

# Akustische Phonetik

## Teil 1

Uwe Reichel, Phil Hoole

*IPS, LMU München*

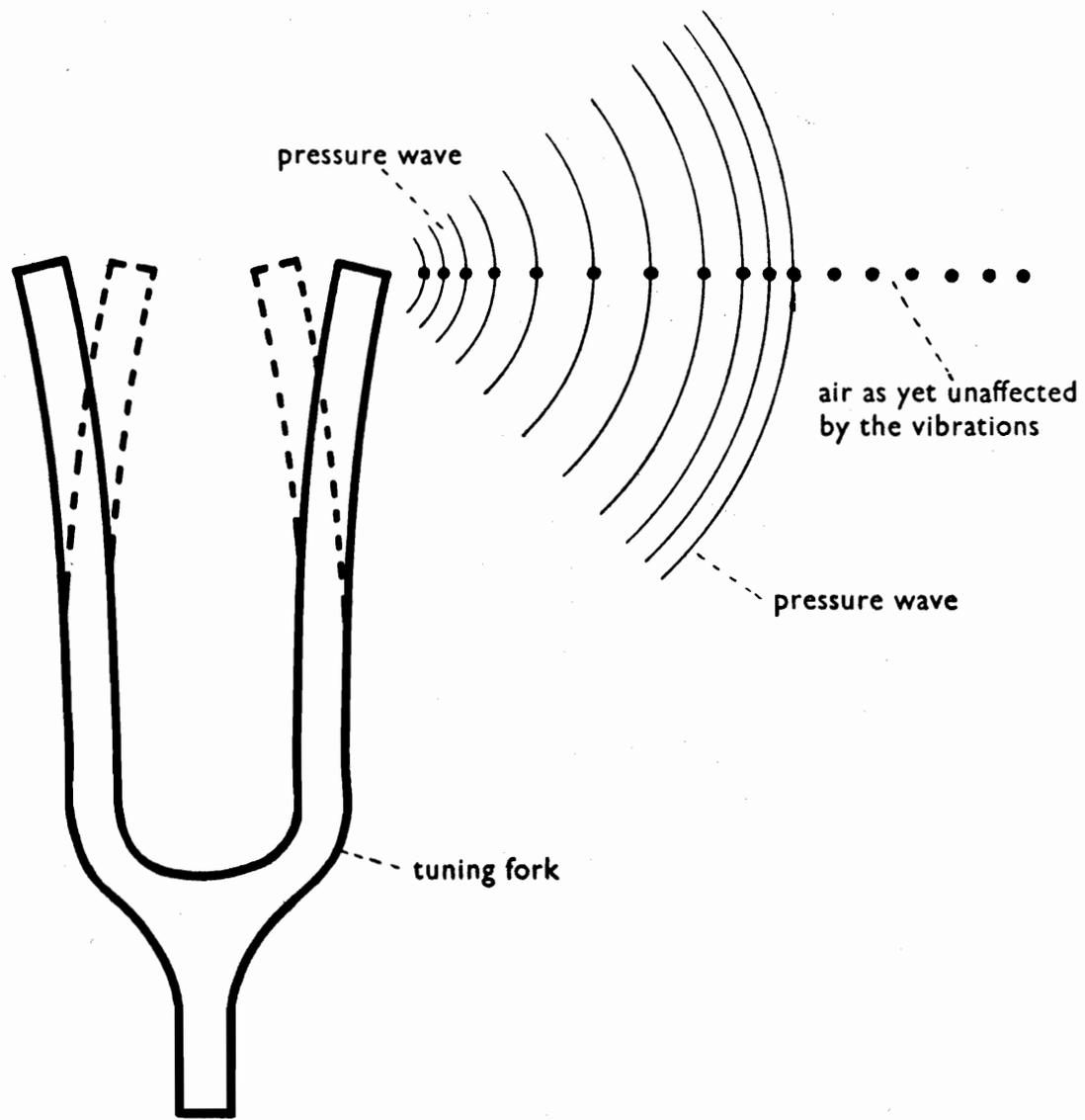
# Inhalt

- Schall
- Schwingung
- Zeitsignal
- Schalldruck, Schallschnelle
- Sinoidalschwingung
- Schallarten
- Periodische Signale
- zeitliche vs. spektrale Darstellung
- Typen von Spektren
- Überführung vom Zeit- in den Spektralbereich: Fourier-Analyse

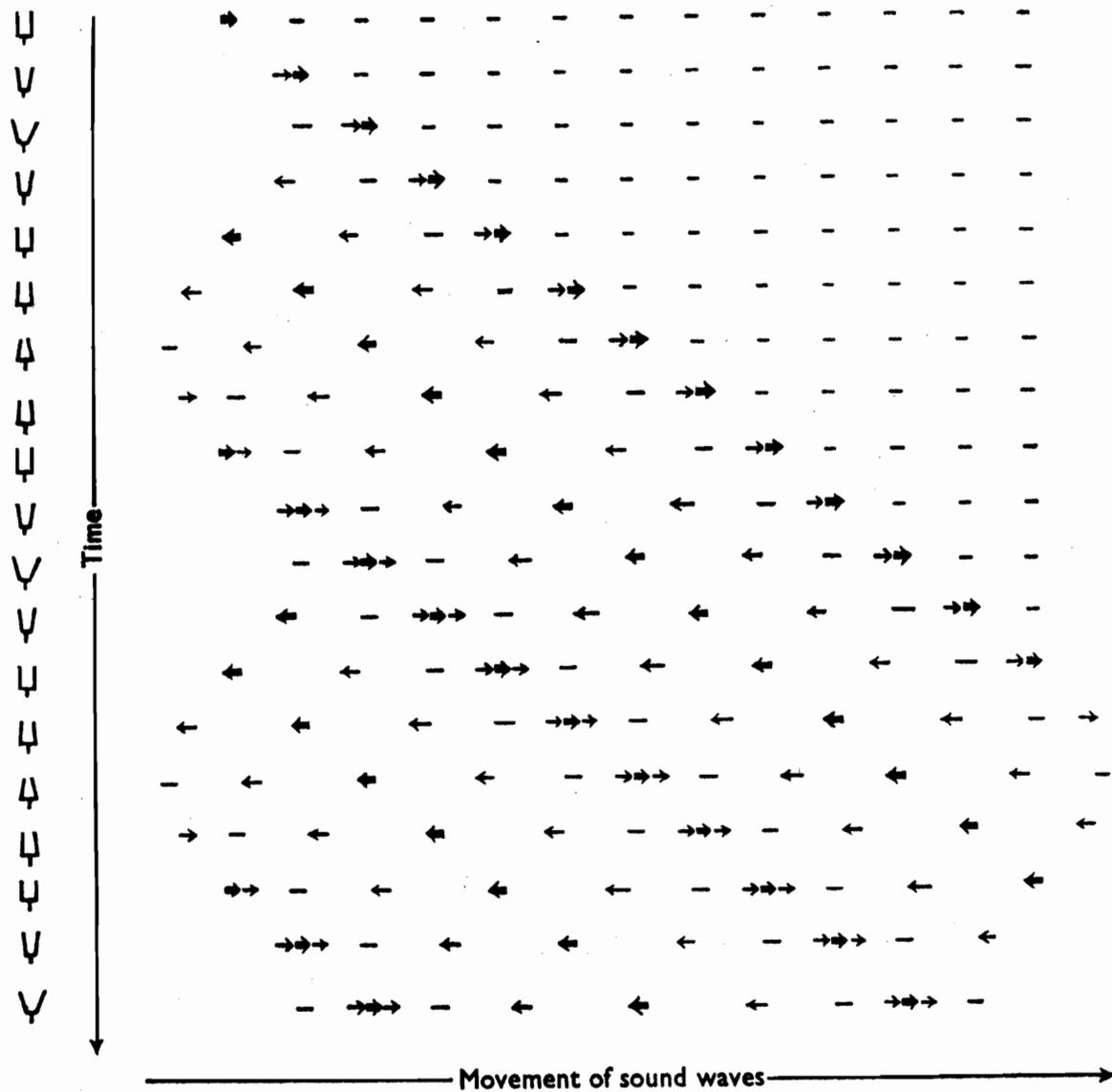
# Schall

- **Schall:** Ausbreitung von lokalen Druckschwankungen in einem elastischen Medium (z.B. Luft) als Welle
- **Welle:** Fortpflanzung von Schwingungen (hier Druckschwankungen)

- Entstehung und Ausbreitung von Schall:
  - Eine Schallquelle (z.B. Stimmgabel) verursacht in ihrer unmittelbaren Umgebung Luftdruckschwankungen (= **Schalldruck**)
  - Dadurch dass die schwingenden Luftmoleküle mit den benachbarten Molekülen interagieren und diese somit ebenfalls in Schwingung versetzen, pflanzen sich die lokalen Luftdruckschwankungen (= der Schalldruck) fort.
  - Im Medium Luft schwingen die Teilchen in **Ausbreitungsrichtung** des Schalls. Die Schwingung pflanzt sich damit in Form einer sog. **Longitudinalwelle** mit Schallgeschwindigkeit (ca. 340 m/s) fort.  
(Bei Transversalwellen wie Wasser- oder Radiowellen schwingen die Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.)



Eine schwingende Stimmgabel führt zu lokalen Luftdruckschwankungen (Schalldruck), die sich fortpflanzen. (aus Ladefoged, 1962, Fig. 1.2)



# Bewegung der Luftmoleküle im Zuge der fortschreitenden Welle

(aus Ladefoged, 1962, Fig. 1.3)

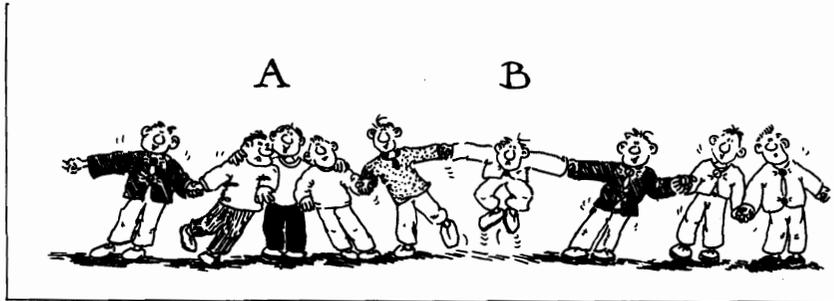


Abb. 3: Personen beim Schunkeln. Neigt sich die Person am linken Rand nach rechts, wird sich etwas später die neben ihr stehende Person ebenfalls nach rechts neigen usw. Nach einer Weile neigt sich auch die Person am rechten Rand nach rechts. D. h. das 'nach-rechts-neigen' zieht sich mit einer gewissen Geschwindigkeit über die ganze Strecke hin, obwohl sich jede einzelne Person nicht vom Fleck bewegt. Die *Ausbreitungsgeschwindigkeit* des 'nach-rechts-neigen' ist unabhängig davon, mit welcher *Schnelle* sich eine einzelne Person hin- und herneigt. In dieser Momentaufnahme sind die Personen im Teil 'A' dichter zusammen als im Teil 'B'.



Abb. 5: Die *la Ola* Welle als Beispiel für eine Transversalwelle: Personen richten sich auf und hocken sich nieder, wobei diese Bewegung der Personen in der *vertikalen* Richtung zu einer Ausbreitung der Welle in *horizontaler* Richtung führt, also senkrecht zur Bewegungsrichtung der Personen. Beim Schunkeln in Abb. 3 dagegen ist die Bewegungsrichtung der Personen horizontal, wie auch die Ausbreitungsrichtung der Welle.

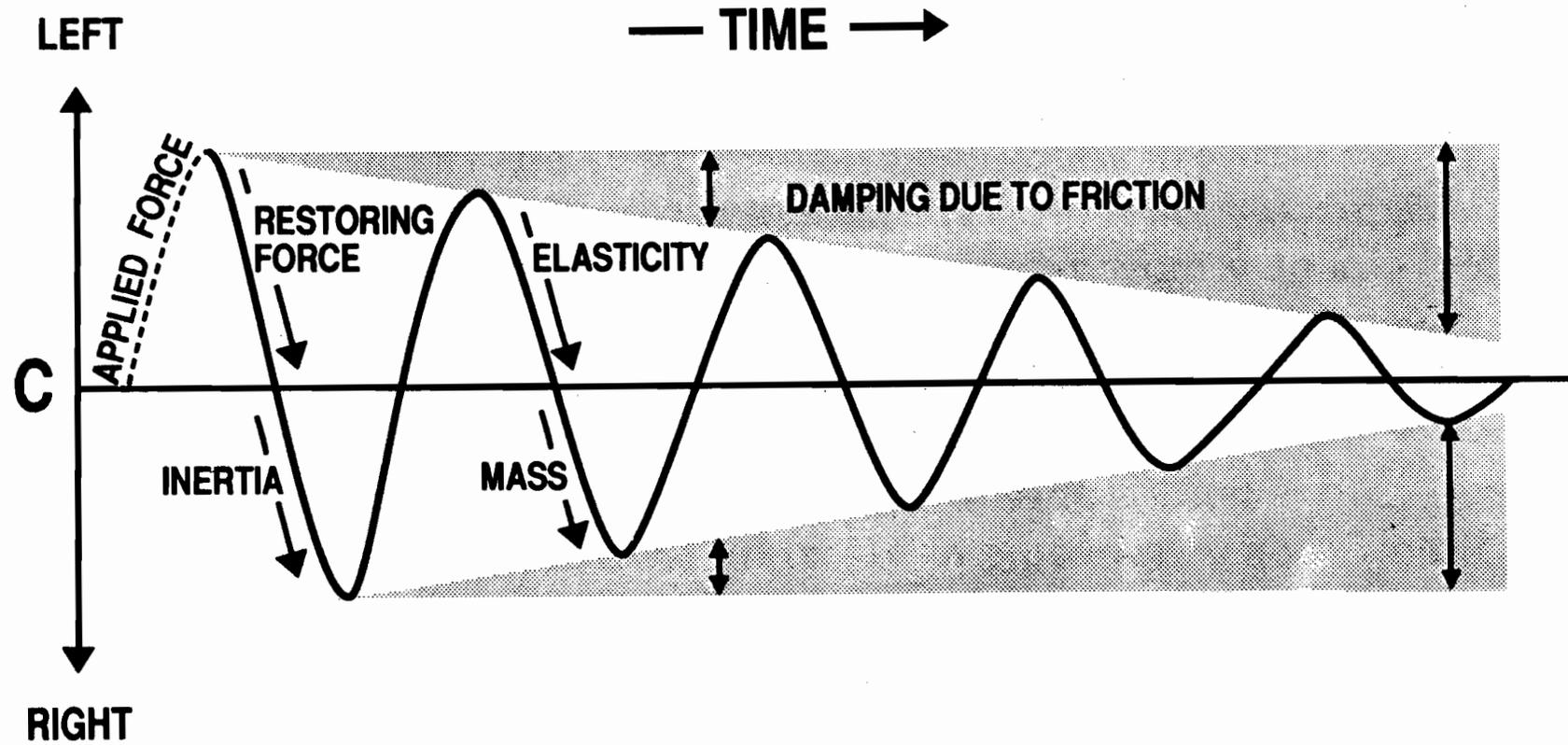
Longitudinalwellen (links) vs. Transversalwellen (rechts)  
 (aus Reetz, 2003, Abb. 3 and 5)

# Schwingung

- **Schwingung:** *Verlauf einer Zustandsänderung eines Systems, das durch eine Störung aus dem Gleichgewicht gebracht wird, woraufhin rücktreibende Kräfte das Gleichgewicht wieder herzustellen versuchen.*
  1. Ein Teilchen wird durch eine auf es einwirkende Kraft (die Schallquelle) aus seiner Ruhelage herausbewegt.
  2. Elastische Rückstellkräfte ziehen es wieder Richtung Ruhelage zurück.
  3. Aufgrund seiner Trägheit bewegt sich das Teilchen aber über die Ruhelage hinaus solange weiter, bis die erneut einsetzenden Rückstellkräfte größer sind als die Trägheit des Teilchens.  
Go to 2

- **Masse-Feder-Modell:**  
Masse -- Trägheit; Feder -- Rückstellkräfte
- Ein Schwingungsdurchgang wird als **Periode** bezeichnet.
- Die zeitabhängige Abweichung des Teilchens von seiner Ruhelage heißt Amplitude (im Falle von Schall ist das der **Schalldruck**).
- Nimmt die Amplitude im Laufe der Schwingung (aufgrund von **Reibungskräften**) ab, so wird die Schwingung als **gedämpft** bezeichnet.

DISPLACEMENT FROM CENTER (C)  
RESTING POSITION



Gedämpfte Schwingung  
aus Gelfand, 1990, Fig. 1.3

## Schwingung eines Teilchens im zeitlichen Verlauf:

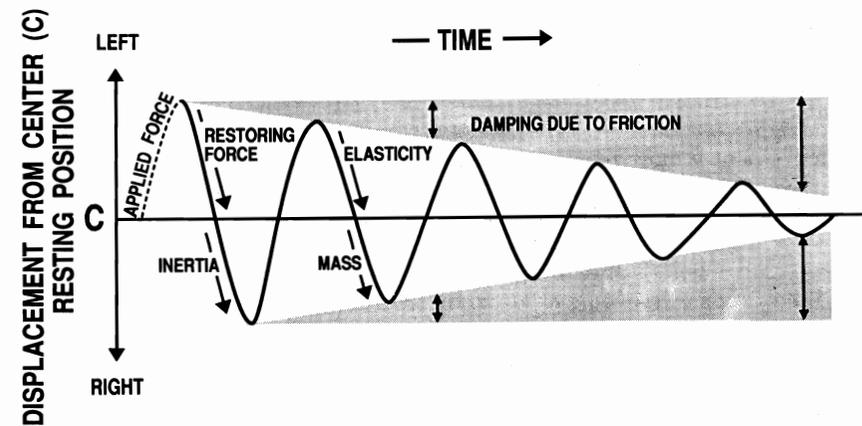
Durch eine angelegte Kraft (*applied force*) wird es aus seiner Ruhelage herausbewegt.

Rückstellkräfte (= Elastizität; *restoring force*, *elasticity*) ziehen es wieder Richtung Ruhelage zurück.

Auf Grund seiner Masse (*mass*) wirken Trägheitskräfte (*inertia*) auf das Teilchen.

Daher bewegt es sich über seine Ruhelage hinaus solange weiter, bis die Rückstellkräfte die Trägheit überwiegen.

Im zeitlichen Verlauf sorgen Reibungskräfte (*friction*) für eine Dämpfung der Schwingung, also einer Abnahme der Amplitude.

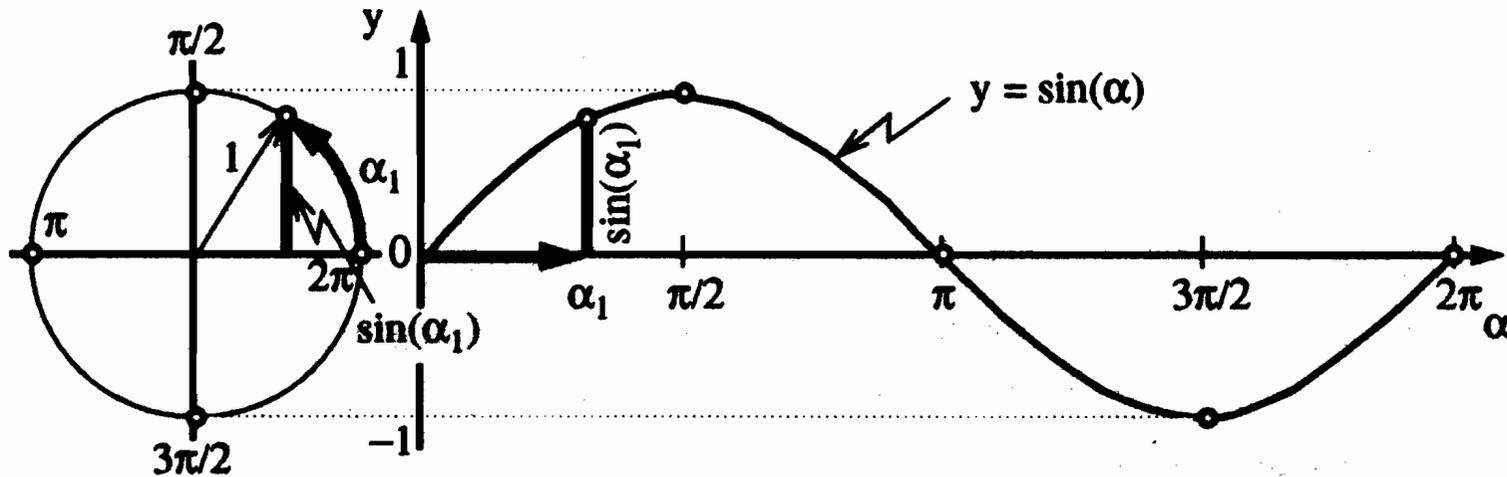


# Zeitsignal

- Durch Messen von Schall **in einem Raumpunkt** (z.B. durch ein Mikrofon) erhält man ein **Zeitsignal**: einen sich in diesem Raumpunkt über die Zeit ändernden Schalldruck.
- Wir erhalten also einen Schalldruckverlauf in Abhängigkeit der Zeit.
- Dieser Schalldruck entspricht der zeitveränderlichen **Amplitude** einer Schwingung.
- Die Anzahl der Schwingungsdurchgänge pro Sekunde ist die **Frequenz** in  $\text{Hz} = 1/\text{s}$ .

# Sinoidalschwingung

- Grundbaustein akustischer Signale
- Sinus- oder Cosinusschwingung aus denen sich komplexere Schwingungen zusammensetzen.
- darstellbar über den Einheitskreis: Ein Punkt bewegt sich auf einer Kreisbahn. Die Höhe über der horizontalen Mittellinie wird gemessen, und als Funktion der Zeit abgebildet.
- **Frequenz (Hz)**: Angabe, wie oft der Punkt pro Sekunde die Kreisbahn umläuft.



(Pompino-Marschall, Abb. 42)

## Sinusschwingung als Kreisschwingung

Allgemein:  $\sin(\alpha) = \text{Gegenkathete}/\text{Hypotenuse}$

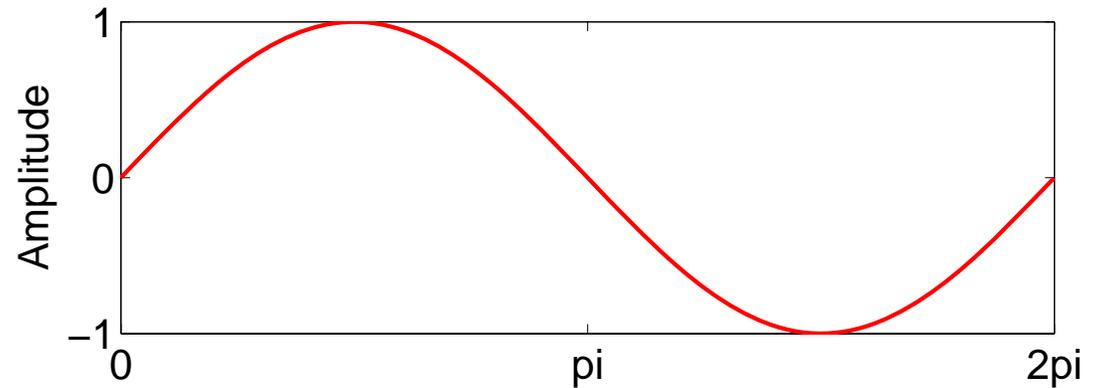
Hier, Einheitskreis:  $\text{Hypotenuse} = 1$

====>  $\sin(\alpha) = \text{Gegenkathete}$

(Winkel in Bogenmaß:  $2\pi = 360^\circ$ )

## Oben:

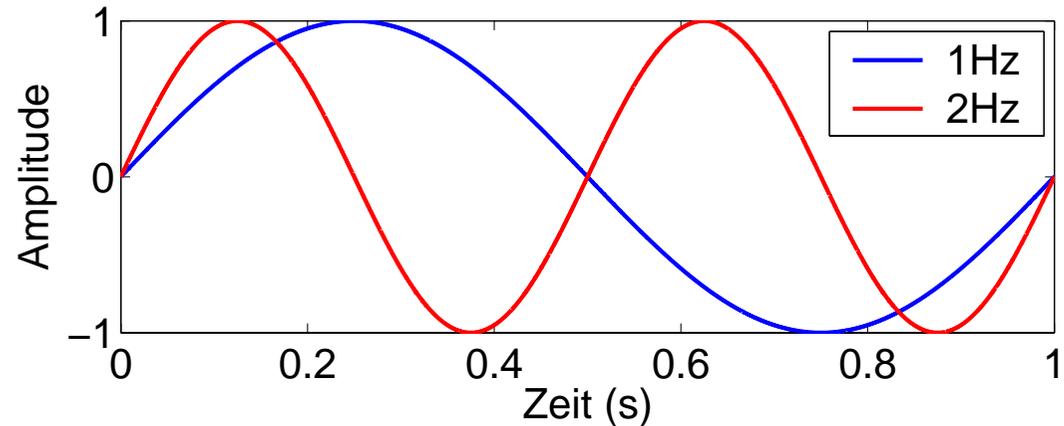
Ein Umlaufen des Kreises von 0 bis  $2\pi$  entspricht einer **Periode**.



## Unten:

Die **Frequenz** gibt an, wie oft der Einheitskreis in einer Sekunde umlaufen wird, wieviele Perioden also in eine Sekunde passen.

Bei der Frequenz 1 Hz ist das genau einmal der Fall, bei 2 Hz zweimal, usf.



- Messung der Amplitude  $y(t)$  einer Sinusschwingung zum Zeitpunkt  $t$ :

$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi f t + \varphi)$$

wobei

- $A$ : Maximalamplitude (Radius des Kreises)
- $\pi$ : Kreiszahl 3.1416
- $f$ : Frequenz
- $t$ : Zeit
- $\varphi$ : Phase, horizontale Verschiebung der Schwingung

- $2\pi f$  wird auch als Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  bezeichnet. Sie gibt an, wie oft pro Sekunde die Kreisbahn umlaufen wird. Multipliziert mit der Zeit ergibt sich die jeweils zugehörige Position auf der Kreisbahn.
- Sinus- und Cosinus-Schwingung sind gegeneinander um  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ) phasenverschoben. Eine Cosinusschwingung weist zum Zeitpunkt 0 einen **Schwingungsbauch (Extremwert)** auf. Bei einer Sinusschwingung befindet sich beim Zeitpunkt 0 ein **Schwingungsknoten (Nulldurchgang)**, vorausgesetzt  $\varphi = 0$ .

# Schalldruck

- lokale Schwankung des Luftdrucks, Amplitude des Zeitsignals
- Einheit: **Pascal** (Pa) = Kraft/Fläche ( $\text{N/m}^2$ )
- Der Schalldruck ist gegenüber dem atmosphärischen Luftdruck ( $10^5$  Pa) sehr gering:
  - Hörschwelle:  $10^{-5}$  Pa
  - Schmerzgrenze: 10 Pa

(Hörschwelle und Schmerzgrenze sind frequenzabhängig. Mehr dazu in den Kursteilen zur Psychoakustik und Perzeption.)

- Die Spanne zwischen Hörschwelle und Schmerzgrenze ist sehr groß.

Daher wird zur Angabe des Schalldrucks i.d.R. statt der linearen Pascal-Skala die "gestauchte" logarithmische **Dezibel-Skala (dB)** verwendet.

Man spricht nun vom **Schalldruckpegel  $L$** .

Hierbei wird der Schalldruck  $P$  stets im Verhältnis zu einem festgelegten **Referenzschalldruck  $P_0$**  angegeben:

$$L \text{ [dB]} = 20 \log (P/P_0),$$

wobei  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa (knapp unterhalb der Hörschwelle bei 1000 Hz)

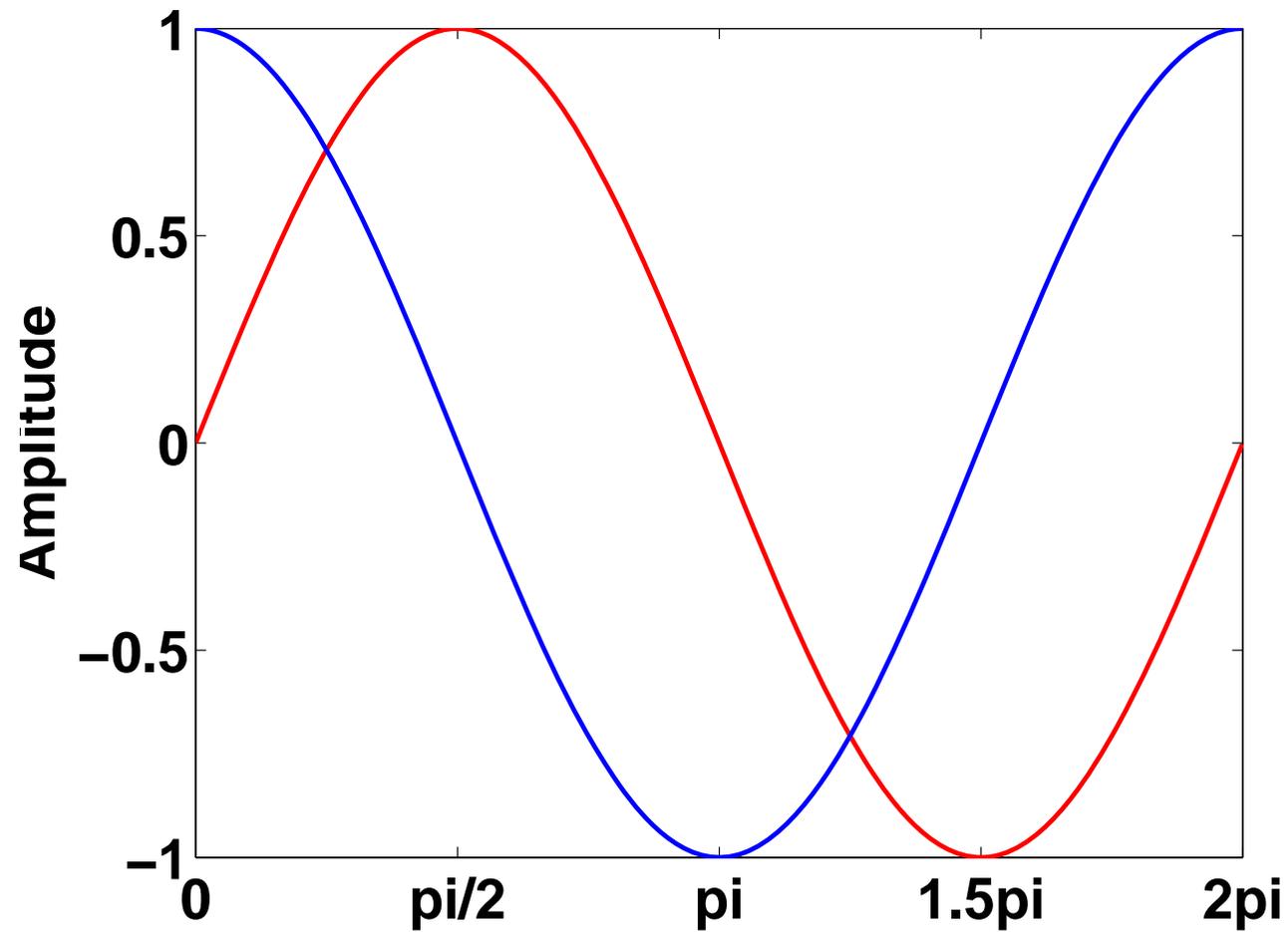
- Allgemeiner formuliert: die Berechnung des Verhältnisses zweier beliebiger Schalldrücke  $P_1$  und  $P_2$  erfolgt mittels folgenden Ausdrucks:

$$20 \log (P_2 / P_1) \text{ [dB]}$$

- +20 dB entspricht einer Verzehnfachung des Schalldrucks
- +6 dB entspricht in etwa einer Verdopplung
- Beispiel:  $P_1=1000 \text{ Pa}$ ,  $P_2=10000 \text{ Pa}$ , d.h.  $P_2$  ist 10x höher als  $P_1$   
Schallpegelverhältnis =  $20 \log (10000/1000) = 20 \log (10) = 20$

# Schallschnelle

- Geschwindigkeit der schwingenden Teilchen
- maximal an Schwingungsknoten, gleich 0 an Schwingungsbäuchen (dort Richtungswechsel)
- Der Schallschnelleverlauf ist also gegenüber dem Schalldruckverlauf um  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ) phasenverschoben.
- nicht gleichzusetzen mit der **Schallgeschwindigkeit**, also der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwingung in Form einer Longitudinalwelle!



Schalldruck- (rot) und Schallschnelleverlauf (blau) einer periodischen Schwingung

# Schallarten

- **Reine Töne**: einzelne Sinoidalschwingungen
- **Klänge**: aus Sinoidalschwingungen zusammengesetzte Schwingungen.

Die tiefste Schwingung wird als **Grundton** bezeichnet und ihre Frequenz als **Grundfrequenz ( $f_0$ )**.

Die Frequenzen der enthaltenen Schwingungen stehen im ganzzahligen Verhältnis zur Grundfrequenz (**Obertöne** oder **Harmonische**).

Der Grundton muss nicht notwendigerweise im Signal enthalten sein.

Allgemeiner formuliert ist die Grundfrequenz der größte gemeinsame Teiler der im Klang enthaltenen Frequenzen.

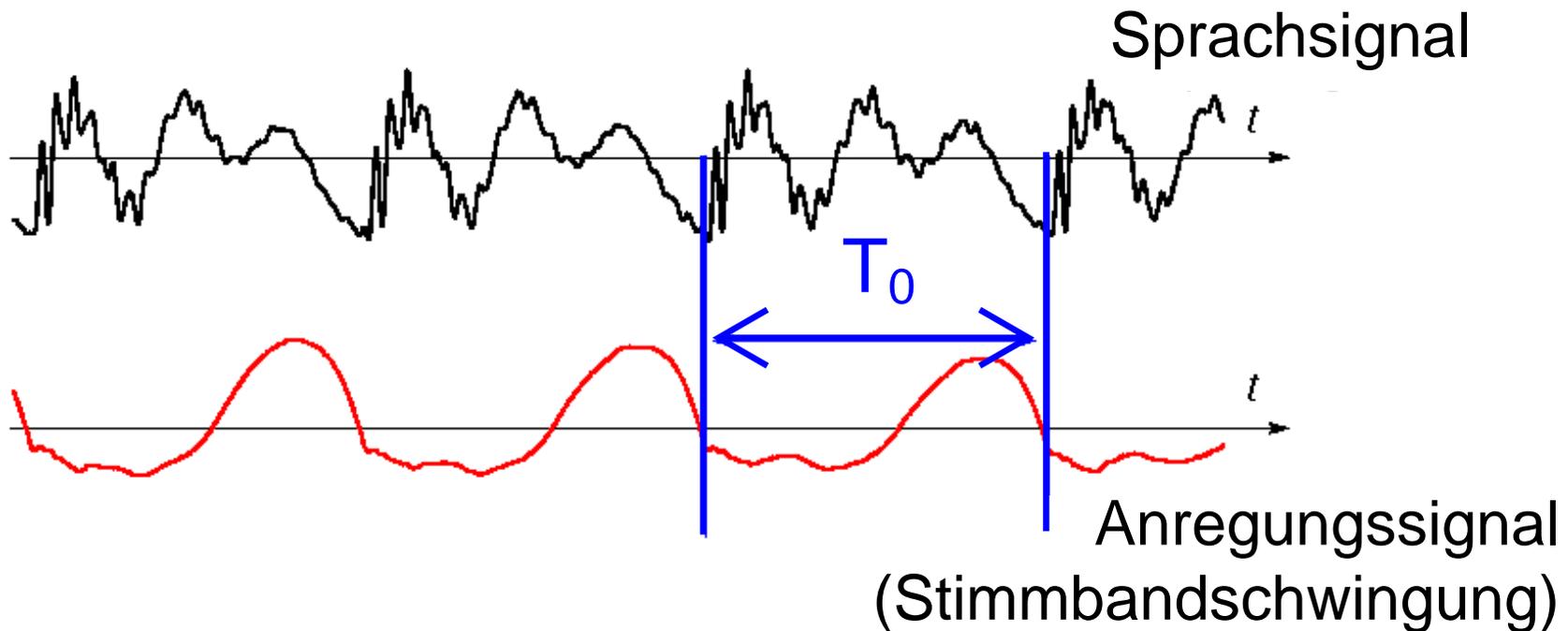
- Geräusche: zusammengesetzte Schwingung, deren Sinoidalkomponenten unendlich nah beieinander liegen.
  
- Bezug zu Sprachlauten:
  - Klänge  $\approx$  Vokale
  - Geräusche = stimmlose Konsonanten
  - Klang-Geräusche = stimmhafte Konsonanten

# Periodizität

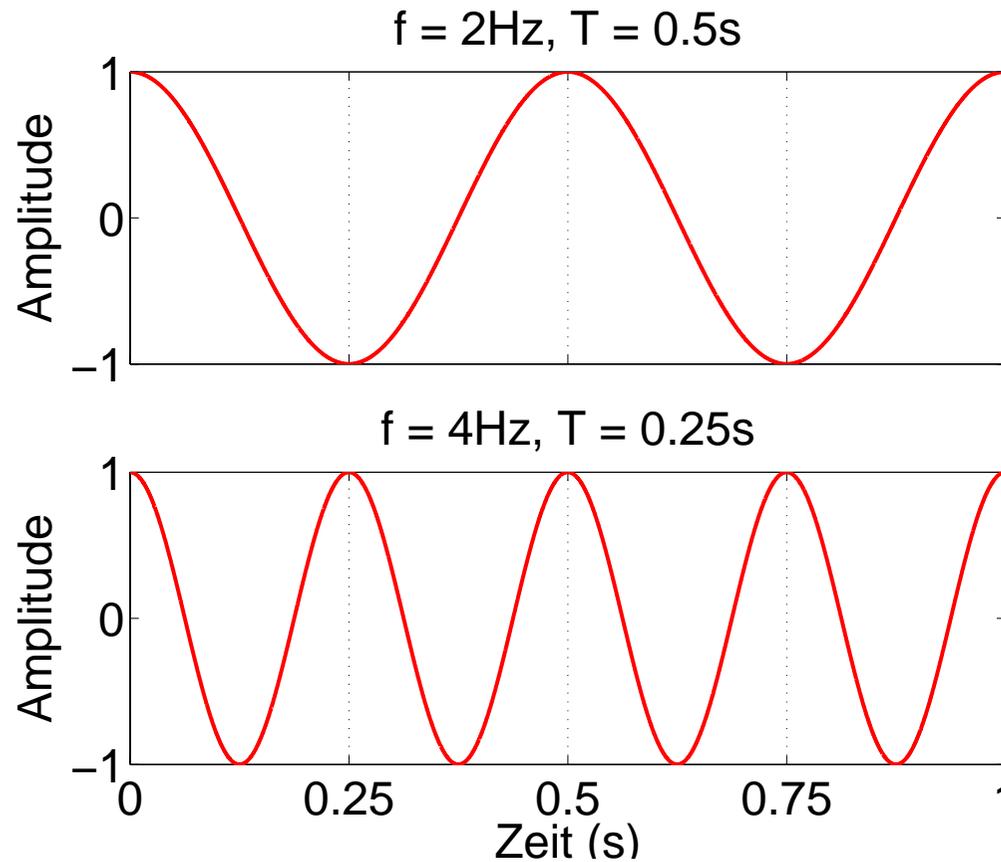
- **periodische Schwingung**: Zeitintervall eines Schwingungsdurchgangs (**Periodendauer  $T$** ) ist konstant.
- Reine Töne und Klänge im engeren Sinn sind periodische Signale
- Zusammenhang zwischen **Harmonizität** der Obertöne und **Periodizität** des Zeitsignals
- Bezug zur Lautsprache:  
Vokale und stimmhafte Konsonanten weisen eine annähernde Periodizität auf.  
Ihre Signale sind **quasi-periodisch**.  
Dies ist auf das quasi-periodische Schwingungsverhalten der Stimmlippen zurückzuführen

- Die Grundfrequenz eines Signals ist gleich der Frequenz der Stimmlippenschwingung (also der Anzahl der Stimmlippenschwingungen pro Sekunde).
- **Anmerkung:** die Schwingung der Stimmlippen ist **nicht unmittelbar** für die akustische Schwingung verantwortlich (vs. Stimmgabel), sondern die durch den glottalen Verschluss bewirkte **impulsartige Störung des Luftdrucks**.

- Das Schließen der Stimmlippen (senkrechte blaue Linien) evoziert die **Führungsamplitude** und markiert den Beginn eines Schwingungszyklusses (einer Periode).



- In einem periodischen Zeitsignal lässt sich die Grundfrequenz anhand des Abstands zwischen zwei Führungsamplituden mittels der Gleichung  $f = 1 / T$  berechnen ( $T$  steht für Periodendauer).

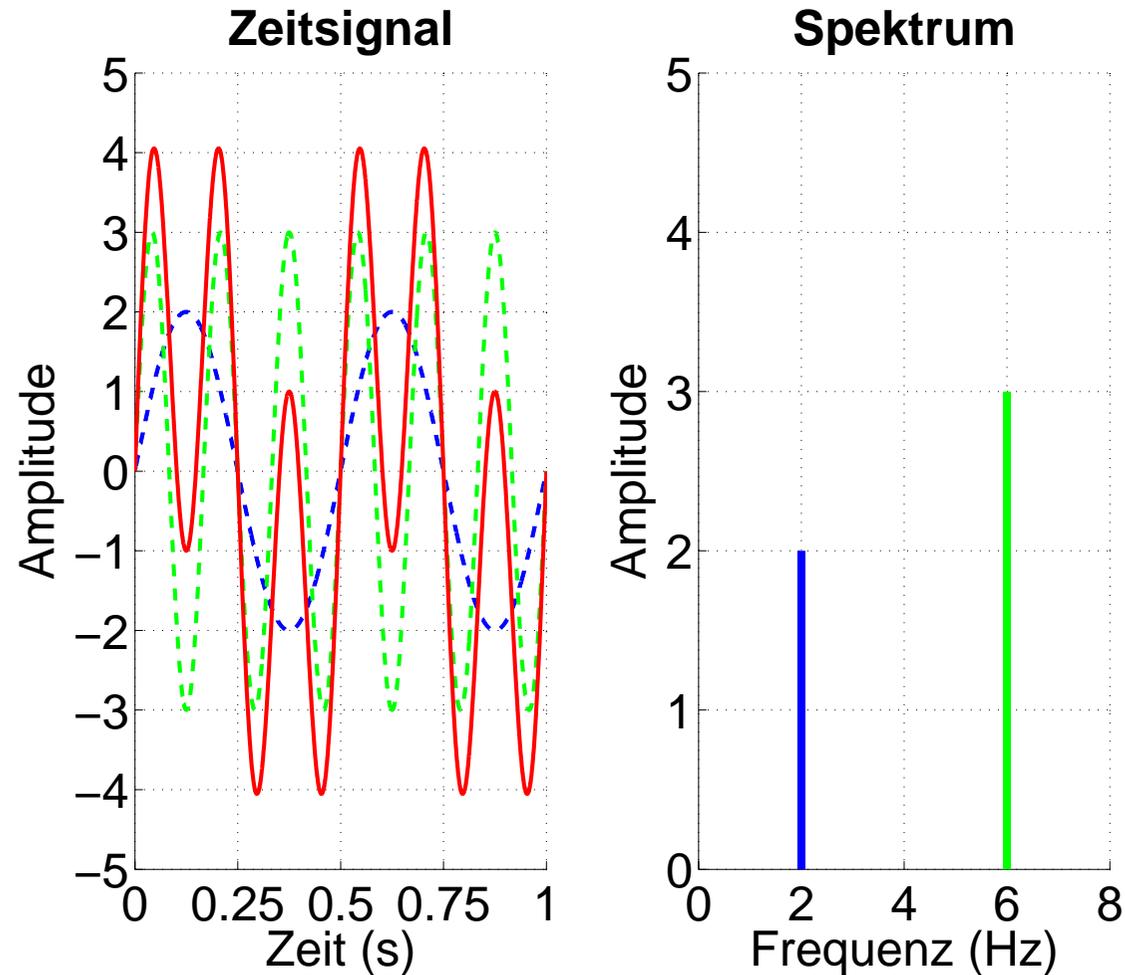


# Zeitliche vs. spektrale Darstellung

- **Zeitsignal**: Änderung des Schalldrucks über die Zeit in einem festen Raumpunkt
  - unabhängige Variable: Zeit
  - abhängige Variable: Amplitude (Schalldruck)
- **Spektrum**: Schalldruck in einem festen Zeitfenster in Abhängigkeit der Frequenz.  
Im Spektrum sind also Raum und Zeit eingefroren.
  - unabhängige Variable: Frequenz
  - abhängige Variable: Amplitude

- **Spektrogramm**: zeitabhängiges Spektrum (z.B. Sonagramm, Wasserfall-Diagramm)
  - unabhängige Variable: Zeit
  - abhängige Variablen: Frequenz, Amplitude

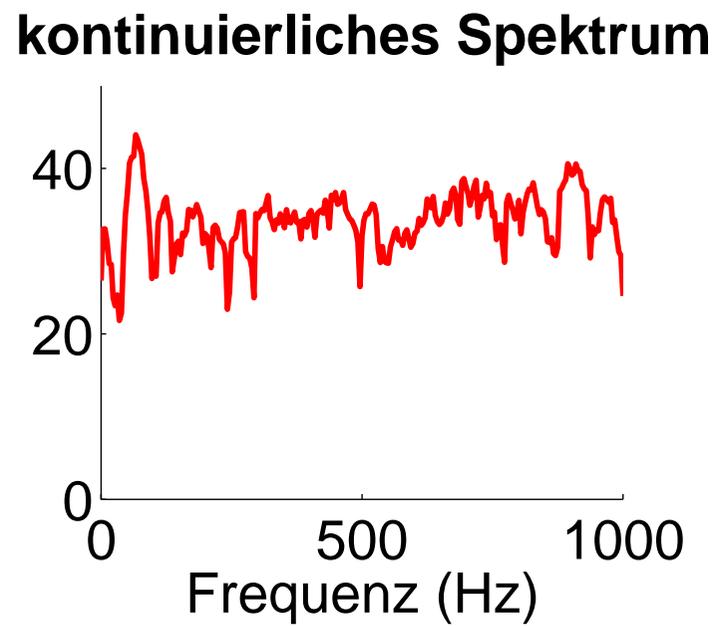
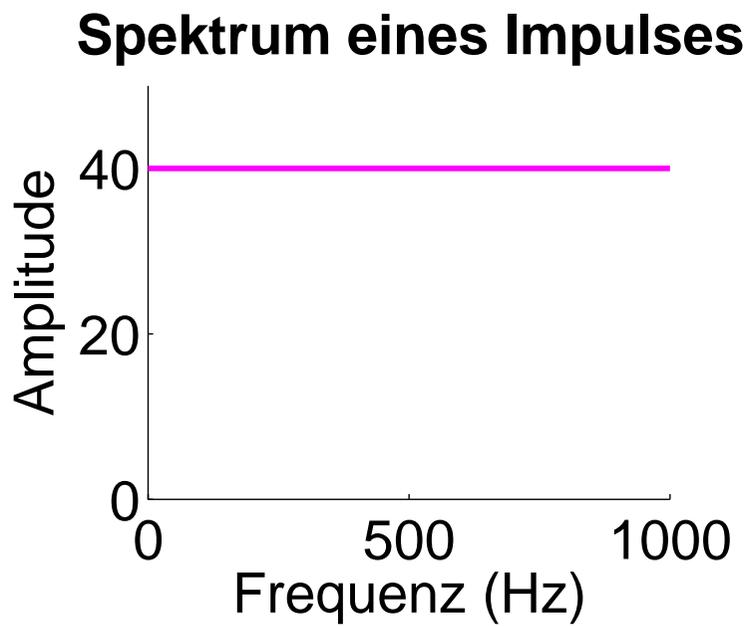
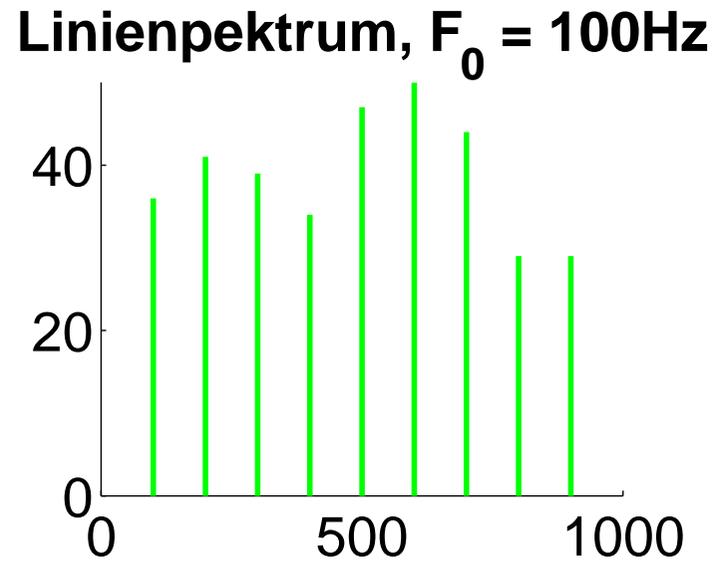
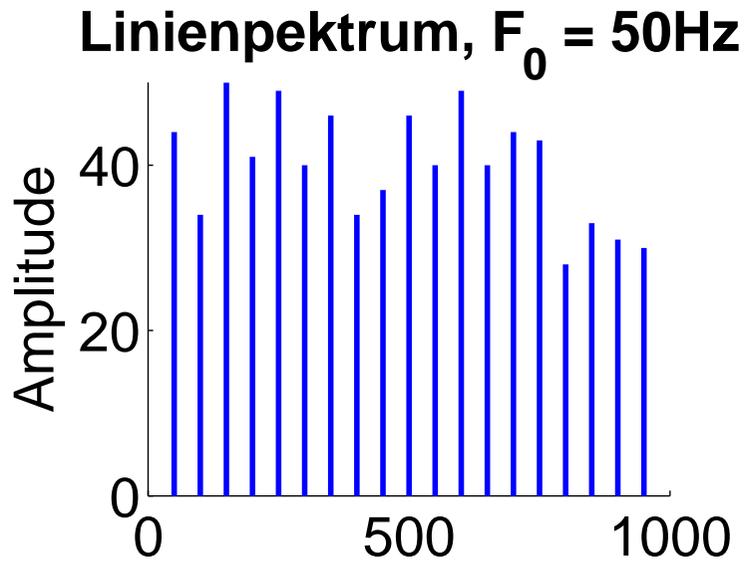
Hier haben wir streng genommen nur das Amplituden-Spektrum definiert. Es gibt aber auch das Phasen-Spektrum. Bei der Fourieranalyse (s.u.) wird nicht nur die Amplitude sondern auch die Phase als Funktion der Frequenz ermittelt.



Zeitsignal und Spektrum einer komplexen Schwingung (**rot**), als Ergebnis der Addition von zwei Sinoidalschwingungen (**blau**, **grün**). Die Grundfrequenz ist gleich der Frequenz der tiefsten Komponente (genauer: gleich dem GGT der Komponenten).

# Typen von Spektren

- **Linienpektren:** für periodische Zeitsignale (z.B. Vokale)
  - je tiefer  $f_0$ , desto enger liegen die Linien beieinander.
- **Kontinuierliche Spektren:** für Impulse  
z.B. Verschlusslösungen. Merkhilfe:  
Impuls einmalig  $\implies$  Periodendauer unendlich  $\implies f_0=0$   
 $\implies$  Spektrallinien unendlich nah beieinander
- **Mittlere kontinuierliche Spektren:** für Rauschen (z.B. Frikative)
  - frequenzabhängige Amplituden ändern sich statistisch über die Zeit
  - nötig: Mittelung der Amplitudenwerte für die jeweiligen Frequenzen über einen größeren Zeitraum ( $> 5$  ms)
  - **weißes Rauschen:** gleiche Amplituden über den kompletten Frequenzbereich



# Vom Zeit- zum Spektralbereich: Fourier-Analyse

## Ergebnis der Analyse

- Zerlegung eines beliebigen periodischen Signals in einem festen Zeitfenster in eine **Summe von Sinoidalschwingungen**
- Ermittlung der Amplituden (und Phasen) der einzelnen Sinoidalschwingungen ==> **Ermittlung des Amplituden- (und Phasen)spektrums eines Zeitsignals**

## Grundidee: **Korrelation**

Je größer die Amplitude einer Sinoidalschwingung relativ zu den anderen, desto stärker prägt sie das Aussehen der komplexen Schwingung, desto stärker ähnelt also die komplexe Schwingung der Sinoidalschwingung.