

Der Tonabnehmer der E-Gitarre im Unterricht

Thomas Wilhelm, Lutz Leußner

1. E-Gitarre

Jugendliche lieben Pop- und Rockmusik, die auch zur eigenen Identitätsfindung und Abgrenzung dient. Die Instrumente sind dabei hauptsächlich elektrische Gitarren und Schlagzeuge. So ist die E-Gitarre für Schüler ein faszinierendes Instrument, das man als Kontext im Physikunterricht nutzen kann [1].

Um 1920 gab es schon verschiedenste Gitarrenformen und Gitarrentypen. In den 1930ern war die Zeit der großen Unterhaltungsorchester und Big Bands, in der die Ensembles aufgrund ihrer Größe und den benutzten Instrumenten an Lautstärke zulegten. Die Gitarre verlor damit ihre Bedeutung im Zusammenspiel und der Ruf nach einer durchsetzungsfähigen Gitarre wurde lauter.

Um 1923 experimentierte ein gewisser *Lloyd Loar* mit elektromagnetischen Tonabnehmern und entwickelte einen Sensor, der die Schwingung der Decke des Gitarrenkorpus abnehmen konnte. Diese Erfindung setzte sich aber aufgrund der Ablehnung durch die Geschäftsführung nicht durch. Erst 1931 entwickelten dann *George Beauchamp* und *Adolph Rickenbacker* einen elektromagnetischen Wandler, der sich die Saitenschwingung über das Induktionsprinzip direkt zu Nutze machte [2]. 1941 entwickelte *Lester William Polfus*, besser bekannt unter seinem Künstlernamen *Les Paul*, eine Gitarre mit einem massiven Korpusteil, in den diese Tonabnehmer eingelassen waren, um Rückkopplung zu vermeiden [2]. Die erste kommerziell erfolgreiche E-Gitarre mit massivem Korpus entwickelte aber erst *Leo Fender* 1950, die zunächst „Fender Esquire“ getauft wurde [3] und nach mehreren Namenswechseln den Namen „Fender Telecaster“ erhielt, den sie bis heute trägt. Dies läutete den Siegeszug der E-Gitarre in sehr vielen Bereichen der Musik ein.

Die massive Elektrogitarre besteht heute grundsätzlich aus zwei Teilen, dem Hals und dem Korpus. Der Korpus besteht bei der E-Gitarre aus einem massiven Stück Holz, das in verschiedene Formen gefräst sein kann. Darin eingelassen sind die Tonabnehmer und die weitere Elektronik wie z.B. Potentiometer, die mit Kondensatoren und Widerständen verbunden, den Ton und die Lautstärke regeln. Die Saiten laufen genau über die eingelassenen, induktiven Tonabnehmer.

2. Induktion

Die Hochschulphysik lehrt, dass eine Spannung induziert wird, wenn sich der magnetische Fluss durch eine Leiterschleife mit der Zeit ändert: $|U_{ind}| = \dot{\Phi} = \frac{d}{dt}(A \cdot B)$. In der Schule trennt man hier meistens zwischen zwei Induktionsarten.

Bei der „Induktion im bewegten Leiter“, auch „Generatorprinzip“ genannt, hat man ein zeitlich unveränderliches Magnetfeld und die vom Magnetfeld durchflossene Fläche ändert sich mit der Zeit: $|U_{ind}| = \dot{\Phi} = \dot{A} \cdot B$. Das Magnetfeld darf dabei auch homogen sein. Ein Standardversuch in der Sekundarstufe I ist die Leiterschaukel im Hufeisenmagnet. In der Sekundarstufe II wählt man dann andere Versuche, da bei der Leiterschaukel die Fläche schwer zu sehen

ist, die sich ändert. Wichtig ist, dass es für den Wert der induzierten Spannung egal ist, ob sich das Magnetfeld oder der Leiter bewegt [4]. Die typische Anwendung ist der Generator.

Bei der „Induktion im ruhenden Leiter“, auch „Transformatorprinzip“ genannt, hat man eine unveränderliche, ruhende Leiterschleife und an dieser Stelle ein zeitlich veränderliches Magnetfeld: $|U_{ind}| = \dot{\Phi} = A \cdot \dot{B}$. Verwendet man statt einer Leiterschleife eine Spule mit N Windungen, ist die Spannung N-mal so groß. Die typische Anwendung ist der Transformator.

Beim Tonabnehmer der E-Gitarre handelt es sich auch um „Induktion im ruhenden Leiter“, aber die Magnetfeldänderung wird auf eine andere Weise als beim Transformator erzeugt: Mit Hilfe von Dauermagneten wird ein Magnetfeld in der Spule erzeugt; wird nun vor der Spule Eisen in Form von Stahlsaiten gebracht, wird das Magnetfeld verstärkt und mit dieser Bewegung eine Spannung induziert. Eine abwechselnde Hin- und Wegbewegung von Eisen vor der Spule erzeugt ein in der Stärke wechselndes Magnetfeld und damit eine Wechselspannung mit der gleichen Frequenz, mit der die Saite schwingt. Der Tonabnehmer ist damit als ein Bewegungssensor anzusehen, der eine mechanische Schwingung in eine elektrische Spannung umsetzt. Dieses Prinzip, dass bewegtes Eisen das Magnetfeld ändert und so eine Spannung induziert, wird auch bei der Zündsteuerung beim Otto-Motor oder bei Drehzahlsensoren verwendet [5].

Dass Eisen ein Magnetfeld verstärkt, kennen die Schüler an dieser Stelle bereits vom Elektromagneten und kann hier wiederholt werden. Selbst das Modell, dass die Verstärkung durch die Ausrichtung von Elementarmagneten geschieht, müsste bekannt sein.

3. Der Tonabnehmer

Die meisten E-Gitarren haben zwei oder drei Tonabnehmer. Ein Tonabnehmer besteht aus einer einzigen Spule und in der Regel aus sechs darin steckenden, zylinderförmigen Dauermagneten sowie einem Gehäuse, wobei alle sechs Dauermagnete gleich orientiert sind [2]. Es gibt auch Konstruktionen, bei denen sechs Eisenstifte auf einem großen, unter der Spule liegenden Permanentmagneten stehen, von dem sie magnetisiert wurden (siehe Abb. 1).

Der Tonabnehmer liegt so unter den Saiten, dass jede Saite über einen dieser Dauermagnete läuft, die man auch gut sehen kann (siehe Abb. 2). Die kleine Spule des Tonabnehmers besteht typischerweise aus 5.000 bis 10.000 Windungen [3] mit einer Induktivität von

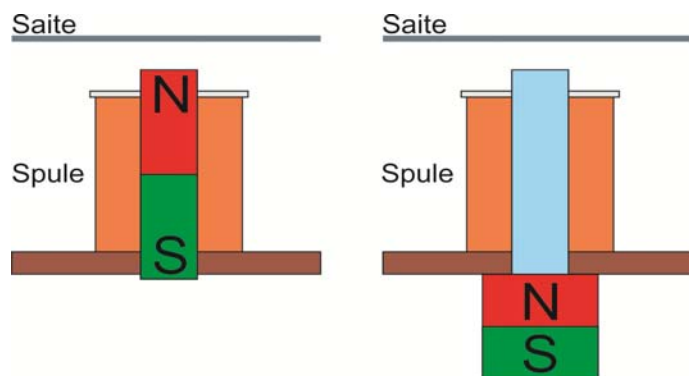


Abb. 1: Querschnitt durch zwei verschiedene Varianten eines Tonabnehmers



Abb. 2. Korpus einer E-Gitarre mit sechs Saiten und drei einfachen Tonabnehmern (Blick von oben auf die Tonabnehmer)

einigen Henry und mit sehr dünnem Draht, da sonst so kleine Abmessungen nicht möglich wären. Im Fachhandel erhält man Spulendraht zum Selbstwickeln von Tonabnehmern mit Durchmessern von circa 0,6 mm.

Die Funktionsweise des Tonabnehmers kann auch in Schulexperimenten gezeigt werden. Bevor man jedoch ein Modell eines Tonabnehmers zeigt, bieten sich einige Vorversuche an.

3.1 Vorversuche zum Tonabnehmer

Als ersten Vorversuch wird eine Spule mit einer Windungszahl von ca. 10.000 Windungen direkt an ein Demonstrationsmessgerät angeschlossen. Wird ein Stabmagnet auf die Spule zu oder von ihr wegbewegt, werden Spannungen erzeugt (siehe Abb. 3). Man sieht also, dass eine Änderung des Magnetfeldes in der Spule eine Spannung an ihren Enden bewirkt.

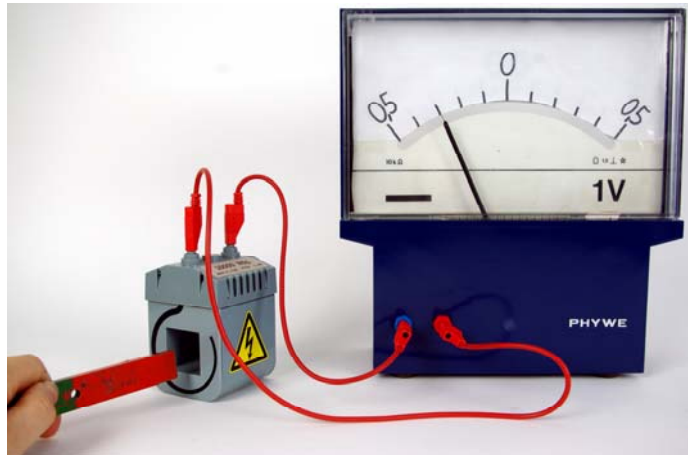


Abb. 3: Vorversuch zur Induktion durch Veränderung des Magnetfeldes

Als zweiten Vorversuch wird in die Spule ein Dauermagnet gesteckt und vor der Spule ein ferromagnetisches

Material wie ein Eisenkern oder ein Stahlstab bewegt. Dies führt zum gleichen Ergebnis: Nur wenn sich das Eisen bewegt, wird eine Spannung induziert. Die Spannungen sind allerdings kleiner, weil man nichts mehr in die Spule hineinbewegen kann, so dass man einen empfindlicheren Messbereich wählen sollte (etwa 10 mV). Hierbei ist es wichtig, deutlich zu machen, dass das Eisen das Magnetfeld verstärkt und sich somit wieder das Magnetfeld in der Spule ändert. Zur Verdeutlichung können verschiedene Stäbe, z.B. aus Stahl, Eisen, Aluminium, Kunststoff und Holz verwendet werden. Betrachtet man den Eisenstab als Gitarrensaite, hat man schon ein Modell für den Tonabnehmer.

3.2 Ein Tonabnehmer-Modell

Für den Aufbau in Abbildung 4 wurde eine Phywe-Spule mit 20.000 Windungen und ein zylinderförmiger Dauermagnet als Kern benutzt, der an beiden Seiten etwas hinausragt. Als Messgerät wurde ein digitales Oszilloskop verwendet, um den gesamten Verlauf eines Spannungsimpulses zeigen zu können. Möglich ist auch ein klassisches Speicheroszilloskop oder ein Computermesswerterfassungssystem mit mV-Sensor. Wird als Modell der Gitarrensaite ein Stahlstab vor der Spule auf- und abbewegt, zeigt auch das Oszilloskop eine Schwingung an.

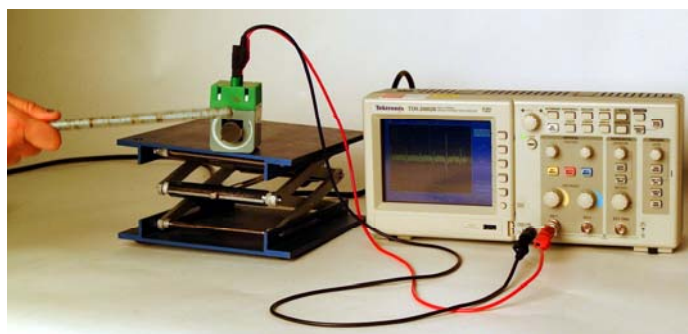


Abb. 4: Tonabnehmermodell mit Eisenstab als Modell einer Gitarrensaite

Steht kein passender Dauermagnet zur Verfügung, so kann auch ein passender Weicheisenkern benutzt werden, an dem auf einer Seite ein möglichst starker Dauermagnet angehängt wird. Der Stahlstab wird nun auf der anderen Seite der Spule bewegt.

Ein besseres Modell erhält man, wenn man vor die Spule ein Monochord stellt. Dieses kann man mit Nylonsaiten, Gummi oder Baumwollfäden bespannen, was jeweils nicht registriert werden kann. Bei einer Bespannung mit einer Gitarren-Stahlsaite muss man aufpassen, dass eine zu hohe Zugspannung nicht das Monochord zerstört. Alternativ kann man auch vor die Spule eine E-Gitarre oder eine akustische Westergitarre mit Stahlsaiten stellen (eine E-Gitarre ist bereits für ca. 60 € erhältlich, mit Verstärker und Accessoires für 100 €). Die Spule stellt man am Besten auf einen höhenverstellbaren Laborboy (Laborhebebühne).

Für den Aufbau in Abbildung 5 wurde eine Phywe-Spule mit 20.000 Windungen gewählt. Außerdem wurde ein Aufbau mit einem Weicheisenkern in der Spule und an ihm hängende starken Dauermagneten gewählt, da sich mit diesem Aufbau größere Amplituden erzielen lassen als mit einem kleinen Dauermagneten in der Spule. Mit diesem Aufbau lag die maximale Amplitude ungefähr bei 50 mV. Die

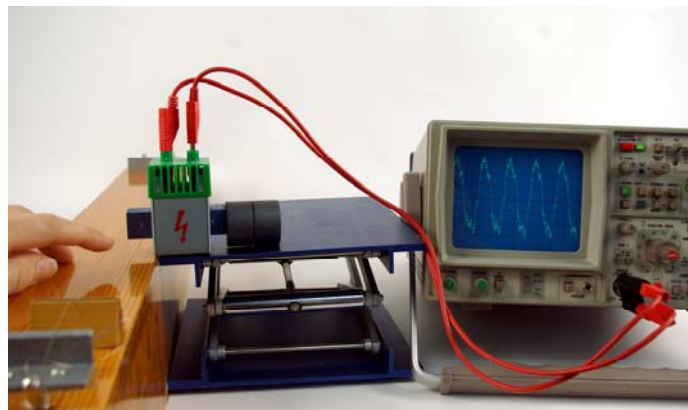


Abb. 5: Tonabnehmermodell mit Saite auf Monochord

Schwingung einer Stahlsaite oder einer umspannenen Nylonsaite lässt sich gut zeigen, obwohl auch ein hohes „Brummen“ bei Leerlauf entsteht.

4. Der Zweispultonabnehmer

4.1 Die Idee

Der bisher beschriebene Tonabnehmer mit einer Spule heißt Singlecoil-Tonabnehmer. Bei diesem tritt das Problem der relativ hohen Brummspannung durch Störfelder auf. Befindet sich nämlich eine Elektrogitarre mit Singlecoil-Tonabnehmern in der Nähe von elektromagnetischen Feldern, induzieren diese Brummspannungen, welche sich mit der Spannung durch die Saitenbewegung überlagern und nach dem Verstärken als Brummen hörbar sind. Solche Störfelder können von Leuchtstoffröhren, Lautsprechern, Netzkabeln, Transformatoren und anderen Geräten, die elektromagnetische Wechselfelder nutzen, ausgehen [3]. Aufgrund dieses Problems wurde der Einspultonabnehmer weiterentwickelt und so der Zweispultonabnehmer, auch Humbucker genannt, gebaut.

Der Humbucker will zwei gleiche Brummspannungen gegenphasig überlagern und so auslöschen. Gleichzeitig soll jedoch die durch die Saitenschwingung induzierte Schwingung verstärkt werden [3]. Dazu besitzt der Humbucker zwei Spulen nebeneinander (siehe Abb. 6). Das von den Störquellen erzeugte Magnetfeld induziert in beiden Spulen jeweils die gleiche Brummspannung $U_{\text{Brumm},2} = U_{\text{Brumm},1}$. Die beiden Spulen sind aber gegenphasig zusammengeschaltet, so dass sich die Spannungen gegenseitig aufheben, ihre Differenz ist Null:

$U_{\text{Brumm},1} - U_{\text{Brumm},2} = 0$. Entscheidend ist nun, dass das Magnetfeld, das von den Dauermagneten erzeugt wird, die beiden Spulen in entgegengesetzten Richtungen durchfließt (siehe Abb. 6). Somit sind die von einer Saitenbewegung induzierten Wechselspannungen in beiden Spulen stets gegenphasig $U_{\text{Signal},2} = -U_{\text{Signal},1}$. Und da die beiden Spulen zusätzlich gegenphasig zusammengeschaltet sind, verdoppeln sich nun die Beträge der Induktionsspannungen: $U_{\text{Signal},1} - U_{\text{Signal},2} = 2 \cdot U_{\text{Signal},1}$.

Man kann auch sagen, es wird eine Differenz zwischen den Spannungen beider Spulen gebildet und zusätzlich in beiden Spulen durch die Saitenbewegung ein gegenphasiges Signal erzeugt. Diese Differenzbildung ist ein Trick, den man bei vielen Sensoren zur Linearisierung und zur Kompensation von Störeinflüssen verwendet, z.B. beim Differentialtransformator und beim Differenzspulensensor [6] oder bei Differentialkondensatoren, wie sie in kapazitiven Beschleunigungssensoren enthalten sind [7].

4.2 Ein Humbucker-Modell

Für ein Modell eines Humbucker verwendet man zwei gleiche Spulen mit gleichen Wicklungszahlen und gleichen Weicheisenkernen. Die beiden Spulen werden nebeneinander gestellt und hinter die Spulen kommen Dauermagneten so, dass an den beiden Eisenkernen verschiedene Magnetpole enden. Statt einem schwachen Stabmagneten wie in Abbildung 7 benutzt man besser zwei einzelne, stärkere Magnete wie in Abbildung 5, die mit unterschiedlichen Polen an die Weicheisenkerne angelegt

werden. Nun muss darauf geachtet werden, dass die Spulen gegensinnig in Reihe geschaltet werden: Betrachtet man die Spulen in axialer Richtung, muss ein gedachter Strom entgegengesetzt durch die Spulen fließen (siehe Abb. 7).

Wird ein Zweikanaloszilloskop benutzt, können die Signale beider Tonabnehmermodelle gleichzeitig betrachtet werden, was den Amplituden- und Brummspannungsunterschied sehr deutlich werden lässt. Die beiden Modelle sind dazu nah aneinander zu positionieren. Streicht

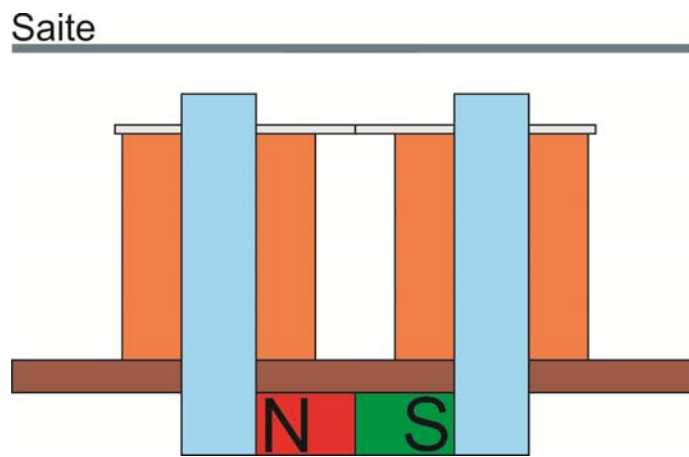


Abb. 6: Querschnitt durch einen Humbucker (Prinzipskizze)

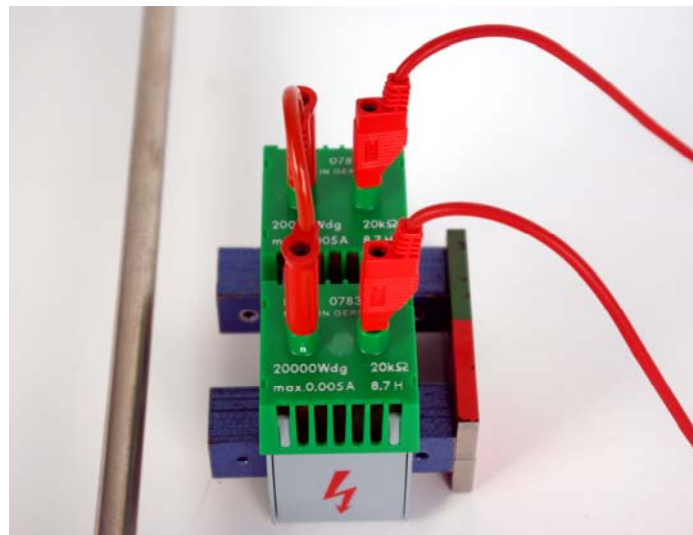


Abb. 7: Modell eines Humbuckers

man mit dem Stab ungefähr gleichzeitig über beide Modellaufbauten, ist deutlich zu sehen, dass der induzierte Impuls am Humbucker größer ist als am Singlecoil.

Positioniert man beide Modelle vor der Stahlsaite eines Monochords, kann deutlich beobachtet werden, dass die Brummspannung beim Humbucker relativ zum Signal kleiner ist. Die Brummspannungen kompensieren sich allerdings nicht auf null, das Signal an einer echten E-Gitarre ist deutlich „sauberer“. Möglich wäre hier auch, einen echten Singlecoil-Tonabnehmer und einen echten Humbucker-Tonabnehmer zu verwenden.

5. Fazit

Der Tonabnehmer der E-Gitarre ist ein Sensor, der so manche Rock- und Popmusik erst möglich macht. Im Physikunterricht ist er als Singlecoil-Tonabnehmer ein gutes und einfaches Beispiel für die „Induktion im ruhenden Leiter“. Dabei wird das Wissen wiederholt, dass Eisen ein Magnetfeld verstärkt. Der Zweispultonabnehmer geht allerdings über das Thema „Induktion“ hinaus und ist eher denkbar, wenn man exemplarisch das technische Prinzip der Differenzbildung zeigen will.

Literatur

- [1] L. Leußner, Physik an der E-Gitarre, Schriftliche Hausarbeit, Universität Würzburg, 2011, unveröffentlicht
- [2] T. Bacon, Gitarrenklassiker, 2007, Premio Verlag
- [3] M. Zollner, Physik der Elektrogitarre, Regensburg, 2009 (Vorveröffentlichung), pdf vorveröffentlicht unter <http://homepages.fh-regensburg.de/~elektrogitarre>
- [4] T. Wilhelm, Rotierende Teelichter, Linearmotore und schwebende Scheiben – Faszinierende Induktionsmotore zum einfachen Nachbau im Unterricht, in: V. Nordmeier, A. Oberländer & H. Grötzebauch (Hrsg.), Didaktik der Physik - Regensburg 2007, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2007
- [5] R. Dietrich, T. Wilhelm & R. Girwitz, Induktive und magnetische Sensoren im Physikunterricht, in: V. Nordmeier, A. Oberländer & H. Grötzebauch (Hrsg.), Didaktik der Physik - Regensburg 2007, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2007
- [6] M. Weidinger & T. Wilhelm, Differenzbildung bei Sensoren - Differentialtransformator und Differenzspulensensor im Unterricht, in: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 57, Nr. 4, 2008, S. 5 – 9
- [7] B. Watzka, S. Scheler, T. Wilhelm & G. Girwitz, Beschleunigungssensoren, in: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 61, Nr. 6, 2012

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. *Thomas Wilhelm*, Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de, www.thomas-wilhelm.net;

Lutz Leußner, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Universität Würzburg, Emil-Hilb-Weg 22, 97074 Würzburg, lutzleusner@gmx.de