verfügung stehenden Messgeräte in diesem Bereich Änderungen nicht mehr mit ausreichender Genauigkeit anzeigen können. Ein Gleichbleiben der Werte bei

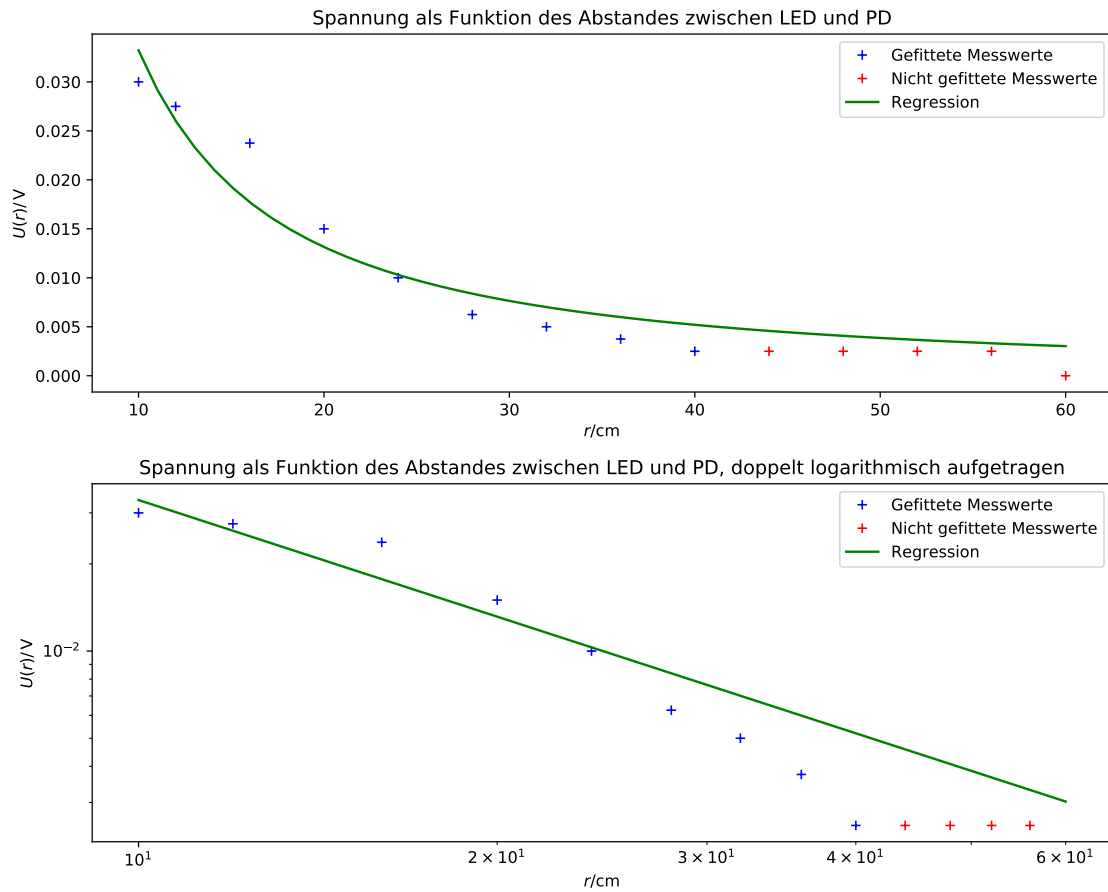


Abbildung 7: Dargestellt sind die gemessenen Spannungen in Abhängigkeit des Abstandes zwischen LED und Photodiode. Die bei der Regression nicht beachteten Messwerte sind kenntlich gemacht. Die Spannungen sind vom Verstärkungsfaktor bereinigt. Der obere Verlauf ergibt sich bei normaler Achsenskalierung, der untere bei doppelt logarithmischer.

Tabelle 2: Mit linearem Verstärkungsfaktor von 5 gemessene Werte

Abstand r/cm	$U(r)/V$
10	6.00
12	5.50
16	4.75
20	3.00
24	2.00
28	1.25
32	1.00
36	0.75
40	0.50
44	0.50
48	0.50
52	0.50
56	0.50
60	0

erhöhen des Abstandes erscheint rein logisch unintuitiv und würde oben genannter Abstandsgesetzmäßigkeit widersprechen. Die Regression ist in Grafik 7 in normaler sowie doppelt logarithmischer Achsenskalierung dargestellt. Bei doppelt logarithmischer Skalierung zeigt sich ein linearer Verlauf, der bei einem Abstandsgesetz wie oben genannt bei dieser Skalierung zu erwarten ist. Der Fit liefert:

$$a = 1,34 \pm 0,18$$
$$b = (0,72 \pm 0,34) \text{ V cm}^2$$

Die Spannungen wurden vor dem Fit durch den Verstärkungswert geteilt. Der sinnvolle Verlauf der Messung lässt wieder auf die ordnungsgemäße Funktionsweise des Lock-In Verstärkers schließen.

5 Diskussion

Zusammenfassend belegt der Versuchsaufbau die gewünschte Funktionsweise des Lock-In Verstärkers. Insbesondere der erste Teil des Versuchs zeigt dies sehr gut. Hier sind die Abweichungen zwischen verrauschter und unverrauschter Messung kaum mit den zur Verfügung stehenden Geräten messbar. Der zweite Teil des Versuches hingegen liefert zwar Werte, die auf den Nachweis des Abstandsgesetzes schließen lassen, jedoch, wie in Grafik 7 zu erkennen ist, starke unregelmäßigkeiten aufweisen. Hier sind definitiv erneute Messungen erforderlich, um die ordnungsgemäße Funktionsweise des Lock-In Verstärkers zu zeigen.

Ansätze zur Verbesserung der Ergebnisse wären ein besseres Abstimmen der Verstärkungswerte, um ein genaueres Ergebnis zu erhalten. Auch musste die Erfassung der

Messwerte über ein analoges Voltmeter mit großschrittiger Skala erfolgen. Ein digitales Gerät oder eine kleinschrittigere Skala hätten die Güte der Messung hier erhöht. Insbesondere das in Kapitel 4.2 genannte Gleichbleiben der Messwerte ab einem gewissen Punkt hätte durch ein genaueres Messgerät verhindert werden können.

Auch eine Referenzmessung ohne Umgebungslicht wäre sinnvoll. Die dabei erhaltenen Messwerte könnten für einen direkten Vergleich mit der Messung bei Umgebungslicht herangezogen werden.

Literatur

- [Dor16] TU Dortmund. *V303: Der Lock-In-Verstärker*. 11. Dez. 2016. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/LockIn.pdf>.