




# Physik für Infotronik (12)

**Gerald Kupris**

**11.11.2015**

## Vorlesungen Physik WS2015/16

07.10.2015	Vorlesung 1	Messung und Maßeinheiten
07.10.2015	Vorlesung 2	Eindimensionale Bewegung
14.10.2015	Vorlesung 3	Bewegung in zwei und drei Dimensionen
14.10.2015	Vorlesung 4	Die Newtonschen Axiome
21.10.2015	Vorlesung 5	Anwendung der Newtonschen Axiome
21.10.2015	Vorlesung 6	Arbeit und kinetische Energie, Energieerhaltung
28.10.2015	Vorlesung 7	Der Impuls
28.10.2015	Vorlesung 8	Elastischer und inelastischer Stoß
04.11.2015	Vorlesung 9	Drehbewegungen
04.11.2015	Vorlesung 10	Drehimpuls
11.11.2015	Vorlesung 11	Harmonische Schwingungen und Resonanz
 11.11.2015	Vorlesung 12	Wellenausbreitung und Doppler-Effekt
<b>18.11.2015</b>	<b>erweitertes Tutorium</b>	

# Mechanische Welle

Eine mechanische Welle wird durch eine Störung in einem Medium erzeugt, z.B. wenn eine gespannte Saite gezupft wird.

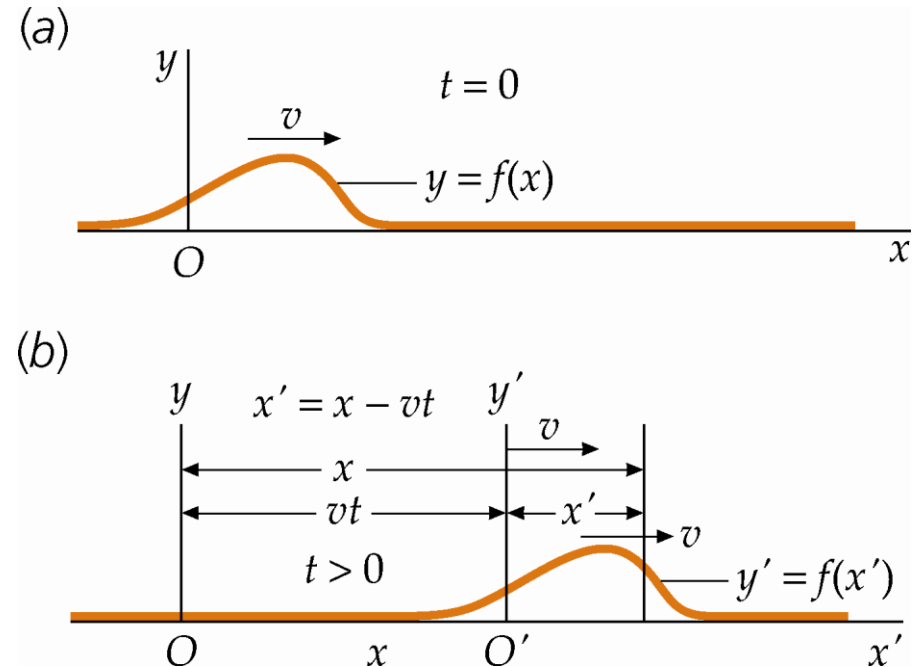
Die Störung pflanzt sich in dem Medium mit folgender Geschwindigkeit fort:

$$v = \sqrt{\frac{|F_s|}{\mu}}$$

$v$  = Geschwindigkeit

$F_s$  = Spannkraft

$\mu$  = lineare Massedichte

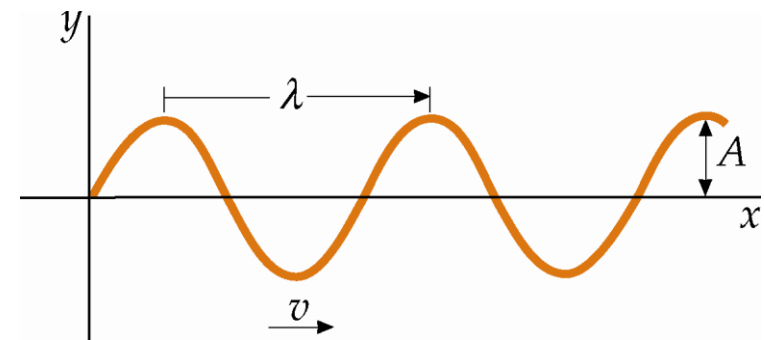


## Harmonische Wellen

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

Wenn sich eine periodische Welle auf der Saite oder in einem anderen Medium ausbreitet, dann führt jeder Punkt auf der Saite Schwingungen mit der gleichen Schwingungsdauer aus.

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



$\lambda$  = Wellenlänge

$v$  = Wellengeschwindigkeit

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

**Bei einer harmonischen Schwingung sind die Beschleunigung (und damit auch die resultierende Kraft) auf einen Körper proportional zu dessen Auslenkung aus der Gleichgewichtslage und stets zu dieser hin gerichtet.**

## 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:  $\lambda = \frac{v}{f}$

# Wellen in Flüssigkeiten



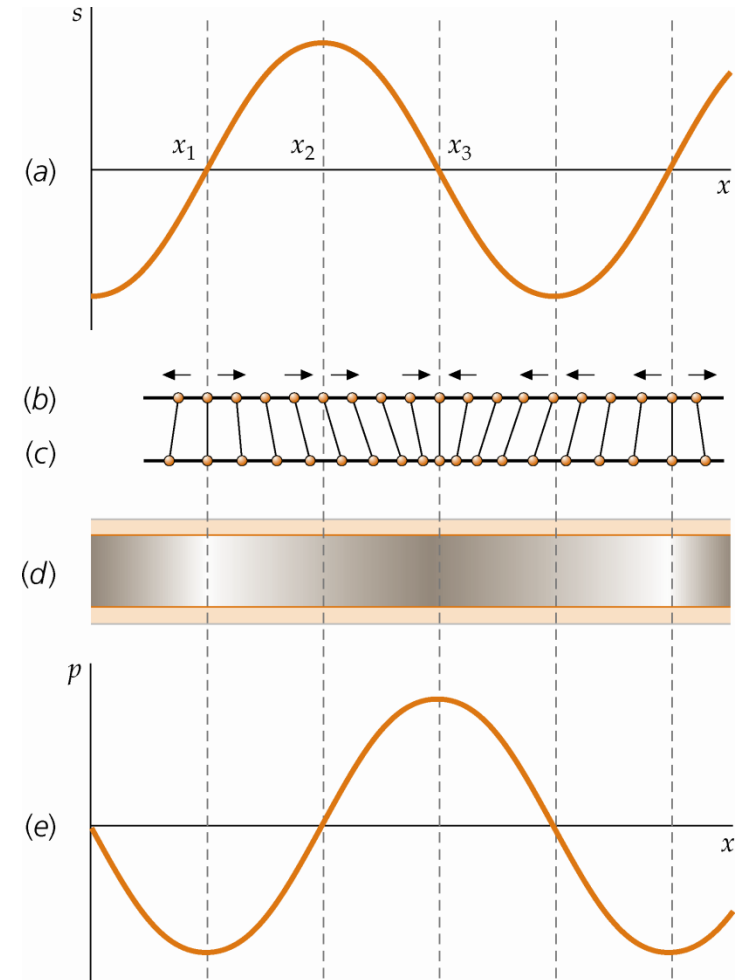
kreisförmige Wellen



Wellenwanne mit Linienwellen

# 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.



## Wellenausbreitung in Luft

Geschwindigkeit  
der Schallwellen:

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}}$$

$K$  = Kompressionsmodul  
 $\rho_0$  = Massedichte des Mediums

Schallwellen  
in einem Gas:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{m_{MOL}}}$$

$\gamma$  = Konstante  
 $R$  = universelle Gaskonstante  
 $T$  = Temperatur  
 $m_{MOL}$  = molare Masse des Gases

Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$f$  = Frequenz



## Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit ( $c$  oder  $v_0$ ) ist die Geschwindigkeit, mit der sich Schallwellen 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  $\lambda$  (lambda) die Wellenlänge und  $f$  die Frequenz der Schallwelle ist. Die Schallgeschwindigkeit kann somit errechnet werden, wenn die Werte für  $\lambda$  und  $f$  gemessen wurden. Ein Ändern der Frequenz eines Tons verursacht keine Änderung der Schallgeschwindigkeit, sondern eine Veränderung der Wellenlänge.

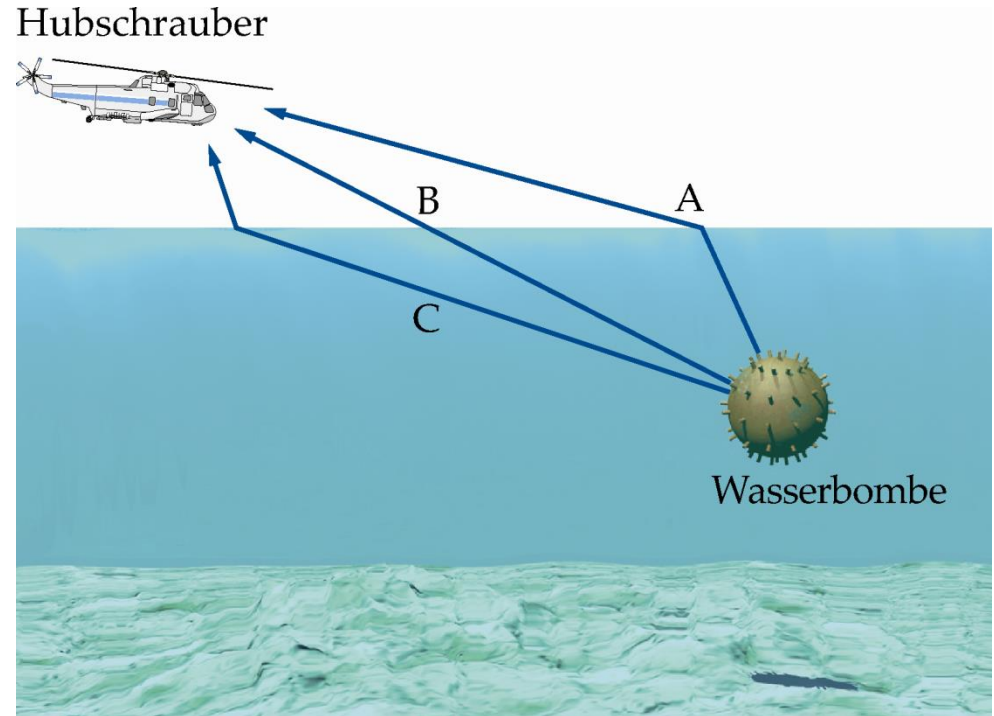
Die Schallgeschwindigkeit wird bei gleichbleibenden physikalischen Eigenschaften des Mediums als konstant angesehen.

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).

## Lautstärke von Schallwellen

Intensitätspegel von Schallwellen:

$$IP = (10dB) \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

$I$  = Schallintensität

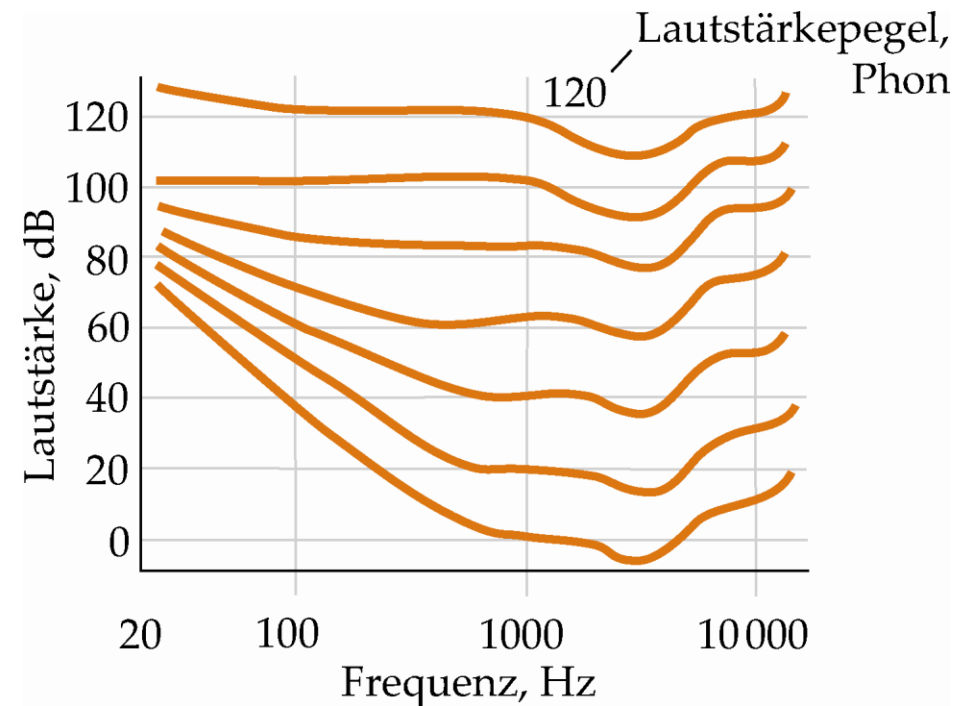
$I_0$  = Hörschwelle =  $10^{-12} \text{ W/m}^2$

Hörschwelle (ca.  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ ):

$$HS = (10dB) \cdot \log \frac{I_0}{I_0} = (10dB) \cdot \log 1 = 0dB$$

Schmerzschwelle (ca.  $1 \text{ W/m}^2$ ):

$$SS = (10dB) \cdot \log \frac{1}{10^{-12}} = (10dB) \cdot \log 10^{12} = (10dB) \cdot 12 = 120dB$$



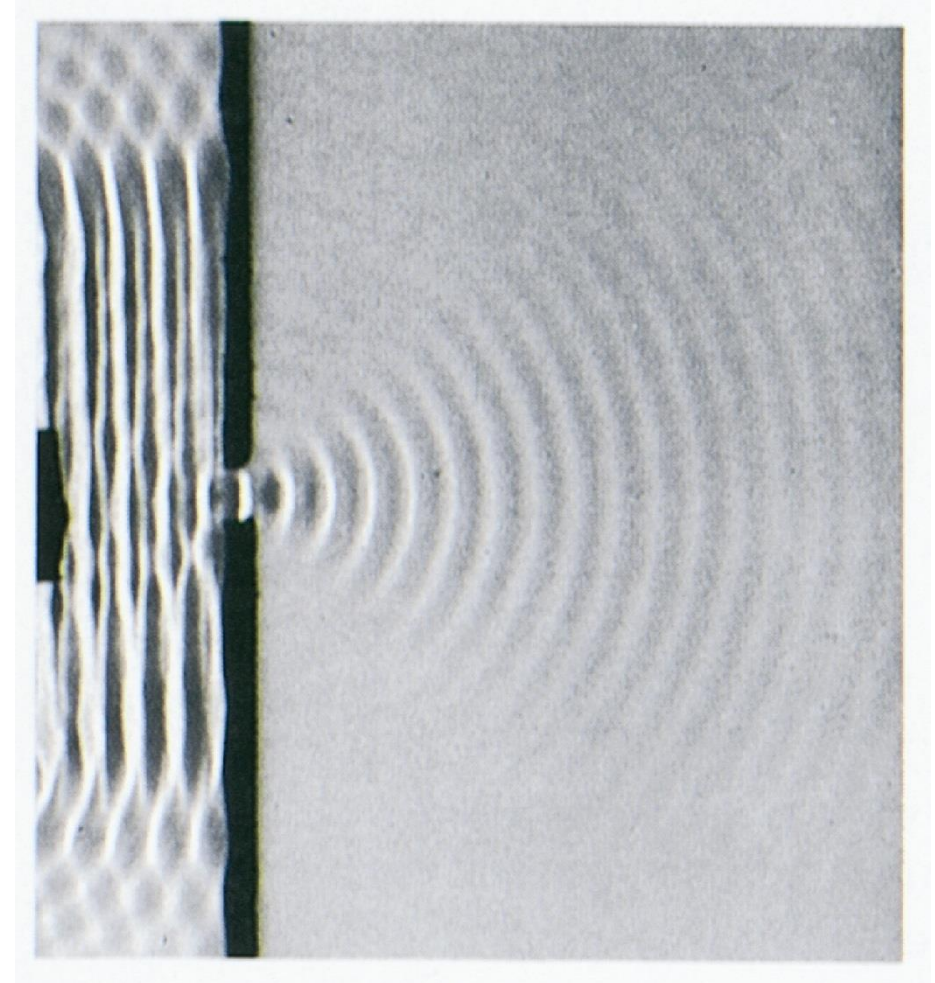
Kurven gleicher subjektiver Lautstärke

## Beugung an einem Hindernis

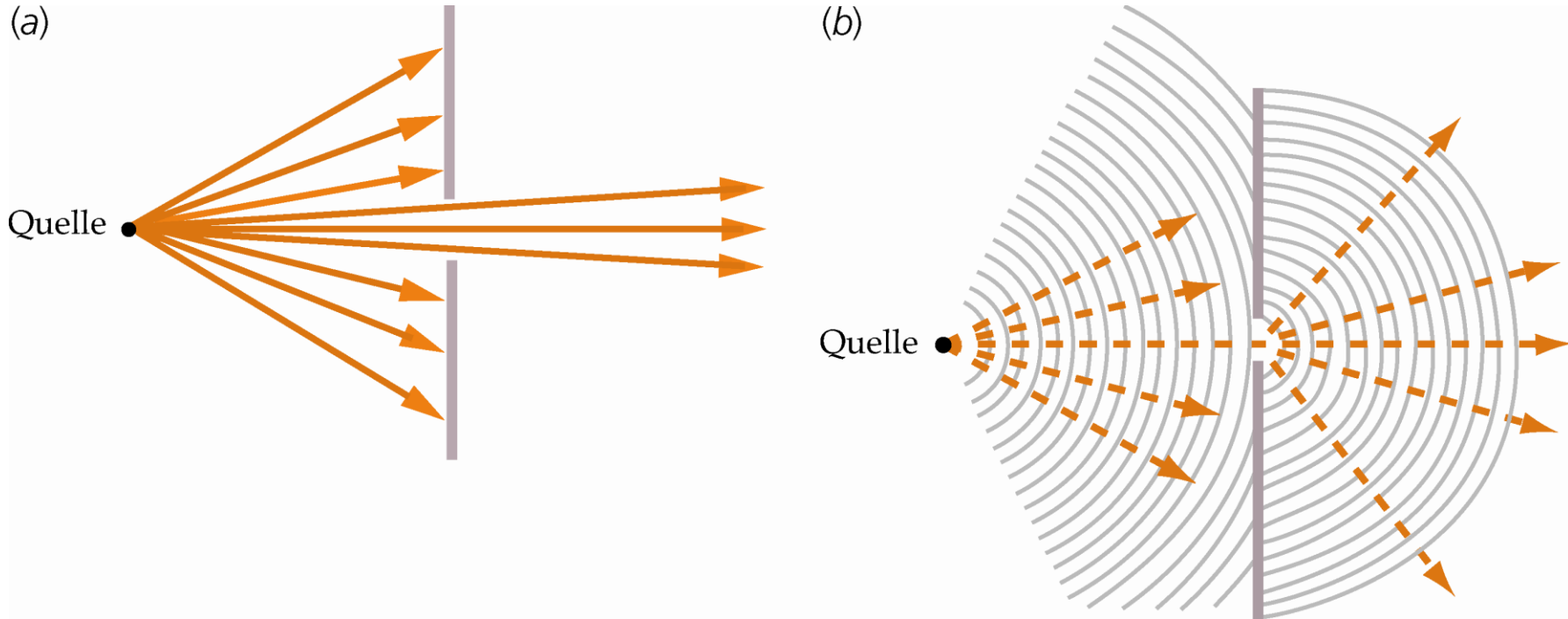
Wenn eine Wellenfront durch ein Hindernis teilweise eingeschränkt wird, dann bewegt sich die Welle in der durch die Strahlengeometrie gegebenen Richtung weiter, sondern es tritt auch eine komplizierte Wellenbewegung außerhalb der geometrischen Strahlengrenzen auf.

Diese Erscheinung wird **Beugung** genannt.

Die Beugung von Wellen tritt grundsätzlich bei jeder Begrenzung der der Ausbreitung der Welle durch ein Hindernis unmittelbar an den Rändern auf.



## Vergleich Teilchen und Wellen



Vergleich von Teilchen und Wellen, die eine schmale Öffnung passieren:

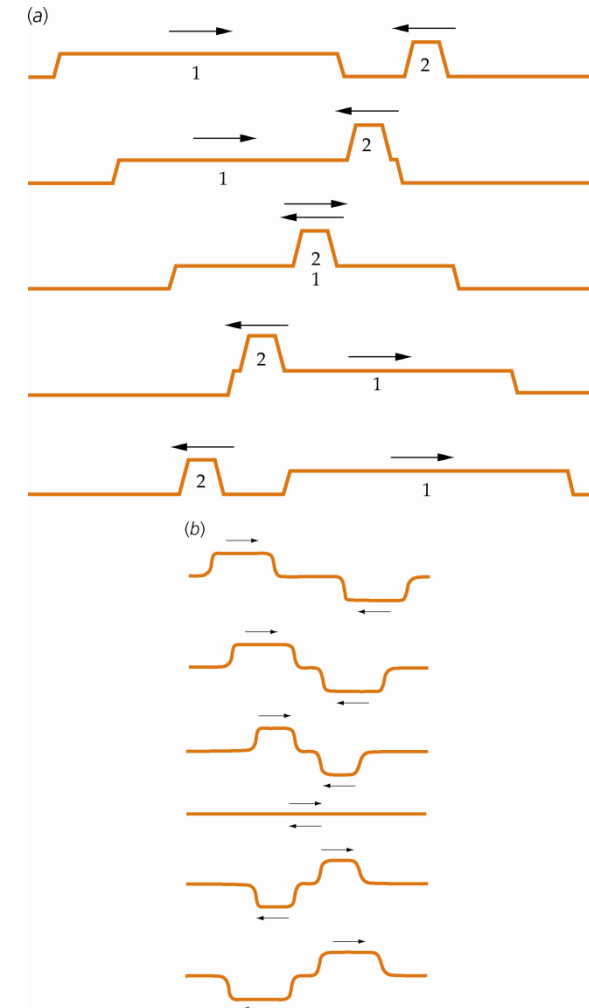
- a) die durchgegangenen Teilchen werden auf einen sich kaum auffächernden Strahl begrenzt
- b) die durchgegangenen Wellen breiten sich radial weiter hinter der Öffnung aus, die wie eine punktförmige Quelle von Kreiswellen wirkt.

## Zwei Wellenberge überlagern sich

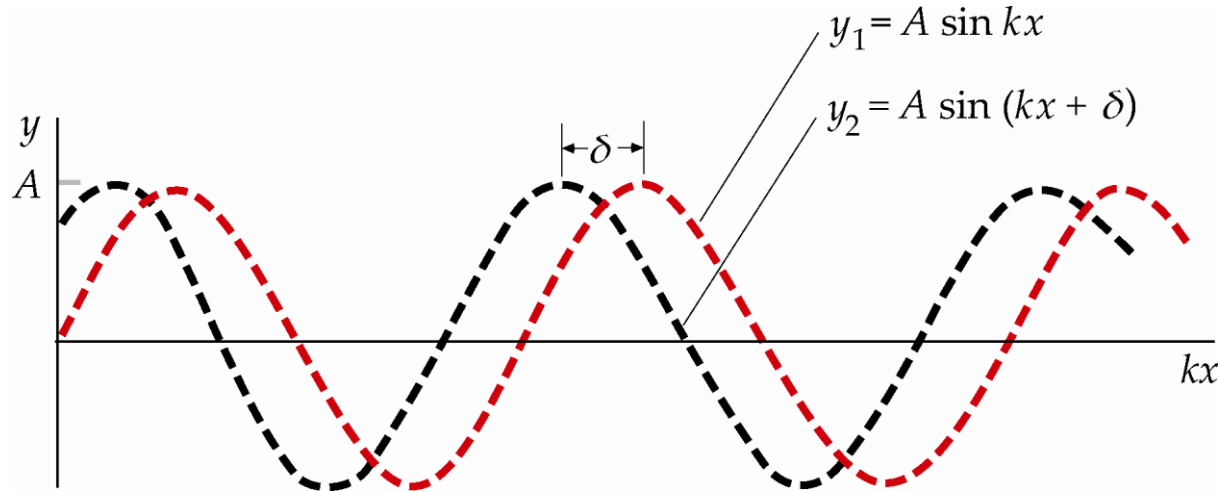
Überlagerung zweier Wellenberge mit gleich gerichteter Auslenkung

Überlagerung zweier Wellenberge mit entgegengesetzter gerichteter Auslenkung

**Wenn zwei oder mehr Wellen sich überlagern, ergibt sich die resultierende Welle als algebraische Summe der einzelnen Auslenkungen.**



## Addition zweier gleichfrequenter Schwingungen



Es gelten die Rechenregeln, die wir bereits kennengelernt hatten: Nach dem Superpositionsprinzip überlagern sich zwei Schwingungen  $y_1 = A_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1)$  und  $y_2 = A_2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_2)$  ungestört und ergeben die resultierende

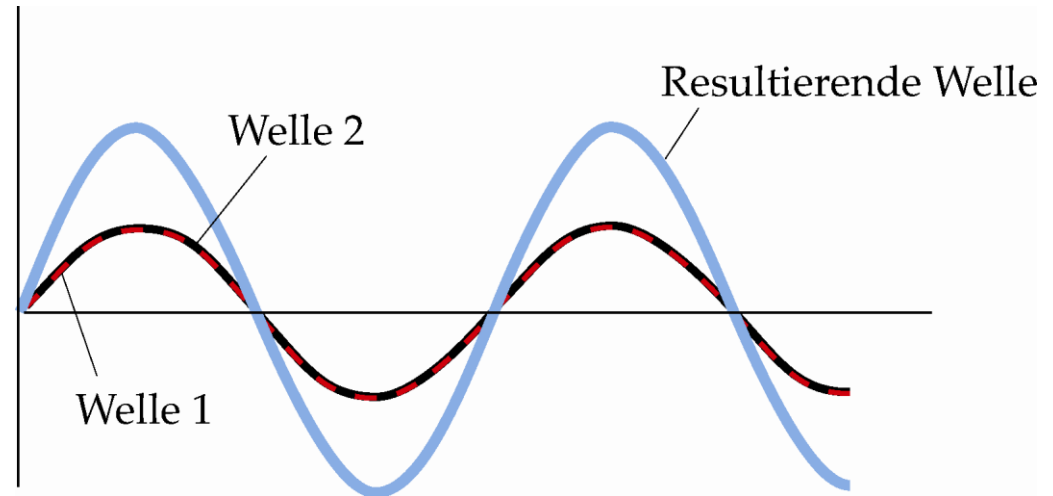
$$y = y_1 + y_2 = A_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_2) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

Amplitude  $A$  und Phase  $\varphi$  lassen sich schrittweise aus den Amplituden  $A_1$  und  $A_2$  sowie den Phasenwinkeln  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  der Einzelschwingungen berechnen.

# Interferenz

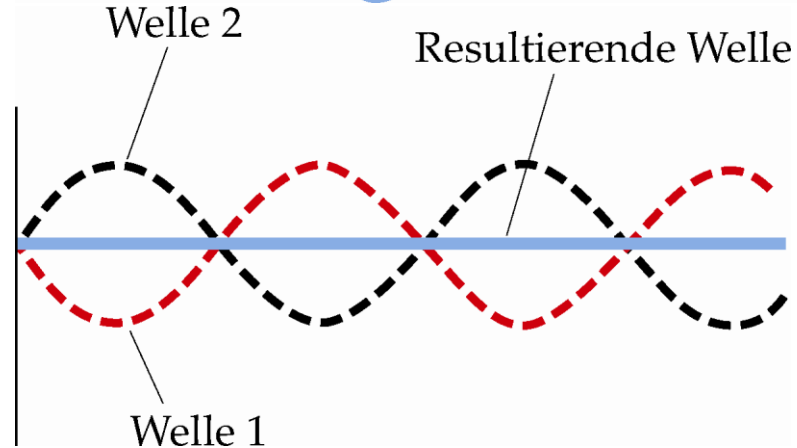
## Konstruktive Interferenz:

Sind zwei harmonische Wellen gleicher Frequenz in Phase, dann addieren sie sich.



## Destruktive Interferenz:

Haben zwei Wellen eine Phasendifferenz von  $\pi$  ( $180^\circ$ ), dann ergibt sich die Amplitude als Differenz der Einzelamplituden.





## Schwebung

Zwei Wellen mit beinahe gleicher Frequenz sind bei  $t_0$  in Phase, bei  $t_1$  um  $180^\circ$  verschoben und bei  $t_2$  wieder in Phase.

Die resultierende Welle, die sich aus der Überlagerung der beiden Wellen ergibt, hat etwa dieselbe Frequenz wie die ursprünglichen Wellen, die Amplitude ist aber mit einer neuen Frequenz verändert („moduliert“).

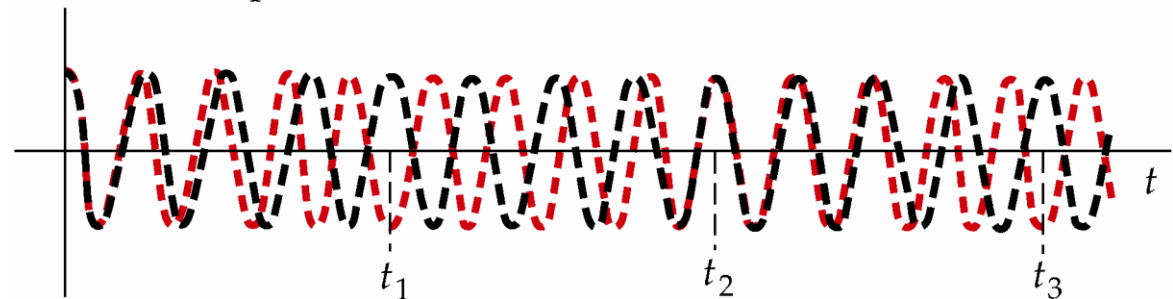
$$f_{\text{Schwebung}} = \Delta f$$

### Beispiele!

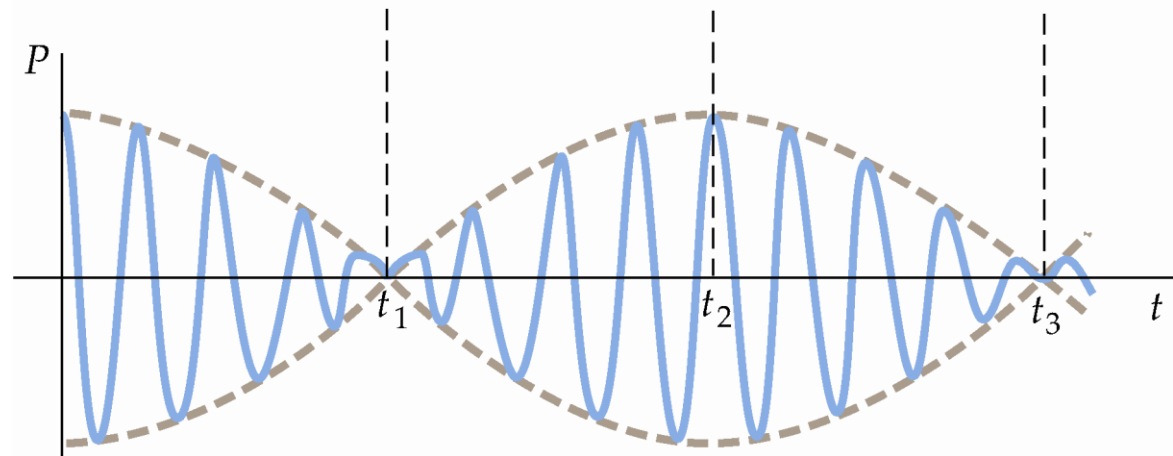
Überlagerung zweier Wellen zu einer resultierenden Welle.

(a)

$P$ , Druckamplitude



(b)



## Kohärente Quellen

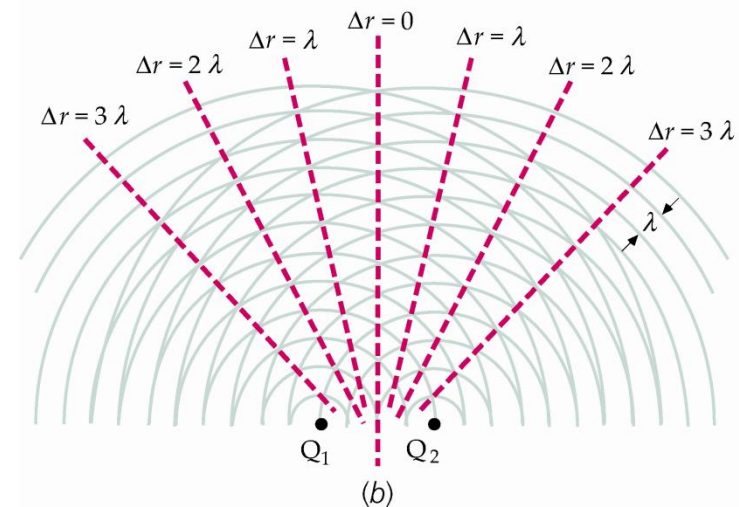
Wasserwellen, die durch zwei dicht beieinander liegende, gleichphasige Punktquellen erzeugt werden.

Durch Überlagerung entsteht ein Interferenzmuster.

Wenn die Phasendifferenz der beiden Quellen konstant bleibt, dann heißen solche Quellen **kohärent**.



(a)



(b)

# Stehende Wellen

Wenn sich Wellen nur in einem bestimmten räumlichen Gebiet ausbreiten können, treten an den Enden des Gebietes Reflektionen auf. Dadurch überlagern sich die Wellen.

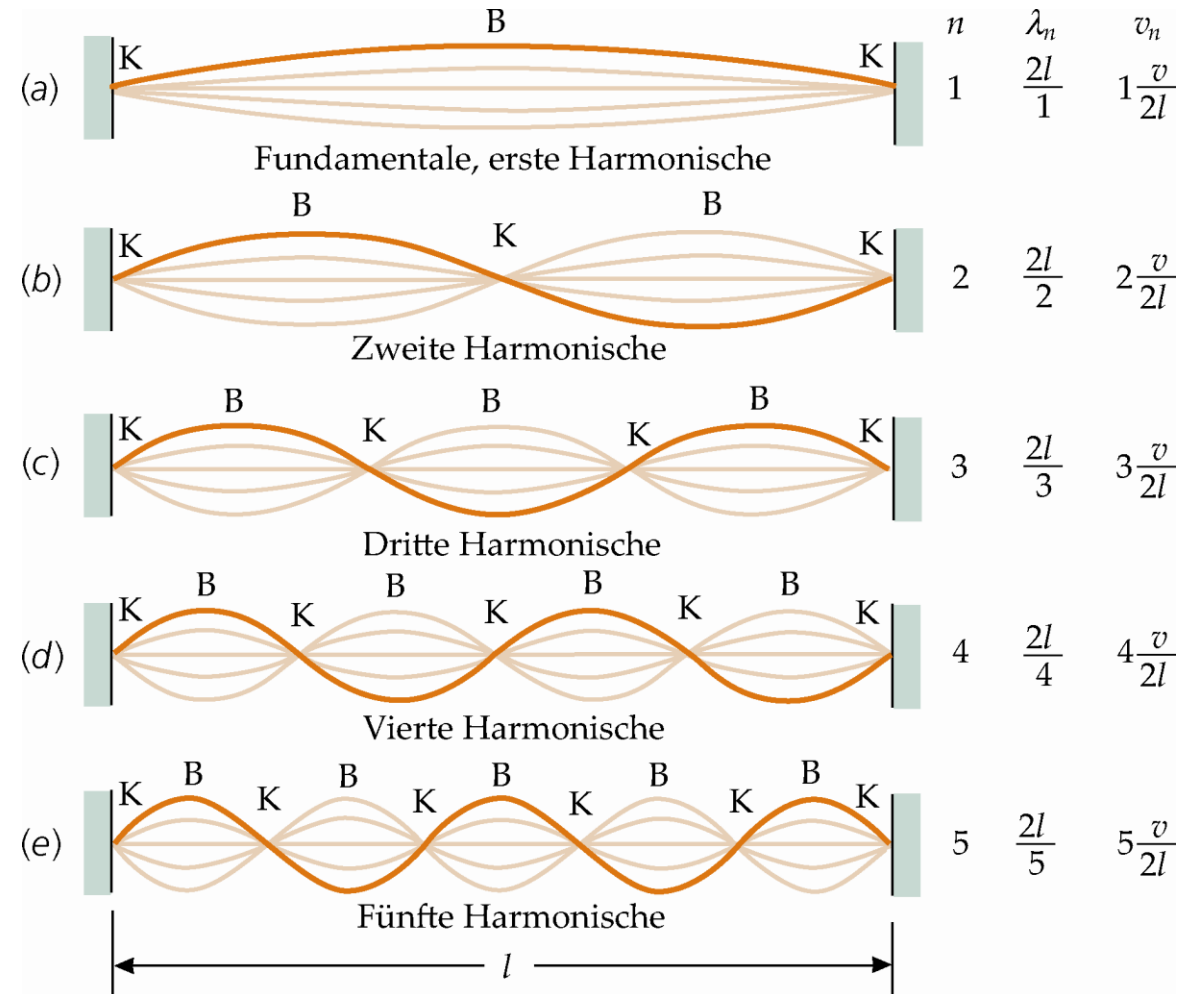
Das führt zu **stehenden Wellen**.

## Beispiel:

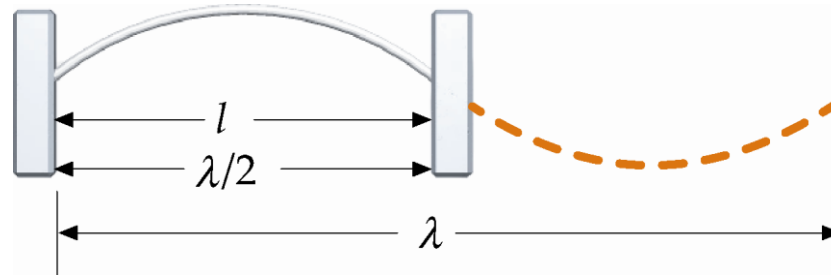
Stehende Wellen auf einer beidseitig eingespannten Saite:

B = Schwingungsbäuche

K = Schwingungsknoten



## Resonanzfrequenzen und Harmonische



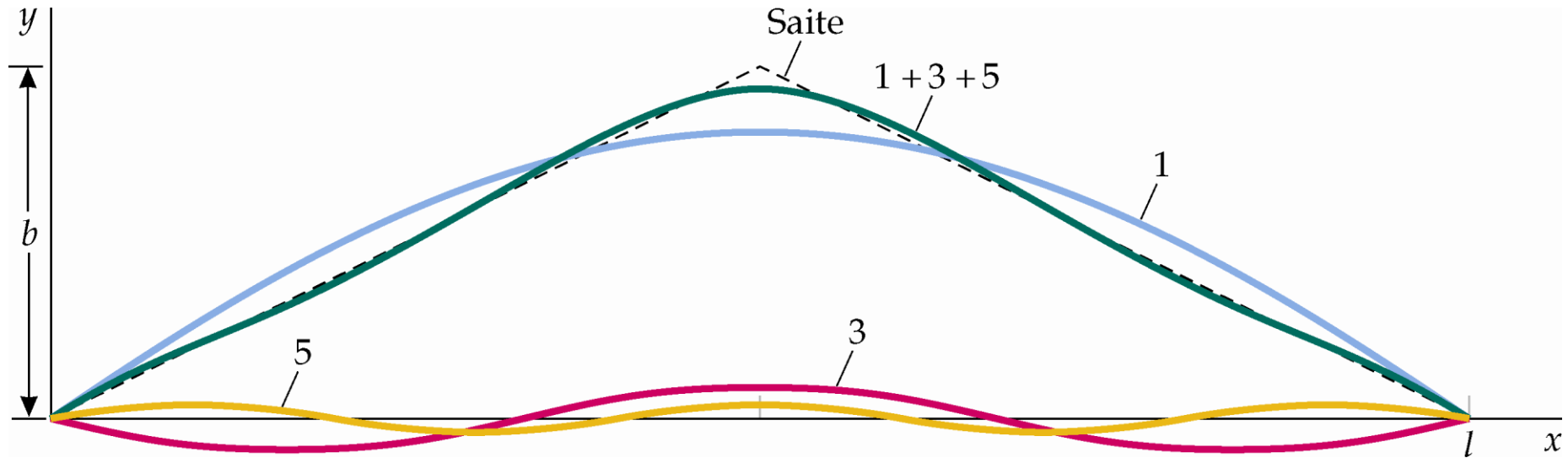
Nicht alle Resonanzfrequenzen werden Harmonische genannt.

Nur wenn jede Frequenz des Resonanzspektrums ein ganzzahliges Vielfaches der niedrigsten Resonanzfrequenz (der Eigenfrequenz) ist, bezeichnet man sie als Harmonische.

Bedingung für stehende Wellen: 
$$l = n \cdot \frac{\lambda_n}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

Resonanzfrequenzen einer Saite: 
$$f_n = n \cdot \frac{f}{2l} = n \cdot f_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

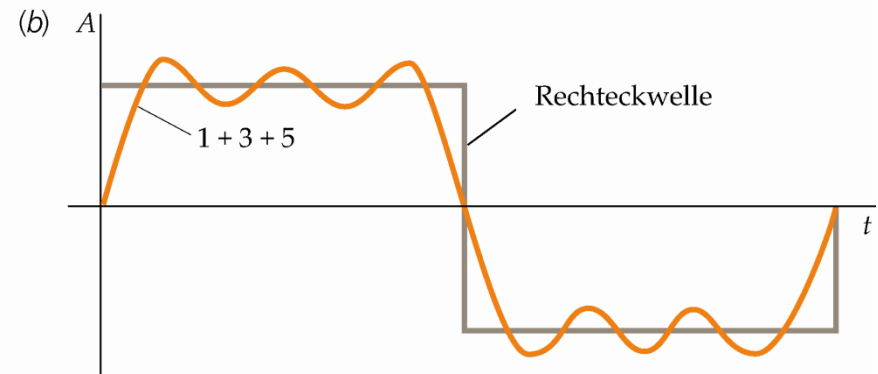
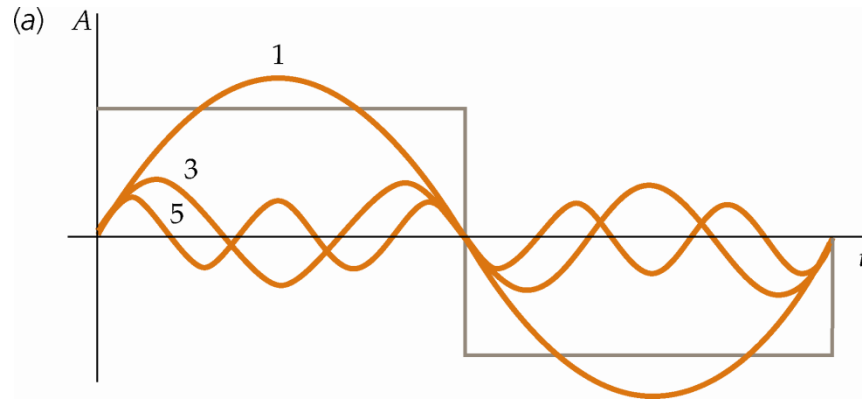
## Überlagerung stehender Wellen



Die ursprüngliche Auslenkung der in der Mitte gezupften Saite lässt sich näherungsweise mit Hilfe mehrerer Harmonischer beschreiben. Die Grundwelle und die ersten höheren ungeraden Harmonischen sind farbig eingezeichnet.

Die Linearkombination dieser Schwingungsmoden ergibt die grün eingezeichnete Linie, mit der die Ausgangsform schon recht gut angenähert wird.

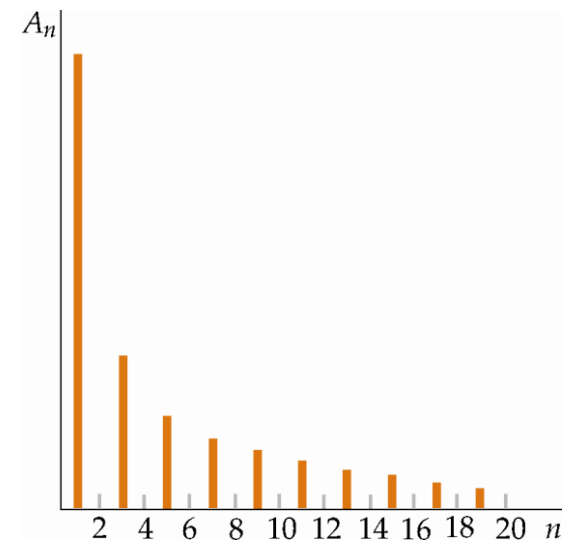
# Rechteckwelle



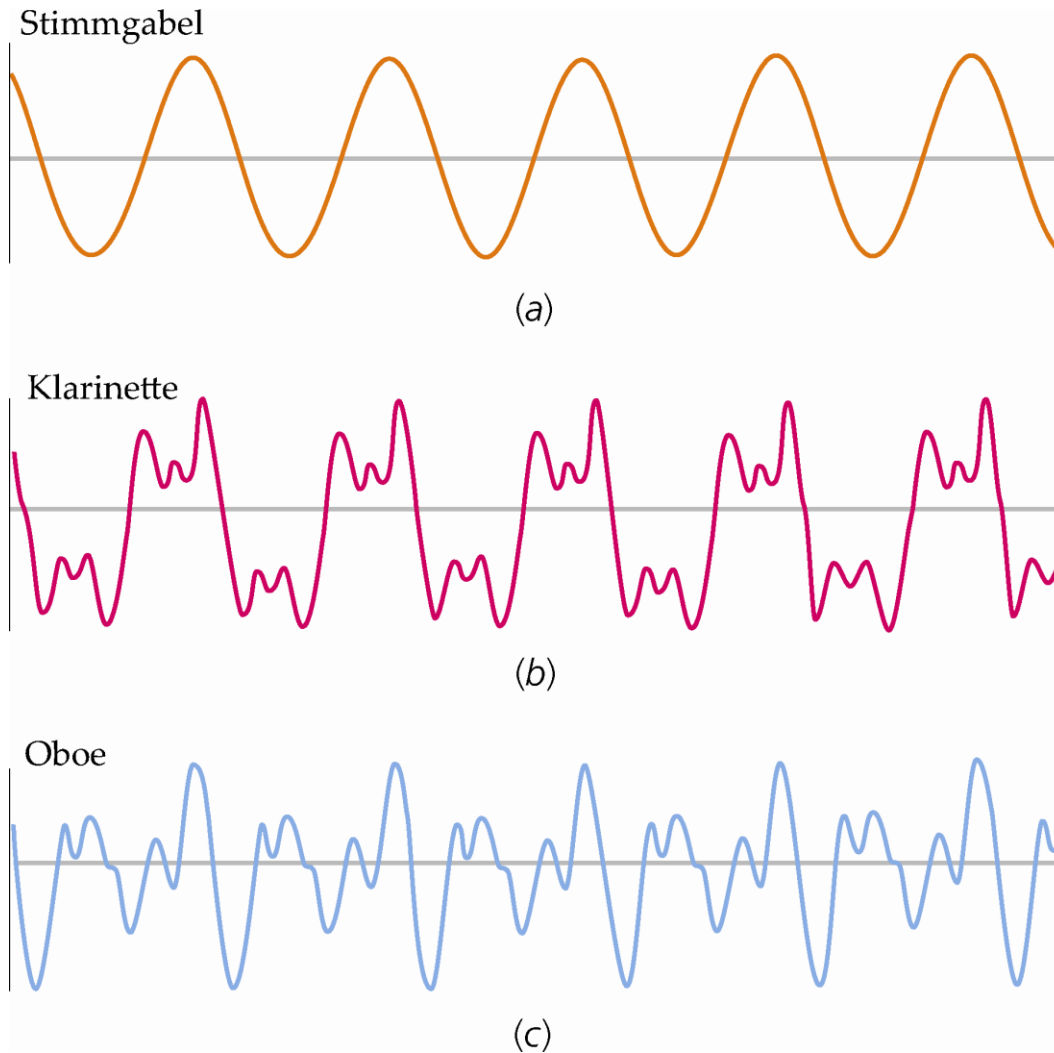
Eine Sinuswelle und die ersten ungeraden Harmonischen, mit denen sich eine Rechteckwelle synthetisieren lässt:

Bei der harmonischen Synthese wird die Rechteckwelle durch die Überlagerung der ersten drei ungeraden Harmonischen schon recht gut angenähert.

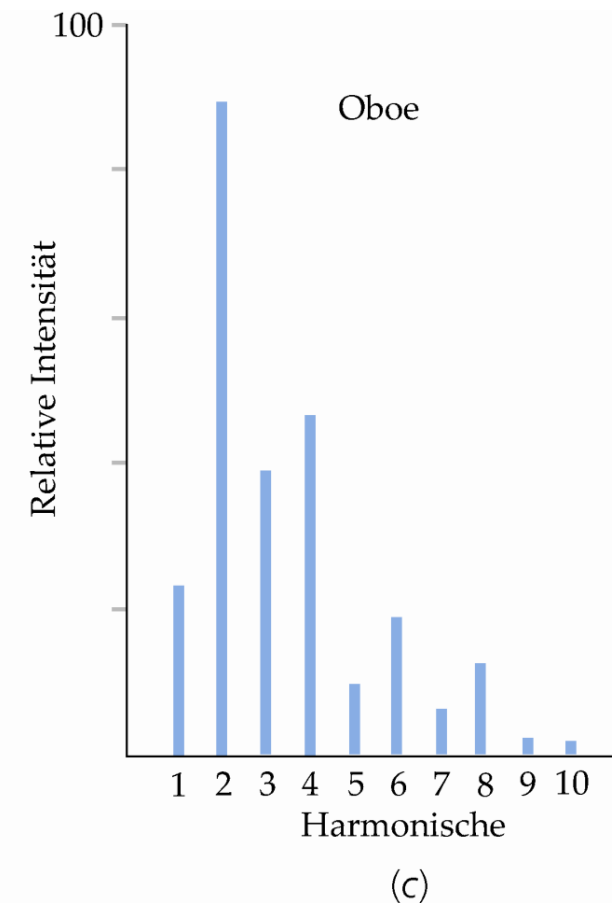
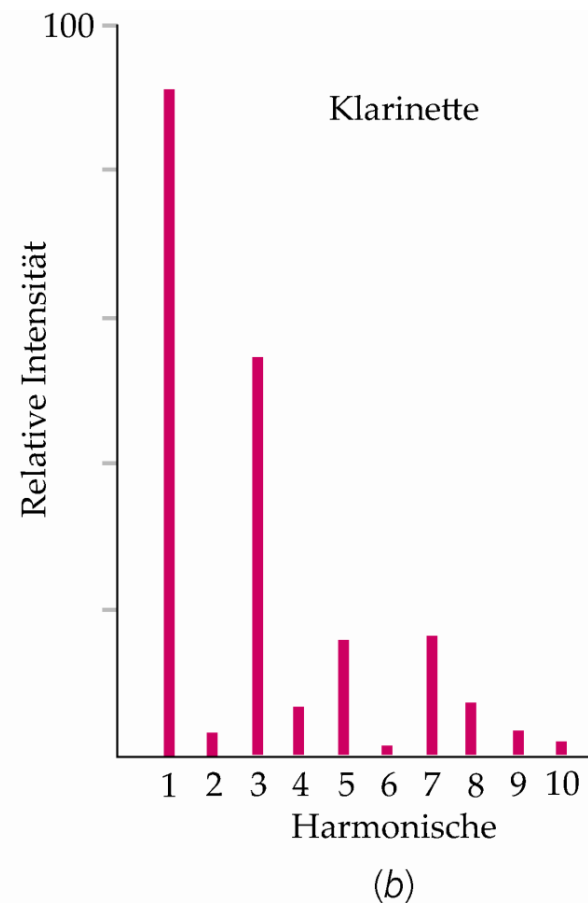
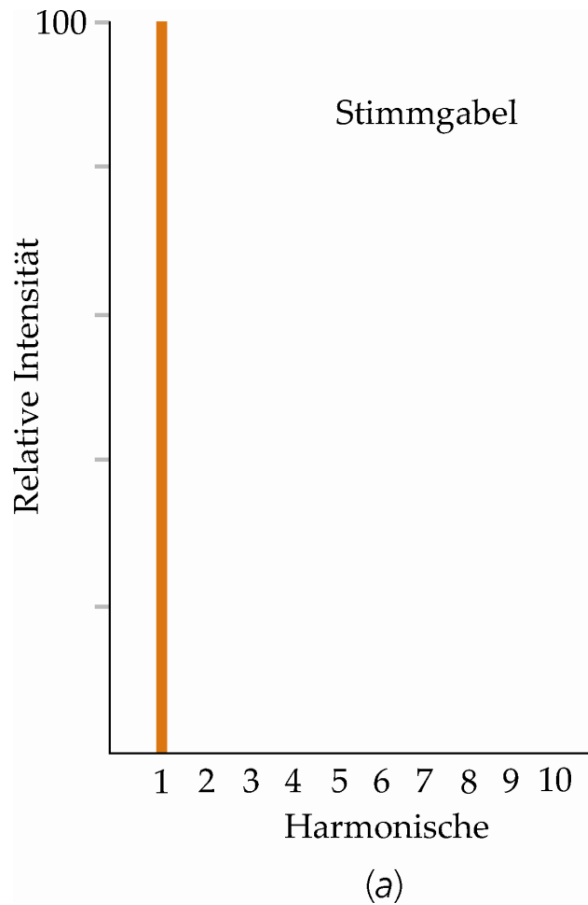
Je mehr Harmonische man bei der Synthese verwendet, umso besser wird der Verlauf der Rechteckwelle angenähert.



# Wellenformen

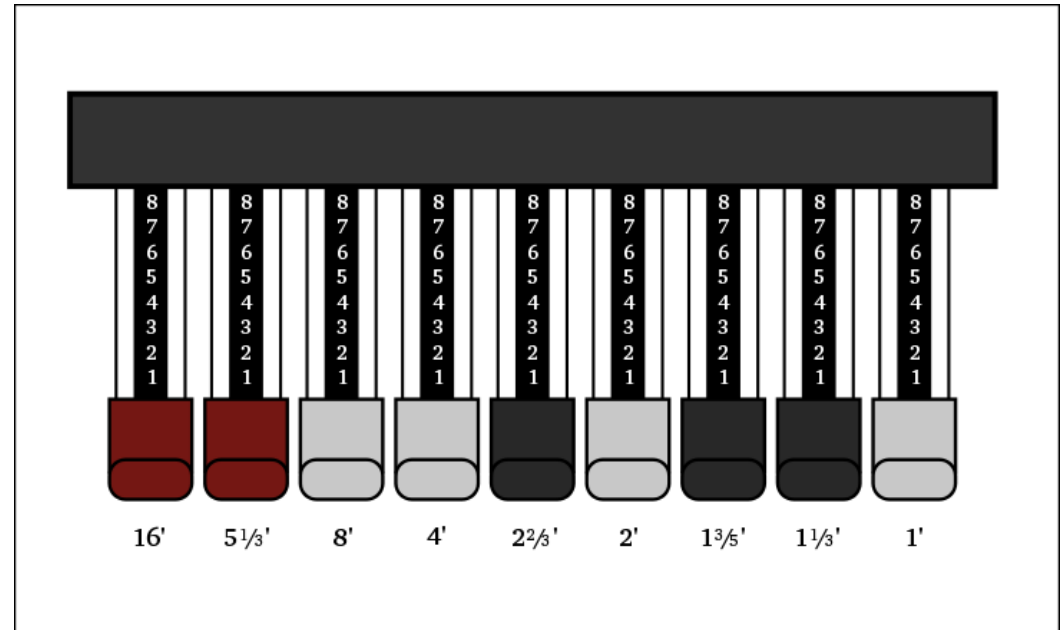


# Relative Intensitäten der Harmonischen





# Zugriegel einer Hammond-Orgel



## 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.

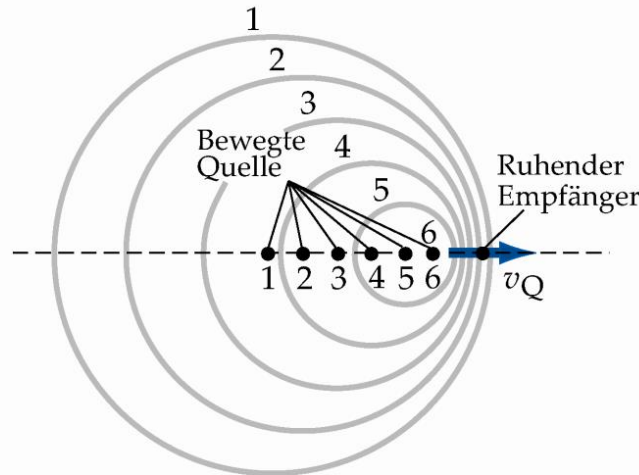
Bei der Erklärung des akustischen Doppler-Effekts ist zu unterscheiden, ob sich die Schallquelle, der Beobachter, oder beide relativ zum Medium (der ruhenden Luft) bewegen.

# Doppler-Effekt

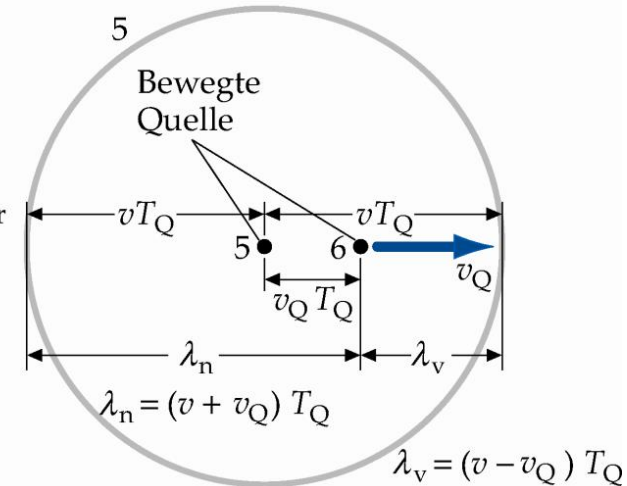
(a)



(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  
 $\lambda_n$  = Wellenlänge nach der Quelle  
 $\lambda_v$  = Wellenlänge vor der Quelle

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

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

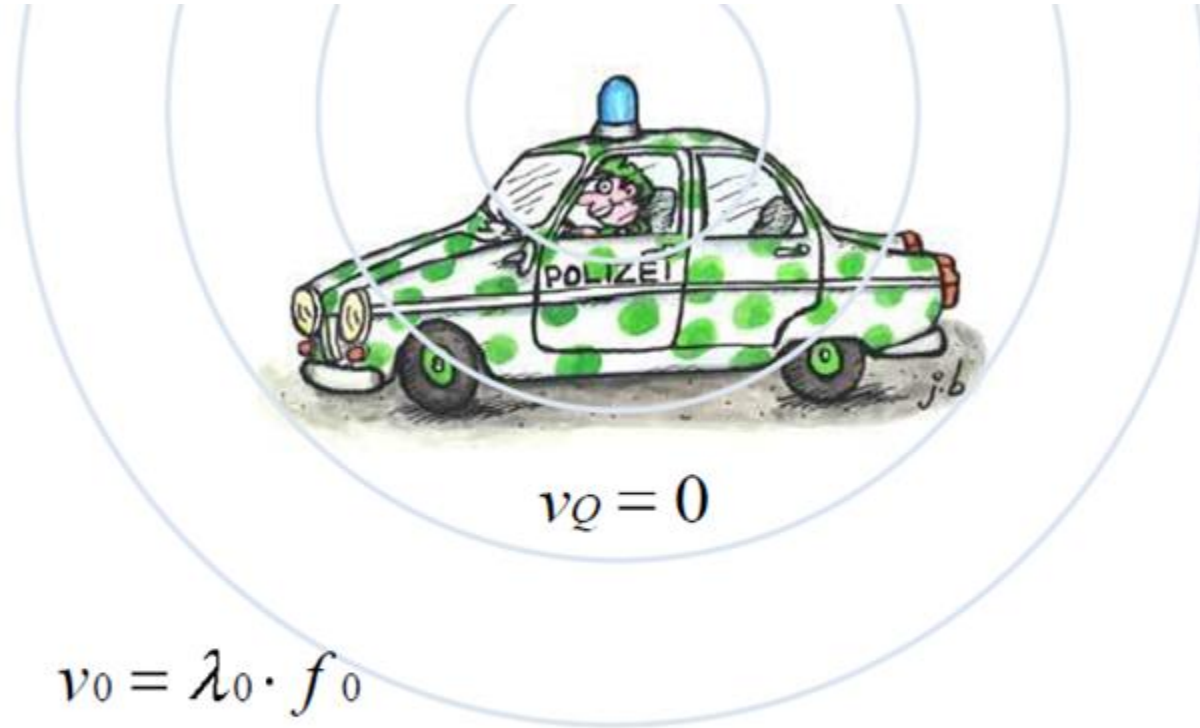
## Empfänger in Ruhe, Quelle in Ruhe



$$v_E = 0$$

Effektive Schallgeschwindigkeit, die vom Empfänger gemessen wird:

Resultierende Frequenz, die von dem Empfänger gemessen wird:



$$v_Q = 0$$

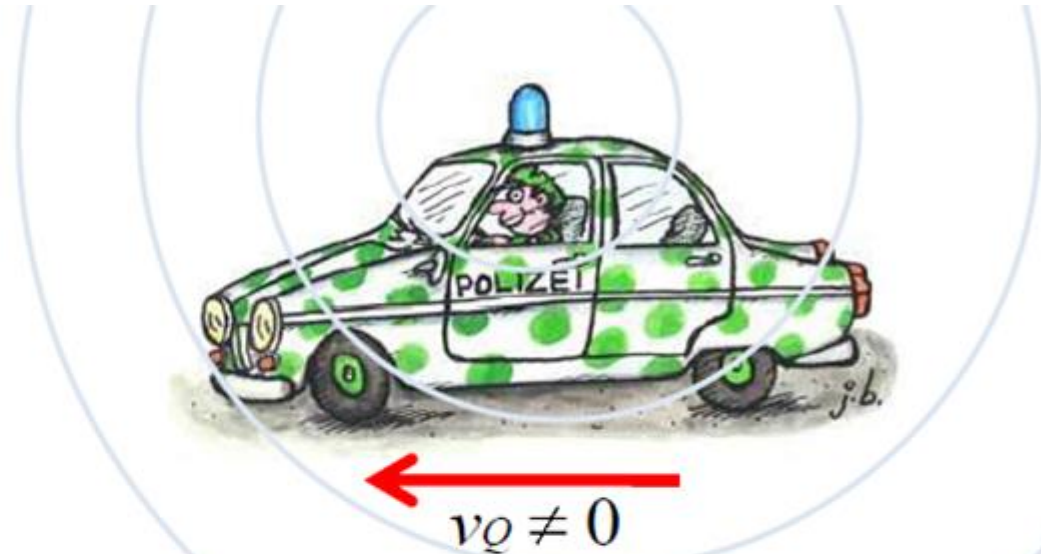
$$v_0 = \lambda_0 \cdot f_0$$

$$f_E = f_Q$$

## Quelle bewegt sich auf den Empfänger zu



$$v_E = 0$$



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

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

Resultierende Frequenz, die von dem Empfänger gemessen wird:

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



## Quelle bewegt sich von dem Empfänger weg



$$v_E = 0$$



$$v_Q \neq 0$$

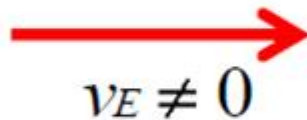
Effektive Wellenlänge, die von der Quelle in Richtung Empfänger abgestrahlt wird (Wellenlänge wird größer):

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

Resultierende Frequenz, die von dem Empfänger gemessen wird:

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

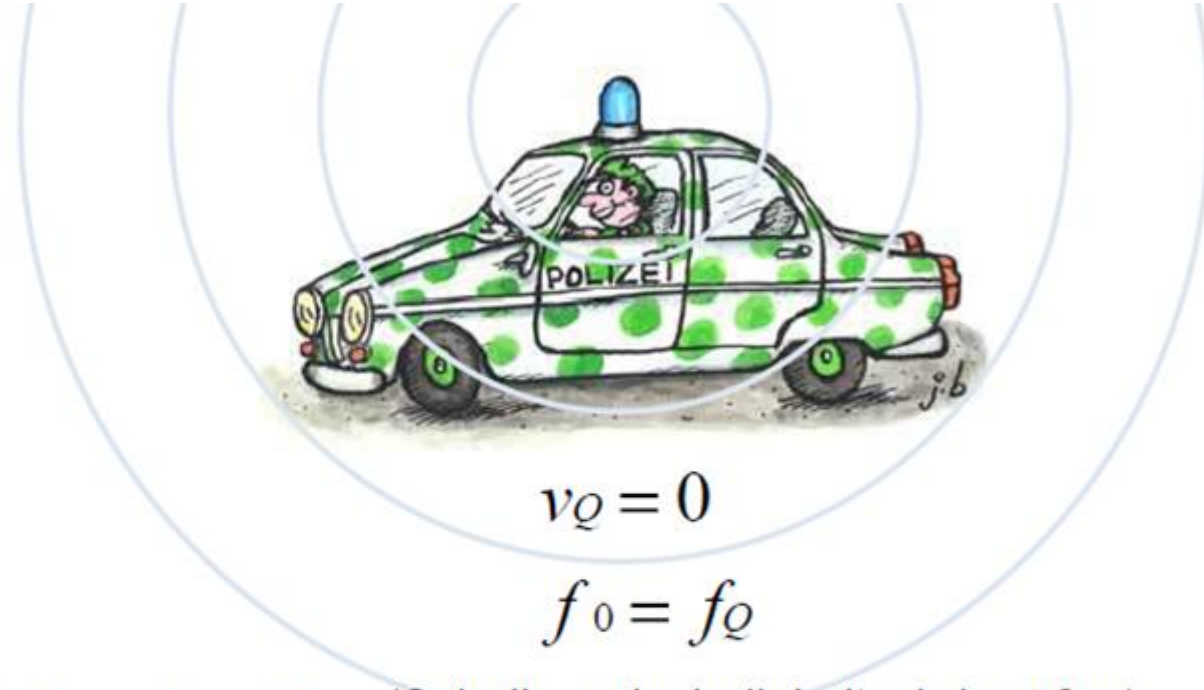
## Empfänger bewegt sich auf die Quelle zu



$$v_E \neq 0$$

Effektive Schallgeschwindigkeit, die vom Empfänger gemessen wird:

Resultierende Frequenz, die von dem Empfänger gemessen wird:



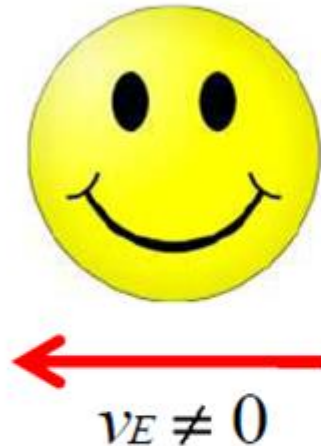
$$v_Q = 0$$

$$f_0 = f_Q$$

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

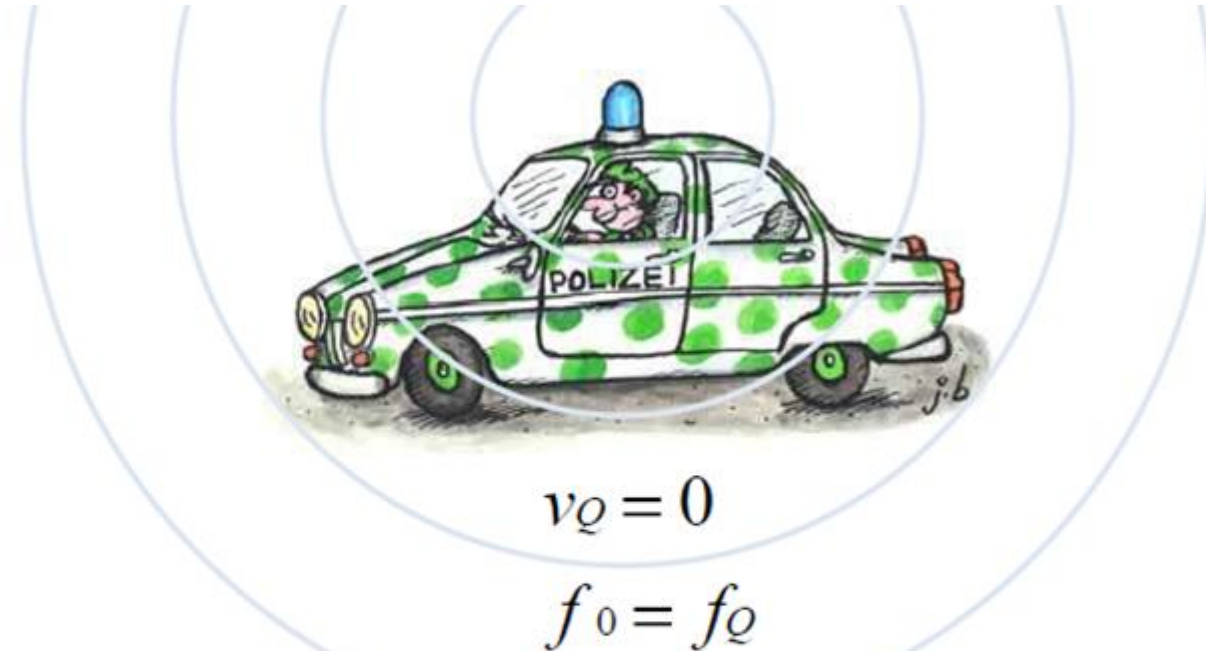
$$f_E = \frac{v_{eff}}{\lambda_0} = \frac{v_0 + v_E}{\lambda_0} = f_Q \frac{v_0 + v_E}{v_0} = f_Q \left(1 + \frac{v_E}{v_0}\right)$$

## 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.

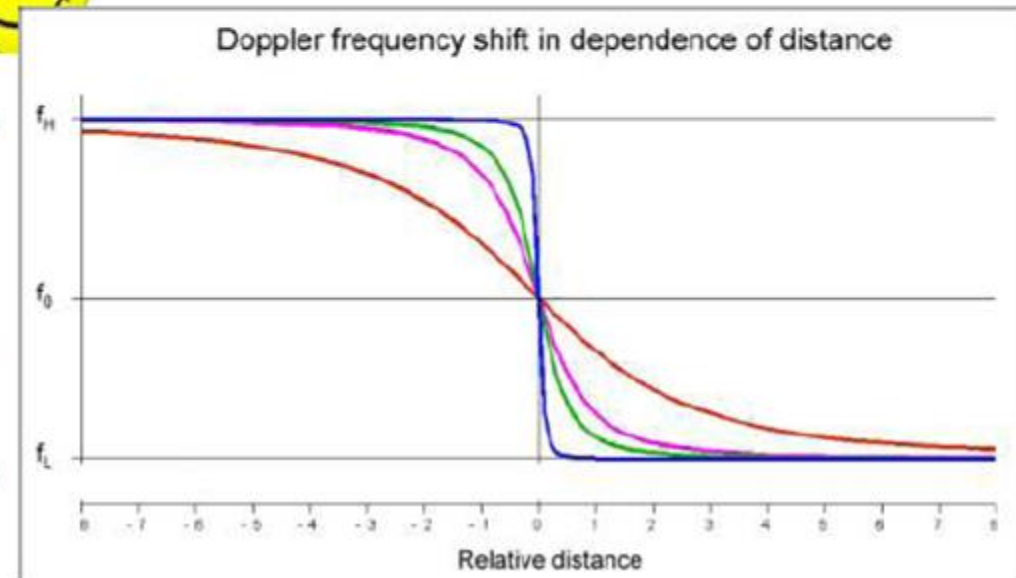
Üblicherweise tritt so ein Fall auf, wenn sich das Medium selbst bewegt, während Sender und Empfänger ruhen (Wind).

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.

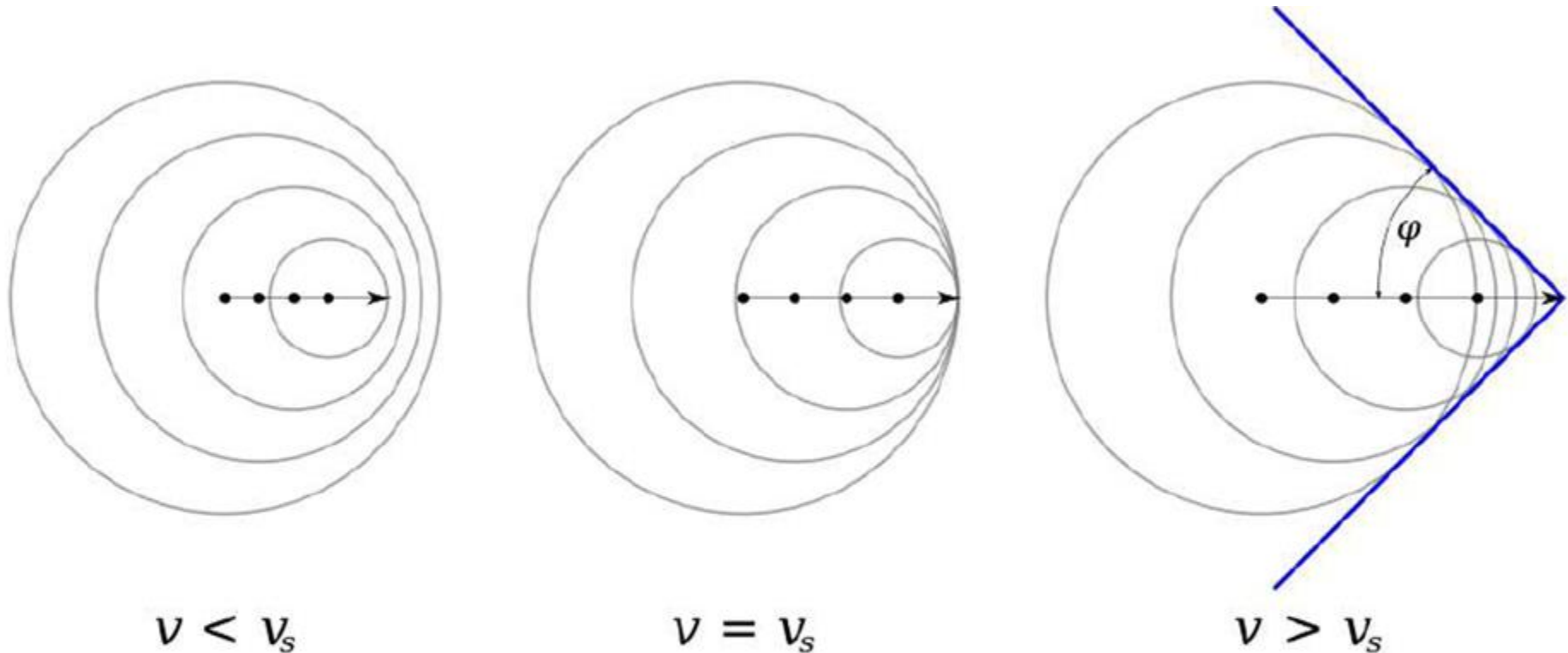
Das Auto fährt an dem Empfänger vorbei und entfernt sich nun mit einer Geschwindigkeit von  $v_q = 122 \text{ km/h}$ . Die Schallgeschwindigkeit beträgt immer noch 343 m/s.

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.

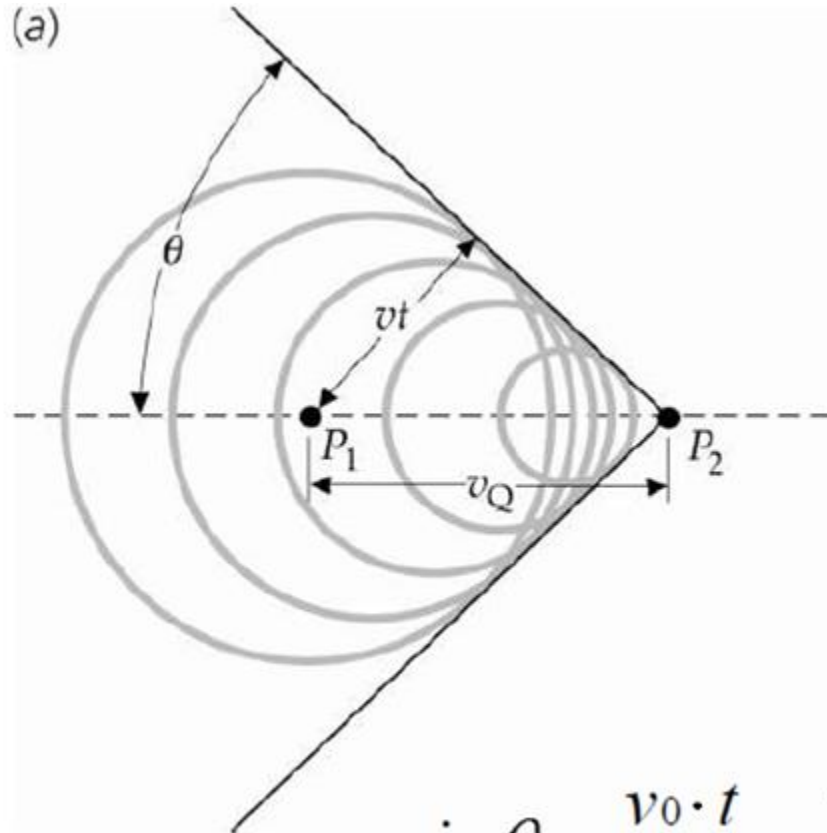
# Machscher Kegel



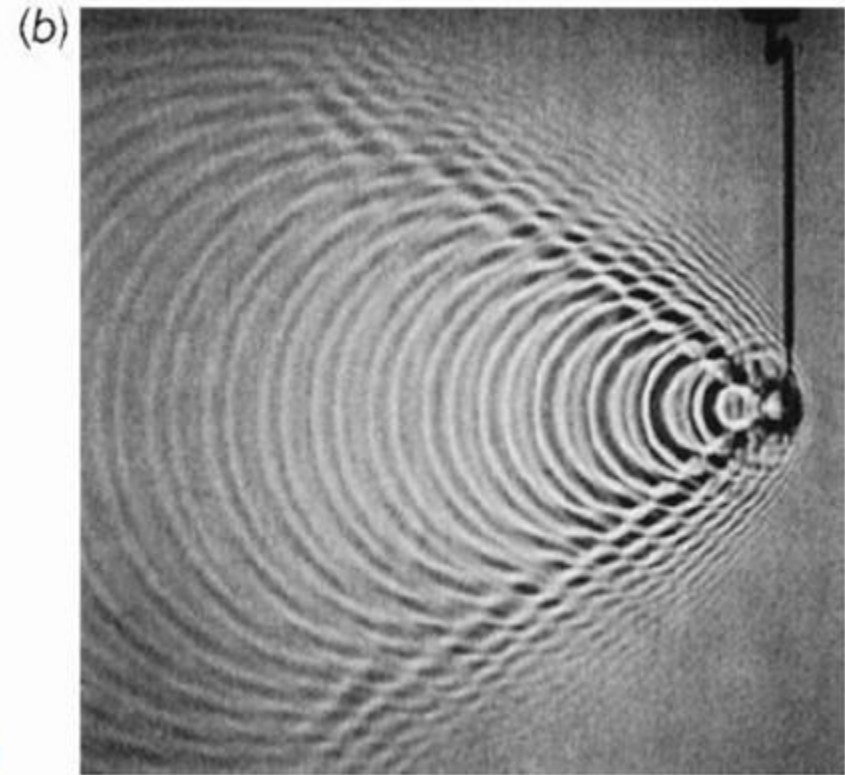
Wenn sich die Quelle schneller bewegt als die Wellengeschwindigkeit, ( $v_Q = v > v_s$ ) dann bildet sich eine Stoßwelle (Verdichtungsstoß, blau dargestellt).

$v_s = v_0 =$  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.

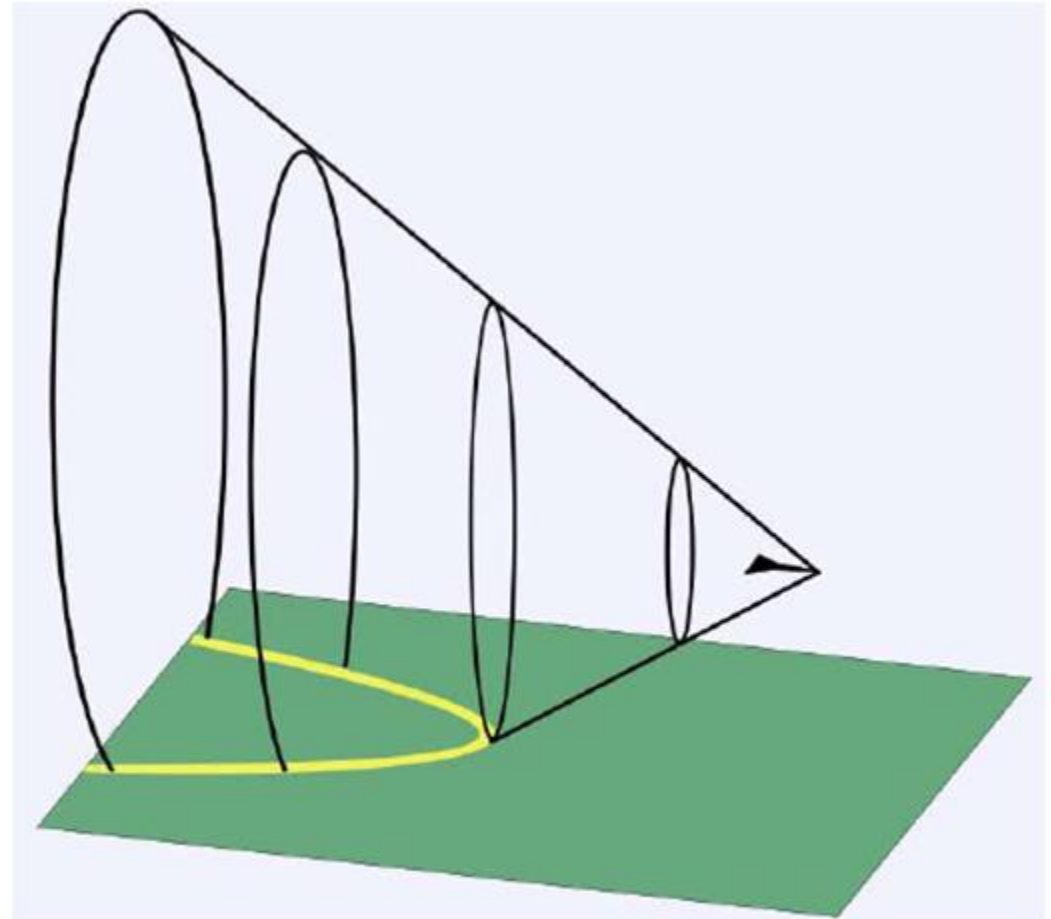
Die Kompressionsenergie aus der Flugbewegung kann als Schallwelle nicht mehr nach vorne entfliehen, da das Flugzeug so schnell fliegt wie die Schallgeschwindigkeit und nach hinten sich ausbreiten, weil das Flugzeug neue Energie nachliefert, die Energie wird in diesem Moment kumuliert und es kommt deswegen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



# Überschallknall

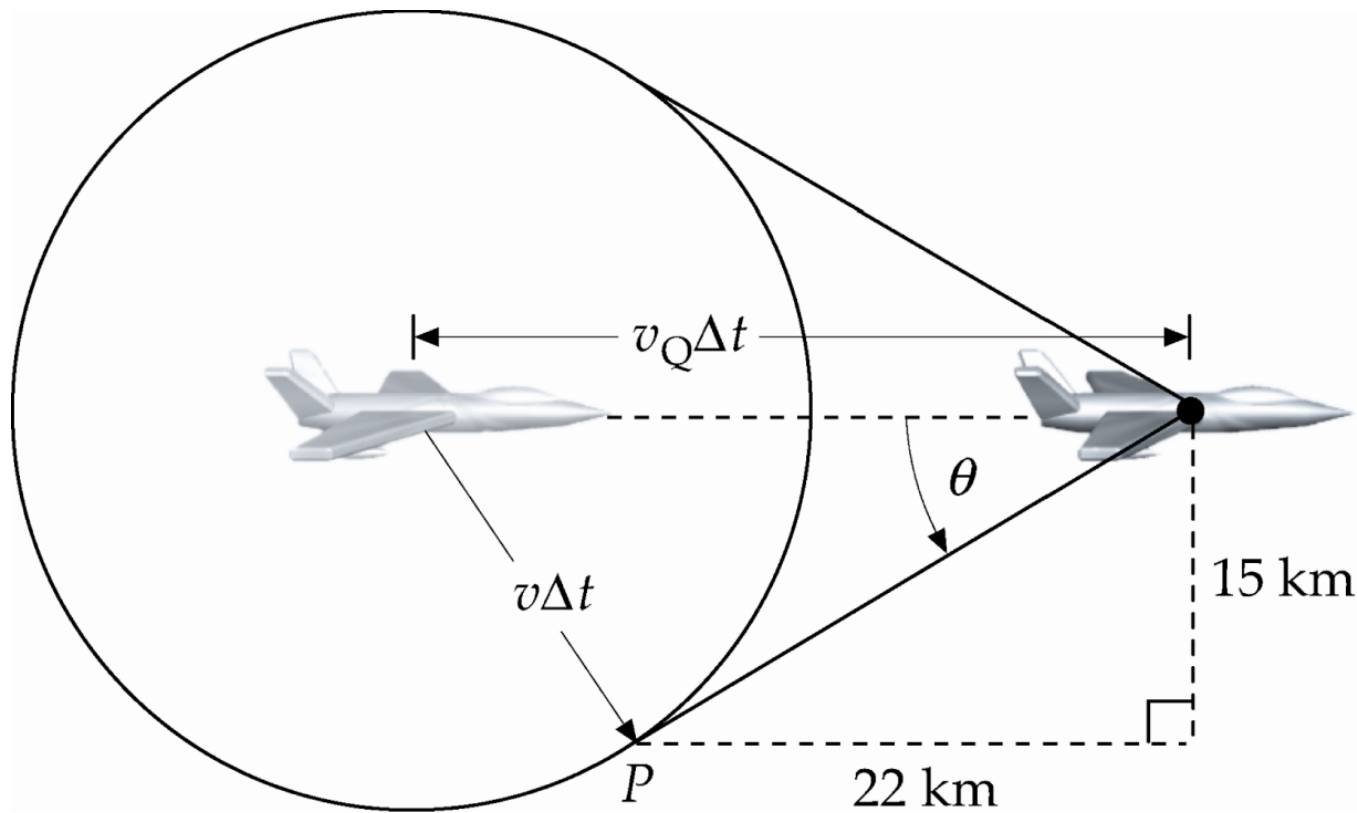
Der Überschallknall ist die hörbare Auswirkung der Stoßwelle (Verdichtungsstoß), welche auftritt, wenn sich ein Flugzeug mit Überschallgeschwindigkeit bewegt.

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“.



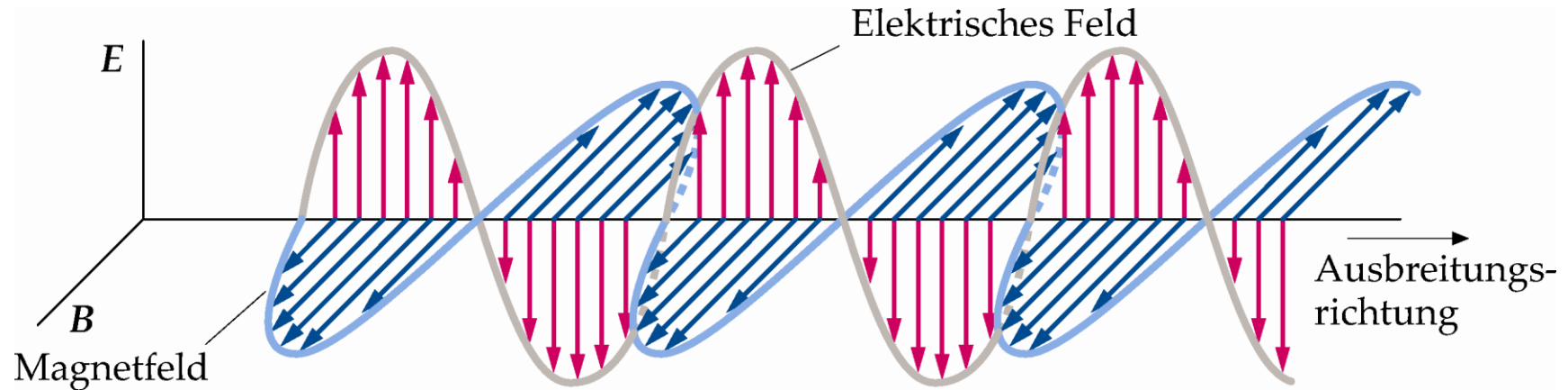
## Beispiel Überschallknall

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  $\lambda$  (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:

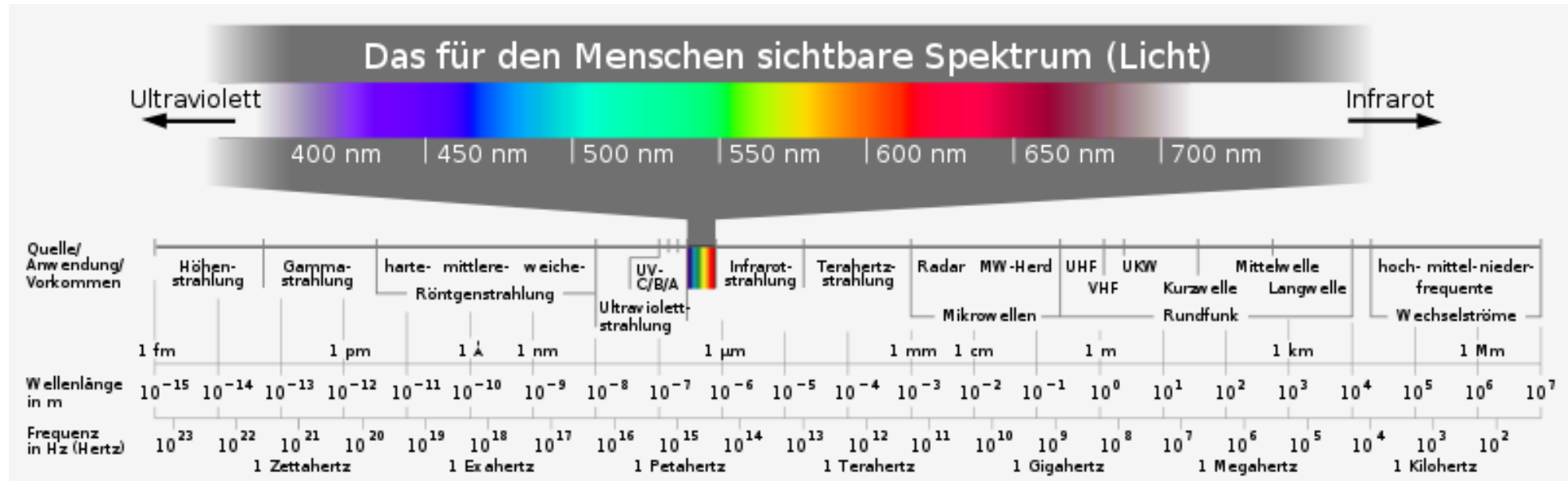
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad f = c/\lambda$$

wobei  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit (etwa 300.000.000 oder  $3 \cdot 10^8$  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 3,94 m
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:

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

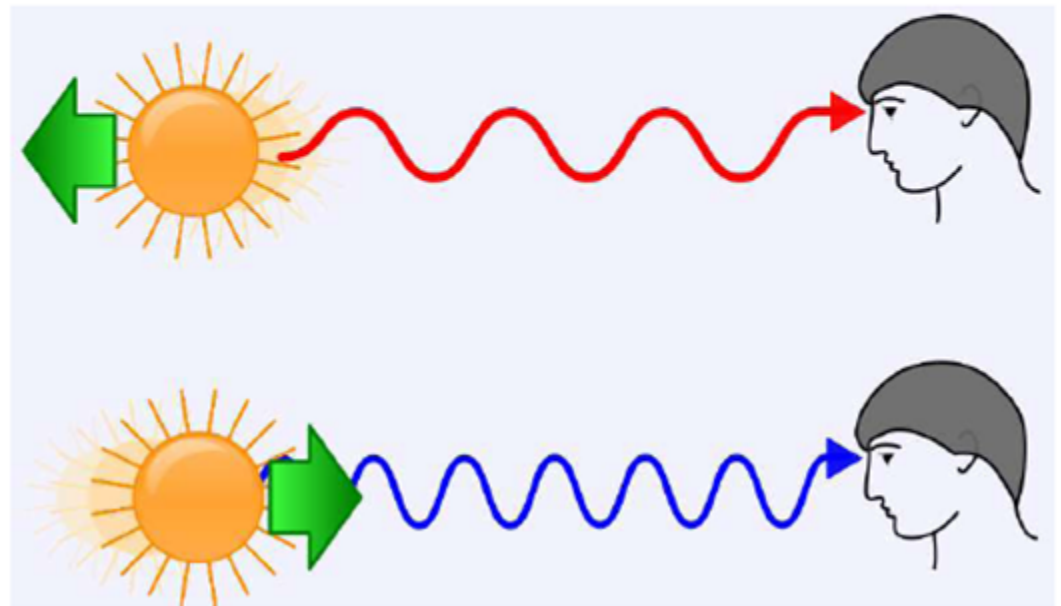
$$f_E = f_Q \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

# 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).



## Aufgaben

1. Eine Stimmgabel mit dem Kammerton a (440 Hz) wird gleichzeitig mit der a-Saite einer Gitarre angeschlagen. Die Saite ist leicht verstimmt, man hört 3,00 Schwebungen pro Sekunde. Die Gitarrensaite wird etwas fester gespannt, um die Frequenz leicht zu erhöhen. Dabei nimmt die Schwebungsfrequenz etwas zu. Welche Frequenz hatte die Saite am Anfang (bevor sie stärker gespannt wurde)?
2. Eine Stimmgabel, die bei 500 Hz schwingt, wird über eine teilweise mit Wasser gefüllte Röhre gehalten. Resonanzen treten auf, wenn der Wasserspiegel 16,0 cm, 50,5 cm, 85,0 cm und 119,5 cm vom oberen Ende der Röhre entfernt ist. Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit in Luft?

Lösungen:

1. 443 Hz
2. 345 m/s

## Aufgaben

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/>



Technische Hochschule Deggendorf – Edlmaistr. 6 und 8 – 94469 Deggendorf