




Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion




Wellen

Experimentalphysik
Ulrich Stein




Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion




Schwingung oder Welle ?

Schwingung	Welle
lokale Erregung: - um Ruhelage, z.B. Federpendel,	Ausbreitungs-Phänomen: - Ausgangspunkt, z .B. Radiosender
Form: oft periodisch, sinus-förmig	- Transport von Information über räumliche Distanz - Empfänger z.B. Radiogerät




Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion




1-dim. Wellenausbreitung

Ausbreitung entlang einer Linie

1. **Erregung** der Welle am Ausgangspunkt
z.B. Musik-Ton, Lampe Versuch: Wellenmaschine
2. **Kopplung**
mit Umgebung,
z.B. Federn
3. **Ausbreitung** der lokalen Störung im Raum

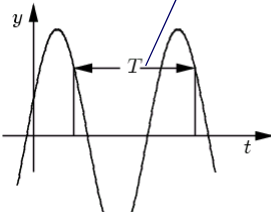


Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

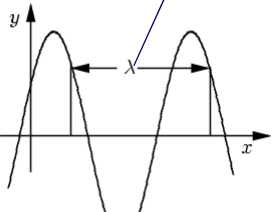


Wellenlänge

Periodizität in Zeit und Raum




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



$$\lambda := \frac{2\pi}{k}$$

Periodendauer T / Kreisfrequenz ω
Wellenlänge λ / Wellenzahl k



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Phasengeschwindigkeit

Weg = λ in Zeit = T

$$c := \frac{\lambda}{T} \quad : \text{Phasengeschwindigkeit}$$

Umformungen:

$$\boxed{c = \lambda f} = \frac{\omega}{k}$$

c wird durch die Art der **Kopplung** bestimmt,
bei Licht hängt sie z.B. vom Medium ab.



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion


Harmonische Welle

Auslenkung u :

$$\boxed{u(x,t) = u_0 \sin(\omega t - kx + \phi_0)}$$

Amplitude Kreisfrequenz Ausbreitungs-Richtung Wellenzahl Null-Phase

[Simulation: PSP Wellen 6](#)



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Wellenausbreitung im Raum

2- oder 3-dimensionale Ausbreitung


1-dim.: Gummiseil Versuch: Gummiseil

2-dim.: Gummimembran

Art der Anregung :

- [Kreiswellen](#)
- [Ebene Wellen](#)

Versuch: Wellenwanne



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion


Wellenausbreitung im Raum (2)

3-dim.: noch komplexer

Wellenfläche / Wellenfront:
identische Phasenwinkel zu einer Zeit t
(z.B. Kamm einer Wasserwelle)

Art der Anregung :

- **Kugelwellen**
- **Zylinderwellen**
- **Ebene Wellen**



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Ebene Wellen im Raum


Auslenkung u :

$$u(\mathbf{r}, t) = u_0 \sin(\omega t - \mathbf{k}^* \mathbf{r} + \phi_0)$$

konstante Amplitude

Wellenvektor \mathbf{k}
definiert die
Ausbreitungsrichtung

Wellenzahl $k = |\mathbf{k}|$



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Kreis- und Zylinderwellen


Auslenkung u :

$$u(\mathbf{r}, t) = u_0 \sin(\omega t - k d + \phi_0)$$

Amplitude abhängig von Abstand d :

$$u_0 = u_0(d) \sim 1/\sqrt{d}$$

mit: $d = |\mathbf{r}|$ (Abstand vom Zentrum)



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Kugelwellen

Auslenkung u :


$$u(r, t) = u_0 \sin(\omega t - k d + \phi_0)$$

Amplitude abhängig von Abstand d :

$$u_0 = u_0(d) \sim 1/d$$

d.h. noch stärkerer Abfall
als bei der Zylinderwelle

→ Energie-Erhaltung
größerer Umfang




Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Wellentypen

Schwingungsrichtung
relativ zur Ausbreitungsrichtung:

- **Longitudinal-Wellen:**
z.B. Schall in Luft
- **Transversal-Wellen:**
z.B. Wasser, Licht
→ polarisierte Wellen, siehe Wellenoptik

[PSP-Wellen](#)



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Signalausbreitung

Welches physikalische Gesetz ?

Mechanik: Newton'sche Gleichungen


Wellenausbreitung: **Wellengleichung**

partielle DGL in Ort und Zeit für Auslenkung u

1. Freie Wellengleichung:

Kopplungskonstante κ

Phasengeschw. $c = \sqrt{\kappa}$

$$\partial^2 u / \partial t^2 = \kappa \partial^2 u / \partial x^2$$


Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Lösungen der freien Wellengl.

a) Harmonische Welle


sinus-förmige Welle,
dann wenn **Randbedingungen** passen

$$\partial^2 u / \partial t^2 = \kappa \partial^2 u / \partial x^2$$

Versuch: Wellenmaschine

$$u(x, t) = u_0 \sin(\omega t \pm kx + \phi_0)$$

Phasengeschw.: $c = \sqrt{\kappa} = \omega / k$ (nachrechnen)



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Weitere Lösungen


b) Allgemeine Lösung

$$u(x,t) = f_1(c t - x) + f_2(c t + x)$$

f_1 und f_2 beliebige Funktionen (**Wellenpakete**)

Versuch: Wellenmaschine

Interferenz beim Zusammentreffen



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Signalausbreitung (2)

2. Wellenausbreitung in Materie

Experiment: Wellenpakete „zerfließen“
werden flacher, größeres Raumgebiet

Ursache: Phasengeschwindigkeit (Kopplung) ist
von der Wellenlänge abhängig

→ **Dispersion** (z.B. Regenbogen, Prisma)

Mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit des Pakets:

Gruppengeschwindigkeit: $c_G := \frac{d\omega}{dk}$



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Wellenphänomene


1. Reflexion

Verhalten an Trennflächen [Versuch: Tazzelwurm](#)
weitere Phänomene: Spiegel, Gummiseil, ...

Reflexion am **festen Ende**: Phasensprung um π
[Simulation: festes Ende](#)

Reflexion am **losen Ende**: kein Phasensprung
[Simulation: loses Ende](#)

Reflexion am Spiegel



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Maschinenbau und Produktion

Wellenphänomene

2. Brechung

Durchgang durch Trennflächen
Inhomogenität in Seil: [Simulation: Inhomogenität](#)
Teil wird reflektiert, Teil läuft weiter

Wasser: Brechung bei Änderung der **Wassertiefe**

Brechung von Licht
an der Trennfläche Luft/Wasser
→ Geometrische Optik
→ danach erst weitere Phänomene:
Interferenz, stehende Wellen, Akustik, ...