

MECHANIK OHNE FERNWIRKUNG

-

mit Impuls und Impulsströmen



Holger Hauptmann
Europa-Gymnasium, Wörth am Rhein
holger.hauptmann@gmx.de

1

Impuls als Grundgröße der Mechanik

Der Impuls beschreibt die Bewegung von Körpern.

Impuls: Bewegungsmenge der Dynamik
(im Sinne der historischen „quantitas motus“)

Ein bewegter Körper enthält Impuls.
Bewegt er sich nicht, so enthält er keinen Impuls.

⇒ Mechanik ist der Teil der Physik, in dem es um
den Impuls geht.

Eigenschaften: Impuls als Erhaltungsgröße

Der Impuls ist eine extensive/mengenartige Größe.
(sein Wert bezieht sich auf ein Volumen)

Der Impuls ist eine Erhaltungsgröße.

Für den Impuls gilt eine Kontinuitätsgleichung.
Impulsänderungen sind lokal mit Stromdichten beschreibbar.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{\vec{p}} + \operatorname{div} \vec{j}_{\vec{p}} = 0$$



Eigenschaften: Impuls als Erhaltungsgröße

Der Impuls ist eine extensive/mengenartige Größe.
(sein Wert bezieht sich auf ein Volumen)

Der Impuls ist eine Erhaltungsgröße.

Für den Impuls gilt eine Kontinuitätsgleichung.

Gaußscher Satz:

$$\dot{\vec{p}} = \vec{F} \qquad \dot{\vec{p}} = \frac{d}{dt} \int_V \rho_{\vec{p}} dV \qquad \vec{F} = \int_{\vec{A}} \vec{j}_{\vec{p}} d\vec{A}$$

Die Impulsänderung in einem Volumen ist gleich dem Impulsstrom durch die Oberfläche in das Volumen.



Eigenschaften: Impuls als gerichtete Größe

Der Impuls ist eine vektorielle/gerichtete Größe.

	Impuls		elektrische Ladung	
	\vec{p}	Vektor	Q	Skalar
Stromdichte:	$\vec{j}_{\vec{p}}$	Tensor	\vec{j}_Q	Vektor
Stromstärke:	$\vec{F} = \int_{\vec{A}} \vec{j}_{\vec{p}} d\vec{A}$	Vektor	$I = \int_{\vec{A}} \vec{j}_Q d\vec{A}$	Skalar

Im Vergleich mit Elektrizitätslehre: mathematisch analog (aber komplexer)



Eigenschaften: Impuls als gerichtete Größe

Der Impuls ist eine vektorielle/gerichtete Größe.

Bei gegebenem kartesischen Koordinatensystem:

- 3 Impulskomponenten p_x, p_y, p_z einzeln erhalten
- Man kann mit drei 3 skalaren Impulskomponenten operieren



Mechanische Wechselwirkung und Impuls

3. Newtonsches Gesetz (actio = reactio) beschreibt Wechselwirkung: $F_A = -F_B$

Mit 2. Gesetz (Aktionsprinzip, $F = dp/dt$) folgt:
Wechselwirkung = Impulsaustausch

Der Impuls des einen Körpers nimmt um denselben Wert ab, wie der Impuls des anderen Körpers zunimmt.



Kraft und Impulsstrom

Die Sprache der Mechanik ist noch heute die von Newton eingeführte.

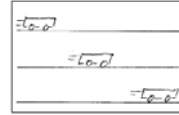
Newton: Die Bewegung eines Körpers ändert sich, wenn eine Kraft auf ihn wirkt.

Planck 1908: Kraft = Impulsstrom

Der Impuls eines Körpers ändert sich, wenn ein Impulsstrom in ihn hineinfließt oder aus ihm heraus.



Kraft- und Impulssprache



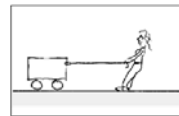
Trägheitssatz (1. Newtonsches Gesetz)

Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung, sofern er nicht durch einwirkende Kräfte zur Änderung seines Zustands gezwungen wird.



Der Impuls eines Körpers bleibt gleich, wenn Impuls weder zufließt noch abfließt.

Kraft- und Impulssprache



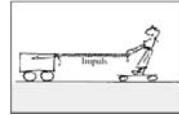
Aktionsprinzip (2. Newtonsches Gesetz)

Die Änderung der Bewegung einer Masse ist proportional zur einwirkenden Kraft und erfolgt in Richtung dieser Kraft: $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$



Fließt der Impulsstrom \vec{F} in einen Körper, so nimmt der Impuls des Körpers entsprechend dem Impulsstrom \vec{F} zu: $\Delta\vec{p} = \int \vec{F} dt$

Kraft- und Impulssprache



actio = reactio (3. Newtonsches Gesetz)

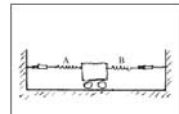
Kräfte treten immer paarweise auf. Übt ein Körper A auf einen anderen Körper B eine Kraft aus (actio), so wirkt eine gleich große, aber entgegengerichtete Kraft von Körper B auf Körper A (reactio).



Strömt Impuls aus einem Körper A in einen Körper B , so ist der aus Körper A heraus fließende Impulsstrom genau so groß, wie der in Körper B hinein fließende Impulsstrom.



Kraft- und Impulssprache



Kräftegleichgewicht

Wirken auf einen Körper zwei gleich große, entgegengerichtete Kräfte, so befindet er sich im Kräftegleichgewicht und bleibt in Ruhe.



Der Impuls eines Körpers bleibt gleich, wenn genau so viel Impuls in einen Körper hineinfließt, wie auch gleichzeitig wieder aus dem Körper heraus fließt.



Einführung des Impulses

Ziel: Anschauung vom Impuls als nicht abgeleitete Grundgröße.

p wird nicht definiert über $m \cdot v$

z. B. im elektromagnetischen Feld ist $p \neq m \cdot v$

Elektrische Ladung wird nicht über $Q = C \cdot U$ eingeführt.

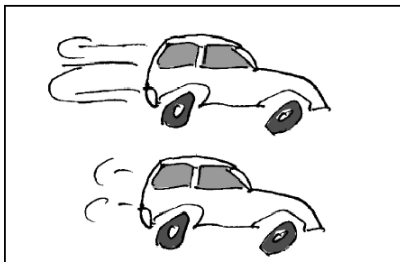
Ein bewegter Körper enthält Impuls.

Bewegt er sich nicht, so enthält er keinen Impuls.

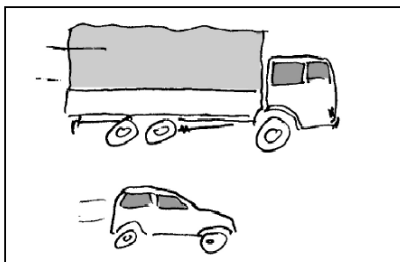
(umgangssprachlich: Impuls = Wucht/Schwung)



Einführung des Impulses



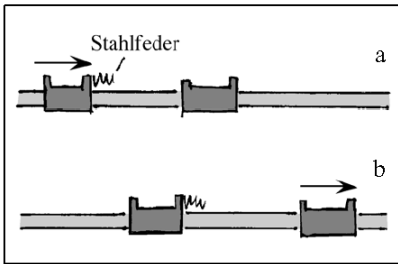
Ein Körper enthält umso mehr Impuls, je höher seine Geschwindigkeit ist.



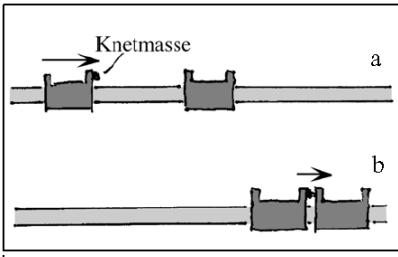
Ein Körper enthält umso mehr Impuls, je größer seine Masse ist.



Einführung des Impulses



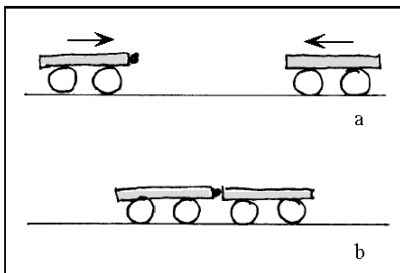
Impuls kann von einem auf einen anderen Körper übergehen.



Impuls kann sich auf mehrere Körper verteilen.

Bei Reibung fließt Impuls so, dass sich die Geschwindigkeiten angleichen.

Einführung des Impulses



Entgegengesetzte Bewegung:
Der Impuls kompensiert sich.

Der Impuls ist eine gerichtete Größe.

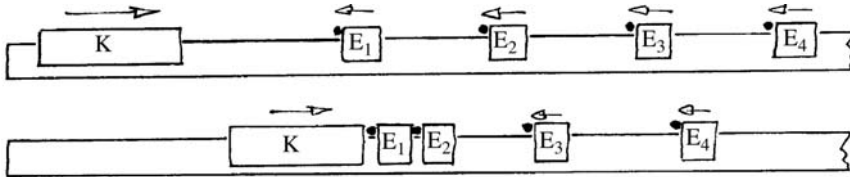
Bei Betrachtung einer Impulsrichtung/Impulskomponente:
Der Impuls kann positive und negative Werte annehmen.

Vereinbarung im Anfängerunterricht:

Der Impuls eines Körpers ist positiv, wenn sich der Körper nach rechts bewegt, und negativ, wenn sich der Körper nach links bewegt.

Messung des Impulses

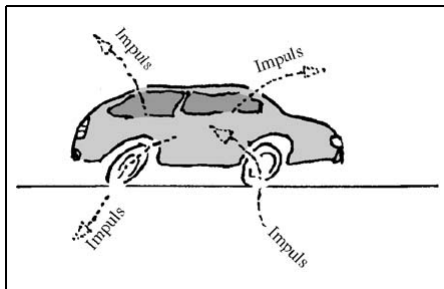
möglich ohne $p = m \cdot v$



Jedes E_i trägt *eine Einheit* Impuls

Konsequenz: Die (träge) Masse wird definiert über $m_{tr} = p / v$

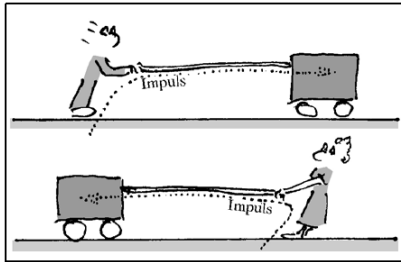
Fließgleichgewicht



Fließgleichgewicht:

Der Wegstrom stellt sich so ein, dass er gleich dem Zustrom ist.

Druck-, Zug- und Biegespannung



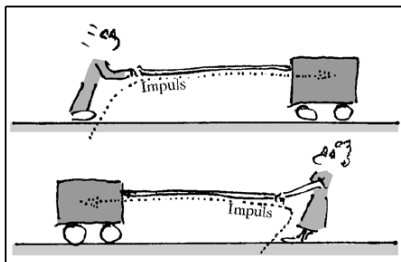
Der Wagen erhält jeweils Impuls nach rechts.

In der Verbindungsstange:
oben Druckspannung
unten Zugspannung

Druckspannung:

Impuls strömt in die Richtung des transportierten Impulses
(Kennzeichen: elastische Körper werden verkürzt)

Druck-, Zug- und Biegespannung



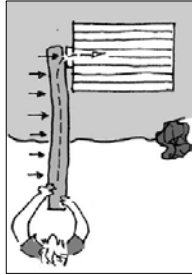
Der Wagen erhält jeweils Impuls nach rechts.

In der Verbindungsstange:
oben Druckspannung
unten Zugspannung

Zugspannung:

Impuls strömt entgegen der Richtung des transportierten Impulses
(Kennzeichen: elastische Körper werden verlängert)

Druck-, Zug- und Biegespannung



Biegespannung:

Impuls strömt quer zur Richtung des transportierten Impulses
(Kennzeichen: elastische Körper werden verbogen)

Impulsströme/Kräfte in Seilen

In Seilen:

- keine Biegespannungen
- keine Druckspannungen
- nur Zugspannungen

Konsequenz: Durch ein Seil kann nur Impuls strömen, der die gleiche Richtung hat wie das Seil.

Impulsströme und ihre Richtung

I. Die Richtung der Impulsstromstärke/Kraft F

Wegen $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ gilt für die Richtung von F :

- identisch zur Richtung der Impulsänderung
- entspricht der Richtung des in den Körper rein fließenden Impulses

II. Stromrichtung

Stromdichte ist Tensor \Rightarrow keine Anschauung für Richtung des Stroms.
Stromrichtung nur für ausgewählte Impulskomponente sinnvoll
(\Rightarrow 3 Stromrichtungen für 3 Impulskomponenten)



Worauf bezieht sich die Größe F ?

$$\vec{F} = \int_A \vec{j}_p d\vec{A}$$

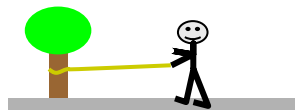
Der Wert der Impulsstromstärke/Kraft bezieht sich auf eine Fläche.
Was ist mit: „Eine Kraft ist bestimmt durch Betrag, Richtung
und Angriffspunkt.“ ????

Konsequenz: Richtung von F abhängig von Orientierung der Fläche.

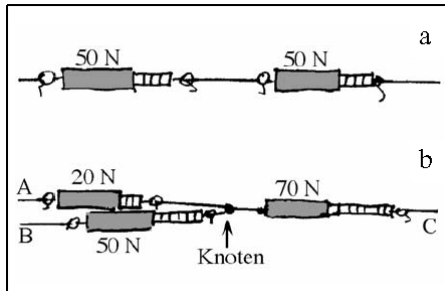
Beispiel: actio = reactio, Impulsaustausch zwischen Körpern

$\vec{F}_A = -\vec{F}_B$ weil Orientierung der Fläche davon abhängt,
welcher Körper betrachtet wird.

Beispiel: Richtung der Kraft im Seil



Knotenregel für den Impuls

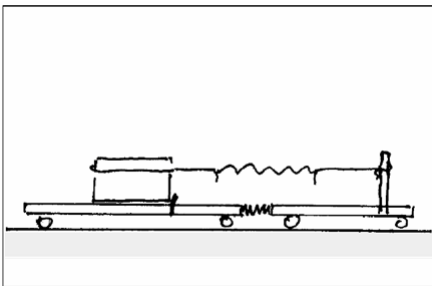


Knotenregel:

Die zu einem Knoten hinfließenden Ströme sind zusammen genauso stark wie die wegfließenden.

- gilt für jede einzelne Impulskomponente.
- gilt für die Summe aller Impulskomponenten, also auch vektoriell.

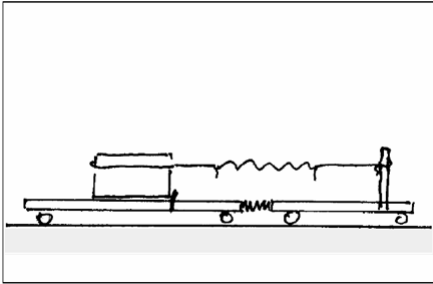
Impulsstromkreise / Statik



Impuls kann in einem geschlossenen Stromkreis fließen.

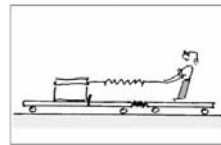
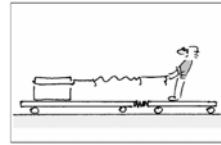
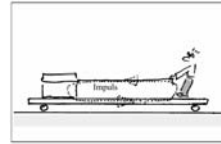
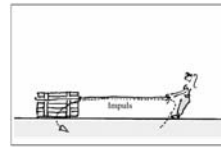
Der Impuls nimmt dann an keiner Stelle zu oder ab.

Impulsstromkreise / Statik

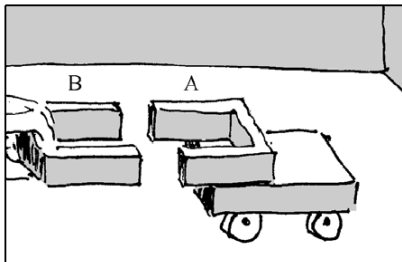


Die Teile des Impulsstromkreises stehen unter Zug-, Druck- oder Biegespannung.

Impuls kann durch Körper fließen, die selbst in Ruhe sind, also Körper mit $p = 0$.



Impulsströme in Feldern

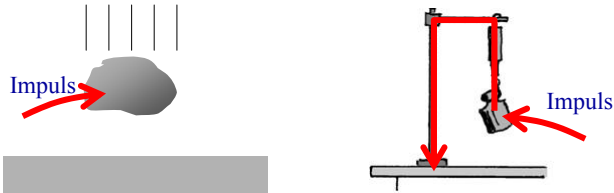


Magnetische Felder leiten den Impuls.

Durch Felder fließt Impuls.

(Impuls kann nicht nur durch Materie fließen.)

Das Schwerfeld - die Erdanziehung



Beobachtung: Die Erde zieht andere Körper an

- Körper fallen beim loslassen
- Körper haben Gewicht

Grund: Körper bekommen von der Erde ständig Impuls

Jeder Körper ist von einem Schwerfeld umgeben. Je größer die Masse des Körpers, desto dichter ist das Feld. Durch das Schwerfeld fließt Impuls von einem Körper zum anderen, z. B. von der Erde in andere Körper (Erdanziehung)

Das Schwerfeld - die Erdanziehung

