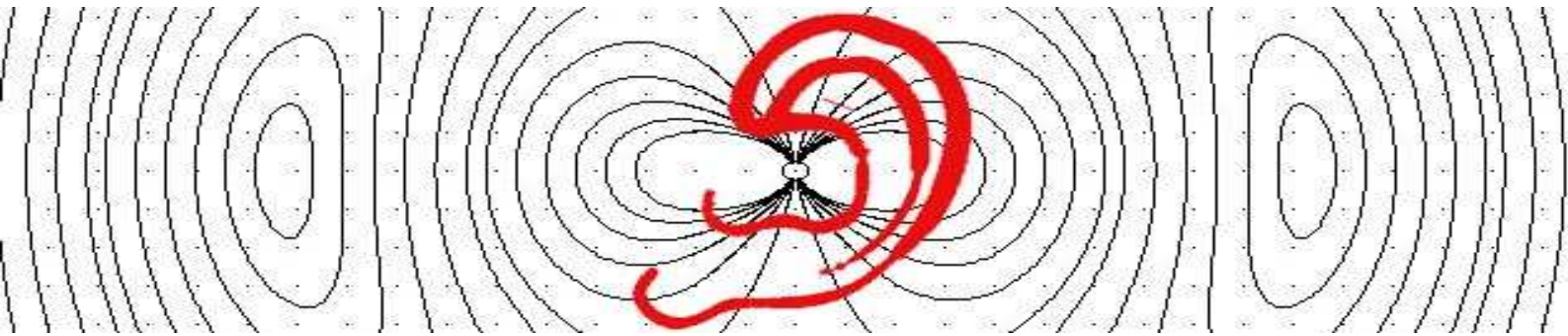


## SCHALLAUSBREITUNG



- Reflexion und Refraktion
- Brechung von Schallwellen
- Wellenbeugung an Öffnungen
- Musik im Freien
- Doppler-Effekt
- Interferenz und Schwebungen

## Reflexion und Refraktion

Die Schallreflexion ist mit der Reflexion in der Optik vergleichbar. Der einfachste Fall ist eine Reflexion an einer ebenen Fläche. Hierfür gilt die Regel Einfallswinkel gleich Reflexionswinkel. Eine reflektierte Welle ist immer schwächer als die ankommende, da ein Teil der Schallenergie von der reflektierten Oberfläche absorbiert wird.

Eine Gruppe von Wellen mit gleicher Richtung wird an einer glatten Oberfläche regelmäßig reflektiert. Diffuse Reflexion kommt zustande, wenn Wellen auf eine raue Oberfläche treffen. Eine reflektierende Wand wirkt erst dann rau, wenn die Unregelmäßigkeiten einen Durchmesser von mindestens einem Meter haben.

Auch wenn keine reflektierenden Objekte wie Mauern oder Gebäude vorhanden sind, tritt im Regelfall immer eine Schallreflexion als Schalldruck am Boden ein.

Beim Erkennen der Schallreflexionen spielt die Echowahrnehmungsschwelle eine bedeutende Rolle. Je nach Anordnung und Anzahl der reflektierenden Flächen und Art der Beschallung ergibt sich ein unterschiedlicher Höreindruck:  
Einige Beispiele sind:

- Echo (z.B. Felswand in größerem Abstand)
- Flatterecho (z.B. zwei parallele reflektierende Wände)
- Nachhall (z.B. Kirche)
- hohe Räumlichkeit (z.B. akustisches Raumempfinden in Konzertsälen)

Für den akustischen Eindruck wichtig sind:

- Anteil des Direktschalls am Gesamtschallpegel
- Zeitverzögerung und Richtung von frühen Reflexionen, sowie deren Anteil am Gesamtschallpegel
- Einsatzverzögerung und räumliche Verteilung des Nachhalls, sowie dessen Anteil am Gesamtschallpegel und dessen zeitlicher Verlauf (Nachhallzeit)

## Brechung von Schallwellen

### Was ist eine Brechung?

Eine Brechung ist eine Richtungsänderung einer Welle aufgrund einer lokalen Änderung .

### Wie kommt es also zur Brechung von Schallwellen?

Tritt eine Schallwelle von einem Medium ins anderes über, so wird sie bei Änderung der Schallgeschwindigkeit zwischen zwei Medien an der Grenzfläche gebrochen.

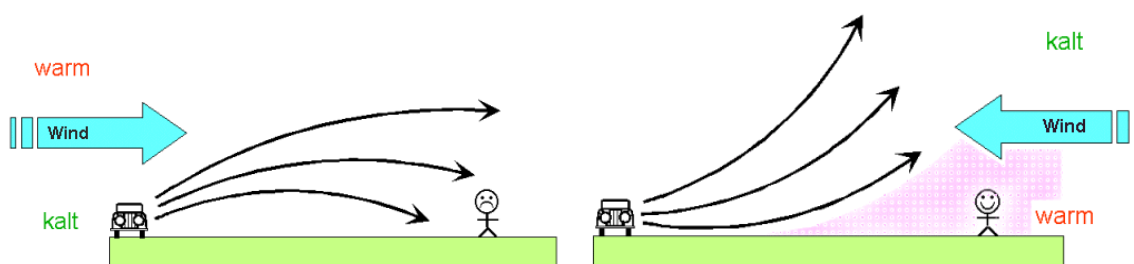
Die Brechung wird durch die Zahl  $n$  beschrieben.

### Abwärtsbrechung:

Sie erfolgt, wenn die Schallgeschwindigkeit mit der Höhe zunimmt ( durch Temperaturzunahme oder Ausbreitung IN Windrichtung. Die Schallwellen werden nach unten gebrochen.

### Aufwärtsbrechung.

Sie erfolgt, wenn die Schallgeschwindigkeit mit der Höhe abnimmt ( durch Temperaturabnahme oder Ausbreitung gegen Windrichtung. Die Schallwellen werden nach oben gebrochen.



## Wellenbeugung an Öffnungen

Wie kann man überhaupt zeigen, dass ein Vorgang mit Welleneigenschaft beschrieben werden kann?

Die **Beugung** oder **Diffraktion** ist die „Ablenkung“ von Wellen (wie Licht- und anderen elektromagnetischen Wellen, Wasser- oder Schallwellen) an einem Hindernis oder einer Öffnung. Bei Beugungserscheinungen kann sich die Welle im geometrischen Schattenraum des Hindernisses (Spalt, Gitter, Fangspiegel usw.) ausbreiten. Zur Beugung kommt es durch Entstehung neuer Wellen entlang einer Wellenfront. Durch Beugung ist eine Ausbreitung der Welle hinter Öffnungen und Hindernissen in Richtungen möglich, die nicht der geradlinigen Fortsetzung der Strahlrichtung von der Quelle entsprechen.

### **Beispiel 1**

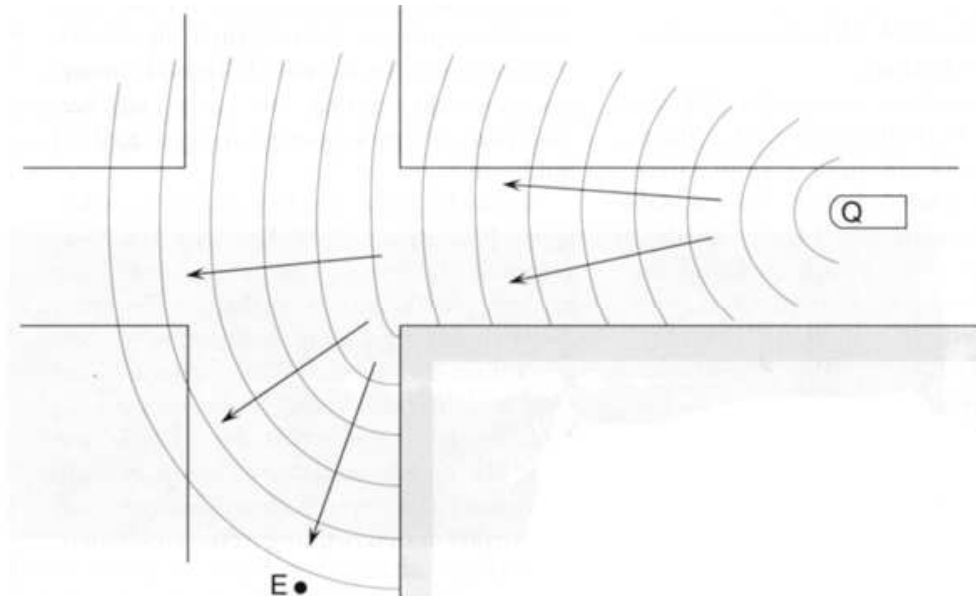
Wasserwellen, die durch einen Spalt hindurchtreten, breiten sich hinter diesem Spalt in allen Richtungen aus.

### **Beispiel 2**

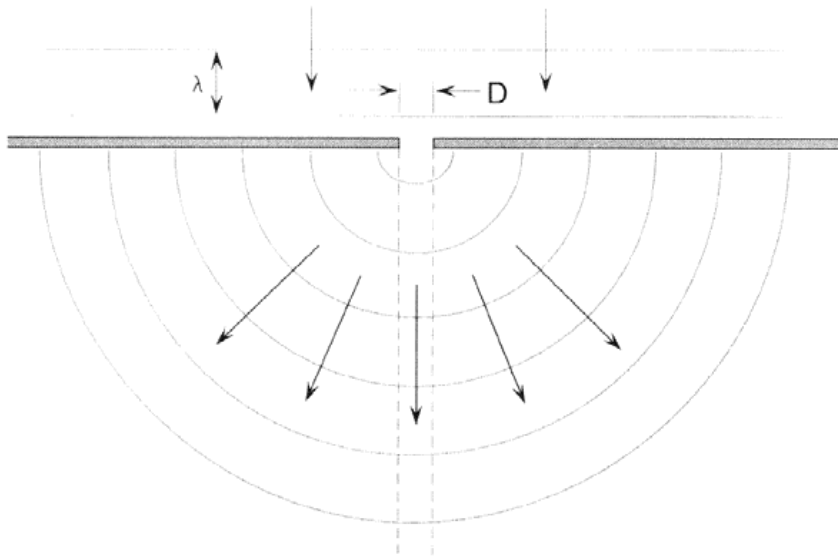
Elektromagnetische Wellen, Radio- und Fernsehempfang mit einer Antenne sind auch möglich, wenn zwischen Sendemast und Empfangsantenne ein Hindernis (z.B. ein Haus) steht. Die Wellen werden hinter einem Haus gebeugt.

Ob Wasser-, Schall-, Materie- oder elektromagnetische Welle: in allen Fällen ist Beugung beobachtbar. In der Schule oder während des Studiums wird am ehesten die Beugung von Licht am Spalt (oder Doppelspalt) und an kleinen Staubkörnern demonstriert; dies ist mit geringem Aufwand möglich.

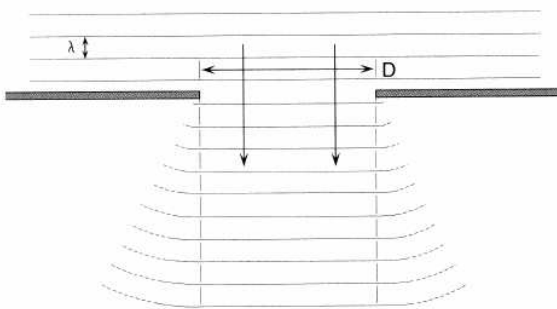
Selbst ohne Wirkung von Reflexion kann die Schallquelle Q um die Ecke herum gehört werden. Die Schallwellen breiten durch den Prozess der Beugung aus.



Wellen breiten sich beim bzw. nach dem Passieren einer engen Öffnung fast gleichmäßig in alle Richtungen aus.



Wenn Wellen an einer Öffnung gebeugt werden, deren Durchmesser  $D$  sehr groß ist im Verhältnis zu ihrer Wellenlänge, bleibt der Wellenausritt hauptsächlich auf einen Strahl in der ursprünglichen Richtung begrenzt.



Beugungsmuster eines Lichtstrahls; wenn keine Strahlbeugung stattfinden würde, müsste eine scharfe Grenze zwischen Licht und Schatten sein.



## Musik im Freien

Bei Musik im Freien sind zahlreiche Faktoren zu beachten. Der **Bau des Pavillons** und die **Struktur des Daches** sind bedeutend für die Schallausbreitung im Freien.

### Abbildungen 1. Folie

1. Seitenansicht durch eine durch eine rückseitig mit akustischer Muschel versehene Bühne; der Zuhörerraum ist links.
2. Schallreflexion an einer konkaven Mauer mit dem Krümmungsmittelpunkt X.
3. Verschiedene mögliche Dachformen für Musikpavillons.

Auch **äußere Einflüsse** sind zu beachten:

- Pegelminderung durch Luftabsorption
- Pegelminderung durch Bewuchs
- Pegelminderung durch meteorologische Einflüsse

### Pegelminderung durch Luftabsorption

**Abbildung 2. Folie:** Durch die starke Luftabsorption im Freien entweichen zahlreiche Schallwellen und die Lautstärke nimmt oft ab. Der Schall erreicht die letzten Reihen nicht mehr so stark.

Bei der Ausbreitung der Schallwellen wird Schallenergie in Wärme umgewandelt (Absorption, Dissipation). Dies führt zu einer Pegelminderung, die von der Temperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Länge des Ausbreitungsweges abhängig ist. Geringere Temperaturen und Luftfeuchtigkeit führen zu größeren Dämpfungen.

### Pegelminderung durch Bewuchs in der Nähe des Pavillons

Die Schallausbreitung im Freien kann von Hindernissen („Schallschirme“), wie z.B. Pflanzen oder Bäume maßgebend beeinflusst werden. Die Schallenergie wird dabei zum Teil absorbiert, zum Teil reflektiert. Hindernisse, die die Schallausbreitung unterbrechen, können je nach Lage und Anordnung, beträchtliche Schallpegelabnahmen bewirken. Der schalltechnische Wirkungsgrad eines Hindernisses ist von mehreren Faktoren abhängig, u. a.

- von den geometrischen Abmessungen (Länge des Hindernisses),
- vom Schalldämmwert des Hindernisses
- von den Absorptionseigenschaften der Hindernisoberfläche

## Einflüsse Meteorologie

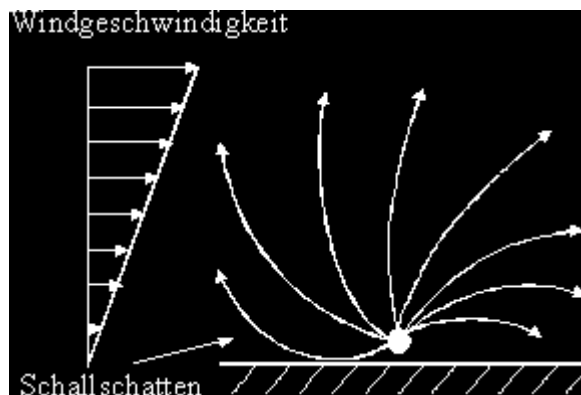
Wind- und Temperatureffekte aber auch Regen können bei der Schallausbreitung die Reichweite des Schalls erheblich beeinflussen. Ein regennasser Pavillon ist förderlich für die Schallausbreitung.

### Wind

Mitwind (Wind in Richtung der Schallausbreitung) führt zu einer „förderlichen“ Schallausbreitung. Gegenwind (Wind entgegengesetzt zur Schallausbreitung) führt hingegen zu einer „hinderlichen“ Schallausbreitung.

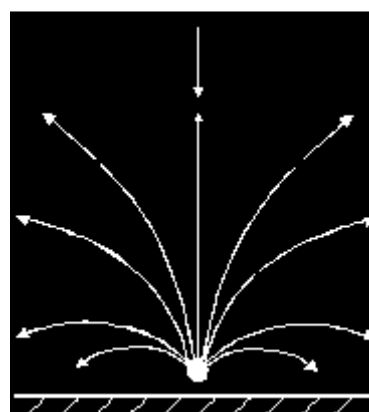
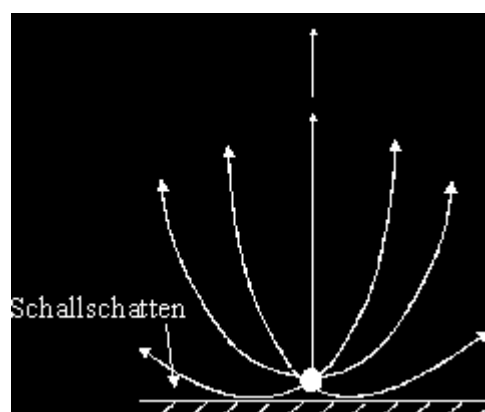
Der Einfluss des Windes wird mit zunehmender Distanz zwischen Quelle und Empfangspunkt grösser.

### Einfluss der Windrichtung und -geschwindigkeit



Durch den Wind wird der Schall abgelenkt

- Einfluss der Temperatur (Brechungseffekte)



## Der Doppler Effekt

Im Jahr 1842 wurde der Doppler Effekt vom österreichischen Physiker und Mathematiker Christian Doppler entdeckt und auch benannt. Ursprünglich wurde der Doppler-Effekt nicht im Schallbereich sondern im optischen Bereich entdeckt. Er wollte die unterschiedlichen Farben der Sterne durch ihre Eigenbewegung erklären. Auch wenn er damit falsch lag – denn die Farben entstehen hauptsächlich durch die unterschiedliche Oberflächentemperatur der Sterne – war seine Berechnung richtig.



Ein Experiment zum Dopplereffekt mit Schallwellen wurde 1845 vom Physiker Christoph Buys-Ballot durchgeführt. Er postierte dazu mehrere Trompeter sowohl auf einem fahrenden Eisenbahnzug als auch neben der Bahnstrecke. Beim Vorbeifahren sollte jeweils einer von ihnen ein G spielen und die anderen die gehörte Tonhöhe bestimmen. Trotz Schwierigkeiten bei der Durchführung – das Geräusch der Lokomotive war sehr laut, die Musiker waren manchmal unaufmerksam – gelang es Buys-Ballot, den Dopplereffekt zu bestätigen.



Armand Hippolyte Fizeau entdeckte den Effekt für Licht im Jahre 1848.



William Huggins wandte den Dopplereffekt auf Sternbewegungen an.





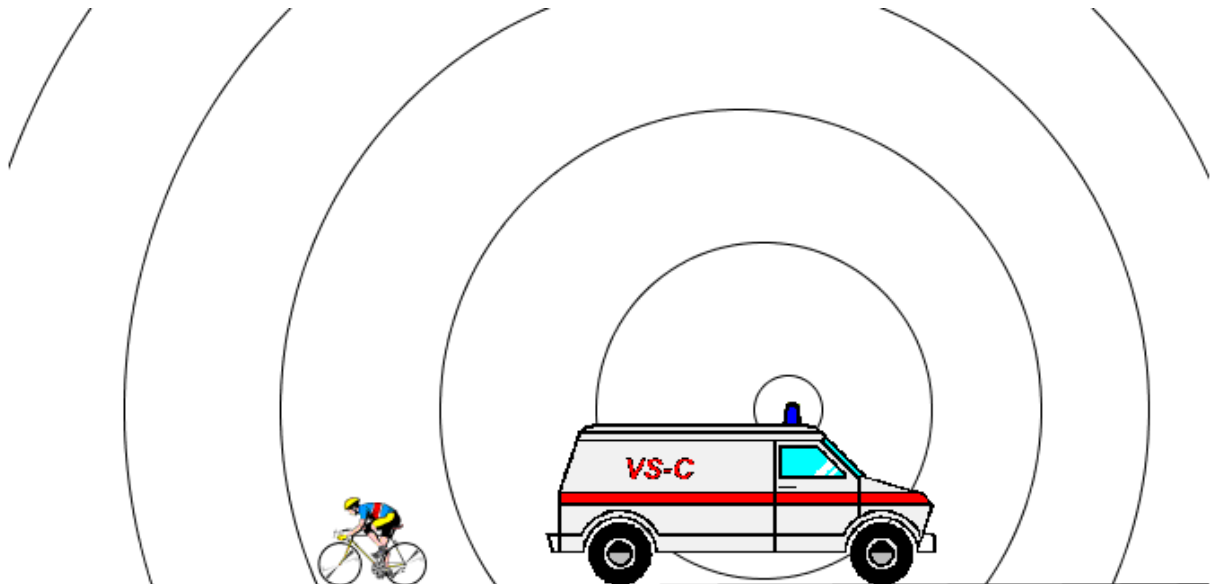
## Was ist der Doppler Effekt wirklich?

Man bezeichnet damit die Veränderung der wahrgenommen oder gemessenen Frequenz von Wellen jeder Art, während sich die Quelle und der Beobachter einander nähern oder voneinander entfernen – sie bewegen sich also relativ zueinander.

Nähern sich also Beobachter und Quelle, so erhöht sich die vom Beobachter wahrgenommen Frequenz, entfernen sie sich jedoch voneinander, verringert sich die Frequenz.

### Beispiel:

Tonhöhenänderung eines Martinshorns eines Rettungswagens und Feuerwehrautos:  
Solange sich das Fahrzeug nähert, ist der wahrgenommene Ton höher als im Stand; wenn es sich entfernt, wird der wahrgenommene Ton tiefer.

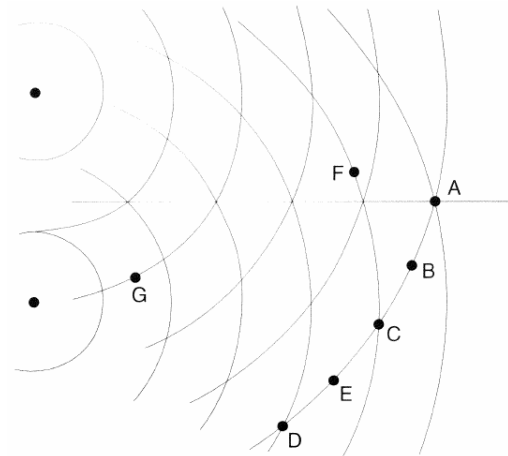


## Hörbeispiel Doppler-Effekt

## Interferenz und Schwingungen:

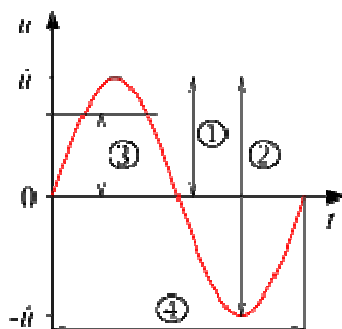
Eine Schwingung ist ein periodischer Vorgang, das heißt sie wiederholt sich regelmäßig. Schwingungen die sich räumlich ausbreiten nennt man Wellen. Überlagern sich zwei Wellen mit gleicher Wellenlänge und gleicher Schwingungsrichtung, so kann es zur Interferenz kommen.

Sie tritt bei allen Arten von Wellen auf, also Schall, Licht, Materiewellen, usw.



Bei diesem Bild sieht man Wellenfronten, die mit der gleichen Frequenz von zwei verschiedenen Punkten ausgesendet werden. Bei Punkt A, C und D geschieht konstruktive Interferenz, das bedeutet die Amplituden verstärken sich. Bei Punkt B und E geschieht destruktive Interferenz – die Wellen löschen sich gegenseitig aus.

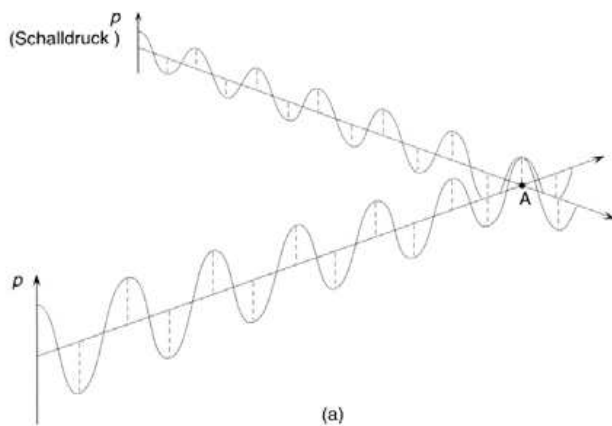
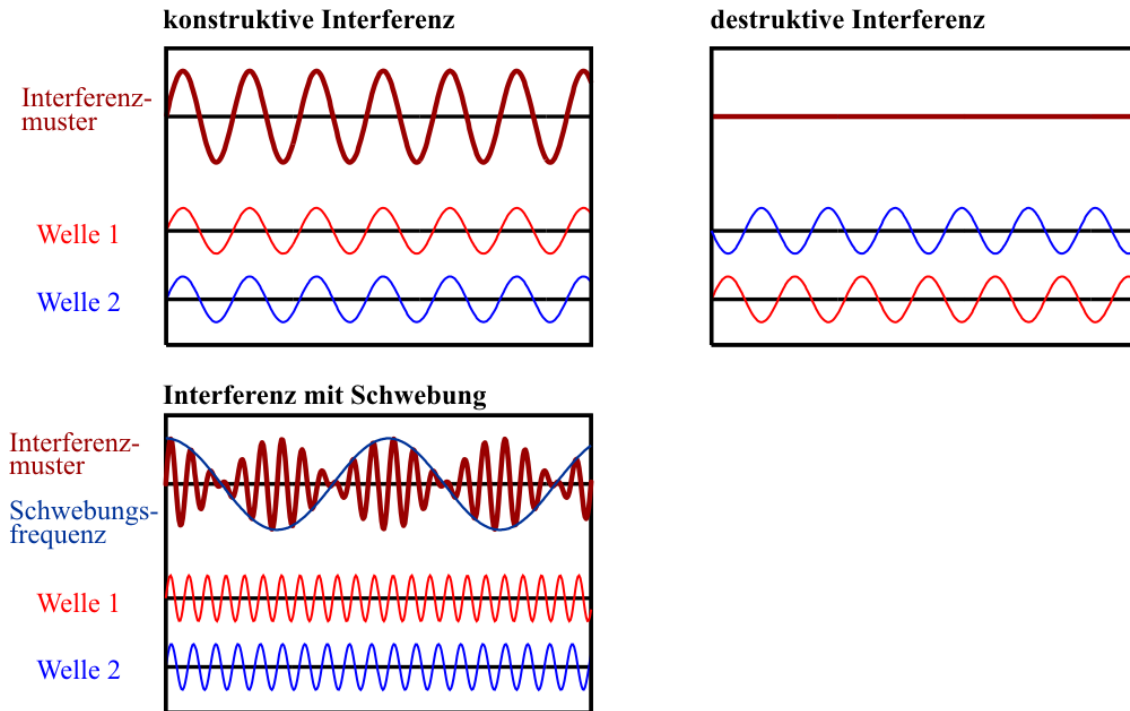
Kurze Erklärung was Amplitude bedeutet: Bei einer Schwingung wird die momentane Entfernung des Punktes auf der Kurve von seiner Ruhelage als Auslenkung bezeichnet. Die größte Auslenkung wird Amplitude genannt. Die Amplitude ist also die maximale Auslenkung einer sinusförmigen Wechselgröße.



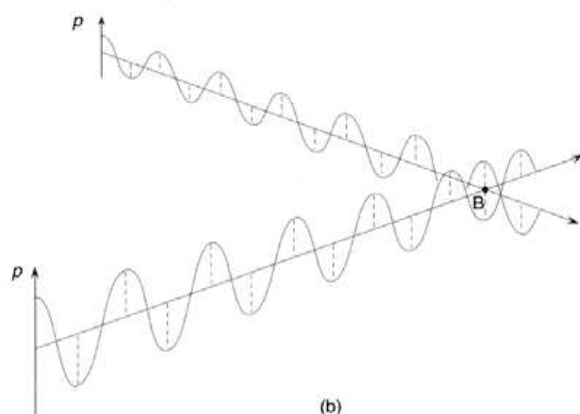
Sinusförmige Wechselspannung:

- 1 = Amplitude,
- 2 = Spitze-Spitze-Wert,
- 3 = Effektivwert,
- 4 = Periodendauer

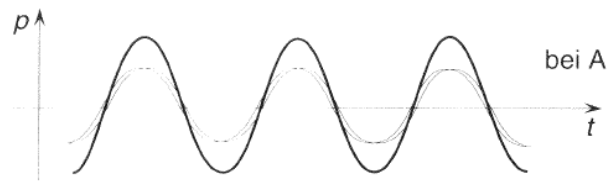
Senden zwei Schallquellen (zB zwei Stimmgabeln) Schallwellen mit beinahe übereinstimmender Frequenz aus, so nimmt man keine getrennten Töne wahr, sondern einen einzigen Ton, dessen Lautstärke regelmäßig kleiner und größer wird. Diese Erscheinung wird als Schwebung bezeichnet und kann durch die Überlagerung der beiden Wellen erklärt werden.



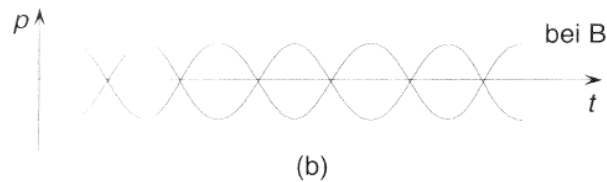
An Punkt A treffen die Wellen in Phase aufeinander und produzieren gemeinsam eine verstärkte Schwingung.



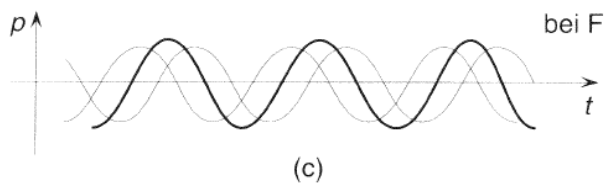
Am Punkt B dagegen ist die Welle vom oberen Lautsprecher aufgrund des um eine halbe Wellenlänge unterschiedlichen Abstands gerade in genau entgegengesetzter Phase.



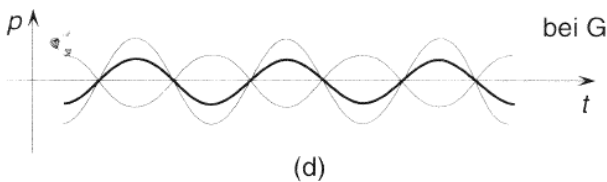
Bei A stimmen beide Wellenbewegungen überein – doppelte Amplitude.



Bei B sind beide Wellen phasenverschoben, das bedeutet die Gesamtstörung ist null.

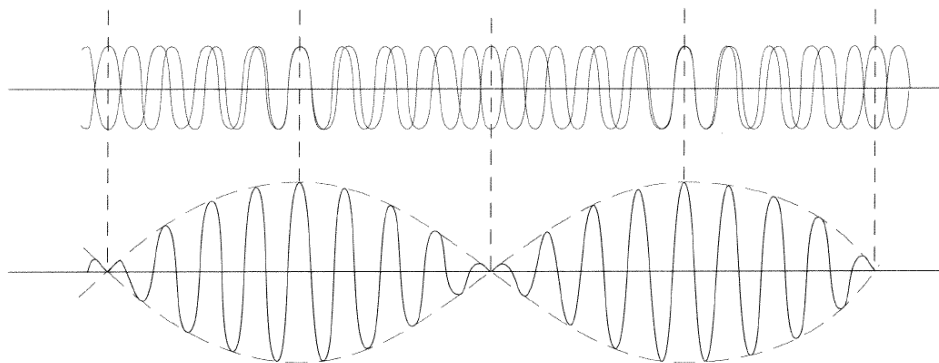


Bei F ist die Welle eine Viertelphase verschoben – die Gesamtstörung ist etwas größer als die Welle alleine.



Bei G passieren die Wellen phasenverschoben, aber mit unterschiedlichen Amplituden. Die destruktive Interferenz ist nicht vollständig (Restschwingung).

Zwei Sinuswellen mit leicht abweichender Frequenz:



Die Schwebung ist manchmal erwünscht, manchmal aber auch nicht. Wir können Töne kleiner als 16 Hz nicht mehr hören. Unterscheiden sich zwei Ausgangsfrequenzen um weniger als 16 Hz, so nehmen wir sie nur mehr als Lautstärkenschwankungen wahr. Das nennen wir dann Schwebung.

Bei Orgeln ist diese Schwebung erwünscht. Hier werden zB einzelne Pfeifen paarweise geringfügig gegeneinander gestimmt. Die Schwebungsfrequenz, also die Frequenz des Differenztones, beträgt dann ca. 5 bis 8 Hz. Der erzeugte Ton dieser Pfeifen vibriert so auf angenehme Weise und wirkt dadurch lebendiger. Durch die Frequenzunterschiede verändert sich auch der Ton. Wird der Frequenzunterschied

kleiner, so entsteht eine Art Gewimmer, wird der Unterschied vergrößert so wird der Ton rauer. Hörbeispiel:

<http://www.dma.ufg.ac.at/app/link/Grundlagen%3AAudio/module/4612?step=5#chapter>

Beim Klavier ist keine Schwebung erwünscht bei Saiten die gleich klingen sollen. Daher verändert der Klavierstimmer die mechanische Spannung einzelner Saiten, bis keine Schwebung mehr auftritt. Dies wird als Schwebungsnull bezeichnet.

Der Schwebungseffekt wird auch von elektrischen Musikinstrumenten ausgenutzt wie zB vom Theremin. Gespielt wird dieses Instrument berührungsfrei durch den Abstand der Hände zu zwei Antennen. Eine Hand verändert die Tonhöhe, die andere die Lautstärke. Das Theremin reagiert auch auf Körperbewegungen von Personen, die sich in der Nähe befinden.



Hörbeispiel:

<http://vids.myspace.com/index.cfm?fuseaction=vids.channel&contributorid=5142055>

Weiters verwendet wird das Prinzip der Schwebung zB im Radio, beim Verkehrsradar, bei Bewegungsmeldern und Metallsuchgeräten.

Verwendete Quellen:

<http://www.nuttree.org/schule/schwingung.html>

[http://de.wikipedia.org/wiki/Interferenz\\_\(Physik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Interferenz_(Physik))

<http://de.wikipedia.org/wiki/Auslenkung>

<http://www.matheplanet.com/matheplanet/nuke/html/article.php?sid=1039>

[http://www.helmholtz-berlin.de/angebote/arbeiten-lernen/info/dualismus/beugung-von-wellen\\_de.html](http://www.helmholtz-berlin.de/angebote/arbeiten-lernen/info/dualismus/beugung-von-wellen_de.html)

<http://vids.myspace.com/index.cfm?fuseaction=vids.channel&contributorid=5142055>

<http://www.dma.ufg.ac.at/app/link/Grundlagen%3AAudio/module/4612?step=5#chapter>

<http://www.jgiesen.de/astro/stars/DopplerEffekt/>

<http://de.wikipedia.org/wiki/Dopplereffekt#Anwendungen>

<http://www.astronews.com/glossar/eintraege/doppler.html>