

Brechung von Schallwellen (Refraktion)

Schallwellen würden sich in der Atmosphäre nur dann geradlinig ausbreiten, wenn die Schallgeschwindigkeit überall gleich wäre und kein Wind herrschte. Da die Schallgeschwindigkeit von der Lufttemperatur abhängt und sich diese wiederum vor allem mit der Höhe stark ändert, kann nicht von einer einheitlichen Schallgeschwindigkeit ausgegangen werden. Auch weht in der Atmosphäre häufig ein Wind, der die Schallwellen zusätzlich verfrachtet. Auch die windbedingte zusätzliche Schallgeschwindigkeit hängt von der Höhe ab, da die Windgeschwindigkeit vom Boden ausgehend mit der Höhe zunimmt.

In einem Medium mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten, breiten sich Wellen nicht mehr geradlinig aus, sondern werden gebrochen, d.h. die Ausbreitung verläuft gekrümmt. Dies geschieht auch mit den Schallwellen in der Atmosphäre.

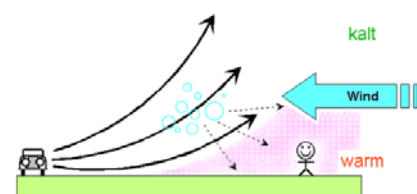
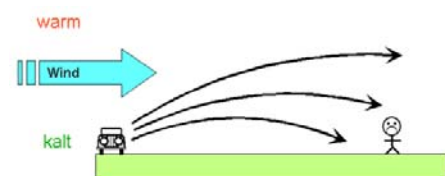
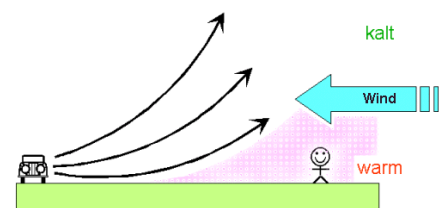
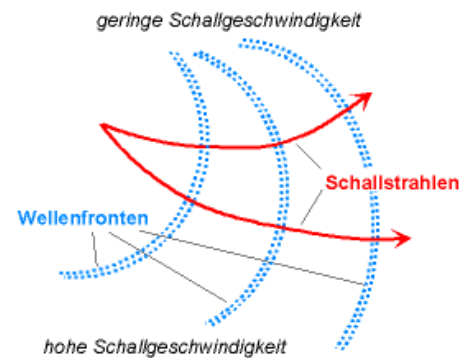
Die Darstellung der Brechung von Schallwellen geschieht in der Regel mit Hilfe von *Schallstrahlen*, die wie Lichtstrahlen, die Richtung der Wellenausbreitung beschreiben.

Nimmt nun die Schallgeschwindigkeit mit der Höhe ab, entweder weil die Temperatur mit der Höhe abnimmt oder im Falle von Schallausbreitung gegen den Wind (*Gegenwindausbreitung*), so werden die Schallstrahlen nach oben gebrochen. Es steht dabei ein *akustischer Schatten*, in den die Schallwellen nicht direkt einfallen können. Lediglich infolge von Beugung oder Streuung kann Schallenergie in die Schattenzone gelangen. Dennoch ist es in der Schattenzone deutlich leiser, als es auf Grund der Entfernung zur Quelle zu erwarten wäre.

Nimmt die Schallgeschwindigkeit dagegen mit der Höhe zu, entweder weil die Temperatur mit der Höhe zunimmt (*Inversion*) oder im Falle von Schallausbreitung in Windrichtung (*Mitwindausbreitung*), so werden die Schallstrahlen nach unten, d.h. in Richtung auf den Boden, gebrochen. Am Boden selbst kann es zu Reflexion kommen. Die reflektierten Schallstrahlen werden erneut nach unten gebrochen. Die Folge sind Mehrfachreflexionen und eine Begünstigung der Schallausbreitung in Bodennähe über weite Entfernungen hinweg.

Streuung von Schallwellen

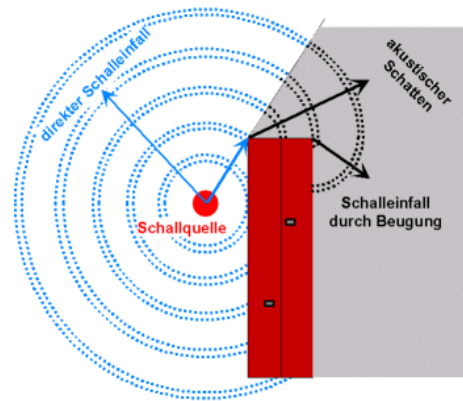
Die Atmosphäre ist in der Nähe des Erdbodens meist turbulent, d.h. der Wind verwirbelt und führt zu zufälligen Druck- und Dichteschwankungen in der Luft. Ist die Größe der turbulenten Wirbel etwa so groß wie die Wellenlänge der Schallwellen, so wird ein Teil der Schallenergie gestreut, d.h. von der eigentlichen Ausbreitungsrichtung abgelenkt. Auch Hindernisse in der Luft, deren Ausdehnung kleiner ist als die jeweilige Wellenlänge führen zur Streuung von Schallwellen, z.B. Zweige und Blätter im Wald.



Beugung von Schallwellen (Diffraktion)

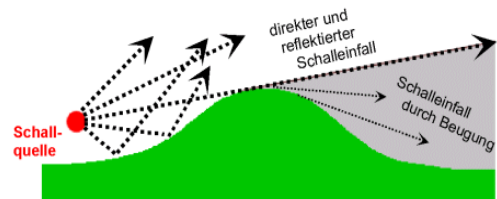
Die *Beugung* von Schallwellen ist ein wichtiger physikalischer Mechanismus, der für den Eintrag von Schallenergie in *akustische Schatten* sorgt, d.h. in Bereiche, die vom direkten Schalleinfall abgeschattet sind, wie etwa hinter Hindernissen. Deswegen kann man zum Beispiel hinter einem Gebäude die vor dem Gebäude verlaufende Straße hören, wenn auch stark gedämpft.

Physikalisch lässt sich die Beugung mit dem Van Huygen'schen Elementarwellenprinzip erklären.



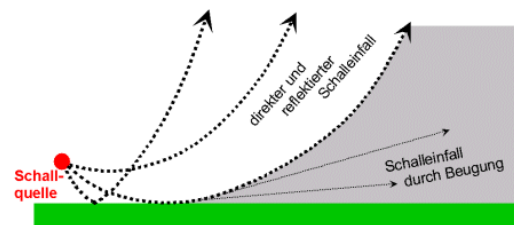
Beugung von Schallwellen hinter einem Gebäude

Beugung findet auch an konvex gekrümmten Geländeoberflächen statt, z.B. an Hangkanten und Hügeln. Des Weiteren wird Schallenergie durch Beugung in die akustischen Schattenzonen geworfen, die durch Aufwärtsbrechung von Schallwellen hervorgerufen werden. Deswegen ist es im akustischen Schatten nicht völlig ruhig.



Beugung in einen akustischen Schatten hinter einem Hügel

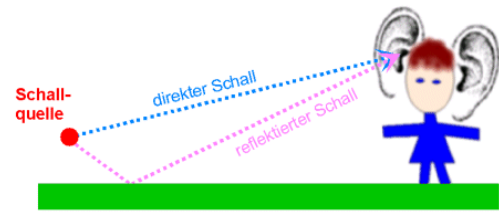
Neben der Beugung führt auch die Streuung von Schallwellen dazu, dass Schallenergie in Schattenzonen einstrahlen kann.



Beugung in einen akustischen Schatten bei Aufwärtsbrechung

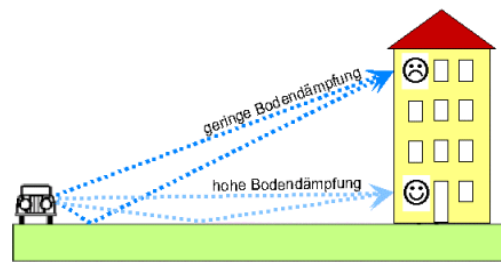
Reflexion von Schallwellen

Treffen Schallwellen, die sich durch die Luft ausbreiten, auf die Oberfläche eines Hindernisses (z.B. Erdboden, Gebäude, Schallschutzschirm), so werden sie dort reflektiert. Grundsätzlich gilt die Regel, dass der Ausfallwinkel eines Schallstrahls gleich dem Einfallwinkel ist. Die direkt an einem Ort einfallenden Schallwellen überlagern sich mit den reflektierten Schallwellen, wobei es im Falle einer kohärenten Schallquelle je nach Laufwegunterschied und Frequenz bzw. Wellenlänge zu einer Verstärkung (*konstruktive Interferenz*) oder Abschwächung (*destruktive Interferenz*) der Schallamplitude kommt. Entscheidend für das Maß der Reflexion sind die Materialeigenschaften des Hindernisses (Dichte, Porosität etc.), die durch die *Impedanz* (Wellenwiderstand) beschrieben werden. Nahezu vollständig wird Schall an Beton oder Wasserflächen reflektiert (*schallhartes Material*), während an der Oberfläche von lockeren Böden oder Schnee nur wenig Schall reflektiert wird (*schallweiches Material*).



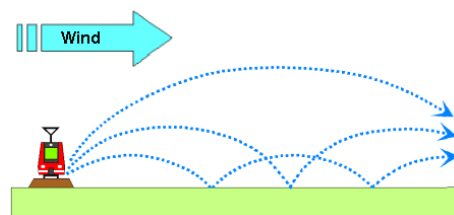
Überlagerung von direktem und reflektiertem Schall

Treffen die Schallwellen in einem sehr flachen Winkel (streifender Schalleinfall) auf einen schallweichen Boden (z.B. Gras), so dringen sie teilweise in den Boden ein und gelangen phasenverschoben wieder an die Luft. Bei der Überlagerung mit dem direkten Schall führt dies trotz nahezu gleichem Laufweg zu einer Amplitudenschwächung (*Bodendämpfungseffekt*). Aus diesem Grund hört man in den oberen Stockwerken eines Hauses die Geräusche einer Straße wesentlich lauter als in den unteren Etagen. Liegt zwischen der Schallquelle und dem Empfänger ein schallharter Boden (Beton, Pflastersteine) so ist keine Bodendämpfung zu erwarten.



Hohe Bodendämpfung bei flachem Schalleinfall

Über konkaven Geländeoberflächen (Talsole, Mulde) kann es zu Mehrfachreflexionen und entsprechender Schallverstärkung kommen, da die Bodendämpfung durch eine Energiebündelung (*Fokussierung*) kompensiert werden kann. Ein ähnlicher Effekt stellt sich bei Abwärtsbrechung über ebenem Boden ein.



Mehrfachreflexion bei Abwärtsbrechung (Mitwindausbreitung)