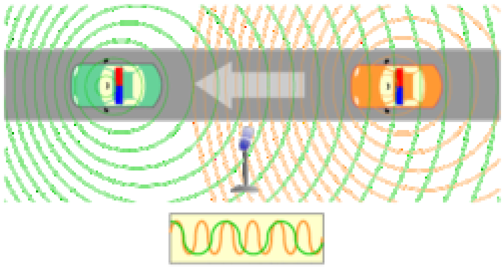
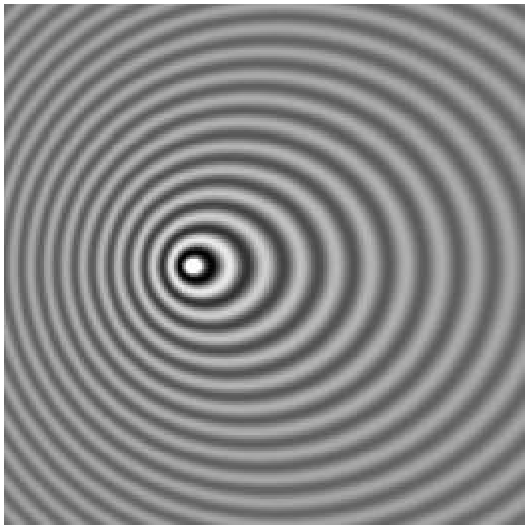
Der Doppler-Effekt



Dopplereffekt am Beispiel zweier sich bewegender Polizeiwagen und eines ortsfesten Mikrophons.



Bei der Erklärung des akustischen Dopplereffekts muss man unterscheiden, ob sich die Schallquelle, der Beobachter oder sogar beide relativ zur ruhenden Luft bewegen. Wir behandeln hier in diesem Skript nur die ersten beiden der drei Fälle.

Beobachter in Ruhe, Signalquelle bewegt

Als Beispiel soll angenommen werden, dass das Martinshorn des Krankenwagens Schallwellen mit einer Frequenz von 1000 Hz aussendet. Dies bedeutet, dass genau $\frac{1}{1000}\,s$ nach dem ersten Wellenberg ein zweiter Wellenberg nachfolgt. Die Wellen breiten sich mit der Schallgeschwindigkeit c = 340 $\frac{m}{s}$ aus. Solange der Krankenwagen steht, ist der Abstand der Wellenberge (also die Distanz, die der erste Wellenberg zurückgelegt hat, bis der zweite nachfolgt), 340 $\frac{m}{s}$ · 0,001 s = 0,34 m, was man als Wellenlänge λ bezeichnet. Für einen Beobachter an der Straße kommen diese Wellenberge zwar je nach Entfernung etwas zeitverzögert an, die Zeit zwischen zwei Wellenbergen ändert sich aber nicht, und damit auch nicht die wahrgenommene Tonhöhe (Frequenz f). Wie man aus obigem Zahlenbeispiel sieht, gibt es einen Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit, Wellenlänge und Frequenz, die sich formelmäßig als $c = \lambda \cdot f$ bzw. $f = \frac{c}{\lambda}$ darstellen lässt.

Die Situation ändert sich aber, wenn der Krankenwagen auf den Beobachter zufährt. Da sich der Wagen in der Zeit zwischen dem Aussenden der beiden Wellenbergen weiterbewegt, verkürzt sich deren Abstand (also die Wellenlänge) etwas, nämlich genau um den Weg, den der Wagen in der Zeit von $\frac{1}{1000}$ s zurücklegt (formelmäßig: $\boldsymbol{\lambda' = \lambda - \frac{v}{f}}$, wenn v die Geschwindigkeit des Wagens ist). Da sich beide Wellenberge mit derselben Schallgeschwindigkeit zum Beobachter bewegen, bleibt der verkürzte Abstand zwischen ihnen erhalten, und der zweite Wellenberg kommt nicht erst $\boldsymbol{\frac{1}{1000}\,s}$ nach dem ersten an, sondern schon ein wenig früher. Dadurch erscheint dem Beobachter die Frequenz (also die Tonhöhe) des Martinshornes höher.

Quantitativ erhält man die Frequenzänderung folgendermaßen (Gleichung 1):

$$\boldsymbol{f' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{\lambda - \frac{v}{f}} = \frac{c \cdot f}{\lambda \cdot f - v} = \frac{c}{c - v} \cdot f}$$

Bemerkung:
Physikalisch problematisch wird es, wenn die Geschwindigkeit v sich in der Nähe der Schallgeschwindigkeit befindet. Betrachte die Grenzwerte, wenn v kleiner als c ist, aber gegen c geht, wenn v größer als c ist (dann wird f' negativ) und gegen c geht, und wenn v = c ist.

Bewegt sich die Signalquelle mit Schallgeschwindigkeit, wird der Abstand zwischen den Wellenbergen praktisch null, sie überlagern sich und es kommt zu einer extremen Verdichtung der Luft (Schallmauerdurchbruch). Da so alle Wellenberge gleichzeitig beim Beobachter eintreffen, wäre das nach obiger Formel theoretisch eine unendlich hohe Frequenz - praktisch hört man keinen Ton einer bestimmten Frequenz, sondern den ***Überschallknall***.

Wenn der Krankenwagen am Beobachter vorbei gefahren ist, verhält es sich sinngemäß umgekehrt: der Abstand zwischen den Wellenbergen (Wellenlänge) vergrößert sich, und der Beobachter hört einen tieferen Ton. Rechnerisch gilt obige Formel genauso, man muss nur für v eine negative Geschwindigkeit einsetzen.
Oder anders formuliert:
Wenn sich der Sender mit der Geschwindigkeit v vom Beobachter weg bewegt, dann hört der Beobachter die niedrigere Frequenz:

$$\mathbf{f'' = \frac{c}{c + v} \cdot f}$$

Bewegt sich der Erreger am Beobachter vorbei, so stellt dieser einen Frequenzsprung fest:

$$\mathbf{\frac{f'}{f''} = \frac{\frac{c}{c - v} \cdot f}{\frac{c}{c + v} \cdot f} = \frac{c + v}{c - v}}$$

Aufgaben: bewegter Sender, ruhender Empfänger

Bemerkung: Bei allen Aufgaben beträgt die Schallgeschwindigkeit $c = 340\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

1. Berechnen Sie, mit welcher Geschwindigkeit sich eine Schallquelle
a) einem ruhenden Beobachter nähern muss, damit dieser die Oktave des ausgesandten Tones hört.
b) von einem ruhenden Beobachter entfernen muss, damit dieser den ausgesandten Ton um eine Oktave tiefer hört.
Bemerkung: Die Frequenz der Oktave ist doppelt so groß wie die des Tons.

2. Eine Schallquelle bewegt sich mit der Geschwindigkeit v unmittelbar an einem ruhenden Beobachter vorbei. Im Augenblick der Begegnung sinkt die vom Beobachter wahrgenommene Tonhöhe um eine Quinte. Berechnen Sie die Geschwindigkeit v. Bemerkung: Die Frequenz der Quinte ist $\frac{3}{2}$ mal so groß wie die des Tons.

3. Ein Radfahrer fährt mit läutender Laufglocke unmittelbar an einem ruhenden Beobachter vorbei. Die Geschwindigkeit des Radfahrers beträgt $6\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. Bei Annäherung des Radfahrers nimmt der Beobachter die Frequenz f ‘ wahr, bei Entfernung des Radfahrers nimmt er die Frequenz f ‘ ‘ wahr. Berechnen Sie das Verhältnis $\frac{f'}{f''}$.

4. Berechnen Sie, welche Frequenzen ein Fußgänger, an dem ein mit einem Ton mit der Frequenz 1 500 Hz pfeifender Triebwagen mit der Geschwindigkeit $120\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$ vorbeifährt, vorher und nachher hört.

5. Ein ruhender Beobachter hört das Signal eines sich auf ihn zu bewegenden Zuges mit einer Frequenz von 680 Hz. Das Horn bläst mit einer Frequenz von 630 Hz. Mit welcher Geschwindigkeit in $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ fuhr der Zug?

6. Eine zunächst ruhende, punktförmige Schallquelle erzeugt Schallwellen mit einer Wellenlänge von 1,3cm. Bewegt man nun den Wellenerreger relativ zur Luft, so misst man vor dem Erreger eine Wellenlänge von 0,8cm.

a) Berechnen Sie das Verhältnis der Geschwindigkeit des Erregers zur Schallgeschwindigkeit.

b) Berechnen Sie die Wellenlänge, die man hinter dem Erreger beobachtet.

7. Eine Schallquelle, die einen Ton mit der Frequenz 1 000 Hz aussendet, wird vom Punkt A des Erdbodens mit konstanter Geschwindigkeit 20 $\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}}$ senkrecht nach oben gezogen. In 85m Höhe bleibt der Sender für 1,5s in Ruhe und fällt dann frei herab bis zum Punkt A.

a) Berechnen Sie die kleinste und die größte Frequenz, die man im Punkt A beobachtet. Geben Sie an, welche anderen Frequenzen noch auftreten.

b) Berechnen Sie, zu welchem Zeitpunkt nach dem Start sich die in A beobachtete Frequenz zum ersten Mal ändert.

8. Eine einschaltbare Schallquelle bewegt sich mit der Geschwindigkeit $\frac{c}{2}$ direkt auf einen ruhenden Beobachter zu. Zum Zeitpunkt $t = 0s$ beginnt die Schallquelle mit der Abstrahlung eines Tones der Frequenz f . Sie befindet sich in diesem Augenblick noch in einer Entfernung von 2 380m vom Beobachter. Untersuchen Sie genau, was der Beobachter im Zeitintervall $0 \leq t \leq 15s$ wahrnimmt.

9. Eine mit 400 Hz schwingende Stimmgabel fällt in einen tiefen Schacht. Wie tief ist die Stimmgabel gefallen, wenn oben eine Frequenz zu hören ist, die sich um 10% von der Original-Frequenz unterscheidet?

10. Bei einem Marschmusikwettbewerb marschiert eine Blaskapelle an einer Jury vorbei. Wie schnell müssten die Musiker marschieren, damit die Jury-Mitglieder die Musik nach dem Vorbeimarsch um einen halben Ton tiefer hören würden als beim Herannahen der Kapelle?

Hinweis: Das Frequenzverhältnis zweier Töne, die sich um einen halben Ton unterscheiden, beträgt $\sqrt[12]{2}$.

11. Eine punktförmige Schallquelle, die einen Ton mit der Frequenz 1 600 Hz sendet, rotiert auf einem horizontalen Kreis mit dem Radius 2m mit 3 Umdrehungen pro Sekunde. Berechnen Sie, zwischen welchen Frequenzen die Tonhöhe für einen seitlich weiter entfernt stehenden Beobachter schwankt.

12. Ein Modellflugzeug durchfliegt immer wieder mit konstanter Bahngeschwindigkeit v eine ebene, horizontale, kreisförmige Bahn mit Radius r. Der Motor des Flugzeuges erzeugt einen Ton mit konstanter Frequenz f_0. Ein ruhender Beobachter befindet sich in der Bahnebene; seine Entfernung vom Flugzeug ist groß gegenüber dem Bahnradius. Mit einer geeigneten Anordnung misst er die an seinem Ort vernehmbare Frequenz f, die der vom Motor hervorgerufene Ton hat, in Abhängigkeit von der Zeit t.

Der Beobachter misst, dass sich die von ihm vernommenen Frequenzen mit der zeitlichen Periode $T = 31{,}42\,s$ wiederholen. Die vom Beobachter registrierte niedrigste Frequenz beträgt $f_{min} = 236{,}1$ Hz, die höchste $f_{max} = 265{,}6$ Hz.

Berechnen Sie aus dem Wissen des Beobachters um die wirklichen Verhältnisse und aus seinen Messungen die Flugzeuggeschwindigkeit v, die Motorfrequenz f_0 und den Bahnradius r.

13. Ein für seine Gutmütigkeit bekannter Indianerhäuptling hatte eines Tages die Nase voll und schubste deshalb seine Schwiegermutter in den *Grand Canyon*. Als Vorsitzende des örtlichen Indianerchores entsprechend geschult, stieß diese daraufhin pausenlos den Kammerton a aus (für die musikalisch weniger Gebildeten: 440 Hz). Das letzte, was der Häuptling noch (mehr oder weniger entzückt) wahrnahm, war allerdings ein Ton der Frequenz 330 Hz.
a) Mit welcher Geschwindigkeit schlug die Schwiegermutter auf?
b) Wie tief ist der *Grand Canyon* an dieser Stelle?
c) Wie lange hat die Schwiegermutter gesungen?
d) Wie lange hat der Häuptling sie gehört?

Lösungen

1.a) $v = \frac{1}{2}c$ b) $v = c$

2. $v = \frac{1}{5}c$

3. $\frac{f'}{f''} \approx 1{,}036$

4. vorher: $f' \approx 1\,663 Hz$ nachher: $f'' \approx 1\,366 Hz$

5. $v = 25\,\frac{m}{s}$

6.a) $\frac{v}{c} = \frac{5}{13}$ b) λ=1,8 cm

7.a) Während des Hochziehens hört man $f_{min} \approx 944$ Hz. Während des Stillstandes oben hört man 1 000 Hz. Beim Fallen erhöht sich die Frequenz kontinuierlich bis auf $f_{max} \approx 1\,137$ Hz.
b) Zum Zeitpunkt $t = 4{,}25$s . Dann erreicht die Schallquelle die Höhe 85m.

8. Für $0 \leq t < 7$s hört der Beobachter nichts. Für $7s \leq t < 14s$ hört der Beobachter einen Ton der doppelten Frequenz 2f. Für $14s \leq t \leq 15s$ hört der Beobachter einen Ton mit der Frequenz $\frac{2}{3}f$.

9. Ungefähr 72,74 m

10. Ungefähr $9{,}81\,\frac{m}{s}$.
Bemerkung: Die schnellsten Menschen auf der Welt laufen (ohne Mitschleppen von Instrumenten) etwa $10\,\frac{m}{s}$.

11. Zwischen ungefähr 1 440 Hz und 1 800 Hz

12. Flugzeuggeschwindigkeit $v \approx 20\,\frac{m}{s}$
Bahnradius $\approx$ 100m
Motorengeräuschfrequenz $\approx$ 250 Hz

13.a) $v \approx 113\,\frac{m}{s}$ b) Falltiefe $\approx$ 655m c) $t \approx 11{,}55$s d) $t_{ges} \approx 13{,}48$s

Beobachter bewegt, Signalquelle in Ruhe

Auch bei ruhender Schallquelle und bewegtem Beobachter tritt ein Doppler-effekt auf, allerdings ist hier die Ursache eine andere: Die Wellenberge kommen schneller hintereinander bei dem Beobachter an, weil sich dieser auf die Quelle zu bewegt:
Für den Beobachter ist die Zeit zwischen dem Auftreffen zweier hintereinander folgender Wellenberge nicht mehr $T = \frac{\lambda}{c}$ wie für einen ruhenden Beobachter, sondern kürzer, weil sich ihm die Wellenberge mit der addierten Geschwindigkeit (c + v) statt nur mit c nähern. Deshalb gilt: $T' = \frac{\lambda}{c+v}$.

Damit folgt: $\frac{\mathrm{T}'}{\mathrm{T}} = \frac{\lambda}{c+v} \cdot \frac{\mathrm{c}}{\lambda} = \frac{c}{c+v}$.

Weil die Frequenzen die Kehrwerte der Periodendauern sind, folgt sofort:
$\frac{f'}{f} = \frac{c+v}{c}$ bzw. $f' = \frac{c+v}{c} \cdot f = f \cdot (1 + \frac{v}{c})$ (Gleichung 2)

Interessant ist hier Folgendes: Selbst wenn sich der Beobachter mit vielfacher Schallgeschwindigkeit auf die Schallquelle zu bewegt, so hört er immer noch einen Ton (Ausnahme: Die Tonfrequenz befände sich schon im Bereich des Ultraschalls). Beispiel: Der Beobachter bewege sich mit v = 10c auf die Schallquelle zu. Dann hört er eine Frequenz von 11·f.

Auch für den Fall eines sich entfernenden Beobachters ergibt sich die entsprechende Formel durch Einsetzen einer negativen Geschwindigkeit:
$f'' = \frac{c-v}{c} \cdot f = f \cdot (1 - \frac{v}{c})$

Interessant ist hier der Fall, wenn sich der Beobachter schneller als mit Schall-geschwindigkeit von der Schallquelle entfernt. Rein mathematisch würde folgen (wenn v > c), dass $f' < 0$ wäre. Physikalisch bedeutet das natürlich, dass der Schall den Beobachter nicht mehr erreicht, und der Beobachter diesen Schall deshalb auch nicht hören kann.

Wie man sieht, sind die Formeln (1) auf der Seite 2 und die Gleichung (2) auf dieser Seite nicht identisch für die Frequenz f' (Beobachter bzw. Quelle bewegt sich). Erklärung: Die <u>relative</u> Geschwindigkeit der Schallwellen zwischen Quelle und Beobachter sind in diesen beiden Fällen unterschiedlich groß.

Bemerkung: Interessant ist dieser Aspekt für den optischen Doppler-Effekt: Stichwort: Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

Bewegt sich der sich bewegende Beobachter an der ruhenden Schallquelle vorbei, so stellt der Beobachter auch hier einen Frequenzsprung fest:

$$\mathbf{\frac{f'}{f''} = \frac{\frac{c+v}{c} \cdot f}{\frac{c-v}{c} \cdot f} = \frac{c+v}{c-v}}$$

Interessant ist, dass hier dieselbe Gleichung gilt wie für den Fall, dass die Quelle sich bewegt und der Beobachter ruht!

Aufgaben: ruhender Sender, bewegter Empfänger

Bemerkung: Bei allen Aufgaben beträgt die Schallgeschwindigkeit $c = 340\,\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}}$.

1. Der Ton einer Autohupe hat eine Frequenz von 400 Hz . Welche Frequenz hört man, wenn man sich mit einer Geschwindigkeit $v = 34\,\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}}$ auf das ruhende Auto zubewegt?

2. An einem Strand bewegen sich Meereswellen mit einer Geschwindigkeit $c = 8{,}9\,\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}}$ und der Wellenlänge 15 m in Richtung Strand. Auf einem Boot, das vor der Küste ankert, befindet sich ein Beobachter.
a) Welche Wellenfrequenz misst der Beobachter?
b) Nach dem Lichten des Ankers entfernt sich das Boot mit einer Geschwindigkeit von $15\,\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}}$ vom Strand. Welche Wellenfrequenz misst der Beobachter nun?

3. Die Hupe eines stehenden Autos besitzt eine Frequenz von 440 Hz. Welche Frequenz nimmt ein Autofahrer wahr, der sich mit $100\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$
a) nähert? b) entfernt?

4. Ein Auto fährt praktisch geradlinig auf ein Polizei-Radargerät zu. Das ruhende Radargerät sendet eine Ultraschallwelle der Original-Frequenz f in Richtung des Autos aus. Das Auto empfängt eine Welle mit etwas höherer Frequenz f_{Auto} . Diese Welle wird vom Auto reflektiert und gelangt wieder zum Ultraschall-Radargerät zurück, wo sie als Welle mit einer noch etwas höheren Frequenz f_R registriert wird. Das Radargerät vergleicht diese Frequenz f_R mit der Frequenz f der ausgesendeten Welle.
Leiten Sie eine Formel her, mit der man die Geschwindigkeit v des Autos aus den Frequenzen f und f_R berechnen kann!

5. Berechnen Sie, mit welcher Geschwindigkeit sich ein Beobachter
a) einer ruhenden Schallquelle nähern,
b) von einer ruhenden Schallquelle entfernen muss,
damit er den ausgesandten Ton um eine Oktave höher bzw. tiefer hört.
Bemerkung: Die Frequenz der Oktave ist doppelt so groß wie die des Tons.

6. Ein Beobachter bewegt sich mit der Geschwindigkeit v unmittelbar an einer ruhenden Schallquelle vorbei. Im Augenblick der Begegnung sinkt die vom Beobachter wahrgenommene Tonhöhe um eine Quarte. Berechnen Sie die Geschwindigkeit v !

Bemerkung: Man muss die Frequenz eines Grundtones mit dem Faktor $\left(\sqrt[12]{2}\right)^5$ multiplizieren, um die Frequenz der Subdominante (also Quartensprung) zu erhalten.

7. Es geht wieder um den schon früher erwähnten Indianerhäuptling und seine Schwiegermutter. In den Zeiten, als die beiden sich noch ein wenig besser verstanden, stand die Schwiegermutter mitten in der Prärie und übte den Gesang des Kammertons a (bekanntlich 440 Hz), wodurch sie allerdings das für das Überleben des Stammes notwendige Wild verscheuchte. Der darüber ergrimmte Häuptling ritt mit seinem Pferd direkt auf sie zu. Im letzten Moment riss er (warum auch immer) jedoch sein Pferd ein wenig zur Seite und galoppierte an seiner Schwiegermutter vorbei. Dabei nahm er voller Erstaunen den durchaus wohlklingenden Frequenzsprung von einem ganzen Ton (also $\frac{f'}{f''} = \left(\sqrt[12]{2}\right)^2$) wahr. Welche Geschwindigkeit besaß sein Pferd?

Lösungen

1. $f' = 440Hz$

2. a) $f \approx 0{,}593Hz$ b) $f' \approx 1{,}593Hz$

3. a) $f' \approx 475{,}95Hz$ b) $f'' \approx 404{,}05Hz$

4. Es gibt zwei mögliche Lösungswege: Entweder man berechnet (zunächst) die Differenz $f_R - f$ oder man berechnet das Verhältnis $\frac{f_R}{f}$. Aus beiden Teilergebnissen folgt schnell, dass $v = \frac{f_R - f}{f_R + f} \cdot c$

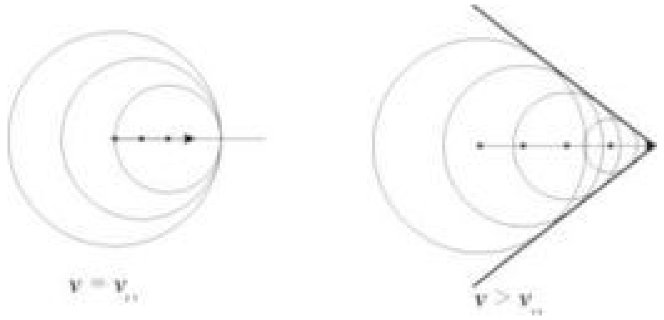
5. a) v = c b) v = 0,5c

6. $v \approx 48{,}76\frac{m}{s}$

7. $v \approx 19{,}62\frac{m}{s} \approx 70{,}6\frac{km}{h}$

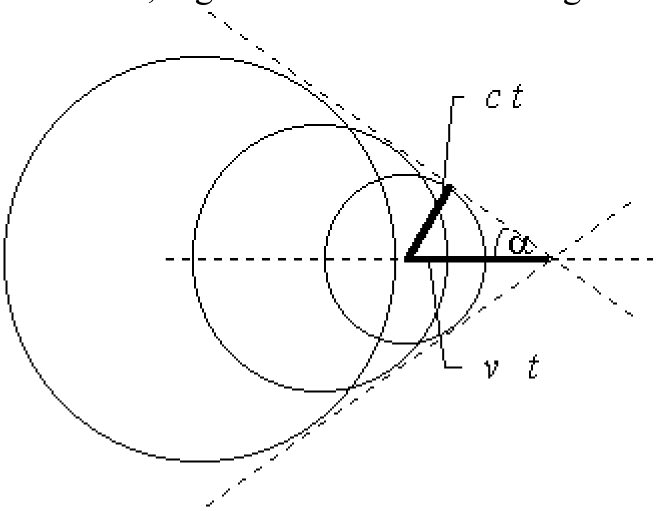
Bemerkung: Die Viertelmeile ist auch heute noch die populärste Renndistanz für American Quarter-Horse-Rennen. Die besten Pferde legen diese Distanz in weniger als 21 Sekunden zurück und kommen damit auf Geschwindigkeiten von ca. 69 bis zu 88 $\frac{km}{h}$.

Sender bewegt sich mit v > c



Machscher Kegel

Wenn sich eine Schallquelle mit *v* bewegt und Wellen aussendet, die sich mit *c* ausbreiten, ergibt sich bei *v* > *c* der sog. *Machsche Kegel*:



Für den sog. ***halben Öffnungswinkel α*** gilt: $\sin\alpha = \frac{c}{v}$

Aufgabe 1

Ein Flugzeug fliegt mit 2,5facher Schallgeschwindigkeit in einer Höhe von 5000 m.

a) Wie groß ist der Öffnungswinkel des Machkegels?

b) Wie weit ist das Flugzeug von einem ruhenden Beobachter auf der Erde entfernt, wenn dieser den Knall hört?

Aufgabe 2

Ein Flugzeug fliegt in 4000m Höhe mit dreifacher Schallgeschwindigkeit direkt über einen Beobachter hinweg. Wann hört dieser den Überschallknall, gerechnet von dem Zeitpunkt an, als das Flugzeug genau über ihm war?

Aufgabe 3

Ein Flugzeug fliegt in 4000m Höhe direkt über einen Beobachter hinweg. Dieser hört den Überschallknall 8,5s nachdem das Flugzeug genau über ihm war. Berechne die Geschwindigkeit des Flugzeugs.

Ist die Schallgeschwindigkeit überschritten (Mach größer 1), breitet sich von der Flugzeugnase und den Tragflächen ausgehend kegelförmig nach hinten der so genannte Machsche Kegel aus. Bei ausreichender Luftfeuchtigkeit kommt es dabei zum sog. *Wolkenscheibeneffekt*.

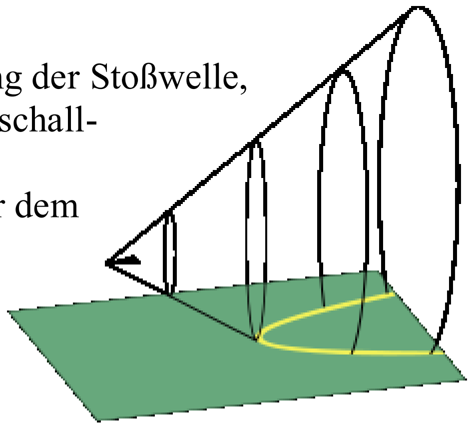
Wolkenscheibeneffekt

Ein Northrop F/A-18 Hornet im Überschallflug mit Wolkenscheibeneffekt

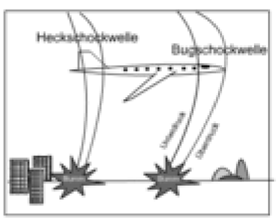
Der **Wolkenscheibeneffekt** tritt bei Überschallgeschwindigkeit dadurch auf, dass die einer Stoßfront folgende Unterdruckphase die Luft abkühlt und dadurch den Wasserdampf der Luft zur Kondensation bringt. Nach dem Durchgang des Flugkörpers herrscht wieder Normaldruck, wodurch der Nebel sofort wieder verschwindet. Da die Unterdruckzone im hinteren Bereich des Flugkörpers ein statisches Phänomen ist (bezogen auf den Flugkörper), scheint die Wolkenscheibe den Flugkörper zu begleiten. Ähnliche Effekte sind auch bei Druckwellen von Explosionen zu beobachten.

Überschallknall

Der Überschallknall ist die hörbare Auswirkung der Stoßwelle, welche auftritt, wenn sich Flugzeuge mit Überschallgeschwindigkeit bewegen.
Die Druckwelle breitet sich kegelförmig hinter dem Überschallflugkörper aus. Der Verlauf des Bodenkontakts der Druckwelle ist hyperbelförmig.



Überschall-Doppelknall



Diese Stoßwelle hat die Form zweier Kegel, einer an der Flugzeugnase und einer am Flugzeugheck. Die Kegel öffnen sich entgegen der Flugrichtung. Bei kleinen Flugzeugen oder Projektilen laufen diese dicht genug zusammen, um als einzelner

Knall wahrgenommen zu werden, bei großen Flugzeugen sind die Schockwellen klar zu unterscheiden und verursachen einen "Doppelknall" im Abstand weniger Zehntelsekunden. Auch wenn der Knall nur einmalig wahrgenommen wird, so darf man nicht zu dem Trugschluss kommen, es entstehe nur ein einziger Knall, wenn die Schallmauer durchbrochen wird. Die Tangente aller Kreise des Kegels, also sozusagen die "Seite" des Kegels, bestimmt den Zeitpunkt des Knalls. Wenn sie den Empfänger erreicht, ist der Knall zu hören, danach z.B. die Motorengeräusche. Währenddessen bewegt sich die Tangente allerdings fort, weshalb ein weiterer Empfänger in einiger Entfernung ebenfalls von ihr erreicht wird und einen weiteren Knall hört. Der Knall beim Durchbrechen der Schallmauer wird lediglich (verzögert um die Flughöhe, also bei 330 Metern um eine Sekunde. Das Flugzeug ist dann, je nach Geschwindigkeit, schon entsprechend weiter) wahrgenommen, sobald das Flugobjekt sich senkrecht über dem Beobachter befindet; der Knall eines sich mit Überschallgeschwindigkeit bewegenden Objekts wird "nachgeschleppt".