

## Wissenschaft in die Schulen – Zusatzinformation für Lehrer

### Thema: Der DOPPLER-Effekt

Autor: Dr. Oliver Schwarz, Universität Koblenz-Landau

### Der DOPPLER-Effekt

Der DOPPLER-Effekt zählt zu den grundlegenden physikalischen Phänomenen. Er tritt nicht nur bei bewegten Empfängern oder Sendern von Schall- bzw. Lichtwellen auf, sondern ist grundsätzlich immer dann zu beobachten, wenn periodische Signale zwischen solchen Sendern und Empfängern hin und her laufen. Bei dieser universellen Bedeutung ist es nicht weiter verwunderlich, dass uns der DOPPLER-Effekt in vielfältigen Anwendungen der modernen Messtechnik entgegentritt.

Auch in den physikalischen Schullehrplänen und -büchern – jedenfalls zumeist denen der gymnasialen Oberstufe – ist der DOPPLER-Effekt in angemessener Weise berücksichtigt. Hieraus ergibt sich eine willkommene Gelegenheit, astronomische Inhalte in den Physikunterricht einfließen zu lassen.

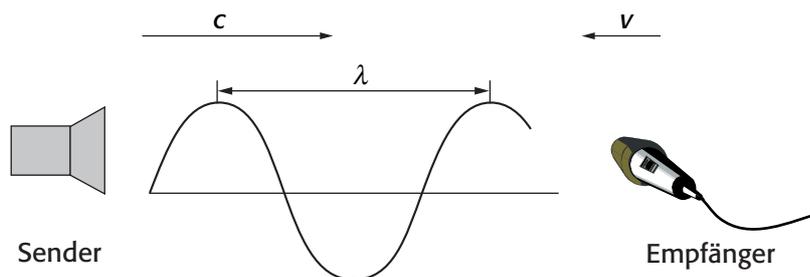
### Der optische und der akustische DOPPLER-Effekt

Wir beschränken uns nachfolgend ausschließlich auf den akustischen und den optischen DOPPLER-Effekt. Sofern man beide Effekte in einem Atemzug erwähnt, sollte man sich zunächst über die Unterschiede beider Phänomene Klarheit verschaffen:

Während der akustische DOPPLER-Effekt ausschließlich mit dem Methoden der klassischen Physik zu beschreiben ist, bedarf es zu vollständigen Behandlung des optischen DOPPLER-Effektes der speziellen Relativitätstheorie. Erst durch die theoretische Untersuchung stellt sich heraus, worauf letztlich dieser Unterschied beruht. Für den akustischen DOPPLER-Effekt ist die Relativgeschwindigkeit von Sender oder Empfänger bezüglich des Trägermediums der Schallwelle entscheidend. Der akustische DOPPLER-Effekt lässt sich auf recht einfache Weise verstehen.

Die folgende Berechnung gilt für die Frequenzänderung, wenn sich der Empfänger auf einen ruhenden Sender zu bewegt.

Abbildung 1



Die Abbildung 1 zeigt zwei benachbarte Wellenberge, deren Abstand gleich der Wellenlänge  $\lambda$  ist. Sei  $c$  die Schallgeschwindigkeit und  $f$  die Frequenz, dann würde bei einem ruhenden Empfänger die Zeit

$$T = \frac{1}{f} = \frac{\lambda}{c} \quad (1)$$

zwischen dem Eintreffen dieser benachbarten Wellenberge vergehen. Bewegt sich der Empfänger jedoch mit der Geschwindigkeit  $v$  auf den Sender zu, dann treffen die Wellenberge mit der effektiven Geschwindigkeit  $c + v$  am Empfänger ein. Somit vergeht auch die kürzere Zeitspanne

$$T' = \frac{1}{f'} = \frac{\lambda}{c + v} \quad (2)$$

zwischen dem Einlaufen benachbarter Wellenberge. Formt man die Gleichungen (1) und (2) nach der Wellenlänge um und setzt sie anschließend gleich, so erhält man den Zusammenhang

$$\frac{c}{f} = \frac{c+v}{f'} \quad (3)$$

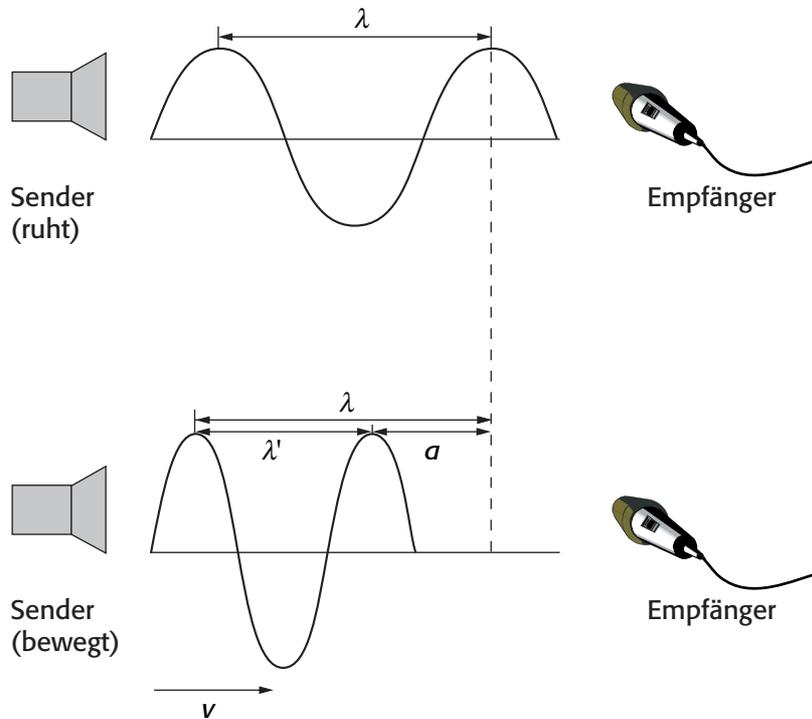
Stellt man die Gleichung (3) nach  $f'$  um, so ergibt sich:

$$f' = f \left(1 + \frac{v}{c}\right) \quad (4)$$

Bewegt sich der Empfänger auf die Schallquelle zu, dann registriert man eine höhere Frequenz. Entfernt sich der Empfänger vom Sender, dann ist in der Gleichung (4) die Geschwindigkeit  $v$  mit negativem Vorzeichen einzusetzen.

Anders liegen die Verhältnisse, wenn der Empfänger ruht und sich eine Schallquelle mit der Geschwindigkeit  $v$  auf ihn zu bewegt.

Abbildung 2



In der Zeit einer Schwingungsperiode  $T$  bewegt sich der Sender um die Strecke  $a = v \cdot T$  voran, eine Wellenfront breitet sich in gleicher Zeit um die Strecke  $\lambda = c \cdot T$  aus. Für den Empfänger beträgt der Abstand zwischen zwei Wellenbergen daher nicht  $\lambda$ , sondern:

$$\lambda' = \lambda - a = c \cdot T - v \cdot T = (c - v)T = \frac{c-v}{f} \quad (5)$$

Bei der Bewegung der Signalquelle wird also das Wellenfeld deformiert. Der Empfänger nimmt die mit der Schallgeschwindigkeit  $c$  ankommenden Wellen der Wellenlänge  $\lambda'$  wahr, denen er deshalb die Frequenz  $f'$  mit

$$f' = \frac{c}{\lambda'} \quad (6)$$

zuordnet. Stellt man die Gleichung (6) nach  $\lambda'$  um und setzt sie dann in die Gleichung (5) ein, so ergibt sich durch Auflösen nach  $f'$  der Zusammenhang:

$$f' = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}} \quad (7)$$

Nähert sich eine Signalquelle einem ruhenden Beobachter, so ist ihre Frequenz erhöht. Für eine sich entfernende Signalquelle müsste man in der Gleichung (7) die Geschwindigkeit  $v$  mit negativem Vorzeichen einsetzen.

Fassen wir kurz zusammen:

Beim akustischen DOPPLER-Effekt sind insgesamt vier Einzelfälle zu unterscheiden.

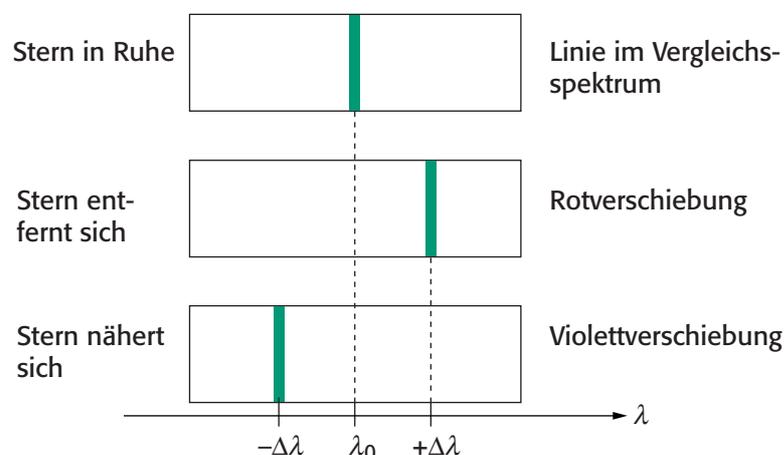
ruhender Sender	ruhender Empfänger
Empfänger entfernt sich vom Sender	Sender nähert sich an den Empfänger an
Empfänger entfernt sich vom Sender	Sender entfernt sich vom Empfänger

Die in der obigen Tabelle zusammengefassten Fallunterscheidungen ergeben nur dann einen Sinn, wenn man von der Existenz eines ruhenden Trägermediums ausgeht, bezüglich dessen man überhaupt unterscheiden kann, ob sich nun gerade der Empfänger oder der Sender bewegt. Da sich elektromagnetische Wellen aber durch den Raum und keineswegs durch irgend ein spezielles Trägermedium hindurch ausbreiten, kann man für sie prinzipiell nur die beiden Fälle Annäherung oder Abstandsvergrößerung zwischen Empfänger und Sender unterscheiden. Liegt die Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger in der Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Strahlung, dann gilt für die beobachtete Frequenz  $f'$  elektromagnetischer Wellen:

$$f' = f \frac{1 \pm \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (8)$$

Das obere Vorzeichen gilt für Annäherung von Sender und Empfänger. Das „Licht“ ist in diesem Fall hochfrequenter, kurzwelliger, also zum blauen Spektralbereich hin verschoben. Bei Abstandsvergrößerung tritt eine Wellenlängenvergrößerung und damit eine Verschiebung in den roten Spektralbereich auf, die so genannte Rotverschiebung.

Abbildung 3

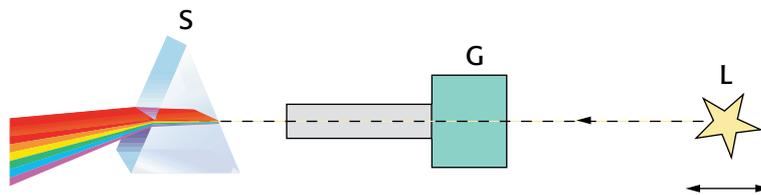


Ist die Relativgeschwindigkeit  $v$  sehr viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ( $v \ll c$ ), dann kann man den Wurzelterm im Nenner vernachlässigen und erhält eine Übereinstimmung mit der Gleichung (4) des akustischen DOPPLER-Effektes. Nur für diesen Fall darf man – auch im Schulunterricht (!) – stillschweigend die Unterschiede zwischen optischem und akustischem DOPPLER-Effekt verschweigen. Glücklicherweise erfüllen viele astronomische Anwendungen des DOPPLER-Effektes die Forderung nach kleiner Relativgeschwindigkeit.

### Der DOPPLER-Effekt in der Astronomie

Im Spektrum der weitaus meisten Lichtquellen im All finden sich neben einem kontinuierlichen Hintergrund zahlreiche Spektrallinien und Absorptionskanten. Diese markanten Stellen in den Spektren dienen als „Markierungen“, die eine Messung der Frequenz- bzw. Wellenlängenänderung aufgrund des DOPPLER-Effektes ermöglichen.

Abbildung 4



Die Abb. 4 zeigt dabei schematisch das Messprinzip für hoch präzise DOPPLER-Messungen. Die Strahlung der kosmischen Lichtquelle L muss auf dem Weg zum Spektralapparat S eine ruhende Gasschicht G durchlaufen, die im Spektrum die Vergleichslinien erzeugt. Dabei sind Geschwindigkeitsmessungen bis in den Bereich von einigen Metern pro Sekunde möglich.

Die astronomischen Anwendungen des DOPPLER-Effektes sind so zahlreich, dass nachfolgend nur eine kleine Auswahl von Beobachtungen dargestellt werden kann.

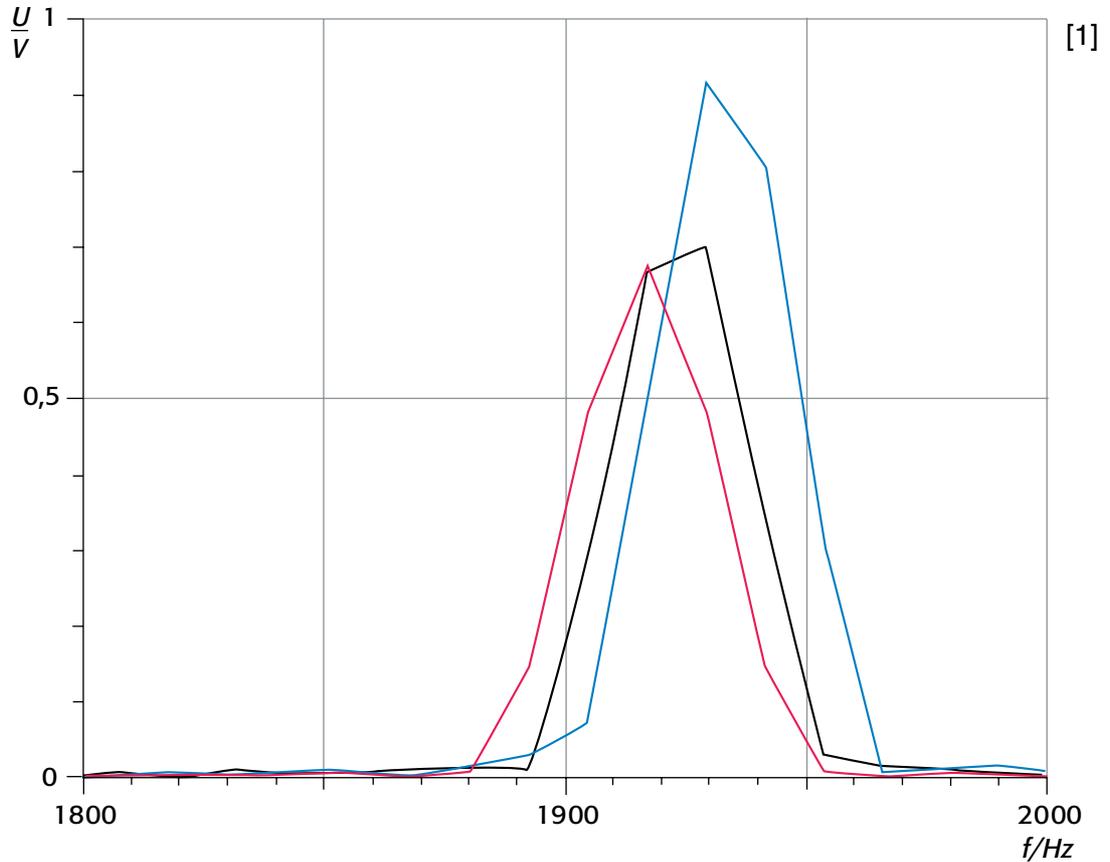
DOPPLER-Messungen ermöglichen die Bestimmung der **Radialgeschwindigkeit** der Sterne. Unter der Radialgeschwindigkeit versteht man die auf die Erde bzw. von ihr weg gerichtete Geschwindigkeitskomponente der Sterne. Radialgeschwindigkeitsmessungen ermöglichen zum Beispiel Aussagen über die Bewegungsverhältnisse in unserem Milchstraßensystem.

Bei sehr engen **Doppelsternen**, deren Komponenten sich annähernd so umeinander drehen, dass ihre Bahnebene in der Richtung des Sehstrahls von der Erde liegt, kann man unter Umständen periodische Linienverschiebungen in den Spektren bzw. im gemeinsamen Spektrum des Systems erkennen. In diesem Fall kann möglicherweise aus der Umlaufzeit und der durch DOPPLER-Messungen bestimmten Bahngeschwindigkeit der Abstand der Komponenten berechnet werden.

Der DOPPLER-Effekt spielt auch bei der Suche nach **neuen Planetensystemen** eine herausragende Rolle. Ein massereicher planetarer Begleiter eines Sterns verursacht ein geringfügiges Schwanken seines Zentralgestirns, das sich vielleicht anhand der DOPPLER-Verschiebungen in dessen Spektrallinien nachweisen lässt.

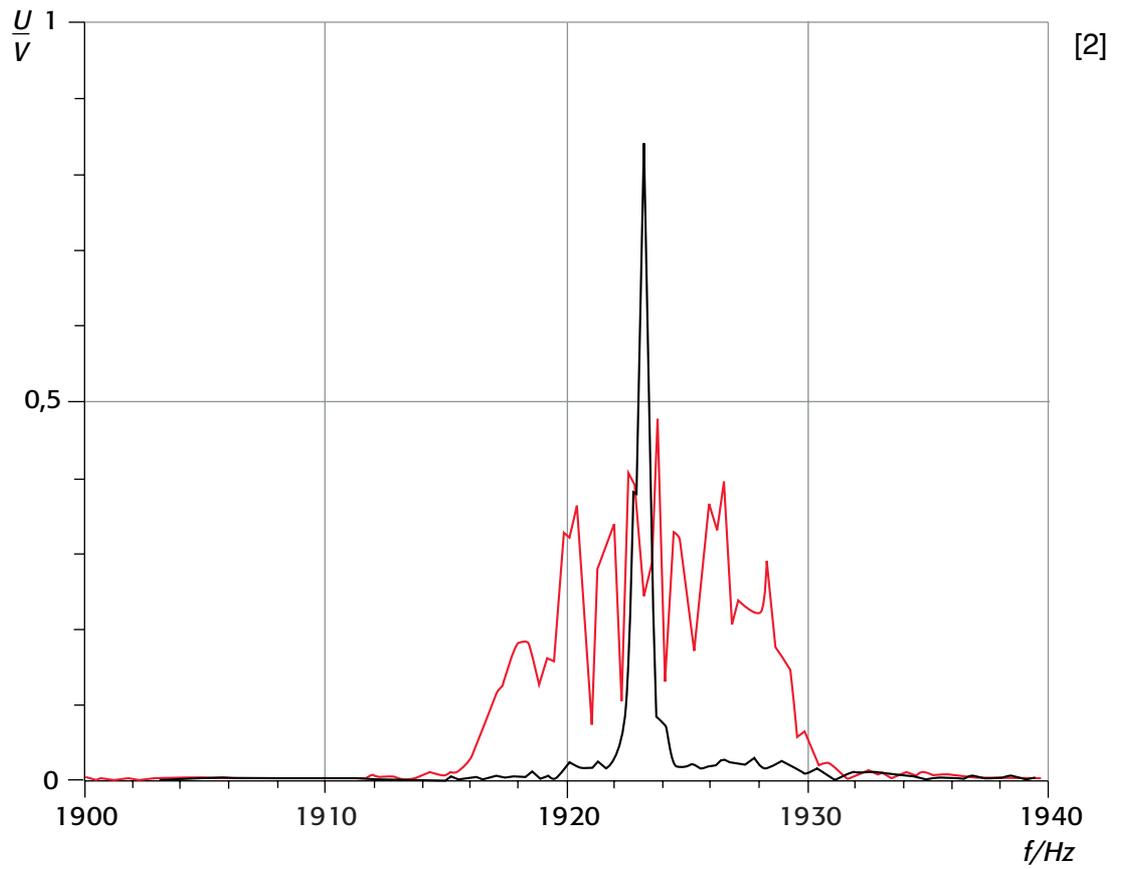
Astronomische DOPPLER-Messungen stoßen an verschiedene Genauigkeitsgrenzen, die sich auch zukünftig nicht unterschreiten lassen. So unterliegen die Gasmassen der Sternatmosphären zumeist intensiven **Konvektionsbewegungen**. Diese Bewegungen verursachen ihrerseits DOPPLER-Verschiebungen in den Spektrallinien. Auch die irreguläre Wärmebewegung der einzelnen Atome in den Sternatmosphären führt aufgrund des DOPPLER-Effektes zu einer Linienverbreiterung, die man als **thermische DOPPLER-Verbreiterung** bezeichnet (Es gibt auch noch andere Effekte, die zu einer Linienverbreiterung führen.). Man könnte also etwas überspitzt formulieren, dass in der astronomischen Beobachtung sehr genaue DOPPLER-Messungen auch durch den DOPPLER-Effekt selbst verhindert werden.

herung (blaue Spektrallinie) und zu geringeren Frequenzen (rote Spektrallinie) bei Abstandsvergrößerung. Die schwarze Kurve entspricht der Frequenz von etwa 1920 Hz des ruhenden Mikrofons.



### Experiment 2: Analogieversuch zur thermischen DOPPLER-Verbreiterung der Spektrallinien

Für diesen Versuch verwende man das bereits im Experiment 1 beschriebene Mikrofonpendel, führe die Frequenzanalyse aber über eine Messzeit hinweg aus, die mindestens genau so groß wie die Schwingungsperiode des Pendels ist. Das Resultat der Messung ist in der Abb. 6 wiedergegeben. Die schwarze Kurve entspricht der ruhenden Spektrallinie. Die rote Kurve gibt den Verlauf der verbreiterten Spektrallinie wieder. Die auffälligen Intensitätsschwankungen der roten Kurve sind nicht typisch für die DOPPLER-Verbreiterung – leider in unserem Analogieversuch aber unvermeidlich. Sie entstehen, weil der Lautsprecher infolge seiner Schwingungsbewegung beständig den Abstand zum Mikrofon ändert und deshalb – ganz unabhängig von der Tonhöhe – auch noch die Schallintensität Schwankungen unterliegt.



## Wissenschaft in die Schulen - Bildquellen

Abbildung 1: Eigene Zeichnung

Abbildung 2: Eigene Zeichnung

Abbildung 3: LB Astronomie Oberstufe - Grundstudium, Duden Paetec, Schulbuchverlag,  
ISBN: 978-3-89517-798-9, S. 151

Abbildung 4: Eigene Zeichnung

[1]: Eigenes Experiment; Eigenes Messresultat

[2]: Eigenes Messresultat