



Physik für Infotronik (15)

Gerald Kupris


03.12.2012

Schwingungen

Teil 2: Schwingungen und Wellen

14 Schwingungen

15 Ausbreitung von Wellen

 16 Überlagerung und stehende Wellen

Teil 3: Thermodynamik

17 Temperatur und die kinetische Gastheorie

18 Wärme und der Erste Hauptsatz der Thermodynamik

19 Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik

20 Thermische Eigenschaften und Vorgänge

Zusammenfassung Wellen

Wenn man das Ende einer gespannten Saite periodisch auf- und ab bewegt, dann erzeugt man auf der Saite eine periodische Welle.

Wenn sich eine harmonische Welle durch das Medium ausbreitet, dann führt jeder Punkt des Mediums harmonische Schwingungen aus.

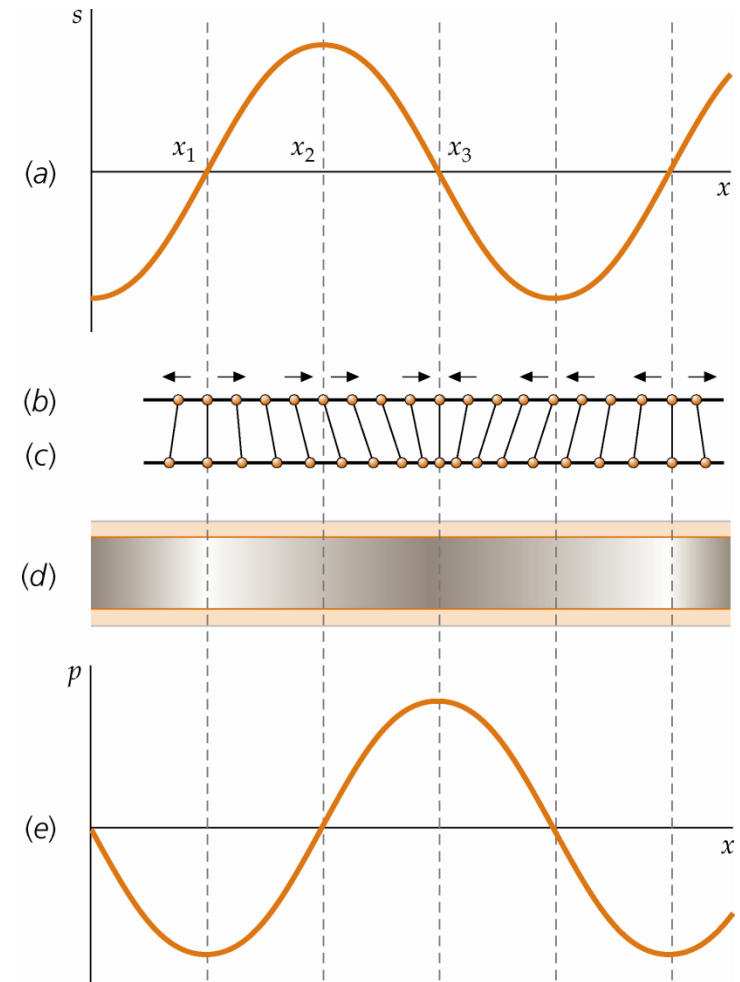
$$f = \frac{1}{T} \quad f = \text{Frequenz}$$

$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$$

Wellenlänge: $\lambda = \frac{v}{f}$

Wiederholung: Schallwelle

- a) Auslenkung der Luftmoleküle aus der Gleichgewichtslage als Funktion der Ortskoordinate zu einem festen Zeitpunkt
- b) einige Moleküle an ihren Gleichgewichtslagen vor dem Eintreffen der Schallwelle
- c) die Position der Moleküle, nachdem die Schallwelle eingetroffen ist
- d) die Dichte hat ein Minimum, wenn sich die Moleküle von diesem Ort entfernen
- e) die Druckänderung ist proportional zur Dichteänderung.



Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit (c oder v_0) ist die Geschwindigkeit, mit der sich Schall-Wellen in einem beliebigen Medium ausbreiten. Die Einheit ist (m/s).

Die Schallgeschwindigkeit wird in der Regel mit $c = 343$ m/s (1234,8 km/h) für 20 °C **in Luft** (1013 hPa) angegeben.

Für die Schallgeschwindigkeit gilt die Formel: $v_0 = \lambda \cdot f$

wobei λ (lambda) die Wellenlänge und f die Frequenz der Schallwelle ist. Die Schallgeschwindigkeit kann somit errechnet werden, wenn die Werte für λ und f gemessen wurden. Ein Ändern der Frequenz eines Tons verursacht keine Änderung der Schallgeschwindigkeit, sondern eine Veränderung der Wellenlänge.

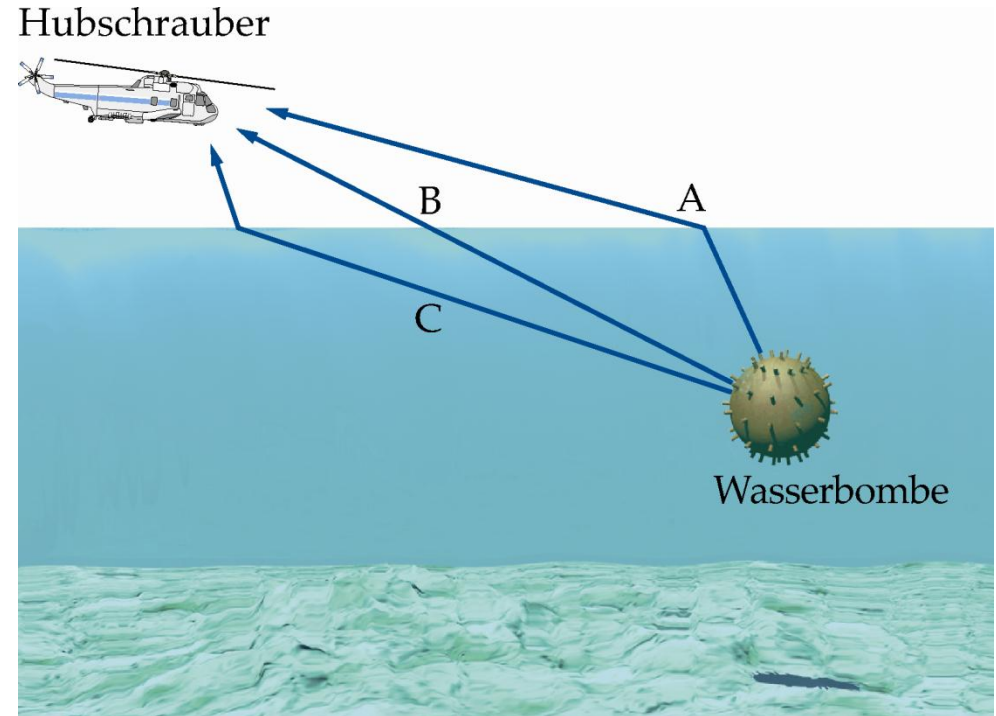
Die Schallgeschwindigkeit wird bei gleichbleibenden physikalischen Eigenschaften des Mediums als konstant angesehen.

Schallgeschwindigkeit in Wasser: 1484 m/s

Berechnung der Wellenlängen des hörbaren Schalls in Luft und in Wasser

Beispiele zur Schallgeschwindigkeit

Die Explosion einer Wasserbombe wird von einem Hubschrauber über der Wasseroberfläche beobachtet. Entlang welchen Wegs benötigt der Schall die geringste Zeit bis zum Hubschrauber?



Berechnen Sie eine allgemeine Regel zur Abschätzung der Entfernung von Gewittern, indem der zeitliche Abstand zwischen dem Eintreffen des Blitzes und des Donners an Ihrem Standort gemessen wird (Lichtgeschwindigkeit ca $3 \cdot 10^8$ m/s).

Der Doppler-Effekt (Dopplereffekt)

Als Doppler-Effekt bezeichnet man die Veränderung der wahrgenommenen oder gemessenen Frequenz von Wellen jeder Art, während sich die Quelle und der Beobachter einander nähern oder voneinander entfernen, sich also relativ zueinander bewegen. Der Effekt wurde nach dem österreichischen Physiker und Mathematiker **Christian Doppler** benannt, der ihn 1842 voraussagte.

Nähern sich Beobachter und Quelle einander, so erhöht sich die vom Beobachter wahrgenommene Frequenz, entfernen sie sich von einander, verringert sich die Frequenz. Bekanntes Beispiel ist die Tonhöhenänderung des Martinshorns eines Rettungswagens. Solange sich das Fahrzeug nähert, ist der wahrgenommene Ton höher als im Stand; wenn es sich entfernt, ist er tiefer.

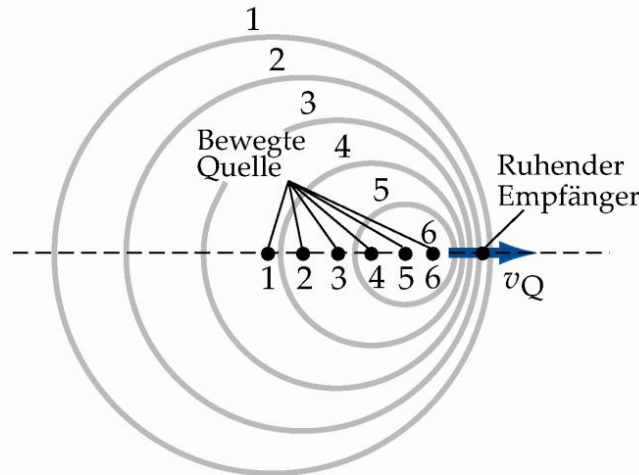
Bei der Erklärung des akustischen Doppler-Effekts ist zu unterscheiden, ob sich die Schallquelle, der Beobachter, oder beide relativ zum Medium (der ruhenden Luft) bewegen.

Doppler-Effekt

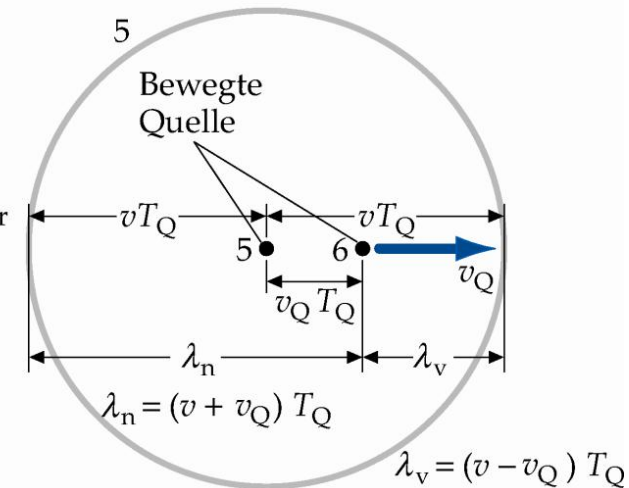
(a)



(b)



(c)



v_Q = Geschwindigkeit der Quelle
 v_E = Geschwindigkeit des Empfängers
 v = Geschwindigkeit der Welle
 f_Q = gesendete Frequenz
 f_E = empfangene Frequenz
 T_Q = Schwingungsdauer der Quelle
 λ_n = Wellenlänge nach der Quelle
 λ_v = Wellenlänge vor der Quelle

$$\lambda_{n,v} = (v \pm v_Q) \cdot T_Q = \frac{v \pm v_Q}{f_Q}$$

$$f_E = \frac{v \pm v_E}{v \pm v_Q} f_Q$$

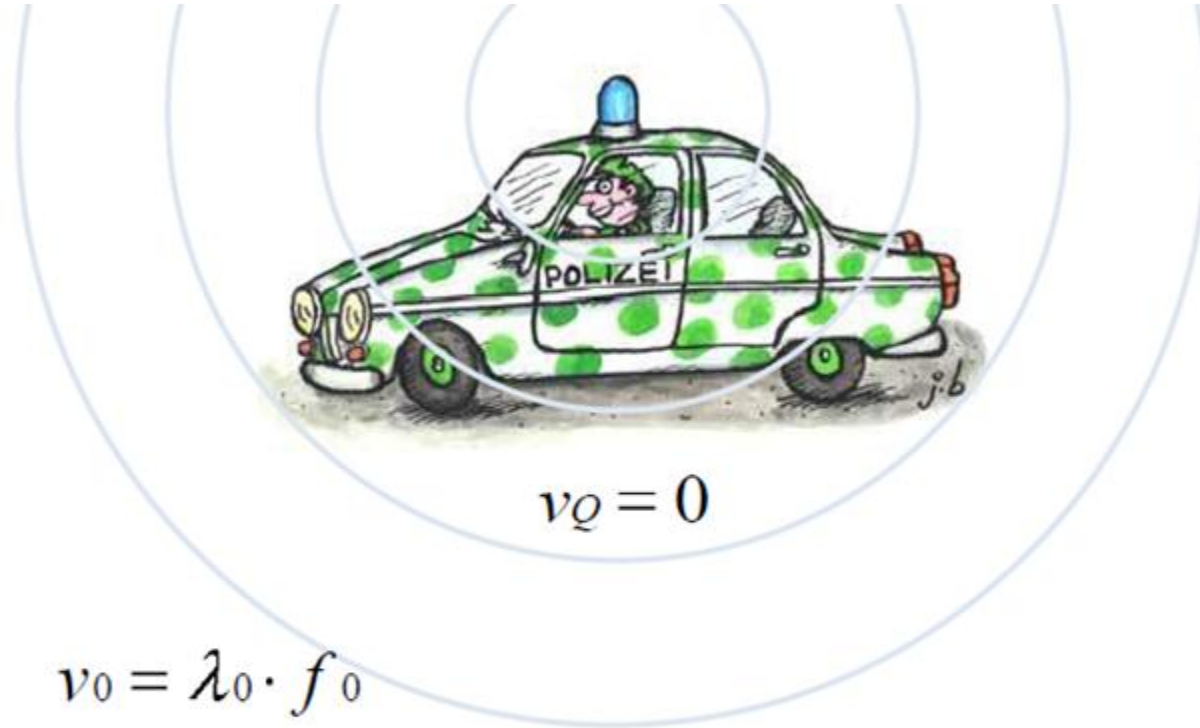
Empfänger in Ruhe, Quelle in Ruhe



$$v_E = 0$$

Effektive Schallgeschwindigkeit, die vom Empfänger gemessen wird:

Resultierende Frequenz, die von dem Empfänger gemessen wird:



$$v_Q = 0$$

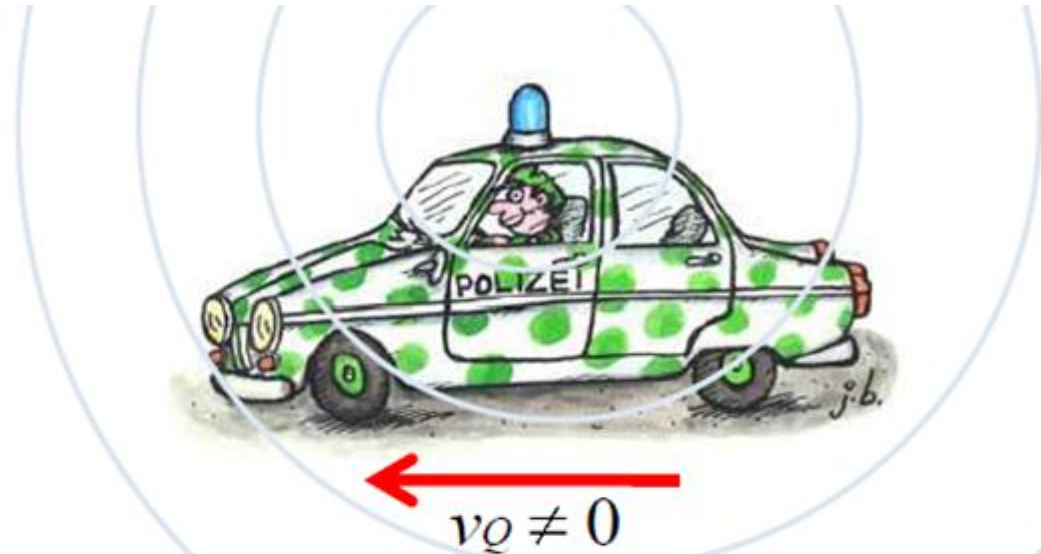
$$v_0 = \lambda_0 \cdot f_0$$

$$f_E = f_Q$$

Quelle bewegt sich auf den Empfänger zu



$$v_E = 0$$



Effektive Wellenlänge, die von der Quelle in Richtung Empfänger abgestrahlt wird (Wellenlänge wird kleiner):

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_0 - \Delta\lambda = \lambda_0 - T_0 \cdot v_Q = \lambda_0 - \frac{v_Q}{f_0}$$

Resultierende Frequenz, die von dem Empfänger gemessen wird:

$$f_E = \frac{v_0}{\lambda_{\text{eff}}} = \frac{v_0}{\lambda_0 - \frac{v_Q}{f_0}} = f_Q \frac{1}{1 - \frac{v_Q}{v_0}} = f_Q \frac{v_0}{v_0 - v_Q}$$

Quelle bewegt sich von dem Empfänger weg



$$v_E = 0$$



$$v_Q \neq 0$$

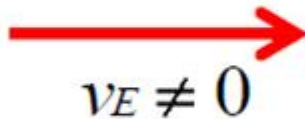
Effektive Wellenlänge, die von der Quelle in Richtung Empfänger abgestrahlt wird (Wellenlänge wird größer):

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_0 + \Delta\lambda = \lambda_0 + T_0 \cdot v_Q = \lambda_0 + \frac{v_Q}{f_0}$$

Resultierende Frequenz, die von dem Empfänger gemessen wird:

$$f_E = \frac{v_0}{\lambda_{\text{eff}}} = \frac{v_0}{\lambda_0 + \frac{v_Q}{f_0}} = f_Q \frac{1}{1 + \frac{v_Q}{v_0}} = f_Q \frac{v_0}{v_0 + v_Q}$$

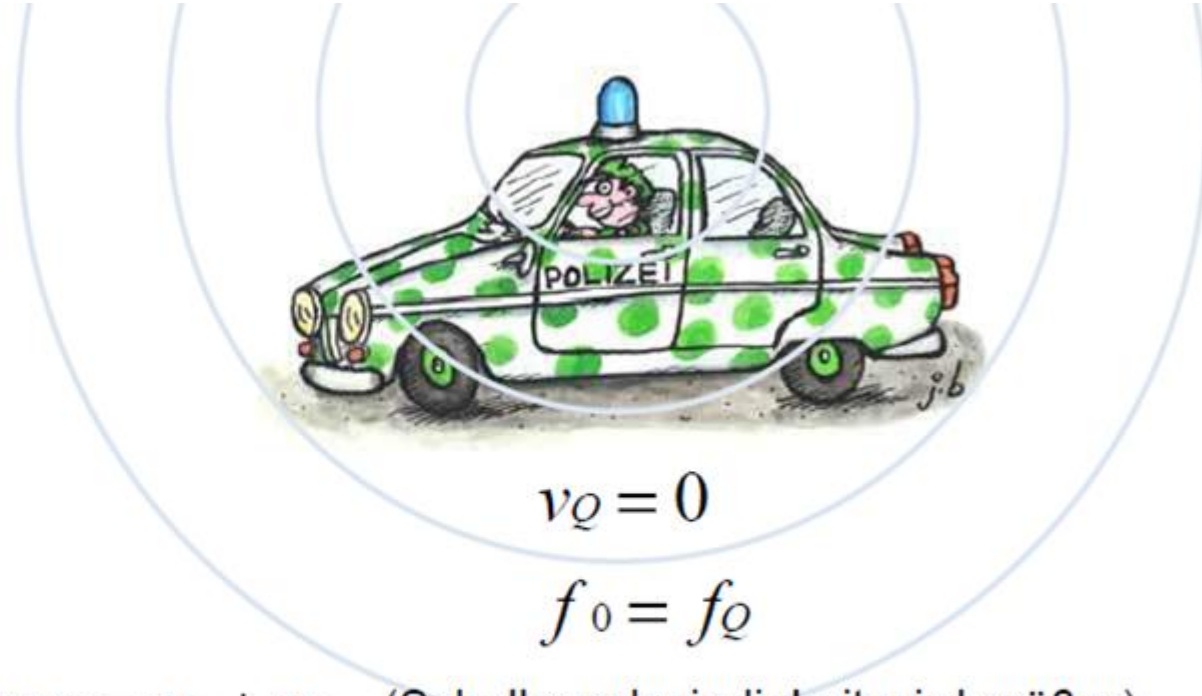
Empfänger bewegt sich auf die Quelle zu



$$v_E \neq 0$$

Effektive Schallgeschwindigkeit, die vom Empfänger gemessen wird:

Resultierende Frequenz, die von dem Empfänger gemessen wird:



$$v_Q = 0$$

$$f_0 = f_Q$$

$$v_{eff} = v_0 + v_E \quad (\text{Schallgeschwindigkeit wird größer})$$

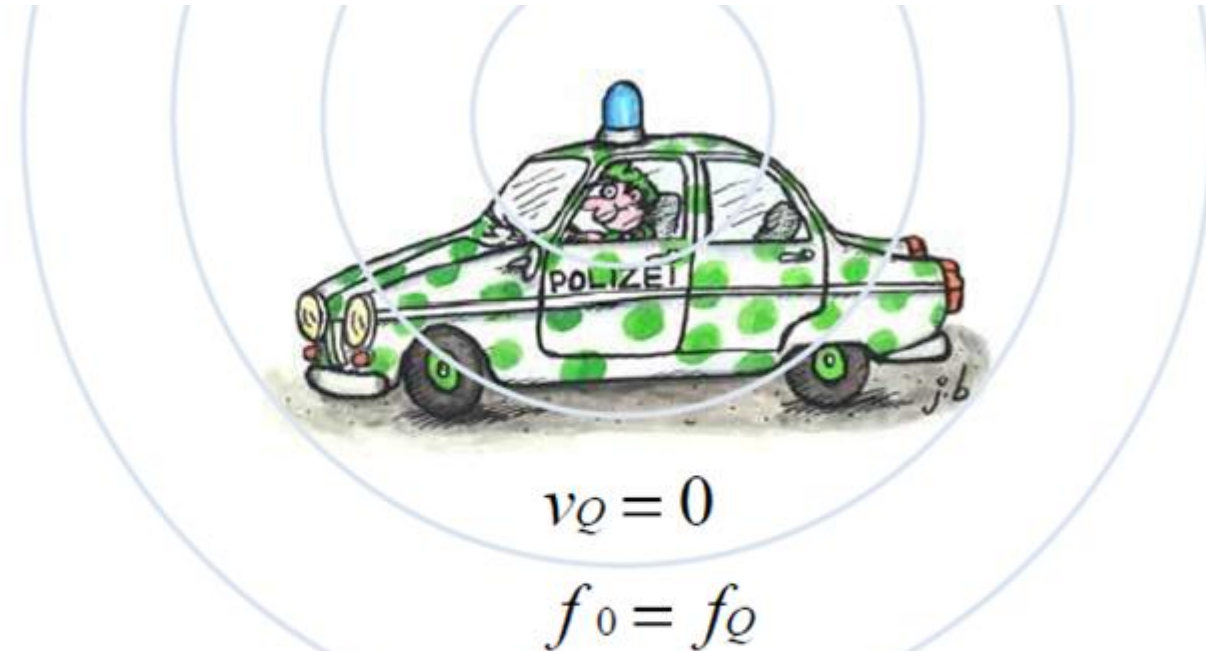
$$f_E = \frac{v_{eff}}{\lambda_0} = \frac{v_0 + v_E}{\lambda_0} = f_Q \frac{v_0 + v_E}{v_0} = f_Q \left(1 + \frac{v_E}{v_0}\right)$$

Empfänger bewegt sich von der Quelle weg



Effektive Schallgeschwindigkeit, die vom Empfänger gemessen wird:

Resultierende Frequenz, die von dem Empfänger gemessen wird:



$$v_{eff} = v_0 - v_E \quad (\text{Schallgeschwindigkeit wird kleiner})$$

$$f_E = \frac{v_{eff}}{\lambda_0} = \frac{v_0 - v_E}{\lambda_0} = f_Q \frac{v_0 - v_E}{v_0} = f_Q \left(1 - \frac{v_E}{v_0}\right)$$

Zusammenfassung der Formeln

$$f_E = f_Q \frac{(1 \pm \frac{v_E}{v_0})}{(1 \pm \frac{v_Q}{v_0})} = f_Q \frac{v_0 \pm v_E}{v_0 \pm v_Q}$$

v_Q = Geschwindigkeit der Quelle

v_E = Geschwindigkeit des Empfängers

v_0 = Geschwindigkeit der Welle im Medium

f_Q = gesendete Frequenz

f_E = empfangene Frequenz

Mit $v_E = 0$ oder $v_Q = 0$ ergeben sich die oben genannten Spezialfälle. Weiter sieht man, dass sich der Effekt aufhebt (es also keine Tonhöhenänderung gibt), wenn $v_Q = -v_E$. Dies entspricht dem Fall, wenn sich Sender und Empfänger beide in dieselbe Richtung mit derselben Geschwindigkeit relativ zum Medium bewegen.

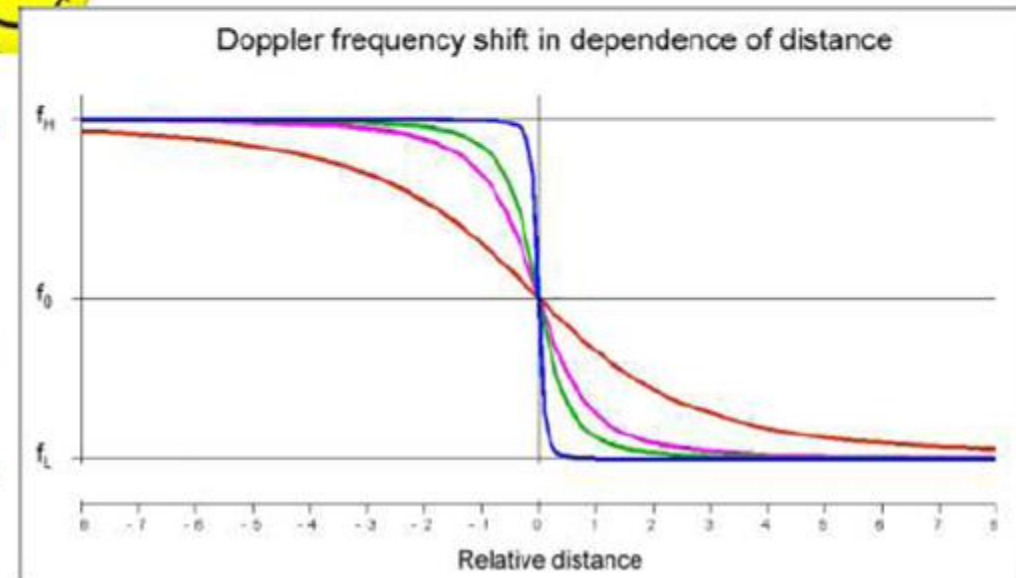
Üblicherweise tritt so ein Fall auf, wenn sich das Medium selbst bewegt, während Sender und Empfänger ruhen (Wind).

Deswegen kommt es unabhängig von der Windstärke zu keinem Dopplereffekt.

Verschiedene Entfernungen von der Quelle



In realen Fällen fährt der Polizeiwagen in einem bestimmten Mindestabstand an dem Beobachter vorbei. Das hat zur Folge, dass sich der Abstand zwischen Quelle und Beobachter nicht gleichmäßig ändert, und deswegen - besonders unmittelbar vor und nach dem Vorbeifahren - ein kontinuierlicher Übergang der Tonhöhe von höher zu tiefer zu hören ist.



Beispiele Doppler-Effekt

Autohupe:

Bei einem Auto beträgt die Frequenz der Autohupe 400 Hz. Das Auto soll mit einer Geschwindigkeit von $v_q = 122 \text{ km/h}$ durch die ruhende Luft hin zu einem ruhenden Empfänger fahren und dauerhupen. Die Schallgeschwindigkeit beträgt 343 m/s.

Bestimmen Sie: a) die Wellenlänge des Schalls, die den Empfänger erreicht,
b) die empfangene Frequenz.

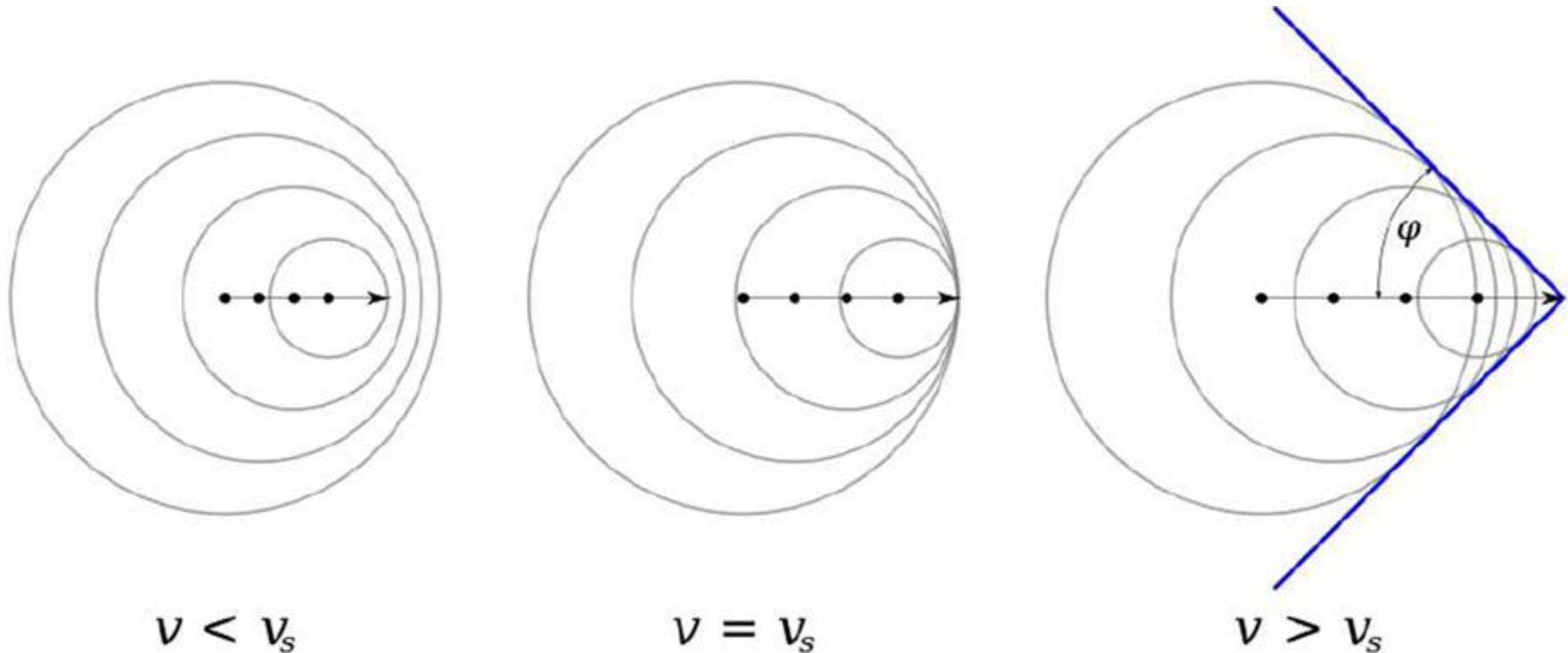
Das Auto fährt an dem Empfänger vorbei und entfernt sich nun mit einer Geschwindigkeit von $v_q = 122 \text{ km/h}$. Die Schallgeschwindigkeit beträgt immer noch 343 m/s.

Bestimmen Sie: c) die Wellenlänge des Schalls, die den Empfänger erreicht,
d) die empfangene Frequenz.

In einem ähnlichen Fall steht das Auto und hupt, während sich der Empfänger mit einer Geschwindigkeit von $v_q = 122 \text{ km/h}$ auf das Auto zu bewegt.

Bestimmen Sie: e) die Wellenlänge des Schalls, die den Empfänger erreicht,
f) die empfangene Frequenz.

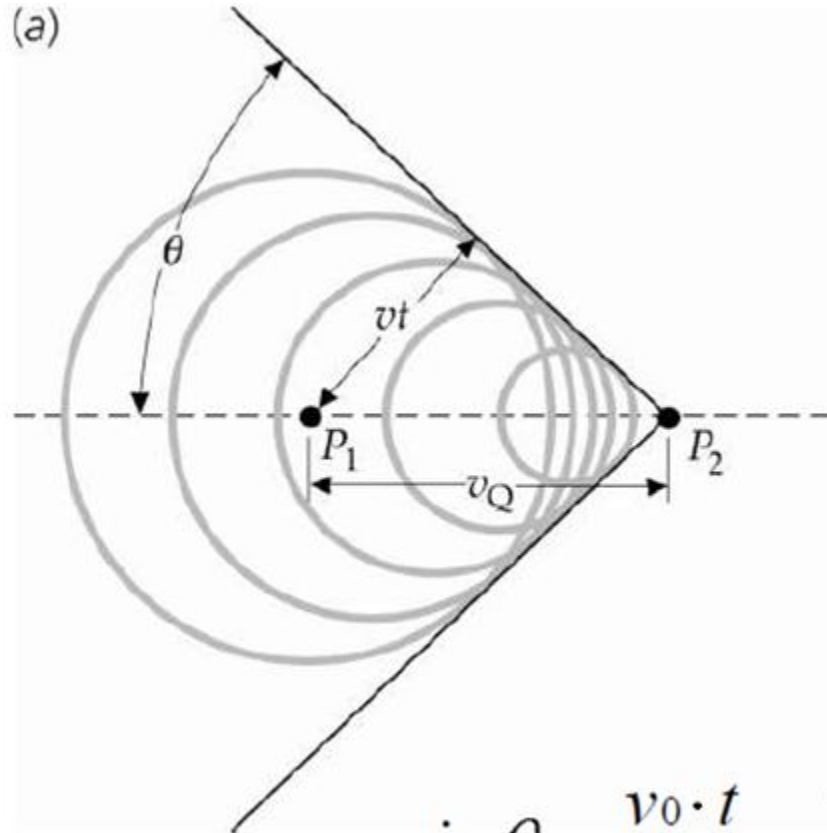
Machscher Kegel



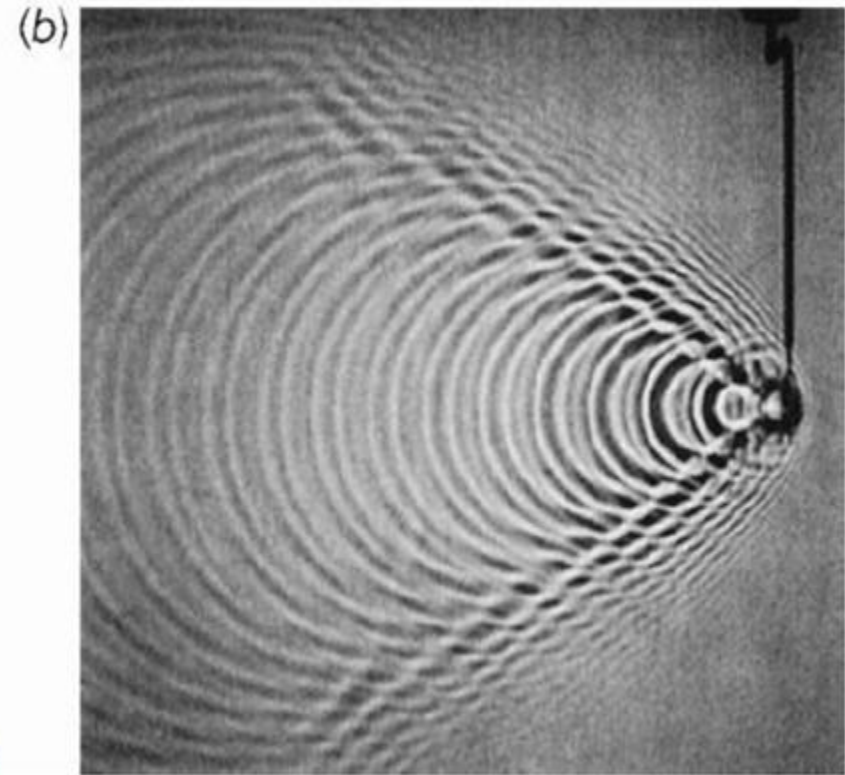
Wenn sich die Quelle schneller bewegt als die Wellengeschwindigkeit, ($v_Q = v > v_s$) dann bildet sich eine Stoßwelle (Verdichtungsstoß, blau dargestellt).

$v_s = v_0 =$ Schallgeschwindigkeit.

Mach-Winkel = Kegelöffnungswinkel



$$\sin \theta = \frac{v_0 \cdot t}{v_Q \cdot t} = \frac{v_0}{v_Q}$$



Durchstoßen der Schallmauer

Beim Erreichen der Schallgeschwindigkeit ist $c = v$ und folglich wird der Kegelöffnungswinkel und damit also der Kegel zu einer Stoßfront aufgeweitet.

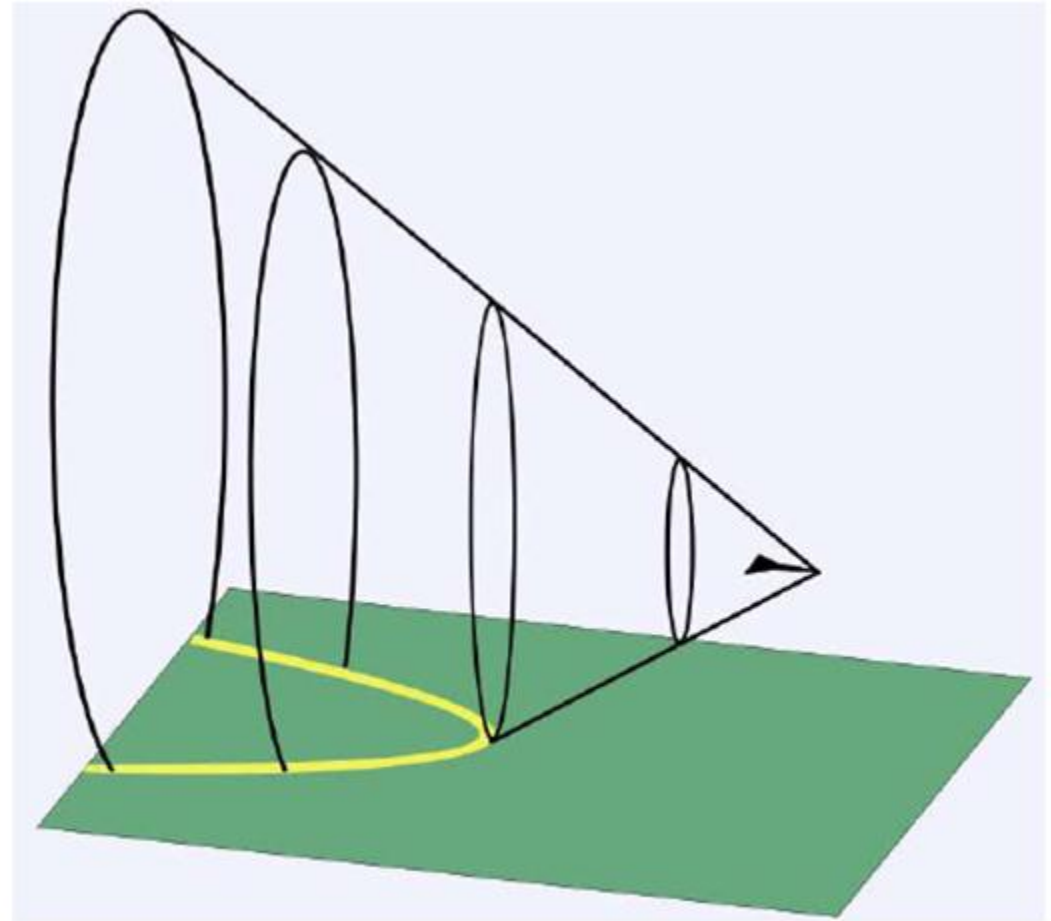
Die Kompressionsenergie aus der Flugbewegung kann als Schallwelle nicht mehr nach vorne entfliehen, da das Flugzeug so schnell fliegt wie die Schallgeschwindigkeit und nach hinten sich ausbreiten, weil das Flugzeug neue Energie nachliefert, die Energie wird in diesem Moment kumuliert und es kommt deswegen beim Überschreiten der Schallgeschwindigkeit zum Überschallknall.



Überschallknall

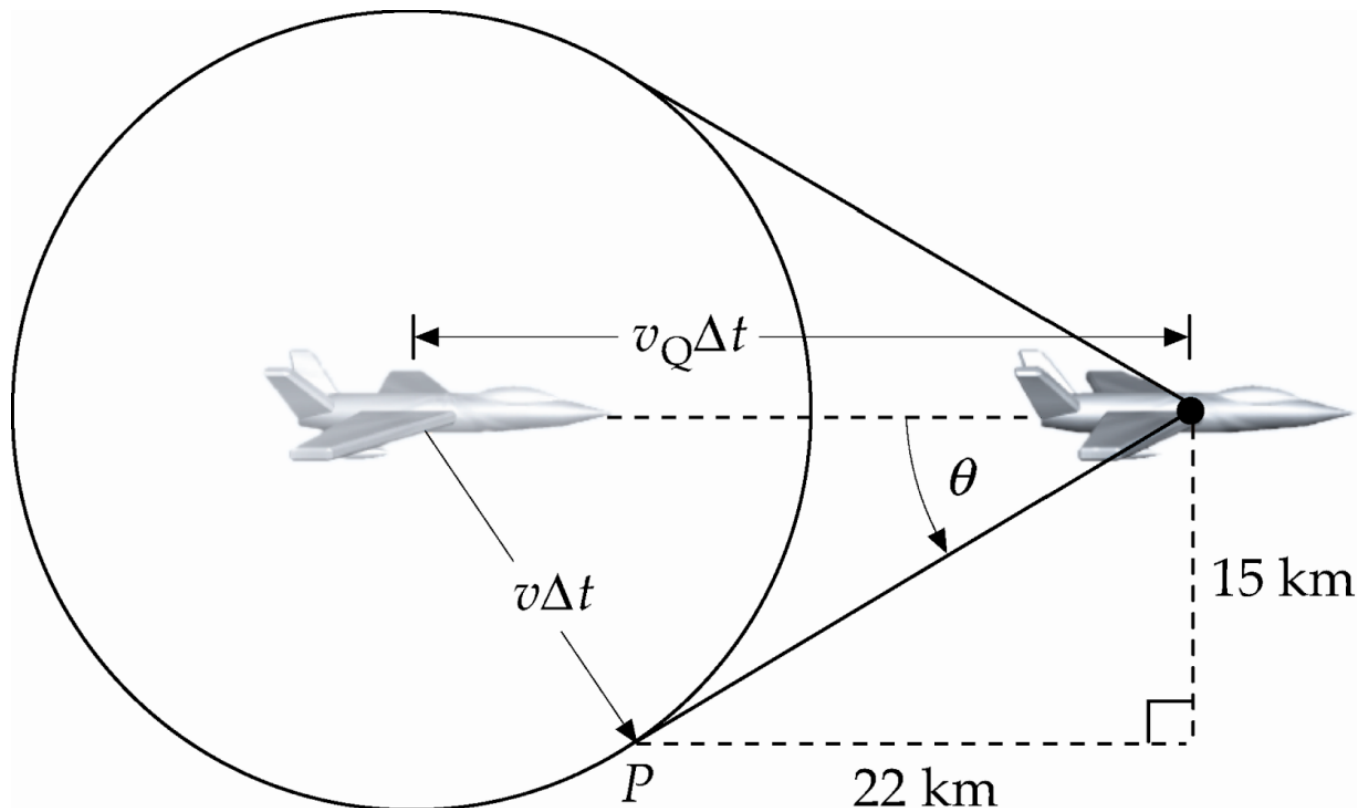
Der Überschallknall ist die hörbare Auswirkung der Stoßwelle (Verdichtungsstoß), welche auftritt, wenn sich ein Flugzeug mit Überschallgeschwindigkeit bewegt.

Die untere Mantellinie des Kegels bestimmt den Zeitpunkt, wann der Knall den Empfänger erreicht und dieser ihn hört, noch vor der Wahrnehmung z.B. der Motorengeräusche. Während dessen bewegt sich der Kegel allerdings fort, weshalb ein weiterer Empfänger in einiger Entfernung ebenfalls von ihm erreicht wird und einen weiteren Knall hört. Der Knall wird „nachgeschleppt“.

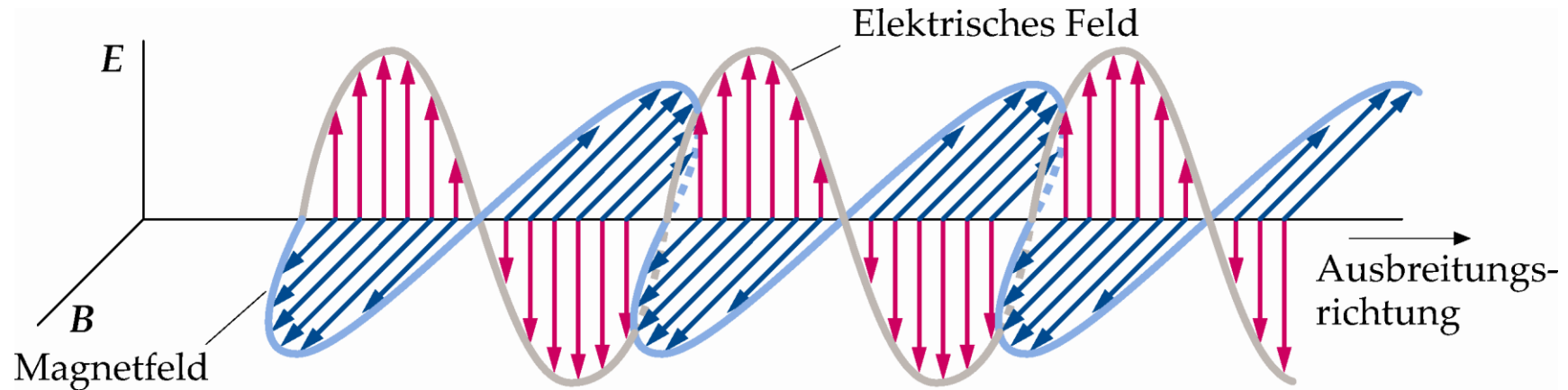


Beispiel Überschallknall

Ein Überschallflugzeug fliegt genau nach Osten und überfliegt den Punkt P in 15 km Höhe. Man hört im Punkt P einen Überschallknall, wenn sich das Flugzeug 22 km östlich von P befindet. Wie schnell fliegt das Überschallflugzeug?



Elektromagnetische Wellen



Elektrischer und magnetischer Feldvektor einer elektromagnetischen Welle. Die Felder sind in Phase, sie stehen senkrecht aufeinander und auf der Ausbreitungsrichtung der Welle.

Die Ausbreitungsrichtung einer elektromagnetischen Welle ist stets gleich der Richtung des Vektorprodukts $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$.

Die Wellenlänge elektromagnetischer Wellen

Als Wellenlänge, Symbol λ (griechisch: Lambda), wird der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase einer Welle bezeichnet. Dabei haben zwei Punkte die gleiche Phase, wenn sie sich in gleicher Weise begegnen, d. h. wenn sie im zeitlichen Ablauf die gleiche Auslenkung (Amplitude) und die gleiche Bewegungsrichtung haben.

Es gilt:

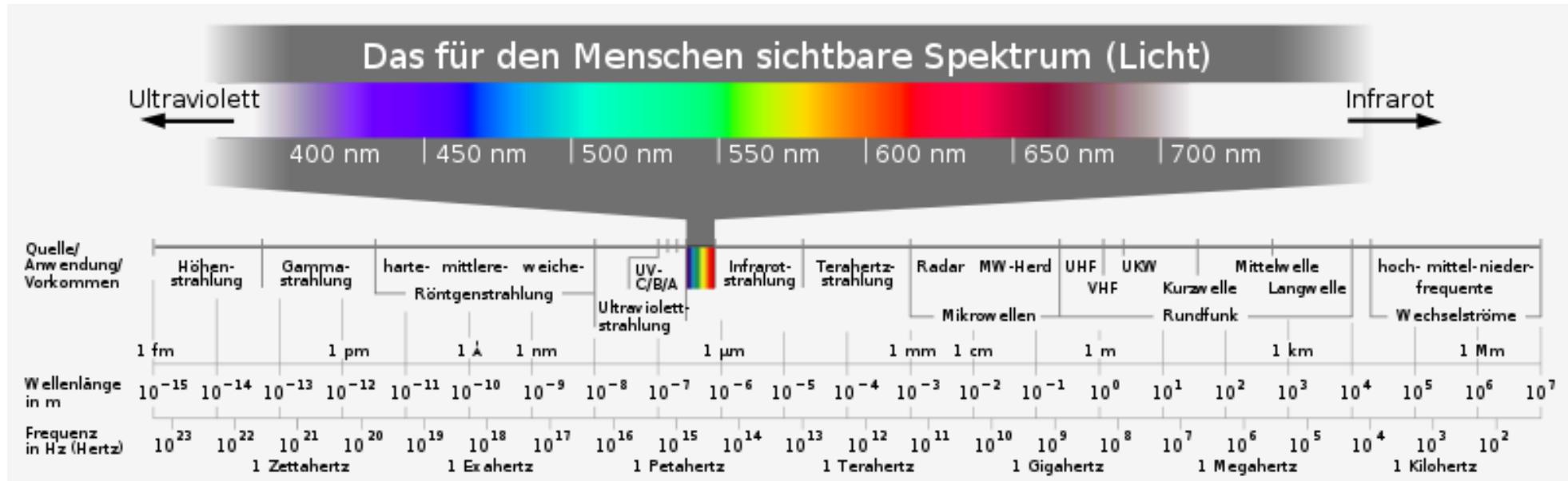
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad f = c/\lambda$$

wobei c die Ausbreitungsgeschwindigkeit (etwa $3 \cdot 10^8$ m/s im Vakuum) oder die Phasengeschwindigkeit und f die Frequenz der Welle ist.

Für die Wellenlänge in einem Medium gilt:

$$\lambda' = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} = \frac{c}{f} \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

Elektromagnetisches Spektrum



Als Elektromagnetisches Spektrum oder elektromagnetisches Wellenspektrum bezeichnet man die Gesamtheit aller elektromagnetischen Wellen, wenn an ihre Unterteilung in Bereiche wie etwa Licht, Radiowellen usw. gedacht ist.

Die Frequenzen liegen dabei meist um Größenordnungen auseinander.

Rundfunk-Frequenzen

Verfahren	Frequenzen	Wellenlängen
Langwellen:	30 kHz bis 300 kHz	1000 m bis 10.000 m
Langwellenrundfunk:	148,50 kHz bis 283,50 kHz	1058 m bis 2020 m
Amateurfunk:	135,70 kHz bis 137,80 kHz	2198 m Band
Mittelwellen:	300 kHz bis 3000 kHz	100 m bis 1000 m
Mittelwellenrundfunk:	526,5 kHz bis 1606,5 kHz	187 m bis 570 m
Kurzwellen:	3 MHz bis 30 MHz	10 m bis 100 m
Kurzwellenrundfunk:	3,2 MHz bis 26,1 MHz	11m bis 90m
CB-Funk:	26,565 MHz bis 27,405 MHz	11,1 m Band
Ultrakurzwellen:	30 MHz bis 300 MHz	10 m bis 1 m
UKW-Rundfunk:	87,5 MHz bis 108 MHz	2,78 m bis 3,43 m
Behördenfunk:	76,155 MHz bis 85,955 MHz	3,49 m bis
Amateurfunk:	144 MHz bis 148 MHz	2 m Band
Betriebsfunk:	146 MHz bis 174 MHz	1,72 m bis 2,05 m
Betriebsfunk:	440,00 MHz bis 470,00 MHz	0,64 m bis 0,68 m

Doppler-Effekt bei Licht

Licht braucht - im Gegensatz zum Schall - kein Medium zur Ausbreitung.

Die Lichtgeschwindigkeit ist eine Naturkonstante und unabhängig davon, ob man in Bewegung ist oder nicht. Das würde uns zur speziellen Relativitätstheorie führen.

$$f_E = f_Q \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} = f_Q \sqrt{\frac{c + v}{c - v}}$$

c - Lichtgeschwindigkeit
 v - Relativgeschwindigkeit zwischen
 Sender und Empfänger

Für Geschwindigkeiten
 wesentlich kleiner als die
 Lichtgeschwindigkeit:

$$\frac{v}{c} \ll 1$$

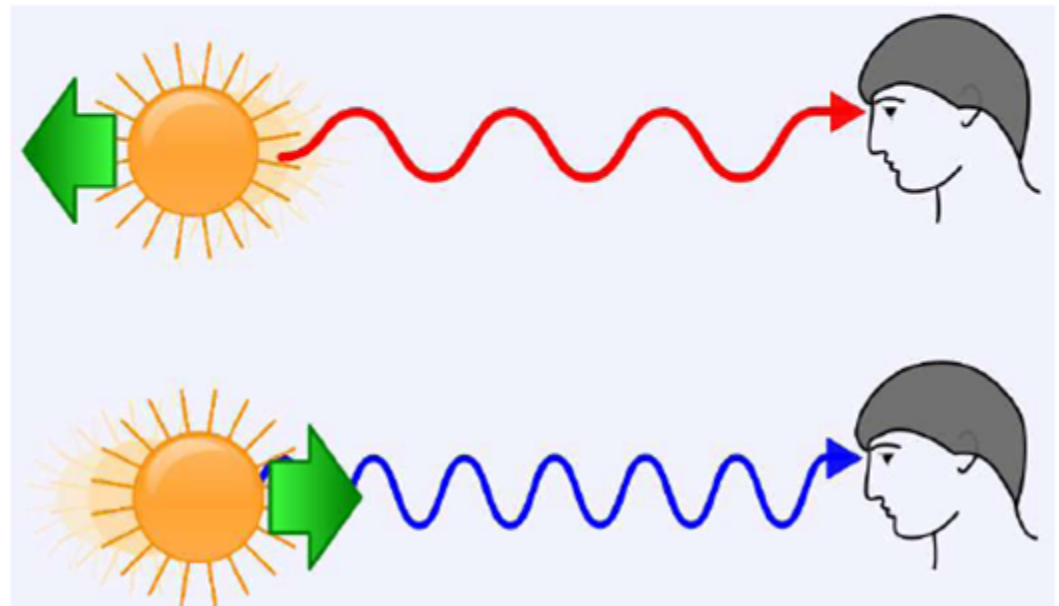
$$f_E = f_Q \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

Rotverschiebung

Als Rotverschiebung elektromagnetischer Wellen wird die Verlängerung der gemessenen Wellenlänge gegenüber der ursprünglich emittierten Strahlung bezeichnet. Der Effekt ist aus der Astronomie bekannt, wo das Licht weit entfernter Galaxien zum Roten verschoben erscheint. Dies lässt sich durch Analyse der Spektrallinien messen.

Drei Ursachen der Rotverschiebung müssen unterschieden werden:

1. Eine Relativbewegung von Quelle und Beobachter (Dopplereffekt),
2. Ein unterschiedliches Gravitationspotenzial von Quelle und Beobachter (Relativität),
3. Das expandierende Universum zwischen Quelle und Beobachter (Kosmologie).



Aufgabe

1. An einem windstillen Tag nähert sich ein Zug mit einer Geschwindigkeit von 90 km/h einer am Bahndamm stehenden Person. Der Lockführer betätigt das Warnsignal, das eine Frequenz von 630 Hz hat. Die Schallgeschwindigkeit beträgt 343 m/s.
 - a) Welche Wellenlänge haben die Schallwellen vor dem Zug?
 - b) Welche Frequenz hört die am Gleis stehende Person?

2. Sie haben den Auftrag, ein Radargerät zur Geschwindigkeitsüberwachung zu kalibrieren. Eines der Geräte strahlt Funkwellen mit einer Frequenz von 2 GHz aus. Während der Versuche werden die Wellen von einem Auto reflektiert, das sich direkt von der ruhenden Strahlungsquelle weg bewegt. Sie registrieren eine Frequenzdifferenz zwischen den ausgestrahlten und empfangenen Radarwellen von 293 Hz. Bestimmen Sie die Geschwindigkeit des Autos.

Literatur und Quellen

Paul A. Tipler, Gene Mosca: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, Spektrum Akademischer Verlag, August 2009

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



Hochschule Deggendorf – Edlmairstr. 6 und 8 – 94469 Deggendorf